

文章编号:1671-6833(2007)04-0080-04

基于离散小波变换的水下回波信号尾波包络特征提取

卜英勇, 张超, 聂双双

(中南大学机电工程学院, 湖南长沙 410083)

摘要:提出一种水下目标回波的特征提取方法.该方法在离散小波变换的基础上,基于回波信号中的散射成分可以对水下底质进行分类的理论基础,提取水下回波信号尾波包络特征作为识别特征矢量,构成基于尾波包络特征的特征空间,再采用最佳鉴别矢量法将特征空间进行特征压缩,最后利用最小距离分类器对目标回波进行分类.实测数据结果表明,采用这种方法得到的包络特征是一种稳健、有效的特征,能够获得较高的正确识别率.

关键词:小波变换;尾波;包络特征;目标分类

中图分类号: TN 911

文献标识码: A

0 引言

水下回波信号中包含了大量的目标特征信息,这是由于主动回波是发射信号与目标的冲击响应的卷积,再加上各种干扰及背景噪声等,因而主动回波的特征提取一直是人们关心的问题^[1].为了从回波中提取目标特征以进行目标分类和识别,人们已经提出了很多信号处理方法,如高阶谱^[2]、短时傅立叶变换^[3]和小波变换^[4].传统上,傅立叶变换是信号处理的主要工具,但是,傅立叶分析只能获得信号的整体频谱,而不能获得信号的局部特征.因此,在信号处理领域提出了一些时频分析方法,而这些时频分析方法都有一些局限性.小波变换理论的出现打破了这些局限性,小波分析方法是一种窗口大小固定但其形状可改变,时间窗和频率窗都可以改变的时频局域化分析方法,即在低频段具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频段具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率,所以被誉为“数学显微镜”^[5].小波变换现在已成为信号分析的一个有力的工具,在各个领域得到广泛的应用.

不同底质类型的水底由于沉积物特性(密度、声速、颗粒大小、孔隙率、反射系数、界面粗糙度等)的不同,对于相同的入射信号会产生不同的回波信号,这些回波信号中包含镜面反射成份

和散射成份,其中镜面反射成份可以用来测距,而利用散射成份可以对水下底质进行分类识别^[6].回波信号中的散射成份大部分集中在回波的拖尾部分^[6],这里将回波的拖尾部分称为回波信号的尾波.作者试图利用离散小波变换提取回波信号尾波的包络特征,从而对不同水下沉积物的回波信号进行识别和分类,并将与利用整个回波信号的包络特征进行分类的结果进行比较.

1 小波变换的基本概念

小波变换的含义就是把某一称为母小波的函数 $\Psi(t)$ 做位移 τ 后,再在不同尺度 a 下与待分析信号 $f(t)$ 做内积.

母小波 $\Psi(t)$ ^[7]是满足条件

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < +\infty \quad (1)$$

的平方可积函数,即 $\Psi(t) \in L^2(R)$.

由函数 $\Psi(t)$ 经伸缩和平移得到一族函数

$$\Psi_{a\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad (2)$$

式中: a 为尺度因子; τ 为平移因子.变量 a 反应函数的尺度(或宽度),变量 τ 检测小波函数在 t 轴上的平移位置.在工程应用中, $a < 0$ 无实际意义, τ 值可正可负.式(2)称为小波变换函数族或者依赖于 a, τ 的连续小波.

收稿日期:2007-09-12;修订日期:2007-09-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50474052)

作者简介:卜英勇(1944-),男,安徽芜湖人,中南大学教授,博士生导师,主要研究方向为设备资产管理、设备故障诊断与状态监测及海洋采矿和微地貌测量与可视化研究. E-mail:saopaolu@163.com

在应用计算机进行小波变换时,必须将信号进行离散化.通过采样信号取离散值 $f(k)$, $\Psi(t)$ 为母小波, $\Psi_{m,n}(t)$ 彼此正交, $\Psi_{m,n}(t) = 2^{m/2} \Psi(2^m t - n)$ 的离散形式为 $\Psi_{m,n}(k) = 2^{m/2} \Psi(2^m k - n)$, $(m, n \in \mathbb{Z})$,则 $f(t)$ 的离散小波变换为

$$W_f(m, n) = 2^{m/2} \sum_k f(k) \Psi(2^m k - n) \quad (3)$$

2 基于离散小波变换的信号包络提取

回波形状在很大程度上反映在回波的包络形状上.对于信号包络的提取,目前最常用的方法是采用 Hilbert 变换将原始信号变成复解析信号,将其模作为包络信号,这种包络提取方法简称为 HT 方法^[8].

