

文章编号: 1001- 2486(2007) 03- 0089- 04

## 一种新的舰船辐射噪声特征提取方法\*

张 民<sup>1,2</sup>, 王向军<sup>2</sup>, 方 兴<sup>3</sup>

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 海军工程大学 电气与信息工程学院, 湖北 武汉 430033; 3. 海军驻 709 所军事代表室, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 提出了一种基于 Dopplerlet 变换的舰船辐射噪声特征提取方法, 给出了 Dopplerlet 变换分解流程。使用此种方法及基于小波变换、波形结构、自然尺度等的特征提取方法对收集到的舰船辐射噪声进行了识别试验, 试验结果证明基于 Dopplerlet 变换的舰船辐射噪声特征提取方法更加有效。

**关键词:** Dopplerlet 变换; 特征提取; 识别

**中图分类号:** TN911.4 **文献标识码:** B

## A Novel Approach of Warship Radio Noise Feature Extraction

ZHANG Min<sup>1,2</sup>, WANG Xiang-jun<sup>2</sup>, FANG Xing<sup>3</sup>

(1. College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Electronic and Info. Engineering, Naval Univ. of Eng., Wuhan 430033, China;

3. Naval Representative at No. 709 Research Inst., Wuhan 430070, China)

**Abstract:** A novel approach of warship radio noise feature extraction using Dopplerlet transform was proposed in this paper, and decompose flow of Dopplerlet transform was typed. An experimentation of warship radio noise classification was tried out using different feature extraction methods, such as Dopplerlet transform method, wavelet transform method, wave structure method and natural measure method. Experimentation result shows that the warship radio noise feature extraction method using Dopplerlet transform is more effective than other methods.

**Key words:** Dopplerlet transform; feature extraction; classification

根据舰船航行时发出的辐射噪声来判断舰船的类型具有重要的理论意义和军事价值。通过对被动声纳接收到的舰船辐射噪声寻找、分析并提取出有效的识别特征是被声纳目标识别中的关键环节<sup>[1]</sup>。由于舰船结构的多样性、海洋环境的复杂性以及水声信道的特殊性, 从舰船辐射噪声中提取有效的识别特征是比较困难的<sup>[2]</sup>。

1 Dopplerlet 变换<sup>[3]</sup>

Doppler 效应是指在波源与观察者之间有相对运动的情况下, 观察者所接收到的频率与波源的频率不相等的现象。设波源的频率为  $f_0$ , 波源的运动速度为  $v$ , 声音在介质中的传播速度为  $u$ , 静止的观察者  $P$  与波源的运动方向垂直距离为  $l$ , 则观察者所接收到的频率为:

$$f = f_0 \left[ \frac{u - \frac{v^2(t-t_0)}{\sqrt{l^2 + v^2(t-t_0)^2}}}{u} \right] \quad (1)$$

其中  $t_0$  为与观察者的位置相对应的时间中心。

被动声纳接收到的舰船辐射的声场信号在绝大多数情况下是 Doppler 信号。由式(1)可知, 对于静止的观察者接收到的 Doppler 信号在不考虑声场强度的情况下可以表示为:

$$d_{t_0, f_0, l, u, v}(t) = \exp[j\pi f_0(t-t_0)] \quad (2)$$

\* 收稿日期: 2006- 12- 08

作者简介: 张民(1961—), 男, 副教授, 博士生。

使用归一化的高斯函数

$$g(t) = \left(1 \setminus \sqrt{\pi} \Delta\right) \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{\Delta}\right)^2\right]$$

式中  $\Delta$  为时宽。对此 Doppler 信号进行调制, 就得到高斯 Dopplerlet:

$$d_{t_0, f_0, \Delta, l, u, v}(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi} \Delta} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t-t_0}{\Delta}\right)^2\right] \cdot \exp\left\{j2\pi f_0 \left[u - \frac{v^2 \left(\frac{t-t_0}{\Delta}\right)}{\sqrt{l^2 + v^2 \left(\frac{t-t_0}{\Delta}\right)^2}}\right]^{-1} \left(\frac{t-t_0}{\Delta}\right)\right\} \quad (3)$$

要描述一高斯 Dopplerlet 需要以下 6 个参数: 时间中心  $t_0$ , 波源频率  $f_0$ , 时宽  $\Delta$ , 静止的观察者  $P$  与波源运动方向的垂直距离  $l$ , 波源运动速度  $v$  以及媒质中的声速  $u$ 。

