

一种双参数可调的水声信道自适应均衡算法

李芳兰, 周跃海, 童峰

(厦门大学 水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要: 针对浅海水声信道固有的随机时-空-频变、高噪、强多径等特性及变化的多径时延扩展, 在变步长最小均方(LMS)平行滤波器组(PFB-LMS)算法的基础上提出了一种新的水声通信自适应均衡算法。该算法将变阶数和变步长的调整结合起来, 降低了算法对迭代步长和均衡器阶数的敏感度。仿真结果表明, 新算法在参数适应性方面优于传统LMS及PFB-LMS算法。

关键词: 信息处理技术; 浅海水声通信; 自适应均衡; 双参数平行滤波器组算法

中图分类号: O427.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2013)06-0726-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.06.011

Two-parameter Adjustable Underwater Acoustic Channel Equalization Algorithm

LI Fang-lan, ZHOU Yue-hai, TONG Feng

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology, Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

Abstract: The shallow water acoustic channel is characterized as a complex time, space and frequency-variant channel with several negative factors, e. g. narrow band, high ambient noise, multipath distortion and polytropic multipath time delay which pose serious difficulty for the underwater acoustic communication. A novel two-parameter adjustable least mean square (LMS) equalization algorithm is presented based on the classic parallel filter banks LMS (PFB-LMS) algorithm. The new algorithm enables hybrid adjustment of step-size and tap-length so that the sensitivity of step-size and tap-length parameter selections is alleviated. Simulation results show that the new algorithm outperforms the traditional LMS and PFB-LMS algorithms in parameter robustness under time varying channels.

Key words: information processing; shallow water acoustic channel; adaptive equalization; two-parameter adjustable least mean square equalization algorithm

0 引言

水声信道中广泛存在着反射、折射、散射、相位

畸变、多普勒效应、声线弯曲、混响、噪声等现象, 是典型的时变多径信道^[1]。时变多径会引起严重的码间干扰(ISI), 造成接收信号的畸变或衰落。目

收稿日期: 2011-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(11274259); 教育部高等学校博士学科点专项基金项目(20120121110030)

作者简介: 李芳兰(1988—), 女, 硕士研究生。E-mail: fanglanli@126.com;

童峰(1973—), 男, 教授, 博士生导师。E-mail: ftong@xmu.edu.cn

前,在相干水声通信中,普遍采用自适应均衡技术来克服 ISI^[2]。常见的自适应均衡算法主要有最小均方(LMS)类和递归最小二乘(RLS)类算法,其中 LMS 算法结构简单,性能稳定,因此许多实际上的应用仍以 LMS 算法为主。

然而,LMS 算法在收敛速度、时变跟踪能力与收敛精度方面对迭代步长的选择存在矛盾。为了解决这个矛盾,提出了许多变步长 LMS 算法,如基于 Sigmoid 函数变步长 LMS(SVS-LMS)算法^[3]等。文献[4]提出了 LMS 平行滤波器组(PFB-LMS)算法,该算法通过比较不同步长计算的估值误差反馈控制步长的变化,具有计算量小、收敛速度快、稳态误差小的特点。文献[5]通过海试实验验证了该算法的优越性。然而,PFB-LMS 算法对滤波器阶数仍有一定的敏感性。

在实际应用中,除了步长参数,均衡器阶数的选择对均衡算法的性能也有较大的影响。当阶数过小时算法难以收敛,而阶数过大则导致运算复杂度的增加。考虑到浅海水声信道多径时延扩展变化的情况^[6],为了能更好地消除 ISI,均衡器阶数也应该相应地变化。由于自适应滤波器阶数与稳态性能的非线性关系,目前关于变阶数 LMS 算法的国内外研究较少^[7-9]。为了减小均衡算法对均衡器阶数的敏感性,本文在 PFB-LMS 算法的基础上提出了一种变阶数和变步长调整相结合的双参数平行滤波器组(TPPFB-LMS)算法,并通过仿真验证了新算法的优越性能。

