

基于常数模的多址干扰抑制能力分析

徐长江, 鄞广增

(南京邮电学院通信工程系, 南京 210003)

摘 要: 本文着重分析一种新的盲多用户检测器(即常数模检测器)的多址干扰抑制能力. 所得到的结果是: 当解调信号的接收幅值小于临界值 $1/\sqrt{3}$ 时, 该检测器的性能较差; 相反, 则具有较强的多址干扰抑制能力. 仿真实例验证了这一结论.

关键词: 常数模; 码分多址 (CDMA); 多址干扰

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 10-0006-03

Capability of Multi-access Interference Suppression Based on Constant Modulus

XU Chang-jiang, FENG Guang-zeng

(Dept. of Telecom. Engineering, Nanjing University of Posts and Telecom., Nanjing 210003, China)

Abstract: The paper investigates a new blind multiuser detector called constant modulus detector and analyzes the capability of the detector to suppress multi-access interference (MAI). The results show that the performance of detector is poor when the received amplitude of the demodulated signal is less than the critical value $1/\sqrt{3}$, contrariwise, the detector possesses stronger capability of MAI suppression. The simulation examples demonstrate the results.

Key words: constant modulus; CDMA; MAI

1 引言

多址干扰 (MAI) 构成 CDMA 系统主要限制, 多用户检测是抑制 MAI 最有效的方法^[1]. 新近提出的盲多用户检测^[2]不需要知道所有用户的特征波形和定时信息, 对于 CDMA 下行链路, 具有特别的诱惑力. Madhow U.^[3]就盲自适应干扰抑制方法作了综述, 指出基于常数模的 CDMA 盲多用户检测有待深入研究.

常数模方法在盲自适应均衡中已得到广泛研究^[4]. 最近 Miguez J. 等^[5]分析了一种约束常数模 (CCM: constrained constant modulus) 准则抑制多址干扰的能力, 然而, 其分析过程并不完善, 存在一些错误, 其结果不具有普遍性 (参见本文第三节的结论以及说明).

本文对常数模方法抑制多址干扰的能力作进一步分析. 首先讨论 CCM 准则的极值, 得出主要结论: 当解调信号的接收幅值小于临界值 $1/\sqrt{3}$ 时, 常数模方法抑制多址干扰的能力较差; 相反, 则具有较强的多址干扰抑制能力. 然后, 通过将 CCM 准则转化为一个无约束条件的优化准则, 给出常数模检测器的一种盲自适应算法. 利用该算法进行仿真分析, 验证了本文的结论.

2 信号模型

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 和 $s_k(t)$ 分别为第 k 个用户的接收幅值、符号系列和传输波形. $2M+1$ 为符号系列的长度; T 为传输波形的持续时间; $n(t)$ 是均值为零的白色高斯噪声, 其方差为 σ^2 ; $b_k(i)$ 等概率取值 ± 1 且相互独立的随机变量. 传输波形

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

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; 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; $s_k = (1/\sqrt{N}) [c_0^k, \dots, c_{N-1}^k]^T$ 是用户 k 的归一化特征波形向量; f_{s_k} 线性无

关,即矩阵 $S = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_K]$ 满秩; n 是均值为零的高斯随机向量,其协方差为 $^2 I_N$.

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 $s \in R^N$. 不失一般性,以下均考虑用户 1 的数据接收.

3 常数模检测器

考虑优化问题:

$$\min_w J(w) = E[(w^T r)^2 - 1]^2, w^T s_1 = 1 \quad (5)$$

其中优化准则 $J(w)$ 为一个四阶统计量,即常数模; $w^T s_1 = 1$ 为规范约束条件. 由优化式(5)确定的线性检测器不妨称作常数模(CM)检测器.

