

基于简化 LSCMA 算法的 STBC MC-CDMA 系统盲多用户检测

熊亦兰, 酆广增

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 南京 210003)

[摘要] 在空时分组编码 (STBC) 的 MC-CDMA 系统中, 根据 STBC 正交编码的特点, 提出了一种简单可行的基于常模 (CM) 准则的盲多用户检测算法。该算法基于最小二乘常模算法 (LSCMA) 的盲多用户检测算法, 算法大为简化, 抽头系数减少了一半, 性能略有下降。

[关键词] 盲多用户检测; 简化 LSCMA 算法; 空时编码 MC-CDMA;

[中图分类号] TN92 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742 (2007) 05-0042-04

B3G 通信技术研究已成为移动通信领域研究的热点。多载波 (MC) 的正交频分复用 (OFDM) 技术将多径信道在频域上分为多个平坦子信道, 进行平行传送, 能有效对抗多径带来的频率选择性衰落, 具有很高的频谱效率。将多载波 OFDM 技术与具有明显系统增益的 CDMA 技术结合起来, 成为 MC-CDMA 技术^[1]; 多天线技术利用其提供的空间分集或空间复用或波束成形增益, 进一步提高系统性能^[2, 3]。基于空时分组编码 (STBC) 的多天线 MC-CDMA 的平台, 讨论了基于常数模 (CM, constant modulus) 准则的盲多用户检测问题。

CM 是一种盲算法准则^[3], 不需训练序列, 被广泛应用于盲均衡、多用户检测、盲信号分离、干扰抑制和波束成形等领域。根据所用迭代算法的不同, 常模算法 (CMA) 有最陡下降的 CMA 算法 (有时亦称为 CMA 算法) 和最小二乘 CMA (LSCMA) 算法等等。

文献[4]讨论了基于 LSCMA 算法的多天线系统中的盲信源分离, 文献[5]讨论了 STBC 编码系统中的盲多用户检测, 但均未涉及多载波 CDMA 多用户检测。文献[6]给出了在 MC-CDMA 系统中基于 CMA 算法的一种两级盲多用户检测器, 但未涉及

多天线 STBC 编码。文献[7]讨论了在接收端采用等距线阵的 MC-CDMA 系统中进行空一时均衡/解码。文献[8]主要讨论了在 STBC-OFDM 的系统中, 利用导频信息在各子载波上进行基于 LSCMA 算法的信道均衡以及自适应分集增益合并。这些文章使用的都是常规的 CMA 算法。

除给出空时分组编码的多天线 MC-CDMA 系统平台基于常规 LSCMA 算法 (CLSCMA) 的盲多用户接收算法和系统性能仿真外, 还根据 STBC 正交编码的特点, 进而提出了一种简化的 LSCMA 算法的盲多用户检测算法 (SLSCMA), 并通过仿真给出了基于 SLSCMA 算法的系统性能。不影响问题的研究, 而为避免过于复杂, 系统未考虑信道编码。

1 系统模型

考虑的系统模型, 是 2 发 1 收 STBC MC-CDMA 的多用户上行系统模型。在发射端, 每个用户的 BPSK 调制信号, 采用 Alamouti 的 STBC 编码方案^[2], 得到两路信号。这两路信号扩频后分别调制到 N 个子载波上 (扩频码长 = 子载波数), 插入 CP (循环前缀) 后, 并/串变化, K 个用户信号叠加后从两根天线发射出去。CP 的长度应该大于信

[收稿日期] 2005-10-26; 修回日期 2005-12-13

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (60472104), 江苏省高校自然科学基金研究计算项目 (04KJB510094), 江苏省高校研究生创新计划 (xm04-32)

