

一种基于 stop-and-go 改进的 MCMA 盲均衡算法

张艳萍¹ 董方¹

摘要

修正的常数模算法(MCMA)可以纠正相位旋转,但剩余稳态误差较大.在 stop-and-go 架构的基础上,提出了基于 stop-and-go 改进的 MCMA 算法.首先将局部信息量引入 MCMA 的误差函数,然后运用 stop-and-go 减少错误均衡的思想,使算法的均衡方向与 MCMA 保持一致,以降低剩余稳态误差.仿真结果表明,基于 stop-and-go 改进的 MCMA 盲均衡算法在保证收敛速度的同时,码间干扰比 MCMA 算法降低了 10 dB.

关键词

水声信道;盲均衡;stop-and-go;修正的常数模算法

中图分类号 TN91

文献标志码 A

0 引言

目前,在带宽受限的水声信道进行高速数字通信时,多采用盲均衡技术^[1]来降低或消除多径效应引起的码间干扰(Inter-Symbol Interference, ISI),以提高水声通信的可靠性.修正的常数模算法(Modified Constant Modulus Algorithm, MCMA)算法在完成信道均衡的同时,对载波相位进行了恢复,能跟踪由于快速变化而引起载波相位不稳定的信道,但不足之处是稳态误差较大^[2]. stop-and-go^[3]方法由于结合了判决法和 Sato 算法的优点,具有计算简单,稳态误差低的优点,其核心思想就是通过“减少错误的均衡”来提高算法的收敛性能.但是若想将“减少错误均衡”的思想运用到其他算法中,就必须对 stop-and-go 算法进行改进.文献[4]提出了一种 stop-and-go 架构,这种架构可以用于随机梯度盲均衡算法的 stop-and-go 改进.本文采用文献[4]中把判决器输出 $\hat{a}(k)$ 引入误差函数的方法,对 MCMA 算法的误差函数进行修改,得到了基于 stop-and-go 改进的 MCMA 盲均衡算法的误差函数.该算法可以成功地将 stop-and-go 技术运用到 MCMA 算法,提高算法的收敛性能,降低剩余稳态误差.

1 Stop-and-go 算法和 MCMA 算法

盲均衡系统的等效基带模型如图 1 所示.其中 $a(k)$ 和 $n(k)$ 分别表示信道输入信号和信道噪声,信道 c 为线性时不变滤波器.均衡器的输入 $X(k)$ 经由抽头延迟线结构的盲均衡器 $f(k)$ 后,得到均衡器的输出信号 $y(k)$.判决器对 $y(k)$ 进行判决,得到发射信号的估计 $\hat{a}(k)$,可以用于恢复原始信号 $a(k)$.

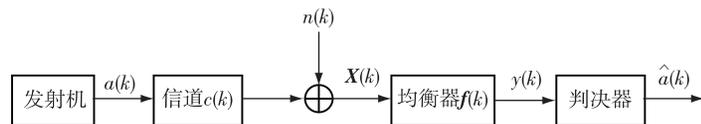


图 1 盲均衡系统等效基带框

Fig. 1 Block diagram of blind equalization system

收稿日期 2011-12-16

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以及水声通信. zypgjc@163.com

¹ 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 南京,210044

Prati 等^[3]首次提出 stop-and-go 算法.这种算法的基本思想是当判决输出误差的可靠性不是充分高时,停止自适应抽头系数的更新,反之则自动更新自适应抽头的系数.抽头系数的更新是“走”还是“停”

取决于误差函数. stop-and-go^[3,5]的误差函数 e_{SC} 的表达式为

$$e_{SC} = \frac{1}{2}[e_{DD}(k) + |e_{DD}(k)| \cdot \text{sgn}(e_s(k))], \quad (1)$$

