

8-20-2020

## Research and Simulation of Equalization Algorithm Suitable for High-Order QAM Signals

Wang Yan

*College of Electrical Engineering, Nanhua University, Hengyang 421001, China;*

Shen Pan

*College of Electrical Engineering, Nanhua University, Hengyang 421001, China;*

Wang Chao

*College of Electrical Engineering, Nanhua University, Hengyang 421001, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Research and Simulation of Equalization Algorithm Suitable for High-Order QAM Signals

## Abstract

**Abstract:** Traditional dual-mode blind equalization algorithm is based on constant modulus channel equalization, its convergence is slow, and it has a low efficiency of bandwidth. For overcoming its shortcoming, two blind equalization algorithms suitable for high-order QAM signals were proposed. These are double mode multi-module equalization algorithm (DMMA) and semi-blind equalization algorithm (SBEA). DMMA used multi-module equalization algorithm as first mode and multi-module assistant equalization algorithm as second mode, both modes simultaneously equalized the signal. For achieving a fastest convergence and lowest error rate, DMMA's result was regard as the pilot data for least mean square algorithm (LMS), which is called SBEA. Simulation results show that the two algorithms have a superior performance by increasing the convergence rate and decreasing the steady mean square error.

## Keywords

multi-module algorithm, adaptive algorithm, double mode multi-module algorithm, semi-blind equalization algorithm

## Recommended Citation

Wang Yan, Shen Pan, Wang Chao. Research and Simulation of Equalization Algorithm Suitable for High-Order QAM Signals[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(3): 662-667.

## 高阶正交幅度调制信号信道均衡算法的研究仿真

王彦, 沈攀, 王超

(南华大学电气工程学院, 衡阳 421001)

**摘要:** 传统双模式盲均衡算法是基于常数模进行信道均衡, 均衡收敛速度慢、频带利用率不高, 针对这个缺点, 利用高阶正交幅度调制(QAM)信号具有多个模值, 频带利用率高的特点, 提出了适用于高阶 QAM 信号的双模式多模盲均衡算法(DMMA)和半盲均衡算法(SBEA)。其中 DMMA 充分利用了 QAM 信号的特点, 采用收敛速度快, 算法复杂度低的多模盲信道均衡算法为基础模式, 以收敛效果更好并且修正相位偏转的多模辅助算法为第二模式; SBEA 是运用 DMMA 均衡后的结果作为自适应均衡算法的导频数据, 提高整个算法的收敛速度和精度。仿真结果表明两种算法收敛速度快、稳态误差小, 并且能消除码间干扰的同时修正相位偏转, 具有很好的实用性。

**关键词:** 多模均衡算法; 自适应均衡; 双模式盲均衡算法; 半盲均衡算法

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 03-0662-06

## Research and Simulation of Equalization Algorithm Suitable for High-Order QAM Signals

Wang Yan, Shen Pan, Wang Chao

(College of Electrical Engineering, Nanhua University, Hengyang 421001, China)

**Abstract:** Traditional dual-mode blind equalization algorithm is based on constant modulus channel equalization, its convergence is slow, and it has a low efficiency of bandwidth. For overcoming its shortcoming, two blind equalization algorithms suitable for high-order QAM signals were proposed. These are double mode multi-module equalization algorithm (DMMA) and semi-blind equalization algorithm (SBEA). DMMA used multi-module equalization algorithm as first mode and multi-module assistant equalization algorithm as second mode, both modes simultaneously equalized the signal. For achieving a fastest convergence and lowest error rate, DMMA's result was regard as the pilot data for least mean square algorithm (LMS), which is called SBEA. Simulation results show that the two algorithms have a superior performance by increasing the convergence rate and decreasing the steady mean square error.

