

CDMA 中的半盲恒模算法

刘胜美 赵春明 李灿伟

(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘要: 该文研究了应用于 CDMA 上行链路多用户检测中的半盲恒模算法。它首先利用非盲算法消除所有小区内干扰用户的影响,接着再利用盲算法抵消剩余的干扰。通过仿真实验,将之与盲恒模算法及解相关算法相比较,可以看出在干扰用户增多时,本文提出的半盲恒模算法的性能明显优于另外两种算法。

关键词: CDMA, 多用户检测, 半盲恒模

中图分类号: TN911.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)01-0072-03

Semi-blind Constant Modulus Algorithm for CDMA System

Liu Sheng-mei Zhao Chun-min Li Can-wei

(National Mobile Communication Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract The semi-blind Constant Modulus (CM) algorithm which applied in the Multi-User Detection (MUD) of CDMA is studied. This approach fully utilizes all known users' information, performs not-blind detector to suppress the interferers within the cell, and exploits blind detector to suppress the inter-cell interference. Compared with the blind CM algorithm and the decorrelating algorithm, the proposed semi-blind CM algorithm exhibits better SIR and BER performances and it is more robust when the system is heavily loaded.

Key words CDMA, Multi-User Detection(MUD), Semi-blind Constant Modulus(CM)

1 引言

多用户检测 (Multi-User Detection, MUD) 技术是一种改善 CDMA 系统检测性能及提高系统容量的有效技术。由于 1986 年 Verdu 提出的最优多用户检测复杂度高,所以近年来人们多研究复杂度较低的次优多用户检测,尤其是解相关检测器和 MMSE 检测器这些非盲线性检测器。早期研究的这些算法一般都假定在接收端知道所有用户的扩频序列,实际情况并非如此,基站一般知道本小区内用户的扩频序列,而不知道相邻小区用户的扩频信息。所以非盲检测一般只能抵消小区内干扰(Intra-cell MAI),无法抵消小区间干扰(Inter-cell MAI),而小区外干扰也是不容忽视的。

假定接收端知道所有用户或大多数用户的扩频序列对移动台来说是不现实的,因为移动台一般只知道自己的扩频序列,而不知道其它干扰用户的扩频序列,因此人们发展出一种盲多用户检测技术。这种盲检测技术只需要待测用户的扩频序列信息就可以进行检测,它能抵消小区内干扰及小区间干扰^[1],所以盲检测技术适用于移动台。

如果将盲检测直接用于基站,则它不能充分利用基站已有的信息(如小区内干扰用户的扩频信息)进行检测。所以出现了一种将非盲检测与盲检测相结合的半盲检测技术。半

盲检测是干扰用户特征序列部分已知部分未知条件下的检测,适用于基站。它能抵消小区内干扰和小区间干扰,并且在实际系统中其性能一般比单纯用非盲检测或盲检测技术性能要好。

本文将子空间方法与恒模算法相结合,提出一种半盲恒模算法,将之应用于 CDMA 上行链路多用户检测器中,与盲恒模算法及解相关算法相比较。通过理论分析及仿真结果,可看出半盲恒模算法在文中所述环境中的优越性。

2 半盲多用户检测技术

目前研究的半盲 MUD 技术主要有两类:基于子空间方法的半盲线性 MUD 技术^[2-4]和将线性与非线性多用户检测技术结合的混合型半盲 MUD 技术^[5,6]。

下面主要简单介绍一下第一种半盲线性 MUD 技术,其主要思想是通过子空间方法^[7]从观察空间中消除小区内所有用户的干扰,这样获得小区外干扰用户的子空间,继而通过代数运算将此子空间与用户特征序列相结合得到半盲多用户检测器。其系统模型如下:

考虑同步 CDMA 系统,小区内用户 K_u 个,小区外用户 K_e 个,接受信号经过 chip 匹配滤波器、以 chip 速率采样得到接收信号向量形式:

$$r = \sum_{k=1}^{K_n} b_k A_k s_k + \sum_{k=1}^{K_u} \tilde{b}_k \tilde{A}_k \tilde{s}_k + n = SAb + \tilde{S}\tilde{A}\tilde{b} + n \quad (1)$$

