

周先春. DS-CDMA 系统中两种盲多用户检测恒模算法的比较 [J]. 南京气象学院学报, 2008 31 (6): 890-894

DS-CDMA 系统中两种盲多用户检测恒模算法的比较

周先春

(南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 研究了线性约束恒模算法 (LCCMA, linear constrained constant modulus algorithm) 和线性约束差分恒模算法 (LCDMA, linear constrained differential constant modulus algorithm), 并仿真试验了在期望用户信号幅度不同情况下这两种算法的收敛性和稳定性, 仿真结果与理论推导相吻合。试验表明: LCCM 算法只有在满足信号幅度是 $A \geq 1/\sqrt{3}$ 的情况下才能完全消除多址干扰 (MAI multiaccess interference), 而 LCDCM 算法不论信号幅度是在 $1/\sqrt{3}$ 还是在 $< 1/\sqrt{3}$ 条件下, 都能够正确收敛到目标用户, 具有很好的收敛性和稳定性, 优越于 LCCM 算法。

关键词: 码分多址; 多用户检测; 多址干扰; 恒模算法

中图分类号: TN 914.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2008) 06-0890-05

Comparison of Two Blind Multiuser Detection Algorithms in DS-CDMA System

ZHOU Xian-chun

(School of Electronic and Information Engineering, NUIST, Nanjing 210044, China)

Abstract Linear constrained constant modulus algorithm (LCCMA) and linear constrained differential constant modulus algorithm (LCDMA) were studied in this paper. Using different signal amplitudes to simulate their convergence and stability, its results tally with the theory analysis. Simulation results show that the LCCMA can remove multiple-access interference completely if and only if the desired user's amplitude is no less than the critical value $1/\sqrt{3}$, however the LCDMA in all test situations can converge to desired user. It is superior to LCCMA in fast convergence and robustness.

Key words direct sequence-code division multiple access; multiuser detection; multiaccess interference; constant modulus algorithm

0 引言

直接序列扩频的码分多址 (DS-CDMA, direct sequence-code division multiple access) 系统中的主要干扰为码间干扰和多用户干扰, 多用户检测 (MUD, multiuser detection)^[1] 在传统检测技术的基础上, 充分利用造成多址干扰 (MAI, multiaccess interference)^[2] 的所有用户信号的信息对单个用户的信号进行检测, 从而具有优良的抗干扰性能, 显著提高系统容量。

在无线通信系统中, 为获取信道参数信息而发

射独立的训练序列, 要浪费大量宝贵的频谱资源, 因而人们考虑利用发射信号本身的特性而不需要参考信号来实现正常通信。Agee^[3] 于 1986 年最早提出恒模算法 (CMA, constant modulus algorithm), 这种最小二乘恒模算法 (LSCMA, least squares constant modulus algorithm) 是利用发送信号的幅度统计特性来调整权系数, 它能够快速收敛, 且易于实现, 计算复杂度低, 因此很快发展成为一类重要的盲算法, Honig^[4] 首次将 CMA 应用在多用户检测中。

作为信号处理领域的热点问题, 恒模算法在 20 世纪 90 年代得到了广泛深入的研究及很多改进, 并

将其应用到盲均衡、多用户检测、盲信号分离、干扰抑制和波束形成等领域,不同程度地解决了这些领域的一些难题。但恒模算法本身在实际应用中有一定的局限性,CMA 存在多个局部收敛点,对于初始向量的收敛步长参数的选择有很大的依赖性,容易收敛到局部最小点上,不能保证收敛到目标用户,故不能在动态环境下使用。针对这些问题,人们先后提出了一些有效的解决方法^[5-7],并提出多种恒模算法应用于多个领域^[8]。

1 线性约束恒模算法

恒模算法极易捕捉到干扰信息而非所需信息,而利用所需信息的导向矢量来对恒模算法进行约束,可以解决干扰捕获问题,这就是线性约束恒模算法(LCCMA, linear constrained constant modulus algorithm)的思想^[9]。