**Keywords:** multi-module algorithm; adaptive algorithm; double mode multi-module algorithm; semi-blind equalization algorithm

## 引言

由于城市的高速发展, 无线通信传输容易因为多径效应而导致码间干扰, 均衡技术能够很好得消

除码间干扰, 已成为现代研究的热点。需要发送训练序列的自适应均衡具有较快的收敛速度, 算法简单得到广泛应用, 但是训练序列的发送占用了频带资源, 同时噪声较大时存在收敛误差高的缺点。而不需要训练序列的盲信道均衡技术更是目前的研究重点, 如常数模均衡算法(CMA)<sup>[1]</sup>、判决反馈均衡算法(DFE)。但是 CMA 收敛到固定的一个模值, 对于模值不唯一的高阶 QAM 信号收敛误差较大,



收稿日期: 2014-03-12 修回日期: 2014-08-09;  
基金项目: 湖南省科技厅计划项目(2011GK3187);  
作者简介: 王彦(1971-), 男, 湖南衡阳人, 博士, 教授, 硕导, 研究方向为智能信息处理技术、智能控制; 沈攀(1989-), 男, 山东泰安人, 硕士生, 研究方向为信号与信息处理; 王超(1984-), 男, 湖南衡阳人, 助教, 研究方向为移动通信, 软件无线电。

<http://www.china-simulation.com>

• 662 •

因此提出了适用于高阶 QAM 信号的多模盲信道均衡算法<sup>[2]</sup>(MMA)。MMA 依据信号特征收敛到不同的模值, 提高了收敛精度, 但是由于算法复杂度较高, 收敛速度受到影响。鉴于此, 人们提出了双模式均衡算法切换的思想, 文献[3]提出了一种基于聚类技术的软切换的双模式盲信道均衡算法, 通过聚类技术的软判决对 CMA 与 DD 算法之间切换, 两种算法互补, 并且切换的同时没有影响收敛精度和收敛速度。但是相对于自适应均衡算法, 收敛速度仍然较慢, 同时算法复杂不易于实现。文献[4]以 CMA 基础模式, 以修正 CMA 为第二模式, 在保证收敛的同时还修正了相位偏转。但是存在对于高阶 QAM 信号收敛误差较大的缺点。

本文充分利用了高阶 QAM 信号位于不同模值上的特点, 提出了两种新的适合高阶 QAM 信号的均衡算法: 双模式多模盲均衡算法和半盲均衡算法。DMMA 以 MMA 算法为基础模式, 以多模辅助算法(MAMA)作为第二模式, 两种模式同时对信号进行均衡, 结合两种均衡算法的优点, 提高收敛精度, 修正相位偏转。半盲均衡算法是在 DMMA 的基础上以误差信号作为判决条件, 当满足判决条件时候自动切换到自适应均衡算法, 实现整个均衡算法的简化以及均衡效果的改善。

## 1 算法描述

### 1.1 多模均衡算法(MMA)

在处理高阶矩形 QAM 信号时, CMA 的模值是在一个固定圆上, MCMA 的模值是在一个正方形上, 以 16QAM 举例, 单一的固定模值收敛后的稳态误差较大, 因此提出了根据判决条件调整模值的大小, 将星座图分为不同的均衡区域, 不同的均衡区域使用不同的模值。星座图划分如图 1 所示。

MMA 的代价函数为

$$J(k) = E[|y(k)|^2 - R_M]^2 \quad (1)$$

其中  $R_M$  的值根据星座图具体来判决计算。对于 16QAM 来说,  $R_M$  的取值规则如下:

$$R_M = \begin{cases} R_1 \approx 2 & \text{if } |y(k)|^2 < 5.23 \\ R_2 \approx 10 & \text{elseif } 5.23 \leq |y(k)|^2 \leq 10.65 \\ R_3 \approx 18 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

MMA 的迭代公式为:

$$\begin{aligned} e_{\text{MMA}}(k) &= y(k)(|y(k)|^2 - R_M) \\ w(k+1) &= w(k) - \mu e_{\text{MMA}} X^*(k) \\ y(k) &= X(k)w(k)^T \end{aligned} \quad (3)$$

