

JIYU GAOJIE TONGJILIANG DE XINXI CHULI JISHU

基于高阶统计量的 信息处理技术

■ 郭业才 著

安徽大学出版社

基于高阶统计量的信息处理技术

郭业才 著

安徽大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

基于高阶统计量的信息处理技术 / 郭业才著. —合肥:
安徽大学出版社, 2005. 12
ISBN 7-81110-096-7

I. 基... II. 郭... III. 高阶—统计分析(数学)
—应用—水下通信—研究 IV. TN929.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 156407 号

基于高阶统计量的信息处理技术

郭业才 著

出版发行	安徽大学出版社 (合肥市肥西路3号 邮编 230039)	印刷	中国科学技术大学印刷厂
联系电话	总编室 0551-5107719 发行部 0551-5107784	照排	合肥述而文化传播有限公司
电子信箱	ahdxchps@mail.hf.ah.cn	开本	787×1092 1/16
责任编辑	钟 蕾	印张	9
封面设计	孟献辉	字数	197 千
		版次	2005 年 12 月第 1 版
		印次	2005 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 7-81110-096-7 / T·91

定价 13.50 元

如有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换



作者简介

郭业才，1986年毕业于安庆师范学院物理教育专业，获得学士学位；2003年毕业于西北工业大学水声工程专业，获得博士学位；现任安徽理工大学教授，控制理论与控制工程专业、电路与系统专业硕士生导师。主要研究方向：高阶统计量理论及其应用，水声信号处理、通信信号处理、测控与仿真，噪声与振动控制等。曾以第一作者身份在国内外重要期刊及国际会议上发表学术论文50余篇，其中被SCI、EI、ISTP等收录近30篇。

前言

低信噪比条件的目标检测和识别是水声技术的关键性难题之一,其中目标特征的提取与增强又是解决此难题的核心技术。这项技术随着军事需求的不断增加、经济发展的不断加快及其他学科的不断进步,引起了各国的高度重视。这项技术是以水下目标噪声和回声特性数据为研究对象,以现代信号处理技术为手段,提取多方位、多层次上的高品质的目标特征,为提高目标检测与识别质量服务,其关键是用什么方法处理声呐设备接收的信息,以消除无关噪声而保留反映目标特征的信息。目前国内关于这项技术的研究主要集中在相关函数与功率谱方法、自适应滤波方法、小波变换方法、基于神经网络的方法、混沌动力学与分形理论的方法、时频分析法、数据结构法、符号推理法和人工智能法、高阶统计量方法等方面。尽管这些方法在水下运动目标特征提取与增强方面的研究已取得了一些进展,但是还存在许多理论问题和实际问题有待解决。如用这些方法对水下运动目标特征进行提取与增强时,大多假定水下运动目标辐射噪声为平稳随机过程,但实际上水下运动目标辐射噪声是非平稳、非高斯、非线性的典型的“三非”问题。对于典型的“三非”问题,高阶统计量是最为有效的处理工具,但其计算复杂,因此利用高阶统计量理论对水下运动目标特征提取与增强课题的研究很少。为了推动该领域的研究与应用,尤其是吸引国内更多的研究人员加入到该研究领域,特撰拙著,以供参考。

本书是作者攻读博士学位期间关于基于高阶统计量的水下运动目标动态谱特征提取与增强方法的研究成果及基本总结。其中的研究陆续发表在《Applied Acoustics》、《通信学报》、《声学学报》、《电子与信息学报》和《兵工学报》等学术刊物及国际会议上,经进一步总结提炼构成本书的主要内容。本书对基于高阶统计量的水下运动目标动态谱特征提取与增强问题进行了较为系统深入的论述。包括给出运动目标动态谱特征的高阶累积量表征技术、高阶统计量计算的优化方法,基于高阶统计量的自适应动态谱特征提取与增强原理、基于高阶谱的动态谱特征提取与增强原理及进行详尽的仿真实验结果分析,由此希望探索出一条时域微弱信号检测的新途径。

