

模拟深海采矿环境下混响的局部平稳性分析

李 密¹, 赵海鸣^{1,2}, 熊志宏¹, 王 猛¹

(1. 中南大学机电工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 中南大学高性能复杂制造国家重点实验室, 湖南长沙 410083)

摘 要: 针对深海采矿环境中强混响干扰下目标回波提取困难的问题, 提出了海底强混响环境的模拟方法, 在此基础上建立了采矿模拟环境中混响干扰的 AR 模型, 并利用建立的 AR 模型计算了模拟环境中信号的 Itakura 距离. 以建立的 AR 模型及 Itakura 距离为基础, 建立了海底强混响仿真模型, 对不同 Itakura 距离下的仿真信号及已知 Itakura 距离的大量实验数据分段预白化处理. 仿真和实验数据处理结果表明模拟采矿环境下混响具有局部平稳性.

关键词: 混响; 局部平稳性; Itakura 距离

中图分类号: TN912.16

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2015)07-1281-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.07.005

Reverberation Local Stationarity Analysis of the Simulation Mining Environment

LI Mi¹, ZHAO Hai-ming^{1,2}, XIONG Zhi-hong¹, WANG Meng¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: It is known that the target echoes extraction is difficult under the intense reverberation interference for deep-sea mining environment. So a new simulation method of bottom reverberation environment is proposed and the reverberation interference of AR model in the simulation environment of mining is set up based on this simulation method. Then the signal's Itakura distance is calculated under the simulation environment by using the AR model. The bottom reverberation simulation model is established which is based on the AR model and Itakura distance. Then signals with different Itakura distance are detected using the pre-whiten processing, as well as a lot of experimental data of known Itakura distance. The processing results of simulation and experimental data show the reverberation under the simulated mining environment has local stationary.

Key words: reverberation; local stationary; Itakura distance

1 引言

深海采矿环境下进行声学探测时, 由于采集头搅起的泥沙矿石颗粒影响, 会引起强混响. 利用时变随机信号处理方法对混响进行分析, 常将混响分成若干小段, 用第 n 段数据构造的白化器 (AR 模型) 对第 $n+1$ 段数据进行预白化. 如果 AR 模型的参数估计足够准确且相邻数据段的 AR 模型的参数变化足够小时, 预白化滤波效果将足够好^[1~3]. 而这种次优的方法, 是在混响具有局部平稳性的假设下进行的, 这种基于局部平稳性假设的检测方法也被用于雷达探测中^[4].

混响是大量无规则散射介质对入射信号产生的散射波在接收点的迭加. 因而混响的频谱受到许多不可预

知的环境因素的影响, 而这些环境因素大多是随时间变化的, 这使得混响成了一种非平稳的随机过程^[5]. R Urlick 等人通过研究混响的统计特性表明, 混响具有非平稳的功率谱密度^[6]. 其后 Carmillet V, Amblard PO 等人的进一步研究表明, 可以通过比较混响的相邻数据段之间的功率谱密度变化情况来评价其局部平稳性, 即 Itakura 距离^[1].

以上研究均是针对远距离声学探测过程中存在的海洋混响, 而未对采矿复杂环境下的近距离、混浊水域超声探测过程中存在的混响进行研究. 本文拟采用 Itakura 距离, 对深海采矿环境中, 以大量泥沙和矿石碎片散射形成的体积混响为主要干扰的混响的局部平稳性展开研究.

2 采矿混响环境模拟及回波信号获取

本文讨论的声学探测是采矿环境下车载近程海底微地形超声实时探测,探头安装在采矿车前端距海底 1m~1.5m 处^[7]. 深海采矿中,采矿设备工作在 800m~3000m 的海底钻结壳矿区,不存在海面混响,但矿区的底质会对入射声信号产生散射,从而形成海底混响. 根据矿区的不同,采矿设备的工况可分为三类:(a)采集头未切削矿石,只激起泥沙;(b)采集头采掘突出的矿石,产生矿石小碎片;(c)采集头切削泥沙覆盖下的矿石,在产生矿石碎片的同时也激起了大量泥沙. 在各类工况下,被激起的泥沙和矿石碎片将成为一种无规则散射介质,由此形成的体积混响干扰将严重影响微地形的实时探测精度. 因真实采矿环境的特殊性,各类工况下超声信号的获取较困难,因此需建立一套能正确模拟各类工况的实验系统,对各类工况下的超声信号进行研究,以提高微地形的实时探测精度.

