DOI:10.11721/cqnuj20140621

电磁频谱衰落信道的相位校正盲均衡算法研究*

任志勇[1]，冯文江[2]
(1. 重庆电子工程职业学院 通信工程系，重庆 401331；2. 重庆大学 通信工程学院，重庆 400044)

摘要:针对电磁频谱衰落信道中常规恒模盲均衡算法对所接收信号相位变化不敏感的缺点,研究了一种即携带接收信号的幅值信息,同时还携带接收信号相位信息的修正恒模盲均衡算法。论文在对修正恒模盲均衡算法进行推导的基础上,利用电磁频谱衰落信道,仿真了高阶正交幅度调制信号的修正恒模盲均衡算法性能。仿真结果表明,修正恒模算法在均衡后星座图不仅汇聚程度大幅提高,而且纠正了由电磁频谱衰落信道带来的相位偏转,在收敛速度和降低残余符号间干扰方面均改善了均衡器的性能。

关键词:频谱衰落;盲均衡;正交幅度调制;修正恒模算法;符号间干扰
中图分类号:TN911.5　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1672-6693(2014)06-0097-05

为了克服由于信道的时变特性而使检测器产生的突发错误,常常采用带有训练序列的自适应均衡器来提升系统性能。在有些情况下,通信接收端要获得人为设置的训练序列是比较困难的。盲均衡技术由于不要求有规则的训练序列,而是根据信号序列自身的先验信息来改善信道特性,因此,在通信技术领域应用前景广阔,特别是在水声信道和无线通信中正受到越来越多的重视与应用[1-3]。

在众多的盲均衡算法中,常数恒模算法(Constant modulus algorithm,CMA)[4]是人们广泛使用的技术。但是,CMA 盲均衡算法忽视了接收信号相位的变化信息,只用了接收信号的幅值变化情况[5],当系统载波的频率有波动时,均衡器达到收敛状态后的输出信号在相位上会存在旋转偏离[6]。对于不确定性的时间变化信道,利用 CMA 算法的均衡器会带来误码率的加大[7]。为了纠正这种相位失真,避免恒模算法陷入局部化的最小点,将 CMA 仅对信号的模值进行处理转换为对信号正交分量和同相分量分别进行计算处理,使其携带接收信号的相位信息[8],这就是修正恒模算法(Modified constant modulus algorithm,MCMA)。

多电平正交幅度调制(Quadrature amplitude modulation,QAM)应用范围很广[9-10],例如全球微波互联接入(Worldwide interoperability for microwave access,WIMAX)技术就采用了 16QAM 以及 64QAM 这两种 QAM 调制方式,因此,有必要对适用于多径电磁频谱衰落信道的高阶 QAM 调制信号的盲均衡算法进行深入研究。论文在对高阶 QAM 信号的修正恒模盲均衡算法进行推导的基础上,针对多径电磁频谱衰落信道,仿真验证了修正恒模算法在纠正信号相位偏转的良好性能,并且在收敛速度和降低残余符号间干扰方面都改善了均衡器的性能。

1 修正恒模的盲均衡算法

1.1 普通恒模算法(CMA)

离散信道和均衡器的等效模型如图 1 所示,假定经过调制后的发送信号记为 $s(n)$,则通过信道后的接收信号为

$$x(n)=\sum_{i=0}^{L-1}h(i)s(n-i)+v(n),n=0,1,\cdots,N-1 \tag{1}$$

其中,L 为信道的冲激响长度,$h(\cdot)$是信道冲激响应函数,$s(n)$是发送符号序列,$v(n)$是与发送序列相互独立的加性高斯白噪声,其均值为 0,方差为 σ^2,N 是观察数据抽样点数,$x(n)$是接收信号序列。

* **收稿日期**:2014-04-21　**修回日期**:2014-06-10　**网络出版时间**:2014-11-19 21:49
资助项目:重庆市教育委员会科学技术研究项目(No. KJ132206);国家自然科学基金(No. 60872038)
作者简介:任志勇,男,副教授,研究方向为自适应信号处理、微波通信技术,E-mail: renzhiyongtx@163.com;**通讯作者**:冯文江,E-mail: fengwj@cqu.edu.cn
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20141119.2149.021.html

假设盲均衡器是FIR结构,其输入输出关系可以表示为

$$y(n)=\sum_{i=0}^{M}w_i(n)x(n-i)=X^{\mathrm{T}}(n)W(n)=W^{\mathrm{T}}(n)X(n) \tag{2}$$

