

基于峰度的盲自适应多用户检测¹

徐长江 鄢广增

(南京邮电学院通信工程系 南京 210003)

摘 要 基于四阶累积量, 分析一种新的优化准则, 即定向最小峰度 (OMK: Oriented Minimum Kurtosis) 准则。理论分析表明, 该准则函数具有全局最小值且极值点满足解相关条件。由此, 通过求解该优化问题, 能得到一种新的盲多用户接收方案。然后, 利用最速下降法, 给出盲多用户检测的自适应算法。仿真结果进一步验证了本文的结论。

关键词 码分多址, 多址干扰, 多用户检测, 四阶累积量
中图分类号 TN929.5

1 引言

码分多址 (CDMA) 是第三代移动通信系统首选的多址方式, 已成共识。多址干扰 (MAI) 构成 CDMA 系统主要限制, 多用户检测能有效地抑制 MAI, 成为近年来研究的热点。新近提出的盲多用户检测^[1] 不需要使用训练序列, 也不需要知道所有用户的特征波形和定时信息, 仅需要知道解调用户的特征波形和定时, 所需条件与传统单用户接收机相同。这克服了以往多用户检测器需要知道所有用户的特征波形和定时信息的弱点。对 CDMA 下行链路, 具有特别的诱惑力, 因为移动用户要获得其他干扰用户的精确信息极为困难, 而且频繁使用训练序列必然浪费信道带宽。

M. Honig 等人^[1] 基于约束最小化输出能量 (constrained minimum output energy) 准则, 给出线性最小均方误差 (MMSE) 检测器的一种盲自适应实现方案, 即 MOE 检测器。最近 X. Wang 等^[2] 基于子空间方法, 给出解相关检测器和线性 MMSE 检测器的盲自适应实现方案。该文所给出的盲检测器依赖于子空间跟踪算法, 且仅适用于高斯白噪声。

本文基于四阶累积量, 即定向最小峰度 (OMK: oriented minimum kurtosis) 准则, 分析一种新的盲多用户检测器, 简称 OMK 检测器。首先, 证明 OMK 准则函数具有全局最小值且极值点满足解相关条件, 由此可知 OMK 检测器具有消除多址干扰的能力。然后, 利用最速下降法, 给出 OMK 检测的自适应算法。本文提出的方法适用于高斯有色噪声, 并且优化准则是无约束的, 这给求解优化问题带来计算方便。

2 系统模型以及线性多用户检测器

考虑具有 K 个用户的同步基带 DS/CDMA 系统, 接收信号为

$$r(t) = \sum_{k=1}^K A_k \sum_{i=-M}^M b_k(i) s_k(t - iT) + n(t) \quad (1)$$

其中 A_k , $b_k(i)$ 和 $s_k(t)$ 分别为第 k 个用户的接收幅值、符号序列和传输波形 (signaling waveform); $2M + 1$ 为符号序列的长度; T 为传输波形的持续时间; $n(t)$ 是均值为零的高斯噪声; $b_k(i)$ 为等概率取值 ± 1 且相互独立的随机变量。传输波形:

¹ 1999-08-18 收到, 1999-12-22 定稿
信息产业部中青年科学基金资助

$$s_k(t) = \sum_{j=0}^{N-1} c_j^k \varphi(t - jT_c), \quad t \in [0, T] \quad (2)$$

其中 $c_j^k = \pm 1, j = 0, \dots, N-1$ 为用户 k 的扩频码, N 为扩频增益; φ 是码片 (chip) 波形, T_c 是码片周期, $T = NT_c$.

