

海洋环境噪声研究发展概述及应用前景*

郭新毅[†] 李凡 铁广朋 马力

(中国科学院声学研究所 中国科学院水声环境特性重点实验室 北京 100190)

2014-07-15收到

[†] email: guoxinyi@mail.ioa.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20141103

Overview of ocean ambient noise and application prospects

GUO Xin-Yi[†] LI Fan TIE Guang-Peng MA Li

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Environment, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

摘要 海洋环境噪声是海洋声场的背景场,通常被当作干扰项。在传统的水声学 and 海洋声学中,对海洋环境噪声的研究目的大多是为了降低或抑制环境噪声对水下设备的干扰,提高水下设备的性能和作用距离。目前,许多国家纷纷投入力量,开展海洋环境噪声数据获取、分析及噪声场建模工作。从另一个角度考虑,海洋环境噪声是海洋中永恒存在的声场,包含了水体及海底海面等环境特性信息。因此,可利用海洋环境噪声来研究海洋环境物理特性,通过低代价换取丰富的海洋声学信息。若能对海洋环境噪声的宽频带和任意时间存在的特性加以利用,则可以从海洋环境噪声中提取出相关的海洋环境参数。

关键词 海洋环境噪声, 海洋环境参数, 环境噪声应用

Abstract Ocean ambient noise is usually considered as an interfering background factor. In traditional underwater acoustics, research has mainly focused on the reduction and restriction of ambient noise interference in underwater devices in order to enhance device performance and detection range. For this purpose, many countries have invested a lot of manpower and material resources to collect and analyze data and propose models of the ambient noise field. On the other hand, this noise is ever present in the ocean, and includes a great deal of environmental information concerning the hydrology, sea surface and seabed. Consequently, ocean ambient noise may be used to study the physical characteristics of the ocean, as well as to obtain a high yield of useful ocean acoustical information at low cost. By exploiting the wide frequency band and perpetual ambient noise, we may extract many ocean environment parameters.

Keywords ocean ambient noise, ocean environment parameters, ambient noise applications

* 国家自然科学基金(批准号: 11304342)资助项目

1 海洋环境噪声研究的目的、意义和研究范围

海洋环境噪声场是海洋环境中普遍存在而又不期望出现的背景声场。它是由风浪、降雨、航船、海洋生物、人类工业活动等因素产生的,是主、被动声纳的主要声学背景干扰,也是潜艇在海洋中实现声隐蔽的主要背景。海洋环境噪声会对声纳装备的探测形成干扰,是限制主、被动声纳工作性能发挥的主要因素之一,另外它也是潜艇进行声隐蔽的重要条件和必须了解的物理参数。对声纳设备的研制和使用来说,只有对海洋环境噪声特性进行充分的调查和分析,深刻认识海洋环境噪声的时-空-频域特性,才能正确评价声纳装备的性能,提高水下设备的性能和作用距离,这是传统的水声学 and 海洋声学对海洋环境噪声的研究范畴。从另一个角度考虑,海洋环境噪声是海洋中永恒存在的声场,包含了声信道中水体及海底、海面等环境特性信息,如何利用海洋环境噪声物理特性对海洋环境参数进行反演获取,也引起众多研究者的关注。

目前,国外海洋环境噪声特性研究内容主要包括各频段海洋环境噪声获取技术,海洋环境噪声建模及预报,噪声模型实验校验,以及环境噪声特性表征方法研究等,其中特别关注全球浅海敏感海域的海洋环境噪声特性研究。文章将分别介绍国内外海洋环境噪声获取、分析以及物理特性研究等方面的前沿成果,介绍如何利用海洋环境噪声来获取海洋物理参数的具体实例。

2 海洋环境噪声测量技术与数据的收集和分析

世界各军事强国历来重视海洋环境及水声学数据收集,美国国防部已经逐步建立了全球化的海洋/水声学环境数据库及海洋水文、气象预报体系。在海洋环境噪声测量方面,美国和欧洲国家采用浮标、潜标、沉底等各种手段,常年观测太

平洋、大西洋、印度洋、北冰洋海域的海洋环境噪声。例如,美国的海军声监测系统(SOSUS)长期在固定地点进行环境噪声测量,采集了1963年至1965年的环境噪声数据(Wenz曲线的原始数据)和1994年至2001年的环境噪声数据(噪声原始信号)。近几年来,随着冲突热点地区的变化,近海岸的浅海海域环境噪声研究工作已成为主流趋势,结合海洋物理过程变化的研究和声纳系统向低频段发展的需要,复杂环境下海洋环境噪声测量以及低频海洋环境噪声测量工作也越来越受到重视。Fredricks等人^[1]在研究海洋环境噪声传播过程的同时,也研究了海洋内潮(即周期内波)对环境噪声强度起伏的影响,讨论复杂水体环境对海洋环境噪声测量的影响。印度的Ramji和Ramakrishnan^[2]利用浮标系统对浅海环境噪声进行测量和分析,主要研究100 Hz—4 kHz噪声功率谱级的时间起伏特性,该浮标同时可以测量风速和降雨数据,可实现海洋环境噪声和海洋环境要素的同步测量。