全书共分8章,第1章介绍了水下目标特征提取或增强的研究意义、发展进程,给出了水下目标特征提取与增强的基本思想,第2章在对高阶统计量理论、目标噪声和海洋环境噪声特征进行分析的基础上,研究了水下运动目标辐射噪声的四阶累积量表征技术及其特点;第3章讨论了高阶统计量计算优化的理论与方法;第4章提出了水下运动目标动态谱线增强理论与算法,确定了衡量算法性能的若干参数,对某水下目标在高斯白噪声、色噪声背景下的动态线谱增强进行了仿真实验研究;第5章提出了水下运动目

标动态谱线增强快速算法,在第3、4章研究的基础上,进一步研究了具有小计算量的动态谱线增强快速算法,以增强工程实用性;第6章着重研究了基于歪度信噪比的二次相位动态耦合信号增强理论与算法,建立了一些新概念,对算法性能的仿真结果进行了分析;第7章构造了基于级联自适应滤波的动态谱线增强器,从理论上对增强器性能进行了分析,并利用实测的某水下目标辐射噪声数据对增强器性能进行了仿真研究;第8章简要介绍了该书的主要结果及进一步研究的方向。

本书得到了船舶工业国防科技基础研究、应用研究基金(2000J42.2.8)、安徽省自然科学基金(050420304)、安徽省教育厅自然科学基金(2003KJ092、2005KJ008ZD)及安徽理工大学博士基金(2004YB005)、安徽理工大学专著出版基金及安徽省级教研项目(2005212)的资助。

感谢西北工业大学声学与信息工程系赵俊渭教授对作者的指导,感谢西北工业大学、安徽理工大学为作者提供的科研和工作条件,使作者顺利地完成了该书中的研究工作。感谢国内外该领域的各位专家所做的研究工作,为本书提供了部分素材。本书的出版还得到了安徽理工大学科技处与电气工程系的支持和帮助,在此一并致谢。

由于作者学识有限,加之时间仓促,本书中的观点和提法难免有不妥之处,恳请读者不吝赐教。

作者

2005.10.1

内 容 提 要

将高阶统计量理论用于水下目标动态谱特征提取与增强,是一种处于探索中的时频域分析方法。本书首次对基于高阶统计量的水下运动目标动态谱特征提取与增强问题进行了较为系统的论述,包括给出水下运动目标动态线谱的高阶累积量表征方法、高阶统计量计算优化的理论与算法,水下运动目标动态谱特征提取与增强理论、算法及快速算法,水下运动目标辐射噪声的多谱特征提取理论与算法,基于级联自适应滤波的动态谱特征增强原理及进行详尽的仿真实验结果分析等。

本书读者对象为在各种科学研究、工程技术领域中从事信息处理的科技工作者,也可作为高等院校各相关专业的研究生的参考书。

目 次

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 研究现状	2
1.2.1 相关函数与功率谱方法	2
1.2.2 自适应谱线增强方法	3
1.2.3 小波变换方法	5
1.2.4 基于神经网络的方法	6
1.2.5 混沌动力学与分形理论	6
1.2.6 高阶统计量方法	7
1.3 本书研究的基本问题与创新之处	8
1.3.1 本书研究的基本问题	8
1.3.2 本书的主要结果与创新之处	9
第 2 章 水下运动目标辐射噪声的高阶累积量表征	10
2.1 高阶统计量理论	10
2.1.1 高阶统计量与高阶谱	10
2.1.2 高阶矩和高阶累积量的转换关系	11
2.2 水下运动目标辐射噪声的四阶累积量表征	13
2.2.1 噪声机理与谱结构特征	13
2.2.2 水下运动目标辐射线谱信号的四阶累积量表征	17
2.3 小结	21
第 3 章 高阶统计量计算优化的理论与算法	22
3.1 非平稳随机过程的四阶累积量计算优化	22
3.1.1 四阶累积量递推精确估计	22
3.1.2 四阶累积量递推近似估计	23
3.1.3 四阶累积量递推估计的优化	24
3.2 非平稳随机过程的五阶累积量计算优化	25
3.2.1 五阶累积量直接估计	25

