

文章编号:1004-4213(2011)06-0898-4

基于 Dual-Mode MMA+MDD 双模式 T/2 分数间隔盲均衡算法的研究

柳雷, 赖惠成, 贾振红

(新疆大学 信息科学与工程学院, 乌鲁木齐 830046)

摘 要:均衡技术是用来解决通信系统中码间干扰的常用方法. 针对传统恒模算法的收敛速度和稳态剩余码间干扰大的缺点, 将双模式多模算法和改进型判决引导算法结合起来, 并且应用于分数间隔盲均衡器中. 该算法初期用双模式算法收敛均衡器, 然后切换到改进型判决引导算法中进一步收敛, 由于分数间隔均衡器解决了波特间隔均衡器因抽样率不高带来的频谱混叠问题, 从而进一步地提高了均衡效果. 蒙特卡罗仿真表明, 该算法不仅收敛速度快, 而且得到较低的剩余码间干扰.

关键词:恒模算法; 盲均衡; 分数间隔; 双模式多模算法

中图分类号: TN 911.5

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114006.0898

0 引言

通信系统中, 码间干扰 (Inter-symbol Interference, ISI) 严重的影响了通信的传输质量^[1], 实际中通常采用均衡技术来解决这个问题. 传统的做法需要训练序列应用于自适应均衡器, 某些快速变化的信道中需要反复发送此序列从而降低了通信效率. 盲均衡器不需要发送训练序列因而得到了学者的广泛研究. 恒模算法 (Constant Modulus Algorithm, CMA) 应用十分的广泛, 然而收敛速度较慢, 稳态残留码间干扰较高并且无法纠正相位旋转错误. 为了改进这些缺点, 文献[2-3]采用了 CMA 和判决引导算法 (Decision Directed, DD) 算法相结合来均衡信道. 文献[4]提出模判决盲均衡多模算法和点判决盲均衡多模算法有效地改善了均衡器性能, 然而未能将两种算法有机的结合起来. 文献[5]在修正恒模算法 (Modified Constant Modulus Algorithm, MCMA) 的基础上提出了双模修正常量模算法 (Dual-mode MCMA) 并且与 DD 算法有效地结合, 纠正了相位错误的同时获得了良好的均衡性能.

本文在文献[5]的基础上研究将一种改进型模判决多模算法 (Modifeid Multi-Modulus Algorithm, MMA) 和改进点判决多模算法 (Modified Decision Directed, MDD) 结合, 提出了

一种均衡性能更好的 Dual-Mode MMA + MDD 算法. 在复杂信道中, 波特间隔恒模算法盲均衡器需要较长的抽头系数, 由于抽样率不高, 均衡效果并不理想. 本文将上述算法引入到 T/2 分数间隔盲均衡器中, 通过提高对均衡器输入信号的采样频率, 有效地降低了频谱混叠带来的影响, 从而获得非常好的均衡性能.

1 CMA 和 MMA 算法

1.1 CMA 算法

CMA 是应用最为广泛的算法之一, 其波特间隔 CMA 算法 (BSE-CMA) 基带传输等效框图如图 1.

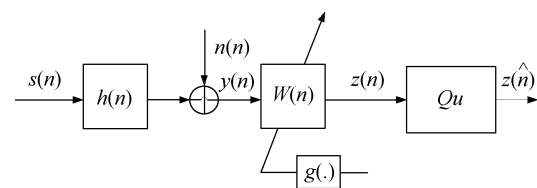


图 1 波特间隔 CMA 算法基带传输等效框图

Fig. 1 BSE-CMA base band transmission model

发送信号 $s(n)$ 通过冲击响应为 $h(n)$ 的信道, $n(n)$ 是高斯白噪声, $W(n)$ 表示均衡器, Qu 是判决装置, $g(\cdot)$ 表示无记忆非线性系统.