中国近海(特别是台湾周边海域)是美国和台湾当局特别关注的重点区域。近年来,美国采取各种措施调查收集我国近海和西北太平洋的各种水声和海洋环境资料。从1996年至2001年,美国在我国北黄海、东中国海和南中国海先后公开进行了四次大型综合海上实验,其中包括复杂水声环境条件下的环境监测、传播、混响、噪声测量等实验内容,获得了包括卫星同步遥感资料在内的大量实验数据。尤其是2001年美国联合台湾地区以及我国周边国家举行的南中国海(实验位置如图1所示)实验,不仅布放的传感器种类与数量多,而且进行为期三周的长时间连续观测,获得了大量的海洋环境噪声和海洋环境参数数据。通过这次实验,台湾中山大学的魏瑞昌^[3]总结了南中国海环境噪声数据分析结果,包括噪声随深度的变化,噪声指向性的时间特性等,并分析了海洋环境要素的变化对环境噪声特性的影响。刘志升^[4]分析了南中国海50 Hz低频海洋环境噪声统计规律,而林柏沧^[5]则分析了南中国海低频环境噪声垂直指向性等。在掌握实测资料的同时,美国

已开始专门预报中国近海水下噪声场及海洋环境要素等与军事活动密切相关的海洋要素，开发了我国近海海域海洋环境预报模型，对我国的海上安全构成了严重威胁。

由于海洋环境噪声具有很强的随机性，其统计特性分析一直是海洋环境噪声研究的重点。文献[6]中指出，风产生的海洋环境噪声级的概率分布符合正态分布规律，并给出了1 kHz海洋环境噪声级统计结果。本文以我国近海某次海试记录的海洋环境噪声数据处理和分析结果为例，分析从100—2000 Hz中9个频段的海洋环境噪声级的概率分布，如图1所示。

图1中直方图代表的是实验中各频段海洋环境噪声级的概率分布，实线是与此对应的近似概率分布曲线。明显的规律是，1000 Hz以下的环境噪声级概率分布接近自由度为5—8的 χ^2 分

布，而1000 Hz以上的环境噪声级概率分布接近正态分布。出现这种现象的原因是，在1000 Hz以下的海洋环境噪声中，航船噪声成分不可忽视。测量时间内的航船噪声时空变化特性决定了环境噪声级非正态分布。1000 Hz以上的环境噪声符合正态分布，是由于这一频段的海洋环境噪声主要由海面风所引起。测量时间段风速较小，变化平稳，所产生的海洋环境噪声强度接近正态分布，这一结果与文献[6]中的分析结果类似。

3 不同条件下的海洋环境噪声快速预报

采用海洋环境噪声模型可以对不同条件下的噪声特性进行快速预报。海洋环境噪声模型是在噪声源研究基础上结合波导声传播特性发展起来的，其发展历程如下：Cron和Sherman^[7]最早于