2.1 海面、海底及体积混响的模拟

深海采矿混响环境模拟实验在长、宽、高为:5000mm×3000mm×1800mm 的水池中进行,探测实验装置如图 1 所示. 实验系统中,换能器位于水面以下,因此理论上是在水池水面混响(类似于海面混响),且水池壁也会成为一种散射介质,为抑制水面混响,在信号采集系统中加装有 TGC 硬件电路^[7],且实验中采用正入射式间隔探测方式,根据射线理论,超声波传播距离越长衰减越严重,因此进入超声波换能器的散射波较为微弱. 因而在模拟深海采矿混响实验探测过程中,水池的水面混响对微地形探测的接收信号影响较少,故不考虑水池的水面混响对接收信号的影响. 对于海底混响,则用水泥底质和置于水池底部的深海钻结壳等来模拟.

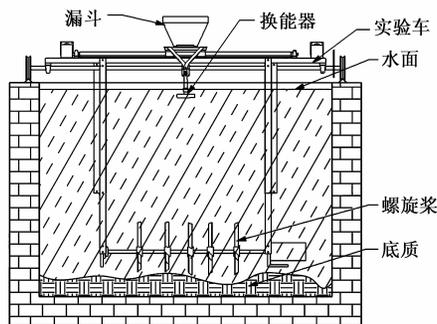


图1 探测实验装置结构示意图

在三种工况中,第三类工况所形成的体积混响最为严重,故本文主要对第三种工况环境(也称混合干扰环境)中所产生的混响进行研究. 实验中,用混合比为 7:3 的河沙和黄土模拟海底泥沙,用项目组研究的螺旋式钻结壳破碎实验台破碎水泥模拟料产生的水泥小碎片代替深海采矿时产生的矿石小碎片,其中水泥小碎

片的宽度为 2mm~20mm,高度为 1mm~6mm,长度小于 35mm. 如图 1 所示,在实验小车中部有分别盛有模拟用泥沙和水泥小碎片的两漏斗,泥沙和水泥小碎片通过漏斗均匀洒向水池,泥沙和水泥碎片的泼洒量可通过漏斗上的舌片来控制. 在漏斗下方,距探头 1.5m 处布置有一螺旋桨,用潜水电机带动螺旋桨旋转,用以搅动水中的泥沙和水泥小碎片,使之形成类似于深海采矿时出现的混响干扰.

2.2 回波信号获取

信号采集系统由超声波探测装置、数据采集系统、工控机等部分组成. 收发一体式超声换能器,置于横跨在实验水池上的实验小车中部的实验平台上,实验小车和实验平台在步进电机的驱动下分别能做纵向和横向平移. 实验平台上的超声换能器能通过曲柄摇杆机构做一定角度的摆动. 平台纵向移动时,带用于搅动水中泥沙和水泥小碎片的螺旋桨移动,用于模拟采矿车的前进. 系统中换能器发射谐振中心频率为 500kHz,数据采集频率为 8MHz,单次采集 20000 个数据点.

3 Itakura 距离

Itakura 距离是 Itakura 提出的一种检测数据段之间相似性的检测方法^[8],随后被迅速应用到水下声信号处理中^[9],也有学者利用 Itakura 距离来对水下声信号进行分类^[10],而 Camillet V, Amblard PO 等人在水下声信号处理中发现,可以通过比较相邻数据段之间的 Itakura 距离来评价混响的局部平稳性^[1]. 假设第 K 段与第 L 段信号为 $x_K(t)$, $x_L(t)$,各自的功率谱密度为 $X_K(\omega)$, $X_L(\omega)$,则第 K 段与第 L 段信号之间的 Itakura 距离为

$$d_I(x_K, x_L) = \ln \left[\int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{2\pi} \left| \frac{X_K(\omega)/\delta_K^2}{X_L(\omega)/\delta_L^2} \right|^2 d\omega \right] \quad (1)$$

其中 δ_i^2 为线性预测误差的方差

$$\delta_i^2 = \exp \left(\int_{-\pi}^{\pi} \frac{\log(X_i(\omega))}{2\pi} d\omega \right) \quad (2)$$

式(1)定义的 Itakura 距离并不是对称的,我们希望得到一种对称的真正意义上的距离. 对其改进后定义为:

$$d'_I(x_K, x_L) = \frac{1}{2} (d_I(x_K, x_L) + d_I(x_L, x_K)) \quad (3)$$

从式(3)可得,不仅在两个信号相等时所定义的 Itakura 距离为零,而且当两段信号成比例时 $\{x_K(t) = k \cdot x_L(t)\}$ 所定义的 Itakura 距离同样为零 ($d'_I(x_K, x_L) = 0$).