多模均衡算法根据不同的模值进行均衡, 收敛后的误差更小, 收敛精度高, 但是传输过程中容易导致相位偏转, 均衡过程中并没有考虑到修复相位偏转的问题。

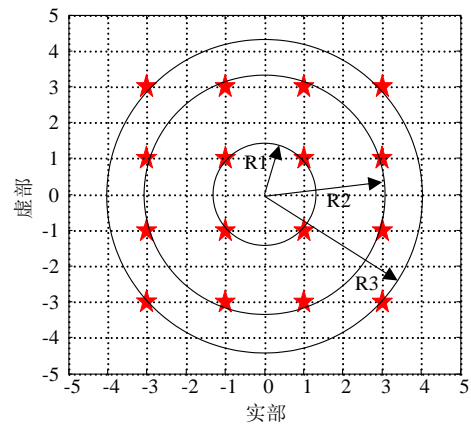


图 1 MMA 星座图划分示意图

### 1.2 多模辅助算法(MAMA)

由于 MMA 并未考虑到相位问题, 因此提出了多模辅助算法, 将均衡输出信号分成实部和虚部, 解决相位偏转问题, 星座图划分如图 2 所示。

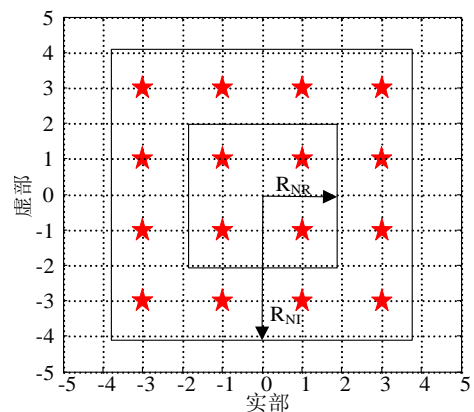


图 2 MAMA 星座图划分示意图

多模辅助算法(MAMA)的代价函数为:

$$J_{MAMA}(k) = J_{MAMA,R}(k) + J_{MAMA,I}(k)$$

其中  $J_{MAMA,R}(k) = E[|y_R(k)|^2 - R_{NR}]^2$

$$J_{MAMA,I}(k) = E[|y_I(k)|^2 - R_{NI}]^2 \quad (4)$$

对于 16QAM 来说, RN 的取值规则如下:

$$R_{NR} = \begin{cases} R_1 \approx 1 & \text{if } |y_R(k)| < 2 \text{ and} \\ & \text{if } |y_I(k)| < 2 \\ R_2 \approx 9 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

$$R_{NI} = \begin{cases} R_1 \approx 1 & \text{if } |y_R(k)| < 2 \text{ and} \\ & \text{if } |y_I(k)| < 2 \\ R_2 \approx 9 & \text{else} \end{cases}$$

$$e_{MAMA}(k) = e_{MAMA,R}(k) + je_{MAMA,I}(k)$$

$$e_{MAMA,R}(k) = y_R(k)(|y_R(k)|^2 - R_{NR})$$

$$e_{MAMA,I}(k) = y_I(k)(|y_I(k)|^2 - R_{NI})$$

$$w(k+1) = w(k) - \mu_{MAMA} X^*(k)$$

$$y(k) = X(k)w(k)^T \quad (6)$$

采用多个模值进行均衡在算法上提高了收敛的速度,收敛精度也得到进一步提高。但是却增加了算法的复杂度,不易于实际应用。

## 2 双模式多模盲均衡算法及分析

MMA 存在相位偏转的缺陷,而 MAMA 存在算法复杂度较高的缺陷,为了克服这些缺陷,本文提出了双模式盲均衡算法(DMMA),是以 MMA 作为基础模式,以 MAMA 为第 2 模式,两种模式同时对信号进行均衡。星座图划分示意图如图 3 所示。当均衡初始阶段,用 MMA 圆形对应的模值对信号进行收敛,能够快速将信号都收敛到均衡区域内,然后用 MAMA 进行相位修正以及能够获得更小的稳态误差。相比较传统的双模式盲均衡算法<sup>[5]</sup>的单一模值,DMMA 具有多个模值,使得收敛的速度更快,而且收敛误差更小。

均衡器输出:

$$y(k) = w_{MMA}(k)^T x(k) + w_{MAMA}(k)^T x(k) \quad (7)$$

其中:  $w_{MMA}(k)$  表示由 MMA 算法更新的系数。

$w_{MAMA}(k)$  表示由 MAMA 算法更新的系数。

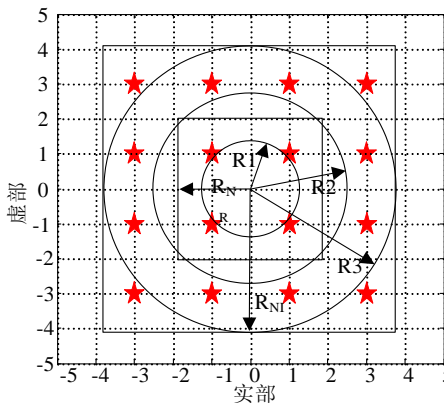


图 3 DMMA 星座图划分示意图

MMA 的系数迭代公式为:

$$w_{MMA}(k+1) = w_{MMA}(k) - \mu_1 x^*(k)[y(k)(|y(k)|^2 - R_M)] \quad (8)$$

其中:  $\mu_1$  为 MMA 迭代步长,令:

$$y'(k) = w_{MMA}(k+1)^T x(k) + w_{MAMA}(k)^T x(k) \quad (9)$$

$\hat{s}'(k)$  为  $y'(k)$  的判决输出,  $\hat{s}(k)$  为  $y(k)$  的判决

输出, MAMA 的系数迭代公式如下:

$$w_{MAMA}(k+1) = \begin{cases} w_{MAMA}(k) - \mu_2 x^*(k) & \\ [y_R(k)(|y_R(k)|^2 - R_{NR}) + & \text{if } \hat{s}'(k) = \hat{s}(k) \\ jy_I(k)(|y_I(k)|^2 - R_{NI})] & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $\mu_2$  为 MAMA 的迭代步长。

MMA 作为基础模式,在均衡的初始阶段,均衡器的错误判决概率较大,算法也不稳定,用性能较好的 MMA 首先对信号进行均衡, MMA 能够得到很好的均衡效果,抗码间干扰,并且均衡速度较快。当 MMA 均衡后的权系数更新后重新对原信号进行均衡,对两次均衡后的结果判决后进行比较,当判决相等时候就用 MAMA 进行辅助均衡,可以纠正相位偏转还可以减小算法的稳态误差。当判决不相等的时候, MAMA 均衡权系数不进行更新,只用 MMA 对信号进行均衡,这样能够保证较大概率的正确判决,同时对模值的更新也能够有较大概率的正确性。

由于 MMA 已经对信号进行了均衡, 使得均衡收敛很多, MAMA 在辅佐 MMA 均衡时候信号已经收敛, 这样为了提高收敛的速度,  $\mu_2$  的取值大于  $\mu_1$ , 可以提高迭代速度从而提高收敛速度。

### 3 半盲均衡算法及性能分析

DMMA 算法能够很好的消除码间干扰, 虽然收敛精度较高, 但是由于复杂度高, 依然利用无记忆非线性函数对均衡权系数进行更新而达到均衡的目的, 均衡收敛速度较慢。为了解决此问题, 结合自适应均衡的特点, 提出了一种新的半盲信道均衡算法, 中心思想是首先利用盲信道均衡均衡效果好的特点对信号进行均衡, 然后当误差达到一定程度的时候, 我们将均衡输出结果判决后权当做一个已知的训练序列, 这样均衡就转变为速度较快的自适应均衡算法, 提高收敛速度。具体实现方法是在均衡初始阶段, 采用均衡效果较好的 DMMA 进行均衡, 当误差达到足够小的时候, 我们把 DMMA 均衡得到的结果进行判决, 因为误差足够小, 判决得到的数据正确率足够高, 因此将此判决数据作为判决反馈最小均方误差算法<sup>[6]</sup>(DD\_LMS)的训练序列, 通过转换到自适应均衡算法, 从而提高收敛的速度, 减小整个算法的复杂度。

半盲均衡算法星座图划分如图 4 所示, 与 DMMA 区别在于当稳态误差足够小的时候, 提出了用 DD\_LMS 单独对信号进行均衡, 这样既能保证信号收敛精度足够高, 同时由于 DD\_LMS 本身的算法简单易于实现性, 使得整个均衡算法的收敛速度提高且降低了算法复杂度。并且克服了自适应均衡算法需要发送训练序列的缺陷。因此半盲均衡算法是一种非常可靠有效的均衡算法。

均衡器输出:

$$y(k) = \begin{cases} w_{DMMA}(k)^T x(k) & \text{if } e(k) > 0.1 \\ w_{DD\_LMS}(k)^T x(k) & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

