

文章编号: 1001 - 893X(2010)05 - 0060 - 04

基于多种调制方式的空时 OFDM 系统多用户检测技术*

齐 萌, 陆彦辉, 穆晓敏

(郑州大学 信息工程学院, 郑州 450001)

摘 要:建立了基于空时分组码的多输入多输出(MIMO) - 正交频分复用(OFDM)系统模型,研究了基于最小均方误差的串行干扰消除(MMSE - SIC)多用户检测算法,通过优化排序迭代结构,使得接收算法具有较好的性能。仿真结果表明,该算法在误码率方面能够取得优于常规线性 MMSE 算法的性能,而且得出星座图中映射点间距也影响着检测算法的性能,随着间距的缩小,误码概率会上升。

关键词:空时编码; MIMO - OFDM; 串行干扰消除; 多用户检测

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001 - 893x.2010.05.013

Multiuser Detection Algorithm for Space-time Coded OFDM Systems Based on a Variety of Modulation

QI Meng, LU Yan-hui, MU Xiao-min

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In this paper, a multiple input multiple output orthogonal frequency division multiplex(MIMO-OFDM) model based on space-time coding is constructed and a successive interference cancellation(SIC) multi-user detection(MUD) algorithm is presented based on minimum mean square error(MMSE) algorithm. Optimizing the sorting structure enables the receiver algorithm to have better performance. The simulation results show that this method can obtain significantly improved bit error rate(BER) over the conventional MMSE MUD algorithm, and the performance of the detection algorithm is influenced by the mapping point spacing in the constellation, with the spacing reduced the BER will rise.

Key words: space-time coding; MIMO-OFDM; SIC; multiuser detection(MUD)

1 引 言

多输入多输出(MIMO)与正交频分复用(OFDM)技术相结合的 MIMO - OFDM 技术被视为下一代高速无线局域网的核心技术^[1]。一方面, MIMO 技术可以在不增加系统带宽的情况下提高频谱效率,成倍地提高系统容量;另一方面, OFDM 解决了 MIMO 对抗频率选择性衰落和符号间干扰的局限性。近年来,以 Alamouti 结构为代表的正交空时分组码

(STBC)通过在发射端采用特殊设计的信道码结合接收端的信号处理获得了高频谱效率的发射分集增益, STBC 与 OFDM 结合的空时 OFDM 系统,由于其结构简单、译码复杂度低且在提高频谱效率的发射分集增益方面具有巨大潜力而受到广泛关注。

目前,针对空时编码的设计和应用已进行了一定的研究,但这些主要是针对单用户系统^[2-3]。在无线通信中,多用户共享有限的频谱资源是不可避免的,因此可靠的多用户检测算法对提高整个系统的性能至关重要。近年来,多用户检测的研究主要

* 收稿日期: 2009 - 12 - 09; 修回日期: 2010 - 03 - 16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60702020)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No. 60702020)

集中在寻求低复杂度和高性能的检测器方面,有许多研究者结合编码、子空间等提出针对 MIMO - OFDM 系统的多用户信号检测技术。文献[4]研究了在 STBC OFDM 系统中基于最小均方误差的接收算法,并显示出较好的检测性能。文献[5]对经典的迫零算法、最小均方误差算法、排序及非排序干扰抵消检测算法进行了分析,得出排序迭代干扰消除接收机与非排序接收相比大大提高了接收机性能,但是计算量有所增加。

本文构建了多用户的 STBC OFDM 系统,并把抑制用户间干扰的基于最小均方误差算法的串行干扰消除检测推广到该系统中,仿真得到多个用户在不同的调制方式下的误码率曲线。