即:

$$e_{SC} = \begin{cases} e_{DD}(k), & \text{sgn}(e_{DD}(k)) = \text{sgn}(e_s(k)), \\ 0, & \text{sgn}(e_{DD}(k)) \neq \text{sgn}(e_s(k)). \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中 $e_{DD}(k)$ 是判决导引(Decision Directed, DD)算法的误差函数,表达式为

$$e_{DD}(k) = y(k) - \hat{a}(k), \quad (3)$$

$e_s(k)$ 的表达式是

$$e_s(k) = y(k) - \beta \cdot \text{sgn}(y_R(k) + jy_I(k)), \quad (4)$$

其中, β 为待定参数^[6], $\text{sgn}[\cdot]$ 是取符号运算. 下标 R 和 I 分别表示信号的实部和虚部.

stop-and-go 算法的权系数向量迭代式为

$$f(k+1) = f(k) - \mu \cdot e_{SC}(k) X^*(k), \quad (5)$$

其中, μ 是步长因子, $*$ 表示共轭运算.

在盲均衡中,实际的均衡方向很有可能是错误的. stop-and-go 算法的思想就是在均衡方向错误时,停止权系数向量的迭代,当均衡方向正确时则继续权系数向量的迭代. 这样就可以有效地减少错误的均衡对算法收敛性能的影响. 从式(1)和(2)可以看出:当 DD 算法的误差函数符号与 $e_s(k)$ 的符号一致时,以 $e_{DD}(k)$ 作为 stop-and-go 算法的误差函数继续自适应过程,而当 DD 算法的误差符号与 $e_s(k)$ 的符号不同时,stop-and-go 算法的误差函数取 0,即停止自适应过程. 这样可以减少错误的均衡,从而提高算法的收敛性能.

MCMA 算法的代价函数包含实部和虚部两部分,因此 MCMA 算法能够对相位误差进行补偿^[7]. 其代价函数为

$$J(k) = \frac{1}{4}E[(y_R^2(k) - R_R)^2] + \frac{1}{4}E[(y_I^2(k) - R_I)^2], \quad (6)$$

其中弥散常数 R_R 和 R_I 的定义如下:

$$R_R = \frac{E[|a_R(k)|^4]}{E[|a_R(k)|^2]}; \quad R_I = \frac{E[|a_I(k)|^4]}{E[|a_I(k)|^2]}. \quad (7)$$

MCMA 盲均衡算法的误差函数为

$$e(k) = e_R(k) + je_I(k), \quad (8)$$

$$\begin{cases} e_R(k) = y_R(k)(y_R^2(k) - R_R), \\ e_I(k) = y_I(k)(y_I^2(k) - R_I). \end{cases}$$

均衡器权向量系数迭代公式为

$$f(k+1) = f(k) - \mu e(k) X^*(k). \quad (9)$$

2 基于 stop-and-go 改进的 MCMA 盲均衡算法

由于判决器输出值 $\hat{a}(k)$ 会根据均衡器输出值的改变而改变,将其称为“局部信息量”,而信号间平均距离、星座图的形状等统计值和星座图结构,不会因均衡器某个特定时刻输出的改变而变化,将其称为“全局信息量”. 由于只含有全局信息量的算法无法消除特定时刻处于错误方向的均衡,而含有局部信息量 $\hat{a}(k)$ 的算法却可以做到^[4,8].

根据以上分析,本文首先将局部信息量 $\hat{a}(k)$ 引入 MCMA 的误差函数. 若 $\hat{a}_R(k)$ 和 $\hat{a}_I(k)$ 分别表示判决器输出 $\hat{a}(k)$ 的实部和虚部,使用 $|\hat{a}_R(k)|^2$ 和 $|\hat{a}_I(k)|^2$ 分别代替 MCMA 算法中弥散常数的实部和虚部 R_R 和 R_I ^[6],得到误差函数如下:

$$\hat{e}(k) = \hat{e}_R(k) + j\hat{e}_I(k), \quad (10)$$

$$\begin{cases} \hat{e}_R(k) = y_R(k)(y_R^2(k) - |\hat{a}_R(k)|^2), \\ \hat{e}_I(k) = y_I(k)(y_I^2(k) - |\hat{a}_I(k)|^2). \end{cases}$$

可以看出式(10)是一个多模算法的误差函数. 从星座图上看,该误差函数可以强制性地使 $y(k)$ 收敛于含有局部信息量 $\hat{a}(k)$ 的点上,因此误差函数的失调率更低,从而可以有效地降低剩余稳态误差.

