

DS/CDMA 系统中的一种自适应单用户接收机

马海波, 刘 芳, 焦李成

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 本文提出了一种在异步多径 DS/CDMA 系统中基于独立分量分析算法的单用户接收机, 这种接收机仅需要已知期望用户的定时和特征波形, 计算量小、结构简单. 它不但能用于在基站进行多用户信号的上行接收, 而且适合于用在移动台进行下行接收. 其性能较之匹配滤波器和盲 MMSE 多用户检测器有很大提高.

关键词: 码分多 (CDMA); 单用户接收; 独立分量分析 (ICA)

中图分类号: TN929.533 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 12-1783-03

A Novel Adaptive Single-User Receiver for DS/CDMA Systems

MA Hai-bo, LIU Fang, JIAO Li-cheng

(Key Lab for Radar Signal Processing Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: A novel single-user receiver based on ICA in asynchronous multipath DS/CDMA channels is proposed in the paper, which require prior knowledge of only the spreading waveform and the timing of the desired user's signal. It is seen that the proposed single-user receiver offer substantial performance gains over the matched filter and blind MMSE multiuser detector.

Key words: CDMA; single-user receiver; ICA

1 引言

第三代移动通信系统的显著特点是宽带、高容量和高速率. 针对移动信道的动态复杂性, 目前有关第三代移动通信系统的研究热点是多用户检测、智能天线、空时二维处理等技术. 这些技术大多要求预先知道很多的系统参数或需要庞大复杂的接收设备 (如阵列天线), 适合在基站用于上行接收, 而无法在移动台使用^[1,2]. 但在第三代通信系统中的高速数据、多媒体业务更可能出现在下行信道, 考虑到这种非对称需求, 以后的瓶颈应该是下行接收.

CDMA 接收机能被大致划分为两类: 多用户和单用户接收机^[8]. 单用户接收机检测单个用户的信号, 它仅需要知道有关期望用户的扩频码和定时的先验知识. 而多用户接收机需要已知所有用户的扩频码、定时及接收功率. 另外, 单用户接收机的复杂度低于多用户接收机, 并且与用户数无关.

本文提出的基于独立分量分析^[3-7]的 CDMA 信号接收方法是一种自适应的单用户接收方法, 它仅需要知道期望用户定时和扩频码、计算量小、结构简单、不需要训练序列, 在异步多径信道中表现出了较好的抗多址干扰和抗远近性能, 非常适用于在移动台进行下行接收. 当然也能够用在基站的上行接收.

2 数学模型

常见的接收端信号模型可以表示如下:

$$S(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=-M}^M \sqrt{2E_k} b_k(i) \sum_{l=1}^L \alpha_{kl} c_k(t - iT - \tau_{kl}) + \sigma n(t) \quad (1)$$

其中 $n(t)$ 是具有单位功率谱密度的高斯白噪声, $2M+1$ 是每帧数据的长度, T 是码元间隔, 而 E_k 、 $\sqrt{2E_k}$ 和 $b_k(i) \in \{1, -1\}$, $|c_k(t)|; 0 \leq t \leq T$ 分别表示第 k 个用户的信号能量、幅度、码元序列和扩频码, α_{kl} 是第 k 个用户第 l 条路径的衰落因子, τ_{kl} 是时延. 对直接序列扩频多址方式, 用户扩频波形是:

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

其中 N 是扩频增益; $(\beta_0^k, \beta_1^k, \dots, \beta_{N-1}^k)$ 是分配给第 k 个用户的 ± 1 符号序列; ψ 是 T_c 期间的标准化码片波形, $NT_c = T$.

3 基于独立分量分析的 DS/CDMA 单用户接收机

作者在以前的文章中曾经提出过一些基于独立分量分析的多用户检测方法^[9], 那些方法是在匹配滤波器之后级联前馈神经网络, 用独立分量分析算法调整神经网络的突触权矩阵, 从而达到多用户信号分离的目的. 这些方法需要知道所有用户的扩频波形和定时, 只适合在基站用作上行接收. 本文提出的方法是对天线接收到的信号以码片速率进行采样, 将采样结果输入到前馈神经网络, 神经网络的初始权值根据期望信号的扩频码设定. 在经独立分量分析算法调整后, 这种单用

收稿日期: 2001-05-21; 修回日期: 2002-02-25

基金项目: 国家“863”计划和国家自然科学基金 (No. 60073053)