3.2.2	五阶累积量研究的必要性	25
3.2.3	五阶累积量递推精确估计	29
3.2.4	五阶累积量递推近似估计	31
3.2.5	五阶累积量递推估计的优化	32
3.3	高阶累积量计算优化的仿真分析	33
3.4	小结	35
第 4 章	水下运动目标动态谱线增强理论与算法	36
4.1	信号模型	36
4.2	基于四阶累积量对角切片的自适应动态线谱增强算法	37
4.2.1	算法原理	37
4.2.2	收敛性研究	39
4.3	基于四阶累积量非对角切片的自适应动态线谱增强算法	42
4.3.1	算法原理	42
4.3.2	收敛性研究	43
4.4	性能评价与性能参数	45
4.5	仿真实验	47
4.6	小结	57
第 5 章	水下运动目标动态谱线增强快速算法	58
5.1	信号模型	58
5.1.1	变速直线运动目标	58
5.1.2	变速曲线运动目标	59
5.2	基于四阶累积量极性迭代的自适应谱线增强快速算法	60
5.2.1	快速算法原理	60
5.2.2	仿真实验	62
5.3	基于加权高阶累积量切片的自适应谱线增强快速算法	65
5.3.1	平稳随机过程的加权高阶累积量切片	65
5.3.2	非平稳随机过程的加权高阶累积量切片及其更新算法	66
5.3.3	仿真实验	68
5.4	基于四阶累积量符号相干累积的自适应谱线增强快速算法	71
5.4.1	算法原理	72
5.4.2	仿真实验	73
5.5	小结	75
第 6 章	水下运动目标辐射噪声的多谱特征提取理论与算法	76
6.1	非高斯白噪声通过线性系统的高阶累积量特征	76

6.2 基于歪度信噪比的二次相位动态耦合信号特征提取	78
6.2.1 三阶累积量切片谱性能分析	78
6.2.2 基于歪度信噪比的水下目标耦合特征提取	80
6.2.3 仿真实验	82
6.3 基于峰度信噪比的水下运动目标辐射噪声特征提取	86
6.3.1 四阶累积量切片谱性能分析	86
6.3.2 基于峰度信噪比的水下目标辐射噪声特征提取	88
6.3.3 仿真实验	89
6.4 小结	94
第 7 章 基于级联自适应滤波的动态谱线增强理论与算法	96
7.1 信号模型	96
7.2 四阶累积量变步长迭代算法与性能	96
7.3 修正的四阶累积量变步长迭代算法	97
7.4 基于级联自适应滤波的谱线增强算法	98
7.5 算法性能的理论分析	99
7.6 仿真实验	102
7.7 小结	106
第 8 章 结论与展望	108
附录 重要公式的推导	111
参考文献	121

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

水下运动目标分军用目标和民用目标两大类。水下军用目标是指潜艇、鱼雷等海军武器装备。在现代海上战争中,它们是大型水面舰艇最主要的威胁^[1]。因此,它们的特性是海上战争中敌我之间的重要信息资源,是海军武器装备对抗中“矛”与“盾”发展的技术关键。水下军用目标噪声特征提取或噪声谱特征增强正是这一技术关键的重要内容。虽然声呐设备是探测这类目标的重要手段,但随着降噪和消声技术的发展,这类目标辐射的噪声级变得越来越低,加上隐身技术的发展和海军战略的转移,使得声呐设备对它们的探测、跟踪和识别越来越困难。就拿潜艇来说,从20世纪60年代以后的30多年中,潜艇噪声级大约降低了35dB,潜艇的反射本领也由于消声瓦的使用大约降低了10dB(在一定频段内),其中潜艇降噪的影响最为显著,使被动声呐的作用距离急剧减小,达到了两艘安静型潜艇互未发现以致相撞的程度^[2]。另一方面,现在西方的海军战略正在从远海向近海转移,如波斯湾、红海、波罗的海、地中海、东中国海等具有重要战略意义的近海水域,是未来海战的重要地区。这些地区水声环境复杂多变,不但使噪声干扰显著增大,而且使信号场与噪声场变得极其复杂,非高斯性、非平稳性、非线性等现象更加明显,这些给声呐设备对潜艇或鱼雷等水下武器进行探测、跟踪、识别与分类造成了越来越大的困难。因此,在现代海战中,首先需要解决的问题是如何及时地发现已受到潜艇,特别是鱼雷的威胁甚至攻击,然后才是采取那些有效措施避免潜艇或对抗鱼雷的攻击,这是世界各国海军研究的重要课题。世界各发达国家,纷纷投入大量的人力、物力、财力从事这方面的研究,但由于保密程度极高,难以见到公开发表的报道;即使有,也不可能提供实质性的内容。我国是个海洋资源丰富的国家,确保海洋资源不受侵犯和领土完整是我国海军的一项艰巨任务。尽管我国在这方面的研究比较落后,但近年来提高我国海军战斗力的客观需求急剧增加。因此,水下军用目标特征提取与增强、分类与识别技术是我国亟待解决的关键技术之一。