为了估计相邻段之间的 Itakura 距离,应先估算各段的功率谱. 分段后的信号,每一分段的数据量相对较少,不能用经典功率谱估计法来精确估算其功率谱. 在工程中多采用基于 AR 模型的参数建模功率谱估计,而建立满足克拉美-罗下限的 AR 模型通常只需要大约 50~100 个数据点.

设各段信号的 p 阶 AR 模型为

$$x(n) = \sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + w(n) \quad (4)$$

式中, $w(n)$ 为均值为零, 方差为 δ_w^2 的正态白噪声.

设:
$$A(z) = \sum_{k=0}^n a_k z^{-k}, \quad a_0 = 1 \quad (5)$$

则信号 $x(n)$ 的功率谱为

$$X(\omega) = \frac{\delta_w^2}{|A(e^{i\omega})|} \quad (6)$$

将式(6)、式(1)代入式(3)得, 第 K 段与第 L 段之间的 Itakura 距离为

$$d_I(x_K, x_L) = \ln \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left| \frac{A_L(e^{i\omega})}{A_K(e^{i\omega})} \right|^2 d\omega \right] \quad (7)$$

当前对 AR 模型参数估计法的研究较多内容丰富, 常用方法有最小二乘法、莱文森 - 德宾 (Levinson-Durbin) 法、最大似然法、自相关法、协方差法等. 对于模型的适用性检验准则有白噪声检验准则、参余平方和检验准则、Akaike 信息检验准则等. 本文以最小二乘估计和 Akaike 信息检验准则的 FPE (Final Prediction Error) 准则针对本文研究的问题进行讨论. FPE 准则函数:

$$FPE(p) = \frac{N+p}{N-p} \delta_w^2 \quad (8)$$

设模型阶数为 p , 数据长度为 N . 且已知数据 $x(p+1)$, $x(p+2), \dots, x(N)$ 时, 由式(4)得

$$x_p = H_p a_p + w \quad (9)$$

由式(9)得 AR 模型参数 a_p 的最小二乘无偏估计及方差 $\text{Var}[a_p]$ 为

$$a_p = (H_p^T H_p)^{-1} H_p^T x_p$$

$$\text{Var}[a_p] = (H_p^T H_p)^{-1} \delta_w^2 \quad (10)$$

其中

$$x_p = [x(p+1), x(p+2), \dots, x(N)]^T$$

$$w = [w(p+1), w(p+2), \dots, w(N)]^T$$

$$H_p = \begin{bmatrix} x(p) & x(p-1) & \dots & x(1) \\ x(p+1) & x(p+2) & \dots & x(2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x(N-1) & x(N-2) & \dots & x(N-p) \end{bmatrix}$$

根据采集到的回波信号, 建立 $AR(p)$ 模型, 对 p 从 1 到 60 运用最小二乘法进行计算, 得到方差 $\text{Var}[a_p]$ 和 FPE 准则函数曲线如图 2 所示.

从图 2 中可看出, 当阶数 $p \geq 17$ 时, 模型的方差 $\text{Var}[a_p]$ 和 FPE 都逐渐趋于平稳, 故选取 AR 模型阶数 $p = 17$. 随后将信号等间隔的分成 20 段, 计算相邻数据段之间的 Itakura 距离如图 3 所示, 在发射信号附近, 混响干扰较强, 因此第 2 段与第 3 段之间的 Itakura 距离相对较大, 而在其他的分段中, 距离都小于 0.09.

