

一种基于天线阵列的判决反馈最小二乘恒模盲多用户检测算法^{*}

傅洪亮, 鄢广增

(南京邮电学院 通信工程系, 江苏 南京 210003)

摘要:提出了一种基于天线阵列的判决反馈最小二乘恒模盲多用户检测算法, 称为 DFB-LSCMA 算法。首先用天线阵列中每根天线的均衡输出与期望用户波达方向(DOA)的共轭进行相关形成判决量, 然后用检测器的输出与此判决分量的误差信息去调节多用户检测器的抽头系数。仿真结果表明, DFB-LSCMA 算法比传统的 LSCMA 算法性能要好, 特别在低信噪比下性能仍优于 LSCMA。

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

中图分类号:TN820.1¹⁺⁵; TN911.7 **文献标识码:**A

0 引言

多用户干扰(MAI)是影响 CDMA 系统性能的主要因素之一, 天线阵列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^[1,2]。

基于天线阵列的盲多用户检测(MUD)是近年来研究的热点; 按照代价函数的不同, 盲自适应算法可分为很多类, 恒模算法(CMA)是其中的一类, 它不需要训练序列, 而且具有鲁棒性及低复杂度^[3]。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^[4], 性能得到提高。

目前大多数基于天线阵列的盲多用户检测都是采用空时两维的算法, 检测器抽头系数较多, 算法比较复杂; 另外, 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。我们将最小二乘恒模算法(LSCMA)与判决反馈相结合, 提出了一种基于天线阵列的判决反馈最小二乘恒模盲多用户检测算法(DFB-LSCMA), 它用天线阵列中每根天线的均衡输出与期望用户波达方向向量的共轭进行相关形成

判决量, 恢复原发射信息, 然后用多用户检测器的输出与此判决所形成的误差信号去调节检测器抽头系数的更新。这种方法充分利用了原始信号的信息, 提高了多用户检测器的性能, 确保了算法收敛于期望用户。

仿真结果表明, 我们提出的 DFB-LSCMA 算法比传统的 LSCMA 算法在信干比和误码性能要好, 特别在低信噪比下性能仍优于后者。系统框图如图 1 所示。

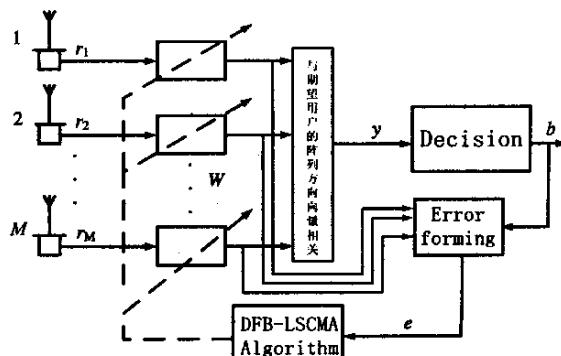


图 1 DFB-LSCMA 系统框图
Fig. 1 Frame of DFB-LSCMA

* 收稿日期: 2004-09-16

基金项目: 国家 863 项目资助(2002AA123046)

作者简介: 傅洪亮(1965-), 博士研究生, 主要研究方向为移动通信和通信信号处理, E-mail: jackfu@371.net; 鄢广增, 教授, 博士生导师。

1 信号模型

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

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

式(1)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

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

式(2)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, $r(t) = [r_1(t) \ r_2(t) \ \dots \ r_M(t)]$, 即:

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

式(3)中, \mathbf{a}_k 表示第 k 个用户的方向向量, 即:

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

考虑等距线阵, 式(4)中的元素 $a_{mk} = e^{-j2\pi\frac{d}{\lambda}(m-1)\sin\theta_k}$, $m = 1, 2, \dots, M$; d 表示每根天线相隔的距离, λ 是载波波长, θ_k 表示第 k 个用户到达第一根天线的入射角。式(3)中 $\mathbf{n}(t)$ 是统计独立的复加性高斯白噪声, $E[\mathbf{n}(t)\mathbf{n}(t)^H] = \sigma^2 \mathbf{I}$, σ^2, \mathbf{I} 分别是噪声方差和单位矩阵。接收信号 $r(t)$ 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

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

式(5)中, $\mathbf{s}_k = s_k \mathbf{a}_k^T$ 表示第 k 个用户的空时特征, $\mathbf{n} = [\mathbf{n}_1 \ \mathbf{n}_2 \ \dots \ \mathbf{n}_M]$, $s_k = \frac{1}{\sqrt{N}}[c_k^1 \ c_k^2 \ \dots \ c_k^N]^T$, $\mathbf{r} = [r_1 \ r_2 \ \dots \ r_M]$ 表示接收信号采样矩阵(N 为扩频增益, M 为天线数)。

2 DFB-LSCMA 算法

数最小化^[5]

