

# 小波分析及其在水声工程中应用的探讨<sup>\*</sup>

张建伟 张效民 相敬林

(西北工业大学航海工程学院·西安·710072)

基于使用傅里叶变换进行信号分析的局限性,本文介绍了小波分析的进展及其独特的性质,继而给出了小波分析在水声工程应用中的两个研究方向。其一,使用以小波变换为工具的宽带相关处理进行水声信号处理;其二,利用小波分析的局部化和多尺度分析的特点进行舰船噪声分析。

关键词: 小波分析, 宽带相关处理, 舰船噪声分析, 局部化, 多尺度分析

## Research on wavelet analysis applications to underwater acoustics

ZHANG Jianwei, ZHANG Xiaomin, XIANG Jinglin

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xian · 710072)

Considering the limitation of using Fourier transform for signal analysis, this paper introduces the progress of wavelet analysis and some of its unique performances. Two research fields on underwater sound are discussed. One is wideband correlation processing of underwater sound with wavelets; another one concerns ship-radiated noise analysis by means of the performances of localization and multiscale analysis of wavelets.

**Keywords:** wavelet analysis, wideband correlation processing, ship-radiated noise, localization, multiscale analysis

### 1 小波分析简介

“小波分析”是近年出现的一种新的数学方法,也是多元调和分析 40 年来发展的一个突破性的进展,它是纯粹数学与应用数学殊途同归的又一个光辉例子。

历史已经证明,传统的傅里叶分析是纯粹数学与应用数学的一个重要工具,它几乎渗透到了数学的各个分枝。传统的傅里叶分析,从函数  $e^{jx}$  出发,成功地构造了  $L^2$  空间的

一种正交展开,但因为  $e^{jx}$  不是局部化的,所以传统的傅里叶分析不能做局部分析,而且它甚至不能提供  $L^P$  空间 ( $P=2$ ) 的无条件基,因此把它应用到  $L^2$  以外的空间,需要加上繁冗的演算与推导。小波分析既保留了傅里叶分析的优点,又弥补了上述的不足之处,它从有限个具有正则性、局部性与振动性的小波函数出发,通过平移与展缩,为  $L^2$  空间提供了一类新的正交基——小波正交基。这类正交基使得调和分析中最常见的一类算子

<sup>\*</sup> 收稿日期: 1996-5-15

(Calderon-Zygmund 算子), 在其上的表现是几乎对角化了的矩阵, 因而使得它们构成了已知绝大多数常用的 Banach 空间的无条件基, 故小波分析为各个空间的分析提供了较传统傅里叶分析更为有力的工具。另外, 小波函数的局部性, 保证了用小波正交基可以进行局部分析, 加上已发展起来的一套快速算法, 便使得小波分析在函数论、算子论、偏微分方程、非线性方程、数值分析以及图象处理、信号传输、数据压缩、边缘探测等方面, 都获得了重要的应用, 并且它的理论与应用范围, 正在迅速深入与扩大。

长期以来, 分析中的基函数是余弦函数、正弦函数和虚指数函数。函数  $(2\pi)^{-\frac{1}{2}} e^{ikx}$ ,  $(k \in \mathbb{Z})$  构成了空间  $L^2[0, 2\pi]$  的一组规范正交基。傅里叶级数是它们的线性组合  $\sum a_k e^{ikx}$ 。对它们的研究一直是并且仍然是数学分析中问题和发现的用之不尽的源泉。但之所以现在存在很多问题, 这主要是因为缺乏一本好的手册, 用它可以把函数的性质翻译到它的傅里叶系数上。

在 80 年代初, 一些科学家就使用了“小波”作为传统傅里叶分析的一个替代物。用这个替代物可以期待把数值分析做得更为简单, 并把某些瞬时现象的综合做得更为有力。从数学方面, 探索也正在积极地进行。

小波基是普遍适用的, 这就是说: 函数或分布可表示成小波级数的和。与用傅里叶级数来做这件事情况不同的是, 这些级数的系数以简单的方式精确并忠实地表达了这些函数或分布的性质。

这样, 人们就有了一个新工具。在某些问题中, 如果用傅里叶级数或积分来解决问题需要很高的技巧, 或是很繁琐的数值计算, 而用它便可以得到以前只有用缺项的或随机的傅里叶级数才能办到的微妙结构; 那些特殊级数的例外好的性质现在变成了一般小波级数的平凡性质。小波一旦被构造出来, 就可以被很好地用于那些领域。