用高斯 Dopplerlet 作基函数, 即可定义任一平方可积信号  $s(t) \in L^2(R)$  的连续 Dopplerlet 变换为:

$$GDT(t, f) = \langle s(t), d_{t_0, f, \Delta, l, u, v}(t) \rangle \quad (4)$$

在上式中  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  表示内积。它们是利用式(3)得到的变换, 因此称作高斯 Dopplerlet 变换。

## 2 Dopplerlet 分解流程

信号的 Dopplerlet 变换可以描述为将待分解信号展开成一系列 Dopplerlet 基函数的线性组合, 其中这些 Dopplerlet 基函数是根据投影能量为最大的准则, 从一个包含这些 Dopplerlet 基函数的冗余的基函数集中挑选出来的。寻找最佳基函数的问题实质上是一个全局优化问题。但由于它是一个五参数的优化问题(由于我们假定了海水中的声速为常数), 因此很难通过一次全平面的五维搜索找到最佳投影基, 而只能按照一定的搜索策略, 进行一系列的一维或多维搜索来逼近这个最佳基, 这是解决优化问题时所经常采用的方法。信号的 Dopplerlet 分解流程如下所述:

(1) 计算主要信号分量的  $\Delta, t_0, f_0$  的近似值: 假定待分析的信号是长度为  $N$  的实信号, 由于采样率和信号长度的限制,  $\Delta$  只能取在 1 和  $N$  之间。窗函数  $g(t)$  使用前文给出的归一化高斯函数。类似于二进小波变换, 在搜索的开始阶段, 采用二进尺度, 以增大搜索的速度。对每一  $\Delta_i$  和相应的  $t'_0$ , 产生一高斯窗  $g_{\Delta_i, t'_0}(n) = g\left(\frac{n-t'_0}{\Delta_i}\right)$ , 计算  $g_{\Delta_i, t'_0}(n)$  与细节信号  $R_s^n$  的内积。计算该内积的傅立叶变换, 找出频谱上的峰值点频率, 该频率就对应于被高斯窗抽取出的信号的主要频率分量, 记为  $f'_{\Delta_i}$ 。改变高斯窗的尺度及相应的时间中心, 产生另一高斯窗, 用同样的方法求出相应的峰值点频率。找出所有峰值点频率中的最大值, 则  $f'_{0} = \max\{f'_{\Delta_i}\}$  就是对应的主要信号分量的  $f_0$  的近似值。相应的高斯窗参数  $\Delta'_i$  和  $t'_0$  就是  $\Delta$  和  $t_0$  的近似值。

(2) 计算  $\Delta$  和  $t_0$  的较精确值: 分别以近似值  $\Delta$  和  $t'_0$  为中心, 在其邻域  $[\Delta'_i - \delta, \Delta'_i + \delta]$  内搜索与信号最匹配的窗函数。即  $\Delta'_i$  的改变不再以 2 的整数次方为步长, 而是每次只增加 1。采用与步骤 1 相似的步骤, 那么所求出的全部峰值点频率中的最大值  $f''_0 = \max\{f_{\Delta_i} | \Delta_i \in [\Delta'_i - m, \Delta'_i + m]\}$  就是对应的主要信号分量的中心频率。虽然  $f''_0$  仍不是精确值, 但要比  $f'_0$  更接近  $f_0$ 。相应的  $\Delta$  和  $t_0$  就是时宽参数和时间中心的更精确值。

(3) 计算  $f_0, l, v$  的近似值: 有了  $\Delta$  和  $t_0$  两个参数后, Dopplerlet 参数表中的参数就剩下  $f_0, l, v$  这三个未知数。在距离  $l$ 、速度  $v$  和波源频率  $f_0$  构成的三维空间中, 以投影值最大(即内积最大)为准则, 搜索与  $R_s^n$  最匹配的 Dopplerlet。在这一步中, 由于  $l$  和  $v$  完全未知, 在这两维上需要在大范围内进行粗搜索, 而  $f_0$  已有初值  $f''_0$ , 这样就能将  $f_0$  的搜索限定在  $f''_0$  的邻域内进行。在这一步的搜索结束后, 得到  $f_0, l, v$  的近似值  $f''_0, l', v'$ 。

(4) 计算  $f_0, l, v$  的较精确值: 在前一轮搜索的基础上, 将这三个参数值的范围限定在  $f''_0, l', v'$  的较小的邻域内。重复与步骤(3)相似的搜索, 就得到比较精确的  $f_0, l, v$  的值。