CMA 算法定义的代价函数

$$J(n) = E[(|z(n)|^2 - R)^2] \quad (1)$$

式中: $R = E[|s(n)|^4] / E[|s(n)|^2]$; $E(\cdot)$ 为求期望;

基金项目: 科技部国际科技合作项目 (No. 2009DFA12870) 资助

第一作者: 柳雷 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为通信与信息系统. Email: liuleiak@163.com

导师 (通讯作者): 赖惠成 (1963-), 男, 教授, 主要研究方向为光通信与光传感器. Email: lai@xju.edu.cn

收稿日期: 2010-10-31; 修回日期: 2011-01-17

$|\cdot|$ 为取模值.

误差函数为

$$e_{\text{CMA}}(n) = z(n) \cdot [z^2(n) - R] \quad (2)$$

CMA 均衡算法抽头更新公式

$$W(n+1) = W(n) - \mu \cdot e(n) \cdot y^*(n) \quad (3)$$

式中 μ 表示步长因子,“ \cdot ”表示共轭运算.

可以看出 CMA 算法的代价函数中 R 是恒定的,因此 CMA 算法是让输出信号 $z(k)$ 尽量地分布到半径为 \sqrt{R} 上.但是由于不含相位信息,所以 CMA 算法无法纠正接收信号相位的旋转问题.又由于 QAM 信号分布在多个圆上(如 16QAM 信号分布在 3 个圆上),CMA 算法在计算误差时使用统计模值使得均衡性能下降.

1.2 MMA 算法

MMA 算法误差函数为

$$e_{\text{MMA}}(k) = e_R(k) + j e_I(n) \quad (4)$$

式中

$$e_R(k) = y_R(k) [y_R^2(k) - R_{2,R}]$$

$$e_I(k) = y_I(k) [y_I^2(k) - R_{2,I}]$$

$R_{2,R}$ 为均衡器输出 $z(n)$ 的星座图中离 $z(n)$ 最近的圆上所有发射信号实部统计的平方.而 $R_{2,I}$ 为其虚部统计的平方.

MMA 算法抽头更新公式

$$W(n+1) = W(n) - \mu \cdot T(n) \cdot e_{\text{MMA}}(n) \cdot y^*(n) \quad (5)$$

式中

$$\text{If } [\text{sgn}(z_R^2(k) - R_{2,R}) = \text{sgn}(z_R^2(k) - R_R)]$$

and

$$[\text{sgn}(z_I^2(k) - R_{2,I}) = \text{sgn}(z_I^2(k) - R_I)], T(n) = 1$$

$$\text{Else } T(n) = 0.$$

式中

$$R_R = E[s_R(n)] / E[s_R(n)]$$

$$R_I = E[s_I(n)] / E[s_I(n)]$$

当 $f(n) = 0$ 时,均衡器没有得到增益,为避免信息浪费,采用改进型恒模算法调整

$$W(n+1) = W(n) - \mu \cdot e_k(n) \cdot y^*(n) \quad (6)$$

式中, $e_k(n) = [z_R^2(k) - R_R] + [z_I^2(k) - R_I]j$

2 Dual-Mode MMA+MDD 双模式算法

2.1 MDD 算法

MDD 算法在均衡器收敛的情况下可以得到更低的剩余码间干扰,其代价函数为

$$J = E\{[|z_R(n)|^2 - \hat{z}_R(n)|^2]^2\} + E\{[|z_I(n)|^2 - \hat{z}_I(n)|^2]^2\}j \quad (7)$$

均衡器更新公式为

$$W(n+1) = W(n) - \mu \cdot e_{\text{MDD}}(n) \cdot y^*(n) \quad (8)$$

式中 $e_{\text{MDD}}(n) = e_r(n) + e_i(n)$

$$e_r(n) = z_r(n) [z_r(n) - \hat{z}_r^2(n)]$$

$$e_i(n) = z_i(n) [z_i(n) - \hat{z}_i^2(n)]$$

可以看到 MDD 实际上是改变了 CMA 算法的代价函数得来的,因此其性能要比 DD 算法好,但是性能受制其于均衡器收敛与否.当均衡器 $z(n)$ 收敛时,MDD 才会对均衡器产生正增益.如果均衡器尚未收敛,判错率高时其增益为负.因此仍然无法单独使用.

