

基于 16QAM 信号星座点判决域切换的混合正方形轮廓线算法

张艳萍¹ 郭磊¹

摘要

提出了一种基于 16QAM 信号星座点判决域切换的混合正方形轮廓线算法. 该算法通过判决输出信号是否在星座点判决域内, 在正方形轮廓线算法和判决导引算法之间进行切换, 不仅能够对输出信号进行相位恢复, 而且可以得到更小的剩余码间干扰. 水声信道仿真结果表明: 与传统的正方形轮廓线算法相比, 混合正方形轮廓线算法的码间干扰更低, 输出星座点更紧凑, 对水声信道具有良好的均衡能力.

关键词

盲均衡; 正方形轮廓线; 正交幅度调制; 相位恢复

中图分类号 TN91

文献标志码 A

0 引言

QAM(正交幅度调制)信号是一种振幅和相位相结合的多进制、高频带利用率的数字调制方式,但其抗误码性能和抗衰老性能较低,因此对高阶 QAM 信号的接收,采取盲均衡算法非常重要^[1].

在各种盲均衡算法中,常数模算法(Constant Modulus Algorithm, CMA)^[2]在 QAM 系统中应用广泛,但是该算法在收敛后仍然存在较大的剩余误差,并且 CMA 的代价函数中没有相位信息,无法对输出信号进行相位恢复. 文献[3]提出的正方形轮廓线算法(Square Contour Algorithm, SCA)结合了简化星座算法(Reduced Constellation Algorithm, RCA)^[4]和 CMA 的优点,能够恢复均衡器输出信号的相位旋转并且具有较高的收敛能力,然而对于高阶 QAM 信号,SCA 算法仍然具有较高的码间干扰(Intersymbol Interference, ISI). 为此,本文提出了一种基于信号星座点判决域切换的混合正方形轮廓线算法(SCA-DD),该算法通过在不同的区域切换 SCA 算法和判决导引算法(Dicision-Directed, DD)^[5],能够对输出信号进行相位恢复,而且能够得到较小的码间干扰. 通过对水声信道模型进行计算机仿真,结果表明混合正方形轮廓线算法不仅具有载波相位恢复的能力,而且较 SCA 算法码间干扰更低,说明所提出的混合正方形轮廓线算法在水声信道盲均衡中具有良好性能.

1 正方形轮廓线算法(SCA)

传统的常数模算法性能稳定且容易实现,但因为 CMA 算法的代价函数中只利用了信号的幅度信息,而没有相位信息,因此当有相位错误时, CMA 算法也会收敛,无法完成载波恢复^[6].

简化星座算法试图将输出信号星座排列在简化的 4 点对称的星座图上,因此有一定的相位旋转能力. 然而对于二维信号,如 QAM, RCA 算法虽然容易实现,但却无法提供可靠的初始收敛.

SCA 算法结合了 RCA 和 CMA 2 种算法的优点,能够自动纠正均衡器输出信号的相位旋转,并且具有良好的收敛性能.

SCA 的代价函数为

$$J_{SCA} = E\{((|y_r(k) + y_i(k)| + |y_r(k) - y_i(k)|)^2 - R_{SCA}^2)^2\}. \quad (1)$$

收稿日期 2011-10-11

资助项目 江苏省自然科学基金(BK2009410)

作者简介

张艳萍,女,博士,教授,研究方向为通信信号处理及水声通信. zypjic@163.com

¹ 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 南京, 210044

其中, $y(k)$ 是均衡器输出, $y(k) = \mathbf{f}^T(k)\mathbf{X}(k)$, $y_r(k)$ 和 $y_i(k)$ 分别是 $y(k)$ 的实部和虚部, $\mathbf{X}(k)$ 是均衡器输入, $\mathbf{f}(k)$ 是均衡器权系数向量, T 为转置运算, R_{SCA} 是与信源高阶统计量有关的一个常数, 称为弥散常数

$$R_{SCA} = \frac{E(|s_r(k) + s_i(k)| + |s_r(k) - s_i(k)|)^2 Q}{E\{|Q|\}}, \quad (2)$$

