

【引用格式】杜立彬, 王政凯, 吕志超, 等. 基于辐射噪声特征的舰船目标识别分类方法综述[J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6(5): 613-621.

基于辐射噪声特征的舰船目标识别分类方法综述

杜立彬, 王政凯, 吕志超*, 刘铭扬, 王磊

(山东科技大学 海洋科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要 通过舰船的辐射噪声对目标进行识别分类是水声领域的一个重要研究课题。综合介绍舰船辐射噪声数据获取途径、特征提取技术和目标识别技术。首先, 介绍了 4 种数据采集类型较为丰富的辐射噪声数据库。其次, 从线谱识别、小波分析和非线性特征提取技术 3 个方面介绍辐射噪声的特征提取技术。最后, 从支持向量机等传统分类识别技术和深度学习技术 2 个方向介绍辐射噪声领域的识别分类技术。较系统地总结了基于舰船辐射噪声的目标识别分类技术, 可以为舰船目标分类识别的研究提供参考。

关键词 舰船目标识别; 特征提取; 深度学习; 辐射噪声

中图分类号 TB56

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2023)05-0613-09

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2023.05.012

A Review of Ship Target Recognition and Classification Methods Based on Radiated Noise Features

DU Libin, WANG Zhengkai, LYU Zhichao*, LIU Mingyang, WANG Lei

(College of Ocean Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract Using ship radiated noise for target identification and classification is an important research topic in the field of underwater acoustics. This article provides a comprehensive overview of data acquisition methods and feature extraction techniques for ship radiated noise, as well as target recognition methods. Firstly, the article introduces four databases with abundant data types of radiated noise. Secondly, it presents feature extraction techniques for radiated noise, including line spectrum recognition, wavelet analysis, and sub-linear features. Finally, the article discusses target recognition and classification techniques in the field of radiated noise, covering traditional methods such as support vector machines and deep learning approaches. This article systematically summarizes classification techniques based on ship radiated noise, offering valuable insights for research on ship target classification and identification.

Key words ship target recognition; feature extraction; deep learning; radiated noise

0 引言

舰船目标的分类识别一直是水声工程中的热点问题, 在过去 20 多年里, 国内外众多学者对此进行了大量的研究。舰船目标的自动识别是舰船安全监测、海上反潜作战和舰船交通控制等方面的重

要课题。

使用舰船的辐射噪声进行识别分类是一类较新的舰船识别方法, 主要内容是利用舰船产生的辐射噪声信号, 提取出舰船目标特征, 并根据这些特征进行识别分类。舰船的辐射噪声主要包括其部件的机械振动噪声和推进器噪声, 两者所占的比例受

收稿日期: 2023-05-09

作者简介: 杜立彬 (1976-), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋观测与探测技术研究。

*通信作者: 吕志超 (1988-), 男, 博士, 讲师, 主要从事水声探测与水声通信方向研究。

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFC2808003, 2023YFE0201900); 青岛市自然科学基金资助项目“声学兼容下的水下无人平台水声通信技术研究” (23-2-1-100-zyyd-jch)。

舰船的速度、桨叶的速度等因素影响；另外还有空化现象产生的噪声，但其特征较难提取，很少用于舰船目标的识别。

本文总结舰船辐射噪声特征提取和目标识别技术的研究现状和发展趋势。首先介绍舰船目标分类识别的研究背景和意义，并概述了基于辐射噪声信号进行舰船目标分类识别的研究内容。然后介绍 4 种水声目标辐射噪声数据库，以供读者研究使用。在此基础上，总结了该领域发展较为成熟的辐射噪声特征提取方法。最后，对舰船目标的识别方法进行了阐述。随着深度学习的不断发展，舰船目标分类识别的研究也逐渐向着高效、准确、实时的方向发展。

1 水声目标辐射噪声数据库

研究舰船的辐射噪声特征离不开大量的实测数据作为支撑。因此，本节总结了一些水声目标辐射噪声数据库，供读者参考。

1.1 ShipsEar 舰船辐射噪声数据库

ShipsEar 数据库是一个专门采集舰船辐射噪声的数据库，该数据库包含 11 种舰船的数据和 1 组海洋环境噪声数据。数据采集地点位于西班牙的西北部海岸，数据采集时长在 15~600 s 不等，采集日期是 2012 年秋季至 2013 年夏季。采集方式是通过系泊在海底的水听器进行的，水听器连接到水下浮标以确保垂直状态，上端连接到水面浮标^[1]。

该数据库详细记录了每条数据的采集时间、采集位置信息、目标类型、舰船图片、水听器采集参数、采集环境数据等信息，为后续的数据处理和分析提供参考。图 1 为部分船型的实拍图，表 1 为 ShipsEar 数据库舰船目标类型总结。



图 1 ShipsEar 数据库中的部分船型实拍图
Fig. 1 Photos of some ship types in the ShipsEar database