为分析上述确定的 CM 检测器是否具有抑制多址干扰的能力,将讨论在噪声为零时,准则函数 $J(w)$ 的性质. 为讨论方便,记 $u_k = A_k(w^T s_k)$, $u = [u_1, \dots, u_K]^T$. 根据 b_k 是均值为零且相互独立的随机变量,以及 $b_k^2 = 1$,可得到

$$J(w) = 3(u^T u)^2 - 2u^T u - 2 \prod_{k=1}^K u_k^4 + 1 \quad (6)$$

因此,优化问题(5)转化为:

$$\min_u \phi(u) = 3(u^T u)^2 - 2u^T u - 2 \prod_{k=1}^K u_k^4 + 1, \quad u_1 = A_1 \quad (7)$$

以下分析当 $u_1 = A_1$ 时,准则函数 ϕ 的极值性. 此时, ϕ 只有 $K-1$ 个变量,关于这些变量的一阶偏导数为

$$\frac{\partial \phi}{\partial u_k} = 4u_k [3(u^T u) - 1 - 2u_k^2] \quad (8)$$

下面分两种情形来讨论:

(1) $3A_1^2 - 1 \geq 0$

据式(8)可知,此时函数 ϕ 存在唯一的驻点:

$$\bar{u}_0 = [u_2 \ u_3 \ \dots \ u_K]^T = 0 \quad (9)$$

并且可计算 ϕ 在该驻点处的 Hessian 矩阵 $H_0 = 4(3A_1^2 - 1)I_{K-1} \geq 0$,因此 $\bar{u}_0 = 0$ 是 ϕ 的全局最小值点.

(2) $3A_1^2 - 1 < 0$

据式(8)可知,此时函数 ϕ 的驻点并不唯一,除驻点 $\bar{u}_0 = 0$ 外,还存在其他非零驻点. 不妨假定这些非零驻点中有 m 个非零元素,记作 $u_{k_i}, i = 1, \dots, m, 2 \leq k_i \leq K$. 为方便起见,记这些非零驻点为 \bar{u}_m . 由式(8)可得

$$2u_{k_i}^2 = 3(u^T u) - 1 \quad (10)$$

其中 $u^T = [A_1 \ \bar{u}_m^T]$. 因此 \bar{u}_m 中所有非零元素的绝对值是相等的,并且 $2u_{k_i}^2 = 3A_1^2 - 1 + 3mu_{k_i}^2$, 即 $u_{k_i}^2 = (1 - 3A_1^2)/(3m - 2)$. 因此当 $3A_1^2 - 1 < 0$ 以及 $u_1 = A_1$ 时, ϕ 的所有驻点分别为 $\bar{u}_0 = 0$ 和

$$\bar{u}_m = [u_{m,2} \ u_{m,3} \ \dots \ u_{m,K}]^T \quad (11)$$

$$\text{其中 } u_{m,k} = \begin{cases} \pm \sqrt{\frac{1 - 3A_1^2}{3m - 2}}, & k = k_i, i = 1, \dots, m \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (12)$$

上面式子中 k_i, m 分别表示驻点 \bar{u}_m 中非零元素的下标和个数.

在驻点 \bar{u}_0 处 ϕ 的 Hessian 矩阵 $H_0 = 4(3A_1^2 - 1)I_{K-1} < 0$, 所以 \bar{u}_0 为 ϕ 的极大值点. 关于驻点 \bar{u}_m 的性质,根据 ϕ 的对称性,只要讨论一种情形即可. 不妨假定 \bar{u}_m 中前 m 个元素非零并且为正数,此时 ϕ 在该驻点处的 Hessian 矩阵为

$$H_m = \frac{8(1 - 3A_1^2)}{3m - 2} \begin{bmatrix} 1 & 3 & \dots & 3 \\ 3 & 1 & \dots & 3 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 3 & 3 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \\ \\ \\ \mathbf{0} \\ \\ \mathbf{0} \end{matrix} \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ I_{K-1-m} \end{matrix} \quad (13)$$

因此当 $m=1$ 时, $H_m = 8(1 - 3A_1^2)I_{K-1} > 0$, 此时驻点 \bar{u}_1 为 ϕ 的极小值点; 而当 $m > 1$ 时, H_m 为不定型,此时驻点 \bar{u}_m 为鞍点型,不是 ϕ 的极值点.