其次,采用“stop-and-go”减少错误均衡的思想进一步修改误差函数如下:

$$\hat{e}(k) = \omega_R \hat{e}_R(k) + j\omega_I \hat{e}_I(k), \quad (11)$$

其中 ω_R 和 ω_I 分别用来控制迭代的继续和停止,其定义为

$$\omega_R = \begin{cases} 1, & \text{sgn}(\hat{e}_R(k)) = \text{sgn}(e_R(k)), \\ 0, & \text{sgn}(\hat{e}_R(k)) \neq \text{sgn}(e_R(k)); \end{cases}$$

$$\omega_I = \begin{cases} 1, & \text{sgn}(\hat{e}_I(k)) = \text{sgn}(e_I(k)), \\ 0, & \text{sgn}(\hat{e}_I(k)) \neq \text{sgn}(e_I(k)). \end{cases} \quad (12)$$

为了加快收敛速度,做如下推导:

由式(10)得

$$\text{sgn}[\hat{e}_R(k)] = \text{sgn}[y_R(k)(y_R^2(k) - |\hat{a}_R(k)|^2)] = \text{sgn}[y_R(k)(y_R(k) + \hat{a}_R(k))(y_R(k) - \hat{a}_R(k))] = \text{sgn}[y_R(k)(y_R(k) + \hat{a}_R(k))] \cdot \text{sgn}[y_R(k) - \hat{a}_R(k)] = \text{sgn}[y_R(k)(y_R(k) + \hat{a}_R(k))] \cdot \text{sgn}[e_{DD,R}(k)],$$

其中 $e_{DD,R}(k)$ 和 $e_{DD,I}(k)$ 分别表示 DD 算法误差函数 $e_{DD}(k)$ 实部和虚部,且 $e_{DD}(k) = e_{DD,R}(k) + je_{DD,I}(k)$. 由于 $\text{sgn}[y_R(k)(y_R(k) + \hat{a}_R(k))] = 1$, 所以 $\text{sgn}[\hat{e}_R(k)] = \text{sgn}[e_{DD,R}(k)]$, 同理可证 $\text{sgn}[\hat{e}_I(k)] = \text{sgn}[e_{DD,I}(k)]$, 因此式(12)可以改为

$$\omega_R = \begin{cases} 1, & \text{sgn}(e_{DD,R}(k)) = \text{sgn}(e_R(k)), \\ 0, & \text{sgn}(e_{DD,R}(k)) \neq \text{sgn}(e_R(k)); \end{cases}$$

$$\omega_l = \begin{cases} 1, & \text{sgn}(e_{\text{DD},l}(k)) = \text{sgn}(e_l(k)), \\ 0, & \text{sgn}(e_{\text{DD},l}(k)) \neq \text{sgn}(e_l(k)). \end{cases} \quad (13)$$

与此对应的均衡器权向量系数迭代公式为

$$f(k+1) = f(k) - \mu \hat{e}(k) X^*(k). \quad (14)$$

式(11)、(13)、(14)构成了本文所提出的基于 stop-and-go 改进的 MCMA 盲均衡算法 (stop-and-go Modified CMA, SAGMCMA). 其均衡流程是: 当 $e_R(k)$ 的符号和 $\hat{e}_R(k)$ 的符号相同的时候, 则认为此次均衡的方向没有错误, $\omega_R = 1$, 权向量系数迭代继续进行; 当 $e_R(k)$ 的符号和 $\hat{e}_R(k)$ 的符号不同的时候, 则认为此次均衡的方向有误, $\omega_R = 0$, 权向量系数迭代停止. $\hat{e}_l(k)$ 和 $e_l(k)$ 的处理过程与上面相同. 这样就可以排除错误方向上的均衡, 提高算法的收敛性能.

从算法复杂度方面分析, 新算法与 MCMA 算法相比每次迭代时, 新的误差函数与判决准则共增加了 2 次乘法运算和 4 次取符号运算. 由于取符号运算的运算量较低, 因此可以近似地认为只增加了 2 次乘法运算. 可见算法的复杂度增加很小, 而且和均衡器的长度无关.