信号 $f(t)$ 的解析信号是一个复值函数,它的定义为

$$\hat{f}(t) = H_h(t) * f(t) = f(t) + j\hat{f}(t) \quad (4)$$

式中: $\hat{f}(t)$ 是信号 $f(t)$ 的希尔伯特变换,即 $\hat{f}(t) = f(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f(\tau)}{t - \tau} d\tau$ 是, H_h 记为求取解析信

号的滤波器算子.复解析信号的模 $|\hat{f}(t)|$ 就是信号包络 $|a(t)|$.但是采用希尔伯特变换求取包络信号存在如下缺点:具有直流成分,且变换存在所有高频成分,因而得到的包络信号中包含许多高频毛刺,抗干扰能力弱.

为了克服 HT 方法的上述缺点,需构造一个新的包络滤波器 $H(\omega)$,使之满足:

$$\begin{cases} \lim_{\omega \rightarrow 0} H(\omega) = 0, & \lim_{\omega \rightarrow +\infty} H(\omega) = 0 \\ H(\omega) = 0, & \omega \in \mathbb{R}^- \\ \angle H_h(\omega) = k\omega & \omega > 0 \end{cases} \quad (5)$$

显然,实对称小波的复解析信号可以方便的满足上述条件.假设实对称小波为 $\Psi_r(t)$,其复解析小波为 $\Psi(t) = \Psi_r(t) + j\Psi_i(t)$,则信号 $f(t)$ 在 t 时刻的复解析小波变换为:

$$\begin{aligned} W_f(a, \tau) &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi^* \left(\frac{t - \tau}{a} \right) dt \\ &= W_{f_r}(a, \tau) + jW_{f_i}(a, \tau) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $W_{f_r}(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi_r^* \left(\frac{t - \tau}{a} \right) dt$; $W_{f_i}(a,$

$\tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi_i^* \left(\frac{t - \tau}{a} \right) dt$. $W_f(a, \tau)$ 的模 $|W_f(a,$

$\tau)|$ 就是在尺度 a 下信号 $f(t)$ 的包络 $E_a(t)$ ^[9].但是复解析小波变换目前一般采用连续小波变换来

实现,而信号包络的变换慢于信号本身的变换,由尺度 a 下的信号 $f(t)$ 的包络 $E_a(t)$ 来求取信号包络存在较大的冗余,而且连续小波变换缺少快速算法,运算较大.

复解析信号存在如下的性质:

$$\begin{aligned} W_f(a, \tau) &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi^* \left(\frac{t - \tau}{a} \right) dt \\ &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(t) \Psi_r^* \left(\frac{t - \tau}{a} \right) dt \\ &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi_r^* \left(\frac{t - \tau}{a} \right) dt \\ &\quad + j \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(t) \Psi_i^* \left(\frac{t - \tau}{a} \right) dt \\ &= W_{f_r}(a, \tau) + jW_{f_i}(a, \tau) \end{aligned} \quad (7)$$

由此性质可知,要对信号进行复解析小波变换,可以对信号的解析信号进行实小波变换,即可以对解析信号的实部和虚部分别进行实小波变换来实现.因此采用 $W_f(a, \tau)$ 的模 $|W_f(a, \tau)|$ 作为尺度 a 下信号 $f(t)$ 的包络 $E_a(t)$,仍可以克服 HT 变换的上述缺点.如果实小波 $\Psi_r(t)$ 为紧支撑正交小波或双正交小波,则可以分别对解析信号的实部和虚部进行离散正交小波变换,将 $W_f(2^j, \tau)$ 的模作为尺度 2^j 下信号 $f(t)$ 的包络 $E_{2^j}(t)$. $\Psi_r(t)$ 可采用线性相位对称的双正交小波或近似对称的 Symlet 小波.尺度 2^j 下的小波系数 $W_f(2^j, \tau)$ 的长度是信号长度的,远远小于信号的长度 $\frac{1}{2^j}$,因此,

这种特征提取方法同时起到了特征提取和特征压缩的作用.