考虑有 k 个用户的同步直接序列扩频的码分多址(DS-CDMA)系统,接收信号为

$$r(t) = \sum_{k=1}^K A_k b_k S_k(t) + n(t), \quad t \in [0, T]。 \quad (1)$$

式中: A_k 、 b_k 、 $S_k(t)$ 分别为第 k 个用户接收信号的幅度、信息码元和归一化信号波形; $n(t)$ 是方差为 σ^2 的加性高斯白噪声。 $b_k = \{ \pm 1 \}$, $S_k(t)$ 形式为

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

式中: N 为扩频增益; $(c_0^k, c_1^k, \dots, c_{N-1}^k)$ 为用户 k 取值为 ± 1 的序列; c_j^k 为归一化码片波形, T_c 为码片周期,且 $NT_c = T$ 。

接收信号经过码片匹配滤波,并以码片速率进行取样形成一个 N 维输出向量

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

式中: $s_k = (1/\sqrt{N})(c_0^k, c_1^k, \dots, c_{N-1}^k)^T$ 是用户 k 归一化信号波形向量, n 为均值为 0 协方差矩阵为 $\sigma^2 I_N$ 的高斯白噪声向量(这里 I_N 为 $n \times n$ 恒等单位矩阵), $\{s_k\}_{k=1}^K$ 线性无关。因此,接收机输出端为

$$y = w^T r = \sum_{k=1}^K A_k b_k w^T s_k + w^T n_o \quad (4)$$

在 LCCM 接收机中,滤波器系数 w 由下面的最优问题来确定

$$\min_{w^T s_1 = 1} J(w) = E[(w^T r)^2 - 1]^2。 \quad (5)$$

这里用户 1 是目标用户。

下面分析 LCCM 算法的干扰消除能力。假设在无噪声环境下,令 $u_k = A_k (w^T s_k)$, $u =$

$[u_1, \dots, u_K]^T$ 。又因 $b_k = \{ \pm 1 \}$, 有

$$E(w^T r)^2 = E\left[\sum_{k=1}^K A_k b_k (w^T s_k)\right]^2 = \sum_{k=1}^K u_k^2 = u^T u \quad (6)$$

$$E(w^T r)^4 = E\left[\sum_{k=1}^K u_k b_k\right]^4 = 3(u^T u)^2 - 2 \sum_{k=1}^K u_k^4 \quad [10] \quad (7)$$

因此

$$J(w) = 3(u^T u)^2 - 2u^T u - 2 \sum_{k=1}^K u_k^4 + 1 \quad (8)$$

因线性约束 $w^T s_1 = 1$ 等价于 $u_1 = 1$, (5) 式化为

$$\min_{u_1=1} J(u) = 3(u^T u)^2 - 2u^T u - 2 \sum_{k=1}^K u_k^4 + 1 \quad (9)$$

定义: $\|u\| = (u^T u)^{1/2}$ 。这里

$$u = [u_2, \dots, u_K]^T, \quad u = [1, u^T]^T。 \quad (10)$$

有

$$\frac{\partial J}{\partial u_k} = 4u_k [3(u^T u) - 1 - 2u_k^2] = 4u_k \left[(3u_1^2 - 1) + u_k^2 + 3 \sum_{j=2, j \neq k}^K u_j^2 \right]。 \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 J}{\partial u_k \partial u_l} = \begin{cases} 4[3(u^T u) - 1], & l = k; \\ 24u_k u_l, & l \neq k \end{cases} \quad (12)$$

(1) 当 $3u_1^2 - 1 = 0$ 时, 由 (11) 式显然可得 有唯一稳定点: $u_0 = 0$ 此点的 Hessian 矩阵为

$$H_0 = \begin{bmatrix} 2 \\ u_k u_l \end{bmatrix}_{2 \leq k, l \leq K} = 4(3u_1^2 - 1) I_{K-1} \quad 0 \quad (13)$$