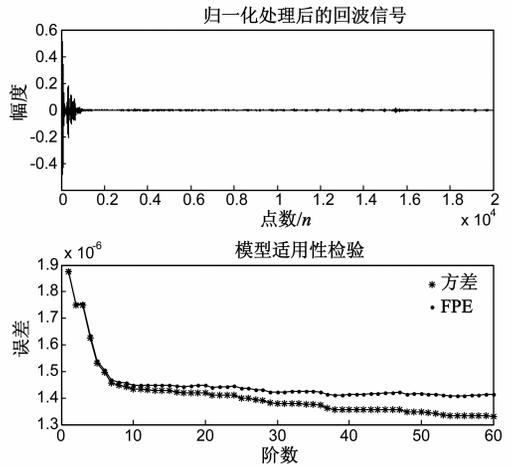


图2 模型阶数估计与准则函数曲线

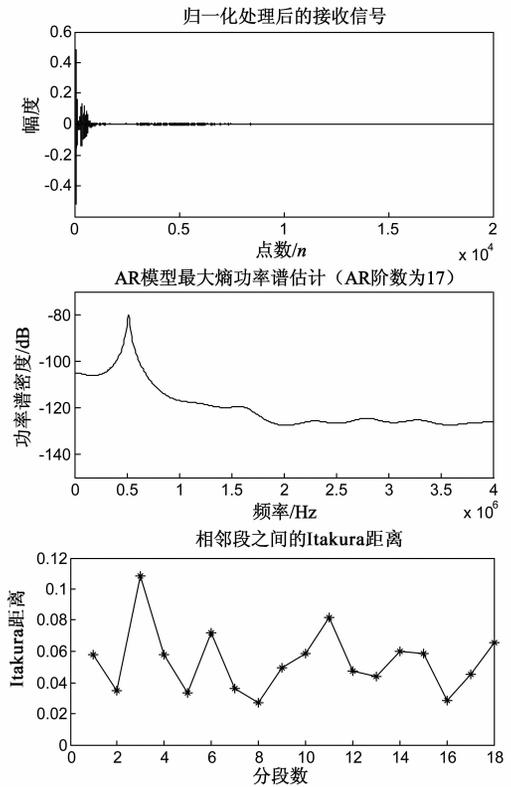


图3 接收信号、功率谱密度及Itakura距离

4 不同 Itakura 距离下检测性能的仿真

如采用分段预白化方法对信号进行处理时, 信号中混响的分段平稳性是影响其检测性能的关键因素. 对于混响的分段平稳性采用相邻段信号之间的 Itakura 距离来评判, 而相邻段之间的 Itakura 距离会随信号的变化而变化, 对于同一信号, 分段方法的不同也会使相邻段之间的 Itakura 距离产生较大的变化. 因此需找出相邻段 Itakura 距离与分段预白化检测方法检测性能之间的关系, 以评估分段方法的优劣及预估检测性能.

分段预白化检测可描述为如下二元假设,其中 $n(t)$ 为海洋混响, $w(t)$ 为均值为零、方差为 δ_w^2 的正态白噪声, $s(t)$ 为目标回波信号.

$$\begin{cases} H_0: y(t) = n(t) + w(t) \\ H_1: y(t) = s(t) + n(t) + w(t) \end{cases} \quad (11)$$

根据二元假设, 设采集到的信号由两段 AR 模型组成, 其中第一段中不含有目标回波, 第二段中除了海洋混响和白噪声外, 还含有目标回波. 根据对采集的实验数据分析结果, 取各段 AR 模型的阶数 $p = 17$.

第一段中不含有目标回波, 其模型如下:

$$x(n) = \sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + w(n) \quad (12)$$

式中 $w(n)$ 为零均值与单位方差的正态白噪声.

第二段中除了海洋混响和白噪声外, 还含有目标回波. 设一频率为 500kHz, 幅值为 0.5, 长度为 $25\mu\text{s}$, 采样频率 $f_s = 8\text{MHz}$ 的正弦信号为目标回波. 其中第 2 段的模型为:

$$x(n) = \sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + w(n) + s(n) \quad (13)$$

选用不同的 AR 模型系数, 使两段数据之间具有不同的 Itakura 距离. 取各段模型样本点数 $N = 1000$. 将目标回波置于第 600 ~ 799 个点. 由此可看出, 目标回波的长度相对于数据段 2 的长度来说较短. 将目标回波用第一段数据的 AR 模型参数所构造的白化器, 预白化后输入匹配滤波器, 得其输出波形.

