

一种适用于 QAM 通信系统的盲均衡算法

潘立军 刘泽民

(北京邮电大学电信工程学院 北京 100876)

摘 要: 该文提出了一种适用于 QAM 通信系统的盲均衡算法。该算法克服了传统 GSA, CMA 等算法收敛后剩余误差大的缺点, 保持了较高的收敛速度, 在均衡的同时能够自动补偿信道引起的相位误差。从计算机仿真结果可以看出, 该算法具有较好的均衡特性。

关键字: 盲均衡, 剩余误差, 收敛速度, 均方误差, 误符号率

中图分类号: TN911.5 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2005)04-0663-03

A Blind Equalization Algorithm Adapt to the QAM Communication System

Pan Li-jun Liu Ze-min

(School of telecommunication engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract In this paper, a new blind equalization algorithm adapt to the QAM communication system is proposed, which overcomes conventional General Sato Algorithm (GSA), Gonstant Modulus Algorithm. (CMA), etc. algorithms' larger residual error after convergence and still keeps a higher convergence rate, and it can recover the channel phase error automatically at the same time. The algorithm's better equalization property is proved by the computer simulation results.

Key words Blind equalization, Residual error, Convergence rate, MSE, SER

1 引言

为了去除由于通信信道的有限带宽和多径传播等引起的 ISI (符号间干扰), 需要在通信系统中采用均衡技术。在最近二三十年里, 盲均衡 (自恢复) 技术成为许多专家和学者研究的热点, 并相继出现了许多新的盲均衡算法, 比如 Godard^[1], Sato^[2], GSA^[3], stop-and-go^[4]算法, 以及目前被广泛关注的通过对接收信号进行过采样后仅利用二阶统计 (SOS) 特性对信道进行均衡的方法等。其主要特点就是均衡器抽头系数的调整不需要借助于训练序列 (导频信号), 而仅借助于发送信号的概率或统计特性, 从而使接收设备具有自动均衡的能力。

Godard 提出的恒模算法(CMA)^[1]和 Benveniste 等提出的 Sato 扩展算法 GSA (General Sato Algorithm)^[3], 是目前广泛用于 QAM 系统的盲均衡算法。CMA 的一个重要的特点是: 即使在有相位误差的情况下, 算法也能够收敛。在没有载波频偏的情况下, 均衡器收敛后的输出有一个恒定的相位误差, 我们可以通过一个相位恢复过程来消除这个相位误差, 有关盲均衡和相位恢复相结合的算法可以参考文献[1,3]等。

2 算法介绍

2.1 系统模型

图 1 是盲均衡系统的简化等效基带模型框图。

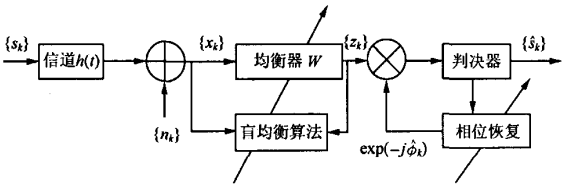


图 1 盲均衡系统框图

图中, $\{s_k\}$ 是原始发送序列, $h(t)$ 是信道的冲击响应, $\{n_k\}$ 是加性高斯白噪声, $\{x_k\}$ 是接收信号的采样序列, $\{z_k\}$ 是均衡器的输出序列, $\{\hat{s}_k\}$ 是判决器的输出序列, $\hat{\phi}_k$ 表示对相位误差的估计。图中的均衡器 W 是采用抽头延迟线模型的线性均衡器, 假设其抽头数为 $2N+1$ 。

2.2 MCMA 算法介绍

文献[5]提出了一种改进的 CMA 算法——MCMA (Modified Constant Modulus Algorithm), MCMA 采用采用 $M^{(p)}$ 代替 CMA 算法中的 $D^{(p)}$ 作为新的代价函数。

$$D^{(p)} = [1/(2p)]E(|z_k|^p - R_p)^2 \tag{1}$$

$$M^{(p)} = M_R^{(p)} + M_I^{(p)} \tag{2}$$

$$\left. \begin{aligned} M_R^{(p)} &= [1/(2p)]E(z_{k,R}^p - R_{p,R})^2 \\ M_I^{(p)} &= [1/(2p)]E(z_{k,I}^p - R_{p,I})^2 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

$$\left. \begin{aligned} R_{p,R} &= E|s_{k,R}|^{2p} / E|s_{k,R}|^p \\ R_{p,I} &= E|s_{k,I}|^{2p} / E|s_{k,I}|^p \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 $z_k = z_{k,R} + jz_{k,I}$, $s_k = s_{k,R} + js_{k,I}$, 考虑到 $z_k = W_k^T \cdot X_k$, $W_k = (W_{-N}^k, \dots, W_N^k)^T$, $X_k = (X_{k+N}, \dots, X_{k-N})^T$, T 表示转置, $\cdot$ 表示矢量相乘。将式 (1) 对 W_k 求偏导, 并取 $p=2$ 分别得到下面的迭代公式:

$$W_{k+1} = W_k - \mu g(z_k) X_k^* \quad (5)$$

$$g(z_k) = g(z_k)_R + jg(z_k)_I \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} g(z_k)_R &= z_{k,R}(z_{k,R}^2 - R_{2,R}) \\ g(z_k)_I &= z_{k,I}(z_{k,I}^2 - R_{2,I}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中 μ 是迭代步长, $g(z_k)$ 是误差控制函数。

