

一种新的混合信道盲均衡算法

刘祖军 徐海生 王杰令 易克初

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 为同时提高盲均衡的稳态MSE性能和收敛速度, 该文提出了一种混合信道盲均衡算法。该算法采用判决反馈均衡器结构, 在判决可靠时采用DD-LMS(Directed Decision-Least Mean Square)误差项进行迭代, 而判决不可靠时采用改进恒模算法(Modified Constant Modulus Algorithm, MCMA)误差项进行迭代, 同时判决可靠区间根据直接判决误差进行自适应迭代。该文采用经过数字无线信道的64QAM信号进行了信道均衡仿真。仿真结果表明, 相比MCMA算法, 该文提出的混合盲均衡算法有效地提高了收敛速度, 并具有良好的稳态MSE性能, 在误比特率为 10^{-6} 时, 能提高SNR约2dB。

关键词: 盲均衡; 恒模算法(CMA); MSE; 收敛速度

中图分类号: TN911.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)07-1606-04

A Novel Hybrid Blind Channel Equalization Algorithm

Liu Zu-jun Xu Hai-sheng Wang Jie-ling Yi Ke-chu

(State Key Lab of Integrated Service Network, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: To improve MSE performance in steady-state and convergence rate of blind equalization, a hybrid blind channel equalization algorithm is proposed in this paper. With decision feedback equalizer, the proposed algorithm applies the error item of DD-LMS (Directed Decision-Least Mean Square) for adaptation when decision is reliable, and error item of MCMA (Modified Constant Modulus Algorithm) is applied when decision is unreliable. And the reliable interval of decision is adapted according to the errors of directed-decisions. The proposed algorithm has been simulated with 64QAM signals through severe digital wireless channel, simulation results show that the proposed algorithm has faster convergence rate and better MSE performance in steady-state than MCMA, and brings 2dB advantage when BER is 10^{-6} .

Key words: Blind equalization; Constant Modulus Algorithm(CMA); MSE; Convergence rate

1 引言

数字无线通信系统中, 多径衰落会在接收端带来严重的码间干扰(ISI), 因此常用均衡技术消除多径带来的码间干扰。其中, 盲均衡技术因其不使用训练序列, 提高了传输效率, 而且可以应用于不利于获取导频的通信系统中, 从而成为研究的热点。在早期由Godard提出了著名的恒模算法(Constant Modulus Algorithm, CMA)^[1]之后, 相继出现了基于接收信号二阶统计量(Second Order Statistics, SOS)^[2,3]和高阶统计量(High Order Statistics, HOS)的盲均衡算法^[4], 以及基于滤波器组的盲均衡算法^[5]等。

CMA是一种Bussgang算法, 因其可靠的收敛性能和易于实现, 得到了广泛的应用。但是传统CMA

算法收敛速度慢; 均衡输出信号星座被旋转, 需要独立载波相位恢复电路; 而且容易收敛到局部极值点, 稳态均方误差性能(MSE)不佳。人们提出了许多有效克服这些缺陷的算法, 例如MCMA(Modified Constant Modulus Algorithm)^[6], OS-CMA (Optimal Step-size-Constant Modulus Algorithm)^[7], CNA (Constant Norm Algorithm)^[8]算法等。

收敛速度和MSE性能是均衡算法的两个最重要指标。与CMA类算法相比, DD-LMS (Directed Decision-Least Mean Square)类算法可以获得最小均方差, 但DD-LMS算法依赖于可靠的判决(“眼图睁开”), 一般无法直接应用于盲均衡。为此‘Stop and go’算法^[9]采用判决不可靠时停止迭代的方式, 使得DD-LMS算法可以应用于盲均衡, 然而收敛速度很慢。CMA算法有时也作为均衡器的初始化, 待CMA算法收敛后切换到DD-LMS算法, 以获得更好的稳态MSE性能, 但是以降低收敛速度为代价, 而且需要准确的切换操作。为了同时提高稳态MSE性能和

2008-06-04 收到, 2009-03-02 改回

国家自然科学基金(60572148)和中国博士后科学基金(20070411119)资助课题

快的收敛速度,文献[10]提出将快CMA滤波器和慢CMA滤波器进行凸组合的方法,实现复杂度有所提高。而MCMA算法^[7]其代价函数中包含了均衡器输出的幅度相关项和相位相关项,均衡器输出后不需要独立的相位恢复电路,相比传统CMA算法,具有更好MSE性能和更快的收敛速度,且复杂度增加很少。