表 1 ShipsEar 数据库总结
Table 1 Summary of ShipsEar database

船型	数据组个数	采集时长/s
挖泥船	5	262
渔船	4	510
摩托艇	13	1 008
采蚌船	5	726
自然环境	12	1 134
远洋班轮	7	938
客船	30	4 256
领航船	2	138
滚装船	5	1 512
帆船	4	404
拖网渔船	1	162
拖船	2	206
总计	90	11 256

1.2 Soundscape 声压级数据库

该数据库的数据主要采集于 2020 年 3 月–2021 年 6 月，数据采集区域较完整地覆盖了意大利到克罗地亚地区的海域。该项目记录的原始数据为声压数据，使用自主被动水听器记录数据，水听器设置为以 48 kHz 的采样率连续记录^[2]。开源网站上可供下载的数据为处理后的声压级数据，项目共布设了 9 个水听器，记录了该海域不同区域的水下声压级信息，记录格式为结构化 hdf5 文件。图 2 为该地区的水深分布图以及各个水听器的分布位置，表 2 表示的是各个水听器的放置深度。

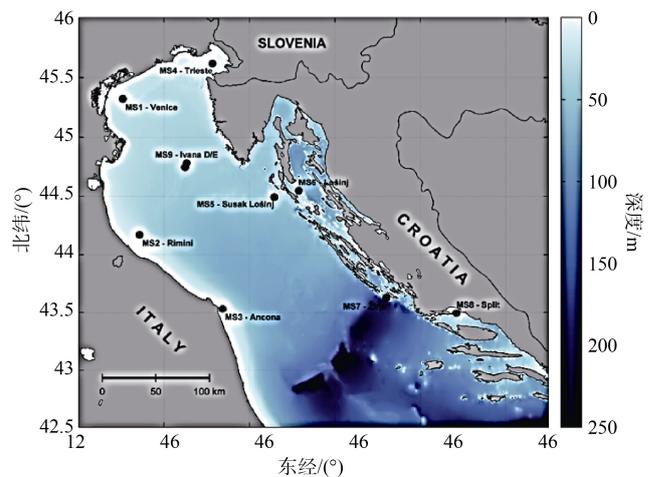


图 2 测量地区水深分布及各个水听器放置位置
Fig. 2 Water depth distribution and placement of hydrophone in survey area

表 2 各个水听器放置深度
Table 2 Placement depth of each hydrophone

编号	位置名称	布放深度/m
MS1	Aqua-Alta	16
MS2	Azalea	20
MS3	Ancona	15
MS4	Paloma	25
MS5	Susak	55
MS6	Losinj	35
MS7	Zirje	53
MS8	Split	42
MS9	Ivana	35

1.3 Noise Egg 设备采集的数据库

Noise Egg 是一种简易高效的可产生低频辐射噪声的设备, 为验证该装置的可靠性, 该实验团队采集了 6 组由该声源发出的辐射噪声, 并以 .wav 文件格式记录。

实验是在一个长 1 m、宽 0.5 m 的水箱中进行的, 以 40 kHz 的采样率对数据进行采样, 声源放置在水深 1 m 处, 共采集记录了 5 个声源的数据^[3]。图 3 为该实验声源和水听器的相对位置俯视图。该实验目的测试 Noise Egg 声源设备的性能所做的实验, 数据可以用于分析低频辐射噪声特性, 为低频噪声的研究提供参考。

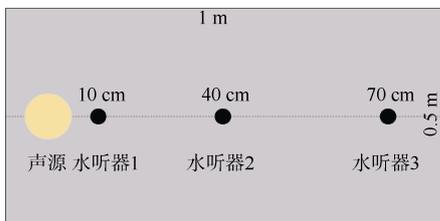


图 3 声源和水听器相对位置
Fig. 3 Relative position of each sound source and hydrophone

1.4 Watkins 海洋哺乳动物声学数据库

水下不仅存在舰船产生的辐射噪声, 还存在大量生物产生的噪声, 这些噪声是海洋环境噪声的重要组成部分, 研究生物辐射噪声对于海洋生物保护、海洋渔业资源开发和水声目标识别等方面具有重要的意义。

Watkins 海洋哺乳动物声学数据库是一个可在线免费下载的海洋哺乳动物噪声的数据库。数据库里有约 2 000 只海洋哺乳动物共计 15 000 多组噪声数据^[4]。该数据库主要采集区域集中在北美洲沿岸海域和南美洲南部海域, 时间跨度大、覆盖范围广, 可以较为全面地分析不同海洋生物的声学特征。图 4 为该数据库采集地点分布。



图 4 Watkins 声学数据库采集地点地理分布
Fig. 4 Geographic distribution of collection locations in Watkins acoustic database

为方便读者获取数据, 表 3 列出了上述 4 种数据库的网站链接和数据获取方式以供读者自行下载使用。

表 3 各数据库网站链接和获取方式
Table 3 Links and access methods to various database websites

数据库	网站链接	获取方式
ShipsEar	http://atlantic.uvigo.es/underwaternoise/	邮箱联系负责人
Soundscape	https://zenodo.org/record/6653258#.ZEPedvxByUI	网站直接下载
Noise Egg	https://datadryad.org/stash/dataset/doi:10.5061/dryad.sf0nn	网站直接下载
Watkins	http://www.who.edu/watkinsounds	网站直接下载