其中,$X(n)=[x(n),x(n-1),\cdots,x(n-M)]^{\mathrm{T}}$ 是均衡器的输入向量,$W(n)=[w_0(n),w_1(n),\cdots,w_M(n)]^{\mathrm{T}}$ 是均衡器抽头系数向量,$y(n)=y_r(n)+jy_i(n)$是均衡器的输出信号,均衡器有 $M+1$ 个抽头系数,上标 T 表示转置运算。CMA 最小化代价函数定义为

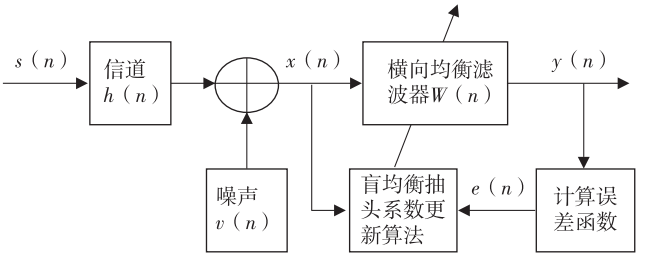

图1 离散信道和均衡器的等效模型

$$J(n)=\frac{1}{4}E\{[|y(n)|^{p}-R_P]^2\} \tag{3}$$

其中,P 是一个正整数,且 R_P 表示为

$$R_P=\frac{E(|s(n)|^{2p})}{E(|s(n)|^{p})} \tag{4}$$

在(4)式中,选 $P=2$,则有

$$R_2=\frac{E(|s(n)|^{4})}{E(|s(n)|^{2})} \tag{5}$$

CMA 盲均衡是按照随机梯度算法调整均衡器抽头系数使 CMA 代价函数达到最小,其均衡器抽头的迭代公式为

$$W(n+1)=W(n)-\mu\ \nabla_w(J(n)) \tag{6}$$

式中,μ 是迭代步长,$\nabla_w(\cdot)$表示求关于 w 的瞬时梯度,经过推导可得

$$\begin{aligned}\nabla_w(J(n))&=\frac{1}{2}E\{[|y(n)|^2-R_2]\cdot\nabla_w[W^{\mathrm{H}}X^{*}X^{\mathrm{T}}W]\}=\\&E\{[|y(n)|^2-R_2]\cdot X^{*}(n)\cdot X^{\mathrm{T}}(n)W(n)\}=\\&E\{[|y(n)|^2-R_2]\cdot y(n)\cdot X^{*}(n)\}\end{aligned} \tag{7}$$

其中,上标 H 表示共轭转置运算,"$*$"表示共轭运算,T 表示转置运算,在用瞬时值代替均值后,得到 CMA 算法的迭代公式:

$$W(n+1)=W(n)-\mu e(n)X^{*}(n) \tag{8}$$

其中 $e(n)$定义为

$$e(n)=(|y(n)|^2-R_2)\cdot y(n) \tag{9}$$

从(8)式可知,CMA 算法收敛后还存在较大的稳态误差,另外,在均衡信道具有相位变化时,采用此种算法的均衡器在达到收敛状态后,输出信号在相位上会存在一定的旋转偏移,对于时间变化的信道,该算法会导致接收信号误码率的加大。

1.2 修正恒模算法(MCMA)

为了使接收信号包含相位信息,使算法具有相位恢复能力,修正恒模算法对原 CMA 的代价函数进行了修改。在取 $P=2$ 时,CMA 算法的代价函数为

$$J(n)=\frac{1}{4}E\{[|y(n)|^2-R_2]^2\} \tag{10}$$

修正恒模盲均衡算法将(10)式的代价函数修改成实部和虚部的代价函数,新的代价函数为

$$G(n)=\frac{1}{4}E\{(y_r^2(n)-R_r)^2\}+\frac{1}{4}E\{(y_i^2(n)-R_i)^2\} \tag{11}$$

其中,$y_r(n)$和 $y_i(n)$分别为均衡器输出 $y(n)$的实部和虚部,分别为

$$R_r=\frac{E(s_r^4(n))}{E(s_r^2(n))},R_i=\frac{E(s_i^4(n))}{E(s_i^2(n))} \tag{12}$$