其中

$$Q = (|s_r(k) + s_i(k)| + |s_r(k) - s_i(k)|) \times (\text{sgn}[s_r(k) + s_i(k)](1+j) + \text{sgn}[s_r(k) - s_i(k)](1-j))s^*(k), \quad (3)$$

式(3)中 $s_r(k)$ 和 $s_i(k)$ 分别是发射信号 $s(k)$ 的实部和虚部, $*$ 表示共轭运算, $\text{sgn}(\cdot)$ 为标准符号函数:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x = 0, \\ -1, & x < 0. \end{cases}$$

对式(1)求关于权系数向量 $\mathbf{f}(k)$ 的偏导, 并用瞬时值代替均值, 得到 SCA 算法的误差函数 e_{SCA} 为

$$e_{SCA}(k) = 4y_r(k)(4y_r(k) - R_{SCA}^2)A + j4y_i(k)(4y_i(k) - R_{SCA}^2)B, \quad (4)$$

其中

$$A = \frac{\text{sgn}(y_r(k))}{2}(\text{sgn}(y_r(k) + y_i(k)) + \text{sgn}(y_r(k) - y_i(k)))$$

$$= \begin{cases} 1, & |y_r| \geq |y_i|, \\ 0, & |y_r| < |y_i|, \end{cases} \quad (5)$$

$$B = \frac{\text{sgn}(y_i(k))}{2}(\text{sgn}(y_r(k) + y_i(k)) + \text{sgn}(y_r(k) - y_i(k)))$$

$$= \begin{cases} 1, & |y_r| \leq |y_i|, \\ 0, & |y_r| > |y_i|. \end{cases} \quad (6)$$

由最速梯度下降法可得 SCA 算法的权向量迭代式如下:

$$\mathbf{f}(k+1) = \mathbf{f}(k) - \mu e_{SCA}(k)\mathbf{X}^*(k), \quad (7)$$

其中 μ 为迭代步长, $*$ 表示共轭运算.

2 混合正方形轮廓线算法(SCA-DD)

SCA 算法相比于 CMA 算法能够恢复相位旋转和减小码间干扰, 然而对于高阶 QAM 信号(如 16QAM), SCA 算法仍然有较高的码间干扰^[7]. 在盲均衡算法中, 判决导引算法虽然剩余误差较小, 但在信道眼图闭合或突发干扰时, 错误判决的比例会比较大, 往往不具备使闭合眼图睁开的能力, 因此常采用其他收敛性能较好的盲算法作冷启动, 在眼图睁开以后再切换到判决导引模式^[8].

为了克服 SCA 的不足, 本文提出了混合正方形轮廓线算法. 根据文献[9]中提到的切换方式, 令星座点判决域为切换门限, 可以有效地启动 DD 算法, 因为当输出信号落在星座点的附近时, 可以认为此时码间干扰量已经达到 DD 算法所要求的程度. 该算法以 SCA 算法为第一模式, DD 算法为第二模式, 通过判断 $y(k)$ 是否在星座点判决域内, 切换 2 种算法. 针对 16QAM 信号, 令 D 为内外相邻 2 星座点之间的距离, 星座点判决域为 16 个以星座点为中心的小正方形区域 S , 小正方形的半径为 d , 如图 1 所示. d 的取值应该小于 D , 取 $d = D/4$. 当输出信号 $y(k)$ 在 S 外时, 认为系统还没有收敛到 DD 算法所要求的程度, 则使用 SCA 算法的误差函数; 当输出信号 $y(k)$ 在 S 内时, 表明此时的码间干扰量已经达到 DD 算法所要求的程度, 可以切换至 DD 算法.

