

MC-CDMA 系统中的自适应半盲多用户检测算法

孟 艳, 汪晋宽, 朱 俊, 宋 昕

(东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘要: 研究多载波CDMA(MC-CDMA)上行半盲多用户检测技术, 对基于Chebyshev逼近算法实现的最小输出能量(MOE)盲多用户检测进行改进, 提出MC-CDMA系统下一种基于子空间跟踪和Chebyshev逼近的自适应半盲多用户检测算法。该算法基于MOE线性检测器原理, 充分利用小区内所有用户的扩频码, 设计了一种基于MOE准则的半盲检测器, 很好地消除了多址干扰。为了减少计算复杂度, 将修正的PASTd算法应用于Chebyshev逼近算法估计MOE半盲检测器的最优权向量。该算法计算复杂度低, 具有较好的抗多址干扰性能和检测性能。仿真结果验证了该算法的可行性和优越性。

关键词: 半盲多用户检测; Chebyshev 逼近算法; 最小输出能量; 多载波

Adaptive Semi-blind Multiuser Detection Algorithm in MC-CDMA System

MENG Yan, WANG Jin-kuan, ZHU Jun, SONG Xin

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004)

【Abstract】 This paper investigates the semi-blind multiuser detection for multicarrier CDMA (MC-CDMA) uplink, improves Chebyshev approximation implementation of the minimum output energy (MOE) blind multiuser detection and proposes an adaptive semi-blind multiuser detection algorithm based on subspace tracking and Chebyshev approximation for MC-CDMA uplink. On the basis of MOE linear detector, it designs a semi-blind multiuser detector based on the MOE principle by making use of the spreading sequences of all known users and effectively eliminates multiaccess interference. In order to reduce the computational complexity, the improved PASTd algorithm is applied to Chebyshev approximation algorithm to estimate the optimal weight vector of MOE semi-blind multiuser detector. The proposed algorithm has the low computational complexity, and excellent capability of eliminating multiple access interference and good detection performance. Simulation results are presented to demonstrate the superiority and feasibility of the proposed algorithm in practical applications.

【Key words】 semi-blind multiuser detection; Chebyshev approximation algorithm; minimum output energy(MOE); multicarrier

1 概述

多载波CDMA系统综合了OFDM和CDMA的优点, 可以在无线信道中高速传送数据流, 并且在频谱效率、频率分集和抗多径干扰能力等方面具有较大的优势, 得到了广泛的关注^[1]。然而, 多址干扰的存在是影响系统性能和限定系统容量的重要因素, 因此多址干扰的抑制和消除对改善系统性能和提高系统容量具有重大意义。最早的最佳多用户检测器^[2]虽然性能最好, 但其计算复杂度随用户数增加呈指数增长, 成为一个不可实现的NP问题。因此, 人们一直在努力寻求一种在复杂度与性能之间能取得较好折中的次优检测方案。近年来, 许多学者提出一系列半盲多用户检测器^[3-6]。由于它们充分利用已知用户的扩频码来同时消除已知和未知用户干扰, 性能优于盲和非盲多用户检测, 因此受到普遍关注。文献[7]给出了一种基于Chebyshev逼近的盲自适应多用户检测算法, 需要特征值分解, 复杂度较高。本文针对实际的MC-CDMA上行链路, 基于MOE多用户检测原理, 充分利用小区内所有用户的扩频码修改MOE盲检测器的约束条件, 给出一种基于MOE准则的半盲检测器, 将修正的PASTd算法用于Chebyshev逼近算法求解半盲检测器的最优权向量, 提出MC-CDMA系统下基于子空间跟踪和Chebyshev逼近的半盲多用户检测。仿真结果表明, 与Chebyshev逼近盲多用户检测