2 系统模型

考虑一个同步的空时分组码 MIMO - OFDM 系统的上行链路,在同一小区同一时隙有 K 个用户,每个用户配备双发射天线,基站接收机有 M 根接收天线,假定接收天线间的距离足够远以保证不同接收天线收到的信号经历相互独立的衰落。每个 OFDM 符号包含 N 个子载波,子载波上空间子信道 H 中的元素是用户在第 n ($n = 1, 2, 3, \dots, N$) 个子载波上不同发射/接收天线之间的信道频率响应。这里假设发射接收天线之间的信道是服从均值为 0、方差为 1 的独立同分布复高斯随机向量。

以第 k 个用户为例,发送信息为二进制比特流,采用 M_0 进制 ($m = \text{lb}M_0$) 的调制方式和 Alamouti 空时分组编码方案,用向量 $\mathbf{X}(n)$ 表示一个 OFDM 符号,经过空时编码器,输出如下所示:

$$\mathbf{X}(n) = \begin{bmatrix} x(2n-1) & x(2n) \\ -x^*(2n) & x^*(2n-1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中的两行分别在时刻 1 和时刻 2 发射,每行的第一个元素从第一根天线发射,第二个元素从第二根天线发射。

数据流 $X_j^k(l, n)$ ($n = 1, 2, 3, \dots, N$) 经 IFFT 变换后由天线 j ($j = 1, 2$) 在第 l 个符号连续时间发出,发射前插入了循环前缀保护间隔,用以消除信道间 (ICI) 干扰。在接收端,接收信号经过串并转换,去掉循环前缀的保护间隔,进行 DFT 解调。当 K 个用户被激活时,接收端第 i ($i = 1, 2, 3, \dots, M$) 个接收天线上接收到的信号可表示为

$$R_i(l, n) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^2 X_j^k(l, n) H_{ij}^k(l, n) + \eta_i(l, n) \quad (2)$$

本系统中设信道在连续两个 OFDM 符号连续时

间内不变化,当考虑两个连续的 OFDM 符号时,式(2)写成矩阵形式:

$$\mathbf{R}[n] = \mathbf{H}[l, n] \mathbf{X}[n] + \boldsymbol{\eta}[n] \quad (3)$$

式(3)中:

$$\mathbf{R}[n] = [R_1(l, n), R_1^*(l, n), R_2(l, n), R_2^*(l, n), \dots, R_M(l, n), R_M^*(l, n)]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{X}[n] = [\mathbf{X}[l, n], \mathbf{X}[l+1, n]] \quad (5)$$

$$\mathbf{X}[l, n] = [X_1^1(l, n), X_2^1(l, n), \dots, X_1^K(l, n), X_2^K(l, n)]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{X}[l+1, n] = [-X_2^{1*}(l, n), X_1^1(l, n), \dots, -X_2^{K*}(l, n), X_1^K(l, n)]^T \quad (7)$$

频域信道矩阵:

$$\mathbf{H}[l, n] = \begin{bmatrix} H_{11}^1(l, n) & H_{21}^1(l, n) & \dots & H_{11}^K(l, n) & H_{21}^K(l, n) \\ H_{12}^1(l, n) & H_{22}^1(l, n) & \dots & H_{12}^K(l, n) & H_{22}^K(l, n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ H_{1M}^1(l, n) & H_{2M}^1(l, n) & \dots & H_{1M}^K(l, n) & H_{2M}^K(l, n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1^1(l, n) & H_1^2(l, n) & \dots & H_1^K(l, n) \\ H_2^1(l, n) & H_2^2(l, n) & \dots & H_2^K(l, n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ H_M^1(l, n) & H_M^2(l, n) & \dots & H_M^K(l, n) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(8)其构成:

$$\mathbf{H}_m^k[l, n] = \begin{bmatrix} H_{1m}^k(l, n) & H_{2m}^k(l, n) \\ H_{2m}^{k*}(l, n) & -H_{1m}^{k*}(l, n) \end{bmatrix}$$

