

## 基于子空间的线性约束最小二乘恒模算法

孟艳 汪晋宽 朱俊

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)

**摘要:** 线性约束最小二乘恒模算法能够有效克服恒模算法中存在的干扰捕获问题, 然而, 在实际的系统中, 由于受到来自噪声子空间分量的影响, 从而导致性能下降。针对这一问题, 该文提出了一种基于子空间方法的线性约束最小二乘恒模(LSCM)多用户检测算法并对其性能进行了理论分析。该算法收敛速度快, 信道跟踪能力强, 有较好的输出信干噪比和误码率性能。理论分析和仿真实验验证了该文算法的有效性和优越性。

**关键词:** DS-CDMA; 多用户检测; 恒模算法; 最小二乘恒模算法

中图分类号: TN914.53

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)01-0049-04

## A Linearly Constrained LSCM Algorithm Based on Subspace

Meng Yan Wang Jin-kuan Zhu Jun

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

**Abstract:** Linearly constrained Least Square Constant Modulus Algorithm (LSCMA) is an effective solution to the problem of interference capture in Constant Modulus Algorithm (CMA). But the performance will degrade when it is affected by the noise subspace in practical situations. In order to overcome this shortage, a subspace-based linearly constrained LSCMA multiuser detection algorithm is proposed. The proposed algorithm offers fast convergence rate, has good channel tracking ability and provides excellent output Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio (SINR) and Bit Error Rate (BER) performance. Theory analysis and simulation results demonstrate the effectiveness and superiority of the proposed algorithm.

**Key words:** DS-CDMA; Multiuser detection; CMA; LSCMA

### 1 引言

多址干扰是影响CDMA系统的主要因素之一, 多用户检测技术能有效地抑制多址干扰, 从而提高系统的性能, 增加系统的容量。盲多用户检测算法<sup>[1-3]</sup>由于不需要训练序列, 只需要目标用户的特征波形和定时信息就可以有效地抑制多址干扰, 因此引起人们越来越多的关注。

传统的恒模算法是基于最陡下降形式的算法<sup>[4]</sup>, 收敛速度较慢。最小二乘恒模算法对线性无关的输入数据能确保全局收敛性和稳定性, 收敛性得到了提高<sup>[5]</sup>。但是CDMA系统是一种多个恒模信号共存的环境, 传统的CMA算法极易捕获到其他干扰信号而不是所需信号, 解决的方法有多个恒模阵列级联的方法<sup>[6]</sup>, 这种方法复杂度相当高, 线性约束恒模算法<sup>[7-9]</sup>能很好地解决干扰捕获问题, 但是其收敛性能受步长因子的影响很大。

文献[10]提出一种线性约束的最小二乘恒模算法, 该算法不仅可以有效解决干扰捕获问题, 而且收敛性能不受步长的影响。然而, 在实际的应用中, 由于受到噪声子空间的影响从而导致性能下降。针对这一问题, 本文将子空间方法和

线性约束最小二乘恒模算法相结合, 提出一种基于子空间的最小二乘恒模多用户检测算法, 并对算法的计算复杂度、输出信干噪比以及误码率性能进行了理论分析。该算法消除了噪声子空间的影响, 改善了系统的性能, 采用OPAST子空间跟踪算法<sup>[11]</sup>自适应得到信号子空间, 减少了计算复杂度。仿真实验表明, 与传统的线性约束最小二乘恒模算法和基于子空间的MMSE算法相比, 所提算法收敛速度快, 能适应环境的变化, 输出信干噪比和误码率性能好。

### 2 信号模型

考虑一个具有  $K$  个用户的同步 DS-CDMA 通信系统。在加性高斯白噪声信道情况下, 经过码片匹配滤波器和码片速率采样之后, 在一个符号间隔  $T$  内, 接收端的输出样本为一个  $N$  维向量

$$\mathbf{r} = \sum_{k=1}^K A_k b_k \mathbf{s}_k + \sigma \mathbf{n} \quad (1)$$

其中  $A_k$  是第  $k$  个用户接收信号的幅度;  $b_k \in \{\pm 1\}$  是第  $k$  个用户接收信号的信息比特;  $\mathbf{s}_k = (1/\sqrt{N})[\beta_0^k, \dots, \beta_{N-1}^k]^T$  是第  $k$  个用户的归一化扩频码向量,  $\beta_i^k \in \{\pm 1\} (i=0, \dots, N-1)$  是第  $k$  个用户的扩频码序列;  $\mathbf{n}$  是一个均值为 0, 方差矩阵为  $\mathbf{I}_N$  ( $\mathbf{I}_N$  表示一个  $N \times N$  的单位矩阵)的高斯白噪声向量,  $\sigma^2$