3 算法性能仿真

为了验证本文提出的基于 stop-and-go 改进的 MCMA 盲均衡算法 SAGMCMA 的性能, 对 MCMA 和 SAGMCMA 算法进行了计算机仿真实验. 本仿真采用的均衡器的结构为横向均衡器, 均衡器的长度为 21, 中心抽头初始化, 发射信号为 16 QAM, 信噪比取 25 dB, 信道噪声为高斯白噪声, 仿真所选取的信道为文献[3]给出的信道. 为了比较两种算法具有相同的收敛速度时码间干扰的不同, MCMA 算法步长因子取 0.01, SAGMCMA 算法步长因子取 0.014, 迭代 10 000 次, 并取 20 次蒙特卡罗实验. 均衡器的收敛

性能剩余码间干扰 ISI^[3] 表示为

$$I_{\text{SI}} = \frac{\sum_i |h_i|^2 - |h|_{\text{max}}^2}{|h|_{\text{max}}^2}, \quad (15)$$

其中 $|h|_{\text{max}}$ 表示合成信道 h 中绝对值最大的项.

图 2 给出了算法的均衡器输出仿真结果. 其中图 2a 给出了输入信号星座, 该图具有明显的相位旋转. 图 2b 和图 2c 分别给出了 MCMA 算法以及本文提出的 SAGMCMA 算法的均衡器输出星座图. 由于 MCMA 算法和 SAGMCMA 算法都引入了信号点的实部和虚部, 所以这两种算法均可以有效地修正相位旋转. 对比图 2b 和图 2c, 可以看出 SAGMCMA 算法的星座点比 MCMA 算法的星座点更为清晰和紧凑. 这是因为 SAGMCMA 算法既引入局部信息量将 MCMA 改为多模算法, 又采用 stop-and-go 思想对特定时刻的均衡方向进行判断, 有效地减少方向错误的均衡对均衡器输出的影响, 降低了剩余稳态误差.

图 3 给出了 3 种盲均衡算法的码间干扰曲线. 可以看出, 稳定收敛后, MCMA 盲均衡算法的 ISI 值降低约 13 dB, 而本文提出的 SAGMCMA 盲均衡算法的 ISI 值降低约 23 dB, 则 SAGMCMA 算法的码间干扰比 MCMA 算法降低了约 10 dB. SAGMCMA1 是以 (12) 式作为判决准则的码间干扰曲线. 可见当收敛于相同的 ISI 时, SAGMCMA 的收敛速度比 SAGMCMA1 的收敛速度快了 1 000 次. 图 3 中 MCMA 算法和 SAGMCMA 算法均约在 2 000 次迭代时趋于稳定. 然而从图 3 中也可以看出, SAGMCMA 在初始时刻的收敛速度比 MCMA 要慢, 这是因为 stop-and-go 算法在初始收敛速度方面不及 CMA 和 MCMA 算法. 仿真结果证明了本文提出的 SAGMCMA 盲均衡算法可以有效地降低剩余稳态误差.

