

文章编号 :1001-2486(2001)00-0123-04

## 盲自适应的多用户 CDMA 阵列接收机\*

陈强,王展,皇甫堪

(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

**摘要** 研究了基于 CMOE 准则的空时多用户检测及其自适应实现。这是一种盲方法,不要求任何训练序列,能够抑制多址干扰,解决远近效应问题。进一步,分析了多用户 CDMA 阵列接收机的性能,并且与多用户单天线接收机、单用户阵列接收机以及单用户单天线接收机进行了比较。

**关键词** 智能天线;空时处理;多用户检测;

**中图分类号** TN914.53 **文献标识码** A

## A Blind Adaptive Multiuser CDMA Array Receiver

CHEN Qiang, WANG Zhan, HUANGFU Kan

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** Space-time multiuser detection based on constrained minimum output energy and its adaptive implementation are studied. This is a blind method which can suppress the multiple access interferences and solve the near-far problem without any training sequences. Furthermore, performances of the multiuser CDMA antenna array receiver are analyzed and compared with the performances of the multiuser single-antenna receiver, the single-user array receiver and the single-user single-antenna receiver.

**Key words** smart antennas; space-time processing; multiuser detection;

随着第三代无线通信的发展,要求进一步增大 CDMA 系统的用户容量、覆盖范围和传输速率,但多址干扰严重地限制了 CDMA 系统的性能。多用户检测技术利用多址干扰的信号结构特征,从本质上解决了远近问题(Near-Far Problem)<sup>[3]</sup>。然而多址干扰和无线信道具有明显的空间结构特征,如果采用阵列处理技术,将为干扰抑制提供新的维度。因此,联合利用空间和信号结构特征进行干扰抑制,将进一步提高系统性能<sup>[4]</sup>。

本文基于 CMOE(Constrained Minimum Output Energy)准则<sup>[2,5]</sup>,研究了一种多用户的 CDMA 阵列接收机。该系统不需要已知信号的到达方向(DOA),只要求已知期望用户的特征序列(Signature Sequence),能够联合进行干扰抑制和 DOA 估计,而且不需要训练序列,能够实现盲自适应算法。

## 1 系统模型

考虑多用户的异步 CDMA 基带信号模型,假设用户数为  $Q$ ,每个用户系统都采用单天线,基站系统是  $M$  个阵元的天线阵,则接收信号可以表示为  $M$  维向量

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{q=1}^Q \mathbf{a}_q \sum_{i=0}^{N-1} A_q b_q(i) \sum_{p=0}^{P-1} c(p) \phi(t - pT_c - iT_s - \tau_q) + \mathbf{v}(t) \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{a}_q = \mathbf{a}(\theta_q)$ ,  $\theta_q$ ,  $A_q$ ,  $\{b_q(i) | 1 \leq q \leq Q, 0 \leq i \leq N-1\}$ ,  $\{c(p) | 0 \leq p \leq P-1, 1 \leq q \leq Q\}$ ,  $\phi(t)$ ,  $\tau_q$ ,  $Q$ ,  $N$ ,  $P$ ,  $T_s$ ,  $T_c$  分别是阵列响应向量,到达角(DOA),信号幅度,独立等概率的符号流,扩展码,归一化的码片波形,信号时延,用户数,符号流长度,处理增益,符号周期和码周期,且  $T_s = PT_c$ ;  $\mathbf{v}(t)$  是均值为零协方差矩阵为  $\sigma^2 \mathbf{I}$  的高斯分布的空时白噪声,  $\mathbf{I}$  是单位矩阵。在上述模型中,我们采用窄带阵列模型刻画信号的空间信息,隐含地假设当信号波前通过阵列时信号包络变化缓慢,如果信号或者天线的带宽远小于载频,假设就可满足。对于 CDMA 这样的宽带信号,只要每个天线的频率响应在信号带宽内近似平坦,且信号波前通过阵列的时间小于信号的逆带宽,此假设也能满足。

\* 收稿日期 2001-02-16  
作者简介 陈强(1972-)男,博士生。

本文只考虑同步情况,即  $\tau_1 = \dots = \tau_Q = \alpha$  (见图 1),因此只要考虑一个符号周期内的接收信号

$$x(t) = \sum_{q=1}^Q a_q A_q b_q \sum_{p=0}^{P-1} c_q(p) \phi(t - pT_c) + v(t), t \in [0, T_s] \quad (2)$$