因此, $u_0 = 0$ 为最小点。由 (12) 式易知 严格收敛。

(2) 当 $3u_1^2 - 1 < 0$ 时, 不仅含有稳定点 $u_0 = 0$ 还包括其他非零稳定点, 记为 u_m , 其 m 个非零元素用 u_{k_i} 表示。其中: $i = 1, \dots, m$ ($m \geq 1$); $k_i \in \{2, 3, \dots, K\}$ 。由 (11) 式可得

$$2u_{k_i}^2 = 3(u^T u) - 1。 \quad (14)$$

这里 $u^T = [1, u_m^T]$, 有

$$2u_{k_i}^2 = 3u_1^2 - 1 + 3m u_{k_i}^2。 \quad (15)$$

由 (15) 式可得

$$u_{k_i}^2 = \frac{1 - 3u_1^2}{3m - 2}, \quad (3m - 2) > 0 \quad (16)$$

在 $3u_1^2 - 1 < 0$ 情况下, 具有稳定点 $u_0 = 0$ 和

$$u_m = [u_{m,2}, u_{m,3}, \dots, u_{m,K}]^T。 \quad (17)$$

这里

$$u_{m,k} = \begin{cases} \sqrt{\frac{1-3A_1^2}{3n-2}} & k = k_i, i = 1, \dots, m; \\ 0 & \text{其他。} \end{cases} \tag{18}$$

由上面的分析可得结论 1。

结论 1 1)当 $u_1=A_1$ 且 $3A_1^2-1=0$ 具有单一全局极小点 $u_0=0$ 2)当 $u_1=A_1$ 且 $3A_1^2-1<0$ 具有一个局部极大点 $u_0=0$ 和 $2k-2$ 个局部极小点 $u_1=[0, \dots, 0, u_{k_1}, 0, \dots, 0]^T$ 。这里 $u_{k_1}=\sqrt{1-3A_1^2}, k_1 \in \{2, 3, \dots, K\}$ 。

又因为 $J(w) = (As^T w)$, 这里 $A = \text{diag}([A_1 \dots A_k])$, $S = [s_1 \dots s_k]$ 且 $\{s_k\}_{k=1}^K$ 线性独立, 结合结论 1 可得结论 2。

结论 2 1)当 $3A_1^2-1=0$ 且 $\rho=0$ LCCMA 的代价函数全局最小, 满足如下条件:

$$\begin{aligned} w^T s_1 &= 1, \\ w^T s_k &= 0, k = 2, \dots, K; \end{aligned} \tag{19}$$

2)当 $3A_1^2-1<0$ 且 $\rho=0$ LCCMA 的代价函数局部最小, 其满足:

$$\begin{aligned} w^T s_1 &= 1, \\ w^T s_{k_1} &= u_{k_1}, \\ w^T s_k &= 0, k = k_1, k = 2, \dots, K. \end{aligned} \tag{20}$$

这里 $u_{k_1} = \sqrt{1-3A_1^2}, k_1 \in \{2, 3, \dots, K\}$ 。

由结论 2 可得推论 1。

推论 1 在无噪条件下, 如果 $3A_1^2-1=0$ 有 $w^T s_1=1, w^T s_k=0(k=2, \dots, K)$, 由 $w^T s_k=0(k=2, \dots, K)$ 可知, LCCMA 能完全消除 MAI。

由上可知: 只有初始权矢量为目标用户有效特征波形, 且目标用户信号幅度 $A=1/\sqrt{3}$ 才能收敛到期望点。其次, 信号幅度参数的选取会明显影响线性约束恒模算法收敛特性, 错误选取会使算法性能急剧下降, 甚至发散。在实际多径衰落信道中由于噪声的干扰, 完全消除 MAI 是无法得到满足的, 但在满足 $A=1/\sqrt{3}$ 的情况下, LCCM 还是有着较好的收敛特性, 在本文的第 3 部分对其进行了性能仿真。

2 线性约束差分恒模算法

线性约束差分恒模算法的思想为: 假定在多径衰落信道中, 每个用户共有 L 条多径。首先, 对每条多径分别采用线性差分恒模算法 (LCDMA, linear constrained differential constant modulus algo-

rihm)来进行跟踪, 再恢复每一条有用信号, 同时抑制所有干扰。然后, 对恢复出 L 条多径的信号进行相关合并^[11-12]。

对于第 l 条路径, 取代价函数为

$$\begin{aligned} J(w_l) &= \frac{1}{4} E \{ |y_l(n)|^2 - |y_l(n-1)|^2 \}, \\ S_1^H w_l &= 1_l. \end{aligned} \tag{21}$$

