

基于星座修正聚类的双模式盲均衡算法

王 成 杨 宾 王大磊

(解放军信息工程大学信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 针对时变信道下, 调制类型未知的 MPSK/MQAM 类信号快速均衡问题, 本文提出了一种新的基于星座聚类的双模式均衡算法。初始阶段均衡器采用稳健的恒模算法, 一段时间后, 用低复杂度的减法聚类算法处理缓存的均衡器输出。然后利用 MPSK/MQAM 类信号星座图的几何旋转不变性, 采用 C 均值模糊聚类算法修正初次聚类的结果, 恢复信号星座, 由此获得精确符号信息。最后依据修复后的聚类效果选择切换时机, 均衡器切换到符号匹配算法, 完成信号均衡。与已有算法相比, 本文提出的新算法克服了调制类型未知的不利因素, 具有收敛速度快, 剩余码间干扰小, 均衡器模式切换时性能平稳等优点。仿真验证了新算法对 4PSK 和 16QAM 信号的有效性。

关键词: 双模式均衡; 星座聚类; 旋转修复

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2012)08-1194-06

Dual-Mode Blind Equalization Algorithm Based on Clustering

WANG Cheng YANG Bin WANG Da-lei

(Institute of Information Engineering, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The paper introduces a new dual-mode blind equalization algorithm for the MPSK/MQAM signals without modulation types identified under the time-varying channel. At the beginning, the constant modulus algorithm (CMA) is adopted in equalization for its robust performance. After a while, we get the cluster values of the equalized signal by subtraction clustering method. Notice that nearly all of the MPSK/MQAM signals' constellations have geometrical rotary symmetry, so the fuzzy c-means algorithm is introduced to modify the former cluster values for the signals' constellation rebuilding. Therefore we can get the signal's precise alphabet information from the modified constellation. Finally, the equalization switches to alphabet-matched algorithm (AMA) to obtain better performance, what's more the switching time depends on the cluster validity index. The new dual-mode algorithm can effectively overcome the difficulty that the modulation types are unknown. Compared with the existing methods, this new algorithm converges fast with few inter symbol interference and enable equalization switch smoothly from CMA to AMA. Simulation results have proved the efficiency of the proposed algorithm for 4PSK and 16QAM inputs.

Key words: dual-mode blind equalization; constellation clustering; rotation rebuilding

1 引言

在实际通信中, 为克服通信带宽受限和多径造成的码间干扰现象, 一般需要在接收端采用均衡技术。

盲均衡技术能够在不降低通信有效带宽同时完成信道均衡, 是近年来的研究热点。

在各种盲均衡算法中, 由 Godard^[1] 提出的常数模算法(CMA constant modulus algorithm)结构简单, 具备

较强的收敛能力,但稳态误差较大,收敛速度也不理想。判决引导和字符匹配^[2](AMA alphabet-matched algorithm)等算法利用了信号的星座信息,精度高,收敛快,跟踪能力强,但只有当信号眼图基本张开后才能使用。文献[3]首次提出双模式盲均衡算法策略:先用收敛稳健性较好的盲均衡算法处理,等均衡器收敛后,切换到误差性能较好的盲均衡算法,收到了良好效果。

包括 AMA 算法在内的大多数高性能均衡算法都是建立在已知信号调制类型的基础上的,然而在软件无线电系统中或非合作接收的情况下,信号调制类型一般未知,受多径影响,均衡前预先进行调制识别也较困难。针对此时的均衡问题,文献[4][5]采用一组均衡器对接收信号进行盲均衡,每路均衡器对应一种调制方式,完成均衡的同时,利用均衡效果判断信号调制类型。这种方案增加了系统的复杂度。

对信号进行初步均衡后,利用聚类可以方便地获得信号的调制状态和阶数信息^{[6][7]}。而聚类也已被应用于数据块的符号恢复^{[8][9]}。受此启发,本文在基于星座聚类识别处理的方案中引入 AMA 算法:对用稳健均衡算法处理后的数据进行初步聚类,然后利用 MPSK/MQAM 信号星座图的旋转对称性,修正得到的星座图,最后引入 AMA 算法完成信道均衡。新算法在信号调制类型未知的情况下,继承了 AMA 算法的良好性能,切换更平稳。同时避免了聚类识别方案所需的严格聚类和模板匹配。理论上,新算法对星座图对称的 MPSK 和 MQAM 信号均适用,仿真验证了其在 4PSK 和 16QAM 信号下的性能。