(5)  $\Delta, t, f_0, l, v$  的精确值: 使用双群进化规划算法<sup>[4]</sup>搜索这五个参数的精确值。种群中的个体均为五维, 分别对应于  $\Delta, t, f_0, l, v$ , 各个不同的维使用互相独立的高斯变异算子, 同时每个高斯变异算子的标准差也随代表的物理量的不同而不同且相互独立, 并将适应度函数设定为这五个参数描述的 Dopplerlet 基函数与细节信号  $R_s^n$  的内积。由于这是一个五维函数的搜索, 同时要计算每一个个体的适应度, 因此这部分的计算是 Doppler 变换中占用时间和内存最大的部分。经过有限次的进化后, 通常不超过 2000 次, 可以搜索到  $\Delta, t, f_0, l, v$  的精确值。

(6) 细节信号更新: 用细节信号  $R_s^n$  减去与之最匹配的 Dopplerlet 信号  $\langle R_s^n, d_{R^n} \rangle \cdot d_{R^n}$ , 得到新的细节信号  $R_s^{n+1}$ , 其中  $R_s^0$  为原始信号。其中  $A_s^n = \langle R_s^n, d_{R^n} \rangle \cdot d_{R^n}$  被称为信号的第  $n$  级近似信号,  $R_s^n$  称为信号的第  $n$  级细节信号,  $d_{R^n}$  为与  $R_s^n$  最匹配的 Dopplerlet 基函数。

(7) 重复步骤(1)~(6), 直到总的迭代次数超过其预定的分解层次, 或直到残余信号  $R_s^k$  与原始信号  $R_s^0$  的能量比低于某一门限值为止。

### 3 基于 Dopplerlet 变换的舰船辐射噪声特征提取

由于舰船辐射噪声的复杂性, 如果直接使用 Dopplerlet 变换对舰船辐射噪声进行分解, 提取信号在  $m$  个尺度的 Dopplerlet 基函数上的投影(近似信号)作为识别特征的话, 不同的舰船所获得的最大投影的尺度并不相同, 这样获得的识别特征同种类型的舰船之间的识别特征还是类似的, 但不同种类型的舰船间的识别特征就很容易混淆, 因此, 在本文中使用了类似与二进小波的分解方式, 固定每个分解尺度的长度, 并且不同分解层次间的尺度是二进关系。例如, 对某舰船辐射噪声信号进行 Dopplerlet 分解, 第  $k$  级分解的尺度为 8, 那么第  $k+1$  级分解的尺度则为 4。因此在使用进化规划算法求解精确的求解参数的时候, 只需要计算四个参数, 虽然仅仅减少了一个参数, 但对于进化规划的求解速度则有很大的提高, 同时也使得使用 Dopplerlet 变换对舰船辐射噪声进行分解获得的识别特征具有了实用性。

在本文中使用了舰船辐射噪声信号在  $m$  个尺度上的近似信号  $A_s^n$  作为识别特征。在本文中使用了类似与文献[5]使用的方法, 提取每一级近似信号  $A_s^n$  的能量作为识别特征, 因此识别特征的维数等于信号所作的 Dopplerlet 分解的级数。

假设舰船辐射噪声第  $n$  级分解所获得的近似信号为  $A_s^n$ , 其中  $A_s^n$  的长度为  $K$ , 那么识别特征向量  $X$  的第  $n$  维分量为:

$$x_n = \frac{\sum_{k=1}^K |a_{sk}^n|^2}{K} \quad (5)$$

其中  $a_{sk}^n$  为  $A_s^n$  的第  $k$  个值。

由于舰船距离被动声纳的距离不同等原因, 被动声纳接收到的辐射噪声的强度即使是同类型的舰船也并不相同, 因此, 为了消除由于声场强度的不同而造成的识别特征向量间的差别, 对识别特征作归一化处理, 处理后的特征矢量, 仅仅表示不同分解层次的能量在总能量中所占的比例, 而与舰船距离的远近和声场强度无关。归一化处理后的特征识别矢量记为  $X'$ , 其第  $n$  维的分量为:

$$x'_n = x_n \setminus \sum_{n=1}^m x_n \quad (6)$$

将归一化处理后的特征矢量  $X'$  送入神经网络进行识别。

### 4 舰船辐射噪声识别试验

为检验基于 Dopplerlet 变换的舰船辐射噪声特征提取技术的性能, 我们对收集到的 44 艘(条)水面和水下运动目标以及不同海况下的海洋环境噪声的实录信号进行识别试验。其中水面和水下运动目标共有 89 个不同工况和航次, 海洋环境噪声为 3 种不同海况。所获得的水面、水下运动目标及海洋环境噪声以 22.050Hz 采样频率采集信号, 取 1.48608s 时间长度的信号即 32768 个数据点构成一个样本, 共