式中: $y_l(n) = w_l^H(n)r(n)$ 为第 l 条路径 n 时刻的输出; $1_l = [0, \dots, 1, 0, \dots, 0]^T$ 为规范约束条件, 即 1_l 为第 l 个位置的值为 1, 其他所有的值为 0 的 1 维矢量。对其进行典范分解成两部分。一部分在由 S_1 组成的空间中, 另一部分则位于它的正交空间中, 权矢量 w_l 由下式给出

$$w_l = w_{q,l} + w_{a,l} \tag{22}$$

矢量 $w_{q,l}$ 为 S_1 列矢量组成的空间, 是一个固定的 N_c 维权矢量, 其中 N_c 为采样长度。 $w_{q,l}$ 由下式给出

$$w_{q,l} = S_1(S_1^H S_1)^{-1} 1_l. \tag{23}$$

式中 $w_{a,l}$ 是一个变化的矢量, 把 (22) 式代入 (21) 式, (21) 式可以表示为 $w_{a,l}$ 的函数:

$$\begin{aligned} J(w_l) &= E \{ [| (w_{q,l} + w_{a,l}(n))^H r(n) |^2 - \\ &| (w_{q,l} + w_{a,l}(n-1))^H r(n) |^2]^2 \}. \end{aligned} \tag{24}$$

(24) 式对 $w_{a,l}$ 求偏导, 可得

$$\begin{aligned} \frac{J(w_l)}{w_{a,l}(n)} &= \\ E \{ [|y(n)|^2 - |y(n-1)|^2] y^*(n) r(n) \}. \end{aligned} \tag{25}$$

求得 $w_{a,l}$ 的更新公式为

$$\begin{aligned} w_{a,l}(n+1) &= w_{a,l}(n) - \frac{J(w_l)}{w_{a,l}(n)} = w_{a,l}(n) - \\ E [|y(n)|^2 - |y(n-1)|^2] y^*(n) r(n). \end{aligned} \tag{26}$$

用瞬时值代替均值则上式变为

$$\begin{aligned} w_{a,l}(n+1) &= w_{a,l}(n) - \\ [|y(n)|^2 - |y(n-1)|^2] y^*(n) r(n). \end{aligned} \tag{27}$$

其中 μ 为步长。

先将 (27) 式 $w_{a,l}(n+1)$ 投影到线性约束空间 $S_1^H w_l = 1_l$ 进行约束, 得 LCDMA 迭代公式,

$$w_l(n+1) = w_{q,l} + P(w_{a,l}(n+1)). \tag{28}$$

式中 $P(\cdot)$ 为投影算子, 利用约束空间投影算法可得其具体值 $P(w) = (I_{N_c} - S_1(S_1^H S_1)^{-1} S_1^H) w$, 在二维情况下, $P(w)$ 可解释为 w 在直线 $S_1^H w_l = 0$ 上的投影, 而 $w_{q,l}$ 为直线 $S_1^H w_l = 0$ 指向 $S_1^H w_l = 1_l$ 的向量。

显然, $\mathbf{w}(k+1)$ 正好落在 $\mathbf{S}_l^H \mathbf{w}_l = \mathbf{1}_l$ 上, 从而保证了约束条件的满足。

权矢量迭代公式变为

$$\mathbf{w}_l(n+1) = \mathbf{w}_{q,l} +$$
$$[\mathbf{I}_{N_c} - \mathbf{S}_l (\mathbf{S}_l^H \mathbf{S}_l)^{-1} \mathbf{S}_l] \mathbf{w}_{a,l}(n+1)。$$

(29)

假设 $\mathbf{H} = \mathbf{I}_{N_c} - \mathbf{S}_l (\mathbf{S}_l^H \mathbf{S}_l)^{-1} \mathbf{S}_l$ 。

相关合并

$$\mathbf{w}(n+1) = \sum_{l=1}^L a_l \mathbf{w}_l(n+1),$$

(30)

$$a_l = h_{kl} / \sum_{l=1}^L h_{kl}$$

(31)