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

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

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

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, $\mathbf{R}_{rr}(i) = \mathbf{R}_{rr}(i-1) + \mathbf{r}(i)\mathbf{r}(i)^H$, $\mathbf{e}(i) = Y - Y/|Y|$; i 代表迭代次数。由式(8)可以看出, 传统的 LSCMA 算法是用多用户检测器的输出信号与其归一化幅度的差来调节抽头系数 \mathbf{W} 的更新。

我们提出的 DFB-LSCMA 算法是将判决反馈与 LSCMA 相结合, 先是用天线阵列中每根天线的均衡输出与期望用户波达方向向量的共轭进行相关并形成判决量, 恢复原发射信息, 然后与检测器输出形成误差信号后去调节 \mathbf{W} 的更新, 即式(8)改为

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

式(9)中, $\mathbf{e}_f(i)$ 为判决误差信息

$$\mathbf{e}_f(i) = \mathbf{w}(i)^H \mathbf{r}(i) - \hat{b}_k(i) \quad (10)$$

$\hat{b}_k(i)$ 是判决信息, 即:

$$\hat{b}_k(i) = \text{sgn}[\text{Re}(\mathbf{w}^H \mathbf{r} \mathbf{a}_k^*)] \quad (11)$$

式(11)中, $\text{sgn}(\cdot)$ 表示取符号运算, $\text{Re}(\cdot)$ 表示取实部运算。显然, 新算法中权重 \mathbf{W} 的更新利用了原始信号与检测信号的误差信息进行迭代, 从而提高了系统的性能, 确保了算法收敛于期望用户。

3 算法仿真及性能分析

将 DFB-LSCMA 与传统的 LSCMA 在相同环境下进行仿真比较。考虑一个同步 DS-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 θ_k , 在 $5^\circ \sim 185^\circ$ 平均分布; 扩频码采用 Gold 31 码, 扩频增益 $N = 31$, 用户数 $k = 4, 8, 15$, 目标用户为用户 1, 多址干扰 $MAI = 10 \lg A_k^2/A_1^2$ 为 10 dB, $k = 2, 3, \dots, 15$, 信噪比 SNR 分别为 10 dB 及 15 dB, 2 种算法均采用相同的初始值 $\mathbf{W}(0) = \mathbf{S}_1$, 输出信干比定义为

$$SINR = \frac{\|\mathbf{w}^H \mathbf{s}_1\|^2 A_1^2}{\sigma^2 \|\mathbf{w}\|^2 + \sum_{i=2}^K A_i^2 \|\mathbf{w}^H \mathbf{s}_i\|^2} \quad (12)$$

传统的 LSCMA 算法是使下面的非线性代价函

仿真结果如图2~图4所示(其中BER特性是在接收10 000个字符情况下得到的)。图2和图3是信噪比SNR分别为10 dB,15 dB及用户数 $k=8$ 时的信干比性能比较图,从图4可以看出,无论是在高信噪比还是在低信噪比情况下,DFB-LSCMA算法的信干比性能都明显优于LSCMA;同时,从图4还可以看出,DFB-LSCMA的收敛速度也比LSCMA快。