本文结合MCMA算法和DD-LMS算法的优点,提出一种混合信道盲均衡算法,不仅能够提高均衡的收敛速度,而且收敛后具有良好的稳态MSE性能,与DD-LMS算法相当。

2 CMA和MCMA算法

经过多径信道后的等效基带接收信号可以表示为

$$x(k) = \sum_n S(n)h_{k-n} + v(k) \quad (1)$$

均衡器输出表示为

$$y(k) = \sum_i x(i)w_{k-i} \quad (2)$$

其中 $\{S(n)\}$ 是发送的符号序列, $v(k)$ 是高斯白噪声, $\{h_k\}$ 是等效的信道离散冲激响应, $\{w_k\}$ 是符号间隔的均衡器系数。

CMA算法的代价函数只与接收信号的幅值有关,而与相位无关,如式(3)所示。

$$\left. \begin{aligned} J_{\text{CMA}}(\mathbf{w}) &= E\{(|y(k)|^2 - A)^2\} \\ A &= \frac{E\{|S(k)|^4\}}{E\{|S(k)|^2\}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

通过对代价函数最小化得到CMA算法均衡器系数迭代公式,如式(4)所示。

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k - \Delta(|y(k)|^2 - A)y(k)\mathbf{x}^*(k) \quad (4)$$

式(4)中, \mathbf{w}_k^T 是均衡器系数向量, $\mathbf{x}^T(k)$ 是接收信号向量。

MCMA算法在传统CMA算法基础上进行了改进,其代价函数如式(5)所示,包含了均衡器输出的幅度相关项和相位相关项。

$$\left. \begin{aligned} J_{\text{MCMA}}(\mathbf{w}) &= E\{(|y(k)|^2 - A)^2 + \beta[g(\text{Re}(y(k))) \\ &\quad + g(\text{Im}(y(k)))]\} \\ g(x) &= 1 - \sin^{2n}(x\pi/2D) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(5)中, β 是一个常数, $2D$ 是星座点中两个符号间最小距离, $g(x)$ 称为星座匹配误差函数。

3 混合盲均衡算法

3.1 算法描述

为了提高信道盲均衡的收敛速度,同时获得良好的稳态MSE性能,本文结合MCMA算法和DD-

LMS算法,提出一种混合信道盲均衡算法,该算法采用判决反馈均衡器结构,原理框图如图1所示。

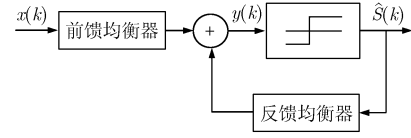


图1 均衡器结构框图

本文提出的算法,根据判决的可靠与否选择不同的误差项进行均衡器系数的迭代,首先定义一个可靠判决区间:

$$\mathcal{R} = \{e(k) \mid \|e(k) = y(k) - \hat{S}(k)\| \leq D\}, \lambda \in [0,1] \quad (6)$$

即认为在此区间得到的直接判决是可靠的,可靠区间的大小由 λ 决定。根据 $e(k)$ 以及 \mathcal{R} ,定义一个标记变量 α_k

$$\alpha_k = \begin{cases} 1, & e(k) \in \mathcal{R} \\ 0, & e(k) \notin \mathcal{R} \end{cases} \quad (7)$$

由 α_k 得到本文提出的盲均衡算法的误差表达式为

$$e_H(k) = \alpha_k e(k) + (1 - \alpha_k)e_{\text{MCMA}}(k) \quad (8)$$

其中 $e(k)$ 为DD-LMS算法中的误差, $e_{\text{MCMA}}(k)$ 为MCMA算法中的误差,由 $\nabla J_{\text{MCMA}}(\mathbf{w})$ 可得迭代中MCMA的误差表达式为

$$\left. \begin{aligned} e_{\text{MCMA}}(k) &= y(k)(|y(k)|^2 - A) + \beta\eta_k \\ \eta_k &= \frac{d}{dx}g(x)\Big|_{x=\text{Re}(y(k))} + \frac{d}{dx}g(x)\Big|_{x=\text{Im}(y(k))} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

则本文提出的混合盲均衡算法的迭代公式如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_{k+1} &= \mathbf{w}_k + \Delta e_H(k)\mathbf{r}_k^* \\ &= \mathbf{w}_k + \Delta[\alpha_k e(k) + (1 - \alpha_k)e_{\text{MCMA}}(k)]\mathbf{r}_k^* \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)中, $\mathbf{w}_k = [w_{-K_1}, w_{-K_1+1}, \dots, w_0, w_1, \dots, w_{K_2}]^T$, $[w_{-K_1}, w_{-K_1+1}, \dots, w_0]$ 为前馈滤波器抽头系数, $[w_1, \dots, w_{K_2}]$ 为反馈滤波器抽头系数, $\mathbf{r}_k = [x_{k+K_1}, \dots, x_k, \hat{S}_{k-1}, \dots, \hat{S}_{k-K_2}]^T$ 。