^[7]相比, 本文算法具有较好的输出信干比和误码率性能, 且复杂度较低, 具有一定的实际应用价值。

2 信号模型

考虑MC-CDMA系统的上行链路^[6], 系统中有 K 个小区内的用户和 \bar{K} 个小区外的用户, 其中 K 个小区内用户的扩频码是已知的。假设载波的个数和扩频因子相同均为 N 。发射的二进制相移键控(BPSK)码元序列经扩频和多个载波调制(反傅里叶变换)发送, 再经瑞利多径衰落信道到达接收端。接收端经傅里叶变换, 最后采样输出样本为一个 N 维向量:

$$\mathbf{r} = \sum_{k=1}^K A_k b_k \mathbf{g}_k + \sum_{k=1}^{\bar{K}} \tilde{A}_k \tilde{b}_k \tilde{\mathbf{g}}_k + \sigma \mathbf{n} \quad (1)$$

其中, A_k 是小区内第 k 个用户接收信号的幅度; b_k 是小区内第 k 个用户接收信号的信息比特; $\mathbf{g}_k = C_k \mathbf{H}_k$ 是小区内第 k 个用户的有效扩频码向量; C_k 是由小区内第 k 个用户的扩频序列组成的对角矩阵; \mathbf{H}_k 是 $\mathbf{h}_k = [h_{k,0}, \dots, h_{k,L-1}]^T$ 的 N 点傅里叶变

基金项目: 博士学科点专项科研基金资助项目(20050145019)

作者简介: 孟 艳(1980 -), 女, 博士研究生, 主研方向: 多载波CDMA 系统中的多用户检测技术; 汪晋宽, 博士生导师; 朱 俊, 硕士研究生; 宋 昕, 博士研究生

收稿日期: 2006-12-10 **E-mail:** ymeng@mail.neuq.edu.cn

换, 其中 $h_{k,l}$ 是小区内第 k 个用户的第 l 条路径的复数信道增益, 服从瑞利分布; L 为路径条数; 同理, $\tilde{A}_k, \tilde{b}_k, \tilde{g}_k$ 分别是小区外第 k 个用户的相应信息; n 是一个均值为 0, 方差矩阵为 I_N (I_N 表示一个 $N \times N$ 的单位矩阵) 的高斯白噪声向量。

不失一般性, 假设所有用户的扩频码是线性独立的。 $G = [g_1, \dots, g_K]$, $\tilde{G} = [\tilde{g}_1, \dots, \tilde{g}_{\bar{K}}]$, $A = \text{diag}(A_1^2, \dots, A_K^2)$, $\tilde{A} = \text{diag}(\tilde{A}_1^2, \dots, \tilde{A}_{\bar{K}}^2)$ 。则接收信号 r 的自相关矩阵为

$$R \square E\{rr^H\} = \sum_{k=1}^K A_k^2 g_k g_k^H + \sum_{k=1}^{\bar{K}} \tilde{A}_k^2 \tilde{g}_k \tilde{g}_k^H + \sigma^2 I_N \quad (2)$$

$$= GAG^H + \tilde{G}\tilde{A}\tilde{G}^H + \sigma^2 I_N$$

假设用户 1 为期望用户。MOE 盲多用户检测解调第 1 个用户数据的权向量 m_1 通过如下最优问题得到

$$\min E\{m_1^H r\}^2 \quad \text{s.t. } m_1^H g_1 = 1 \quad (3)$$

判决器的输出

$$\hat{b}_1 = \text{sgn}(m_1^H r) \quad (4)$$

3 基于 Chebyshev 逼近的半盲多用户检测

在 MC-CDMA 上行链路, 基站已知小区内所有用户的扩频码, 小区外用户的扩频码未知。MOE 半盲多用户检测解调第 1 个用户数据的权向量 c_1 通过如下最优问题得到

$$\min E\{(c_1^H r)^2\} \quad \text{s.t. } c_1^H G = f^T \quad (5)$$

其中, $f = [1, 0, \dots, 0]^T$, $f \in \mathbb{R}^{K \times 1}$ 。

式(5)的问题是一个约束优化问题, 为了实现自适应, 需转化为无约束优化问题。将 c_1 分成相互正交的两个分量, 即

$$c_1 = w_f - U_s w_1 \quad (6)$$

其中, $w_f \in \text{range}(G)$ 是 c_1 的非自适应部分; $U_s \in \mathbb{R}^{N \times \bar{K}}$ 是约束矩阵 G 的零信号子空间, 即 U_s 位于信号子空间内, 且满足 $w_f^H U_s = 0$; w_1 是 c_1 的自适应调整部分。