其中:  $w_{DMMA}(k)$  为双模式多模均衡算法的权向量,  $w_{DD\_LMS}(k)$  为自适应均衡算法的权向量。

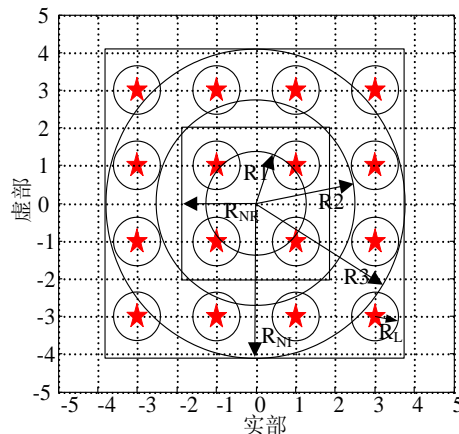


图 4 半盲均衡算法星座图划分示意图

$$e(k) = \begin{cases} y(k)(|y(k)|^2 - R) & \text{if } e(k) > 0.1 \\ y(k) - \hat{y}(k) & \text{else} \end{cases} \quad (12)$$

其中判决条件中误差信号的取值是通过实验可以得出最佳的一个数值, 实验中取值 0.1。当(12)式满足误差信号>0.1 的时候, 选择 DMMA 对信号进行均衡, 然后模值的选取以及多模算法的选取根据前后两次判决条件来决定, 如式(13)所示。当误差信号<0.1 的时候, 均衡算法切换到判决反馈自适应均衡算法。

$$R = \begin{cases} R_M & \text{if } \hat{s}'(k) = \hat{s}(k) \\ R_N & \text{else} \end{cases} \quad (13)$$

系数迭代公式如下:

$$w_{DMMA}(k+1) = \begin{cases} w_{DMMA}(k) + \mu_1 e(k) x^*(k) & \text{if } (\hat{s}'(k) = \hat{s}(k)) \& \\ & (e(k) > 0.1) \\ w_{DMMA}(k) & \text{else} \end{cases} \quad (14)$$

$$w_{DD\_LMS}(k+1) = \begin{cases} w_{DD\_LMS}(k) + \mu_2 e(k) x^*(k) & \text{if } e(k) \leq 0.1 \\ w_{DD\_LMS}(k) & \text{else} \end{cases} \quad (15)$$

在半盲均衡的初始阶段, 由于信号误差大, 眼图没有张开, 所以采用均衡性能较好的 DMMA 进行均衡, 当误差小到一定程度后, 认定眼图睁开, 就可以采用 DD\_LMS 对单独对信号进行均衡。由

DD\_LMS 均衡算法的算法简单, 收敛速度快, 因此可以大大提高整体的收敛速度和收敛精度。传统的半盲信道均衡算法<sup>[7]</sup>还是需要发送训练序列来修正均衡权系数, 在频带利用率上并没有多大的改善, 而本文的半盲信道均衡算法不需要发送训练序列, 提高了频带利用率。

### 4 算法仿真及性能分析

为了验证本文提出的 2 种均衡算法, 在计算机

上进行仿真实验, 均衡器都采用 11 阶横向抽头结构, 并且 MMA 的中心抽头系数初始化为 1, 其他抽头系数初始化为 0。所用信道<sup>[8]</sup>为  $h=[0.041+0.0109j, 0.0495+0.0123j, 0.0672+0.017j, 0.0919+0.0235j, 0.792+0.0414j, 0.1287+0.0154j, 0.1023+0.0119j]$ , 加入高斯白噪声 SNR=20dB, MMA 的迭代步长为  $2.4e-4$ , MAMA 的迭代步长为  $2e-4$ , DD-LMS 的迭代步长为  $1e-3$ 。仿真结果如图 5 所示。图 6 为各种均衡算法的最小均方误差的比较。