3 实测水下回波的特征提取与分类实验

四类水下沉积物分别为细沙、中沙、粗沙和砾石,它们的粒径分别为细沙: $< 1.25 \text{ mm}$ 、中沙: $1.25 \sim 2.36 \text{ mm}$ 、粗沙: $2.36 \sim 4.75 \text{ mm}$ 、砾石: $4.75 \sim 9.5 \text{ mm}$,将四种沉积物装于上方敞口的实验箱中放置在深为 1.8 m 的水池底部.实验在水面平静的情况下进行,采用正入射法^[10],超声波探头距离沉积物表面的平均距离为 1.5 m ,发射信号为一 500 kHz 的单频信号,如图1所示.总共得到4类回波,回波波形如图2所示,图1、图2中横坐标为采样点数,纵坐标为电压幅值.每类沉积物测4~5组回波样本,每组样本里有40个样本.采样点数为20 000个,采样频率为 8 MHz .实验中发射信号脉宽为 $25 \mu\text{s}$,由 8 MHz 的采样频率可

以算出发射信号的长度为 200 个采样点,从回波起点开始往后 200 个采样点开始然后截取 600 个采样点长度的回波信号作为尾波信号。

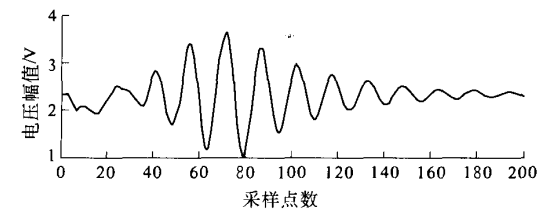


图 1 发射信号
Fig. 1 Transmitting signal

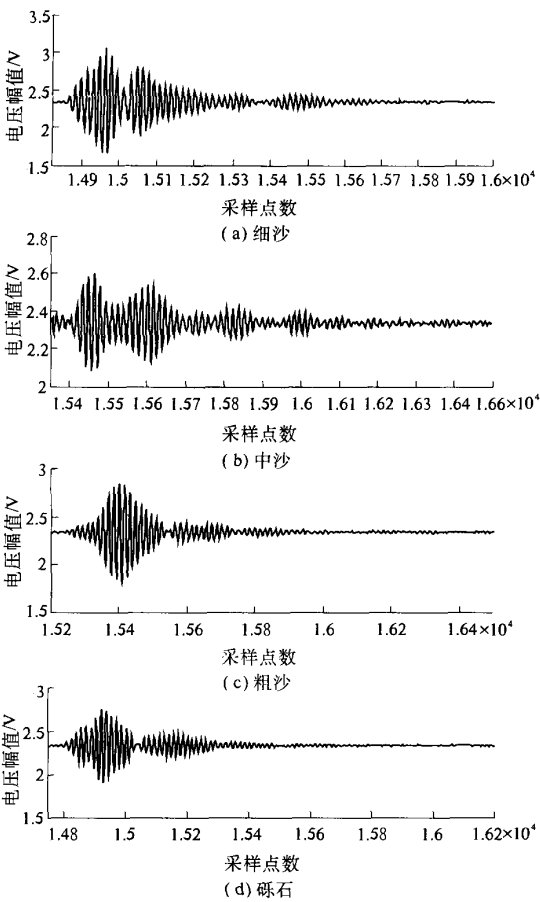


图 2 回波信号
Fig. 2 Echo of four sediments

从每类回波中随机抽取一组样本,采用 Sym-let5 小波分别对尾波解析信号的实部和虚部分别进行 4 级尺度的离散正交小波变换,提取第四级别尺度上的包络信息作为目标识别的特征矢量,得到 48 维的包络特征,包络形状如图 3 所示,图 3 中横坐标为采样点数,纵坐标为小波变换幅度。采用最佳鉴别矢量^[11]提取的特征压缩方法,将

48 维的包络特征矢量均压缩至 3 维^[12]。

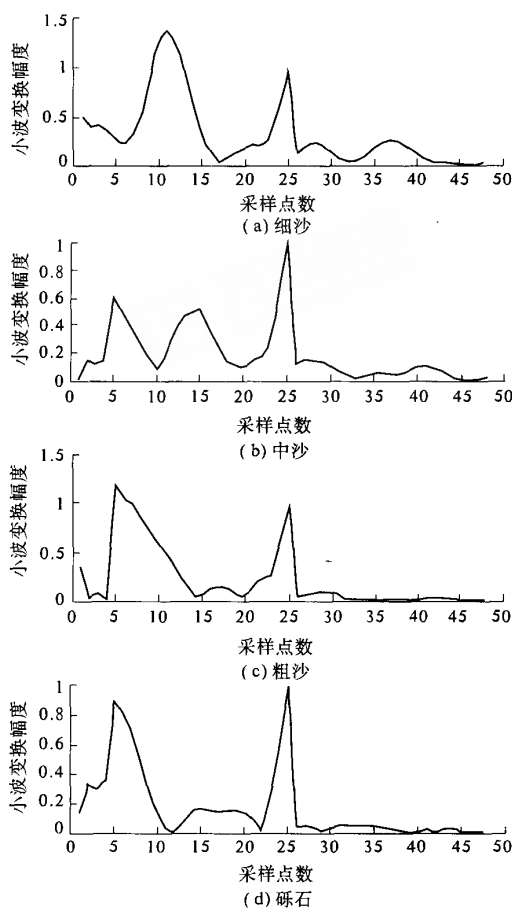


图 3 尺度 4 的尾波包络特征
Fig. 3 Envelop feature at the fourth scale

从每一类回波信号中随机抽取两组样本,将一组作为训练样本集,另一组作为测试样本集.因此,四类回波分类的训练集和测试集均为 160 个样本,训练样本和测试样本由不同次试验所得.用上述特征提取方法提取四类尾波包络特征,并送入最近邻法分类器分类,得到的分类结果如表 1 所示。