1 传统算法及改进算法分析

1.1 LMS 算法

LMS 算法所采用的准则是最小均方误差准则,其迭代公式^[10]为:

$$e(n) = d(n) - \omega(n) X^T(n), \quad (1)$$

$$\omega(n+1) = \omega(n) + 2\mu e(n) X(n), \quad (2)$$

其中: $X(n)$ 为 n 时刻输入信号矢量; $\omega(n)$ 为 n 时刻 N 阶自适应滤波器的权系数; $d(n)$ 为期望信号; $e(n)$ 为误差信号; μ 为步长因子。该算法收敛速度与步长因子 μ 成反比关系,造成了该算法的收敛速度与稳态误差之间的矛盾。

1.2 PFB-LMS 算法

PFB-LMS^[4]算法根据均方误差和较优步长之间的关系,采用 3 个平行放置的自适应滤波器进行算法步长的选择。定义 $mu(k)$ 为算法的步长序列,3 个滤波器步长分别为 $\mu_1 = \frac{mu(k)}{\gamma}$, $\mu_2 = mu(k)$, $\mu_3 = mu(k) \cdot \gamma$ 。其中 $\gamma(0 < \gamma < 1)$ 为步长调整系数。该算法利用标准 LMS 算法分别计算 3 个滤波器的估值误差,每 L 次迭代比较 3 个滤波器的均方估值误差,取 LMS 估值误差对应的步长来更新算法步长序列,以此进行步长参数的自动迭代优化。由于算法设计的 3 个滤波器的步长之比为 $\frac{1}{\gamma} : 1 : \gamma$,当 $\gamma \rightarrow 0$ 时,算法有越来越好的收敛性能,但是对于跟踪性能而言,会导致系统跳变时步长增大速度趋向于 0。

2 新的改进 LMS 算法

TPPFB-LMS 算法的原理如图 1 所示。算法同样采用了 3 个平行滤波器,通过模式切换来进行步长调整和阶数调整。定义平行滤波器组中每个滤波器 $F_j(n)$ ($j=1, 2, 3$) 在模式切换时的均方误差为

$$\xi_j = \frac{1}{L_m} \sum_{n=n_i}^{n_i+L_m-1} e_j^2(n), \quad (3)$$

式中: n_i 为上一次模式切换时的滤波器输出序列下标; L_m ($m=1, 2$) 分别代表算法步长($m=1$)和滤波器阶数($m=2$)更新的迭代周期。定义 $K(k)$ 、 $mu(k)$ 分别为算法双参数迭代中的阶数、步长序列, k 为当前参数调整模式下参数迭代的次数,则该算法的步长和滤波器阶数控制方法如下:

1) 初始化 $L_m, K(0), mu(0), Num1, Num2$ 。其中 $Num1$ 和 $Num2$ 分别代表步长和滤波器阶数控制模式下参数迭代的次数。

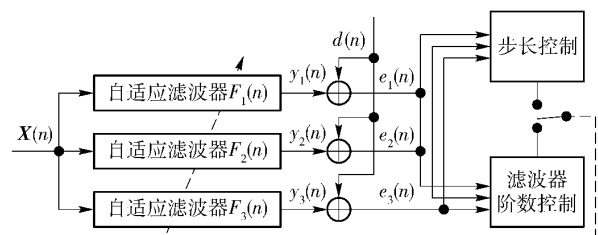


图 1 双参数平行滤波器组算法结构

Fig. 1 The algorithm structure of two-parameter parallel filter banks

2) 根据当前参数控制模式进行平行滤波器组迭代。

步长选择模式: 3 个平行滤波器步长分别为 $\mu_1 = \frac{mu(k)}{\gamma}$ $\mu_2 = mu(k)$ $\mu_3 = mu(k) \cdot \gamma$; 阶数选择模式: 3 个平行滤波器阶数分别为 $K_1 = K(k) - 1$ $K_2 = K(k)$ $K_3 = K(k) + 1$ 。

3) 根据 LMS 算法分别用 3 个滤波器计算估值误差、更新各自权系数。

当 $n = n_i + L_m$ 时, 更新 $n_i = n_i + L_m$, 并计算每个滤波器均方误差 ξ_j 。

4) 参数调整。

步长选择模式: $m\mu(k) = \arg \min [\xi(\mu_j)]$; 阶数选择模式: $K(k) = \arg \min [\xi(K_j)] (j=1, 2, 3)$, 更新 $k = k + 1$ 。