2 辐射噪声特征提取方法

水声信道非常复杂, 不仅有舰船的辐射噪声在

信道里传播, 还会存在其它干扰目标检测的噪声, 因此需要首先对原始信号进行降噪以提高信噪比。舰船辐射噪声是一种宽频带噪声, 其能量谱包含多

个频段的窄带的线性成分,因此线性成分的探测与提取在舰船辐射噪声的信号分析中起着重要作用。此外,使用小波理论分析舰船辐射噪声的特征同样是水下目标识别领域的重要研究内容。另外,随着非线性动力学的发展与完善,将其应用在舰船辐射噪声特征识别领域的工作也越来越多。

2.1 辐射噪声信号预处理技术

信号的预处理工作就是将信号中的噪音和杂波剔除提高信号的信噪比,这个过程称为滤波。

维纳于20世纪40年代提出了基于最小均方误差准则的最佳滤波方法。60年代卡尔曼提出了卡尔曼滤波器的基本原理,适用于对非平稳信号进行处理。然而,这2种方法均要求先验特征输入信号的统计特征,但这些统计特征通常为未知或可变的,因而不能满足优化滤波的要求。

自适应滤波器是一种在不需要先验知识的情况下,实现结构与参数的自动优化的方法。WIDROW^[5]等提出的自适应最小均方算法(Least Mean Square, LMS),促进了自适应滤波技术的发展。文献[6]根据WIDROW的自适应算法,提出一种用于声呐系统的自适应滤波技术,并成功地用于被动声呐目标检测,是国内较早将自适应滤波系统应用到水声领域的研究。文献[7]将LSM算法集成到硬件中,对原始水声信号进行滤波并获取到稳定的目标信号。文献[8]提出了基于小波阈值去噪的自适应滤波算法,结果显示辐射噪声信号明显增强。文献[9]提出了一种基于自适应相干抵消的舰船辐射噪声通信技术,将扩频信号和辐射噪声信号的分离。稀疏自适应滤波技术逐步被应用到水声信道自适应均衡中,基于稀疏LMS自适应滤波算法的自适应均衡也获得较多的研究^[10]。文献[11]将基于最小均方算法的自适应滤波技术引入研发的光纤水听器中,使得该水听器具备较高的灵敏度和信噪比。文献[12]针对强脉冲干扰,提出了一种基于切比雪夫不等式的自适应窗口中值滤波算法,有效抑制了脉冲干扰。

小波分析发展至今,已经被广泛应用于水下声学的研究中。文献[13]利用双树复解析小波变换对舰船的辐射噪声线谱进行小波分解。文献[14]通过变换阈值进行去噪,得到了最佳的信噪比和均方误差。文献[15]结合正余弦算法与粒子群算法,优化

变分模态分解的参数,利用小波阈值去噪得到目标信号,该方法在信噪比和均方误差2种指标里有着显著的优化效果。文献[16]研究了连续小波变换替代时频分解的效果,结果表明其优于时频分解。

2.2 辐射噪声线谱分析技术

线谱中的能量稳定集中,含有丰富的舰船螺旋桨的特征信息。目前,对于舰船辐射噪声线谱的研究主要集中在低频端的离散线谱方向。

文献[17]采用不同频率计算功率谱,分析舰船辐射噪声的功率谱信息,是较早将线谱提取技术应用到舰船辐射噪声领域的研究。文献[18]研究了水下目标辐射噪声的平稳化方法,提出了一种平稳化处理模型,提高了线谱分辨率。文献[19]利用线谱的时空特性研究舰船噪声目标线谱,实测数据表明该方法的有效性。文献[20]设计了一个干扰抑制门,降低了宽带噪声的影响,结果表明该方法能够有效地提取出舰船辐射噪声线谱特征。文献[21]利用线谱幅度、相位随时间低起伏特性提取线谱特征,有效地提高信号的信噪比。文献[22]利用线谱相干性和连续谱非相干性获取相干增益,提高了线谱的信噪比。

文献[23]利用低频分析记录谱(Low Frequency Analysis and Recording, LOFAR)与调制噪声包络检测(Detection of Envelope Modulation on Noise, DEMON)分析方法,对比分析了2种方式的优缺点,结果显示,DEMON谱能够显示辐射噪声信号的轴频信息。文献[24]和文献[25]在LOFAR频谱分析的基础上提出了一种优化算法,使其能够在检测线谱的同时对噪声信号进行识别。文献[26]通过自适应线谱增强器(Adaptive Line Enhancer, ALE)的线谱净化能力对线谱进行提取,实验结果显示该方法有效地提高信号的信噪比。文献[27]研究了二级ALE检测方法,提取了一级ALE信号,将其与原始延迟信号的差值进行分析,增强了低信噪比的信号分离能力。