其中,$s_r(n)$和 $s_i(n)$分别为发送信号 $s(n)$的实部和虚部,其滤波器抽头系数更新公式为

$$W(n+1)=W(n)-\mu e(n)X^{*}(n) \tag{13}$$

式中 $e(n)$定义为

$$e(n)=y_r(n)(y_r^2(n)-R_r)+jy_i(n)(y_i^2(n)-R_i) \tag{14}$$

由于新的误差调节函数分开考虑了信号的实部与虚部两大部分，它能在某种程度上恢复载波相位，同时完成信号均衡。当系统载波的频率有波动时，均衡器能对载波频率波动带来的相位角度变化或信道本身的相位偏离进行校正。

2 数据仿真及分析研究

2.1 MCMA 相位校正性能研究

为了验证修正恒模算法具有相位恢复能力，在计算机上进行了模拟仿真。仿真中，均衡器结构采用横向均衡器，均衡器长度为 31，初始化中心抽头为 1，其他抽头均为 0，迭代步长为 0.000 03，总符号数为 20 000，信噪比固定为 30 dB，图中结果是算法在 10 次蒙特卡罗运行中取平均得到的图形。这里采用以下典型复信道[11]，信道的冲击响应为

$$ch1=ch1r+j\times ch1i$$

其中，$ch1r$=[−0.005　0.009　−0.024　0.854　−0.218　0.049　−0.032 3]，$ch1i$=[−0.004　0.03　−0.104　0.520　0.273　−0.074　0.020 3]。

图 2 是多径频谱衰落信道的幅频响应，从图中可以直观地看出信道的频谱衰落。

从图 2 可以看出，信道最大衰落深度接近−10 dB。下面，以 16QAM 信号为例，讨论修正恒模算法的均衡性能。

正交幅度调制是由两个正交载波的多电平振幅键控信号叠加而成的，发送的 16QAM 信号星座如图 3 所示，信号经过信道的接收信号星座如图 4 所示。

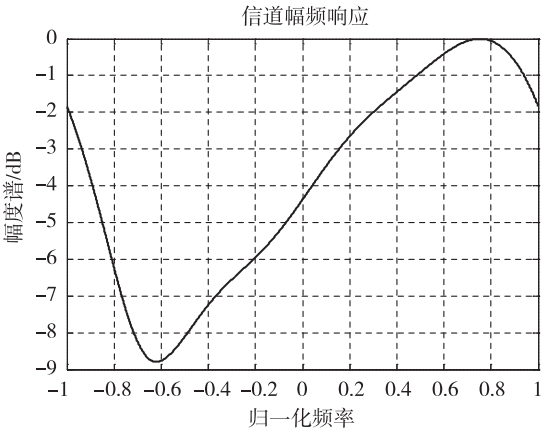

图 2　频谱衰落信道幅频响应(峰值归一化为 0 dB)