其中 h_{kl} 为多径衰落信道中第 k 个用户第 l 路径的复衰落。(22)~(31)式就构成了线性约束差分恒模算法(LCDCM A)。

3 性能仿真

考虑一个 CDMA 系统, 扩频码采用 Gold 码, 其扩频增益 $N = 31$, 用户数 $K = 5$, 目标用户为 1, 输入信号为二进制相移键控(BPSK)调制。每个用户多径数目为 4 每径参数服从高斯分布, 实验中采用蒙特卡罗法模拟, 每样本点独立运行 50 次。其输出信干比定义为

$$R_{SI} = \frac{E^2 \{ \mathbf{w}^H \mathbf{r} \}}{\text{var} \{ \mathbf{w}^H \mathbf{r} \}} =$$
$$\left| \frac{A_1^2 (\mathbf{w}^H \mathbf{s}_1)^2}{\sum_{k=2}^K A_k^2 (\mathbf{w}^H \mathbf{s}_k)^2 + \sigma^2 \mathbf{w}^H \mathbf{w}} \right|。$$

其中 $\mathbf{w} = [\mathbf{w}_0, \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_{N_c-1}]$ 。

仿真 1 期望用户的信号幅度为 1, 且信道中其他用户造成的 MAI 为 10 dB 时, 比较 LCCM 算法和 LCDCM 算法的 R_{SI} 与迭代次数的性能关系, 其仿真结果如图 1a 所示。

仿真 2 期望用户的信号幅度为 0.2 且信道中其他用户造成的 MAI 为 10 dB 时, 比较 LCCM 算法和 LCDCM 算法的 R_{SI} 与迭代次数的性能关系, 其仿真结果如图 1b 所示。

由图 1a 可知: 在目标用户信号幅度值为 1 的情况下, LCDCM 算法与 LCCM 算法的性能近似, 有着良好的收敛性和稳定性, 能够收敛到期望用户, 只是 LCCM 算法比 LCDCM 算法的收敛速度要慢, 这是因为 LCCM 算法需要对目标模值进行搜索, 降低了收敛速度。

由图 1b 知: 当期望用户的信号幅度为 0.2 时, LCDCM 算法的性能几乎没有改变, 而 LCCM 算法的输出信干比则很差, 因为此时的信号幅度为 0.2 小于 $1/\sqrt{3}$ 较多, 有 $(2k-2)$ 个非零稳定点, 它们造成的多址干扰相对较大, 从而导致性能急剧恶化, 使得该算法不能收敛到期望用户的所需解。

4 结论

本文研究了线性约束恒模算法和线性约束差分恒模算法, 其中线性约束恒模算法需对目标用户的幅值进行搜索, 从而降低了收敛速度。而线性约束差分恒模算法不需要具体知道期望用户的信号幅值, 只需要知道相邻两次信号的幅度值的差值即可,

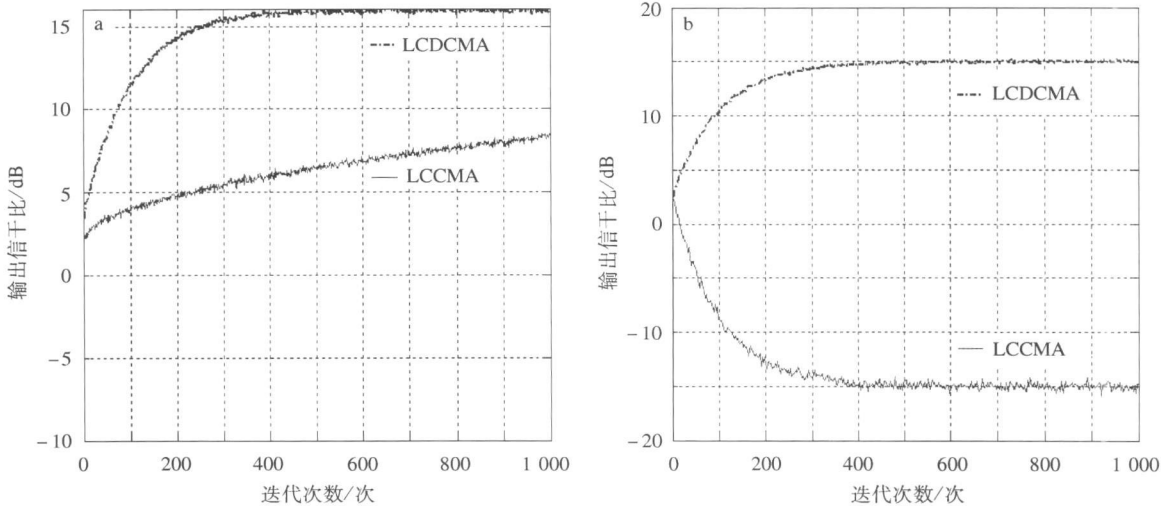


图 1 信号幅度 A 为 1 和 0.2 时两种算法的 R_{SI} 性能曲线

Fig. 1 The output R_{SI} versus number of iterations with two algorithms for signal amplitude values $A = 1$ and 0.2

