基于小波包和 $1\frac{1}{2}$ 维谱的舰船辐射噪声频域特征提取及融合

史广智，胡均川
(海军潜艇学院, 青岛 266071)

摘要: 舰船辐射噪声频域特征提取是舰船目标识别的关键技术之一。为提高舰船目标识别率, 采用小波包和 $1\frac{1}{2}$ 维谱对舰船辐射噪声进行多小波包空间调制谱和噪声谱特征提取及融合研究。并用提取的特征对五类舰船目标辐射噪声进行了分类识别实验,结果表明所提特征具有很好的分类识别效果。

关键词: 小波包; $1\frac{1}{2}$ 维谱; 特征提取; 特征融合
中图分类号: TP391.4 文献标示码: A 文章编号: 1000-3630(2004)01-0004-04

Extraction and fusion of frequency-domain features from ship radiated-noise based on wavelet packet and $1\frac{1}{2}$-dimensional spectrum

SHI Guangzhi, HU Junchuan
(*Navy Submarine Academy, Qingdao 266071, China*)

Abstract: Extraction of frequency-domain features from ship radiated-noise is a key technique in ship-target recognition. To improve the recognition-rate, feature extraction in the frequency-domain is first studied based on wavelet packet analysis and 1-dimensional spectrum. Frequency-domain feature fusion is then investigated. An experiment is carried out to classify five different classes of ship-targets, giving satisfactory results.

Key words: wavelet packet analysis; $1\frac{1}{2}$ dimensional spectrum; feature extraction; feature fusion

1 引 言

舰船辐射噪声组要包括机械噪声、螺旋桨噪声和水动力噪声。螺旋桨空化噪声是舰船辐射噪声高频端的主要部分, 其频谱为高频连续谱。螺旋桨节拍对其辐射的空化噪声有明显的振幅调制作用, 其调制频率及调制深度与螺旋桨转速、桨叶数及舰船航速等指标有关。同时, 舰船辐射噪声谱与舰船类型、空化程度、海洋声信道及目标距离等关系密切。可见, 舰船辐射噪声频域特征蕴含着重要的目标信息。

收稿日期: 2003-10-21; 修回日期: 2003-12-25
作者简介: 史广智(1977-), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 助教, 从事目标识别和信号处理方面的研究。

目前, 舰船辐射噪声频域特征提取、分析和应用是国内舰船目标识别领域的主要研究方向之一。小波包分析为基础的频域特征提取是一种全新的特征提取方法, 其通过小波包分析将信号分解到不同的小波包空间, 然后分别提取各小波包空间的频域特征, 并将各小波包空间的频域特征进行特征级数据融合, 从而得到具有更好识别效果的频域特征, 提高了舰船目标识别率。

2 小波包[1]

小波包的概念于20世纪90年代提出。小波包分析为信号提供了一种更精细的分析方法, 它将频带多层次划分, 对多分辨率分析没有细分的高频部分进一步分解, 并能够根据被分析信号的特征自适应的选择频带, 从而提高了时间 频率分辨率, 因此具有广泛的应用价值。

2.1　正交小波包的定义及性质

定义函数序列$\{\ _n(t)\}_{n\quad 0}$: $\quad _{2l}(t)=\sqrt{2}\ _{k\quad Z}h_k\ _l(2t-k)\quad _{2l+1}(t)=\sqrt{2}\ _{k\quad Z}g_k\ _l(2t-k)\quad l=0,1,\quad$，称此函数序列为由 $\ (t)(\ _0(t)=\ (t),\ _1(t)=\ (t),\ (t)$和$\ (t)$为小波多分辨率分析的尺度函数和小波函数) 生成的小波包, 若 $\ (t)$为正交尺度函数, 则称其为正交小波包。

性质 1　相同 n 值的正交小波包函数是整数平移正交的, 即 $\ _n(t-l),\ _n(t-k)\ =\ (k-l)\ ,k,\ l\quad Z$。

性质 2　$\ _{2l}(t)$与 $\ _{2l+1}(t)$ 是整数平移正交的, 即 $\ _{2l}(t-m),\ _{2l+1}(t-k)\ =0\ ,m,\ k\quad Z$。

2.2　空间的正交小波包分解

对于正交小波包函数$\{\ _n(t)\}_{n\quad 0}$, 定义 U_j^n 空间为$L^2(R)$中的闭子空间 $U_j^n=$ close$\{2^{-j/2}\ _n(2^{-j}t-k)\}_{k\quad Z}$, 由正交小波包的性质 1 知$\{\ _n(2^{-j}t-k)\}_{k\quad Z}$之间一定是正交的。因此, $\{2^{-j/2}\ _n(2^{-j}t-k)\}_{k\quad Z}$构成$U_j^n$ 空间的一组正交基, 称 U_j^n 为j 尺度空间。