[作者简介] 熊亦兰 (1982-), 女, 江西崇仁县人, 南京邮电大学硕士, 研究方向为移动通信与无线技术

道脉冲响应的最大时延。系统框图见图 1。

频率选择性信道的脉冲响应可用一 FIR 抽头延

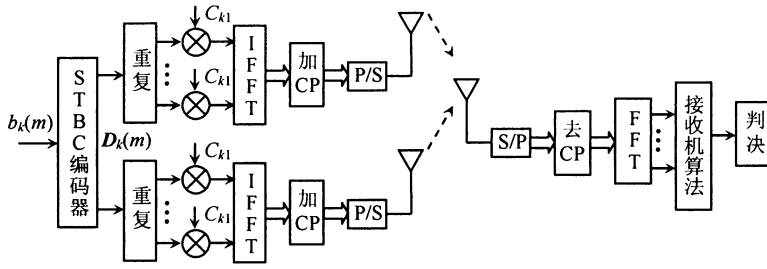


图 1 STBC-MC-CDMA 系统框图

Fig.1 Diagram of a STBC-MC-CDMA system

时线滤波器来表示，

$$h_{k\mu} = [h_{k\mu}(0) \cdots h_{k\mu}(L-1) \ 0_{1 \times (N-L)}]^T,$$

其中 天线数 $\mu = 1, 2, k = 1, \dots, K, L$ 是信道价数，添加了 $(N-L)$ 个 0，使其长度等于 N 。每个子载波上的信道响应可以认为是准平坦衰落的，即一帧内各子载波上的信道响应

$$g_{k\mu} = \mathbf{F}h_{k\mu} = [H_{k\mu}(0) \cdots H_{k\mu}(N-1)]^T$$

保持不变，其中 \mathbf{F} 是 $N \times N$ 的 DFT 矩阵，其第 (q, p) 个元素为 $(1/(N)^{1/2})\exp(-j2\pi pq/N)$, $p, q = 0, 1, \dots, N-1$ 。设不同收发天线对之间的信道响应不相关，每根发射天线的平均功率相同。

图 1 中 $\{b_k\}$ 为第 k 个用户的原始信号经过信道编码和交织的序列，独立等概分布。设每个用户一帧数据有 $2M$ 个数据比特，经过 STBC 编码后成为 M 个码块，第 m 个码块为

$$D_k(m) \triangleq \begin{bmatrix} b_k(2m) & -b_k^*(2m+1) \\ b_k(2m+1) & b_k^*(2m) \end{bmatrix},$$

第一、第二行分别对应于发射天线 Tx1 和 Tx2，第一、第二列分别在 $2m, 2m+1$ 的时刻发送。在接收端经过串/并变换，移除 CP 后，再进行 FFT 变换。对应的连续 2 个时刻的接收信号表示为

$$\mathbf{r}(2m) = [r_0(2m) \cdots r_{N-1}(2m)]^T,$$

$$\mathbf{r}(2m+1) = [r_0(2m+1) \cdots r_{N-1}(2m+1)]^T.$$

$$\text{令 } \mathbf{y}(m) = [\mathbf{r}^T(2m) \ \mathbf{r}^H(2m+1)]^T,$$

$$\mathbf{b}_k(m) = [b_k(2m) \ b_k(2m+1)]^T, \text{ 则}$$

$$\mathbf{y}(m) = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_k \mathbf{b}_k(m) + \mathbf{n}(m) = \mathbf{H} \mathbf{b}(m) + \mathbf{n}(m) \quad (1)$$

其中 $\mathbf{b}(m) = [\mathbf{b}_1^T(m), \dots, \mathbf{b}_K^T(m)]^T$,

$$\mathbf{H}_k = [\tilde{c}_{k1} \ \tilde{c}_{k2}] = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_k \mathbf{g}_{k1} & \mathbf{C}_k \mathbf{g}_{k2} \\ \mathbf{C}_k \mathbf{g}_{k2}^* & -\mathbf{C}_k \mathbf{g}_{k1}^* \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H} = [\mathbf{H}_1, \dots, \mathbf{H}_K];$$

\mathbf{C}_k 是第 k 用户的归一化扩频序列构成的对角矩阵

$$\mathbf{C}_k = \text{diag}(c_{k1}, \dots, c_{kN}), c_{kN} \in \{\pm 1/(N)^{1/2}\},$$

$\mathbf{n}(m)$ 是所有用户的噪声总和。

2 盲多用户检测接收机设计

2.1 基于常规 LSCMA 算法 (CLSCMA) 的盲多用户检测算法

不失一般性，假设期望用户为用户 1，期望检测的数据为 $\{b_1(m)\}$ ，把接收信号重新写作

$$\mathbf{y}(m) = \mathbf{H}_1 \mathbf{b}_1(m) + \mathbf{n}'(m) = [\tilde{c}_{11} \ \tilde{c}_{12}][b_1(2m) \ b_1(2m+1)]^T + \mathbf{n}'(m) \quad (2)$$