经过码片匹配滤波并采用码片速率采样,可以得到以下的离散时间信号模型,

$$x = \sum_{q=1}^Q A_q b_q h_q + v = HAb + v \quad (3)$$

其中  $x = [x^T(0), x^T(T_c), \dots, x^T(PT_c - T_c)]^T$ ,  $v = [v^T(0), v^T(T_c), \dots, v^T(PT_c - T_c)]^T$ ,  $A = \text{diag}\{A_1, \dots, A_Q\}$ ,  $b = [b_1, \dots, b_Q]^T$ ,  $H = [h_1, \dots, h_Q]$ ,  $h_q = c_q \otimes a_q$ ,  $c_q = [c_q(0), \dots, c_q(P-1)]^T$ ,  $\otimes$  是 Kronecker 积。可以看出,式(3)类似于一般的窄带阵列信号模型。因此,我们要求  $h_1, \dots, h_Q$  是线性独立的。从下面的引理可以看到,这一条件很容易满足:

引理 1 向量组  $\{h_q = c_q \otimes a_q, 1 \leq q \leq Q\}$  是线性独立的,只要向量组  $\{c_q, 1 \leq q \leq Q\}$  或者向量组  $\{a_q, 1 \leq q \leq Q\}$  是线性独立的,其中  $\otimes$  是 Kronecker 积。

该引理很容易利用反证法证明。实际上,这放松了单天线 CDMA 系统要求线性独立的特征序列的条件。多天线的 CDMA 系统能够区分两个不同的用户,只要他们的特征序列不相关,或者他们的 DOA 不相同,事实上,前者指的是码分多址,后者指的是空分多址。进一步,如果我们将  $h_q$  视为等效的特征序列,称为空时特征序列(Space-Time Signature Sequence),则等效的处理增益为  $MP$ ,因此,多用户的 CDMA 阵列系统能够实现联合多址。

## 2 CMOE 空时多用户检测

CMOE 空时多用户检测类似于一维的 CMOE 多用户检测,是一种盲方法,只要求已知期望用户的特征序列,不需要任何训练序列,也不需要已知期望用户的阵列响应或 DOA;并能够隐式地估计期望用户的阵列响应或 DOA,同时完成信号检测、干扰抑制和参数估计。下文中假设期望的用户为用户 1。

### 2.1 CMOE 空时多用户检测

接收机的设计问题等价于确定一个向量  $f$ ,使得接收机的输出

$$\hat{b}_1 = f^H x \quad (4)$$

逼近期望的信号  $b_1$ ,而包含最少的干扰和噪声。

我们采用 CMOE 准则

$$J_{CMOE}(f) = E\{\|\hat{b}_1\|^2\} = f^H R_x f \quad (5)$$

其中  $R_x = E\{xx^H\}$  很明显,需要关于  $f$  的约束条件,使 CMOE 准则在最小化过程中避免  $f = 0$ 。特别地,约束对于期望用户的响应为常数,即

$$f^H h_1 = 1 \quad (6)$$

这样,最小化 CMOE 准则就导致干扰和噪声的能量最小。这类似于阵列处理中的 LCMV(Linear Constrained Minimum Variance)波束形成。假设已知用户 1 的空时特征序列,利用拉格朗日乘法可以获得以上约束最优化问题的解为