3.2 可靠区间选择

采用DD-LMS误差项进行迭代需要有可靠的判决,当 $e_k \in \mathcal{R}$ 时,设判决正确的概率为

$$\left. \begin{aligned} p_{\text{sc}} &= p\{\alpha_k = 1 \mid \text{no error}\} \\ e_{R,k} &= y_k - S_k \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

而判决不正确的概率为

$$p_{\text{se}} = p\{\alpha_k = 1 \mid \text{error}\} \quad (12)$$

并且有

$$p_1 = \{\alpha_k = 1\} = p_{\text{sc}} + p_{\text{se}} \quad (13)$$

判决的正确与否对迭代收敛性能影响很大,而这又

与可靠区间的大小有关。

采用 DD-LMS 误差项进行迭代需要有可靠的判决,但在均衡初始阶段,得到正确判决的概率较小,即 p_{sc} 较小,如果将可靠区间设置较大,会使得将误判的误差项带入迭代的概率增大,即 p_{sc} 增大,降低收敛性能。而在迭代过程逐步收敛后,得到的可靠判决的概率较大,因此可设置较大的可靠区间,使得 DD-LMS 误差项进行参与迭代的概率增加,提高收敛后 MSE 性能。为此,本文中对可靠区间判决根据直接判决误差进行迭代, λ 的迭代过程如下:

$$\lambda_{n+1} = \lambda_n - \Delta_\lambda \varepsilon_n, \varepsilon_n = \sum_{k=nM}^{(n+1)M-1} |e(k)|^2 - \sum_{k=(n-1)M}^{nM-1} |e(k)|^2 \quad (14)$$

误差 $e(k)$ 由于噪声等因素的影响,波动较大,因此可靠区间的大小根据判决误差的统计平均值变化进行迭代,每 M 个点迭代一次,而不是每得到一个误差 $e(k)$ 就迭代一次。

4 仿真结果及分析

本文对提出的混合盲均衡算法和 MCMA 算法进行了仿真。仿真中采用 64QAM 信号,以及信道条件恶劣的数字无线信道,信道响应为 $\mathbf{h}=[0.0410 - 0.0109j, 0.0495 - 0.0123j, 0.0672 - 0.0170j, 0.0919 - 0.0235j, 0.7920 - 0.1281j, 0.3960 - 0.0871j, 0.2715 - 0.0498j, 0.2291 - 0.0414j, 0.1287 - 0.0154j, 0.1032 - 0.0119j]$,两种算法的前馈和反馈均衡器抽头数都设为 15,抽头系数迭代步长 $\Delta = 6 \times 10^{-7}$, $M=50$ 。当 SNR=30 dB 时,图 2(a), 2(b), 2(c)分

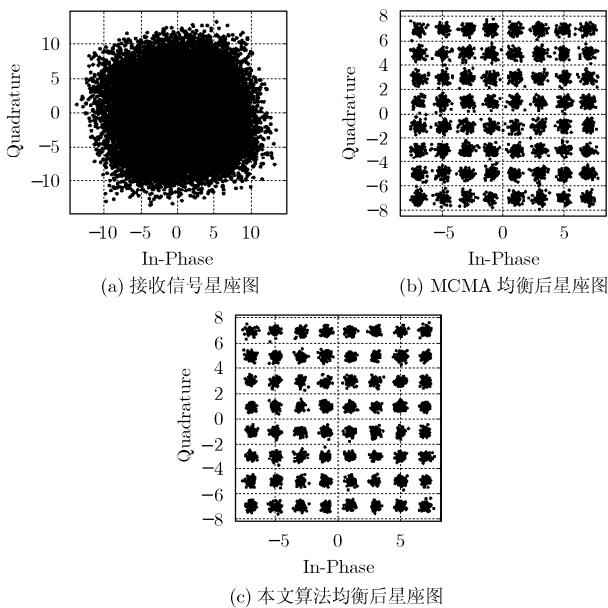


图 2 星座图

别给出了经过信道后接收信号, MCMA 均衡输出和本文提出的算法均衡输出的信号星座图。从图 2 可以看出,本文提出的算法在稳态时输出信号的更紧密的分布在星座符号的周围。