表 1 四类目标基于尾波包络特征的分类结果
Tab. 1 Classification result of four targets based on tail-wave envelop feature

测试样本名称	细沙 /个	中沙 /个	粗沙 /个	砾石 /个	识别率/%
细沙	37	—	2	1	92.5
中沙	—	36	1	3	90.0
粗沙	—	—	39	1	97.5
砾石	—	—	4	36	90.0
平均/%					92.5

采用上述相同的方法,将整个回波信号作为分类目标,提取整个回波信号的包络特征进行分类,得到分类结果如表 2 所示。

表 2 四类目标基于整个回波包络特征的分类结果

Tab.2 Classification result of four targets
based on whole echo envelop feature

	细沙	中沙	粗沙	砾石	识别率/%
细沙	38	—	1	1	95.0
中沙	—	36	1	3	90.0
粗沙	—	—	38	2	95.0
砾石	—	—	3	37	92.5
平均/%					93.1

由表 1 和表 2 的分类结果可以看出,采用对尾波进行包络特征提取这种方法的分类正确率与采用对整个回波信号进行包络特征提取的分类正确率大致相同,说明底质分类特征主要由回波信号中的尾波部分决定,采用对尾波进行包络特征提取能达到正确识别底质的目的,而且可以减小运算量。

4 结论

笔者提出了基于离散小波变换提取水下回波尾波信号包络特征的特征提取方法。本文中,采用 Symlet 小波,分别对水下回波信号尾波的解析信号的实部和虚部进行离散正交小波变换,提取合适尺度上的包络特征作为水下底质识别的特征,并与提取整个水下回波信号包络特征的方法做了比较。对实测的水下回波数据进行的特征提取和分类的仿真实验表明,采用这种方法得到的包络

特征是一种稳健、有效的特征,能够获得较高的正确识别率。

参考文献:

[1] 朱 堃.主动声纳检测信息原理[M].北京:海洋出版社,1990.

[2] 樊养余.基于高阶谱的舰船辐射噪声特征提取[J].声学学报,1999,24(6):611-616.

[3] 王蕴红.基于短时傅立叶变换及奇异值特征提取的目标识别方法[J].信号处理,1998,14(2):123-127.

[4] 赵建平.用小波变换进行水下回波边缘特征提取与分类识别[J].声学学报,1998,23(1):31-38.

[5] 飞思科技产品研发中心.小波分析理论与实现[M].北京:电子工业出版社,2005.14-16.

[6] 孟金生,关定华,海底沉积物的声学方法分类[J].声学学报,1981,7(6):337-343.

[7] 邓 华,蔡迎春,张 蓓.小波变换在路用雷达信号处理中的应用[J].郑州大学学报:理学版,2002,23(1):103-105.

[8] 张绪省.信号包络提取方法[J].电子科学学刊,1997,19(1):120-123.

[9] 刘建国,李志舜.湖底回波的包络特征提取[J].计算机仿真,2005,151-154.

[10] 徐 铭.基于相平面的声学方法浅海海底底质分类研究[D].中国海洋大学,2006.3-3.

[11] 边肇祺,张学工.模式识别[M].清华大学出版社.178-186.

[12] FUKUNAGA K S. No linear feature extraction with a general criterion function[J]. IEEE Trans Information Theory,1978,24(5):600-607.

Tail-Wave Envelop Feature Extraction of an Underwater Echo
Based on Discrete Wavelet Transform

BU Ying - yong, ZHANG Chao, NIE Shuang - shuang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A feature extraction method of underwater target echo is proposed based on discrete wavelet transform. In the method, these tail-wave envelop features of an underwater echo which compose the feature space are extracted as the discriminating eigenvectors and compressed with optimal set of discriminant vectors. At the end, the classification is accomplished of target echo using the shortest-distance classifier. The result of experimentation data shows that the envelop feature acquired with this method is a kind of robust and effective feature to recognize the kind of underwater echoes, and high recognition rate can be obtained.

Key words: wavelet transform; tail-wave; envelop feature; target classification