这本专著正是基于这种背景,结合船舶工业国防科技预研项目“水中运动目标动态谱特征增强与表征技术”课题而展开研究的。主要目的为:(1)在分析水下运动目标特性的基础上,建立水下运动目标辐射噪声的动态谱特征的数学模型;(2)为水下目标探测和识别系统,提供水下运动目标动态谱特征提取与增强的有效方法和算法;(3)给出动态谱特征增强的优化算法和仿真结果,以便对算法的有效性能进行比较和评估。其

研究成果将为弱信号检测、参数估计和目标识别等信号处理,提供一个新的技术途径,为减小鱼雷、潜艇等水下武器对大型水面舰艇所构成的威胁奠定技术基础。

1.2 研究现状

在水下目标探测和识别技术所需的目标特征提取或增强研究上,以水下目标噪声和回声特性数据为研究对象,以现代信号处理技术为手段,提取多方位、多层次上的高品质的目标特征,为提高目标检测与识别质量服务。这项技术是随着军事需求、经济发展及其他学科的进步而逐渐发展起来的。

声呐的起源可追溯到很远。1490年达芬奇所描述的通过将长管插入水中,用耳听测远处行船声音的装置,是最原始的被动收听系统。数百年后,一种根据双耳定向原理用双管构成的噪声定向仪是具有实际意义的被动声呐的雏形。电声转换技术的发展,真空三极管的发明,为现代声呐技术的发展奠定了技术基础。20世纪第一次世界大战的爆发,成为声呐发展最直接、最重要的推动力。1915年,英国物理学家卢瑟福按双耳效应原理制成的噪声定向仪(SC装置)是现代被动声呐的雏形。1917年,朗之万制成的石英夹心换能器(装有真空管),可以接收远在1500米处潜艇的反射信号,可以说是现代主动声呐的雏形。第二次世界大战,模拟声呐技术继续发展,促进了水下目标识别技术的提高。战后,计算机技术和数字信号处理技术的发展,推动着模拟声呐技术向数字声呐技术转化。20世纪60年代以前的声呐,以模拟声呐为主,包含一些模拟—数字声呐,功能单一;60年代以后相继出现的数字声呐,自动化程度越来越高,可靠性、可维护性越来越强,运算速度越来越快。但随着电子技术与隐身技术的发展,水下电子战愈演愈烈,而低噪声鱼雷、核潜艇的出现,以及海军战略的转移,又使被动声呐系统接收的水下目标信号越来越弱,甚至接近海洋环境噪声的水平。因此,惟有提高被动声呐的灵敏度,才能有效识别诸如潜艇、鱼雷这类隐身性很强的水下武器。因而,关键技术就变成了用什么方法处理声呐设备接收的信息,以消除无关噪声而保留反映目标特征的信息。企图解决这一问题的努力,导致了各种各样的方法。下面列举的方法和成果代表了现今水下目标特征提取或增强的发展与现状。