文献[28]–[30]使用经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)方法提取舰船辐射噪声特征,将排列熵理论引入到目标噪声经过EMD分解后的模态分量中。文献[31]针对传统EMD分解后所产生的模态混叠问题,在原信号中加入了回

幅值、反相位的正负白噪声,并在分解后获得了平均,使用了一种完备总体经验模态分解方法,与此同时,还利用信号对称自相关原理,实现了低信噪比下的特征线谱提取。文献[32]及其他相关文献在对波动声场辐射噪声进行分析的基础上,提出通过波动相位差分对齐来实现对窄带线谱部分的相干探测,以增强其相位辨识能力。文献[33]利用线谱与宽带噪声之间的起伏相位差异和时间相关半径提取信号的线谱特征。

文献[34]中采用高阶累量双谱法分析舰船辐射噪声振幅调制成分,在提取过程中保持信号的相位信息,并将所提取到的包络谱组合起来,实现了周期调制信号的重建。文献[35]使用高阶累计量提取了舰船辐射噪声中的线谱,与常规的功率谱分析相比该方法具有更高的检测效率和抗干扰能力。文献[36]–[38]中均使用了高阶谱分析方法来提取舰船辐射噪声的特征,并得到了较好的实验效果。

2.3 小波分析技术

声呐信号是非平稳信号,但传统的傅立叶变换方法很难处理非平稳信号。小波变换优良的非平稳信号分析能力使得其在舰船辐射噪声特征提取领域取得了广泛应用。

文献[39]中运用小波多分辨分析的特点,对舰船辐射噪声的功率谱进行了提取。文献[40]采用了小波包分析的方法,将舰船辐射噪声在空间中分解,再用统计学的方法来获得各个频段中的能量分布,将实验结果和真实数据进行比较,证明了这种方法的合理性和有效性。文献[41]采用一种基于谐波小波变换的解析方法,可以将信号正交且无冗余地分解到独立的频段,取得了良好的辨识效果。文献[42]–[44]采用小波多子带技术对辐射噪声的调制谱进行了提取,并对各频段内能量更大的调制谱进行了重点研究。文献[45]运用 Mallat 快速算法将辐射噪声信号进行多尺度分解,然后提取各级小波的谱特征和波形结构特征。文献[46]使用小波分解技术,提取了舰船辐射噪声的多种特征,并使用主成分分析法进行降维,结合深度网络进行目标识别。文献[47]提出一种基于 Morlet 小波的带通滤波器与正交性的信号解调,将含有调制信息的小波成

分提取出来,再由 $1(1/2)$ 频谱分析获得舰船的轴向频率特征。文献[48]利用小波变换从去除噪声后的数据中提取舰船的线谱特征。文献[49]提出了一种以小波门限去噪为基础的改进算法,通过对原信号的小波分析将其分解,再采用一种改进的门限算法和一个小波门限函数来提取所得的小波系数的特征,最后通过重建新的小波系数来获得去噪后的信号。文献[50]提出了一种基于谐波小波分析的舰船噪声线谱探测方法,该小波基具有独特的箱形光谱,可以将信号直接分离到独立的波段,相对于传统的线谱提取方法,其在对线谱进行微弱提取方面具有显著的优越性。

2.4 非线性特征提取技术

随着混沌理论和非线性动力学的发展,舰船辐射噪声特征提取中也将其作为一个新的研究方向进行了研究。文献[51]采用 TAKENS 延迟法重建时变信号,使其在超维相空间中呈现出独特的空间几何特征。文献[52]中使用混沌和分形理论分析舰船噪声的非线性特征,为水下目标识别与处理提供了新的途径。文献[53]对混沌理论展开了研究,结果表明,当舰船辐射噪声最大 Lyapunov 指数有限且为正值时,辐射噪声呈现出显著的混沌特征。在这些特征中,自然测度与相关维数可以被有效的用来作为目标舰船分类识别参数。文献[54]中进一步分析了 Duffing 振子的混沌运动规律,完善了它的状态方程,并在此基础上提出了一种基于 Duffing 振子的舰船噪声线谱提取方法,并通过试验验证了其精度和分辨率。

3 基于舰船辐射噪声的识别方法

水声信号的自动识别与分类技术是实现水声装备智能化和自动化的重要手段,也是当今世界各国都十分关注的研究课题。

最初使用辐射噪声进行分类识别是通过受过训练的专业人员实现的。这种方法受限于人的主观因素影响,很容易出现误判的情况。随着信号处理技术的发展和机器学习的出现,出现了特征提取结合机器学习分类的方法,这种分类方法提高了识别效率,减少了主观因素的影响。近些年,随着深度

学习的发展,水声领域出现了很多使用深度学习对辐射噪声信号进行分类识别的研究。

3.1 传统舰船目标识别方法

传统的舰船目标识别方法主要可以分为基于人工的分类方法、基于统计学的分类方法和机器学习的分类方法。对于舰船目标的分类识别,最初是水声目标领域的专家通过自身经验对舰船进行识别^[55]。