采集了4745个数据样本,以此作为试验样本集。由于此次收集到的舰船噪声样本长度并不一致,最短的仅有20余秒(鱼雷噪声信号),最长的则有4min50s(护卫舰和商船噪声信号),因此试验样本集中每类目标所包含的样本数并不相同,而且区别比较大。同时,每个目标噪声所包含的工况和海况并不相同,例如某型驱逐舰的辐射噪声包含三个工况和三种海况的样本,但是某型鱼雷辐射噪声则只有一个工况和一种海况的样本。

对于舰船辐射噪声而言,如果仅仅从其时域波形来看是非常相似的,为了区分不同的舰船必须使用某些特殊的方法提取出各种类型的舰船不同与其他类型舰船的特征,这也就是舰船辐射噪声特征提取技术需要达到的目的。为了比较基于 Dopplerlet 变换的舰船辐射噪声特征提取技术的性能,在本文中选取了基于小波变换的舰船辐射噪声特征提取技术<sup>[5]</sup>、基于相空间重构理论(自然尺度)的舰船辐射噪声特征提取技术<sup>[6]</sup>和基于时域波形结构的舰船辐射噪声特征提取技术<sup>[7]</sup>作为比较的对象。

在4745个样本集中选择1132个样本作为训练集,其余的3613个样本作为测试集。其中训练集中包含了所有类型的舰船(鱼雷、环境噪声),但是并不包含每类舰船的所有工况(海况)。同时,用A类表示水面舰船,B类表示水下低速运动目标,C类表示水下高速运动目标,D类表示环境噪声。其中,训练集中包含A类样本487个,B类样本278个,C类样本186个,D类样本181个;在测试集中包含A类样本1462个,B类样本877个,C类样本702个,D类样本572个。使用EPRBF神经网络对上述四种方法提取出来的特征进行识别,识别结果如表1所示。为了表述方便,在表格中用WT(wavelet transform)代表使用小波变换技术提取的舰船辐射噪声特征,用WS(wave structure)表示舰船辐射噪声的时域波形结构特征,NM(natural measure)表示舰船辐射噪声的自然尺度特征,用DT(Dopplerlet transform)表示基于 Dopplerlet 变换的舰船辐射噪声特征。

表1 不同特征提取方法识别率比较(%)

Tab. 1 Identification rate of several feature extraction methods (%)

	训练集				测试集				综合
	A类	B类	C类	D类	A类	B类	C类	D类	
WT	95.69	94.96	89.78	96.13	85.98	82.33	80.63	85.49	86.51
WS	95.89	93.88	91.93	94.48	85.70	83.12	79.91	84.62	86.34
NM	93.22	96.40	91.40	95.58	84.95	81.53	80.63	85.66	83.84
DT	96.51	94.96	94.10	96.13	88.24	82.10	84.33	85.49	87.97

从表1可以看出,基于 Dopplerlet 变换的舰船噪声特征提取技术相对于其他特征提取方法综合识别率提高两个百分点左右,对于水声识别这种复杂的模式识别问题,提高一个百分点都是难能可贵的。

## 5 结论

本文提出了一种基于 Dopplerlet 变换的舰船辐射噪声特征提取方法,在该方法中使用与舰船辐射噪声性质更加类似的 Doppler 信号作为分解的基函数。使用基于 Dopplerlet 变换的舰船辐射噪声特征提取方法和基于小波变换、波形结构、自然尺度的特征提取方法对收集到的舰船辐射噪声信号进行特征提取与模式识别,识别结果表明,基于 Dopplerlet 变换的舰船辐射噪声特征提取方法具有更好的性能。

## 参考文献:

- [1] Bulsari A. Some Analytical Solutions to the General Approximation Problem Using Feedforward Neural Networks[J]. IEEE Trans. on Neural Networks, 1993, 6: 991-996.
- [2] Moore F. Passive Sonar Target Recognition Using a Back-propagation Neural Network[D]. Naval Postgraduate School, Monterey, California, July, 1991.
- [3] 邹红星,周小波,李衍达. 采用 Dopplerlet 基函数的时频信号表示[J]. 北京: 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(3): 55-58.
- [4] 王向军,向东,蒋涛,等. 一种双群进化规划算法[J]. 计算机学报, 2006, 29(5): 835-839.
- [5] 丁庆海,庄志洪,祝龙石,等. 混沌、分形和小波理论在被动声信号特征提取中的应用[J]. 声学学报, 1999, 24(2): 197-203.
- [6] 杨绍清,章新华,肖明杰,等. 舰船辐射噪声的自然尺度特征[J]. 声学学报, 2001, 26(3): 212-216.
- [7] 蔡悦斌,张明之,史习智,等. 舰船噪声波形结构特征提取及分类研究[J]. 电子学报, 1999, 27(6): 129-130.