是噪声的方差。假设  $K$  个用户的扩频码是线性独立的。 $\mathbf{S} \triangleq [\mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_K]$ ,  $\mathbf{A} \triangleq \text{diag}(A_1^2, \dots, A_K^2)$ 。则接收信号  $\mathbf{r}$  的自相关矩阵为

$$\mathbf{R} = E\{\mathbf{r}\mathbf{r}^H\} = \sum_{k=1}^K A_k^2 \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^H + \sigma^2 \mathbf{I}_N = \mathbf{S}\mathbf{A}\mathbf{S}^H + \sigma^2 \mathbf{I}_N \quad (2)$$

对矩阵  $\mathbf{R}$  进行特征值分解

$$\mathbf{R} = [\mathbf{U}_s \ \mathbf{U}_n] \begin{bmatrix} \mathbf{\Lambda}_s & \\ & \mathbf{\Lambda}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_s^H \\ \mathbf{U}_n^H \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中  $\mathbf{\Lambda}_s = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_K)$ ,  $\lambda_i$  是  $\mathbf{R}$  的第  $i$  个最大特征值(降序);  $\mathbf{U}_s = [\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_K]$  包含相应于特征值的正交特征向量;  $\mathbf{\Lambda}_n = \sigma^2 \mathbf{I}_{N-K}$  和  $\mathbf{U}_n = [\mathbf{u}_{K+1}, \dots, \mathbf{u}_N]$  分别表示  $N-K$  个特征值  $\sigma^2$  以及与其对应的正交向量。  $\mathbf{U}_s$  为信号子空间, 它的正交部分  $\mathbf{U}_n$  为噪声子空间。

### 3 基于子空间的线性约束 LSCMA 算法

传统的线性约束 LSCMA 算法是使下面的非线性代价函数最小化<sup>[10]</sup>

$$J(\mathbf{w}) = \sum_{i=1}^L \|\mathbf{w}^H \mathbf{r}_i - 1\|^2, \text{ s.t. } \mathbf{w}^H \mathbf{s}_1 = 1 \quad (4)$$

其中  $\mathbf{w}$  是多用户检测器的权向量,  $\mathbf{r}_i$  表示第  $i$  个接收信号向量,  $L$  是接收信号向量的个数,  $\mathbf{s}_1$  为期望用户的扩频码, 检测器的输出  $y_i$  为

$$y_i = \mathbf{w}^H \mathbf{r}_i \quad (5)$$

权向量  $\mathbf{w}$  可分解为相互正交的两部分

$$\mathbf{w} = \mathbf{s}_1 + \mathbf{B}\mathbf{x} \quad (6)$$

其中  $\mathbf{x}$  是新的更新权向量,  $\mathbf{B} = \mathbf{I} - \mathbf{s}_1 \mathbf{s}_1^H$ 。其权向量  $\mathbf{x}$  的更新算法如下

$$\mathbf{x}(i+1) = \mathbf{x}(i) - \mathbf{R}_{ic}(i)^{-1} \mathbf{B}\mathbf{r}(i) e^*(i) \quad (7)$$

式中  $\mathbf{R}_{ic}(i)$  是向量  $\mathbf{B}\mathbf{r}(i)$  的自相关矩阵,  $\mathbf{R}_{ic}(i) = \mathbf{R}_{ic}(i-1) + \mathbf{B}\mathbf{r}(i)(\mathbf{B}\mathbf{r}(i))^H$ ,  $e(i) = y(i) - \frac{y(i)}{|y(i)|}$ 。

从式(6)可知, 权向量  $\mathbf{w}$  中存在噪声子空间分量, 从而导致性能下降。针对这一问题, 本文提出一种基于子空间方法的线性约束 LSCMA 算法。该算法通过将权向量约束在信号子空间内, 从而消除了噪声子空间的影响。