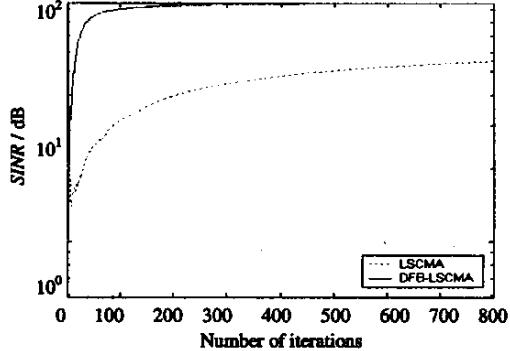


图2 $SNR=10$ dB 时信干比性能

Fig. 2 Performance of signal and interference rate at $SNR=10$ dB

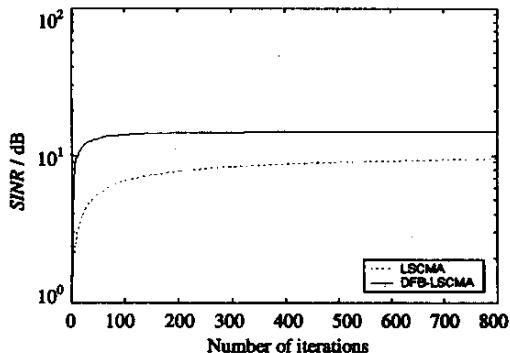


图3 $SNR=15$ dB 时信干比性能

Fig. 3 Performance of signal and interference rate at $SNR=15$ dB

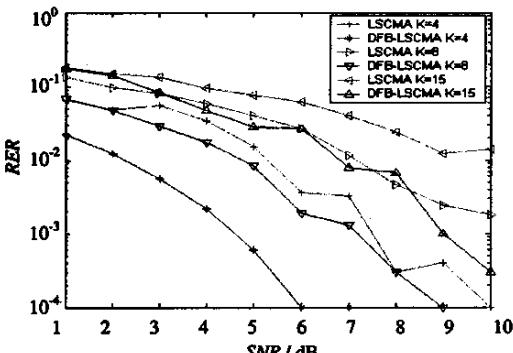


图4 用户数 $K=4,8,15$ 时误码性能比较

Fig. 4 BER comparison of users number at $k=4,8,15$

的误码性能比较图,可以看出,DFB-LSCMA 算法的误码性能同样优于传统的 LSCMA 算法。

4 结 论

本文将最小二乘恒模算法(LSCMA)与判决反馈相结合,提出了一种基于天线阵列的判决反馈最小二乘恒模盲多用户检测算法(DFB-LSCMA),它用天线阵列中每根天线的均衡输出与期望用户波达方向向量的共轭进行相关形成判决量,恢复原发射信息,然后多用户检测器的输出与此判决所形成的误差信号去调节检测器抽头系数的更新,充分利用了原始信号的信息,提高了多用户检测器的性能,确保了算法收敛于期望用户。通过仿真和分析,DFB-LSCMA 算法性能无论在高信噪比还是在低信噪比情况下都比传统的 LSCMA 算法性能明显有较大提高。

参考文献:

- [1] WANG X M, LU W S, ANTONOU A. Blind adaptive multiuser detection using a vector constant modulus approach [A]. Conference Record of the Thirty-fifth Asilomar Conference on[C]. 2001, 36-40.
- [2] PURWOKO A, ATTALLAH S, ZOUBIR A M. Performance enhancement of adaptive blind multiuser detection for MC-CDMA using antenna arrays [A]. Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop Proceedings[C]. 2002, 288-292.
- [3] XU Chang-jiang, FENG Guang-zeng, KWAK Kyung Sup. A modified constrained constant modulus approach to blind adaptive multiuser detection [J]. IEEE Trans. on comm. 2001, 49(9): 1642-1648.
- [4] JONH R AGEE B. A new approach to multipath correction of constant modulus signals[J]. IEEE Trans. ASSP, 1983, 31(2): 459-471.
- [5] 张贤达, 保铮. 通信信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 383-388.

(责任编辑:何先刚)

(下转 191 页)

图4 给出的是2种算法在用户数 $k=4,8,15$ 时

集成开发环境调试。播放终端主要利用在应用程序中嵌入 printf 语句进行调试并监测程序执行过程。

实验结果表明将服务器和多个播放终端通过一集线器连接形成一小型局域网。运行服务器程序,选择不同采样率、不同波特率 MP3 播放,等待终端连接。运行播放终端应用程序,终端迅速找到服务器并连接。服务器配合终端建立连接并将终端添加到用户列表中,给终端分配MP3 组。终端接收到MP3 流解码播放,播放达到预期效果。

3 结束语

网络 MP3 播放终端集成了网络化和数字化的优点,是嵌入式系统在音频领域中一个典型应用。这一网络 MP3 播放终端模型可以应用于工业控制、信息家电领域,同时可以扩展各种音频、视频格式,以适应不同系统需求。网络MP3 播放终端在信息化生

活中将得到更广泛的推广和应用。

参考文献:

- [1] 毛德操,胡希明. 嵌入式系统[M]. 浙江:浙江大学出版社,2003.
- [2] Ed Sutter. 嵌入式系统固件揭秘[M]. 张晓林等译. 北京:电子工业出版社,2003.
- [3] 马忠梅,马广云,徐英慧. 嵌入式处理器结构与应用基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002.
- [4] 单片机与嵌入式系统应用 2003(1-6)合订本 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003.
- [5] 张毅,赵国锋. 嵌入式 Internet 的几种接入方式比较[J]. 重庆邮电学院学报(自然科学版), 2002,14(4):83-86. (责任编辑:郭继笃)

Audio on demand system based on embedded system

DU Jian, XIONG Jian-she, SHAO Min, LI Li

(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, 266071, P. R. China)

Abstract: This article introduces an Audio on Demand system based on Ethernet which is a C/S structure. In this system, MP3 will be collected and stored in net server, and the MP3 will be broadcasted online using Network-MP3-Terminal designed by us. This system can be widely used in many locations such as karaoke room, audio classroom and public broadcast.

Key words: embedded system; Ethernet; MP3; uClinx; audio on demand

~~~~~  
(上接 129 页)

## Decision-feedback based least square blind multiuser detection algorithm via antenna arrays

FU Hong-liang, FENG Guang-zeng

(Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, P. R. China)

**Abstract:** A decision-feedback based least squares constant modulus blind multiuser detection algorithm (DFB-LSCMA) using antenna arrays is proposed in this paper. It uses the equalization output of every antenna in the antenna array to correlate with the conjugation of the DOA of the expected user to form the decision, then use the error between the decision and the output of the detector to alternate the coefficients of the multiuser detector. Simulation results show that the proposed DFB-LSCMA algorithm is superior to conventional LSCMA, especially with low SNR.

**Key words:** antenna array; MUD; feedback; CMA; DFB-LSCMA; LSCMA; CDMA

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>