图 3 给出了两种算法在迭代过程中的方差 ($|e(k)|^2$)变化趋势,从图 3 中可以看出,本文提出的算法比 MCMA 算法收敛速度提高约 25%,稳态 MSE 约减小 1dB。由于 MSE 值减小到一定时,判决的可靠性提高,此时采用 DD-LMS 误差项进行迭代的次数增加,可以有效地增加收敛速度,且减小了稳态 MSE。

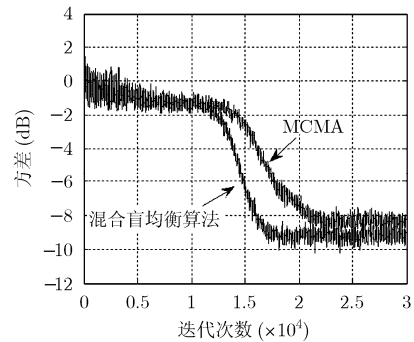


图 3 迭代中的方差

图 4 给出了 MCMA 算法和本文算法在上述数字无线信道下仿真的误比特率曲线,可以看出在误比特率为 10^{-6} 时,本文提出的算法能提高 SNR 约 2 dB。

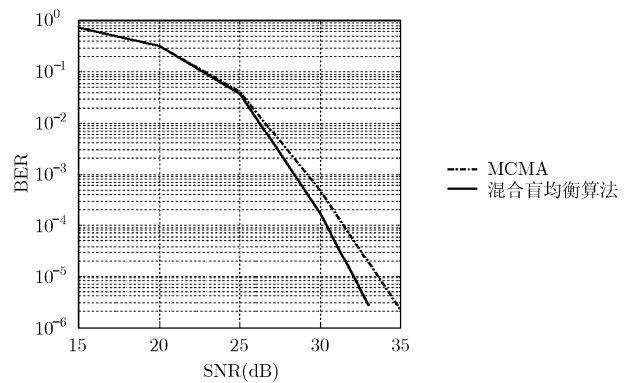


图 4 误码率曲线

5 结束语

本文结合 MCMA 算法和 DD-LMS 算法的优点,提出一种混合信道盲均衡算法。该算法充分利用迭代过程中的可靠判决,在判决可靠时采用 DD-LMS 误差项进行迭代,而在判决不可靠时采用 MCMA 误差项进行迭代。本文对该算法及 MCMA

算法, 采用通过恶劣的数字无线信道的 64QAM 信号进行了仿真, 仿真结果表明本文提出的方法具有更快的收敛速度和良好的稳态 MSE 性能, 同时具有更好的信道均衡性能。

参 考 文 献

- [1] Godard D N. Self-recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems. *IEEE Transactions on Communications*, 1980, 28(11): 1867-1875.
- [2] Tong L, Xu G, and Kailath T. Blind identification and equalization based on second-order statistics: A time domain approach. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1994, 40(2): 340-349.
- [3] Naveed A, Qureshi I M, and Hussain A, *et al.* Blind equalisation of communication channels for equal energy sources: Energy matching approach. *Electronics Letters*, 2006, 42(4): 247-248.
- [4] Pinchas M and Bobrovsky B Z. A novel HOS approach for blind channel equalization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(3): 875-886.
- [5] Scaglione A, Giannakis G B, and Barbarossa S. Redundant filterbank precoders and equalizers Part II: Blind channel estimation, synchronization, and direct equalization. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1999, 47(7): 2007-2022.
- [6] He L, Admin M G, and Reed C, *et al.* A hybrid adaptive blind equalization algorithm for QAM signals in wireless communications. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(7): 2058-2069.
- [7] Zarzoso V and Comon P. Optimal step-size constant modulus algorithm. *IEEE Transactions on Communications*, 2008, 56(1): 10-13.
- [8] Goupil A and Palicot P. New algorithms for blind equalization: The constant norm algorithm family. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(4): 1436-1444.
- [9] Picchi G and Prati G. Blind equalization and carrier recovery using a "stop and go" decision-directed algorithm. *IEEE Transactions on Communications*, 1987, 35(9): 877-887.
- [10] Silva M T M and Nascimento V H. Convex combination of blind adaptive equalizers with different tracking capabilities. *IEEE international conference on acoustics, speech and signal Processing*, Hawaii USA, ICASSP 2007, Vol.3: 457-460.

刘祖军: 男, 1976年生, 博士后, 副教授, 研究方向为无线通信和通信信号处理.

徐海生: 男, 1984年生, 硕士生, 研究方向为无线通信.

王杰令: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为无线通信和通信信号处理.

易克初: 男, 1943年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信、卫星通信和通信信号处理.