5) 模式切换。

步长选择模式: 如果 $k = Num1 + 1$, 则 $k = 0$, 模式切换, 跳到 2) 在阶数选择模式继续迭代; 否则跳到 2) 在步长选择模式继续迭代; 阶数选择模式: 如果 $k = Num2 + 1$, 则 $k = 0$, 模式切换, 跳到 2) 在步长选择模式继续迭代; 否则跳到 2) 在阶数选择模式继续迭代。

3 仿真实验

3.1 突变信道均衡算法仿真实验

为验证新算法的性能, 本文采用了一个阶数发生变化的抽头延迟线信道模型来模拟多径时延扩展变化的水声信道。输入信号采用 BPSK 调制, 数据率 4 kbps。首先将信号经过一个 4 阶的海洋水声信道模型^[11], 其冲激响应为 $[0.3122 \quad -0.1040 \quad 0.8908 \quad 0.3134]$; 当迭代到 1000 个点时, 信道突变为 11 阶信道^[12], 其冲激响应为 $[0.05 \quad -0.063 \quad 0.088 \quad -0.126 \quad -0.25 \quad 0.9047 \quad 0.25 \quad 0 \quad 0.126 \quad 0.038 \quad 0.088]$; 信噪比 6 dB。为了进行性能比较, 采用本算法和 PFB-LMS 算法进行了 100 次信道均衡实验。

实验中, 根据经验对本文算法引入参数 L 及 Num 进行适当选取。其中, 由于算法参数 L 的作用在于平滑信道特性的小尺度变化, 故 L 按信道阶数的 2~3 倍选取^[13], 考虑到算法的误差函数对滤波

器阶数失配(特别是阶数过低时)的敏感程度要高于步长失配, 本文中算法选取 $L_1 > L_2$, 使阶数调整的频率高于步长调整; 参数 Num 的作用在于检测信道特性的大尺度变化, 考虑到水声信道多径扩展的时变较为缓慢, 本文选取 $Num1 > Num2$, 使步长调整的时间尺度大于阶数调整。具体算法参数选择如表 1 所示。仿真结果如图 2~图 3 所示。

表 1 算法参数设置

Tab. 1 The parameter setting of the algorithms

自适应算法	滤波器阶数	其他参数设置
PFB-LMS	7	$\gamma = 0.78$ $L = 28$ $\gamma = 0.78$ $Num1 = 50$,
TPPFB-LMS	初始阶数: 7	$Num2 = 15$ $L_1 = 28$, $L_2 = 10$

图 2 给出了 PFB-LMS 算法与 TPPFB-LMS 算法的均衡结果。可看出, PFB-LMS 算法和 TPPFB-LMS 算法均能自适应调整迭代步长, 在信道发生突变前均能较快地收敛; 迭代到 1000 点之后由于信道参数特别是时延扩展发生了变化, PFB-LMS 算法的收敛性能下降, 而 TPPFB-LMS 算法由于将变步长与变阶数的调整结合了起来, 收敛性能明显改善。比较 2 种算法的星座图可以看出, 信道突变前 PFB-LMS 算法的星座图与 TPPFB-LMS 算法星座图都比较清晰, 误码率均为 0。

信道阶数发生突变后, PFB-LMS 算法均衡效果不理想, 星座图不清晰, 误码率为 6%; TPPFB-LMS 算法的星座图比 PFB-LMS 算法的更为清晰, 误码率为 0。可见, 在同样的初始条件下, 但信道时延扩展发生变化时, TPPFB-LMS 算法均衡效果明显优于 PFB-LMS 算法。

图 3 为 TPPFB-LMS 算法滤波器阶数的变化曲线图。滤波器初始阶数为 7, 随着迭代的进行, 该算法能自动调整滤波器的阶数, 而 PFB-LMS 则无法对失配的阶数进行调整, 导致算法性能的明显下降。

从计算量的角度, 假设均衡器的长度为 N_1 , 则 TPPFB-LMS 算法运算复杂度为 $O(N_1)$, 约为 LMS 算法的 3 倍, 与 PFB-LMS 算法计算量相当。然而, TPPFB-LMS 算法能自适应调整滤波器阶数和迭代步长, 较 PFB-LMS 算法具有更好的步长、阶数参数