接收信号经过码片匹配滤波, 在一个符号间隔内, 形成一个 N 维输出向量:

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

其中 b_k 是相应符号间隔内用户 k 的信息码元; $s_k = [c_0^k, \dots, c_{N-1}^k]^T$ 是用户 k 的特征波形 (signature waveform) 向量, $\{s_k\}$ 线性无关, 即矩阵 $S = [s_1 \dots s_K]$ 列满秩; n 是均值为零的高斯随机向量。

线性多用户检测器由一个相关器和一个判决器组成, 即

$$b = \text{sgn}(w^T r) \quad (4)$$

其中 $w \in R^N$ 。对于任一 $\mu > 0$, 线性检测器 w 与 μw 是等效的, 容易推得其误码率、渐近效率以及信干比分别是相等的。不失一般性, 以下均考虑用户 1 的数据接收。

3 定向最小峰度 (OMK) 检测器

考虑优化问题:

$$\min_w J(w) = (3[E(w^T r)^2]^2 - E(w^T r)^4) + (w^T s_1 - m)^4 \quad (5)$$

其中 $m > 0$ 为一常数。我们将证明由上述优化问题得到的检测器是解相关的, 因此, 通过求解优化问题 (5) 式, 就能得到一种盲多用户检测器。

优化准则 $J(w)$ 的第一部分是一个四阶累积量, 称为峰度 (kurtosis), 描述了 $w^T r$ 的概率分布曲线的高峰程度。第二部分确保检测器 w 与 s_1 同向, 即其投影 $w^T s_1 > 0$, 起到定向作用。鉴于此, $J(w)$ 不妨称作定向最小峰度 (OMK) 准则, 由此得到的线性检测器简称为 OMK 检测器。

对于均值为零的实随机变量 x , 其四阶累积量为^[3]

$$c_4(x) = E(x^4) - 3[E(x^2)]^2 \quad (6)$$

且具有下面性质:

性质 1 若 x 是均值为零的高斯随机变量, 那么 $c_4(x) = 0$;

性质 2 若 x 与 y 是独立的随机变量, 且均值为零, 那么 $c_4(x+y) = c_4(x) + c_4(y)$ 。

上述性质由 (6) 式可直接推导, 这里从略。以下我们来证明优化问题 (5) 式的解使得 $J(w)$ 达到全局最小值, 且满足解相关条件。

根据定义和性质 2, 可知优化准则

$$J(w) = - \left[\sum_{k=1}^K c_4(A_k b_k w^T s_k) + c_4(w^T n) \right] + (w^T s_1 - m)^4 \quad (7)$$

根据性质 1, 有 $c_4(\mathbf{w}^T \mathbf{n}) = 0$, 由 (6) 式可直接推得 $c_4(A_k b_k \mathbf{w}^T \mathbf{s}_k) = -2A_k^4 (\mathbf{w}^T \mathbf{s}_k)^4$, 因此

$$J(\mathbf{w}) = 2 \sum_{k=1}^K A_k^4 (\mathbf{w}^T \mathbf{s}_k)^4 + (\mathbf{w}^T \mathbf{s}_1 - m)^4 \quad (8)$$

记 $\mu_k = \mathbf{w}^T \mathbf{s}_k$, $\mathbf{u} = [u_1, \dots, u_K]^T$, 即 $\mathbf{u} = \mathbf{S}^T \mathbf{w}$. 那么优化问题 (5) 式转化为

$$\min_{\mathbf{u}} \tilde{J}(\mathbf{u}) = 2 \sum_{k=1}^K A_k^4 u_k^4 + (u_1 - m)^4 \quad (9)$$

容易证明 $\tilde{J}(\mathbf{u})$ 是严格凸的, 其极值点由 $\tilde{J}(\mathbf{u})$ 的零梯度确定:

$$\nabla_{\mathbf{u}} \tilde{J} = \begin{bmatrix} 8A_1^4 u_1^3 + 4(u_1 - m)^3 \\ 8A_2^4 u_2^3 \\ \vdots \\ 8A_K^4 u_K^3 \end{bmatrix} = 0 \quad (10)$$

因此 $\tilde{J}(\mathbf{u})$ 存在唯一的极值点:

$$\mathbf{u}_{\text{opt}} = [\mu_0, 0, \dots, 0]^T \quad (11)$$

其中

$$\mu_0 = \frac{\sqrt[3]{4m}}{\sqrt[3]{4} + \sqrt[3]{8A_1^4}} \quad (12)$$

从而, 根据 $\mathbf{u} = \mathbf{S}^T \mathbf{w}$ 和 $J(\mathbf{w}) = \tilde{J}(\mathbf{S}^T \mathbf{w})$, 可知 $J(\mathbf{w})$ 是凸函数 (未必严格凸), 因此, 存在全局最小值, 且所有极值点满足

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{w}^T \mathbf{s}_1 &= \mu_0 \\ \mathbf{w}^T \mathbf{s}_k &= 0, \quad k = 2, \dots, K \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

其中 $\mu_0 > 0$ 由 (12) 式给出. 因此由优化问题 (5) 式得到的检测器即 OMK 检测器是解相关的.

