

# 一种基于天线阵列的预处理盲多用户检测算法

傅洪亮 鄢广增

(南京邮电学院 通信工程系 南京 210003)

**摘要:** 该文提出了一种基于天线阵列的预处理判决反馈最小二乘恒模盲多用户检测算法,称为 P-DFB-LSCMA 算法。它是对天线阵列接收信号经预处理,采用判决反馈最小二乘恒模算法进行多用户检测。仿真结果表明, P-DFB-LSCMA 算法比仅采用判决反馈最小二乘恒模算法(DFB-LSCMA)和传统的 LSCMA 算法性能要好,特别在低信噪比下性能仍优于后二者。

**关键词:** 天线阵列, 盲多用户检测, 判决反馈, 恒模算法, P-DFB-LSCMA

中图分类号: TN914.5, TN911.23 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2005)10-1613-03

## A Pre-processing Blind Multiuser Detection Algorithm Using Antenna Arrays

Fu Hong-liang Feng Guang-zeng

(Nanjing University of the Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract** A Pre-processing Decision-FeedBack Least Squares Constant Modulus blind multiuser detection Algorithm (P-DFB-LSCMA) using antenna arrays is proposed in this paper. It pre-processes the received signals from the antenna arrays and utilizes the least squares constant modulus algorithm based on decision feedback to detection the DS-CDMA signals. Simulation results show that the proposed P-DFB-LSCMA algorithm is superior to DFB-LSCMA and LSCMA, especially with low SNR.

**Key words** Antenna array, Blind multiuser detect, Feedback, Constant modulus algorithm, P-DFB-LSCM

### 1 引言

多用户干扰(MAI)是限制CDMA系统容量的主要因素之一,基于天线阵列的多用户检测技术能够有效地抑制MAI,从而提高系统的性能,增加系统的容量<sup>[1]</sup>。

目前存在许多种基于天线阵列的自适应算法。然而,为了更有效地利用带宽,盲自适应算法越来越受到青睐,恒模算法(CMA)算是一类,它不需要训练序列,而且具有鲁棒性及低复杂度<sup>[2]</sup>。最陡下降法的CMA收敛较慢,最小二乘法CMA(LSCMA)对线性无关的输入数据能确保全局收敛性和稳定性,收敛性能得到提高<sup>[3]</sup>。

现在大多数基于天线阵列的盲多用户检测都是采用空时二维处理的方法,检测器抽头系数较多,且算法比较复杂。本文提出了一种基于天线阵列的预处理判决反馈最小二乘恒模盲多用户检测算法,称为 P-DFB-LSCMA 算法,它是对天线阵列接收信号进行预处理,即用接收的阵列信号与期望用户的波达方向向量(假设已估计出)的共轭进行相关,一方面

降低了信号的维数,另一方面增强了期望用户信号的能量,然后将检测器的输出与其判决所产生的误差信息运用于最小二乘恒模算法去调节检测器的抽头系数。仿真结果表明,本文提出的 P-DFB-LSCMA 算法比判决反馈最小二乘恒模算法(DFB-LSCMA)及传统的最小二乘恒模算法(LSCMA)性能要好,特别在低信噪比下性能仍优于后二者。

### 2 信号模型

考虑具有  $K$  个用户的同步基带 DSCDMA 系统,第  $k$  个用户的特征波形为

$$s_k(t) = \sum_{n=1}^N c_k^n p_c[t - (n-1)T_c], \quad t \in [0, T_b] \quad (1)$$

其中  $T_c$  是码片间隔,  $T_b$  是比特间隔,  $(c_k^1 c_k^2 \dots c_k^N)$  是第  $k$  个用户的扩频码,  $N = T_b / T_c$  是扩频增益,  $p_c(t)$  是码片(chip)波形,  $s_k(t)$  具有归一化能量,即  $\int_0^{T_b} s_k^2(t) dt = 1$ 。这样第  $k$  个用户在一个符号内的发送基带信号可表示为

$$x_k(t) = \sum_{n=1}^N A_k b_k c_k^n p_c[t - (n-1)T_c] \quad (2)$$

2004-04-06 收到, 2004-09-09 改回  
国家 863 计划(2002AA123046), 国家自然科学基金(60472104)和江苏省博士创新基金(XM04-32)资助课题