其中 $S = [s_1, s_2, \dots, s_{K_n}]$ 是小区内用户扩频序列矩阵, A 是用户幅度矩阵, b 是发送的数据信息; 同理 $\tilde{S} = [\tilde{s}_1, \tilde{s}_2, \dots, \tilde{s}_{K_u}]$, $\tilde{A}, \tilde{b}$ 是小区外用户相应信息; n 是均值为 0, 方差为 σ^2 的白噪声序列。则 r 的互相关矩阵可写成:

$$R = E[rr^T] = SA^2S^T + \tilde{S}\tilde{A}^2\tilde{S}^T + \sigma^2 I \quad (2)$$

假定所有扩频码是线性无关的, 则 $[S \ \tilde{S}]$ 是满秩矩阵。

对接收向量 r 的观察空间可以通过对 r 的自相关矩阵 R 作 ED (特征值分解) 分为信号子空间和噪声子空间。对 R 进行 ED 得

$$R = [U_s \ \tilde{U}_s \ U_n] \begin{bmatrix} \Lambda_s & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{\Lambda}_s & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_s^T \\ \tilde{U}_s^T \\ U_n^T \end{bmatrix} \quad (3)$$

文献 [2] 中获得半盲解相关检测器的步骤如下:

(1) 首先从观察空间中消除所有小区内用户的影响。为此, 将接收信号 r 向正交于 $\text{span}(S)$ 的子空间上投影得到新的向量 $\tilde{r}$, 即

(a) 找到在 $\text{span}(S)$ 上的正交投影矩阵 P :

$$P = S(S^T S)^{-1} S^T \quad (4)$$

(b) 找到正交于 $\text{span}(S)$ 的子空间上的投影矩阵:

$$P^\perp = I - P \quad (5)$$

(c) 将接收信号投影到正交于 $\text{span}(S)$ 的子空间上, 得

$$\tilde{r} = P^\perp r \quad (6)$$

(2) 用子空间跟踪方法跟踪 $\text{span}(\tilde{S})$ 的特征元素 ($\tilde{U}_s, \tilde{\Lambda}_s$)。

(3) 通过 $\tilde{U}_s, \tilde{\Lambda}_s$ 和 R 利用下式获得半盲解相关多用户检测 (对小区内所有用户的联合检测):

$$\hat{b} = \text{sgn}((S^T S)^{-1} S^T (I - R\tilde{U}_s(\tilde{\Lambda}_s - \sigma^2 I)^{-1} \tilde{U}_s^T) r) \quad (7)$$

3 半盲恒模算法

本文提出的半盲恒模算法, 其基本思想是将接受信号投影到小区内干扰用户的补空间上以消除其干扰, 接着利用恒模算法^[8]抵消剩余的干扰。其步骤如下:

首先利用子空间方法抵消小区内干扰用户的影响。令

$$S_1 = [s_2 \ s_3 \ \dots \ s_{K_n}] \quad (8)$$

则消除了小区内干扰用户影响的信号为

$$\tilde{r} = (I - S_1(S_1^T S_1)^{-1} S_1^T) r \quad (9)$$

接着利用恒模算法抵消剩余的干扰。恒模 (Constant Modulus, CM) 算法一般是使下面的非线性代价函数最小化:

$$J(p, q) = E[|y|^p - 1]^q \quad (10)$$

其中指数 p 和 q 等于 1 或 2, 利用不同的 p 和 q , 即可发展多种不同的最陡下降恒模算法, 它们具有不同的收敛特性和复杂度。本文选用 $J(2, 1)$ 代价函数, 算法如下:

$$y(k) = w^T(k) r(k) \quad (11)$$

$$e(k) = 2y(k) \text{sgn}(|y(k)|^2 - 1) \quad (12)$$

$$w(k+1) = w(k) - ue(k)r(k) \quad (13)$$

在半盲恒模算法中, 上 3 式中用 $\tilde{r}$ 代替 r , 即将接收信号 r 向正交于 $\text{span}(S_1)$ 的子空间上投影得到新的向量 $\tilde{r}$, 从观察空间中消除所有小区内干扰用户的影响, 接着再利用盲算法抵消剩余的干扰。半盲算法由于先利用已知信息抵消了一部分干扰, 接受信号中的干扰因素减少了, 这时再用盲算法来抵消新的接受信号中的多址干扰, 比起直接用盲算法来抵消原接受信号中的多址干扰来说, 半盲算法的性能会有所提升。