图 4 ~ 图 9 给出了 Itakura 距离为 0.2、0.21、0.22、0.23、0.24、0.25 时经预白化后匹配滤波器输出波形. 当 Itakura 距离小于或等于 0.24 时, 我们能清晰的看到目标回波的位置; 当 Itakura 距离大于 0.24 时, 输出波形变化很大, 我们已无法清晰的看到目标回波.

选取不同的初始条件, 对每组 Itakura 距离重复实验 100 次, 得其统计结果如表 1 所示. 从表 1 可看出, 当 Itakura 距离大于 0.24 时, 其正确率急剧下降.

表 1 不同 Itakura 距离下目标回波清晰可见的次数

Itakura 距离	正确检测率 (%)			
	AR 系数 1	AR 系数 2	AR 系数 3	AR 系数 4
0.2	100	100	100	100
0.21	100	100	100	100
0.22	100	100	100	100
0.23	100	100	100	100
0.24	90	92	89	93
0.25	47	52	32	57

5 模拟深海采矿混响环境中接收信号的处理

由于实验水池的水泥模拟底质质换能器的距离为 1400mm ~ 1500mm 左右, 根据超声波在水中传导速度^[7]和采样频率估算, 目标回波应在接收信号序列的 15000 ~ 16000 点之间. 将信号等间隔的分成 20 段, 取与目标回波相邻段(13000 ~ 13999 点)作为混响信号, 利用分段预白化法检测目标回波. 图 10 给出了分段预白化方法的输出波形.