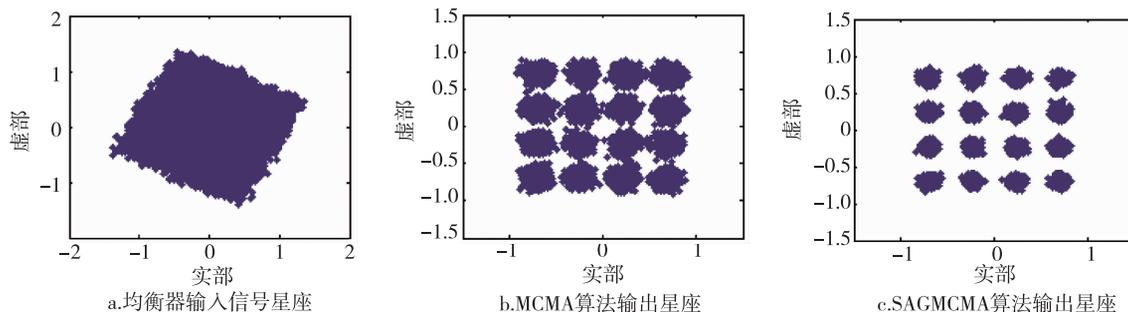


图 2 均衡器输出结果
Fig. 2 Output of equalizer

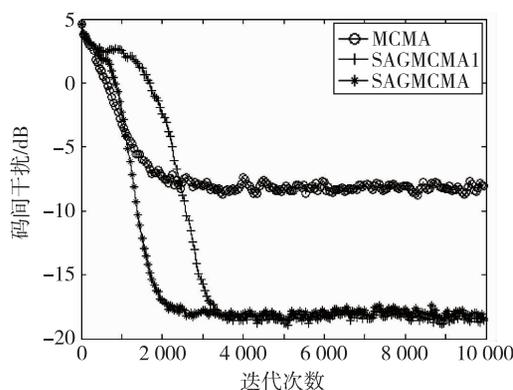


图3 收敛性能比较

Fig.3 Convergence performance comparison

4 结论

本文提出的 SAGMCMA 算法不但避免了 stop-and-go 算法中的待定参数,而且结合了 MCMA 和 stop-and-go 的优点,既可以纠正相位旋转,又可以有效地降低剩余稳态误差.仿真结果表明,当信噪比为 25 dB 时,与 MCMA 算法相比 SAGMCMA 算法既保持了高速收敛,又降低了 10 dB 的码间干扰.这表明本文提出的 SAGMCMA 算法在降低剩余稳态误差方面具有有效性,适用于对精度要求较高的场合.

参考文献

References

- [1] 郭业才,丁雪洁.正交小波变换和时间分集联合盲均衡算法[J].南京信息工程大学学报:自然科学版,2010,2(1):1-5
GUO Yecai, DING Xuejie. The orthogonal wavelet trans-
- [2] 张艳萍,郭业才,刘金铸.适用于 16QAM 信号的水声信道载波恢复盲均衡算法[J].系统仿真学报,2008,20(1):156-158
ZHANG Yanping, GUO Yecai, LIU Jinzhu. Blind equalization algorithm suitable for 16QAM signals for carrier recovery of underwater acoustic channel[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(1):156-158
- [3] 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
- [4] Abrar S. Square-contour stop-and-go algorithm for blind channel equalization in QAM data communication systems[C]//IEEE Student Conference on Engineering, Sciences and Technology, 2004:73-76
- [5] Chung W, You C. Fast recovery blind equalization for time-varying channels using "run-and-go" approach[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2007, 53(3):693-696
- [6] 徐金标,王育民."Stop and go"判决引导算法中 β 的选择及其动量算法[J].电子与信息学报,1998,20(3):321-328
XU Jinbiao, WANG Yumin. Selecting β in stop-and-go decision-directed algorithm and its momentum algorithm[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 1998, 20(3):321-328
- [7] Chahed I, Belzile J, Kouki A B. Blind decision feedback equalizer based on high order MCMA [C]//Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2004, 4:2111-2114
- [8] Abrar S, Amin A, Siddiq F. Stop-and-go square-contour blind equalization algorithms: Design and implementation [C]//Proceedings of the IEEE Symposium on Emerging Technologies, 2005:157-162

Modified constant modulus blind equalization algorithm based on stop-and-go

ZHANG Yanping¹ DONG Fang¹

¹ College of Information and Control, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Although the modified constant modulus algorithm (MCMA) can correct the phase rotation, it is bothered by relatively high steady-state mean square error (MSE). In this paper, an improved MCMA blind equalization algorithm which incorporates a stop-and-go technique is proposed. First, a new error control function is obtained by introduction of the local information. Then, the idea of reducing wrong equalizations in stop-and-go algorithm is used to further lower MSE through synchronizing the direction of the new algorithm with MCMA. The simulation results demonstrate that the proposed algorithm not only have the same convergence rate, also lower the inter-symbol interference by 10 dB compared with MCMA.

Key words underwater acoustic channel; blind equalization; stop-and-go; MCMA