1.2.1 相关函数与功率谱方法

时域的相关函数法和频域的功率谱法,是研究水下目标辐射噪声特征的基本方法。20世纪80年代以来,国内学者在这方面做了大量的研究。

陶笃纯等人,利用ECS模型对舰船辐射噪声的平均功率谱建模,提取了功率谱的最大位置和归一化平均功率谱级的二阶中心矩两个参数构成的特征向量;分析了舰船辐射噪声中节奏的物理根源,指出了常见的节奏类型;计算了叠加型调制的功率谱密度以及各种调制类型的自相关函数^[3~7];建立了在海水介质中传播的舰船辐射噪声线谱幅度起伏模型。这些工作为舰船辐射噪声的线谱检测和连续谱平滑提供了理论和实验依据^[8]。

吴国清等人,通过双重谱和后置谱分析器分析了高斯背景噪声中舰船辐射噪声的周期性局部平稳和周期调制性能^[9,10];利用时变功率谱和双重频率功率谱对舰船辐射噪声的线谱(含调制线谱)特征进行了提取^[11,12,13],主要内容为谱特征的分离、线谱分析参数的选择与特征提取等;通过对海上记录时间大于4h的几十条水声目标噪声进行归一化短时谱图分析,归纳出一些典型的瞬态信号的时频分布形态,研究了用谱相关提取瞬态信号模态的技术^[14]。

曲存让等人,分析研究舰船辐射噪声的自相关函数的图形差别后,提取了反映舰船辐射噪声特性的频带宽窄、高低频分量的强弱、平均频率的大小和线谱分量的多少等信息^[15]。

文献[16],将舰船辐射噪声的平均功率谱和相关函数相结合,提取了谱位置、谱宽度、谱强度和相关函数的极值等参数。

尽管自相关函数(或功率谱)在水下目标特征提取或增强中得到了广泛应用,但存在的主要缺陷是:(1)不同频率分量间的相位信息会完全丢失,进行准确的相位重构仅在最小相位信号才能实现;(2)去除非高斯过程中的高斯噪声,效果是不理想的,特别是在色噪声环境下,很难将线谱与色噪声谱进行分离。

1.2.2 自适应谱线增强方法

通常所说的自适应谱线增强器是一种自适应滤波器,由于它具有可以自动调节参数而不需要关于信号和噪声先验知识的优点,从1967年B. Widrow等人^[17]提出该理论以来的30多年时间内发展迅速,现在已广泛应用于噪声中的信号检测、跟踪、增强、线性预测及特征提取等^[18~20]。用自适应谱线增强技术提取水下目标噪声特征的自适应滤波器有两种基本类型:基于自适应线性组合器的自适应谱线增强器和基于短时相关的自适应谱线增强器。

1. 基于自适应线性组合器的自适应谱线增强器。

基于自适应线性组合器的自适应谱线增强器(ALE, Adaptive Line Enhancer)原理图,如图1.1所示。

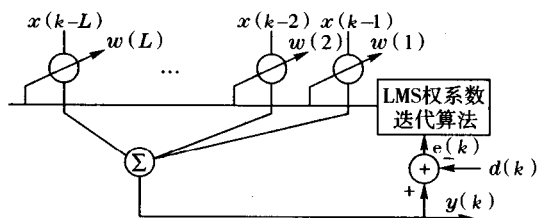


图 1.1(a) 自适应线性组合器

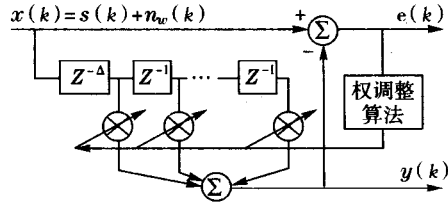


图 1.1(b) 自适应谱线增强器

自适应谱线增强器是一个典型的闭环自适应,图中 $x(k)$ (k 是离散时间) 是采样数据; $n_w(k)$ 是环境噪声, $w(k)$ 是权系数; $y(k)$ 为实际处理输出; $e(k)$ 为实际处理输出与理想处理输出之差; Z^{-1} 代表一个采样间隔的延时; Δ 为预测距离,取整数。其参考输入直接取自输入 $x(k)$, 其权系数更新的最基本方法是最小均方 (LMS, Least Mean Square) 算法,即