2.2 Dual-Mode MMA+MDD 双模式算法

Dual-Mode MMA 算法的误差函数为

$$e_{\text{Dual}}(n) = \alpha(n) e_{\text{MMA}}(n) + \text{sgn}[e_{\text{MDD}}(n)] \cdot |e_{\text{MMA}}(n)| \cdot [1 - \alpha(n)] \quad (9)$$

式中: $\alpha(n) = \delta \left[\frac{1}{1 + \exp(-\omega |e_{\text{MDD}}(n)|^m)} - 0.5 \right]$

当 $m=1$ 时, $\alpha(n)$ 退化为 sigmoid 函数.选定合适的 δ 和 ω ,可以加速算法收敛速度,然而还需要和 MDD 结合进一步地降低剩余码间干扰.这里使 $m=2$, $\delta=0.8$, $\omega=10\ 000$ 实验效果较好.

确定一个判决门限 d , D 为信号星座间距, $\sqrt{E_s^2/10^{\text{SNR}/10}} \leq d < D/2$, 令 $d = \sqrt{E_s^2/10^{\text{SNR}/10}}$, 当均衡器输出信号星座图到判决值小于 d 时,认为均衡器收敛,可以采用 MDD 算法调整均衡器, E_s^2 为发射信号的功率.否则,判定其没有收敛,用 Dual-Mode MMA 算法调整均衡器.通过这种方式可以较快地调整均衡器到一个收敛的状态.设定一个阈值 K ,迭代次数小于等于 K 时,先使用上述方法收敛.当迭代次数大于 K 然后只使用 MDD 算法调整均衡器,进一步地降低残留码间干扰.

因此当迭代次数小于 K 时其抽头更新公式为

$$W(n+1) = \begin{cases} W(n) - \mu \cdot e_{\text{Dual}} \cdot y^*(n) & \text{if } D > d \\ W(n) - \mu \cdot e_{\text{MDD}} \cdot y^*(n) & \text{if } D \leq d \end{cases} \quad (10)$$

当迭代次数大于等于 K 时其抽头更新公式为

$$W(n+1) = W(n) - \mu \cdot e_{\text{MDD}} \cdot y^*(n) \quad (11)$$

3 Dual-Mode MMA+MDD 双模式 T/2 分数间隔算法

3.1 T/2 分数间隔盲均衡器

分数间隔均衡器由于提高了采样频率,有效地降低了频谱混叠带来的影响,从而获得非常好的均衡性能.其受系统噪声的影响较小而被广泛使用.其离散时间框图如图 2.

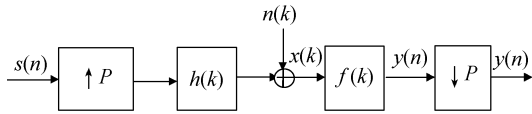


图2 分数间隔盲均衡器模型

Fig. 2 Model of fractionally-spaced equalizer

$s(n)$ 是0均值方差为 $E\{|s(n)|^2\}$ 的独立信号源,对其 P 倍下采样,然后进入冲击响应为 $h(k)$ 的信道, $n(k)$ 是白噪声, $x(k)$ 是接收信号序列,通过均衡器 $f(k)$ 后得到 $\hat{y}(n)$,对其以 P 倍速率上采样得到 $y(n)$ 。