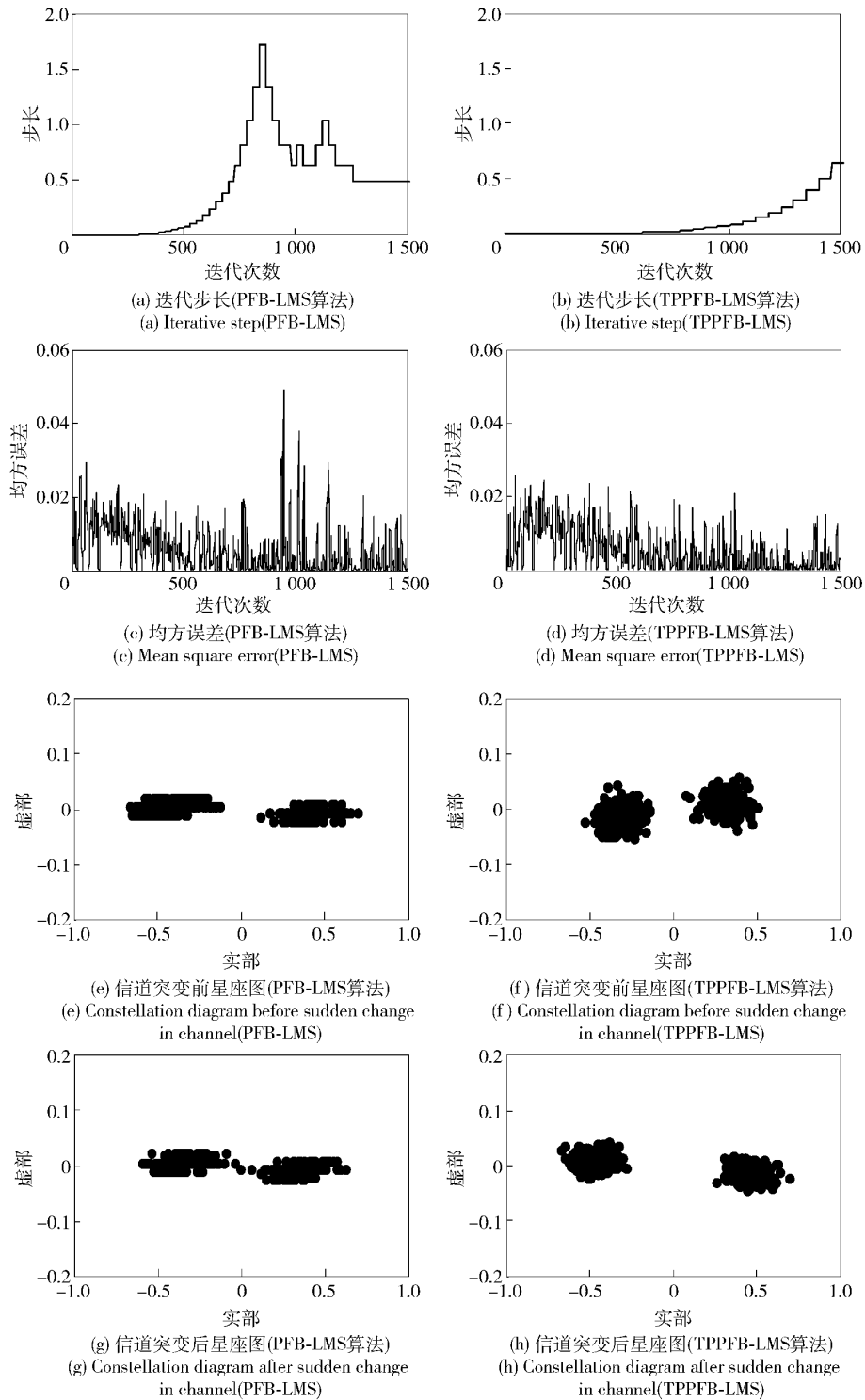


图 2 PFB-LMS 和 TPPFB-LMS 算法均衡结果

Fig. 2 The equalization results of PFB-LMS and TPPFB-LMS algorithms

稳健性,因此,TPPFB-LMS 算法在时变信道中具有更加明显的优势。

3.2 引入参数对算法性能影响分析

新算法在迭代过程中,为减小对步长及滤波器

阶数敏感性,引进了几个新的参数用于控制双参数的交替调整。3.1 小节给出了算法引入参数适应选取的经验方法,为了研究引入参数在一定范围内的变化对算法性能的影响,采用 3.1 节中的信道参数,