$$w(k+1) = w(k) + 2\mu e(k)x(k) \quad (1.1)$$

式中, $0 < \mu < 1$ 为步长。若输入信号包括若干个正弦波(线谱)和宽带噪声,则权系数通过(1.1)式更新稳定后,包含了这些线谱成分的信息。该滤波器的输出信号为

$$y(k) = \sum_{l=0}^{2L} w(k)x(k-l-\Delta) \quad (1.2)$$

式中, $l=0,1,\dots,2L$ 是延时。ALE 的性能是通过自适应算法来实现的,有下列几种流形的算法来确定自适应权系数。它们是:递推最小二乘 (RLS, Recursively Least Square) 算法^[21],极性 LMS 算法^[22],归一化 LMS 算法^[23],变步长 LMS 算法^[24,25],动量 LMS 算法^[26,27],最小均方混合范数 (LMMN, Least Mean Mixed-Norm) 算法^[28,29] 等。研究人员对各种各样算法的探索,目的均在于提高计算效率和改善性能,便于实时实现。这些算法可改善 LMS 算法某些方面的性能,但同时可能出现另一方面的性能有所降低的问题。例如,极性 LMS 算法减小了计算量,但稳态误差增大。

2. 基于短时相关的自适应谱线增强器。

在基于短时相关的自适应谱线增强器^[30] (SCBALE, Short-term Correlation Based Adaptive Line Enhancer) 中,设 $x(k)$ 和 $Y(k)$ 的互相关函数为 $R_{xY}(k,l)$, 其递推公式为

$$R_{xY}(k,l) = \mu R_{xY}(k-1,l) + (1-\mu)x(k)Y(k-l), \quad |l| \leq L \quad (1.3)$$

式中, L 表示最大延迟,取正整数, $0 < \mu < 1$ 是平滑因子。该式表示短时相关的自适应算法 (SCA, Short-term Correlation Adaptive)。自适应滤波器的脉冲响应定义为

$$h(k,l) = R_{Z,Z-\Delta}(k, -L+l) \quad (1.4)$$

式中, $R_{Z,Z-\Delta}(k,l) = \mu R_{Z,Z-\Delta}(k-1,l) + (1-\mu)x(k)x(k-\Delta-l)$ 。SCBALE 的原理,如图 1.2 所示。

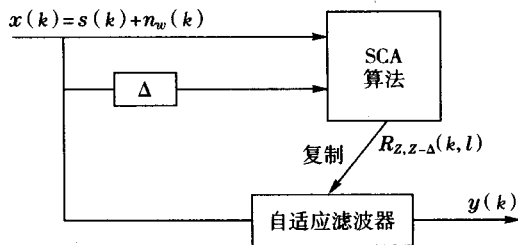


图 1.2 基于短时相关的自适应谱线增强器

该自适应滤波器输出的信号为增强信号,即

$$y(k) = \sum_{l=0}^{2L} h(k,l)x(k-l) \quad (1.5)$$

该增强器是开环自适应滤波器,增强谱线的性能略优于 ALE 算法,但低信噪比时,性能仍较差。

基于自适应谱线增强方法的特征提取或增强,20 世纪 90 年代以来,我国学者做了不少研究。文献[31]提出了具有 ARMA 结构的自适应谱线增强器,其权系数是用动量 LMS 算法进行更新的。用该增强器对海上实验数据进行了分析处理,结果表明具有很高的信噪比增益。为了在理想条件及多途信道条件下检测任意周期信号,文献[32]设计了自适应脉冲序列增强器和相关联合处理器。文献[33]对自适应谱线增强器在主动声呐中的应用进行了研究。研究表明:自适应谱线增强器可提高主动声呐的作用距离。惠俊英教授针对线谱干扰抵消器的理论及应用课题在国内一直被研究人员所忽视的现实,于 2000 年提出了基于 LMS 的自适应线谱干扰抵消器。用它对潜艇舷侧自噪声分布及特点等进行了分析和研究,具有运算量小、性能稳定等优点^[34]。而文献[35]提出一种采用两个相干累加器构造的 ALE,具有较好的窄带滤波性能,提高了在低信噪比的水声环境下对 CW 信号的检测能力。