另外, 在本文中用作比较的解相关算法如下:

$$w = (I - S_1(S_1^T S_1)^{-1} S_1^T)^T s_1 \quad (14)$$

4 仿真实验

假设一同步 CDMA 系统。目标用户为用户 1, 各用户发送功率相同。其处理增益 $N = 31$, 小区内用户数 $K_n = 10$, 小区外用户数为 $K_u = 4$ 。信噪比 SNR 为 20dB (图 1(a))、10dB (图 1(b)); 输出的信干比 SIR 定义为

$$\begin{aligned} \text{SIR} &= E^2\{w^T r\} / \text{var}\{w^T r\} \\ &= A_1^2 (w^T s_1)^2 / (\sum_{k=2}^{K_x} A_k (w^T s_k)^2 + \sigma^2 w^T w) \end{aligned} \quad (15)$$

其中在恒模算法中 $K_x = K_n + K_u$; 在半盲恒模算法中 $K_x = K_n$, 仿真中恒模算法步长为 $u = 0.001$ 。

3 种算法 SIR 性能仿真结果如图 1 所示。

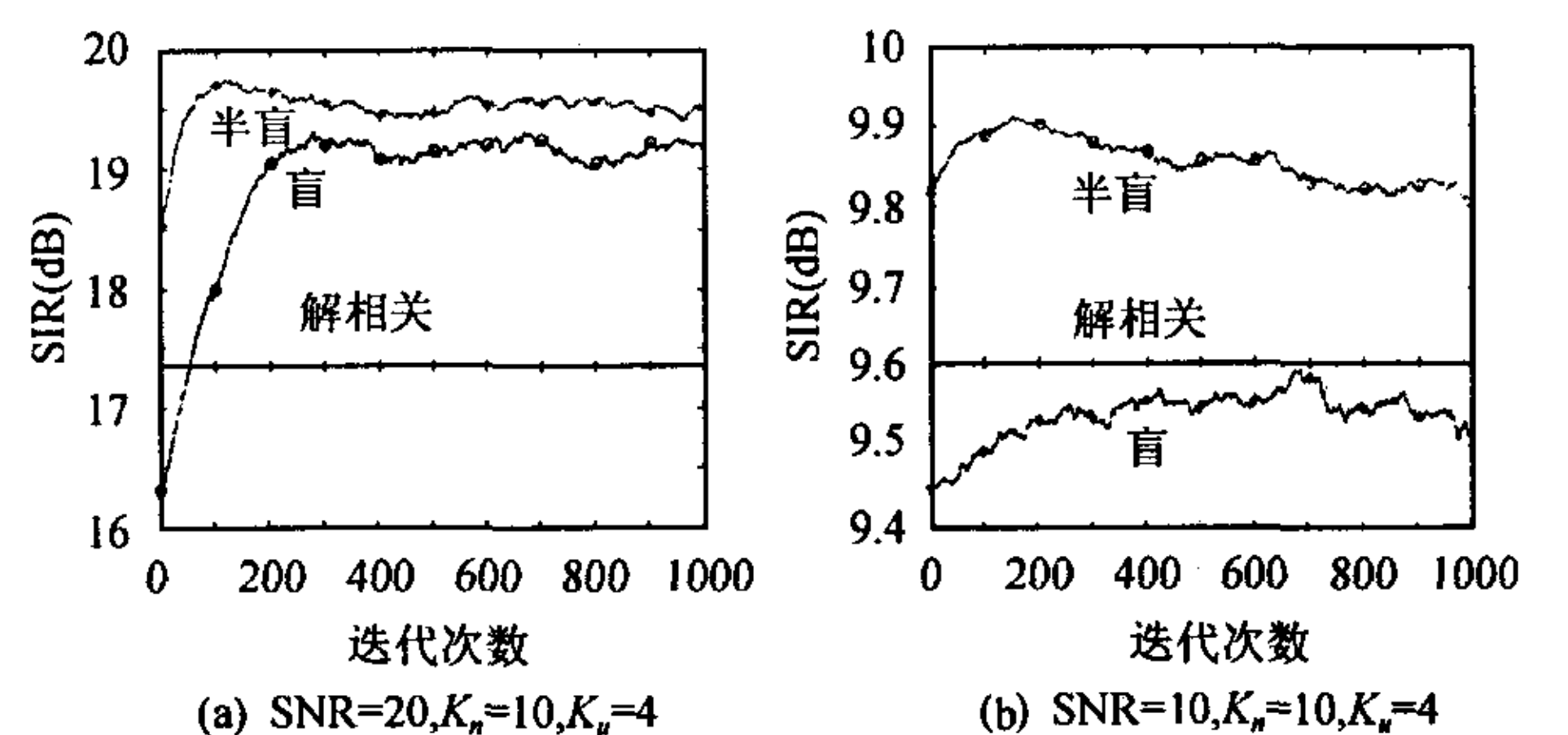


图 1 3 种算法 SIR 性能比较图

下面是 3 种算法误码率 BER 性能比较图。图 2(a)仿真条件是 $N = 31, K_n = 10, K_u = 7$; 图 2(b)仿真条件是 $N = 63, K_n = 40, K_u = 7$ 。由图 1 可以看出半盲恒模算法较另外两种算法有更好的 SIR 性能, 即更好的抗 MAI 的能力。由图 2 可以看出在系统负荷较小时, 半盲恒模算法与另两种算法的 BER 性能相差不多。但当系统负荷增加, 即小区干扰用户数增多时, 提高 SNR 能极大地改善半盲恒模算法的 BER 性能, 而盲恒模算法几乎没有什么改善、非盲算法改善速度远没有半盲恒模算法那么快且与半盲算法的差距越来越明显。当 BER 为 10^{-2} 时半盲算法与非盲算法相差 1.1dB, 当 BER 为 10^{-3} 时半盲算法与非盲算法相差 3dB。由此可以看出, 半盲恒模算法有更好的抗干扰、抗衰落性能。