2.3 对 MCMA 的改进

MCMA 收敛后的剩余误差仍然比较大, 为了减小算法收敛后的剩余误差, 我们对原算法的误差控制函数 $g(z_k)$ 又进行了如下改进。

$$\left. \begin{aligned} g(z_k) &= \overline{g(z_k)_R} + j\overline{g(z_k)_I}, \quad \text{若 } \text{sgn}(\overline{g(z_k)_R}) = \text{sgn}(g(z_k)_R) \\ &\quad \text{且 } \text{sgn}(\overline{g(z_k)_I}) = \text{sgn}(g(z_k)_I) \\ g(z_k) &= g(z_k)_R + jg(z_k)_I, \quad \text{其它} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \overline{g(z_k)_R} &= z_{k,R}(z_{k,R}^2 - \hat{s}_{k,R}^2) \\ \overline{g(z_k)_I} &= z_{k,I}(z_{k,I}^2 - \hat{s}_{k,I}^2) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

上式中 $\hat{s}_k = \hat{s}_{k,R} + j\hat{s}_{k,I}$ 。

由于均衡器收敛后的剩余误差一般由两部分组成: 理论极小值和超量均方误差, 后者是由于梯度噪声导致均衡器抽头系数在极小值附近波动产生的。即使在均衡器收敛到全局最小以后, MCMA 的梯度噪声仍是很大的, 从而导致算法存在较大的剩余误差。比较式 (7) 和式 (9) 可以看出, 式 (7) 是恒模算法, 而式 (9) 是多模算法, 因此在均衡器抽头系数迭代的过程中新算法比 MCMA 具有更小的梯度噪声, 因此新算法的剩余误差要比 MCMA 的小。而且, 从式 (8) 中可以看出, 新算法保证了均衡器抽头系数调整梯度方向与 MCMA 调整时梯度方向的一致性, 从而保证了均衡器的收敛特性保持不变。

3 仿真结果

计算机仿真时采用的复信道冲击响应如图 2 所示, 发送信号为 32QAM, 长度为 4096, 均衡器的抽头数为 31, 均衡器中心抽头初始化为 $1.8+0j$, 其它的为 $0+0j$, 信噪比为 30dB, 迭代步长为 10^{-5} 。徐金标等提出了一种新的多模盲均衡算法 MMA, 有效地克服了 CMA 收敛后剩余误差较大的不足, 但是该算法的收敛速度却比较慢, 具体介绍参考文献