至此,分析了当 $u_1 = A_1$ 时函数 ϕ 的极值性,即有如下结论:

结论 1: (i) 当 $3A_1^2 - 1 \geq 0$ 时, ϕ 存在唯一的全局最小值点 $\bar{u}_0 = 0$. (ii) 当 $3A_1^2 - 1 < 0$ 时, ϕ 存在一个极大值点 \bar{u}_0 和 $2K - 2$ 个极小值点 $\bar{u}_1 = [0, \dots, 0, u_{k_1}, 0, \dots, 0]^T$, 其中 $u_{k_1} = \pm \sqrt{1 - 3A_1^2}, k_1 = 2, \dots, K$.

根据结论 1 以及关系式 $u_k = A_k(w^T s_k)$, 即可得到关于常数模(CM)检测器抑制多址干扰能力的结论.

结论 2: (i) 当 $3A_1^2 - 1 \geq 0$ 时, 优化问题式(7)的解为 $\bar{u}_0 = 0$. 因此,由式(5)确定的 CM 检测器满足解相关条件,具有消除多址干扰的能力. (ii) 当 $3A_1^2 - 1 < 0$ 时, 优化问题式(7)的解为 $\bar{u}_1 = [0, \dots, 0, u_{k_1}, 0, \dots, 0]^T$, 存在一个非零元素,并且是局部极小值. 因此,由式(5)确定的 CM 检测器不满足解相关条件,只能消除部分多址干扰.

说明:

① 文献[5]在分析 CM 检测器抑制多址干扰能力过程中,为讨论方便,假定 $A_1 = 1$. 根据本文的分析,可知这种假定是错误的,不具有普遍性.

② 文献[5]得出准则函数 ϕ 存在多个非零的驻点. 由于文献[5]假定 $A_1 = 1$, 因此根据本文的分析,可知该结论是不正确的,因为此时 ϕ 只有一个驻点,即零点.

4 仿真实例

以下通过仿真实例分析 CM 检测器抑制多址干扰的能力. 首先利用随机梯度方法,给出 CM 检测器的一种盲自适应算法. 然后针对 A_1 的不同取值进行仿真分析.

由于矩阵 $B = I_N - s_1 s_1^T$ 的列向量张成 s_1 的正交补空间,因此满足规范约束条件 $w^T s_1 = 1$ 的任一 $w \in R^N$ 具有下面的正交分解: $w = s_1 + Bx$, 其中 $x \in R^N$ 为一向量. 由此,可将约束优化问题(5)转化为下述无约束优化问题:

$$\min_x \tilde{J}(x) = J(s_1 + Bx) \quad (14)$$

这样,利用随机梯度方法,就可得到 CM 检测器的一种盲自适应算法:

$$w(n) = s_1 + Bx(n) \quad (15)$$

$$x(n) = x(n-1) - \mu \nabla \tilde{J}(x(n-1)) \quad (16)$$

$$\nabla \tilde{J}(x(n-1)) = B^T [(w(n-1)^T r_n)^2 - 1] / [w(n-1)^T r_n] \quad (17)$$

下面利用上述算法, 针对 A_1 的不同取值进行仿真分析.

考虑同步 DS/CDMA 系统, 用户数 $K=5$, 处理增益 $N=10$. 用户 1 为所需检测的信号, 其余用户为多址干扰, 干扰强度: $MAI_k = 10 \log_{10}(A_k^2/A_1^2) = 20\text{dB}$, $k=2 \sim 5$. 信道干扰为高斯白噪声, 信噪比 $SNR_1 = 10 \log_{10}(A_1^2/\sigma^2) = 20\text{dB}$. 针对 A_1 的不同取值所得仿真结果如图 1 所示, 图中曲线表示 CM 检测器的输出信干比:

$$SIR_1(n) = E\{w(n)^T r\} / \text{Var}\{w(n)^T r\} \quad (18)$$

图 1 表明当 $A_1 = 0.4$ 时, CM 检测器的输出信干比成下降趋势, 此时检测器抑制多址干扰的能力较差. 当 $A_1 = 1/\sqrt{3} = 0.5774$ 为临界值时, CM 检测器具有抑制多址干扰的能力; 而当 $A_1 = 1$ 时, 检测器具有较强的干扰抑制能力. 仿真结果验证了结论 2.