自适应谱线增强方法的优点是,原理较简单,计算量小,工程上易实现;其缺点是,权系数的更新是建立在二阶统计量基础之上的,因此,在低信噪比条件下,难以有效地进行目标特征提取或动态谱特征增强。如何设计权系数更新算法,仍是自适应研究的重点。

1.2.3 小波变换方法

小波变换是在时间上有平移、在窗口时间尺度上有伸缩变化的冲激响应函数 $h_{\alpha\tau}(t)$ 作为窗口对输入信号 $x(t)$ 进行滤波,即

$$h_{\alpha\tau}(t) = |\alpha|^{-1/2} h\left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right) \quad (1.6)$$

式中, $h(t)$ 为基小波函数, τ 代表时间平移, α 是窗口时间尺度伸缩因子。连续形式的小波变换定义为

$$CWT_x(\tau, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) h_{\alpha\tau}^*(t) dt \quad (1.7)$$

如果把小波函数 $h(t)$ 视为带通滤波器的冲激响应,就可将连续形式的小波变换看成带通滤波过程,滤波的结果将是信号在时间—频率平面上一矩形窗口内的信号分量。这个窗可表示为

时间范围: $[t_0 - \alpha\delta_b, t_0 + \alpha\delta_b]$

频率范围: $[\alpha^{-1}\omega_0 - \alpha^{-1}\delta_\omega, \alpha^{-1}\omega_0 + \alpha^{-1}\delta_\omega]$

其中 δ_b 和 δ_ω 是小波函数 $h(t)$ 的等效时窗宽度和等效谱宽。

就小波变换的方法而言,由于小波函数一般是通过对一定的平滑函数求导数而得到的。因此,不同的小波函数具有不同的性质,对变换结果的分析和解释自然也会不同^[19]。

利用小波变换已经检测了水下目标信号中的瞬态成分^[36],实现了水下目标回波对消^[37]和水下回波边缘特征提取^[38],提取了舰船辐射噪声的低频特征^[39]和线谱分量,还进行了信号的重构^[40,41]。

1.2.4 基于神经网络的方法

人工神经网络是一种多元、多层次、非线性的并行自适应网络。它的信息是存储于各神经元之间连接的分布上,它的特性是由网络全局体现的。这种结构使人工神经网络具有很强的并行处理能力、学习和自适应能力、稳健性以及容错能力,适合于实时处理。

1991年,美国的 R H Baran 和 J P Coughlin 等人利用前向神经网络来分辨中至远距离快速航行的水面舰船的辐射噪声与近距离慢速航行的安静潜艇所辐射的噪声^[42]。英国的 Sheppard 和 Gent 等人,开发的基于自组织神经网络的被动声呐分类系统,具有识别不寻常目标的能力^[43]。1993年,美国人 Meister 研制的神经网络谐波族分类器,适用于目标噪声频谱中包含一个或多个特定基频的谐波族情况^[44]。文献[45]设计了基于模糊神经网络的智能螺旋桨转速估计器,提取了舰船螺旋桨转速。

当然,将神经网络直接用于水下目标特征提取,首先会遇到输入矢量维数过大,难以训练的问题;其次,当有新的目标类型时,它需要重新训练;再次,训练过程中初值的选取比较困难,也容易收敛到局部最小解,这些问题是神经网络的性能缺陷。