定义基于信号子空间的新的权向量:

$$\mathbf{w} = \mathbf{s}_1 + \mathbf{B}_1 \mathbf{x} \quad (8)$$

式中  $\mathbf{B}_1 = \bar{\mathbf{U}}_s \bar{\mathbf{U}}_s^H$ ,  $\bar{\mathbf{U}}_s \in \mathcal{R}^{N \times K-1}$  是向量  $\mathbf{s}_1$  的零信号子空间, 即  $\bar{\mathbf{U}}_s$  位于信号子空间内, 且满足  $\mathbf{s}_1^T \bar{\mathbf{U}}_s = 0$ ;  $\mathbf{x}$  是  $\mathbf{s}_1$  的自适应调整部分。从式(8)可知, 矩阵  $\bar{\mathbf{U}}_s$  将权向量约束在信号子空间, 消除了噪声的影响, 提高了系统的输出信干噪比和误码率性能。

权向量  $\mathbf{x}$  的更新算法如下

$$\mathbf{x}(i+1) = \mathbf{x}(i) - \mathbf{R}_1(i)^{-1} \mathbf{r}_1(i) e^*(i) \quad (9)$$

式中  $\mathbf{r}_1(i) = \mathbf{B}_1 \mathbf{r}(i)$ ,  $\mathbf{R}_1(i)$  是向量  $\mathbf{r}_1(i)$  的自相关矩阵,  $\mathbf{R}_1(i) = \mathbf{R}_1(i-1) + \mathbf{r}_1(i) \mathbf{r}_1(i)^H$ 。

为了简化  $\mathbf{R}_1(i)^{-1}$  的运算, 根据矩阵求逆引理, 可得逆矩阵  $\mathbf{p}(i) = \mathbf{R}_1^{-1}(i)$  的递推公式

$$\begin{aligned} \mathbf{p}(i) &= \mathbf{p}(i-1) - \frac{\mathbf{p}(i-1) \mathbf{r}_1(i) \mathbf{r}_1(i)^H \mathbf{p}(i-1)}{1 + \mathbf{r}_1(i)^H \mathbf{p}(i-1) \mathbf{r}_1(i)} \\ &= \mathbf{p}(i-1) - \mathbf{k}(i) \mathbf{r}_1(i)^H \mathbf{p}(i-1) \end{aligned} \quad (10)$$

式中

$$\mathbf{k}(i) = \frac{\mathbf{p}(i-1) \mathbf{r}_1(i)}{1 + \mathbf{r}_1(i)^H \mathbf{p}(i-1) \mathbf{r}_1(i)} \quad (11)$$

利用式(10)不难证明

$$\begin{aligned} \mathbf{p}(i) \mathbf{r}_1(i) &= \mathbf{p}(i-1) \mathbf{r}_1(i) - \mathbf{k}(i) \mathbf{r}_1(i)^H \mathbf{p}(i-1) \mathbf{r}_1(i) \\ &= [1 + \mathbf{r}_1(i)^H \mathbf{p}(i-1) \mathbf{r}_1(i)] \mathbf{k}(i) - \mathbf{k}(i) \mathbf{r}_1(i)^H \\ &\quad \cdot \mathbf{p}(i-1) \mathbf{r}_1(i) = \mathbf{k}(i) \end{aligned} \quad (12)$$

因此,  $\mathbf{x}(i+1)$  的迭代公式为

$$\mathbf{x}(i+1) = \mathbf{x}(i) - \mathbf{k}(i) e^*(i) \quad (13)$$

为了得到权向量  $\mathbf{w}$ , 必须估计信号子空间  $\bar{\mathbf{U}}_s$ 。

定义在  $\mathbf{s}_1$  上的投影为

$$\mathbf{Q} = \mathbf{s}_1 (\mathbf{s}_1^H \mathbf{s}_1)^{-1} \mathbf{s}_1^H \quad (14)$$

其在正交于  $\mathbf{s}_1$  的子空间上的投影为

$$\mathbf{Q}^\perp = \mathbf{I} - \mathbf{Q} \quad (15)$$

将接收向量  $\mathbf{r}$  投影到  $\mathbf{Q}^\perp$  得到新的向量  $\tilde{\mathbf{r}}$

$$\tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{Q}^\perp \mathbf{r} \quad (16)$$