式中 $A_k$ ,  $b_k$ 分别表示第 $k$ 个用户信号的幅度和信息比特,  $b_k$ 为等概率取值 $-1, +1$ 的独立随机变量。假设接收机天线阵列有 $M$ 根天线, 从这 $M$ 根天线接收的信号可表示为矢量 $\mathbf{r}(t)=[r_1(t)r_2(t)\cdots r_M(t)]$ , 即

$$\mathbf{r}(t) = \sum_{k=1}^K A_k b_k \mathbf{a}_k s_k(t) + \mathbf{n}(t) \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{a}_k = [a_{1k} a_{2k} \cdots a_{Mk}]^T, \quad k=1, 2, \dots, K \quad (4)$$

表示第 $k$ 个用户的方向向量, 考虑等距线阵, 式(4)中的元素 $a_{mk} = e^{-j2\pi \frac{d}{\lambda}(m-1)\sin\theta_k}$ ,  $m=1\sim M$ ,  $d$ 表示每根天线相隔的距离,  $\lambda$ 是载波波长,  $\theta_k$ 表示第 $k$ 个用户到达第一根天线的入射角;  $\mathbf{n}(t)$ 是统计独立的复加性高斯白噪声,  $E[\mathbf{n}(t)\mathbf{n}(t)^H] = \sigma^2 \mathbf{I}$ ,  $\sigma^2$ ,  $\mathbf{I}$ 分别是噪声方差和单位矩阵。接收信号 $\mathbf{r}(t)$ 通过码片匹配滤波器后, 以码片速率采样, 其输出在一个符号周期内用矩阵表示为

$$\mathbf{r} = \sum_{k=1}^K A_k b_k \mathbf{S}_k + \mathbf{n} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{S}_k = \mathbf{s}_k \mathbf{a}_k^T$ 表示第 $k$ 个用户的空时特征,  $\mathbf{n} = [\mathbf{n}_1 \mathbf{n}_2 \cdots \mathbf{n}_M]$ ,  $\mathbf{s}_k = (1/\sqrt{N})[c_k^1 c_k^2 \cdots c_k^N]^T$ ,  $\mathbf{r} = [\mathbf{r}_1 \mathbf{r}_2 \cdots \mathbf{r}_M]$ 表示接收信号采样矩阵( $N$ 为扩频增益,  $M$ 为天线数); 本文中上标 $T$ 表示转置,  $H$ 表示共轭转置,  $*$ 号表示取共轭。

### 3 P-DFB-LSCMA 算法

传统的LSCMA算法是使下面的非线性代价函数最小化<sup>[4]</sup>, 即

$$J(\mathbf{W}) = E[\|\mathbf{w}^H \mathbf{r} - 1\|^2] \quad (6)$$

式(6)中,  $\mathbf{w} = [w_1 w_2 \cdots w_N]^T$ 是多用户检测器抽头系数, 检测器输出 $\mathbf{Y}$ 为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{w}^H \mathbf{r} \quad (7)$$

其权重 $\mathbf{W}$ 的更新算法如下

$$\mathbf{W}(i+1) = \mathbf{W}(i) - \mathbf{R}_{rr}(i)^{-1} \mathbf{r}(i) \mathbf{e}^*(i) \quad (8)$$

式(8)中,  $\mathbf{R}_{rr}(i)$ 表示输入信号 $\mathbf{r}$ 的自相关矩阵,  $\mathbf{R}_{rr}(i) = \mathbf{R}_{rr}(i-1) + \mathbf{r}(i)\mathbf{r}(i)^H$ ,  $\mathbf{e}(i) = \mathbf{Y} - \mathbf{Y}/|\mathbf{Y}|$ ,  $i$ 代表迭代次数。

本文提出的P-DFB-LSCMA算法是首先对接收信号矩阵 $\mathbf{r}$ 进行预处理, 即用接收的阵列信号 $\mathbf{r}$ 与期望用户的波达方向向量(假设用户1, 关于波达方向的估计有多种方法, 如: MUSIC法、ESPRIT法等<sup>[4]</sup>)的共轭进行相关, 如前所述, 这一方面降低了信号的维数(原来信号的维数是天线数, 即 $M$ , 经过与期望用户的波达方向向量的共轭进行相关, 降为一维), 另一方面增强了期望用户信号的能量, 即 $\mathbf{z} = \mathbf{r} \mathbf{a}_1^*$ ,  $\mathbf{z}$ 代表预处理后的信号向量, 然后将检测器的输出与其判决所产生的误差信息运用于最小二乘恒模算法去调节检测器的