$H_{jm}^k[l, n]$ 为用户 k 的发送天线 j 和接收天线 m 之间第 l 个符号持续时间内第 n 个子载波的信道频域响应。

3 空时多用户接收机

由于传统的最优化多用户检测^[6]的复杂度随用户数目的增加呈指数增长,难以付诸于实时应用,因此研究各种具有良好性能和较低复杂度的次优方案^[7-8]具有重要意义。本文在 MMSE 检测算法的基础上,仿真了 MMSE - SIC 算法,通过迭代运算获得每个用户的发射信号。

MMSE 算法^[5]采用线性的估计矩阵 \mathbf{G} 来估计向量 \mathbf{X} ,使得估计向量与原始向量的误差的平方最小,即:

$$\mathbf{G} = \arg \min_w E\{ \|\mathbf{X} - \mathbf{G}\mathbf{r}\|^2 \} \quad (9)$$

可以得到估计矩阵 \mathbf{G} 的表示式为

$$\mathbf{G} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{N_0}{E_b} \mathbf{I}_{Tx}^{* \text{ usernum}})^{-1} \mathbf{H}^H \quad (10)$$

式中, N_0 是噪声方差, E_b 是发送信号能量, $\mathbf{I}_{Tx}^{* \text{ usernum}}$ 是酉矩阵。

采用联合干扰抑制和干扰消除的接收算法,在接收信号中对多个用户逐个进行数据判决,每一级只检测一个用户信号,操作顺序是根据信号信噪比或均方误差(MSE)^[9],信噪比或均方误差大的信号先进行操作,每级输出的是信噪比或均方误差大的用户的数据判决和去除该用户造成的MAI以后的接收信号,这样就可以将多址干扰的影响降到最低,大大增加检测的可靠性。接收端框图如图1所示。

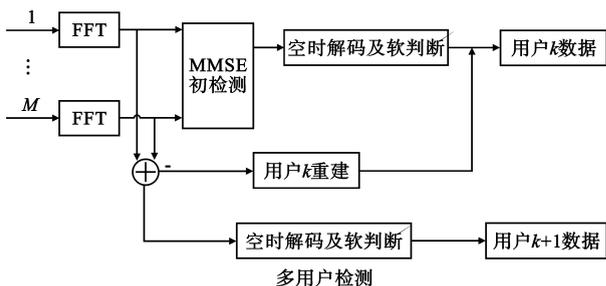


图1 STBC OFDM 系统接收框图

Fig.1 Block diagram of STBC OFDM transceiver

在算法开始时按照估计信号的均方误差的降序来确定估计用户顺序。假设收端已知信道状态信息,在一个发送符号间隔,MMSE-SIC检测算法流程如下:

(1) 初始化

$$l = K$$

(2) 递归

$l = 1, 2, 3, \dots, K^{[j]}$, 计算

$$G^{[l]} = (H^{H[l]} H^{[l]} + \frac{N_0}{E_b} I_{Tx * usernum})^{-1} H^{H[l]}$$

根据 $MSE^{(k)[l]} = \partial_k^2 (1 - H_1^{(k)[l]} G_1^{(k)[l]})$ 得到 $k[l]$
 $= \arg \min \{ MSE^{(k)[l]} \}$, 这里 $MSE^{(k)[l]}$ 表示用户 k 发送信号 $X_1^{(k)}$ 的均方误差, $\partial_k^2 = E\{|X_1^k|^2\}$ 为发送信号能量, $H_1^{(k)}$ 是 $H^{(k)}$ 的第一列。计算判决统计量 $y^{(k)[l]} = G^{(k)[l]} r$, 将 $y^{(k)[l]}$ 量化到星座图中对应欧氏距离最近的星座点, 得到用户 k 发送信号的估计量 $\hat{x}^{(k)[l]}$, 即 $\hat{x}^{(k)[l]} = Q(y^{(k)[l]})$ 。

对第 k 个用户发送信号检测后,从接收信号中通过消除 $\hat{x}^{(k)[l]}$, 得到修正后的接收向量 $r^{[l+1]}$, 即 $r^{[l+1]} = r^{[l]} - H^{(k)[l]} \hat{x}^{(k)[l]}$ 。