则  $\tilde{\mathbf{r}}$  的自相关矩阵为

$$\mathbf{C} \triangleq E\{\tilde{\mathbf{r}}\tilde{\mathbf{r}}^H\} \quad (17)$$

对  $\mathbf{C}$  进行特征值分解为

$$\mathbf{C} = [\bar{\mathbf{U}}_s \ \mathbf{U}_n \ \mathbf{U}_o] \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{\Lambda}}_s & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{\Lambda}_n & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{\Lambda}_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{U}}_s^H \\ \mathbf{U}_n^H \\ \mathbf{U}_o^H \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中  $\bar{\mathbf{\Lambda}}_s = \text{diag}(\bar{\lambda}_1, \dots, \bar{\lambda}_{K-1})$  包含了  $\mathbf{C}$  的  $K-1$  个最大的特征值;  $\mathbf{\Lambda}_n = \sigma^2 \mathbf{I}_{N-K}$  为噪声的特征值;  $\mathbf{\Lambda}_o = 0$ ;  $\bar{\mathbf{U}}_s$ ,  $\mathbf{U}_n$  和  $\mathbf{U}_o$  分别为对应的正交特征向量。  $\bar{\mathbf{U}}_s$  的列空间是向量  $\mathbf{s}_1$  的零信号子空间, 因此通过对自相关矩阵  $\mathbf{C}$  进行特征值分解即可得到  $\bar{\mathbf{U}}_s$ 。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 OPAST 子空间跟踪算法<sup>[11]</sup>自适应得到信号子空间  $\bar{\mathbf{U}}_s$ 。

### 4 OPAST 子空间跟踪算法

文献[11]给出了 OPAST 子空间跟踪算法, 具体算法如下。设  $\tilde{\mathbf{r}}$  是一个  $N$  维的随机向量序列, 其相关矩阵  $\mathbf{C} = E\{\tilde{\mathbf{r}}\tilde{\mathbf{r}}^H\}$ , 秩为  $K-1, N > K-1$ 。其代价函数为

$$\begin{aligned} J(\mathbf{W}) &= E(\|\tilde{\mathbf{r}} - \mathbf{W}\mathbf{W}^H \tilde{\mathbf{r}}\|^2) = \text{Tr}(\mathbf{C}) - 2\text{Tr}(\mathbf{W}^H \mathbf{C} \mathbf{W}) \\ &\quad + \text{Tr}(\mathbf{W}^H \mathbf{C} \mathbf{W} \mathbf{W}^H \mathbf{W}) \end{aligned} \quad (19)$$

信号子空间特征向量  $\mathbf{W}$  的正交预测逼近子空间跟踪迭代算法如下:

对于  $i = 1, 2, \dots, M$ ,  $\mathbf{W}(i) = \mathbf{W}(i-1) + \mathbf{p}'(i) \mathbf{q}(i)^H$ ,  $\mathbf{q}(i) = (1/\beta) \mathbf{Z}(i-1) \mathbf{y}(i)$ ,  $\mathbf{y}(i) = \mathbf{W}(i-1)^H \tilde{\mathbf{r}}(i)$ ,  $\gamma(i) = 1/[1 +$

$\mathbf{y}(i)^H \cdot \mathbf{q}(i)$ ,  $\mathbf{p}(i) = \gamma(i)(\tilde{\mathbf{r}}(i) - \mathbf{W}(i-1)\mathbf{y}(i))$ ,  $\tau(i) = [1/(\|\mathbf{q}(i)\|^2)] [1/\sqrt{1+\|\mathbf{p}(i)\|^2\|\mathbf{q}(i)\|^2} - 1]$ ,  $\mathbf{p}'(i) = \tau(i)\mathbf{W}(i-1) \cdot \mathbf{q}(i) + (1+\tau(i)\|\mathbf{q}(i)\|^2)\mathbf{p}(i)$ ,  $\mathbf{Z}(i) = (1/\beta)\mathbf{Z}(i-1) - \gamma(i)\mathbf{q}(i) \cdot \mathbf{q}(i)^H$ ,  $0 < \beta < 1$  ( $\beta$  为遗忘因子)。