小波分析不能完全取代傅里叶分析。事实上, 傅里叶分析对构造小波分析中不可缺少的小波基起了很大的作用。小波变换是作为短时傅里叶变换的另一种形式推导出来的。这两者之间更多的关系是互相补充而不是互相排斥。

小波分析的主要应用之一是用于非平稳(或时变)信号的分析。小波变换的“变焦距”性质可提供出不连续性的非常好的表示。人们以不同的“标度”或“分辨率”来观察信号: 信号粗略地看是平稳的, 而在细节处(用一个很小的窗口观察)信号的不连续性变得明显。信号分析中的这种多分辨率多标度的观点正是小波变换的基本点。小波变换的目的就是“既要看到森林(信号的概貌), 又要看到树木(信号的细节)”。

Y. Meyer 是现在形式小波正交基存在性的证明者, 为小波理论的建立做出了重要的贡献。他编写了小波理论的第一本专著《小波与算子》。另外, I. Daubechies, S. Mallat 等人对小波理论发展的促进也有着不可替代的作用。

## 2 使用小波变换的宽带相关处理技术在水声工程中的应用

宽带相关处理常应用于以下几种信号: 具有大的分形带宽(Fractional Bandwidth)的信号; 大的时间带宽积信号; 统计非平稳信号; 由快速目标返回的信号等。应用宽带相关处理分析这些信号的优点是: 改善抗噪度(Noise Immunity)(时间带宽积变大时, 信噪比提高); 改善分辨率(时域分辨率与带宽成反比, 频域分辨率与时间成反比); 舍弃了许多假设(如信号的统计平稳性、被描述目标的物理静止等)。

宽带处理研究了几十年, 但它的应用仍被限制着, 这其中主要的原因就是, 多数处理是用 FFT 来完成的。因 FFT 不是宽带处理的主要工具, 所以宽带方法就不能被有效地

使用。由于没有使用宽带处理的有效方法,许多研究人员要么舍弃了宽带技术,要么为被考虑的应用加上了约束假设,这些假设妨碍了“真正”的宽带处理。

小波变换与宽带处理之间的联系,给研究人员提供了一个研究宽带技术的新前景。

尽管小波变换和宽带相关处理用宽带二重性(Ambiguity)函数研究了许多年,但因涉及到的计算困难使得宽带二重性函数处理的使用受到限制。在对小波兴趣增加和当前计算机具有强大计算能力情况下,宽带处理已获新生并被正确地应用到许多情况下。

在宽带雷达和声纳中,连续展缩和时间平移是必须要求的。在这些情况下,选择连续、冗余小波母函数,并将之应用于相关信号处理是更适宜的,且能得到更好的性能。

将连续小波变换应用于宽带相关处理经典领域带来了几个好处,其中最主要的好处便是选择或设计小波母函数的灵活性。选择一最佳小波母函数,可得到好的分辨率。非正交小波母函数特别适用于在一个倍频程中要求有多个精度值的应用。

选择母小波带来的额外灵活性,使得研究人员可以应用小波理论和宽带相关处理解决诸多问题,例如,源定位、通道建模等相应的结果,其中的许多窄带约束便可以去掉。

现代宽带雷达与声纳技术通过求收到信号与发射信号延时和变频后各种信号组合的相关来估计时间延迟与时间变化。对窄带信号来说,这种方法就是求收到信号与发射信号的时延和 Doppler 移频后信号的相关;而对宽带信号而言,相关可用公式表示为收到信号相对发射信号的小波变换<sup>[1]</sup>。

一般声纳(主动声纳)系统的频率在数千赫以上,其发射的信号带宽通常在 400Hz 以下,远小于中心频率,是窄带信号。而现需要一种宽带信号,以便进行宽带相关处理;这便要求采用宽带主动声纳。

连续小波变换提供了选择小波母函数的

灵活性,特别是选它作为发射信号。适当选择或设计需要的小波母函数,可得到额外好处。根据文献[2],可看出某种典型的宽带声纳发射信号形式具有小波的形式。

利用小波变换技术进行宽带相关处理,可以不考虑目标是点目标还是体分布目标,并充分发挥宽带处理的优点。利用反射回波的结构特征,通过宽带相关处理得到目标的时延和变频数,结合主动声束的指向性,以及声基阵的结构形式便可推算出目标舰船位置的参数,比如,方位角、仰角、距离、航向、航速等。同时这种方法在经验数据的帮助下,还可以进行目标类别识别。