由于 $J(\mathbf{w})$ 的极值为全局最小, 所以利用最速下降法, 可求解优化问题. 从而, 得到 OMK 检测器的自适应算法. 优化准则 $J(\mathbf{w})$ 的梯度为

$$\nabla_{\mathbf{w}} J = 12E(\mathbf{w}^T \mathbf{r})^2 E[(\mathbf{w}^T \mathbf{r}) \mathbf{r}] - 4E[(\mathbf{w}^T \mathbf{r})^3 \mathbf{r}] + 4(\mathbf{w}^T \mathbf{s}_1 - m)^3 \mathbf{s}_1 \quad (14)$$

求解优化问题 (5) 式的一种自适应算法是

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \mu \nabla_{\mathbf{w}} J|_{\mathbf{w}=\mathbf{w}(n)} \quad (15)$$

在实际应用中, 由 (14) 式难于精确计算梯度 $\nabla_{\mathbf{w}} J$ 的值, 只能求其近似值. 具体方法如下:

$$\mathbf{Q}(n) \triangleq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{r}(i)\mathbf{r}(i)^T = \frac{n-1}{n} \mathbf{Q}(n-1) + \frac{1}{n} \mathbf{r}(n)\mathbf{r}(n)^T \quad (16)$$

$$\mathbf{q}(n) \triangleq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mathbf{w}(i)^T \mathbf{r}(i))^3 \mathbf{r}(i) = \frac{n-1}{n} \mathbf{q}(n-1) + \frac{1}{n} (\mathbf{w}(n)^T \mathbf{r}(n))^3 \mathbf{r}(n) \quad (17)$$

$$E(\mathbf{w}^T \mathbf{r})^2 = \mathbf{w}^T E(\mathbf{r}\mathbf{r}^T) \mathbf{w} \approx \mathbf{w}^T \mathbf{Q}(n) \mathbf{w} \quad (18)$$

$$E[(\mathbf{w}^T \mathbf{r}\mathbf{r})] = E(\mathbf{r}\mathbf{r}^T) \mathbf{w} \approx \mathbf{Q}(n) \mathbf{w} \quad (19)$$

$$E[(\mathbf{w}^T \mathbf{r})^3 \mathbf{r}] \approx \mathbf{q}(n) \quad (20)$$

$$\nabla \mathbf{w} J|_{\mathbf{w}=\mathbf{w}(n)} \approx 12[\mathbf{w}(n)^T \mathbf{Q}(n) \mathbf{w}(n)] \mathbf{Q}(n) \mathbf{w}(n) - 4\mathbf{q}(n) + 4(\mathbf{w}(n)^T \mathbf{s}_1 - m)^3 \mathbf{s}_1 \quad (21)$$

4 仿真分析

下面通过计算机仿真来分析本文所给出的盲自适应检测器的性能。考虑同步 DS/CDMA 系统, 用户数 $K=5$, 处理增益 $N=31$ 。用户 1 为所需检测的信号, 其余用户为多址干扰, 干扰强度为 $\text{MAI}_k = 10 \log(A_k^2/A_1^2) = 20\text{dB} (k=2 \sim 5)$ 。信道干扰为高斯噪声, 信噪比 $\text{SNR}_1 = 10 \log(A_1^2/\sigma^2) = 20\text{dB}$, 其中 σ^2 为噪声方差。仿真结果如图 1(a)–1(b) 所示, 图中曲线是 30 次独立实验的平均值。