(3) 循环结束

基于MMSE-SIC的多用户检测算法采用兼顾抑制干扰与噪声的MMSE准则进行滤波,与采用ZF准则进行滤波的ZF-SIC相比,可以有效地克服噪声增强的问题,提高检测性能。而且,由于采用了优化排序消除干扰,MMSE-SIC能获得比线性的

MMSE检测以及未排序的MMSE-SIC检测更好的性能,在略微增加系统时间复杂度的基础上,使系统检测性能得到了明显改善。

4 仿真实验结果

下面采用计算机仿真来验证算法的可行性。在频率选择性衰落信道下,假定接收端已经得到准确的信道统计信息,定义信噪比为信息比特功率和噪声功率之比。

图2给出了一个基于空时分组码的同步MIMO-OFDM系统,每个移动终端配备两根发射天线,调制方式为QPSK,采用Alamouti的空时分组码方案,OFDM子载波数为512,循环前缀为113。从图2可以看出,MMSE-SIC算法对系统的BER性能有较大改善。例如在用户数为2,接收天线为2时,在BER为 10^{-2} 处相对于MMSE算法有2.5 dB增益,相对于ZF算法有3.5 dB增益。在用户数为2,接收天线为4时,在BER为 10^{-3} 处相对于MMSE算法有4.5 dB增益,相对于ZF算法有6.1 dB增益。双发送天线的4用户系统比2用户系统性能要好,那是因为增加接收天线数,分集增益提高,同时也提高了多用户增益。随着接收天线和用户数的增多,非线性检测MMSE-SIC算法与常规的线性算法之间的BER性能差距进一步增大,说明这种方法更适用于采用多天分集接收的系统。

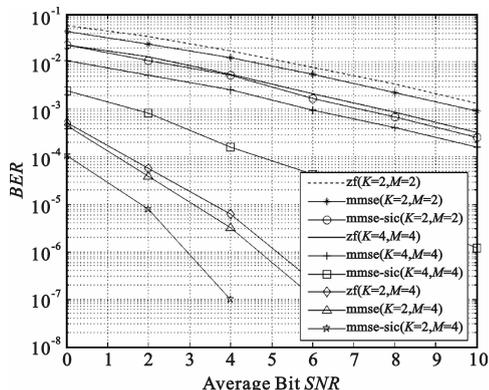


图2 多个用户数检测算法的比较

Fig.2 Performance comparison for different multiuser detection algorithms

图3仿真了3个用户经过MMSE和MMSE-SIC接收机之后每个用户的BER,3个用户分别采用BPSK、QPSK和16QAM调制。从图中可以看出,MMSE-SIC接收时采用BPSK调制的用户比采用QPSK和16QAM调制的用户BER性能要好。随着星座图中

星座点间距的缩小,误码概率会上升。BER 为 10^{-2} 处对于 MMSE 算法,采用 BPSK 调制比采用 QSPK 和 16QAM 调制的用户有 0.8 dB、7.5 dB 增益。对于 MMSE-SIC 算法,采用 BPSK 调制比采用 QSPK 和 16QAM 调制的用户有 0.5 dB、4.3 dB 增益。

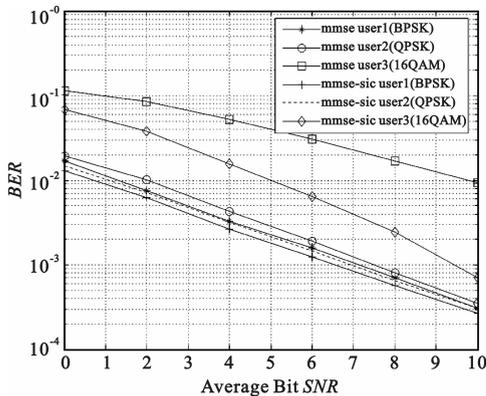


图3 同一用户不同调制方式下检测算法的比较
Fig.3 Comparison of different modulation schemes under the same user detection algorithm