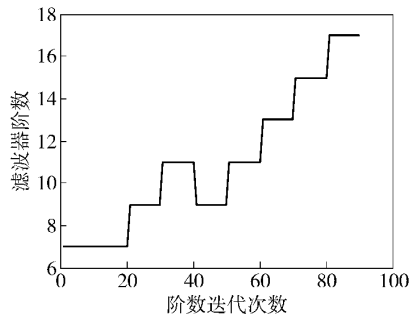
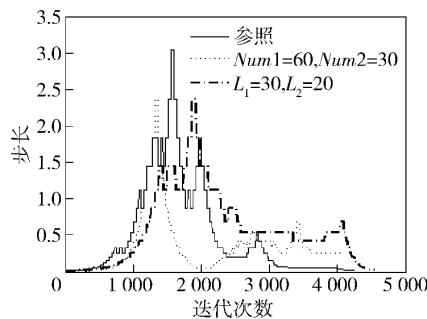


图 3 TPPFB-LMS 算法滤波器阶数变化

Fig. 3 Filter order curve of TPPFB-LMS algorithm

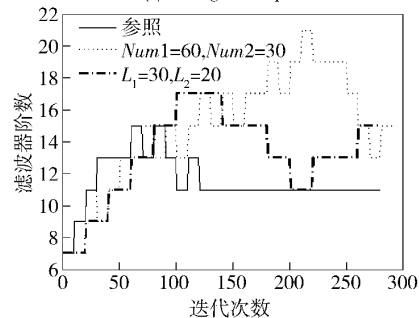
进行如下仿真实验。

在同样的信道模型及发射信号条件下,以前文中 TPPFB-LMS 算法采用的参数作为参照,与以下 2 种情况进行比较分析: 1) L_1 、 L_2 不变, $Num1$ 、 $Num2$ 分别改为 60、30; 2) $Num1$ 、 $Num2$ 不变, L_1 、 L_2 分别改为 30、20。算法收敛后的步长及阶数变化如图 4 所示。



(a) 步长变化

(a) Change of step size



(b) 滤波器阶数变化

(b) Change of filter order

图 4 参数变化时的步长、阶数变化曲线

Fig. 4 Filter order and step size curves when parameters are changed

从图 4 可看出,无论是情况 1) 还是情况 2), TPPFB-LMS 算法都能自适应调整滤波器阶数以及迭代步长。因此,在参数选择经验方法的范围内,本

文算法在参数 L_1 、 L_2 , $Num1$ 和 $Num2$ 有一定变化的情况下,仍具有自适应调整步长和滤波器阶数的能力。但是,如何进一步优化该算法,减少引入参量还有待研究。

4 结论

针对在实际应用中自适应算法对步长和滤波器阶数参数选择的敏感性,本文在 PFB-LMS 算法的基础上,提出了一种新的变阶数与变步长调整相结合的 TPPFB-LMS 算法。仿真结果表明,TPPFB-LMS 算法在具有 PFB-LMS 算法自适应调整步长的优点的同时,降低了对滤波器阶数参数的依赖性。

同时,本文实验也表明:PFB-LMS 和 LMS 算法在信道平稳及滤波器阶数选取合适情况下,也能收敛并取得较好的均衡效果,并且其算法复杂度更低。因此,在均衡器阶数的选择可获得实际观测结果或定性理论基础支持的应用场合,采用 PFB-LMS 和 LMS 算法可从工程角度更加简单可行地调整信号处理算法参数。

但是,对水下环境不易或无法测量、获取,信道理论模型无法普适推广的应用场合,如水声信道受海面、海底反射及声速梯度跃层变化严重影响、多径效应复杂,存在信道突变现象^[14]。此时,PFB-LMS 和 LMS 算法虽实现简单,但其仅依靠初始设定的阶数易造成算法性能下降甚至发散。此种条件下,本文 TPPFB-LMS 算法通过结合步长与阶数的调整,当信道无突变时能提供对初始阶数参数设置的调整能力,而信道发生突变时则可提供对滤波器阶数的调整,因此相对于 PFB-LMS 和 LMS 算法而言,可改善对信道变化的适应性。