2 双模式均衡

假设接收端已进行过精确的载波同步和码元同步。则接收端得到的信号序列表达式为:

$$x(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} d(k)h(n - kT_s) + b(n) \quad n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (1)$$

式中: $x(n)$ 为等效基带信号; $h(\bullet)$ 为基带等效冲击响应函数; $d(k)$ 为基带发送符号序列,满足零均值,独立同分布的特性; $b(n)$ 为高斯白噪声; N 为观察数据长度。

用 FIR 滤波器构建均衡器,均衡处理表达式为:

$$y(n) = \sum_{i=1}^M w(n)x(n - i) \quad (2)$$

式中: M 为均衡器阶数, $w(n)$ 为均衡器权值, $y(n)$ 为均衡器输出。

对于 MPSK 和 MQAM 信号,CMA 代价函数定义为:

$$J = E\{(|y(n)|^2 - \gamma_2)^2\} \quad (3)$$

式中: $\gamma_2 = E[|d(n)|^4]/E[|d(n)|^2]^2$ 。

CMA 算法的物理意义是使均衡器输出的模值逼近常数,MQAM 信号虽然不满足恒模性质,但 CMA 算法对其仍有效。因此对 MPSK/MQAM 信号而言,CMA 算法是稳健的冷启动算法。

文献[7]提出的 AMA 算法代价函数定义为:

$$J = E\left\{1 - \prod_{i=1}^M \exp\left(-\frac{|y(n) - c(i)|^2}{2\sigma^2}\right)\right\} \quad (4)$$

式中: $c(i)$ 代表星座图中的第 i 个星座, σ 控制代价函数零点的宽度,由星座分布确定。

AMA 算法的物理意义是使均衡器输出与星座匹配后的匹配误差最小,因此它具备更高的精度和快速收敛能力,但很容易收敛到局部最小值,一般要信号眼图张开后使用。所以在文献[7]的 CMA+AMA 双模式均衡方案中,启动阶段采用 CMA 算法,一段时间后,切换到 AMA 算法,提高收敛速度的同时进一步降低稳态误差。另外如果切换时,星座图存在较大相偏,AMA 算法性能将下降,甚至无法收敛。因此该方案建议切换后,立即进行信号的相位补偿,以保证平稳切换。

双模式切换时机的选择,一般是对均衡器输出判决,看判决前后数据差别。在调制类型未知情况下,显然无法使用。如果统计 CMA 代价函数值大小,作为切换标准,又无法准确反映 QAM 信号均衡效果。关于未知调制类型时,双模式的切换时机的选择将在第五部分详细介绍。

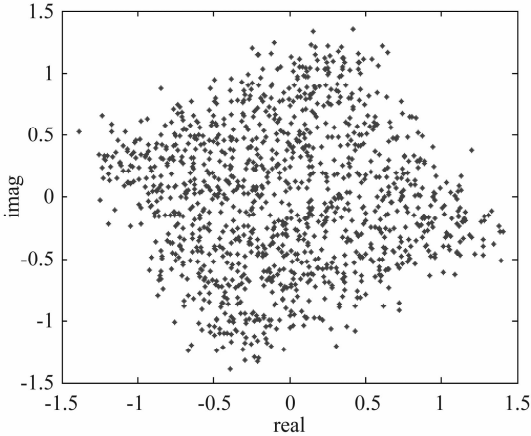
3 星座聚类

聚类是将一个数据集划分为若干组,使得组内的相似性大于组之间的相似性。依据星座图聚类,则通过星座的位置信息来分组。常用的聚类方法有减法聚类和 C 均值模糊聚类(Fuzzy c-means, FCM)算法。