基于统计分析的舰船目标识别方法主要有贝叶斯模式分类方法、聚类分析方法、支持向量机(Support Vector Machine, SVM)、决策树、近邻法、隐马尔可夫模型^[56]等。文献[57]运用贝叶斯方法,对辐射噪声作了最小均方误差估计和最大后验概率估计,为操作者的决策提供了一个参考。舰船桨叶产生的噪声是舰船辐射噪声的重要组成成分,文献[58]提取了舰船辐射噪声的 DEMON 谱,使用邻近样本分布加权的方法改进了 SVM,结果显示该方法适合对舰船辐射噪声 DEMON 谱的识别分类。文献[59]提取辐射噪声的 Gammatone 倒谱系数,使用多种机器学习的方法对目标进行分类识别,结果表明该特征提取方法适合于机器学习分类器。

文献[60]和文献[61]使用自适应子波神经网络和自适应高斯神经网络对舰船噪声进行分类,是国内较早使用神经网络对舰船辐射噪声进行分类的研究。文献[62]和文献[63]研究了舰船辐射噪声的分形特征和噪声谱 AR 模型特征,使用模糊神经网络对数据进行训练,分类效果明显提升。文献[64]以舰船辐射噪声的非平稳性为基础,将其非线性混沌特征量和多尺度小波能量特征提取出来,同时将 BP 神经网络用作分类器,对这 2 种参数展开分类,对文中不同的船型的正确识别率均超过了 80%。文献[65]将舰船辐射噪声的自适应成分权重(Adaptive Components Weighting, ACW)倒谱作为训练集,采用 BP 神经网络和支持向量机的方法进行机器学习。文献[66]建立了一种自适应小波网络分类器,识别性能和学习收敛速率都优于 BP 神经网络。

3.2 基于深度学习的舰船目标识别方法

深度学习的多层神经网络结构使得算法可以模仿人脑中的神经元来进行学习与预测,从而更好地处理与分析复杂数据。利用深度学习技术对舰船

辐射噪声进行识别是近年来一个热点问题。

在水声目标识别领域中,主要使用卷积神经网络、深度置信网络和长短时记忆网络对目标进行识别。文献[67]提取了舰船辐射噪声的频谱、梅尔倒谱系数,将提取的特征图像作为训练集,使用卷积神经网络进行识别,有效地提高了识别的正确率。文献[68]设计了一种根据信号时频特征进行特征提取的深度卷积神经网络,并利用深度卷积网络对提取出的特征信息进行目标识别,识别正确率显著提高。文献[69]使用卷积神经网络对信号进行特征识别,然后利用深度神经网络(Deep Neural Networks, DNN)进行目标的识别,分类效果显著提升。文献[70]直接使用卷积神经网络直接进行目标识别,使用信号提取的线谱和调制特征作为训练集,利用卷积神经网络对目标进行识别。文献[71]–[75]使用卷积神经网络,以 DEMON 谱、LOFAR 频谱图、常数 Q 变换技术提取的特征为训练集,对舰船进行分类。频谱图相较于图像来说更加复杂,如果单纯将频谱图作为特征进行卷积神经网络分类,会使分类出现问题。文献[76]通过提取梅尔倒谱系数,利用长-短时记忆网络,建立了一个基于长-短时记忆网络的辨识与分类模型。

4 展望

4.1 研究问题

舰船的辐射噪声在舰船目标识别中具有十分重要的作用,利用辐射噪声来进行舰船目标的识别的特点是隐蔽程度高,对于军事对抗来说具有重要意义。深度学习的应用使得舰船目标识别技术正逐步实现从人工到智能化的转变。综合分析文章内容,本节提出了几个当前舰船识别技术尚待深入探讨的问题。

1) 辐射噪声信号特征选择。随着现代信号处理技术的进步与发展,根据舰船辐射噪声提取的特征信息越来越多,成熟的深度神经网络同样很多,通过不同特征提取方法提取的特征参数,往往适用于特定的神经网络,因此,选取合适的特征提取方法并搭配合适的神经网络进行目标识别是研究者重点研究的问题。

2) 训练数据较为缺乏。深度学习是实现舰船目

标自动识别的关键技术。使用深度学习的重要条件就是需要大量的训练数据作支撑,尽管目前有大量的数据库可供使用,但这些数据库内容不同,目标类型和数据量也不同,使得深度学习在舰船目标识别领域的应用有一定的限制。近些年发展起来的迁移学习技术能够为相似目标的识别提供新的研究方向,而数据增广技术则可以增加相似数据的质量^[77]。

3) 训练模型适配问题。由于制造工艺、航行状态等的影响,即使是同一类型的舰船,辐射噪声也可能存在差异。为解决这一问题,可以通过迁移学习的方法解决数据不匹配情况下造成的识别错误。