抽头系数 $\mathbf{W}$ 的更新, 即式(8)改为

$$\mathbf{W}(i+1) = \mathbf{W}(i) - \mathbf{R}_p(i)^{-1} \mathbf{z}(i) \mathbf{e}_f^*(i) \quad (9)$$

其中 $\mathbf{z}(i) = \mathbf{r}(i) \mathbf{a}_1^*$ 。

$$\mathbf{R}_p(i) = \mathbf{R}_p(i-1) + \mathbf{z}(i)\mathbf{z}(i)^H \quad (10)$$

$\mathbf{e}_f(i)$ 为判决误差信息:

$$\mathbf{e}_f(i) = \mathbf{w}(i)^H \mathbf{z}(i) - \hat{b}_k(i) \quad (11)$$

其中 $\hat{b}_k(i)$ 是判决信息,  $\hat{b}_k(i) = \text{sgn}[\text{Re}(\mathbf{w}^H \mathbf{z})]$ ,  $\text{sgn}(\cdot)$ 表示取符号运算,  $\text{Re}(\cdot)$ 表示取实部运算。

### 4 算法仿真及性能分析

本文将P-DFB-LSCMA与DFB-LSCMA和LSCMA在相同环境下进行仿真比较。考虑一个同步DS-SS-CDMA天线阵列系统, 信道为加性白高斯信道; 信源采用2PSK信号, 抽样速率为码片速率; 天线为等距线阵, 各天线相距 $\lambda/2$ , 天线数 $M=4$ , 各用户DOA为 $\theta_k=5^\circ\sim 185^\circ$ 平均分布; 扩频码采用Gold码, 扩频增益 $N=31$ , 用户数 $K=8, 15$ , 目标用户为用户1, 多址干扰MAI= $10\lg A_k^2/A_1^2$ 为10dB,  $k=2\sim 15$ , 信噪比SNR=5dB, 10dB及15dB, 3种算法均采用相同的初始值 $\mathbf{W}(0)=\mathbf{S}_1$ , 输出信干比可从下面式(12), (13)得出。重写式(5), 即抽样前接收信号 $\mathbf{r}(t)$ 可表示为

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{a}_1 A_1 b_1 s_1(t) + \cdots + \mathbf{a}_K A_K b_K s_K(t) + \mathbf{n}(t) \quad (12)$$

经过抽样并预处理和多用户检测, 得

$$\begin{aligned} \mathbf{w}^H(\mathbf{r} \mathbf{a}_1^*) &= \mathbf{w}^H \mathbf{s}_1 (\mathbf{a}_1^H \mathbf{a}_1) A_1 b_1 + \cdots \\ &+ \mathbf{w}^H \mathbf{s}_K (\mathbf{a}_1^H \mathbf{a}_K) A_K b_K + \mathbf{w}^H(\mathbf{n} \mathbf{a}_1^*) \end{aligned} \quad (13)$$

从式(13)可以看出, 如果要恢复用户1信号, 理想情况下,  $\mathbf{w}^H \mathbf{s}_1 = 1$ , 而 $\mathbf{w}^H \mathbf{s}_k = 0$ ,  $k=2, 3, \dots, K$ , 所以用户1的输出信干比可定义为

$$\text{SIR} = \frac{\|\mathbf{w}^H \mathbf{s}_1\|^2 \|\mathbf{a}_1^H \mathbf{a}_1\|^2 A_1^2}{\sigma^2 \|\mathbf{w}\|^2 \|\mathbf{a}_1\|^2 + \sum_{i=2}^K A_i^2 \|\mathbf{w}^H \mathbf{s}_i\|^2 \|\mathbf{a}_i^H \mathbf{a}_i\|^2} \quad (14)$$