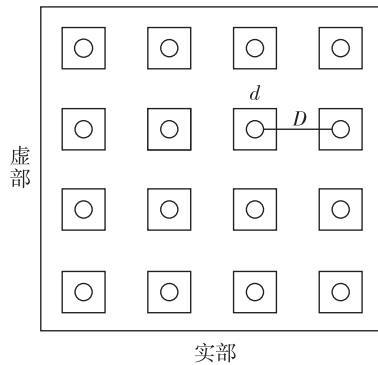


图 1 16QAM 信号星座

Fig. 1 16QAM signal constellation chart

SCA-DD 算法的权值迭代过程如下.

$$1) y(k) = \mathbf{f}^T(k)\mathbf{X}(k).$$

2) 当 $y(k)$ 落在判决域外时, 则采用 SCA 算法:

$$e_1(k) = 4y_r(k)(4y_r(k) - R_{SCA}^2)A + j4y_i(k)(4y_i(k) - R_{SCA}^2)B, \quad (8)$$

$$\mathbf{f}(k+1) = \mathbf{f}(k) - \mu_1 e_1(k)\mathbf{X}^*(k), \quad (9)$$

其中, A 和 B 分别见式(5)和(6).

否则切换到 DD 算法:

$$e_2(k) = y(k) - \hat{s}(k), \quad (10)$$

$$\mathbf{f}(k+1) = \mathbf{f}(k) - \mu_2 e_2(k)\mathbf{X}^*(k), \quad (11)$$

其中, μ_1 和 μ_2 分别是 SCA 和 DD 算法的迭代步长, $\hat{s}(k)$ 为判决器输出, $e_1(k)$ 和 $e_2(k)$ 分别代表 SCA 算法和 DD 算法的误差项.

3 仿真

为了验证本文提出的混合正方形轮廓线算法的

性能效果, 在计算机上进行仿真测试. 本仿真采用的发射信号为 16QAM, 水声通信信道采用文献[10]给出的信道

$$h = [-0.005 - 0.004j, 0.009 + 0.030j, \\ -0.024 - 0.104j, 0.854 + 0.520j, \\ -0.218 + 0.273j, 0.049 - 0.074j, \\ -0.016 + 0.020j] \exp(-j\pi/3),$$

信噪比取 30 dB, 均衡器的长度为 12. 因为输入信号为 16QAM, 计算得 $D = 0.4714$, 则 d 取值 0.12. 仿真时采用了 2 个步长: SCA 算法的迭代步长 $\mu_1 = 0.0009$, DD 算法的迭代步长 $\mu_2 = 0.0004$. 迭代 8 000 次, 20 次蒙特卡罗实验. 仿真结果如图 2 所示.

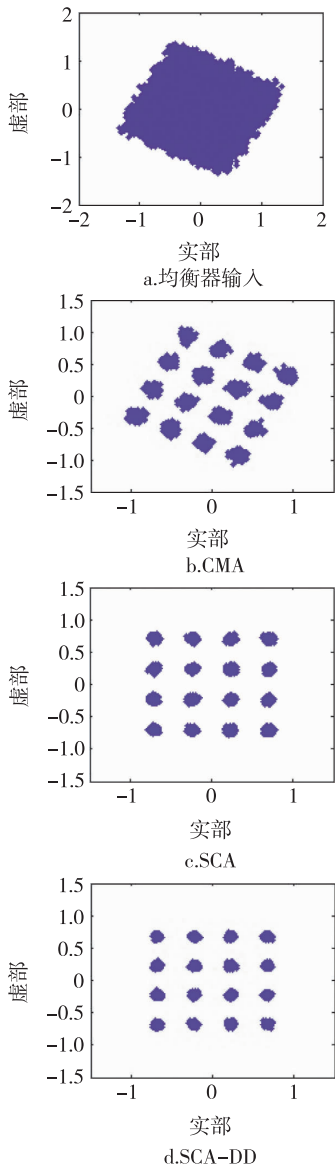


图 2 均衡器输入及 3 种算法收敛后的输出信号星座
Fig. 2 Equalizer input and the convergence output signal constellation chart of the three algorithms

图 2 是均衡器输入及 CMA、SCA、SCA-DD 3 种算法收敛后的输出信号星座. 从图 2 中可以看出: CMA 算法不具有相位恢复的能力, 输出信号星座图有一定的相位旋转并且比较分散; SCA 和 SCA-DD 算法都具有相位恢复的能力, 并且 SCA-DD 算法的星座点比 SCA 算法的星座点更加紧凑, 这说明了 SCA-DD 算法比 SCA 算法的收敛能力更好.