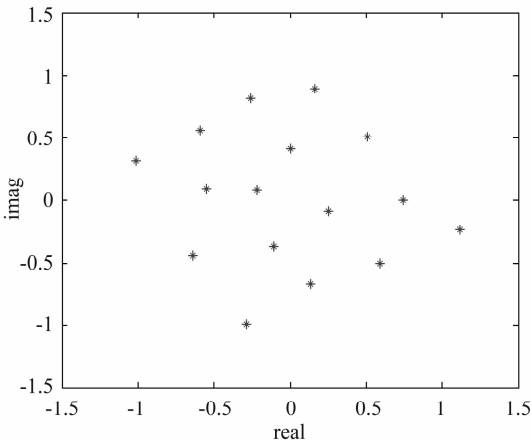
减法聚类计算复杂度较低,稳健性好。聚类识别方案中多用该方法对缓存的均衡器输出数据进行处理。减法聚类是基于密度的方法,它将每个数据作为候选聚类中心,通过衡量数据点间的欧式距离进行分

组,有关减法聚类的实现细节和参数选择详见文献[10]。

16QAM 均衡后,聚类数据和减法聚类结果如图 1 中(a)(b)所示。可以看到所得的聚类形状很不规则,组数也不一定是 2 的整数幂,无法提供准确的星座信息。



(a) 聚类数据
(a) data for clustering



(b) 减法聚类效果
(b) subtraction clustering result

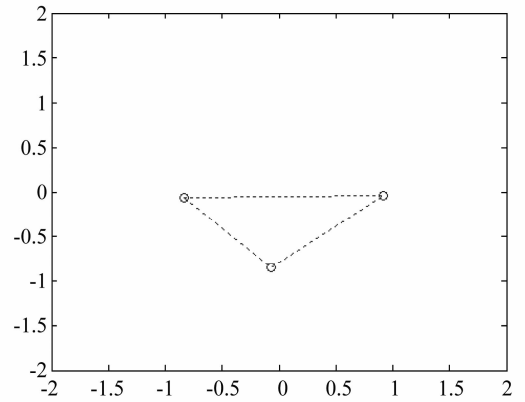
图 1 16QAM 聚类前后效果示意图

Fig. 1 Performance of the clustering for 16QAM input

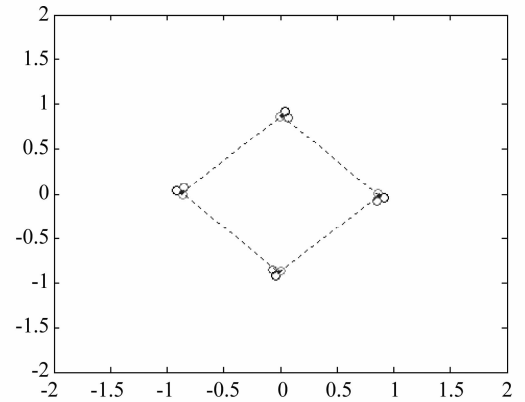
4 基于星座聚类的双模式均衡算法

在未知调制类型时,为了采用性能更好的 AMA 算法,聚类获得的星座图必须准确,而上述减法聚类效果显然不理想。考虑到 MPSK/MQAM 类信号星座图,无论是否存在相位偏移,都具有旋转不变性。将聚类得到的星座图分别旋转 0° 、 90° 、 180° 、 270° ,然后对四组数据叠加后再进行聚类,即可在一定程度上克服上述

形状不规则和组数不正确的问题。通过二次聚类修复 4PSK 信号星座的示意图,如图 2 所示:



(a) 修复前星座
(a) unmodified constellation



(b) 修复后星座
(b) modified constellation

图 2 星座修复效果示意图

Fig. 2 Performance of the constellation rebuilding

由于此时数据相对于初次聚类数据较少,故选用复杂度较高的 C 均值模糊聚类(Fuzzy c-means, FCM)算法。该算法采用模糊划分,迭代计算各数据点对各个分组的隶属度,具有更好的聚类性能。

在调制类型未知情况下,既无法用判决误差选择切换时机,用 CMA 代价函数值作为切换标准又不准确。而考虑到聚类后信号,如果星座图对称性较好,一般可以认为达到了初步均衡的目的。因此本文通过判断二次聚类时,FCM 处理的效果来选择切换时机。FCM 算法可用公式(5)评价聚类效果^[11]:

$$V_{bsaid}(U, V; c) = \frac{\sum_{j=1}^c u_{ij}^m \|x_j - v_i\|^2}{n_i \sum_{i=1}^c \|v_i - v_i\|^2} \quad (5)$$