该算法确保了每次迭代跟踪得到的信号子空间的正交性, 并且算法复杂度为  $O(N(K-1))$ 。

## 5 性能分析

本节对算法的计算复杂度、输出信干噪比以及误码率性能3个方面进行分析。

(1)算法复杂度比较 传统的LSCMA算法<sup>[10]</sup>的算法复杂度为  $O(N^3)$ 。本文算法在传统的LSCMA算法的基础上引入了子空间方法, 因此需要估计信号子空间。本文采用低复杂度的OPAST子空间跟踪算法自适应得到信号子空间, 这部分计算复杂度为  $O(N(K-1))$ , 因此本文算法的复杂度为  $O(N^3) + O(N(K-1))$ 。两种算法的计算复杂度比较如表1所示。从表1可以看出, 本文算法并没有增加太多的计算复杂度。

表1 两种算法的计算复杂度比较

算法	计算复杂度
传统 LSCMA	$O(N^3)$
本文算法	$O(N^3) + O(N(K-1))$

(2)输出信干噪比 根据文献[12], 输出信干噪比(SINR)定义为

$$\text{SINR} = \frac{P_d}{P_i + P_n} \quad (20)$$

式中  $P_d$  为输出信号功率,  $P_d = (\mathbf{w}^H \mathbf{s}_1)^2 A_1^2$ ,  $P_i$  为输出干扰功率,  $P_i = \sum_{k=2}^K A_k^2 (\mathbf{w}^H \mathbf{s}_k)^2$ ,  $P_n = \sigma^2 \mathbf{w}^H \mathbf{w}$  为输出噪声功率,  $\mathbf{w}$  为权向量。

权向量  $\mathbf{w}$  可以分解为如下形式

$$\mathbf{w} = \mathbf{w}_s + \mathbf{w}_n \quad (21)$$

其中  $\mathbf{w}_s$  和  $\mathbf{w}_n$  是分别位于信号子空间和噪声子空间的两个正交分量。

传统的线性约束 LSCMA 算法的输出 SINR 为

$$\text{SINR}_{\text{old}} = \frac{A_1^2}{\sum_{k=2}^K A_k^2 (\mathbf{w}^H \mathbf{s}_k)^2 + \sigma^2 \mathbf{w}^H \mathbf{w}} \quad (22)$$

将式(21)代入式(22)可得

$$\text{SINR}_{\text{old}} = \frac{A_1^2}{\sum_{k=2}^K A_k^2 (\mathbf{w}_s^H \mathbf{s}_k)^2 + \sigma^2 (\mathbf{w}_s^H \mathbf{w}_s + \mathbf{w}_n^H \mathbf{w}_n)} \quad (23)$$

其中使用了  $\mathbf{w}_n^H \mathbf{s}_k = 0$ ,  $\mathbf{w}_n^H \mathbf{w}_s = 0$ 。

新的线性约束 LSCMA 算法是将权向量约束到信号子

空间, 亦即相当于把  $\mathbf{w}_n$  分量去掉, 则上式变为

$$\text{SINR}_{\text{new}} = \frac{A_1^2}{\sum_{k=2}^K A_k^2 (\mathbf{w}_s^H \mathbf{s}_k)^2 + \sigma^2 \mathbf{w}_s^H \mathbf{w}_s} \quad (24)$$

比较式(23)和式(24)得到

$$\text{SINR}_{\text{new}} > \text{SINR}_{\text{old}} \quad (25)$$

从式(25)可知, 基于子空间的线性约束LSCMA算法的输出 SINR 较高。

(3)输出误码率 传统的线性约束LSCMA算法的近似误码率为

$$P_{\text{old}}(e) = Q\left(\frac{A_1}{\sigma\sqrt{\mathbf{w}^H \mathbf{w}}}\right) \quad (26)$$

其中  $Q(x) \triangleq \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-(x^2/2)} dx$ 。

将式(21)代入式(26), 得到

$$P_{\text{old}}(e) = Q\left(\frac{A_1}{\sigma\sqrt{\mathbf{w}_s^H \mathbf{w}_s + \mathbf{w}_n^H \mathbf{w}_n}}\right) \quad (27)$$