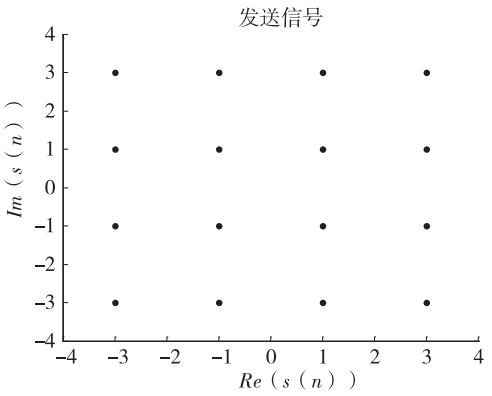

图 3　初始发送信号 $s(n)$

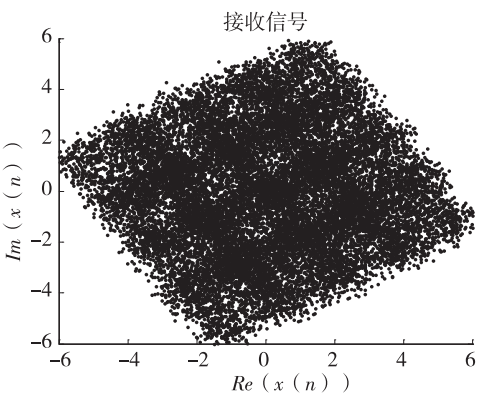

图 4　经过信道的接收信号 $x(n)$

在分别采用 CMA 算法和 MCMA 算法均衡后，信号星座如图 5 所示。

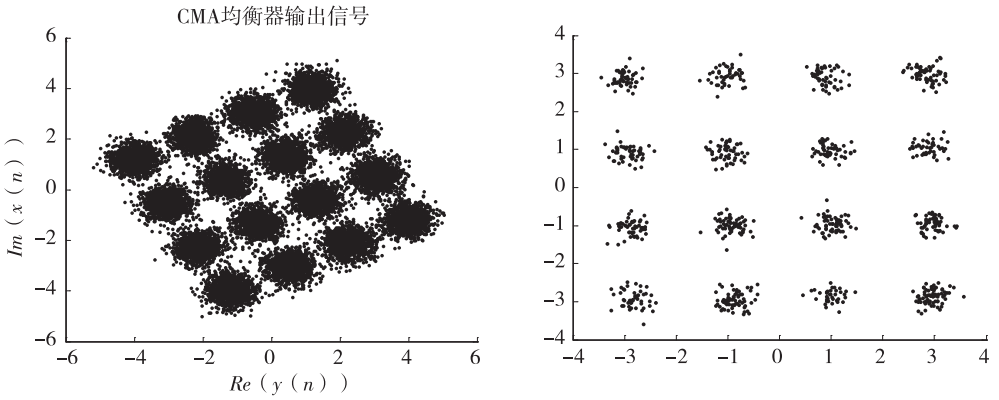

图 5　CMA 和 MCMA 算法均衡后星座图

仿真结果表明,普通恒模算法丢掉了相位信息,算法虽然能够使均衡器收敛,但是没有相位恢复功能,均衡后的星座图仍然存在相位偏转。在相同仿真条件下,修正恒模算法均衡后的星座图不仅汇聚程度大幅提高,而且纠正了由信道带来的相位偏转,这是由于修正恒模算法既用了接收信号的幅值信息,同时,还携带了接收信号的相位信息所带来的结果。

2.2 MCMA 残余符号间干扰的仿真研究

为了比较普通恒模算法和修正恒模算法的盲均衡收敛性能,通常利用均衡器输出残余符号间干扰(Inter-symbol interference,ISI)来衡量[12],其计算公式为

$$ISI=\frac{\sum_n |c(n)|^2}{|c(n_0)|^2}-1, n_0=\arg\max_n |c(n)| \tag{15}$$

其中,$c(n)$为均衡器参数和信道参数的卷积,表示为

$$c(n)=h(n)*W(n)=\sum_i w(i)h(n-i) \tag{16}$$

仿真中,信号仍然采用16QAM信号,仿真参数与上面对修正恒模算法相位校正性能研究的参数保持一致,图6显示了常规恒模算法与修正恒模算法均衡残余符号间干扰的变化情况。

从图6可以看出,在相同的初始条件下,MCMA算法稳态残余ISI约-24 dB,CMA算法稳态残余ISI约-18 dB,很显然,修正恒模算法达到稳定状态后的残余符号间干扰ISI的值低于CMA算法。同时,两种算法在残余符号间干扰ISI值均下降为-18 dB时,普通恒模算法大约要经过3 000次迭代才能达到该值,而修正恒模算法大约2 000次迭代就能达到该值,相比之下,MCMA算法收敛速度更快。因此,MCMA算法在收敛速度和降低残余符号间干扰方面改善了均衡器的性能。

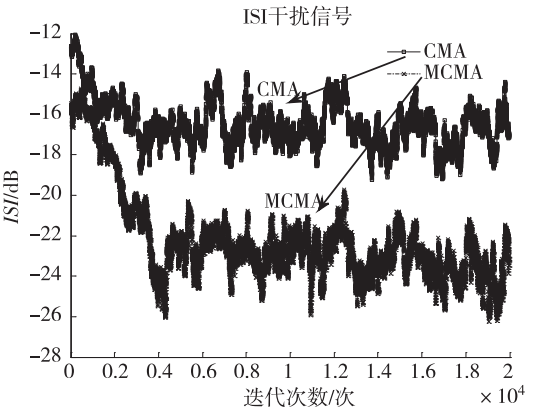

图6 残余符号间干扰

3 总结

本文对适用于多径电磁频谱衰落信道的高阶QAM调制信号的盲均衡算法进行了深入研究。由于常规恒模盲均衡算法只用了接收信号的幅度信息,对所接收信号相位变化不敏感,针对这种情况,论文在常规恒模盲均衡算法的基础上,对原有算法进行改进,改进后的算法同时考虑了携带信号的幅值信息和相位信息。仿真结果表明,在多径电磁频谱衰落信道中,修正恒模算法既纠正了由信道带给接收信号的相位偏转,同时也提高了均衡器的收敛速度,降低了残余符号间干扰,相应地改善了均衡器的性能。

参考文献:

[1] 童峰,许肖梅,方世良,等. 改进支持向量机和常数模算法水声信道盲均衡[J]. 声学学报, 2012,37(2):144-150.
Tong F, Xu X M, Fang S L, et al. Blind equalization of underwater acoustic channels based on modified support vector machine and constant modulus algorithm[J]. Acta Acustica, 2012,37(2):144-150.