$$f_{CMOE} = \frac{R_x^{-1} h_1}{h_1^H R_x^{-1} h_1} \quad (7)$$

且最小输出能量为

$$CMOE(h_1) = \frac{1}{h_1^H R_x^{-1} h_1} \quad (8)$$

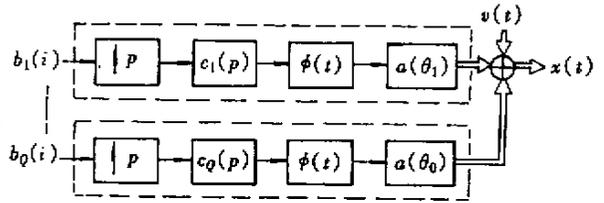


图 1 多用户 CDMA 阵列系统的信号模型

Fig.1 Signal model of the multiuser CDMA array system

通常,我们并不知道期望用户的阵列响应或 DOA,也就是说空时特征序列是未知的。直接利用各种高精度方法(例如 MUSIC)显式地估计阵列响应或 DOA 并不可取,因为对于无线通信,通常用户数远远多于天线数。在干扰被抑制以后,我们要求期望信号的分量最大,也就是要选择空时特征序列  $\mathbf{h}_1$ ,且  $\|\mathbf{h}_1\| = 1$ ,使  $\text{CMOE}(\mathbf{h}_1)$  最大,即

$$\hat{\mathbf{h}}_1 = \arg \max_{\mathbf{h}} \frac{\mathbf{h}^H \mathbf{h}}{\mathbf{h}^H \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{h}} \quad (9)$$

进一步,由于  $\mathbf{h}_q = \mathbf{c}_q \otimes \mathbf{a}_q = \mathbf{C}_q \mathbf{a}_q$ , 其中

$$\mathbf{C}_q = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_q & & \mathbf{0} \\ & \mathbf{c}_q & \\ & & \ddots \\ \mathbf{0} & & & \mathbf{c}_q \end{bmatrix} \quad (10)$$

是  $MP \times M$  维矩阵,代入式(9),得到期望用户的阵列响应为

$$\hat{\mathbf{a}}_1 = \arg \max_{\mathbf{a}} \frac{\mathbf{a}^H \mathbf{C}_1^H \mathbf{C}_1 \mathbf{a}}{\mathbf{a}^H \mathbf{C}_1^H \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{C}_1 \mathbf{a}} \quad (11)$$

由上式可以看出,期望用户的阵列响应实际上是矩阵对

$$(\mathbf{C}_1^H \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{C}_1, \mathbf{C}_1^H \mathbf{C}_1) \quad (12)$$

的最大广义特征值对应的广义特征向量。

## 2.2 自适应实现

我们基于 CMOE 准则推导出 LMS 算法,实现自适应的空时 CDMA 接收机。一方面,由式(3)和(5)可以得到

$$J_{\text{CMOE}} = \mathbf{f}^H \mathbf{H} \mathbf{A}^2 \mathbf{H}^H \mathbf{f} + \sigma^2 \mathbf{f}^H \mathbf{f} \quad (13)$$

而引理 1 的线性独立条件说明  $\mathbf{H} \mathbf{A}^2 \mathbf{H}^H$  是非负定的,所以  $J_{\text{CMOE}}$  是凸函数,不存在局部最小值。另一方面,由式(5)和(6)可以看到,CMOE 准则是二次型(式(13))与超平面(式(6))的交集。因此,为了使搜索过程限制在约束平面内,梯度向量必须垂直于约束平面。

根据式(5),直接对  $\mathbf{f}$  微分,并用瞬时估计值代替期望值,可以得到梯度向量的瞬时估计

$$\hat{\nabla} J_{\text{CMOE}} = 2 \mathbf{x} \mathbf{x}^H \mathbf{f} = 2 \mathbf{x} \hat{\mathbf{b}}_1 \quad (14)$$

定义空时特征序列的投影矩阵及其正交补分别为

$$\mathbf{P}_1 = \mathbf{h}_1 (\mathbf{h}_1^H \mathbf{h}_1)^{-1} \mathbf{h}_1^H, \mathbf{P}_1^\perp = \mathbf{I} - \mathbf{P}_1 \quad (15)$$

那么, LMS 迭代算法为

$$\mathbf{f}(k+1) = \mathbf{f}(k) - \frac{\mu}{2} \mathbf{P}_1^\perp \hat{\nabla} J_{\text{CMOE}} = \mathbf{f}(k) - \mu \hat{\mathbf{b}}_1 (k) (\mathbf{I} - \mathbf{h}_1 \mathbf{h}_1^H) \mathbf{x}(k) \quad (16)$$

其中,步长  $\mu$  满足条件  $0 < \mu < 2/\lambda_{\max}$ ,  $\lambda_{\max}$  是  $\mathbf{R}_x$  的最大特征值<sup>[1]</sup>。