将权向量定义在信号子空间相当于把  $\mathbf{w}_n$  分量去掉, 则新的线性约束LSCMA算法的近似误码率为

$$P_{\text{new}}(e) = Q\left(\frac{A_1}{\sigma\sqrt{\mathbf{w}_s^H \mathbf{w}_s}}\right) \quad (28)$$

比较式(27)和式(28)可得

$$P_{\text{new}}(e) < P_{\text{old}}(e) \quad (29)$$

从上面的分析可知, 基于子空间的线性约束 LSCMA 算法的近似误码率小于传统的线性约束 LSCMA 算法。

## 6 仿真结果

假设在同步DS-CDMA系统中, 同时有7个用户通信, 用户1为期望用户, 其他用户为干扰用户, 干扰强度为  $\text{MAI}_i = 10 \lg A_i^2 / A_1^2 = 10 \text{dB}$ ,  $i=2, \dots, 7$ 。用户1的扩频码为31位的 gold 序列, 其他用户的扩频码随机产生。每个点为100次仿真实验的平均值。仿真结果如图1-图5所示。图中, 实线表示基于子空间的线性约束LSCMA(SLSCMA)算法, 点线表示传统的线性约束LSCMA算法<sup>[10]</sup>, 点划线表示基于子空间的MMSE算法<sup>[3]</sup>, 信号子空间由特征值分解得到。

实验1 比较3种算法的输出信干噪比(SINR)性能。图1中给出了信噪比  $\text{SNR}=0 \text{dB}$  时, 检测器的输出信干噪比 SINR 随迭代次数的变化曲线。当信噪比  $\text{SNR}=10 \text{dB}$  时, 检

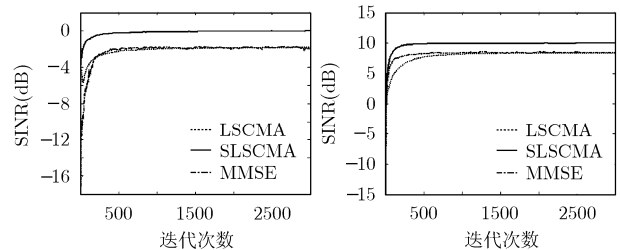


图1 输出信干噪比 (SNR=0dB)

图2 输出信干噪比 (SNR=10dB)

测器的输出信干噪比 SINR 随迭代次数的变化曲线在图 2 中给出。从实验 1 可以看出 SLSCMA 算法的收敛速度快, 输出信干噪比优于线性约束 LSCMA 算法和 MMSE 算法, 具有较强的抗多址干扰能力。

**实验2** 比较3种算法在动态信道下的输出信干噪比性能。初始时系统有7个用户, 迭代至3000次时, 系统增加3个 MAI 为 10dB 的干扰用户, 当迭代至6000次时, 系统又减少5个 MAI 为 10dB 的干扰用户。图3和图4分别给出了信噪比 SNR=0dB 和 SNR=10dB 时3种算法在动态环境下的输出信干噪比 SINR 随迭代次数的变化曲线。从图3和图4的结果中可以看出, 系统中用户动态变化时, SLSCMA 算法能快速收敛到稳态值, 且输出的稳态信干噪比一直高于 LSCMA 和 MMSE 算法。实验2表明本文算法具有较强的动态信道跟踪能力, 且能很好地适应环境的变化, 非常适用于移动 CDMA 系统中。

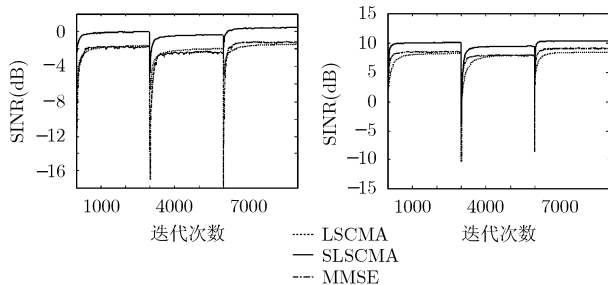


图3 输出信干噪比  
(SNR=0dB)

图4 输出信干噪比  
(SNR=10dB)