[2] Zhao Y, Xue X N, Zhang T F, et al. Receiver-channel based adaptive blind equalization approach for GPS dynamic multipath mitigation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013,26(2): 378-384.

[3] 李进,冯大政,房嘉奇. MIMO通信系统中QAM信号的快速半盲均衡算法研究[J]. 电子与信息学报, 2013,35(1):185-190.
Li J, Feng D Z, Fang J Q. Study of fast semi-blind equalization algorithm for MIMO systems with QAM signal [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013,35(1):185-190.

[4] 郭莹,邱天爽,唐洪,等. 脉冲噪声环境下的恒模盲均衡算法[J]. 通信学报,2009,30(4):35-40.
Guo Y, Qiu T S, Tang H, et al. Constant modulus algorithm for blind equalization under impulsive noise environments[J]. Journal on Communications, 2009,30(4):35-40.

[5] 徐烽,邱乐德,王宇. APSK信号的混合盲均衡方法[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版,2013,25(5):605-610.
Xu F, Qiu L D, Wang Y. Hybrid blind equalizing method for APSK signals[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2013,25(5):605-610.

[6] Xie N, Hu H Y, Wang H. A new hybrid blind equalization algorithm with steady-state performance analysis[J]. Digital Signal Processing, 2012,22 (2):233-237.

[7] Pincemin E, Brochier N, Selmi M, et al. Novel blind equalizer for coherent DP-BPSK transmission systems: theory and experiment[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013,25(18):1835-1838.

[8] 阮秀凯,蒋啸,刘莉,等.一族新的 Bussgang 类指数拓展多模盲均衡算法[J]. 电子与信息学报, 2013,35(9):2188-2193.
Ruan X K, Jiang X, Liu L, et al. A novel Bussgang category of blind equalization with exponential expanded multi-modulus algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013,35(9):2188-2193.

[9] 李艳玲,李兵兵,刘明骞.瑞利衰落信道中基于分集技术的 MQAM 信号的识别[J]. 北京邮电大学学报,2012, 35(4):64-67.
Li Y L, Li B B, Liu M Q. Spatial diversity based MQAM modulation classification in rayleigh fading channel[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012, 35(4):64-67.

[10] Wang C, Lin C X, Chen Q, et al. A 10-Gbit/s wireless communication link using 16-QAM modulation in 140 GHz band[J]. IEEE Microwave Theory and Techniques, 2013,61(7): 2737-2746.

[11] 王彬.无线衰落信道中的调制识别、信道盲辨识和盲均衡技术研究[D].郑州:中国人民解放军信息工程大学, 2007.
Wang B. Study of modulation classification, blind channel identification and equalization in wireless fading channels [D]. Zhengzhou:The PLA Information Engineering University, 2007.

[12] 孙守宇.盲信号处理基础及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
Sun S Y. Blind signal processing foundation and its applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.

On Phase Correction Blind Equalization Algorithm Suitable for Electromagnetic Spectrum Fading Channel

REN Zhiyong[1], FENG Wenjiang[2]

(1. Department of Communication Engineering, Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331;
2. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Now that the constant modulus blind equalization algorithm is not sensitive to phase change of received signals in the electromagnetic spectrum fading channel, the modified constant modulus algorithm has been studied, which carries the amplitude information of received signals, also carrying the received signal phase information at the same time. In this paper, the modified constant modulus algorithm was deduced. Using the electromagnetic spectrum fading channel, performance of MCMA was simulated for higher-order QAM signals. Simulation has shown that MCMA not only greatly improved the degree of convergence of constellation after equilibrium, and corrected phase deflection. The algorithm can improve the convergence rate and reduce the residual intersymbol interference (ISI), accordingly improve the performance of the equalizer.

Key words: spectrum fading; blind equalization; quadrature amplitude modulation(QAM); modified constant modulus algorithm (MCMA); intersymbol interference

(责任编辑 游中胜)