[6]。我们在不考虑载波频偏的情况下, 对 CMA, MMA 和新算法各进行 10 次 Monte Carlo 仿真, 仿真结果如图 3—图 8 所示。

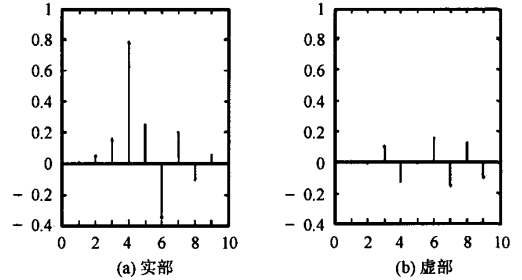


图2 用于仿真的复信道冲击响应

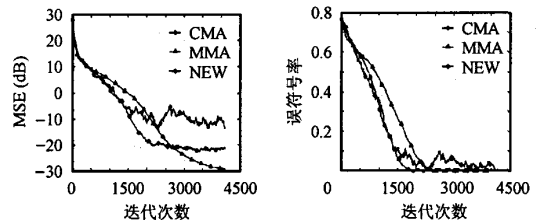


图3 MSE 与迭代次数的关系曲线

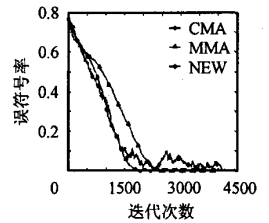


图4 误符号率与迭代次数的关系

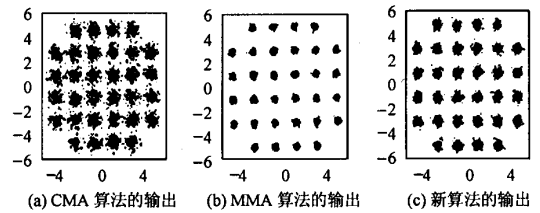


图5 收敛后均衡器输出信号 z_k 的散布图

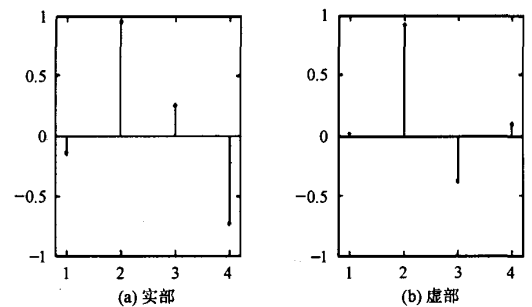


图6 用于仿真的信道冲击响应

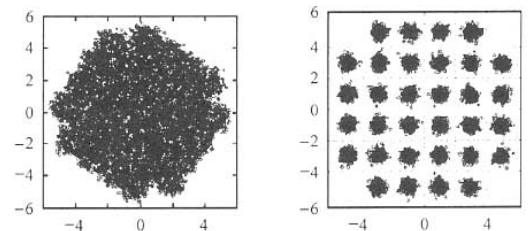


图7 均衡前后的信号散布图

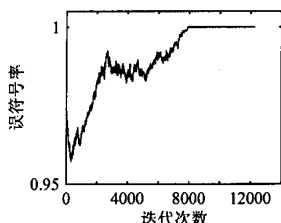


图8 误符号率与迭代次数的关系

从以上的仿真结果我们可以看出, CMA 和 MMA 算法均衡输出的散布图都存在一定的旋转, 而新算法的输出散布图很正。这是由于 CMA 和 MMA 不能补偿由信道引起的相位误差, 所以在均衡之后还得经过一个相位恢复过程, 然后才能经判决器判决输出。但是新算法却隐含地包括了相位恢复, 在均衡的同时能够补偿这个相位误差, 从而可以在均衡之后直接进行判决, 不再需要图 1 中所示的单独的相位恢复过程。新算法的输出信号散布图要比 CMA 的紧凑, 但是不如 MMA 的紧凑, 这是因为收敛后 CMA 的均方误差最大, MMA 的最小, 而新算法收敛后的均方误差介于两者之间。同时, 新算法的收敛速度与 CMA 算法的相当, 要比 MMA 算法的快。从判决器输出的误符号率特性来看, 新算法大大减少了使误符号率下降为 0 所需要的迭代次数。综上所述, 新算法在有效减小均衡器收敛后的剩余误差的同时, 仍然保持了较高的收敛速度, 同时能自动补偿信道引起的相位误差, 从而更加有利于判决器进行准确的判决, 大大减少了对均衡器进行迭代的次数, 提高了系统的效率, 从而使均衡器具有更好的均衡特性。

需要注意的是, 尽管 MCMA 与改进算法包含相位信息, 但是并不像文献[5]中指出的, 算法在任意信道情况下都能准确克服相位误差。实际上当信道引起的相位误差较大时, 均衡输出存在 $n\pi/2 (n=1,2,3)$ 的相位模糊, 这仅从判决输出信号散布图上是看不出来的, 需要借助于判决输出的误符号率。下面我们给出一个例子来说明, 复信道冲击响应如图 6 所示, 均衡前后的信号散布图和误符号率分别由图 7, 图 8

给出。

从仿真结果可以看出, 相位模糊极大地影响了判决器的性能, 不过我们可以通过对发送信号进行差分编码来克服这个问题。

4 结论

新算法收敛后的剩余误差小, 收敛速度快, 能自动补偿信道引起的相位误差, 有效减少了使判决输出误符号率降为 0 所需的迭代次数, 从而具有更好的均衡特性。

参考文献

- [1] Godard D N. Self-recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional communication systems. *IEEE Trans. on Commun.*, 1980, COM-28(11): 1867 – 1875.
- [2] Sato Y. A method of self-recovering equalization for multilevel amplitude modulation systems. *IEEE Trans. on Commun.*, 1975, COM-23(6): 679 – 682.
- [3] Benveniste A, Goursat M. Blind equalizers. *IEEE Trans. on Commun.*, 1984, COM-32(8): 871 – 883.
- [4] Picchi G, Prati G. Blind equalization and carrier recovery using a “stop-and-go” decision-directed algorithm. *IEEE Trans. on Commun.*, 1987, COM-35(9): 877-887.
- [5] Kil Nam Oh, Yong Ohk Chi. Modified constant modulus algorithm: blind equalization and carrier phase recovery algorithm. 1995 IEEE International Conference on Communications, ICC 95 Seattle, Gateway to Globalization, 1995, vol.1: 498 – 502.
- [6] 徐金标, 葛建华, 王新梅. 一种新的盲均衡方法. *通信学报*, 1995, 16(5): 78 – 81.

潘立军: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向是信号处理及其在通信中的应用。

刘泽民: 男, 1927 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向有信号处理、神经网络、以及它们在通信中的应用。