当 $P=2$,得到 $T/2$ 分数间隔均衡器,这里

$$\hat{y}(n) = \sum_0^{2L_f-1} f(k)x(n-k) \quad (12)$$

式中均衡器长度为 $2L_f$,对均衡器进行截断取 $2k+1$,由此得到多信道模型如图3。

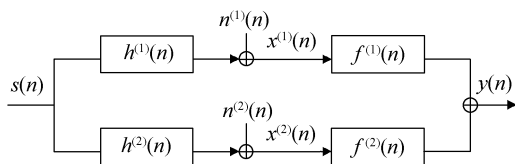


图3 等效多信道模型

Fig. 3 Equivalent multi-channel model

每个子信道的输出可以表示为

$$x^{(i)}(n) = \sum_{j=0}^M h^{(i)}(n) s(n-j) + n^{(i)}(n) \quad (13)$$

式中 $i=0, 1$;信号 $s(n)$ 和噪声 $n^{(i)}(n)$ 同为 $(L_f + N - 1) \times 1$ 维; $h^{(i)}$ 是子信道的冲击响应,长度为 N 。式(13)的矢量形式为

$$\mathbf{x}^{(i)}(n) = \mathbf{c}^{(i)}(n) \mathbf{h}(n) + \mathbf{n}^{(i)}(n) \quad (14)$$

式中

$$\mathbf{x}^{(i)}(n) = [x^{(i)}(n), x^{(i)}(n-1), \dots, x^{(i)}(n-L_f+1)]^T$$

$$\mathbf{n}^{(i)}(n) = [n^{(i)}(n), n^{(i)}(n-1), \dots, n^{(i)}(n-L_f+1)]^T$$

$$\mathbf{s}(n) = [s(n), s(n-1), \dots, s(n-L_f-N+1)]^T$$

这里 $\mathbf{c}^{(i)}(n)$ 是 $L_f \times (L_f + N - 1)$ 维信道矩阵

$$\mathbf{c}^{(i)}(n) = \begin{bmatrix} h^{(i)}(0) & \dots & h^{(i)}(N-1) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \\ 0 & \dots & h^{(i)}(0) & \dots & h^{(i)}(N-1) \end{bmatrix}$$

得到式(14)的一般形式

$$\mathbf{x}(n) = \mathbf{c}(n) \mathbf{s}(n) + \mathbf{n}(n) \quad (15)$$

式中

$$\mathbf{c}(n) = [\mathbf{c}^{(0)}(n), \mathbf{c}^{(1)}(n), \dots, \mathbf{c}^{(N-1)}(n)]^T$$

$$\mathbf{x}(n) = [\mathbf{x}^{(0)}(n), \mathbf{x}^{(1)}(n), \dots, \mathbf{x}^{(N-1)}(n)]^T$$

$$\mathbf{n}(n) = [\mathbf{n}^{(0)}(n), \mathbf{n}^{(1)}(n), \dots, \mathbf{n}^{(N-1)}(n)]^T$$

均衡器输出为

$$y(n) = \mathbf{f}^T(n) \mathbf{x}(n) \quad (16)$$

式中: $\mathbf{f}_n = [\mathbf{f}_n^{(1)}, \mathbf{f}_n^{(2)}]$

$$\mathbf{f} = [f_0, f_1, \dots, f_{L_f-1}] = [f_0, f_1, \dots, f_{P(L_f+1)-1}]$$

3.2 Dual-Mode MMA+MDD 双模式 T/2 分数间隔算法

用 Dual-Mode MMA+MDD 双模式算法更新 T/2 分数间隔盲均衡器。

当迭代次数小于阈值 K 时其抽头更新公式为

$$f^{(i)}(n+1) = \begin{cases} f^{(i)}(n) - \mu \cdot e_{\text{Dual}} \cdot x^*(n) & \text{if } (D > d) \\ f^{(i)}(n) - \mu \cdot e_{\text{MDD}} \cdot x^*(n) & \text{if } (D \leq d) \end{cases} \quad (17)$$