参考文献 (References)

- [1] 张刚强,童峰. 基于 LMS/SOLMS 算法的时变多径水声信道估计方法[J]. 应用声学, 2008, 27(3): 212-216.
ZHANG Gang-qiang, TONG Feng. Time-varying underwater acoustic multipath channel estimation based on LMS/SOLMS algorithm [J]. Applied Acoustics, 2008, 27(3): 212-216. (in Chinese)
- [2] 啜钢,王文博,常永宇. 移动通信原理与应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002: 99-108.

- CHUO Gang, WANG Wen-bo, CHANG Yong-yu. The mobile communication principles and applications [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2002: 99 - 108. (in Chinese)
- [3] 覃景繁, 欧阳景正. 一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法 [J]. 数据采集与处理, 1997, 12(3): 171 - 174.
- QIN Jing-fan, OUYANG Jing-zheng. A novel variable step size LMS adaptive filtering algorithm based on sigmoid function [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 1997, 12(3): 171 - 174. (in Chinese)
- [4] 林川, 冯全源. 变抽头长度 LMS 自适应滤波算法 [J]. 电子与信息学报, 2008, 30(7): 1676 - 1679.
- LIN Chuan, FENG Quan-yuan. Variable tap-length LMS adaptive filtering algorithm [J]. Journal of Electronics & Information Technology 2008, 30(7): 1676 - 1679. (in Chinese)
- [5] 彭琴, 童峰. 浅海水声信道自适应均衡算法 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2011, 50(4): 724 - 728.
- PENG Qin, TONG Feng. Experimental studies on shallow water acoustic channel equalization [J]. Journal of Xiamen University: Natural Science 2011, 50(4): 724 - 728. (in Chinese)
- [6] 童峰, 许肖梅, 方世良. 一种单频水声信号多径时延估计算法 [J]. 声学学报, 2008, 33(1): 62 - 68.
- TONG Feng, XU Xiao-mei, FANG Shi-liang. Multipath time-delay estimation of underwater acoustic sinusoidal signals [J]. Acta Acoustic, 2008, 33(1): 62 - 68. (in Chinese)
- [7] Riera-Palou F, Noras J M, Cruickshank D G M. Linear equalizers with dynamic and automatic length selection [J]. Electronics Letters, 2001, 37(25): 1553 - 1554.
- [8] Gu Y, Tang K, Cui H. LMS algorithm with gradient descent filter length [J]. Signal Processing Letters 2004, 11(3): 305 - 307.
- [9] Gong Y, Cowan C F N. An LMS style variable tap-length algorithm for structure adaptation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing 2005, 53(7): 2400 - 2407.
- [10] 孟玲玲, 秦秀娟. 一种新的变步长 LMS 自适应算法及其应用 [J]. 电子测量技术, 2008, 31(5): 35 - 37.
- MENG Ling-ling, QIN Xiu-juan. New variable step-size LMS algorithm and its simulation [J]. Electronic Measurement Technology, 2008, 31(5): 35 - 37. (in Chinese)
- [11] 罗亚松, 刘忠, 夏清涛, 等. 具有强抗干扰能力的水声信道盲均衡算法 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(10): 60 - 63.
- LUO Ya-song, LIU Zhong, XIA Qing-tao, et al. Algorithm of blind equalization with robust anti-jamming on underwater acoustic channels [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition 2009, 37(10): 60 - 63. (in Chinese)
- [12] 高丽娟, 赵洪利, 蒋太杰. 一种改进的变步长常数模算法 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(2): 283 - 286.
- GAO Li-juan, ZHAO Hong-li, JIANG Tai-jie. A modified variable step size constant modulus algorithm [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(2): 283 - 286. (in Chinese)
- [13] Li W, Preisig J C. Estimation of rapidly time-varying sparse channels [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2007, 32(4): 927 - 939.
- [14] Porter M B, McDonald V K, Baxley P A, et al. SignalEx: linking environmental acoustics with the signaling schemes [C]//OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. US: IEEE, 2000: 595 - 600.