户接收方法在存在强多址干扰和远近效应的情况下,能够达到较高的误码率性能,明显优于匹配滤波和盲 MMSE 多用户检测方法。

3.1 独立分量分析

独立分量分析是盲信号分离的一种基本方法,首先讨论盲信号分离的数学模型。在本文中,把多用户 CDMA 通信信号的分离问题等效为盲信号分离问题加以处理。盲信号分离可用如下的数学模型^[1,4,5]描述:

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{A}\mathbf{s}(k) \quad (3)$$

式中 $\mathbf{x}(k) = [x_1(k), \dots, x_n(k)]^T$ 是被观测到的传感器输出信号, $\mathbf{s}(k) = [s_1(k), \dots, s_n(k)]^T$ 是相互独立零均值的未知源信号, $\mathbf{A} = [a_{ij}] \in R^{n \times n}$ 是混合矩阵。

从传感器观测到的信号 $\mathbf{x}(k)$ 用一个线性单层前馈神经网络进行处理,得到:

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{W}(k)\mathbf{x}(k) \quad (4)$$

式中, $\mathbf{W}(k)$ 是 $n \times n$ 维突触权矩阵,也称为解混矩阵。盲信号处理的目的是自适应调整 $\mathbf{W}(k)$ 使得:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{W}(k) = \mathbf{\Lambda} \mathbf{P} \mathbf{A}^{-1}$$

式中, $\mathbf{\Lambda}$ 为非奇异的对角矩阵; $\mathbf{P}$ 为交换矩阵。

独立分量分析^[3-7]所要处理的基本问题是:根据源信号相互独立这一信息,将 n 个源信号从它们的线性混合中“等变化”地分离出来。“等变化”的属性意味着算法的收敛速率、稳定性条件和抗干扰能力只取决于源信号的分布,而与混合矩阵无关。从信息论观点看,要将独立的混合信号分离,就需要使输出分量之间的互信息最小化,在理想情况下直至趋于零。为此应从神经网络系统输出的互信息的最小化来推导权矩阵的更新公式。假定系统可以用式(4)表征,最小互信息(MMI: minimum mutual information)的基本思想是选择神经网络的突触权矩阵 $\mathbf{W}$,使输出 $\mathbf{y}$ 的各个分量之间的相依性最小。这一相依性可用 $\mathbf{y}$ 的概率密度函数 $p_y(\mathbf{y}, \mathbf{W})$ 与其分解形式 $\tilde{p}_y(\mathbf{y}, \mathbf{W})$ 之间的 Kullback-Leibler(KL)散度 $D(\mathbf{W})$ 度量^[1],即 $D(\mathbf{W}) = KL[p_y(\mathbf{y}, \mathbf{W}) \parallel \tilde{p}_y(\mathbf{y}, \mathbf{W})]$

$$= \int p_y(\mathbf{y}, \mathbf{W}) \log \frac{p_y(\mathbf{y}, \mathbf{W})}{\tilde{p}_y(\mathbf{y}, \mathbf{W})} d\mathbf{y}$$

式中,分解形式的概率密度函数 $\tilde{p}_y(\mathbf{y}, \mathbf{W})$ 是 $\mathbf{y}$ 的边缘概率密度函数的乘积,即 $\tilde{p}_y(\mathbf{y}, \mathbf{W}) = \prod_i p_i(y_i, \mathbf{W})$,而边缘概率密度函数 $p_i(y_i, \mathbf{W})$ 定义为:

$$p_i(y_i, \mathbf{W}) = \int \dots \int p_y(\mathbf{y}, \mathbf{W}) dy_1 \dots dy_{i-1} dy_{i+1} \dots dy_n$$

Comon 证明,互信息是独立分量分析的对比函数,即

$$I(\mathbf{W}) = 0 \quad \text{iff} \quad \mathbf{W} = \mathbf{\Lambda} \mathbf{P} \mathbf{A}^{-1}$$

这意味着,当且仅当 $\mathbf{y} = \mathbf{W}\mathbf{x} = \mathbf{\Lambda} \mathbf{P} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{A}\mathbf{s} = \mathbf{\Lambda} \mathbf{P}\mathbf{s}$ 的各个分量独立时,互信息 $I(\mathbf{W})$ 等于零,用熵表示互信息,可以证明互信息与 KL 散度相等,所以互信息具有和 KL 散度相同的性质。由 KL 散度出发,文献[1]给出了更新权矩阵 $\mathbf{W}$ 的随机梯度算法为:

$$\frac{d\mathbf{W}}{dt} = \eta(\mathbf{W}^{-T} - \phi(\mathbf{y})\mathbf{y}^T) \quad (5)$$