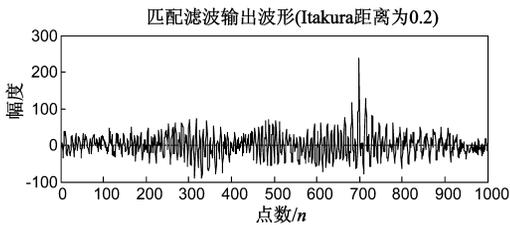


图4 Itakura距离为0.2

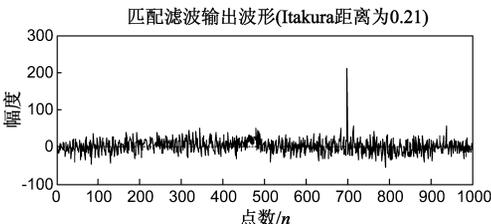


图5 Itakura距离为0.21

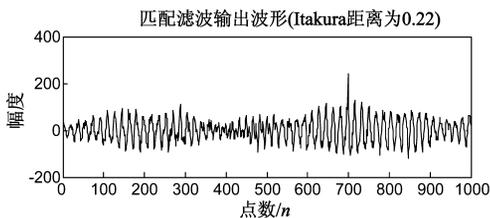


图6 Itakura距离为0.22

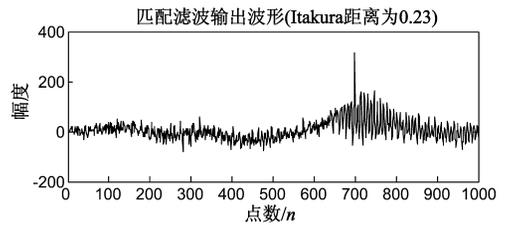


图7 Itakura距离为0.23

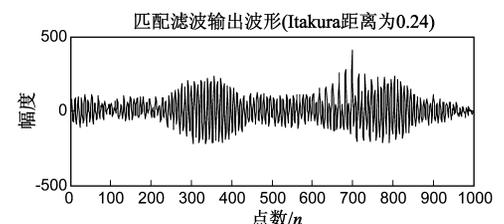


图8 Itakura距离为0.24

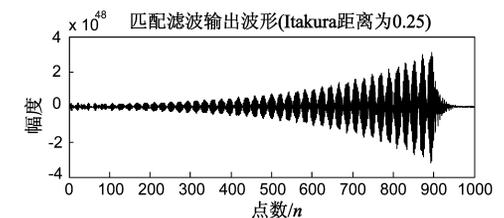


图9 Itakura距离为0.25

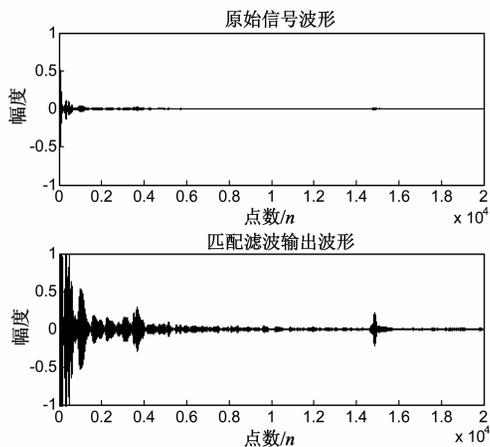


图10 分段预白化方法的输出波形

从图中清晰可见目标回波出现的位置,且提高了信混比.对模拟采矿环境中泥沙和水泥小碎片混合干扰严重的 100 组接收信号(其中目标回波的幅值与混响干扰幅值相当的信号 80 组,目标回波的幅值比混响干扰的幅值小的信号 20 组),分段预白化处理.其中能正确检测到目标回波的次数为 87 次,检测失败 13 次.13 次中有 5 次因混响干扰太强,信号经分段预白化处理后未出现峰值;8 次因矿石碎片过大,信号经分段预白化处理后出现多个峰值,无法准确判断目标回波出现的位置.8 次因矿石碎片过大而检测失败的信号,相邻段之间的 Itakura 距离变化较大,在多处出现峰值.

6 小结

本文以 Itakura 距离为基础,对不同 Itakura 距离下的仿真信号及已知 Itakura 距离的大量实验数据分段预白化处理.从仿真和实验结果中可看出,当相邻数据段的 Itakura 距离未超过 0.24 且未出现多次峰值时,分段预白化匹配滤波检测法的正确率较高.因此当混响信号相邻段的 Itakura 功率谱距离小于 0.24 时可认为其具有局部平稳性.

对于海底微地形超声实时探测精度的提高,可在混响具有局部平稳性的基础上对混响采用更合理的分段方法,降低各分段之间的 Itakura 距离值,从而使探测精度更高,这将成为下一步的工作.

参考文献

- [1] Carmillet V, et al. Detection of phase-or frequency-modulated signals in reverberation noise[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1999, 1(105):3375 - 3389.
- [2] 王兴国,蒋伟峰,等.数字混响器设计[J].电子学报,2000, 28(7):84 - 87.
Wang Xing-guo, Jiang Weifeng, et al. Digital artificial reverber-

ator design[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(7):84 - 87. (in Chinese)

- [3] 葛凤翔,蔡平,等.混响背景中目标回波检测和参数估计的一种新方法[J].电子学报,2001,29(3):304 - 306.
Ge Feng-xiang, Cai Ping, et al. A new method for detecting the signal corrupted by the reverberation and estimation its parameters[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(3):304 - 306. (in Chinese)
- [4] Bowyer D E, et al. Adaptive clutter filtering using autoregressive spectral estimation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1979, 1(4):538 - 546.
- [5] H L Van Trees. Detection Estimation and Modulation Theory (Vol. I and III)[M]. New York: Wiley. 1968.
- [6] Urick R J. Principles of Underwater Sound for Engineers[M]. New York: McGraw-Hill, 1967.
- [7] 赵海鸣,卜英勇,等.摆动式单波束超声波水下微地形探测[J].中南大学学报自然科学版,2007,38(5):932 - 936.
Zhao Hai-ming, Bu Ying-yong, et al. Detection of seabed cobalt-rich crusts micro-topography based on single-beam ultrasonic wave[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(5):932 - 936. (in Chinese)
- [8] Itakura F. Minimum prediction residual principle applied to speech recognition [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1975, 23(1):67 - 72.
- [9] Basseville M. Distance measures for signal processing and pattern recognition[J]. Signal Processing, 1989, 18(4):349 - 369.
- [10] Lashkari K, Friedlander B, Abel J. Classification of transient signals[acoustic signals][A]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing[C]. USA: IEEE, 1988. 2689 - 2692.

作者简介



李 密 男,1989 年生,湖南益阳人,学士,现于中南大学机电工程学院攻读硕士学位,主要研究方向是水声信号处理.

E-mail: nangongjilin@hotmail.com



赵海鸣 男,1966 年生,湖南邵阳人,副教授,硕士,主要从事深海探测技术、机电一体化技术研究.

E-mail: zhm0097@126.com