$\mathbf{n}'(m)$ 是其他用户的干扰信号和噪声的总和。

常模代价函数的一般形式为

$$J(\mathbf{W}) = E[|\|\mathbf{W}^H \mathbf{y}|\|^p - [1 \ 1]^T |^q] \quad (3)$$

\mathbf{W} 为抽头系数，有 $2N \times 2$ 个，形式为

$$\mathbf{W} = [\mathbf{W}_1 \ \mathbf{W}_2] = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_{11} & \mathbf{W}_{12} \\ \mathbf{W}_{21} & \mathbf{W}_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对于 $p=1, q=2$ 型的 CMA 均衡/解码器，代价函数为 $J(\mathbf{W}) = E[|\|\mathbf{W}^H \mathbf{y}|\|^2 - [1 \ 1]^T |^2]$ ，可以采用 LS-CMA 算法计算其抽头系数。第 $l+1$ 步迭代的抽头系数 \mathbf{W}_{l+1} 可由下式得

$$\mathbf{W}_{l+1} = (\mathbf{y}^H \mathbf{y})^{-1} \mathbf{y} L^*(z_l) \quad (5)$$

其中 $\mathbf{y} = [\mathbf{y}(1) \cdots \mathbf{y}(M)]$, $z_l = \mathbf{W}_l^H \mathbf{y}$, $L(z_l) = z_l / |z_l|$ 。

(若矩阵 $\mathbf{A} = (a_{ij})$ ，则定义 $\mathbf{A} / \|\mathbf{A}\| = (a_{ij} / |a_{ij}|)$ 期望用户信号的估计值为

$$\mathbf{z}(m) = \mathbf{W}^H \mathbf{y}(m) = \mathbf{W}^H \mathbf{H}_1 \mathbf{b}_1(m) + \tilde{\mathbf{n}}'(m) \quad (6)$$

其中

$$\mathbf{z}(m) = [z_1 \ z_2]^T = [b_1(2m) \ b_1(2m+1)]^T, \tilde{\mathbf{n}}'(m) = \mathbf{W}^H \mathbf{n}'(m).$$

2.2 基于简化 LS-CMA 算法的盲多用户检测算法 (S-LS-CMA)

根据 Alamouti 空时分组编码的正交性, 提出了一种简化的基于 LSCMA 的算法。

由式 (6) 可以看出来, \mathbf{W}_1 对 $\mathbf{y}(m)$ 的均衡/解码效果对应于原始信号 $b_1(2m)$, \mathbf{W}_2 对 $\mathbf{y}(m)$ 的均衡/解码效果对应于原始信号 $b_1(2m+1)$ 。在没有噪声的情况下, 当 \mathbf{W}^H 为 \mathbf{H}_1 的逆矩阵时, 就可以正确解调出用户信息。将式 (2) 展开为

$$\mathbf{y}(m) = \mathbf{H}_1 \mathbf{b}_1(m) + \mathbf{n}'(m) = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 \mathbf{g}_{11} & \mathbf{C}_1 \mathbf{g}_{12} \\ \mathbf{C}_1 \mathbf{g}_{12}^* & -\mathbf{C}_1 \mathbf{g}_{11}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1(2m) \\ b_1(2m-1) \end{bmatrix} + \mathbf{n}'(m).$$

容易证明

$$\mathbf{H}_1^H \mathbf{H}_1 = (\mathbf{g}_{11}^H \mathbf{g}_{11} + \mathbf{g}_{12}^H \mathbf{g}_{12}) \mathbf{I}_2 / N \quad (7)$$

也即用户 1 信道矩阵的逆可以由自身的共轭转置除去一个常数得到。因此可以构造一组均衡器/解码器的抽头系数, 它具有如下结构:

$$\mathbf{W} = [\mathbf{W}_1 \quad \mathbf{W}_2] = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_{11} & \mathbf{W}_{12} \\ \mathbf{W}_{21}^* & \mathbf{W}_{22}^* \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中 \mathbf{W}_{11} , \mathbf{W}_{12} 是 $N \times 1$ 维向量, \mathbf{W}_1 和 \mathbf{W}_2 都是 $2N \times 1$ 维向量。原始信号的估计值由式 $\mathbf{z}(m) = \mathbf{W}^H \mathbf{y}(m)$ 算得。