仿真结果如图1至图4所示(其中BER特性是在接收10000个字符情况下得到的)。图1至图3是在信噪比SNR分别为5dB, 10dB, 15dB及用户数 $K=8, 15$ 时的信干比性能比较图, 从图中可以看出, 无论是在高信噪比还是在低信噪比情况下, P-DFB-LSCMA算法的信干比性能都明显优于DFB-LSCMA和LSCMA; 同时, 从图中还可以看出, P-DFB-LSCMA的收敛速度也比LSCMA快, 但略慢于DFB-LSCMA, 另外图3中LSCMA算法在迭代初始出现了个陷点, 这可能是传统的LSCMA算法不太稳定所致。

图4给出的是3种算法在用户数 $K=8, 15$ 时的误码性能比较图, 可以看出, 本文提出的P-DF-LSCMA算法的误码性能同样明显优于DFB-LSCMA和LSCMA算法。

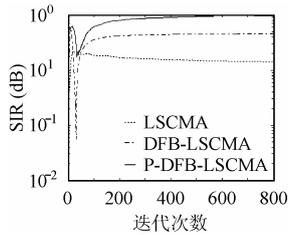


图 1 SNR=5dB,  
K=8 时信干比性能

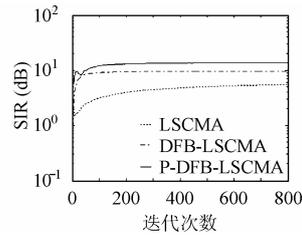


图 2 SNR=10dB,  
K=8 时信干比性能

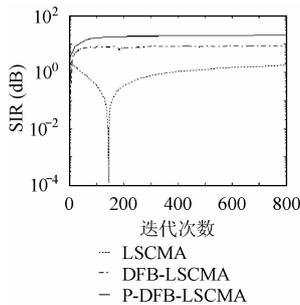


图 3 SNR=15dB,  
K=15 时信干比性能

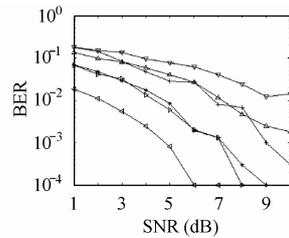


图 4 3 种算法误码性能比较

## 5 结束语

本文提出了一种基于天线阵列的预处理判决反馈最小二乘恒模盲多用户检测算法,称为 P-DFB-LSCMA 算法,它是对天线阵列接收信号进行预处理,即用接收的阵列信号与期望用户的波达方向向量(假设已估计出)的共轭进行相关,一方面降低了信号的维数,另一方面增强了期望用户信号的能量,然后将检测器的输出与其判决所产生的误差信息运用于最小二乘恒模算法去调节检测器的抽头系数。仿真结果表

明,本文提出的 P-DFB-LSCMA 算法比 DFB-LSCMA 及 LSCMA 性能要好。从复杂度方面看,虽然本文提出的 P-DFB-LSCMA 比 DFB-LSCMA 和 LSCMA 在每次迭代过程中多了一次矩阵乘法,但 P-DFB-LSCMA 算法的信干比性能和误码率性能明显要好于 DFB-LSCMA 和 LSCMA。另外从信干比性能比较图上看, P-DFB-LSCMA 算法的收敛速度略慢于 DFB-LSCMA,因此,如何加快 P-DFB-LSCMA 算法的收敛速度是我们进一步努力的方向。

## 参考文献

- [1] Purwoko A, Attallah S, Zoubir A M. Performance enhancement of adaptive blind multiuser detection for MC-CDMA using antenna arrays. *Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop Proceedings*, 2002, 4 – 6 Aug, 2002: 288 – 292.
- [2] Wang X M, Lu W S, Antoniou A. A constant-modulus algorithm for blind multiuser detection in DS-SS systems with antenna array. 2001. *PACRIM. 2001 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and signal Processing*, 26 – 28 Aug, 2001, vol.1: 234 – 237.
- [3] AGEE B. The least squares CMA: a new technique for rapid correction of constant signals. *Proc ICASSP[C] Tokyo, Japan*, 1986: 953 – 956.
- [4] 张贤达, 保铮. 通信信号处理. 北京: 国防工业出版社, 2000: 326 – 335, 383 – 388.

傅洪亮: 男, 1965 年生, 博士生, 研究方向为多用户检测和通信信号处理。

酆广增: 男, 1943 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向是移动通信和通信信号处理。