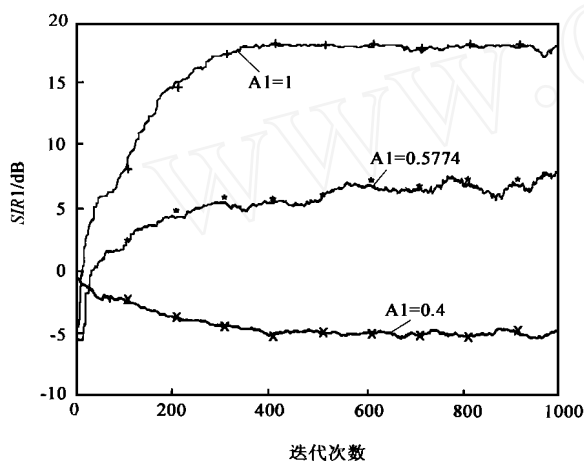


图 1 CM 检测器的输出信干比

5 结论

本文分析了常数模方法抑制多址干扰的能力. 得出本文的主要结论: 当解调信号的接收幅值小于临界值 $1/\sqrt{3}$ 时, 常数模方法抑制多址干扰的能力较差; 相反, 则具有较强的

多址干扰抑制能力. 同时指出并纠正了文献 [5] 中的错误. 仿真分析验证了本文的结论. 本文的讨论仅限于高斯信道, 对于衰落信道可作类似分析, 还有待研究.

参考文献:

- [1] Verdu S. Multiuser Detection [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998.
- [2] Honig M, Madhow U, Verdu S. Blind adaptive multiuser detection [J]. IEEE Trans Information Theory, 1995, 41(4): 944 - 960.
- [3] Madhow U. Blind adaptive interference suppression for direct-sequence CDMA [C]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(10): 2049 - 2069.
- [4] Johnson C, Schniter P, Endres T, Behm J, Brown D and Casas R. Blind equalization using the constant modulus criterion: A review [C]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(10): 1927 - 1950.
- [5] Míguez J, Castedo L. A linearly constrained constant modulus approach to blind adaptive multiuser interference suppression [J]. IEEE Communications Letters, 1998, 2(8): 217 - 219.

作者简介:



徐长江 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.



鄧广增 1943 年生, 教授, 主要从事卫星移动通信、无线个人通信的教学与科研工作.

(上接第 19 页)

参考文献:

- [1] M. Vetterli, C. Herley. Wavelets and filter banks: Theory and design [J]. IEEE Trans. on Signal Process, 1992, 40(9): 2207 - 2232.
- [2] S. Schweid, T. K. Sarkar. Projection minimization techniques for orthogonal QMF Filters with vanishing moment [J]. IEEE Trans. on Circuits System, 1995, 42(11): 694 - 701.
- [3] 唐金山, 蔡安妮, 孙景鳌. 正交小波变换中边界的零延拓及其失真恢复 [J]. 电子学报, 1999, 27(1): 89 - 92.
- [4] M. M. Yeung, B. Yeo, M. Holliman. Digital watermarks: shedding light on the invisible [J]. IEEE Micro, 1998, 18(6): 32 - 41.
- [5] 程正兴. 小波分析算法与应用 [M]. 西安交通大学出版社, 1998.
- [6] 刘贵忠, 邱双亮. 小波分析及其应用 [M]. 西安电子科技大学出版社, 1997.
- [7] 崔锦泰著, 程正兴译. 小波分析导论 [M]. 西安交通大学出版社, 1995.
- [8] 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析 [M]. 西安电子科技大学出版社, 1992.
- [9] S. Mallat and S. Zhong. Characterization of signals from multiscale edges [J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(7): 710 - 732.
- [10] Michael L. Hilton, Brian D. Jawerth, Ayan Sengupta. Compression still and moving images with wavelets [EB]. ftp://ftp.math.sc.edu/pub/wavelet/papers/varia/tutorial. 1994, 4, 18
- [11] I. Daubechies. Orthonormal bases of compactly support wavelets [J]. Commun. Pure Appl. Math., 1988, 41: 909 - 996.
- [12] 中国通信学会主编. 数字通信工程 [M]. 人民邮电出版社, 1996.
- [13] S. Mallat. Multifrequency channel decomposition of images and wavelet models [J]. IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal processing, 1989, 37(12): 2091 - 2110.