定理　令$\{U_j^n\}_{j\quad Z,\ n\quad 0}$是由正交小波包$\{\ _n(t)\}_{n\quad 0}$生成的空间序列, 则对于任意非负整数有下式成立

$$U_j^{2n}\qquad U_j^{2n+1},\ U_{j-1}^n=\ U_j^{2n}\qquad U_j^{2n+1}\qquad (1)$$

按多分辨率分析理论, 随着尺度的增加, 频窗半径将减小, 频率分辨率增加。因此, 将多分辨率尺度空间 W_j 分解为更大尺度的子空间的直和, 对于提高频率分辨率是有利的。由多分辨率分析及(1)式知 $L^2(R)=\ _{j\quad Z}W_j=\ _{j\quad Z}\left(\ _{i=0}^{2^{k_j}-1}U_{j+k_j}^{2^{k_j}+i}\right)$。设 $V_0\quad L^2(R)$, 分解到 J 级, 有 $L^2(R)\quad _{j=1}^{J}\left(\ _{i=0}^{2^{k_j}-1}U_{j+k_j}^{2^{k_j}+i}\right)\ U_J^{0[2]}$。

2.3　正交小波包变换及快速算法

若已知连续函数$f(t)\quad U_0^0$ 空间, $f(t)$在空间 U_0^0 的投影系数为$\{S_k^{0,0}\}_{k\quad Z}$, 将 $U_0^0\quad L^2(R)$空间进行分解, 并记$f(t)$在各子空间 U_j^n 投影系数为$\{S_k^{n,j}\}_{k\quad Z}$($S_k^{n,j}$ 中上标表示对信号进行j 级分解后, 第j 级中的第n 个小波包; 下标表示第j 级中的第n 个小波包序列中的第 k 个点), 则称$f(t)$在各子空间投影系数的集合为$f(t)$的正交小波包变换, 也称为离散时间信号$\{S_k^{0,0}\}_{k\quad Z}$的离散正交小波包变换。与 Mallat 算法类似, 正交小波包变换算法也可采用递推算法实现。

对于序列 S_k 定义如下空间算子:

$$F_0\quad S_l^{2n,j+1}\qquad _{k\quad Z}h^*\ _{k-2l}S_k^{n,j}\ =\ F_0\{S_k^{n,j}\}$$
$$F_1\quad S_l^{2n+1,j+1}=\qquad _{k\quad Z}g^*\ _{k-2l}S_k^{n,j}\ =\ F_1\{S_k^{n,j}\}\qquad (2)$$

由(2)式可以得到小波包变换的递推算法。该流程的运算规律可总结为如下定理:

若$0\quad j<J,0\quad n<2^j$, 令 $n=\ _{m=1}^{j}\ _m2^{m-1},\ _m$为$n$ 的二进制表示的第m 个系数, 有

$$S_k^{n,j}\ =\ F_{\ _1}F_{\ _2}\ F_{\ _j}\{S_k^{0,0}\}\qquad (3)$$

由于 F_0, F_1 算子都包含二倍再取样运算, 所以系数序列$\{S_k^{2n,j+1}\}$和$\{S_k^{2n+1,j+1}\}$的长度是$\{S_k^{n,j}\}$的一半, 从而提高了运算效率, 构成了类似 Mallat 算法的快速算法。

3　基于小波包的舰船辐射噪声谱特征提取

令连续噪声信号 $x(t)\quad U_0^0$、$U_0^0\quad L^2(R)$, 则长度为 K 的归一化离散时间信号序列$\{x(k)\}=\{S_k^{0,0}\}$, $k\quad [1,K]$, 按(2)和(3)式对$\{S_k^{0,0}\}$进行j 级分解得到2^j 个子空间 $U_j^n(n\quad [1,\ 2^j])$的投影系数序列$\{\ S_k^{n,j}\}$，其中 $k\quad [1,\ K_j]$, $K_j=K/2^j$。

系数序列$\{S_k^{n,j}\}$的功率谱估计:

$X_l^{n,j},\ =\quad [BL1]$FFT $(S_k^{n,j})\quad ^2/\ K_j\quad l=1,2,3,\quad ,\ K_j/2$

提取每个小波包的强谱峰值: $X^{n,j}=\quad max_l(X_l^{n,j})\quad n=1,2,\quad ,\ 2^j,\ l=1,2,\quad ,\ K_j/2\ [BL2]$

阈值化处理: $Y^{n,j}[BL3]\ =\ u(X^{n,j}-\quad ^{n,j})\ u(X^{n,j}-\ ^{n,j})$

式中 $\ ^{n,j}$, 为阈值函数, $u\ (t)$为阶跃函数, 当 $t\quad 0$ 时, $u\ (t)=1$, 否则 $u\ (t)=0$, 本文中 $u\ (t)$均表示阶跃函数。

提取谱峰向量

$$Y=\ [\ Y^{1,j},\ Y^{2,j},,\quad ,\ Y^{N,j}]\quad N\ =\ 2^j\qquad (4)$$

系数序列$\{S_k^{n,j}\}$的能量为: $E^{n,j}=\quad _k(\ S_k^{n,j})^2,\ k=1,2,3,\quad ,\ K_j$

对系数序列能量 $E^{n,j}$ 归一化: $E^{n,j}=\quad E^{n,j}/\max(E^{n,j})$

提取能量密度向量

$$E\ =\ [E^{1,j},\ E^{2,j},\ E^{3,j},\quad ,\ E^{N,j}]\qquad (5)$$

4　$1\frac{1}{2}$维谱的定义

高阶统计量能够抑制高斯噪声, 包含了二阶统计量所没有的丰富信息, 这使其在信号处理领域得