把 w_f 代入式(5)的约束条件中, 求得

$$w_f = G(G^H G)^{-1} f \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)中; 则权向量可改写为

$$c_1 = G(G^H G)^{-1} f - U_s w_1 \quad (8)$$

根据式(8), 式(5)转化为无约束最优问题

$$\min (G(G^H G)^{-1} f - U_s w_1)^H R (G(G^H G)^{-1} f - U_s w_1) \quad (9)$$

求式(9)的最优解

$$w_1 = (U_s^H R U_s)^{-1} U_s^H R G (G^H G)^{-1} f = R_s^{-1} P_s \quad (10)$$

由于权向量 c_1 随信道参数的变化、多址干扰以及远近效应的影响, 因此需要采用自适应算法递推准确估计。本文采用 Chebyshev 逼近自适应算法递推得到权向量 c_1 。

Chebyshev 逼近算法^[7]归纳如下:

初始化:

$$\alpha = \frac{b-a}{2(2-b-a)}, \gamma = \frac{2}{2-b-a}, \rho_0 = 2$$

$$w_1(-1) = w_1(0) = 0$$

$$R_z(0) = 0, P_z(0) = 0$$

For $k = 1, 2, \dots, M$

$$R_z(k) = \lambda R_z(k-1) + U_s^H r(k) r(k)^H U_s$$

$$P_z(k) = \lambda P_z(k-1) + U_s^H r(k) r(k)^H G (G^H G)^{-1} f$$

$$u_k = 2 / \text{trace}\{R_z(k)\}, \rho_k = (1 - \alpha \rho_{k-1})^{-1}$$

$$w_1(k) = \rho_k [\gamma u_k (-R_z(k) w_1(k-1) + P_z(k) + w_1(k-1)) + (1 - \rho_k) w_1(k-2)]$$

$$c_1(k) = G(G^H G)^{-1} f - U_s w_1(k)$$

End

为了得到权向量 c_1 , 必须估计信号子空间 U_s 。

定义在 G 上的投影为

$$Q = G(G^H G)^{-1} G^H \quad (11)$$

其在正交于 G 的子空间上的投影为

$$Q^\perp = I - Q \quad (12)$$

将接收向量 r 投影到 Q^\perp 得到新的向量 \tilde{r}

$$\tilde{r} = Q^\perp r \quad (13)$$

则 \tilde{r} 的自相关矩阵为

$$C \square E\{\tilde{r}\tilde{r}^H\} \quad (14)$$

对 C 进行特征值分解为

$$C = [U_s \quad U_n \quad U_o] \begin{bmatrix} A_s & 0 & 0 \\ 0 & A_n & 0 \\ 0 & 0 & A_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_s^H \\ U_n^H \\ U_o^H \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中, $A_s = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_{\bar{K}})$ 包含了 C 的 \bar{K} 个最大的特征值; $A_n = \sigma^2 I_{N-(K+\bar{K})}$ 为噪声的特征值; $A_o = \text{diag}(0, 0, \dots, 0)$ 包含 K 个零特征值; U_s, U_n 和 U_o 分别为对应的正交特征向量。 U_s 的列空间是约束矩阵 G 的零信号子空间, 因此通过对自相关矩阵 C 进行特征值分解即可得到 U_s 。直接特征值分解计算复杂度高, 不利于工程实现。为了减少计算复杂度, 本文采用修正的 PASTd 子空间跟踪算法自适应得到信号子空间 U_s 。