该算法巧妙地避免了对目标幅值的搜索。仿真结果表明,在期望用户信号幅度 $1/\sqrt{3}$ 的情况下,线性约束恒模算法的性能与线性约束差分恒模算法近似,有着良好的收敛性和稳定性,当与目标信号幅值有偏差时,线性约束恒模算法的干扰抑制性能将减弱,当目标信号幅值为 0.2 时,偏离重要值 $1/\sqrt{3}$ 较大,此时,线性约束恒模算法收敛性能恶化,导致该算法不能收敛到期望用户,输出信干比性能较差。而线性约束差分恒模算法可以在任意初始条件下,能正确收敛到目标用户,即对任意初始值及任意模值具有很好的鲁棒性,无论收敛速度和稳态性,比线性约束恒模算法要优越,具有很高的实用价值。

参考文献:

[1] Honing M, Madhow U, Verdu S. Blind multiuser detection[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1995, 41(4): 944-960.

[2] 张贤达, 保铮. 通信信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.

[3] Agee B G. The Least-Squares CMA: A new technique for rapid correction of constant modulus signals[C] //Proc IEEE International Conference Acoustics Speech, Signal Processing Tokyo April 1986. 1986 953-956

[4] Honing M L. Orthogonally anchored blind interference suppression using the Sab cost criterion[C] //Proc IEEE International Symposium on Information Theory, Chicago, 17-22 Sep 1995. 1995: 314-318

[5] Luis C, Carlos J E, Adriana D. A blind signal separation method

formultiuser communications[J]. IEEE Transaction on Signal Processing 1997, 45(5): 1343-1348

[6] Feng A igang Wu X iaojun, Yin Q inye. A feedback adaptive space-time constant modulus algorithm in DS-CDMA multiuser detection[J]. IEEE Transaction on Signal Processing 2001, 54(4): 1975-1978.

[7] Ping He, T ihung T T, Rasmussen L K. Constant modulus algorithm for CDMA communications systems[J]. IEEE Transaction on Communication 1998, 48(2): 949-953.

[8] 冯燮, 廖桂生. 恒模算法: 进程与展望[J]. 信号处理, 2003, 19(5): 441-447.

[9] 蒋笑冰. 基于 LCCM A 的盲自适应多用户检测新算法[J]. 铁道学报, 2004, 26(5): 67-71

[10] Tang Zuqiang Yang Zhixing. C losed-form analysis of linearly constrained CM A-based multiuser detector [J]. IEEE Communication Letters 2000, 4(9): 273-276

[11] 陈长征, 王华力, 甘仲民. 线性约束差分恒模算法[J]. 电子学报, 2002, 30(6): 872-875

[12] 周先春. 异步 CDM A 系统中的 LCDCM 多用户检测器[J]. 安徽师范大学学报: 自然科学版, 2004, 27(4): 410-413.

[13] Xu Zhengyuan Liu Ping. Constrained CM A-based multiuser detection under unknown multipath personal indoor and mobile radio communications[J]. IEEE International Symposium on Information Theory, 2001, 12(1): 21-25

[14] 谢跃雷, 欧阳缙, 赖伟明. 多径衰落信道下的一种盲多用户检测方法[J]. 通信学报, 2005, 26(2): 53-57.

[15] 潘伟钢, 胡斌杰, 韦岗. 一种新的无线信道多用户检测算法[J]. 电波科学学报, 2005, 20(6): 37-40.

[16] 傅洪亮, 鄧广增. 线性受限最小二乘恒模盲多用户检测算法[J]. 信号处理, 2005, 21(5): 66-69.