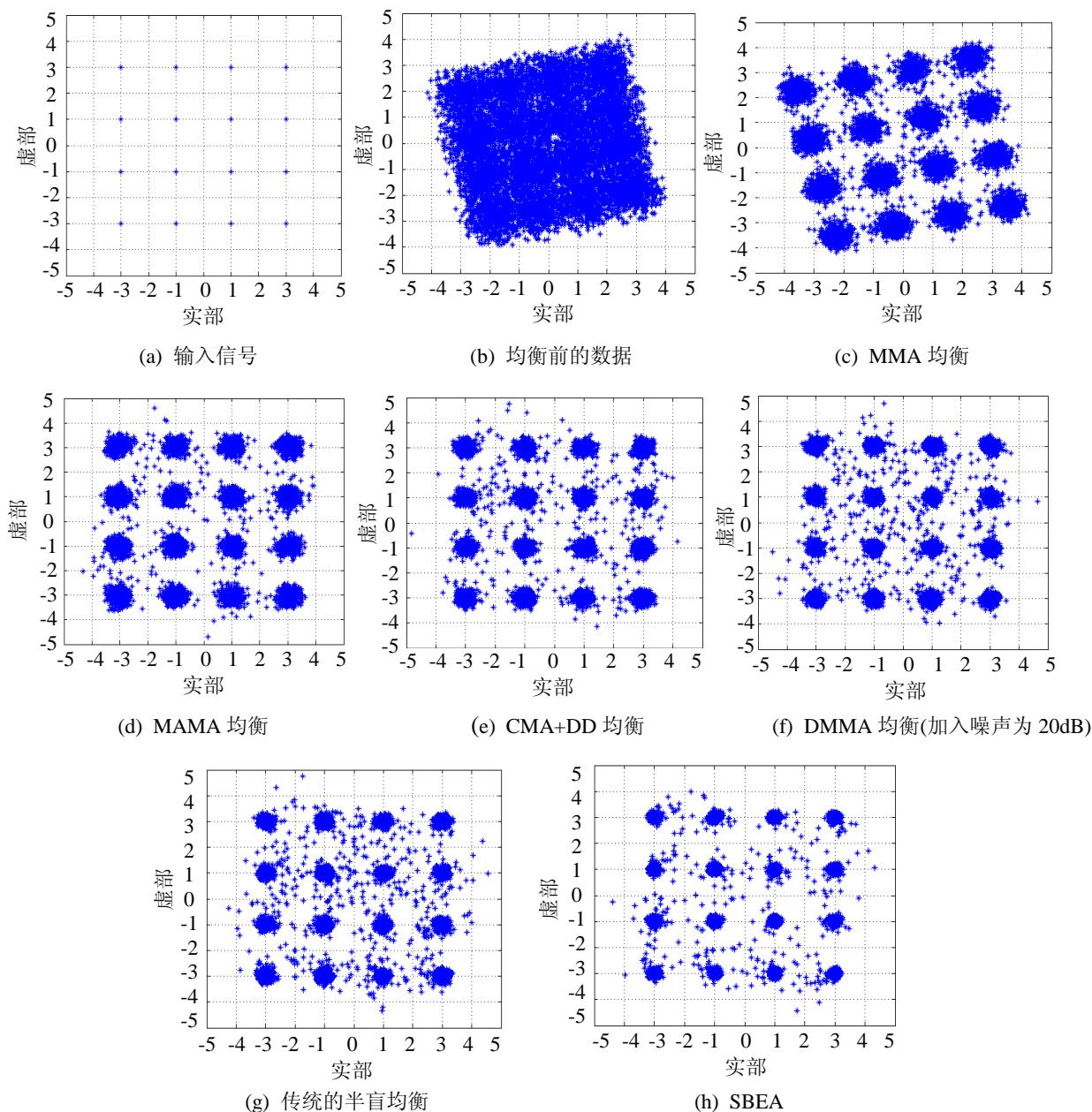


图 5 均衡前后星座图

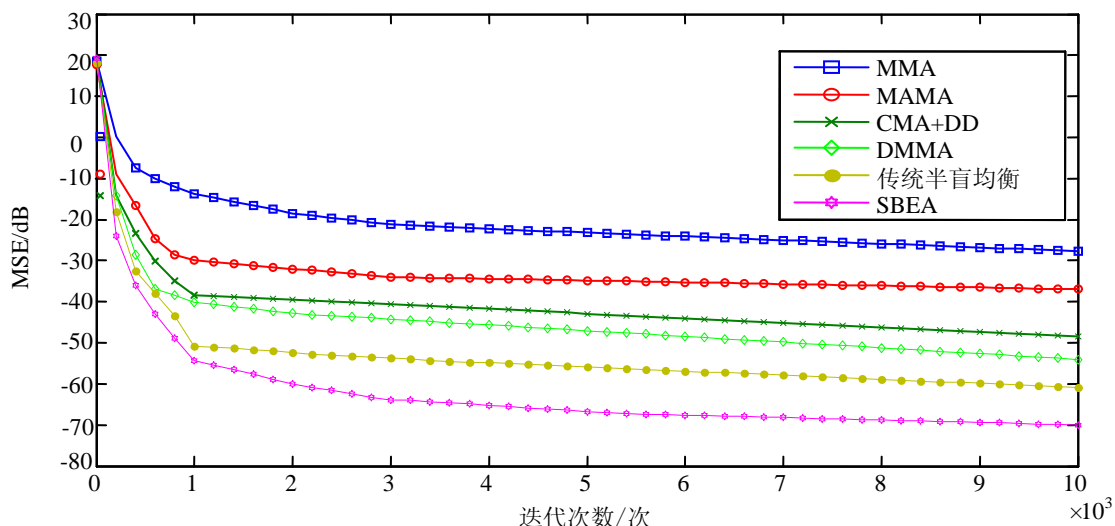


图 6 各种均衡算法后的最小均方误差比较

通过分析图 5 中的各种算法结果可以发现本文提出的 DMMA 与 SEBA 在相比较其他均衡算法具有较好的收敛效果, 并且 SEBA 的收敛精度明显高于 DMMA; 通过分析图 6 各种算法均衡到达最小均方误差时间以及所能达到的最小均方误差可以得出: DMMA 比其他盲信道均衡算法具有较快的收敛速度和最小均方误差, 而 SBEA 的收敛精度最高, 并且收敛速度最快。

通过图 5 和图 6 综合分析比较可以发现, DMMA 能够有效的消除相位偏转, 并且收敛程度比传统的双模式盲均衡收敛效果要好, 并且提高了盲信道均衡算法达到收敛时的时间。半盲均衡算法的星座图收敛效果最好, 在兼顾收敛精度的同时提高了收敛速度, 提高了均衡的收敛效率。

## 5 结论

本文提出了适用于高阶 QAM 的基于多模算法的双模式盲均衡算法和半盲均衡算法。作为多模算法的推广, 双模式多模算法利用两种不同的多模算法之间的相互切换, 更加迅速的修正模值, 更新迭代权值, 减少了模型失配误差。半盲算法在双模式盲均衡的基础上当判决误差达到足够小的时候转换到算法简单有效的 DD\_LMS 能够加快收敛速度, 节省频带资源并且简化算法, 节省了均衡时间。

仿真结果表明这两种方法在处理高阶 QAM 信号时表现出了良好的性能, 收敛速度和稳态误差都得到改善。

## 参考文献:

- [1] 李金明, 陆晶. 一种改进的分数间隔常数模盲均衡算法 [J]. 计算机仿真, 2012, 29(7): 159-162.
- [2] 窦高奇, 高俊. 适用于高阶 QAM 系统的多模盲均衡新算法 [J]. 电子与信息学报, 2008, 30(2): 388-391.
- [3] 张艳萍, 季怿. 一种基于聚类技术软切换的双模式盲均衡算法 [J]. 计算机应用研究, 2014, 31(10): 3078-3080.
- [4] Feng L, Lindong G, Yejin W. Dual - mode multi - modulus algorithms for blind equalisation of QAM signals [J]. European Transactions on Telecommunications (S1124-318X), 2008, 19(8): 917-921.
- [5] Ashmawy D, Banovic K, Abdel-Raheem E, *et al.* Joint MCMA and DD blind equalization algorithm with variable-step size [C]// IEEE International Conf. on Information Tech., 2009. USA: IEEE, 2009: 174-177.
- [6] Yan X, Wang Q, Qin K. Dual-mode blind decision feedback equalizer for high-order QAM multi-domain measurement [C]// Communications, Circuits and Systems, 2009, ICCAS 2009, International Conference on. USA: IEEE, 2009: 91-95.
- [7] 曹岚健. 一种快速收敛的半盲均衡算法 [P]. 中国专利(CN102255834A), 2011-11-23.
- [8] 赵晓群. 多算法加权融合的盲均衡算法 [J]. 北京邮电大学学报, 2009, 32(5): 41-46.