其中 $\nu_i(i=1,2\cdots c)$ 代表聚类中心, $x_j(j=1,2\cdots n)$ 代表数据, u_{ij} 代表 FCM 算法中的数据相对于各组的隶属度。可见 V_{bsaid} 由两部分组成, 分子代表类内的紧致程度, 分母代表类间距离, 整体上反应了均衡效果。所以 V_{bsaid} 若小于门

限, 则认为可以切换; 否则均衡器仍用 CMA 算法, 且更新均衡器输出缓存, 一定时间后重新聚类。

综上所述, 本文提出的基于星座图聚类的双模式均衡算法处理流程如图 3 所示。

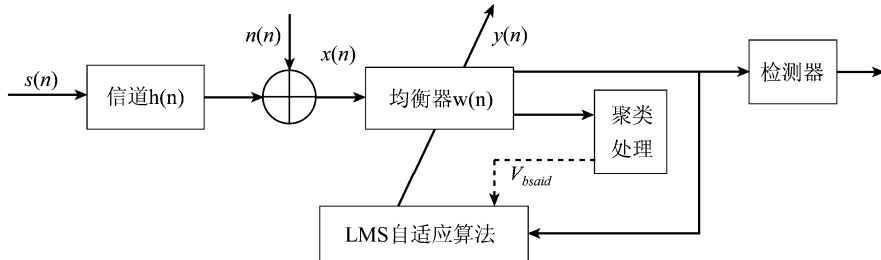


图 3 基于星座聚类的双模式均衡算法框图

Fig. 3 Procedure of the dual-mode equalization algorithm based on clustering

初始阶段, 均衡器选用 CMA 算法, 同时缓存一定长度的均衡结果, 一段时间后, 利用缓存数据进行减法聚类, 提取大致星座图, 然后用上述二次聚类方法, 对 4 组旋转后的星座集合进行 FCM 聚类, 修复星座图。待 V_{bsaid} 小于门限后, 用得到的星座图辅助 AMA 算法完成均衡。

由于引入了聚类运算, 新算法计算量较 CMA + AMA 算法有所增加。假设用于聚类的数据长度为 N , 减法聚类复杂度为 $O(N^2)$, FCM 算法复杂度为 $O(N^3)$ 。二次聚类虽然采用了 FCM 算法, 但由于信号调制阶数远小于用于数据长度, 本文算法增加的计算复杂度仍可认为是 $O(N^2)$ 。

5 仿真结果

计算机仿真选用信道 $[0.3887 \ 1 \ 0.3887]$, 均衡器采用抽头系数为 7 阶的横向均衡器, 中心抽头初始化为 1, 信噪比为 30dB。均衡器的收敛性能由剩余码间干扰 (ISI inter symbol interference) 度量, ISI 的表达式为:

$$ISI = \frac{\sum_n [|h(n) * w(n)|^2 - |h(n) * w(n)|_{\max}^2]}{|h(n) * w(n)|_{\max}^2} \quad (6)$$

图 4(a) 比较了新算法 (含修正星座与不修正星座两种情况) 与已知星座的 CMA+AMA 算法对 4PSK 信号的收敛性能。可以看出, 如果未二次聚类修复星座图, 剩余 ISI 很大。而采用了聚类修复星座图的新算法完全继承了 AMA 算法的高精度, 快收敛性能, 与已知星