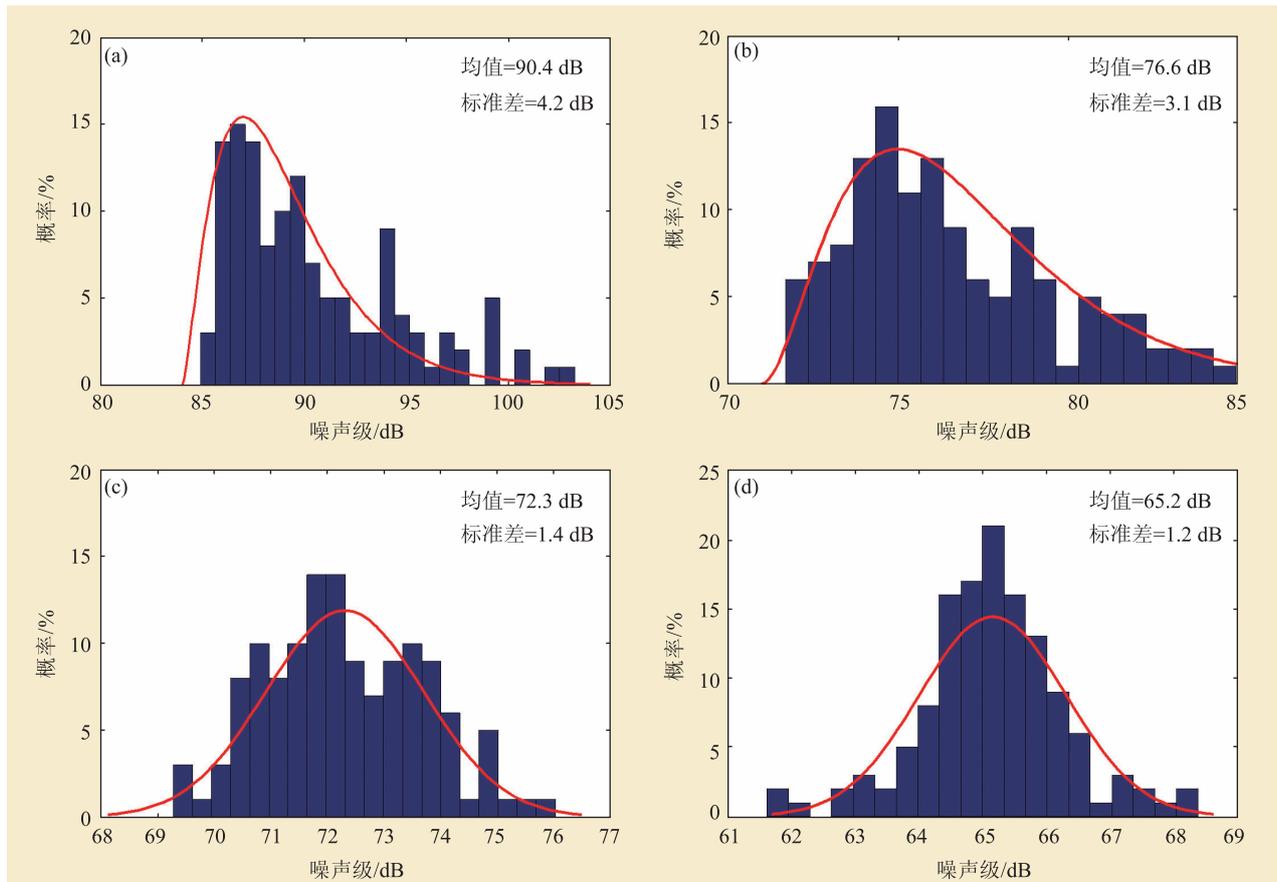


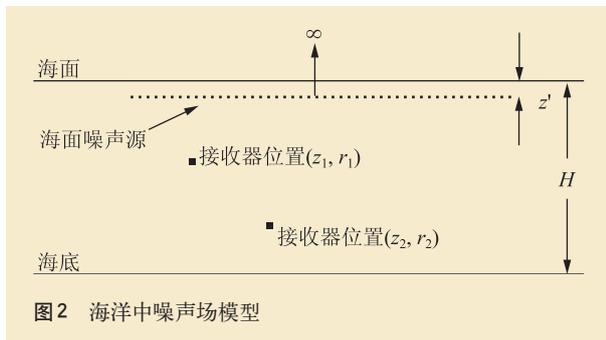
图1 不同频段海洋环境噪声概率分布(直方图为测量数据统计结果，实线为对应的概率分布曲线) (a)100 Hz环境噪声级概率分布，接近自由度为5的 χ^2 分布；(b)500 Hz环境噪声级概率分布，接近自由度为6的 χ^2 分布；(c)1000 Hz环境噪声级概率分布，接近正态分布；(d)2000 Hz环境噪声级概率分布，接近正态分布

上世纪60年代初开始了环境噪声理论模型的研究,该模型假设分布在海表面的噪声源具有 $\cos^m\alpha$ (通常 $m=1$ 或 2)的指向性,采用的传播模型较为简单,没有考虑边界影响,只适合深海情形,得到的环境噪声空间相关特性(无论是水平相关还是垂直相关)都仅与接收水听器间距有关,而与垂直深度无关;Liggett和Jacobson采用波动理论研究了半无限深海洋中的噪声传播理论,并假设深海中的噪声场是不相关平面波的叠加,得到了噪声场协方差与噪声指向性的关系式;Chapman^[8, 9]对Cron/Sherman噪声模型中使用的传播模型进行了扩展,考虑了海底反射的影响,推导出以仰角为函数的噪声强度公式;Talham和Stockhausen^[10]考虑了海底和声速剖面的影响,计入海水的体积吸收以及海面 and 海底的反射,研究了噪声场的垂直指向性;Stockhausen采用了数值方法,把噪声场的指向性转化为复相关系数;Plaisant用射线理论描述了表面源层到接收水听器的传播过程,考虑了体积衰减、海底损失和变化的声速剖面的影响,模型结果和垂直阵的测量结果在500 Hz以上符合得较好;Kuperman和Ingenito^[11]假设具有一定强度和相关性的单极子源随机均匀地分布在海面以下无穷大平面上,利用波动理论推导出了分层海洋中噪声场空间相关函数,求出了从每个源点到接收点传播方程的完整解,模型包括离散简正波和连续谱的贡献,共同构成浅海的噪声场,获得了垂直方向的非均匀噪声场;Buckingham^[12]针对等声速剖面的特殊情况,用在浅海“低损失”声道中传播的离散简正波得到噪声场的垂直相关系数和阵增益的表达式;Hamson^[13, 14]考虑了复杂的噪声源情形,探讨了源指向性对噪声场的影响,进一步指出环境噪声的垂直指向性取决于噪声源的性质,海底的性质,以及声速剖面 and 阵在水层中的位置;Carey等人^[15-17]将抛物方程传播模型与海面噪声源耦合起来,计算与距离有关的海洋环境(即水平非均匀海洋环境)中噪声场的垂直分布,Carey还利用该模型模拟了大陆架噪声和深海噪声各自对深海观测站的贡献(尽管噪声场的抛物方程模型只适合远场条件,而且进行了海