Yang 等人对随机梯度算法(5)加以改进,得到:

$$\frac{d\mathbf{W}}{dt} = \eta(\mathbf{I} - \phi(\mathbf{y})\mathbf{y}^T) \mathbf{W} \quad (6)$$

式中, $\phi(\cdot)$ 表示一高阶非线性可微奇函数。

与随机梯度算法(6)相似,在权矩阵更新表达式中引入两个不同的高阶非线性可微奇函数,可以得到另一种独立分量分析算法:

$$\frac{d\mathbf{W}}{dt} = \eta(\mathbf{I} - \phi(\mathbf{y})\varphi(\mathbf{y}^T)) \mathbf{W} \quad (7)$$

这种算法被称为迭代求逆算法,其正式的推导可以在文献[5]中找到。

下面考虑步长的选择,选择合适的步长对于算法的稳定性及快速收敛是至关重要的。理论分析表明^[5,6]:对于迭代求逆算法(7)而言,为保证算法的稳定及快速收敛,步长必须满足下面的关系:

$$\eta(k) < \frac{1}{\|\mathbf{R}_{\phi\varphi}(k) - \mathbf{I}\|_p} \quad (8)$$

其中, $\|\cdot\|_p$ 表示矩阵的 p 范数。在实际当中, $\mathbf{R}_{\phi\varphi}(k)$ 用瞬时值 $\phi(\mathbf{y}(k))\varphi^T(\mathbf{y}(k))$ 代替,选取下式作为步长:

$$\eta(k) = \frac{\mu}{1 + \mu \|\phi(\mathbf{y}(k))\varphi(\mathbf{y}(k))\|} \quad (9)$$

式中, $0 < \mu < 1$ 。类似的结果可以推广到随机梯度算法,只需令 $\phi(\mathbf{y}) = \mathbf{y}$ 或 $\varphi(\mathbf{y}) = \mathbf{y}$ 即可。

3.2 基于独立分量分析的 DS/CDMA 单用户接收机

我们提出的基于独立分量分析的单用户接收方法,是将天线接收到的多用户 CDMA 信号以码片速率进行采样,然后将采样得到的结果输入到前馈神经网络,神经网络的突触权矩阵用独立分量分析算法进行调整。考虑到下行接收的实际需要,只要求检测到某一期望信号,所以按期望用户的定时进行采样,并根据期望用户的扩频码设定突触权矩阵的初值,在理论上应该可以得到理想的信号分离效果。计算机仿真结果表明了在存在多址干扰和远近效应的情况下,这种基于独立分量分析的单用户接收机具有较好的误码率性能。当然这种方法也能用在基站进行上行接收。其基本结构如图 1 所示。

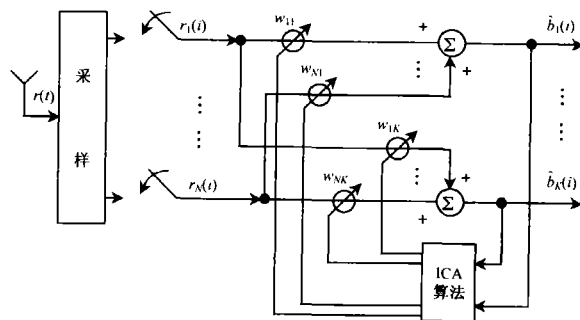


图 1 本文提出的 DS/CDMA 单用户接收机

我们知道,用独立分量分析算法进行盲信号分离时,分离出的信号的顺序和波形复振幅(幅值和相位)具有不确定性。本文提出的单用户接收方法也存在这样的问题。事实上,对 CDMA 通信信号而言,它所携带的全部信息都包含在信号的符号当中,所以我们只关心所检测到的信号的符号,而对它们

的排序和精确的幅值不感兴趣。

4 仿真结果

本文对异步多径 DS/CDMA 系统进行仿真,采用扩频增益为 31 的 Gold 码。设第 k 个用户的信号幅度为 A_k ,信号能量为 $E_k = A_k^2/2$,加性高斯噪声的均方差为 σ 。