4.2 发展方向

本文通过总结舰船辐射噪声识别的研究,总结了该领域的3个发展方向。

1) 智能化和自动化。舰船的辐射噪声数据采集相对比较容易,可以获取大量实测数据,仅靠人工进行识别比较困难,随着人工智能技术的飞速发展,其在舰船辐射噪声识别领域中的应用将成为一个较为热门的研究方向。

2) 多目标检测分类。现实中往往会存在多个目标信号混合干扰的情况,因此,多目标混合信号检测与识别是舰船辐射噪声识别的重要发展方向。

3) 微弱辐射噪声信号检测与识别。随着减振降噪技术和消声措施的技术进步,舰船的辐射噪声强度有了显著降低,辐射噪声在水声信道长距离传播再被接收后信号强度也会明显下降。因此,对于微弱舰船辐射噪声信号的检测与识别是远程水声目标探测的重要发展趋势。

5 结束语

舰船辐射噪声识别一直是水声目标识别领域的研究热点,该方向的研究还具有十分重要的国防意义。本文首先介绍了4个关于水声目标辐射噪声的数据库,以帮助读者研究参考使用。然后介绍了舰船辐射噪声的特征提取方法,总结了该领域常用的研究方法。最后,从传统识别和深度学习2个方面介绍了舰船目标识别的方法。综合文章内容来看,舰船辐射噪声的识别仍然是水声领域的研究热点和难点问题,希望本文能为广大研究人员的研究提供参考。

参考文献

- [1] SANTOS-DOMÍNGUEZ D, TORRES-GUIJARRO S, CARDENAL-LÓPEZ A, et al. ShipsEar: an underwater vessel noise database[J]. *Applied Acoustics*, 2016, 113: 64-69.
- [2] PETRIZZO A, BARBANTI A, BARFUCCI G, et al. First assessment of underwater sound levels in the Northern Adriatic Sea at the basin scale[J]. *Scientific Data*, 2023, 10 (1): 137.
- [3] JONG K, SCHULTE G, HEUBEL K U. The Noise Egg: a cheap and simple device to produce low-frequency underwater noise for laboratory and field experiments[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2016, 8 (2): 268-274.
- [4] SAYIGH L, DAHER M A, ALLEN J, et al. The Watkins Marine Mammal Sound Database: an online, freely accessible resource[C]// Fourth International Conference on the Effects of Noise on Aquatic Life. Dublin: Acoustical Society of America, 2016.
- [5] WIDROW B, GLOVER J R, MCCOOL J M, et al. Adaptive noise cancelling: principles and applications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1975, 63 (12): 1692-1716.
- [6] 蔡惠智,李启虎,孙增,等.自适应滤波技术在水声信号处理中的应用[J]. *应用声学*, 1993 (2): 14-18.
- [7] 荆博原,张国军,柳燕. MEMS水听器信号FPGA自适应滤波处理[J]. *仪表技术与传感器*, 2023 (2): 34-39.
- [8] 孙继鑫. 基于现代信号理论的舰船辐射噪声线谱增强研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [9] 郑乃华. 基于舰船辐射噪声的隐蔽水声通信技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [10] 秦臻. 稀疏自适应滤波技术及其在水声信道均衡中的应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [11] LUO Z H, DING S, TAN C, et al. Low-frequency fiber optic hydrophone based on ultra-weak fiber Bragg grating[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23 (11): 11635-11641.
- [12] TAN G, YAN S F, YANG B B. Impulsive noise suppression and concatenated code for OFDM underwater acoustic communications[C]// 2022 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). Xi'an: IEEE, 2022.
- [13] 侯铁双,相敬林,韩鹏. 基于信号小波系数层间关系的线谱信号去噪研究[J]. *兵工学报*, 2009, 30 (7): 935-939.
- [14] 刘洁. 基于去噪方法的智能水声信号识别技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.