### 3 利用小波技术进行舰船噪声分析

长期以来,舰船噪声分析多数是采用傅里叶分析方法来完成的。通过我们对舰船噪声信号的频谱结构分析来看,有用信号多集中分布于一个或数个频段内<sup>[3~5]</sup>,而在舰船噪声信号的处理分析中,我们也就是对这些频段内的信号比较感兴趣,从而对之加以利用。由傅里叶分析理论我们知道在频域内单频信号对应的是一个频率点,而时变信号的傅里叶变换,由于其频率成份比较丰富,展开系数的能量必然展得很宽,也就是说,平均到可利用的频段上的能量较少。这就使得我们考虑到,有无一种局部性较好的方法对噪声信号进行分析,以便使被利用信号部分的能量更加集中,从而提高信号分析的水平。我们现在寻求一种新的方法以便更加有效地进行特征提取等舰船噪声的分析工作。

傅里叶分析方法的出现,使得数理科学发生了很大的变化,时至今日,人们仍普遍认为无论怎样强调它的作用也不过分。但因为傅里叶变换是对时间求积,从而将非平稳信号中的时变信息掩盖掉了,所以它只适用于确定性的平稳信号。另外,它在时频域的分辨率是固定不变的,也就不足以在任意小的范

围内描述或确定频率,这无论是在理论上还是在实用中都带来了相当多的不便。以舰船噪声信号来说,因为信噪比的限制,提取频谱中的线谱分量也受到一定的限制。

具有多分辨率或多尺度特性的小波分析方法为我们提供了一个局部性优良的便利工具。小波分析相当于一个数学显微镜,具有放大、缩小和平移等功能,通过检查不同放大倍数下的变化来研究信号的动态特性。由于对频率成份采用逐渐精细的时域或空域取样步长,从而可以聚焦到信号的任意细节。这正是我们所需要的特性,依此,我们可以对可利用的频段信息有效地加以利用。

经过对小波分析方法的理 解,我们可以利用小波理论进行舰船噪声的有关研究。

从分辨率看,小波变换较好地解决了时间和频率分辨率的矛盾,它巧妙地利用了非均匀分布的分辨率:在低频段用高的频率分辨率和低的时间分辨率;而在高频段则采用低的频率分辨率和高的时间分辨率。换句话说,小波分析的窗宽(基宽度)是可变的,它在高频时使用短窗口,而在低频段时则使用宽窗口,这充分体现了相对带宽频率分析和自适应分辨分析的思想,与时变信号特性也是一致的,用以分析时变信号十分有效,这也是有人将其称为‘数学显微镜’的原因。

从频谱分析看,小波变换将信号分解为对数中具有相同大小频带的集合。与加窗傅里叶变换(即短时傅里叶变换)相比:加窗傅里叶变换对不同的频率分量,在时域都取相同的窗宽,而小波变换的窗宽是可调的。这种以对数形式(非线性的)而不是以线性方式处理频率方法对时变信号具有明显的优越性,从而可见非线性方法的潜力之一斑。

据查寻文献可知,小波技术在信号与图象分析、地震信号处理、信号的奇异性检测等方面已有很好的应用,但具体到舰船噪声类信号的分析,仍无人涉足此项研究,更无应用先例。

我们认为,将小波分析理论引进舰船微弱信号检测领域,为引信技术的发展做些基础性研究工作,并结合实际提出行之有效的分析方法,如提高信噪比、进行目标特征提取等新方法,这是一件很有意义的工作。

## 4 结束语

小波理论是调和分析—现代傅里叶分析的重大突破,局部化与多尺度分析是其精华所在。小波展开保留了傅里叶展开的优点,且在时间和频率上都可进行局域分析,并且频谱分析仍可进行,只是基波须用小波母函数所代替。本文提出了小波分析在水声工程中的两种应用,但其应用的范围远不止这些。某些快速小波变换算法又为完成实时处理和减小能耗提供了可能。可以预见,小波分析将会在水声工程中得到广泛应用。

### 参考文献

- 1 Weiss, L. G, Wavelets and wideband correlation processing, IEEE Signal Processing Magazine, Jan. 1994; 13 ~ 32
- 2 侯自强,李贵斌. 声纳信号处理. 海洋出版社, 1986. 12: 476 ~ 488
- 3 叶平贤,龚沈光, 舰船物理场. 兵器工业出版社, 1992. 4: 124 ~ 138
- 4 Urlick, R. J. 水声原理. 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990. 2: 260 ~ 274
- 5 相敬林,王海燕. 微弱信号检测技术及近感系统. 西北工业大学出版社, 1993. 9: 58 ~ 69