4 修正的 PASTd 子空间跟踪算法

PASTd 算法^[8]跟踪得到的特征向量正交性不强, 因此收敛速度极慢。针对这一问题, 本文提出一种修正的 PASTd 子空间跟踪算法, 有效地提高了收敛速度。该算法在 PASTd 算法的基础上, 在每次迭代提取第 k 个特征向量时, 将第 k 个特征向量与前 $k-1$ 个已得到的特征向量进行单位正交化处理, 以保证已估计出来的 k 个特征值都正交。提取第 $k+1$ 个特征向量也同样如此, 依次类推, 直到所有最大的 \bar{K} 个特征向量都提取完毕。这样, 在每次迭代提取任何一个特征向量时都能保证此特征向量与之前已估计得到的特征向量正交, 从而保证所有特征向量都相互正交。假设 $w = U_i(:, 1:k-1)$ 为第 i 次迭代时 $k-1$ 个已得到的特征向量, $U_i(:, k)$ 为第 i 次迭代时第 k 个特征向量, 则在第 i 次迭代提取第 k 个特征向量时的单位正交化步骤为:

$$U_i(:, k) = U_i(:, k) - w w^H U_i(:, k) \quad (16)$$

$$dd = \|U_i(:, k)\| \quad (17)$$

$$U_i(:, k) = U_i(:, k) / dd \quad (18)$$

修正的 PASTd 算法如下:

For $i = 1, 2, \dots, M$

$$x_i(:, 1) = \tilde{r}$$

For $k = 1, 2, \dots, \bar{K}$

$$y_i = U_{i-1}(:, k)^H x_i(:, k)$$

$$A_i(k, k) = \beta A_{i-1}(k, k) + |y_i|^2$$

$$U_i(:, k) = U_{i-1}(:, k) + [x_i(:, k) - U_{i-1}(:, k) y_i] y_i^H / A_i(k, k)$$

$$x_i(:, k+1) = x_i(:, k) - U_i(:, k) y_i$$

If $k \geq 2$

$$w = U_i(:, 1:k-1)$$

$$U_i(:, k) = U_i(:, k) - w w^H U_i(:, k)$$

End

$$dd = \|U_i(:, k)\|$$

$$U_i(:, k) = U_i(:, k) / dd$$

End

End

其中, M 为迭代次数; \bar{K} 为小区外的用户数; β 为遗忘因子 ($0 < \beta < 1$)。

在本算法中, 修正的 PASTd 子空间跟踪算法的计算复杂度为 $O(N\bar{K}^2)$, 特征值分解(EVD)算法的计算复杂度为 $O(N^3)$ 。

在实际的 CDMA 系统中, $N \gg K$ 。所以, 修正的 PASTd 算法的计算复杂度远低于 EVD 算法。

5 仿真结果

假设在同步多径衰落信道的 MC-CDMA 系统中, 考虑 10 个用户, 其中 7 个为小区内用户, 3 个小区外用户。用户 1 为期望用户, 系统中 9 个干扰用户的功率相等, 且干扰用户和期望用户功率比为 20dB。各个载波的信道增益服从瑞利分布, 路径数 $L=3$ 。假设小区内所有用户的信道信息已知。扩频码为 32 位的 walsh 序列。载波数和扩频码的增益相同, 都为 $N=32$ 。 $\beta=0.995, \lambda=0.995, a=-1, b=0.99$ 。每个点为 100 次仿真实验的平均值。仿真结果如图 1~图 4 所示。修正的 PASTd 算法的初始矩阵为单位矩阵。图中, 实线表示本文算法, 点线表示 Chebyshev 逼近盲多用户检测算法^[7]。

图 1 给出了用户 1 在两种算法下的输出信干比性能的比较。期望用户的信噪比为 20dB。图 1 的结果显示本文算法的稳态输出信干比高于 Chebyshev 盲算法 6dB 左右。图 2 给出了多用户检测器的输出平均信干比随着信噪比的变化曲线。每个信噪比对应的信干比为 2 000 次迭代信干比的平均值。