- [15] 奥彦, 胡红萍, 白艳萍, 等. MEMS 矢量水听器的一种新的联合去噪算法[J]. 数学的实践与认识, 2021, 51 (2): 158-163.
- [16] RADEMAN M W, VERSFELD D J J, PREEZ J A. Soft-output signal detection for cetacean vocalizations using spectral entropy, K-means clustering and the continuous wavelet transform[J]. Ecological Informatics, 2023, 74: 101990.
- [17] 刘铭克. 频率分辨率对水噪声线谱分析的影响[J]. 舰船科学技术, 1994 (1): 31-34.
- [18] 杨德森, 吴一. 水下目标辐射噪声线谱的分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 1996, 17 (1): 38-44.
- [19] 李厚全, 韩树平. 噪声背景下目标线谱提取方法研究[J]. 声学技术, 2005 (1): 14-17.
- [20] 牛芳, 惠娟, 赵安邦. 干扰抑制门在线谱提取中的应用[J]. 振动与冲击, 2019, 38 (23): 253-258.
- [21] 张大伟, 章新华, 李前言, 等. 一种基于舰船辐射噪声起伏特性的线谱提取方法[J]. 舰船科学技术, 2015, 37 (10): 85-88.
- [22] ZHAO Z X, LI Q, XIA Z, et al. A single-hydrophone coherent-processing method for line-spectrum enhancement[J]. Remote Sensing, 2023, 15 (3): 659.
- [23] 熊紫英, 朱锡清. 基于 LOFAR 谱和 DEMON 谱特征的舰船辐射噪声研究[J]. 舰船力学, 2007 (2): 300-306.
- [24] COMON P, JUTTEN C. Handbook of blind source separation[M]. New York: Academic Press, 2010.
- [25] 陈敬军. 基于人工智能的线谱检测技术[J]. 舰船工程, 2004, 26 (3): 68-71.
- [26] 路晓磊, 兰丽茜. 自适应线谱增强器在舰船噪声提取中的应用[J]. 电声技术, 2015, 39 (9): 58-61.
- [27] 石敏, 徐裘, 岳剑平. 基于两级自适应线谱增强器的舰船辐射噪声线谱检测[J]. 舰船科学技术, 2012, 34 (8): 79-82.
- [28] URICK R J. Principles of underwater sound[M]. New York: Peninsula Publishing, 1983.
- [29] HSIEH N K, LIN W Y, YOUNG H T. High-speed spindle fault diagnosis with the empirical mode decomposition and multiscale entropy method[J]. Entropy, 2015, 17 (4): 2170-2183.
- [30] LI Y X, LI Y A, CHEN Z, et al. Feature extraction of ship-radiated noise based on permutation entropy of the intrinsic mode function with the highest energy[J]. Entropy, 2016, 18 (11): 393.
- [31] 李江乔. CEEMD 与蚁群算法在舰船目标识别中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [32] TUCKER J D, AZIMI-SADJADI M R. Coherence-based underwater target detection from multiple disparate sonar platforms[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2011, 36 (1): 37-51.
- [33] 解恺, 丁雪洁, 孙贵青, 等. 基于目标辐射噪声的信号起伏检测算法研究[J]. 电子与信息学报, 2013, 35 (4): 844-851.
- [34] 吴国清, 任锐, 陈耀明. 船辐射噪声高阶谱分析和标记图[J]. 声学学报, 1996 (1): 29-39.
- [35] 张贤达. 现代信号处理[M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [36] 陈凤林, 林正青, 彭圆, 等. 舰船辐射噪声的高阶统计量特征提取及特征压缩[J]. 应用声学, 2010, 29 (6): 466-470.
- [37] TACCONI G, TESEI A, REGAZZONI C S. A new HOS-based model for signal detection in non-Gaussian noise: an application to underwater acoustic communications[C]// Oceans 1995 MTS/IEEE. San Diego: IEEE, 2014.
- [38] 温旋旋. 基于高阶统计量的舰船辐射噪声包络特征提取[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [39] 赵建平. 水下目标信号的特征提取和瞬时参量估计的小波变换技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 1998.
- [40] 王梦璇. 基于小波包分解的舰船辐射噪声特征提取方法研究[J]. 电子设计工程, 2014, 22 (4): 81-83.
- [41] WANG L, MA Y L. Line-spectra extraction of ship-radiated noise based on harmonic wavelet[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 131 (4): 3507.
- [42] 王晶, 袁连喜, 孙绍武. 小波变换用于舰船辐射噪声调制信息检测[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004 (1): 53-57.
- [43] 程广涛, 戴卫国, 王易川, 等. 基于小波变换的舰船辐射噪声调制特征分析[J]. 火力与指挥控制, 2007 (5): 75-77, 101.
- [44] 姚昊然. 基于小波变换的舰船特征信号分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [45] 章新华, 王骥程, 林良骥. 基于小波变换的舰船辐射噪声特征提取[J]. 声学学报, 1997 (2): 139-144.
- [46] 吴承希, 王彪, 徐千驰, 等. 基于小波包分解和 PCA-Attention-LSTM 的舰船辐射噪声识别技术[J]. 声学技术, 2022, 41 (2): 264-273.
- [47] 赵冕, 宋玉龙, 郑威. 基于小波解调-1 (1/2) 维谱的舰船辐射噪声调制特征提取[J]. 舰船科学技术, 2019, 41 (15): 122-126.
- [48] 李玉潇, 刘纪元, 陈新华. 基于小波变换的舰船辐射噪声特征线谱检测[J]. 网络新媒体技术, 2016, 5(6): 56-60.
- [49] FANG Y C, HE Q Y, BAI L B, et al. A multi-target underwater acoustic signals denoising method based on