图 1(a) 中曲线分别表示 OMK 和 MOE 检测器的输出信干比:

$$\text{SIR} = E^2\{\mathbf{w}(n)^T \mathbf{r}\} / \text{Var}\{\mathbf{w}(n)^T \mathbf{r}\}$$

从图可知, OMK 的性能优于 MOE。

图 1(b) 中的曲线分别表示 OMK 检测器在失配和未失配时的输出信干比, 其中用户 1 实际接收到的特征波形: $\tilde{\mathbf{s}}_1 = \mathbf{s}_1 + \delta \mathbf{n}_0$, \mathbf{n}_0 为具有标准正态分布的随机向量, $\delta = 0.3$ 。从图可知, 在失配时 OMK 检测器亦具有较强的多址干扰抑制能力。

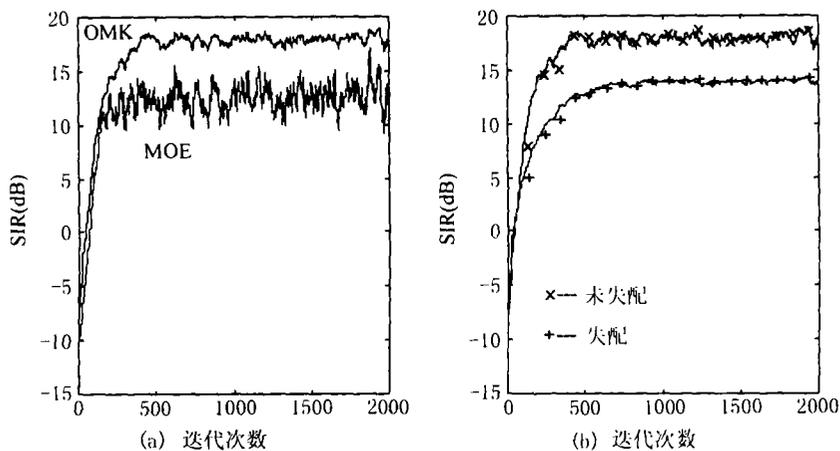


图 1 OMK 与 MOE 检测器的输出信干比

5 结 论

本文基于定向最小峰度 (OMK) 优化准则, 给出一种新的盲自适应多用户检测器, 即 OMK 检测器。OMK 准则函数具有全局最小值, 且极值点满足解相关条件, 由此得到 OMK 检测器具有消除多址干扰的能力。该方法无须估计噪声的方差, 且适用于高斯有色噪声。仿真结果表明, 所提出的 OMK 检测器具有较强的干扰抑制能力。

参 考 文 献

- [1] M. Honig, U. Madhow, S. Verdu, Blind adaptive multiuser detection, IEEE Trans. on IT, 1995, IT-41(4), 944-960.
- [2] X. Wang, H. V. Poor, Blind multiuser detection, a subspace approach, IEEE Trans. on IT, 1998, IT-44(2), 677-690.
- [3] O. Shalvi, E. Weinstein, New criteria for blind deconvolution of nonminimum phase systems (channels), IEEE Trans. on IT, 1990, IT-36(2), 312-321.
- [4] 张贤达, 时间序列分析——高阶统计量方法, 北京, 清华大学出版社, 1996, 第 2 章.

KURTOSIS-BASED BLIND ADAPTIVE MULTIUSER DETECTION

Xu Changjiang Feng Guangzeng

(Dept. of Telecom. Eng., Nanjing Inst. of Posts and Communication, Nanjing 210003, China)

Abstract Based on fourth-order cumulants, a new optimizing criterion is discussed and proven to have the global minima, while the minima satisfy the decorrelating conditions. Thereby, a new scheme for the blind multiuser detection can be obtained by solving the optimization problem. Then, an adaptive algorithm for the blind multiuser detection is given using method of the steepest descent. The computer simulation further demonstrates the results.

Key words CDMA, MAI, Multiuser detection, Fourth-order cumulant

徐长江: 男, 1965 年生, 副教授, 博士, 目前主要研究兴趣为系统辨识、信号检测与估计、CDMA 个人通信技术。
鄢广增: 男, 1943 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事移动通信和无线个人通信的教学与科研工作。