1.2.5 混沌动力学与分形理论

以分形与混沌为代表的非线性理论的日渐成熟,运用分形理论研究水下目标信号的非线性,已取得了一些进展。

文献[46]指出,分数维的空间变化率是声呐图像目标的有力特征,它与其他特征一起,对于提高沉底水雷的检测性能十分有效。文献[47]利用旁侧声呐图像的多重分形分析,进行了海底分类的研究。我国学者的研究表明:舰船噪声有混沌现象^[48];舰船噪声极限环有混沌行为,利用其非线性特征能够准确区分水面和水下两类目标^[49];在超维相空间中,舰船辐射噪声的非线性表明同类目标具有相似性,不同类目标具有可分性^[50]。

由于实际的随机噪声中,不存在严格的分形信号,大多数水声信号只是在某种尺度范围内具有分形特征^[50,51]。因此,分形与混沌方法仅是识别特征的补充。

1.2.6 高阶统计量方法

高阶统计量是指阶数大于二阶的统计量,主要有高阶矩、高阶累积量和高阶累积量谱(简称高阶谱)等内容,是一门新兴学科^[52]。1958年由维纳等人提出,并在数学、统计学、流体动力学、信号处理等领域获得应用。20世纪80年代后期,随着计算机技术的发展,高阶统计量在雷达、声呐、通信、海洋学、天文学、电磁学、等离子体、结晶学、地球物理、生物医学、故障诊断、振动分析、流体动力学等领域获得了广泛应用^[53~64]。之所以如此,是因为高阶统计量方法的突出优点有以下几点:

- (1) 抑制高斯色噪声的影响(高斯噪声的二阶以上累积量恒为零)^[65,66]。
- (2) 辨识非因果、非最小相位系统或重构非最小相位信号^[67~69]。
- (3) 提取由于高斯性偏离引起的各种信息^[70,71]。
- (4) 检验和表征信号中的非线性以及辨识非线性系统^[72~74]。
- (5) 检验和表征信号中的循环平稳性以及分析和处理循环平稳信号^[75~77]。
- (6) 高阶累积量不仅可以自动抑制高斯噪声的影响,而且也能抑制对称分布噪声的影响;高阶循环统计量则能自动抑制任何平稳(高斯与非高斯)噪声的影响。

由于高阶统计量包含了二阶统计量(功率谱和相关函数)没有的大量丰富信息,因此,凡是用功率谱和相关函数分析与处理过的且未得到满意结果的任何问题,都值得重新试用高阶统计量方法。也正因如此,利用高阶统计量从噪声环境中提取或恢复或增强谐波信号,是令研究人员十分感兴趣的领域。

国外学者提出的从高斯噪声中恢复或增强谐波的主要方法有:基于三阶累积量和四阶累积量的线性预测法^[78];基于复数过程的四阶累积量的线性预测法^[79];基于四阶混合累积量的非线性匹配方法^[80];基于高阶累积量的 MUSIC 谐波恢复算法^[81];基于四阶累积量的正交块自适应谱线增强(OBALE, Orthogonal Black Adaptive Line Enhancer)算法^[82,83];基于高阶累积量的格型预测块算法^[84]。

国内较早涉足这一领域的学者是清华大学的张贤达教授。他最先提出了从非高斯 ARMA 噪声中恢复谐波的混合方法,该方法将三阶累积量与相关分析法相结合,对谐波成分的数量和频率进行了估计^[85];利用基于预滤波的 ESPRIT 算法从非高斯 ARMA 噪声中提取了谐波信号^[86]。他在文献[87]中,介绍了将 MUSIC 方法直接从二阶统计量推广到四阶累积量的两种方法,从而获得从高斯有色噪声中恢复谐波的 MUSIC 方法。国内其他学者,在这方面所做的研究有:文献[88]提出了从未知协方差、未知分布的有色线性噪声中恢复谐波的算法。在这个算法中,假定非高斯噪声没有二次相位耦合的成分,通过累积量可获得非参数的噪声相关性估计或者通过 ARMA 建模获得带参数的非高斯噪声的 AR 多项式;通过色噪声预白化或预滤波技术,实现谐波恢复。文献[89]提出了利用高阶累积量从非高斯噪声和高斯 ARMA 噪声中恢复谐波的方法;文献[90]利用互四阶累积量的 Yule-Walker 方程,估计了正弦信号的参数。