当迭代次数大于等于阈值 K 时其抽头更新公式为

$$f^{(i)}(n+1) = f^{(i)}(n) - \mu \cdot e_{\text{MDD}} \cdot x^*(n) \quad (18)$$

4 蒙特卡罗仿真

下面采用蒙特卡罗仿真来验证算法的快速收敛性和有效性。仿真条件是:信源采用16QAM调制,数据长度为20000,信噪比为30dB。信道传递函数为 $h = [-0.005 - 0.004j, 0.009 - 0.03j, -0.024 - 0.104j, 0.854 + 0.52j, -0.218 + 0.273j, 0.049 - 0.074j, -0.016 + 0.2j, 0.005 + 0.073j]$ 。分数间隔均衡器两个等效信道为 $h_1 = [-0.005 - 0.004j, -0.024 - 0.104j, -0.218 + 0.273j, -0.016 + 0.2j,]$; $h_2 = [0.009 - 0.03j, 0.854 + 0.52j, 0.049 - 0.074j, 0.005 + 0.073j]$,均衡器抽头数为14。均衡器初始化时,对波特间隔均衡算法均衡器第7个抽头中心置1,其他置0,对分数间隔均衡算法均衡器每个子信道第4个抽头置1,其他置0。进行50次蒙特卡罗仿真,阈值 $K=2000$,步长因子 $\mu=0.0055$ 。步长选择受限于收敛速度和稳态残留ISI的折中,之所以用同一个步长是为不同算法性能比较提供一个统一的参量。

从图4可以看出MCMA的收敛速度较慢而且

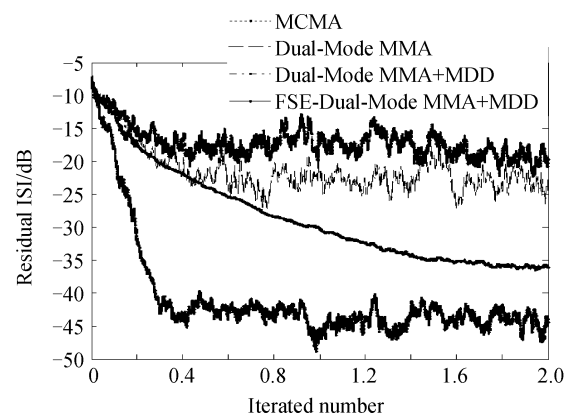


图4 各算法残留ISI比较

Fig. 4 Comparison of the residual ISI of each algorithm

稳态残留 ISI 还比较高,而 Dual-Mode MMA 由于改进了算法,稳态残留 ISI 比 MCMA 略有改善.但是由于算法中仍然有 MMA 算法调整均衡器抽头系数,无法进一步地降低残留 ISI,所以在 Dual-Mode MMA+MDD 算法中把两种算法结合,性能进一步提高.而 FSE-Dual-Mode MMA+MDD 算法的均衡性能最优.

图 5 是各算法输出星座图比较,从中可以看出四种算法都可以纠正相位旋转.然而,MCMA 算法均衡效果最差,Dual-Mode MMA 性能较 MCMA 好但是仍然不够紧凑,Dual-Mode MMA+MDD 较