凭经验选取非线性函数: $\phi(y) = y^2 \text{sign}(y)$ 和 $\varphi(y) = \tanh(10y)$ 。对于迭代求逆算法,选取步长中的参数 $\mu = 0.005$ 。而在随机梯度算法中选取 $\mu = 0.001$ 。初始突触权矩阵 $W(0)$ 中有一行设定为期望用户的扩频码。

假定系统中有 8 个用户,用户 1 为期望用户。路径数为 3,其中有一条为主路径,衰减系数为 0.6,另外两条的衰减系数均为 0.2。每个用户每条路径的时延为整码片,在区间 $[0, 30]$ 内均匀分布。在仿真中令 $A_1/\sigma = 10\text{dB}$ 。

期望用户误码率随多址干扰变化曲线如图 2 所示。该结果是各种方法都经过 500 次迭代之后,用 100000 个数据进行检验得到的。仿真中考虑到了分离出的多个信号顺序的不确定性及其相位的模糊性。

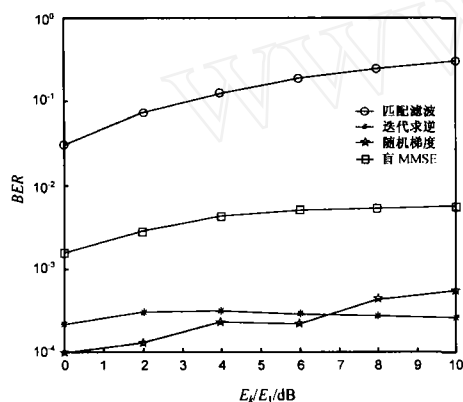


图 2 此单用户接收机在异步多径条件下的误码率性能

5 结论

本文提出的 DS/CDMA 单用户接收机是将天线接收下来的信号按码片速率进行采样,然后将采样结果输入到一前馈神经网络,并用独立分量分析算法调整神经网络的突触权矩阵。理论分析和仿真结果表明这种方法在异步多径条件下具有较好的抗多址干扰和抗远近性能。

因为这种接收机仅需要知道期望用户的定时和特征波形、计算量小、结构简单,所以不但适用于上行接收,而且适用于下行接收,有一定的实用价值。

参考文献:

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

- [2] Sergio Verdu, Multiuser Detection [M]. U K: Cambridge University, 1998.
- [3] C Jutten, J Herault. Blind separation of sources, Part I: An adaptive algorithm based on neuromimetic architecture [J]. Signal Processing, 1991, 24(7): 1-10.
- [4] A Cichocki, R Unbehauen. Robust neural networks with on-line learning for blind identification and blind separation of sources [J]. IEEE Trans. Circuits syst. I, 1996, 43(11): 894-906.
- [5] S Cruces-Alvarez, A Cichocki, L Castedo-Ribas. An iterative inversion approach to blind source separation [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 2000, 11(6): 1423-1437.
- [6] S Douglas, A Cichocki. Neural networks for blind decorrelation of signals [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1997, 45(11): 2829-2842.
- [7] J F Cardoso, B Laheld. Equivariant adaptive source separation [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1996, 44(12): 3017-3030.
- [8] M Majmundar, N Sandhu, J H Reed. Adaptive single-user receivers for direct-sequence spread-spectrum CDMA systems [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2000, 49(2): 379-389.
- [9] 马海波, 刘芳, 焦李成. 一种快速稳健的盲自适应多用户检测器 [J]. 《信号处理》已录用。

作者简介:



马海波 男, 1976 年 10 月出生于黑龙江省林甸县, 现为西安电子科技大学电路与系统专业的硕士研究生, 主要研究兴趣为智能信号处理等。



刘芳 女, 1963 年出生于北京, 副教授, 分别于 1984 年和 1994 年获西安交通大学、西安电子科技大学计算机系学士和硕士学位, 现为西安电子科技大学计算机学院人工智能与模式识别研究室主任, 获国家教育部、陕西省科技进步二等奖四项, 主要研究方向为模式识别与计算智能。



焦李成 男, 1959 年 10 月出生于陕西省白水, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 中国电子学会理事和学术委员会委员, 中国神经网络委员会委员, 获十余项国家和省部级科技奖, 主要研究方向为神经网络、数据挖掘、子波理论与应用等。