图 3 是 3 种算法的码间干扰. 可见 CMA 算法的码间干扰最大, 并且收敛速度也比较慢. SCA 算法相比 CMA 算法, 提升了收敛速度并且降低了码间干扰. 本文所提出的混合正方形轮廓线算法由于采用了在 2 种算法之间切换的办法, 在略微降低收敛速度的前提下, 性能在 SCA 算法基础上又有所提高, 稳定后的剩余码间干扰最小.

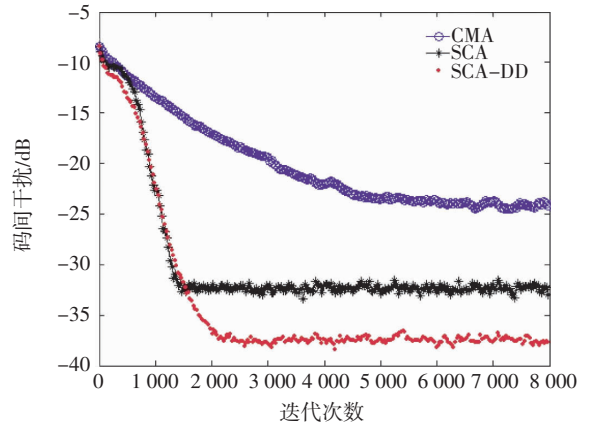


图 3 3 种算法的码间干扰

Fig. 3 The intersymbol interferences of the three algorithms

4 结论

在对 16QAM 信号进行盲均衡的各种算法中, 正方形轮廓线算法相比于常数模算法不仅具有相位恢复能力, 而且有更快的收敛速度和更低的剩余码间干扰. 本文提出的混合正方形轮廓线算法通过采用星座点判决域的方法, 使得 SCA 算法稳定收敛的时候能够立即切换到 DD 算法, 与传统的 SCA 算法相比, 混合正方形轮廓线算法码间干扰更低, 输出星座点更紧凑.

参考文献

References

- [1] 张艳萍. 水声通信信道盲均衡理论与算法[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 53
ZHANG Yanping. Blind equalization theory and algorithm

- of underwater acoustic communication channel [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009: 53
- [2] Godard D. Self-recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 1980, 28 (11): 1867-1875
- [3] Thaiupatump T, Kassam S A. Square contour algorithm: A new algorithm for blind equalization and carrier phase recovery [C] // Conference Record of the 37th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2003, 1: 647-651
- [4] Sato Y. A method of self-recovering equalization for multilevel amplitude-modulation systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 1975, 23 (6): 679-682
- [5] Lucky R W. Techniques for adaptive equalization of digital communication systems [J]. The Bell Systems Technical Journal, 1966, 45 (2): 255-286
- [6] Mathis H. Nonlinear functions for blind separation and equalization [D]. Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 2001
- [7] Sheikh S A, Fan P Z. New blind equalization techniques based on improved square contour algorithm [J]. Digital Signal Processing, 2008, 18 (5): 680-693
- [8] Endres T J. Equalizing with fractionally-spaced constant modulus and second order statistics blind receivers [D]. Ithaca, NY: Cornell University, 1997
- [9] Lin J C. Blind equalisation technique based on an improved constant modulus adaptive algorithm [J]. IEEE Proceedings on Communications, 2002, 149 (1): 45-50
- [10] Picchi G, Prati G. Blind equalization and carrier recovery using a “stop-and-go” decision-directed algorithm [J]. IEEE Transactions on Communications, 1987, 35 (9): 877-887

The hybrid square contour algorithm switches based on the judgement domain of the constellation points for 16QAM signals

ZHANG Yanping¹ GUO Lei¹

1 School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract A hybrid square contour algorithm for 16QAM signals is proposed. By judging whether the output signals are in the judgement domain of the constellation points and switching the algorithm between the square contour algorithm (SCA) and decision-directed (DD), this algorithm can recover the phase and reduce the Intersymbol Interference (ISI). Simulation results with underwater acoustic channel verify the significant improvements of the proposed algorithm in the convergence rate and ISI as compared with the conventional SCA. The ISI of the proposed algorithm is low, thus can provide underwater acoustic channel with significant equalization ability.

Key words blind equalization; square contour; quadrature amplitude modulation; phase recovery