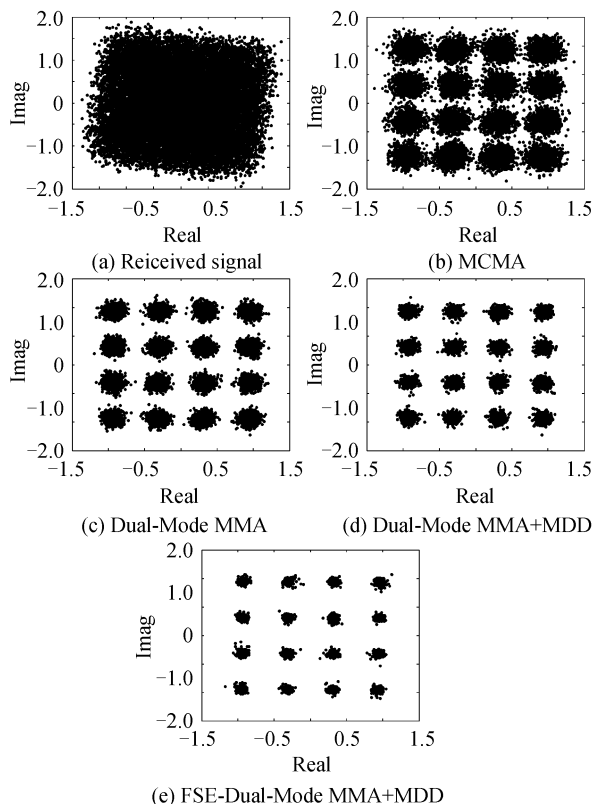


图 5 各算法星座图

Fig. 5 Signal constellations of each algorithm

Dual-Mode MMA+MDD Dual Mode Based on T/2 Fractionally-spaced Equalization

LIU Lei, LAI Hui-cheng, JIA Zhen-hong

(College of Information Science & Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: Equalization technique is an usual way to solve the inter-symbol interference problem in communication system. The dual-mode modified multi-mode algorithm and modified decision directed algorithm were combined in the fractionally-spaced equalizer to improve the performance about convergence speed and steady residual inter-symbol interference which produced by traditional constant modulus algorithm. The dual-mode was used to adjust equalizer, and the equalizer was further adjusted by switching to decision directed algorithm. And fractionally-spaced equalizer solves the spectrum aliasing problem, caused by band-spaced equalizer because the sampling rate is not high, thus the performance of equalizer was further improved. Monte Carlo simulation shows that the algorithm has fast convergence with lower residual ISI.

Key words: Constant Modulus Algorithm(CMA); Blind equalization; Fractionally-spaced; Dual-mode blind equalization algorithm

前两种算法更加的紧密.而 FSE-Dual-Mode MMA+MDD 算法的均衡效果是最好的.

5 结论

本文把 Dual-Mode MMA 做为启动算法,然后和 MDD 算法结合的方式获得了良好的均衡效果.为了进一步获得更好的均衡性能,把结合算法引入到分数间隔均衡器中形成 FSE-Dual-Mode MMA+MDD 算法,新算法的运算量和 Dual-Mode MMA+MDD 算法相当,较前两种算法运算量大.蒙特卡罗仿真表明此算法良好的收敛性能和较低残留 ISI 性能.

参考文献

- [1] LIANG Bo, ZHU Hai, CHEN Wei-biao. Equalization and denoise techniques for optical communication in time-varied bandlimited channel[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1195-1199.
梁波,朱海,陈卫标.时变带限信道中光通信的均衡与去噪技术[J]. *光子学报*, 2008, **37**(6): 1195-1199.
- [2] GUO Ye-Cai, ZHANG Yan-ping. Dual-mode multi-modulus blind equalization algorithm for high-order QAM signals[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, **20**(6): 1423-1426.
郭业才,张艳萍.一种适用于高阶 QAM 信号的双模式多模盲均衡算法[J]. *系统仿真学报*, 2008, **20**(6): 1423-1426.
- [3] SUN Li-jun, SUN Chao. Making blind algorithm of multi-path fading underwater acoustic channels suitable for high order QAM Signals [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2005, **23**(5): 598-601.
孙丽君,孙超.一种适用于高阶 QAM 信号的水声信道盲均衡算法[J]. *西北工业大学学报*, 2005, **23**(5): 598-601.
- [4] XU Jin-biao, GE Jian-hua, WANG Yu-min. Dual-mode algorithms for blind equalization based on CMA[J]. *Journal of China Institute of Communications*, 1997, **18**(2): 65-69.
徐金标,葛建华,王育民.基于 CMA 算法的双模式盲均衡算法[J]. *通信学报*, 1997, **18**(2): 65-69.
- [5] GUO Yuan-shu, YUE Lei, Yao Bo-bin. Dual mode blind equalization algorithm based on dual-mode MCMA+DD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(10): 2702-2706.
郭元术,玥蕾,姚博彬.基于 Dual-Mode MMA+DD 双模式盲均衡算法研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(10): 2702-2706.