座的 CMA+AMA 算法收敛曲线几乎重合。

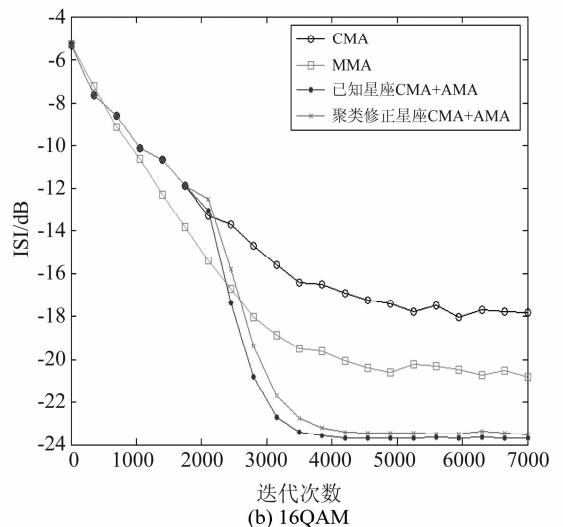
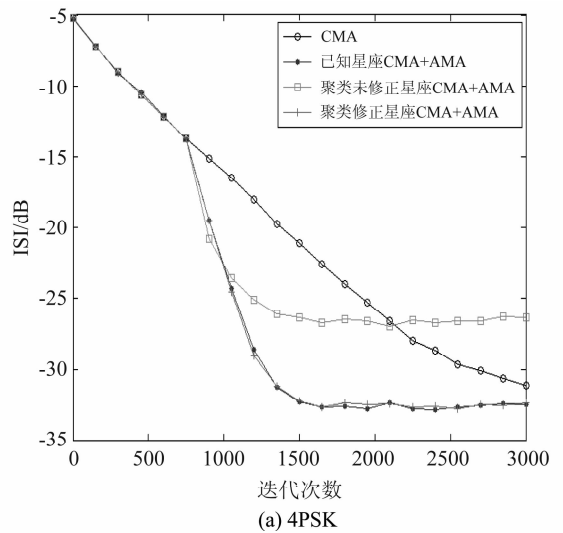
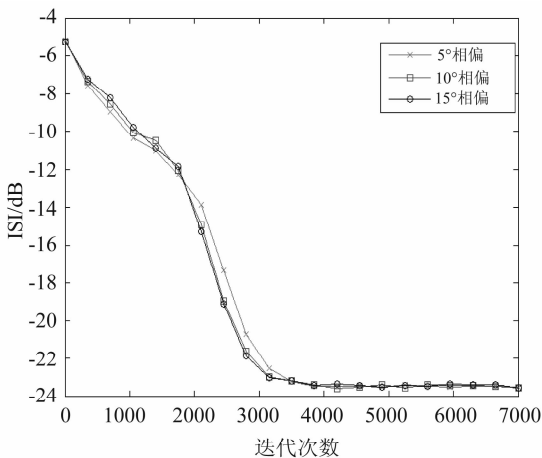


图 4 无相偏时 ISI 收敛曲线

Fig. 4 ISI plots without phase error

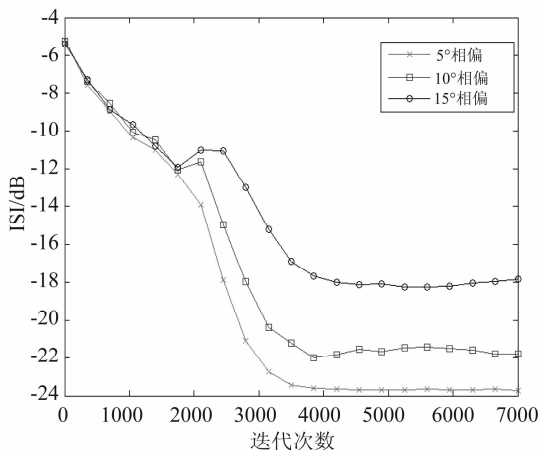
图4(b)比较了新算法与各经典算法对16QAM信号的收敛性能,仿真未加入相偏。因为信号调制阶数较高时,由聚类得到的修正星座和真实星座相比存在微小偏差,所以新算法性能比已知调制方式的CMA+AMA算法略差,但仍有很高的收敛速度和精度。

图5比较了新算法与已知星座的CMA+AMA算法对16QAM信号,在存在相位偏差时的收敛性能。分别加入 5° , 10° , 15° 的相位偏转,结果如图所示,本文算法对相偏不敏感,而已知星座的CMA+AMA算法相偏越大,切换时均衡器性能下降越明显,稳态剩余ISI也更大。这是因为相偏导致切换时,实际星座与CMA收敛到的符号位置有一定偏差。而聚类提取的星座包含偏转,用来辅助AMA算法,解决了切换时均衡器性能突降的问题,收敛速度不受相偏影响。但为正确检测,判决前应进行相位补偿。