5 结论

MIMO-OFDM 接收机复杂度较高,具体算法实现时,不得不在性能和复杂性之间进行权衡。针对 MIMO-OFDM 多用户检测的特点,采用基于 MMSE 的串行干扰消除多用户检测技术在检测顺序优化的基础上,通过 MMSE 检测与判决反馈结构,在增加系统时间复杂度的基础上,有效地控制了误差传播,使系统整体性能得到提高。在实际应用时通过设定不同的调制方式和检测算法,可以在性能与复杂度之间实现灵活的系统设计。

参考文献:

- [1] Nanda S, Walton R, Ketchum J, et al. A high-performance MIMO-OFDM wireless LAN[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(2): 101-109.
- [2] Huang D F, Letaief B K, Lu J H. A receive space diversity architecture for OFDM systems using orthogonal designs[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(3): 922-1001.
- [3] Lu B, Wang X D. Space-time code design in OFDM systems [C]//IEEE Global Telecommunication Conference. San Francisco, CA: IEEE, 2000: 1000-1004.
- [4] Tran X N Fujino, Karasawa T Y. On performance of multiuser OFDM Systems with transmit diversity[C]// Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology. Rome: IEEE, 2004: 421-424.

- [5] 陈康,陈伟,贺智轶. 分层空时码检测算法的分析与研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(14): 110-113.
CHEN Kang, CHEN Wei, HE Zhi-yi. Research and Analysis on the Detection Algorithms of the Layered Space-time Codes System[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(14): 110-113. (in Chinese)
- [6] Varanasi M K. Multistage direction in asynchronous code-division multiple-access communication[J]. IEEE Transactions on Communication, 1998, 38(4): 1107-1120.
- [7] 李小蓓,王杰令,张永顺. 一种 V-BLAST 系统的高性能联合检测算法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(5): 1387-1389.
LI Xiao-bei, WANG Jie-ling, ZHANG Yong-shun. Joint Detection Algorithm for V-BLAST System with Higher Performance[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(5): 1387-1389. (in Chinese)
- [8] 张晓格,徐澄圻. 联合天线选择的上行 Alamouti MIMO 多用户检测[J]. 应用科学学报, 2008, 3(2): 162-166.
ZHANG Xiao-ge, XU Cheng-qi. Uplink multi-user alamouti MIMO detection with antenna selection[J]. Journal of Applied Sciences, 2008, 3(2): 162-166. (in Chinese)
- [9] Tran X N, Fujino T, Karasawa Y. An MMSE detector for multiuser space-time coded OFDM[J]. IEEE Transactions on Communication, 2005, 7(1): 141-149.

作者简介:

齐萌(1984-),女,河南商丘人,硕士研究生,主要研究方向为 OFDM 系统多用户检测;

QI Meng (female) was born in Shangqiu, Henan Province, in 1984. She is now a graduate student in Zhengzhou University. Her research direction is multi-user detection for OFDM system.

Email: qm_happiness@yahoo.cn

陆彦辉(1972-),女,河南许昌人,郑州大学信息工程学院副教授、硕士生导师,主要研究方向为无线通信系统资源管理;

LU Yan-hui (female) was born in Xuchang, Henan Province, in 1972. She is now an associate professor and also the instructor of graduate students in School of Information Engineering of Zhengzhou University. Her research concerns wireless communication system resource management.

Email: ieyhlu@zzu.edu.cn

穆晓敏(1955-),女,河南许昌人,郑州大学信息工程学院教授、博士生导师,主要研究方向为通信信号处理、图像信号处理、通信系统的抗干扰技术、图像数字水印技术等。

MU Xiao-min (female) was born in Xuchang, Henan Province, in 1955. She is now a professor and also the supervisor of Ph.D. candidate in School of Information Engineering of Zhengzhou University. Her research interests include communication signal processing, image signal processing, anti-interference technology for communication system, image digital watermarking technology.

Email: iexmmu@zzu.edu.cn