**实验3** 比较3种算法的误码率性能。图5给出了3种算法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输10000个数据后计算的误码率。从图5中可以看出, SLSCMA 算法的误码率在各个信噪比下都优于传统的线性约束 LSCMA 算法和 MMSE 算法。实验3表明本文算法的输出误码率较低, 检测性能较好。

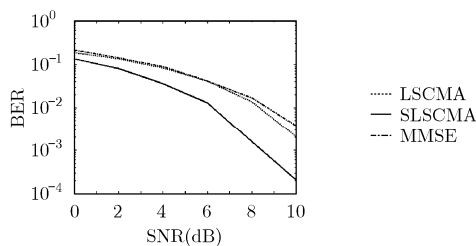


图5 输出误码率

## 7 结束语

针对线性约束 LSCMA 算法在实际的应用中受到噪声子空间的影响从而导致性能下降的问题, 本文提出了一种基于子空间方法的线性约束 LSCMA 算法, 并对其进行了性能分析。该算法将线性约束 LSCMA 算法和子空间方法相结合, 消除了噪声子空间的影响, 提高了多用户检测的性能, 采用 OPAST 子空间跟踪算法实现了信号子空间的自适应跟

踪, 降低了计算复杂度。仿真结果表明, 与线性约束 LSCMA 算法和基于子空间的 MMSE 算法相比, 所提算法不仅收敛速度快, 输出信干噪比和误码率性能好, 而且在动态环境下也能很好的工作。

## 参考文献

- [1] Jia L Q, Wang J K, Liu Z G, and Xue Y B. Adaptive multiuser detection algorithm based on subspace tracking [C]. ISAP, Seoul, 2005, 3: 1285-1288.
- [2] De Lamare R C and Sampaio-Neto R. Low-complexity variable step-size mechanisms for stochastic gradient algorithms in minimum variance CDMA receivers [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2006, 54(6): 2302-2317.
- [3] Wang X and Poor H V. Blind multiuser detection: A subspace approach [J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1998, 44(2): 677-690.
- [4] Treichler J R and Agee B G. A new approach to multipath correction of constant modulus signals [J]. *IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1983, 31(2): 459-472.
- [5] Agee B G. The least squares CMA: A new technique for rapid correction of constant signals [C]. ICASSP, Japan, 1986, 2: 953-956.
- [6] Annalingam D, Ali F H, and Stipidis E. Successive blind multi-target adaptive antenna array and interference cancellation for DS-CDMA [J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(20): 1165-1167.
- [7] 陈旸, 刘泽民. 一种基于改进的 DSE-CMA 算法的盲多用户检测[J]. *信息与电子工程*, 2006, 4(3): 221-224.
- [8] Chen Y, and Liu Z M. Blind multiuser detector based on modified DSE-CMA [J]. *Information and Electronic Engineering*, 2006, 4(3): 221-224.
- [9] Sun L, Bi G, and Zhang L. Blind adaptive multiuser detection based on linearly constrained DSE-CMA [J]. *IEE Proceedings-Communications*, 2005, 152(5): 737-742.
- [10] Xu C, Feng G, and Kwak K S. A modified constrained constant modulus approach to blind adaptive multiuser detection [J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2001, 49(9): 1642-1648.
- [11] 傅洪亮, 鄧广增. 线性受限最小二乘恒模盲多用户检测算法 [J]. *信号处理*, 2005, 21(5): 490-493.
- [12] Fu H L and Feng G Z. A linearly constrained LSCM blind multiuser detection algorithm [J]. *Signal Processing*, 2005, 21(5): 490-493.
- [13] Abed-Meraim K, Chkeif A, and Hua Y. Fast orthonormal PAST algorithm [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2000, 7(3): 60-62.
- [14] Caamano A J, Segovia-Vargas D, and Ramos J. Blind adaptive Krylov subspace multiuser detection [C]. *IEEE Vehicular Technology Conference*, Atlantic City, 2001, 4: 2338-2341.

孟 艳: 女, 1980 年生, 博士生, 研究领域为 CDMA 系统中的多用户检测技术。

汪晋宽: 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师, 研究领域为自适应信号处理、智能控制。

朱 俊: 男, 1980 年生, 硕士生, 研究领域为以太网在工业网中的应用。