观察 \mathbf{W} , 可以发现 \mathbf{W}_2 可以由 \mathbf{W}_1 的元素进行共轭操作和重新排列后得到, 即存在下面的关系:

$$\mathbf{W}_2 = \mathbf{P}^T \mathbf{W}_1^* \quad (9)$$

其中
$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0_{N \times N} & \mathbf{I}_{N \times N} \\ \mathbf{I}_{N \times N} & 0_{N \times N} \end{bmatrix}.$$

得到了 \mathbf{W}_1 , 那么 \mathbf{W}_2 也就可得到。因此考虑只对 \mathbf{W}_1 采用 LS-CMA 算法, 其代价函数为

$$J(\mathbf{W}_1) = E[|\mathbf{W}_1^H \mathbf{y} - 1|^2],$$

迭代公式

$$\mathbf{W}_{1, l+1} = (\mathbf{y}\mathbf{y}^H)^{-1} \mathbf{y}L^*(\mathbf{z}_l, l),$$

其中 $\mathbf{y} = [\mathbf{y}(1) \cdots \mathbf{y}(M)]$, $\mathbf{z}_{l, i} = \mathbf{W}_{1, l}^H \mathbf{y}$, $L(\mathbf{z}_{l, i}) = \mathbf{z}_{l, i} / |\mathbf{z}_{l, i}|$ 。 \mathbf{W} 可以通过式 (8) 和式 (9) 计算得到, 从而完成盲多用户检测。

这种算法可以减少一半抽头, 从而大大降低了计算量。比较分析可以看出简化算法相当于只对 $b_1(2m)$ 进行了均衡/解码过程, 因此会带来一定的性能下降。由于正交设计的 STBC 编码使得信道矩阵具有了正交性, 这种简化算法可以很自然的推广到更多天线数目的情况。

LSCMA 算法具有良好的收敛性能, 在同信道干扰不大 ($\text{SIR} > 0$ dB) 时, 收敛快而稳定。但是在干扰严重 ($\text{SIR} < 0$ dB) 的通信环境中, 算法性能会恶化, 且可能收敛到错误的噪声信号上。在 MCCDMA 系统中, 多用户干扰比较严重。因此, 笔者采用半盲的方法来解决初值问题。

在 MCCDMA 系统中, 在每一帧的第一个码元块发送已知的数据, 在接收端就可以容易得到信道的频域估计值, 就采用该估计值作为 LSCMA 算法的初始值。

为了使其他用户信号的干扰减少, 在进行 CMA 算法前, 先将信号乘上目标用户 1 的扩频码构成的对角阵。

2.3 基于 MMSE 准则的接收机

作为性能比较的基准, 讨论基于 MMSE 准则的最佳非盲接收算法。假设期望用户是用户 1, 期望检测的数据为 $b_1(2m)$ 。接收信号可重写为

$$\mathbf{y}(m) = \mathbf{H}\mathbf{b}(m) + \mathbf{n}(m) = \tilde{\mathbf{c}}_{11} b_1 + \tilde{\mathbf{y}}(m) \quad (10)$$

其中 $\tilde{\mathbf{y}}$ 是干扰信号和噪声的总和。

由文献 [2, 3] 可知, 使 MSE 最小的 MMSE 权向量为

$$\mathbf{w}_1 = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p}_1 = (\mathbf{H}\mathbf{H}^H + \sigma^2 \mathbf{I}_{2N \times 2N})^{-1} \tilde{\mathbf{c}}_{11} \quad (11)$$

其中 \mathbf{R} 和 \mathbf{p}_1 分别代表接收信号的自相关矩阵和接收信号与期望信号的互相关向量。 σ^2 是信道噪声方差。这里假设各子载波上的噪声独立分布。

假设接收机即基站知道用于检测的用户的所有必要信息, 则利用式 (3) 可检测出

$$\hat{b}_1(2m) = \mathbf{W}_1^H \mathbf{y}(m) \quad (12)$$

类似地可恢复 $b_1(2m+1)$, 而得到期望用户信号。

3 仿真结果

仿真环境: 采用 M.1225 6 径信道, BPSK 调制, 子载波数 = 扩频码长 = 32, 扩频序列为 WALSH 码, 2 发 1 收的多用户 MC-CDMA 同步上行系统, 一帧内有 1 000 字符, 共仿真了 200 帧, CMA 算法迭代次数为 15, 其他用户的干扰设为 10 dB。图 2 中, MMSE 是基于 MMSE 的接收机, SLSCMA 是基于简化 LSCMA 算法的盲多用户接收机, CLSCMA 是基于常规 LSCMA 算法的盲多用户接收机。