(a) CMA+AMA配合聚类星座

(a) CMA+AMA with constellation from clustering



(b) CMA+AMA配合标准星座

(b) CMA+AMA with standard constellation

图5 16QAM信号有相偏时ISI收敛曲线

Fig. 5 ISI plots with phase error for 16QAM input

6 结束语

本文提出了一种新的基于星座聚类的双模式均衡算法。在未知信号调制类型的情况下,新算法在CMA+AMA算法基础上,首先对CMA均衡数据进行聚类处理,然后利用MPSK/MQAM信号的对称性,二次聚类修复星座图,并用聚类效果判断切换时机,最后引入AMA算法完成均衡。新算法继承了CMA+AMA双模式均衡高精度快收敛的优点,通过聚类克服了调制类型未知带来的影响,避免了信号识别所需的严格聚类 and 模板匹配。同时新算法克服了存在相位偏差情况下,切换到AMA算法时,均衡器性能下降的问题。与文献[4][5]算法相比,新算法结构更简单,适用信号范围更广。仿真验证了新算法的有效性。

参考文献

- [1] Godard D N. Self-recovering Equalization and Carrier Tracking in two Dimensional Data Communication System [J]. IEEE Trans on Communication, 1980, 28: 1867-1875.
- [2] Barbarossa S, Scaglione A. Blind Equalization using Cost Functions Matched to the Signal Constellation [C]. Pacific Grove (CA), Nov 1997. vol. 1: 550-554.
- [3] Weerackody V, Kassam S A. Blind adaptive equalization using dual-mode algorithms [A]. In: Proceedings of the Twenty-Fourth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers [C]. Pacific Grove, CA, Nov. 1990: 263-267.
- [4] Barbarossa S, Swami A, and Sadler B. Classification of digital constellations under unknown multipath propagation conditions [A]. In Proc. SPIE 2000, 4045: 175-185.
- [5] Wang B, Ge L D. A joint blind equalization and modulation identification algorithm [A]. In Proc. ICCAS, Gui Lin, China, Jan. 2006, 593-598.
- [6] Ying C Y, Li B B, Li Y L. Modulation classification of MQAM signals from their constellation using clustering [C]. IEEE 2010 Second International Conference on Communication Software and Networks, Singapore, 2010: 303-306.
- [7] 谭晓波, 张杭, 朱德生. 基于星座图恢复的PSK信号调制方式识别 [J]. 宇航学报. 2011年6期. 1386-1393. Tan X B, Zhang H, Zhu D S. Blind Modulation Recognition of PSK Signals Based on Constellation Recovery [J]. Journal of Astronautics. Vol32. No. 6 June. 2011, 1386-

1393. (in Chinese)

- [8] Costamagna E, Favalli L. and Savazzi P. Blind recovery of M-QAM signals for fading channels using the fuzzy c-means algorithm [C]. IEEE VTC '99, Houston, TX: 516-520.
- [9] Lain J K, Huang C T. FPCM-Assisted Blind Channel Equalization of M-QAM Signals for Time-Varying Channels [C]. In Proc. Networking Sensing and Control. London. April 2007:15-17.
- [10] 裴继红,范九伦,谢维信. 聚类中心的初始化方法[J]. 电子科学学刊,1999,21(3):320~325.
Pei J H, Fan J L, Xie W X. A New Initialization Method of Cluster Centers[J]. 1999,21(3):320-325. (in Chinese)
- [11] 朱文婕,吴楠,胡学钢. 一个改进的模糊聚类有效性指标[J]. 计算机工程与应用. 2011,47(5):206-209.
Zhu W J, Wu N, Hu X G. Improved cluster validity index for fuzzy clustering[J]. Computer Engineering and Applications. 2011,47(5):206-209. (in Chinese)

作者简介



王 成(1988-)男,生于河南郑州,2010年毕业于解放军信息工程大学,现为解放军信息工程大学在读硕士研究生,主要研究方向为信道盲均衡技术、调制识别技术。E-mail:melody198819@163.com



杨 宾(1974-)男,生于江西南昌,2003年获解放军信息工程大学硕士学位,现为解放军信息工程大学副教授,研究方向为通信信号处理。
E-mail:ybmailbox@126.com



王大磊(1984-)男,生于河南开封,2010年获解放军信息工程大学硕士学位,现为解放军信息工程大学在读博士生,研究方向为通信信号处理。
E-mail:278345660@qq.com