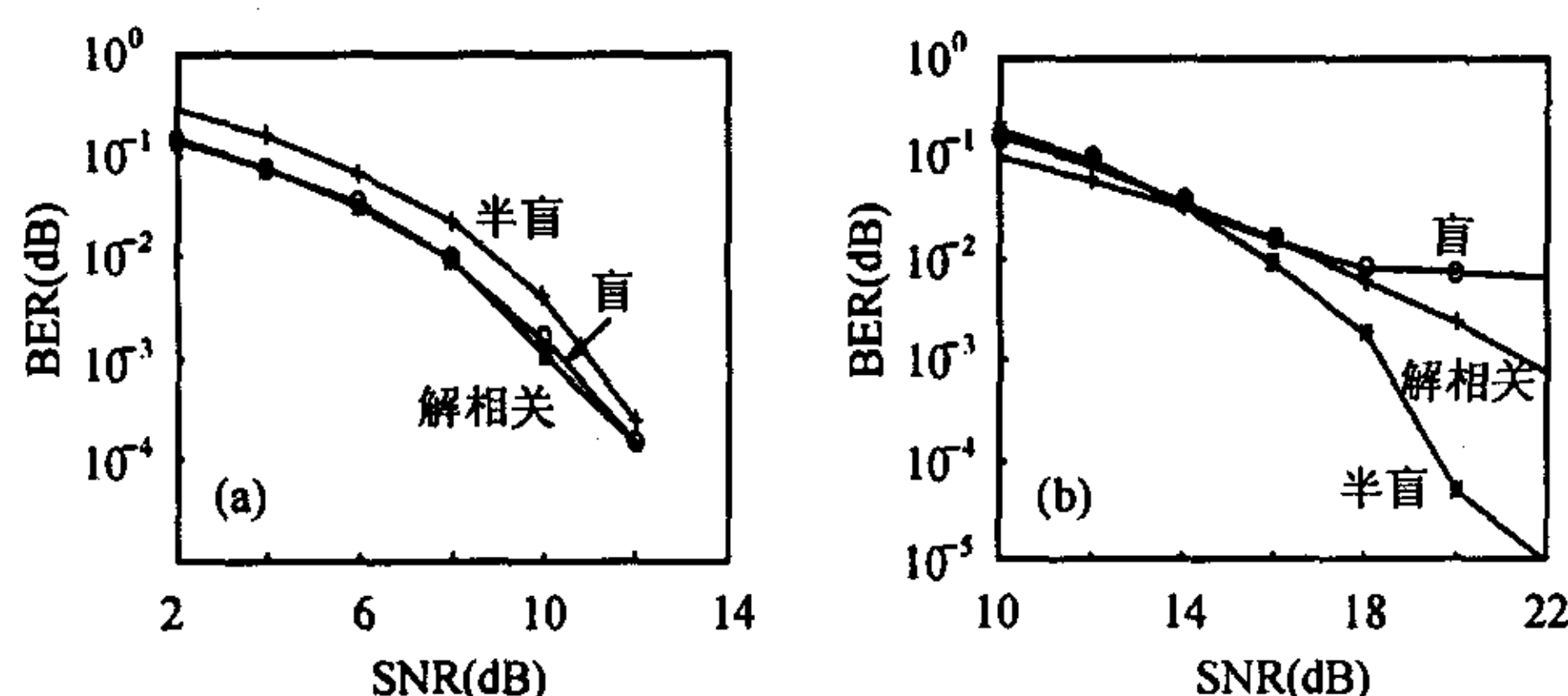


图 2 三种算法 BER 性能比较图

5 结束语

本文将子空间方法与恒模算法相结合, 提出一种半盲恒模算法, 将之应用于 CDMA 上行链路多用户检测器中。由于基站一般知道小区内干扰的相关信息, 所以如果首先利用非盲算法消除所有小区内干扰用户的影响, 接着再利用盲算法抵消剩余的干扰, 比单纯用盲算法或非盲算法其性能要好。通过仿真实验, 将之与盲恒模算法及解相关算法相比较,

可以看出在干扰用户增多时, 本文提出的半盲恒模算法的性能明显优于另外两种算法。

参考文献

- [1] Hoing M, Madhow U. Blind adaptive multiuser detection[J]. *IEEE Trans. on Info. Theory*, 1995, 41(4): 944 – 960.
- [2] Anders H. Semi-blind decorrelating multiuser detectors for CDMA: subspace methods[A]. *IEEE PIMRC'98[C]*, Boston, USA, 1998: 202 – 207.
- [3] Anders H. Semi-blind multi-user detectors for CDMA: subspace methods[A]. *Proc. of ACSSC[C]*. Pacific Grove, USA, 1998: 1858 – 1862.
- [4] Anders H. Hybrid semi-blind multiuser detectors for CDMA: subspace tracking methods[A]. *Proc. of ICASSP[C]*. Phoenix, USA, 1999: 2695 – 2698.
- [5] Varanasi M. Near-optimum detection in synchronous code-division multiple-access systems[J]. *IEEE Trans. on Comm.*, 1990, 39(3): 825 – 836.
- [6] Xu Z, Cheng R. Multistage semi-blind adaptive multiuser detector for reverse link in CDMA systems[A]. *IEEE IC C' 2001 [C]*. Helsinki, Finland, 2001: 16 – 20.
- [7] Wang X, Poor H. Blind adaptive multiuser detection: a subspace approach[J]. *IEEE Trans. on Info. Theory*, 1998, 44(2): 677 – 691.
- [8] Xu C, Feng G. Comments on a linearly constrained constant modulus approach to blind adaptive multiuser interference suppression[J]. *IEEE Comm. Lett.*, 2000, 4(1): 280 – 282.

- 刘胜美: 女, 1977 年生, 博士生, 主要研究方向为多用户检测技术、OFDM 中关键技术。
- 赵春明: 男, 1959 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为扩频通信、编解码、自适应信号处理等。
- 李灿伟: 男, 1974 年生, 工程师, 中兴通讯公司南京技术中心 3G 平台。