图 2 中可看出, 用户数目越多, 性能越差。基于 MMSE 的接收机性能最好, 但是它的解调需要所有用户的信息。两种 CMA 算法中, 基于简化

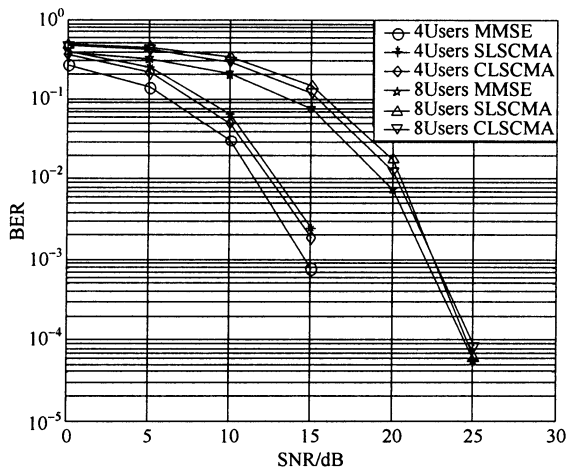


图 2 三种接收机的误码率比较

Fig.2 Bit error rate vs. SNR for the three receiver

LSCMA 算法的盲多用户接收机比基于常规 LSCMA 算法的盲多用户接收机稍差。但简化算法抽头只有常规 LSCMA 算法的一半，运算量大为下降，无疑是一种可供选择的简化算法。

4 结语

MMSE 接收机性能较好，但是需要所有用户的信道信息，这在实际中可能是困难的，或者需要付出很大的代价。基于常模准则的接收机不需要知道所有用户的信道信息。笔者提出的基于 LSCMA 的盲多用户接收机比在 MCCDMA 系统中基于常规的 LSCMA 算法，优点在于其利用了 STBC 编码的正交性，减少了一半的抽头系数，从而大为降低了 CMA 的运算量，是一种简单可行的解码方法。

参考文献

- [1] 尹长川, 罗涛, 乐光新编著. 多载波宽带无线通信技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004
- [2] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications [J]. IEEE J Select. Areas Commun, 1998, 16(Oct): 1451~1458
- [3] 张贤达, 保铮. 通信信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000
- [4] Sansrimahachai P, Ward D B, Constantinides A G. Multiple-input multiple-output least-squares constant modulus algorithms [A]. Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '03. IEEE, Vol 4 [C]. 2003. 2084~2088
- [5] Xu Changjiang, Le-Ngoc T. Joint channel estimation and decoding of space-time block codes [A]. Vehicular Technology Conference, Proceedings VTC Fall 2002 IEEE 56th, Vol 3 [C]. 2002. 1540~1544
- [6] Darsena D, Gelli G, Paura L, Verde F. Blind multiuser detection for MC-CDMA systems [A]. Signals, Systems and Computers, 2002 Conference Record of the 36th Asilomar Conference [C]. 2002
- [7] Feng Aigang, Yin Qinye, Zhao Zheng, et al. Blind space-time equalization/decoding with carrier frequency synchronization in multicarrier CDMA systems [A]. Circuits and Systems, ISCAS 2002 IEEE International Symposium, Vol 2 [C]. 2002. 500~503
- [8] Feng Aigang, Yin Qinye, Zhang Jianguo, et al. Adaptive diversity combination of space-time block coding in OFDM-CDMA systems with pilot-based channel estimation [A]. Vehicular Technology Conference, VTC Spring 2002 IEEE 55th, Vol 1 [C]. 2002. 190~193

Blind Multi-user Detection Based on Simplified LSCMA in STBC Coded MC-CDMA Systems

Xiong Yilan, Feng Guangzeng

(College of Communication & Information Engineering, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210003, China)

[Abstract] Utilizing the orthogonal feature of space time block coding (STBC), a simple and feasible algorithm based on constant modulus (CM) criterion is proposed for blind multi-user detection in STBC MC-CDMA systems. The algorithm proposed in the paper as a simplified version of the algorithm based on the least square constant modulus algorithm(LSCMA) has the advantage of half taps and therefore considerable reduced computation at the cost of a certain loss in performance.

[Key words] space time block code; MC-CDMA; constant modulus algorithm; blind multi_user detection