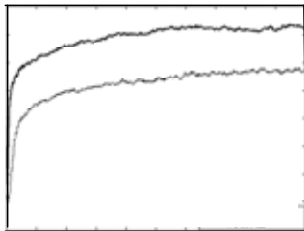


图 1 输出信干比/迭代次数

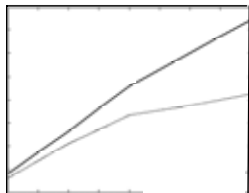


图 2 输出信干比/信噪比

从图 2 中可以看出, 在低信噪比时, 两种算法的平均信干比相差较小, 但随着信噪比的增大, 本文算法的平均信干比明显高于 Chebyshev 盲算法。从图 1 和图 2 的仿真结果可知, 本文算法有较好的输出信干比性能, 体现了较强的抗多址干扰能力。

图 3 给出了多用户检测器的误码率随着迭代次数的变化曲线。用户 1 的信噪比为 20dB。比较图 3 的结果可以看出, 采用本文算法的多用户检测的误码率性能优于 Chebyshev 盲多用户检测算法。图 4 给出了多用户检测器的误码率随着信噪比的变化曲线。每个信噪比下各个算法的误码率为传 2 000 个数据后计算的误码率。由图 4 的结果可知, 无论在低信噪比还是在高信噪比下, 采用本文算法的多用户检测的误码率

都低于 Chebyshev 盲算法。从图 3 和图 4 可以看出, 本文算法具有较低的误码率, 显示了较好的检测性能。

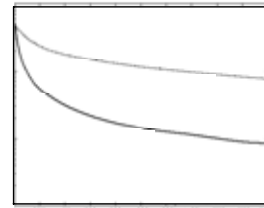


图 3 输出误码率/迭代次数

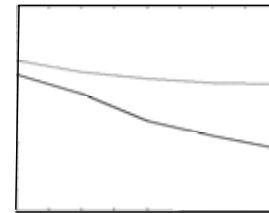


图 4 输出误码率-信噪比

6 结束语

本文提出 MC-CDMA 系统下一种基于子空间跟踪和 Chebyshev 逼近的自适应半盲多用户检测算法。该算法基于 MOE 多用户检测原理, 利用小区内所有用户的扩频码将多址干扰完全去除, 并将修正的 PASTd 算法应用于 Chebyshev 逼近算法, 避免了特征值分解, 从而降低了计算量。仿真结果表明, 本文算法有较强的抗多址干扰性能和较好的检测性能, 计算复杂度低, 具有一定的实用价值。

参考文献

- 1 Hara S, Prasad R. Overview of Multicarrier CDMA[J]. IEEE Communications Magazine, 1997, 35(12): 126-133.
- 2 Verdu S. Minimum Probability of Error for Asynchronous Gaussian Multiple Access Channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1986, 32(1): 85-96.
- 3 Host-Madsen A. Semi-blind Decorrelating Multi-user Detectors for CDMA: Subspace Methods[C]//Proc. of PIMRC'98. 1998: 203-207.
- 4 Wang X D, Host-Madsen A. Group-blind Multiuser Detection for Uplink CDMA[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(11): 1971-1984.
- 5 刘胜美, 赵春明, 李灿伟. CDMA 中的半盲恒模算法[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(1): 72-74.
- 6 Hua W, Hanzo L. Semi-blind and Group-blind Multiuser Detection for the MC-CDMA Uplink[C]//Proc. of 2004 IEEE Vehicular Technology Conference. 2004: 1727-1731.
- 7 Wu X B, et al. Blind Multiuser Detection Based on Chebyshev Approximation[C]//Proc. of ICSP'04. 2004, 2: 1727-1730.
- 8 Yang B. Projection Approximation Subspace Tracking[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(1): 95-107.

-5
-10
-15
-20

0 400 800 1 200 1 600 2 000

迭代次数