- wavelet[C]// 3rd International Conference on Electronics, Communications and Information Technology(CECIT). Sanya: IEEE, 2022.
- [50] WANG L, MA Y L. Line-spectra extraction of ship-radiated noise based on harmonic wavelet[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 131(4): 3507.
- [51] 陈向东, 宋爱国, 高翔. 基于相空间重构理论的舰船辐射噪声非线性特性研究[J]. 声学学报, 1999(1): 12-18.
- [52] 马国军, 曾庆军, 王菲. 混沌方法在舰船辐射噪声分析中的应用研究[J]. 华东舰船工业学院学报: 自然科学版, 2004(4): 7-10.
- [53] 杨玲, 郑思仪. 基于混沌理论的舰船辐射噪声特征提取[J]. 海军工程大学学报, 2014, 26(4): 50-54, 62.
- [54] ZHENG S Y, GUO H X, LI Y A, et al. A new method for detecting line spectrum of ship-radiated noise using duffing oscillator[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(14): 1906-1912.
- [55] MAKSYM J N, HAYASHI R M, 王云龙. 专家系统在水声中的应用[J]. 声学与电子工程, 1990(3): 39-45.
- [56] 杨宏晖, 徐光辉, 李俊豪, 等. 被动水下目标识别研究进展综述[J]. 无人系统技术, 2019, 2(4): 1-7.
- [57] 过武宏, 笪良龙. 基于贝叶斯方法的舰船辐射噪声估计[J]. 指挥控制与仿真, 2008, (3): 51-53.
- [58] 戴卫国, 张宗堂, 刘启军. 近邻样本分布加权 SVM 及在桨叶数识别中的应用[C]//中国声学学会水声学会 2015 年学术会议. 北京: 中国声学学会, 2015.
- [59] ZHANG W, WU Y Q, WANG D Z, et al. Underwater target feature extraction and classification based on Gammatone filter and machine learning[C]// 2018 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition(ICWAPR). Chengdu: IEEE, 2018.
- [60] 张艳宁, 孙进才, 孙玉兰, 等. 一种基于自适应子波神经网络的舰船噪声分类方法[J]. 西北工业大学学报, 1997(1): 126-130.
- [61] 张艳宁, 焦李成, 靳云姬, 等. 一种基于自适应高斯神经网络的舰船噪声分类方法[J]. 声学学报, 1998(4): 349-356.
- [62] 周越, 相敬林, 王海燕, 等. 舰船噪声的特征描述及其模糊分类方法的研究[J]. 数据采集与处理, 2000(2): 142-147.
- [63] 周越, 刘勋, 相敬林. 舰船辐射噪声的模糊神经网络分类[J]. 电子科学学刊, 2000(5): 723-728.
- [64] 赵犁丰, 宋洁, 姚玉玲, 等. 利用小波包分析和混沌特征提取进行舰船辐射噪声分类[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2004(6): 1036-1040.
- [65] 康春玉, 章新华, 苗坤. 基于 ACW 倒谱特征的舰船辐射噪声识别[C]//2007 年全国水声学学术会议. 北京: 中国声学学会, 2007.
- [66] 吕淑萍, 李强. 自适应小波网络在舰船噪声识别中的应用[J]. 舰船工程, 2004(2): 65-67.
- [67] 朱可卿, 田杰, 黄海宁, 等. 基于深度学习的舰船辐射噪声识别研究[J]. 应用声学, 2018, 37(2): 238-245.
- [68] 李俊豪, 杨宏晖. 用于水声目标信号时频特征提取与识别的深度卷积神经网络[J]. 无人系统技术, 2019, 2(4): 26-30.
- [69] 卢安安. 基于深度学习方法的水下声音目标识别研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [70] 程锦盛, 杜选民, 曾赛. 采用深度学习方法的水下目标听觉特征提取与识别技术研究[C]//2018 年全国声学大会. 北京: 中国声学学会, 2018.
- [71] LU J, SONG S, HU Z, et al. Fundamental frequency detection of underwater acoustic target using DEMON spectrum and CNN network[C]// 3rd International Conference on Unmanned Systems (ICUS). Harbin: IEEE, 2020.
- [72] CAO X, TOGNERI R, ZHANG X M, et al. Convolutional neural network with second-order pooling for underwater target classification[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, (8): 1.
- [73] WU H, SONG Q Z, JIN G H. Deep learning based framework for underwater acoustic signal recognition and classification[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Artificial Intelligence. New York: Association for Computing Machinery, 2018.
- [74] HAO Y, ZANG L L, WANG D Z, et al. The classification of underwater acoustic targets based on deep learning methods[C]// 2nd International Conference on Control, Automation and Artificial Intelligence(CAAI2017). Sanya: Atlantis Press, 2017.
- [75] CINELLI L P, CHAVES G S, LIMA M. Vessel classification through convolutional neural networks using passive sonar spectrogram images[EB/OL]. [2018-10-14]. https://www.researchgate.net/publication/332158639_Vessel_Classification_through_Convolutional_Neural_Networks_using_Passive_Sonar_Spectrogram_Images.
- [76] 张少康, 田德艳. 水下声目标的梅尔倒谱系数智能分类方法[J]. 应用声学, 2019, 38(2): 267-272.
- [77] 徐及, 黄兆琼, 李琛, 等. 深度学习在水下目标被动识别中的应用进展[J]. 信号处理, 2019, 35(9): 1460-1475.

(责任编辑: 张曼莉)