## 3 仿真结果

考虑一个多用户 CDMA 阵列系统,天线数  $M = 3$ ,用户数  $Q = 10$ ,处理增益  $P = 15$ 。假设存在严重的远近效应,期望用户的功率比其他干扰用户的功率小 10dB。定义输出信干噪比<sup>[2]</sup>:

$$\text{SINR}_{\text{out}}(k) = \frac{A_1^2 [f^H(k) \mathbf{h}_1]^2}{\sum_k \{f^H(k) [\mathbf{x}(k) - A_1 \mathbf{b}_1(k) \mathbf{h}_1]\}^2} \quad (17)$$

稳态时,输出信干噪比与最小输出能量的关系为<sup>[5]</sup>:

$$\text{SINR}_{\text{out}} = \frac{1}{\text{CMOE}(\mathbf{h}_1) - 1} \quad (18)$$

图 2 分析了稳态时空时多用户接收机的输出信干噪比,并且与单天线的多用户接收机<sup>[2][5]</sup>、空时单用户接收机和单天线单用户接收机进行了比较。由于远近效应,多址干扰明显地限制了单用户接收机

的性能,而多用户接收机抑制了多址干扰,所以输出信噪比随输入信噪比线性增加。另一方面,采用多天线的空时接收机的性能明显优于单天线接收机。图3给出了输入信噪比为10dB时,空时多用户接收机的自适应实现的结果,并且与单天线接收机进行了比较。这进一步说明空时多用户接收机比单天线的多用户接收机有更好的输出性能和更快的收敛速度。

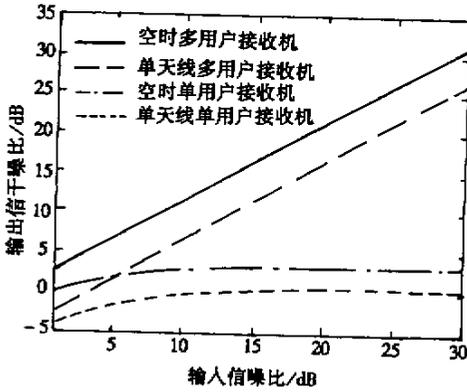


图2 稳态性能分析

Fig.2 Analysis of steady performances

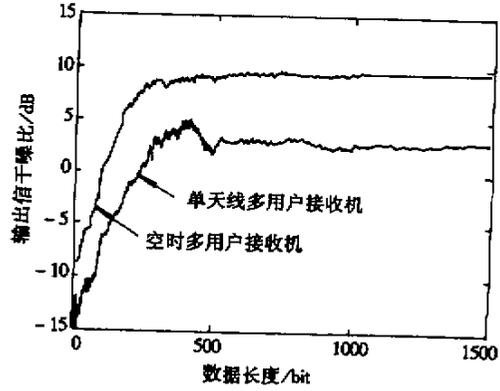


图3 自适应实现的性能分析

Fig.3 Performance analysis of adaptive algorithms

## 4 结论

采用多天线的空时多用户接收机联合利用空间结构和特征序列的码结构信息,能够同时获得 DOA 估计并且有效地抑制多址干扰,从而提高了 CDMA 系统的性能。为了使空时多用户接收机能够应用到第三代无线通信系统,还需要更深入的研究,包括信道估计、低复杂度的系统实现、快速的自适应算法等等。

## 参考文献:

- [1] Haykin S. Adaptive Filter Theory [M]. 北京:电子工业出版社,1998.
- [2] Honig M L, Madhow U, Verdu S. Blind adaptive multiuser detection [J]. IEEE Trans IT, 1995, (4): 944.
- [3] Madhow U. Blind adaptive interference suppression for direct-sequence CDMA [J]. Proc IEEE, 1998, (10): 2049-2069.
- [4] Miller S Y, Schwartz S C. Integrated spatial-temporal detectors for asynchronous Gaussian multiple-access channels [J]. IEEE Trans Com, 1995, (2): 394-410.
- [5] Tsatsanis M K, Xu Z. Performance analysis of minimum variance CDMA receivers [J]. IEEE Trans SP, 1998, (11): 3014.