洋环境模型的柱面对称简化假设,但考虑到抛物近似算法在水平非均匀环境声场计算能力和准确度方面的优势,该噪声模型仍然显示出了良好的前景);Perkins和Kuperman等人^[18]把波动声学模型从理论上推广到三维的情况,但是三维声场的传播问题至今没有快速的计算方法,用波动方法预报三维海洋环境噪声场在目前仍有一定的困难;上世纪90年代中期,英国的Harrison^[19]提出了射线声学模型(CANARY模型),这个模型把Buckingham在等声速波导中得到的结论应用到一般的非均匀剖面情况,发展了经典的射线声学方法,考虑了海洋信道的各种影响,如声速分布,海面 and 海底反射,以及介质的吸收等,可计算噪声强度、垂直指向性和阵响应,这个噪声模型的优点是计算速度快,可以推广到随距离有变化的三维情形以及非均匀源分布的情况(但由于射线理论对计算低频远场的局限性和Buckingham结论的局限性,它的准确程度还需进一步检验);美国的RANDI(research ambient noise directionary mode)^[20]模型可用于计算选定海洋环境下的低频(10—500 Hz)环境噪声的垂直指向性和水平指向性。该模型是用快速场程序(fast field program, FFP)计算连续谱的贡献,用简正波程序SUPERSNAP计算离散简正波贡献,模型预报结果得到了地中海实验测量结果的验证。以上模型是针对不同的海区、频段以及不同的假设条件建立的,在使用过程中应正确选择,以达到计算时间和精度的优化结果。

4 海洋环境噪声特性在波导环境参数获取中的应用

目前,声波是唯一可以在水中远距离传输信息的载体,声信号在传输过程中受海洋波导特性即海洋环境参数影响,这些环境参数(如水层中的温度、盐度以及密度剖面,海底和海面的声反射系数等)直接影响声场在波导中的传递函数。通常按照水声学实验和装备的工作模式,可以分为主动探测和被动探测两种,主动



探测有人为制造的发射声源，利用其发射信号进行声学及环境特性研究，而被动探测则不存在主动发射信号，直接采集背景噪声或水中目标辐射噪声信号。如前文所述，海洋环境噪声携带了丰富的海洋环境信息，通过挖掘海洋环境噪声物理特性，可以从中提取出与噪声相关度较高的环境信息。目前发展较好的是利用海洋环境噪声被动获取海洋信道传递函数的方法，并以此为基础开展被动获取海底深度以及海底沉积层厚度等重要环境参数的研究。这种方法需要从众多海洋表面噪声源中突显出能够使空间分离的两个声学接收端产生的同相位响应的(互相关函数时域相位一致)噪声源。因此，海洋环境噪声模型应把满足以下假设作为前提：

(1)海洋环境噪声源主要由海面连续源产生(即由风浪产生的噪声源)，位于海面以下固定深度，水平方向以接收点为中心对称均匀分布；

(2)噪声源之间时空独立，单个噪声源特性满足平稳随机过程；

(3)噪声源频谱为白色噪声；

(4)在噪声场相关函数分析时间内，海洋波导环境为稳态过程。

4.1 简单波导情况下波导纵向传递函数被动获取方法仿真分析

图2所示为海面均匀分布的噪声源(深度为 z')对两个不同接收位置产生的海洋环境噪声模型，海深为 H ，波导上边界(海面)为压力释放表面， ∞ 表示半无限大真空空间，下边界(海底)为半无限空间硬质基底层。

图3是4种简单波导环境纵向传递函数(即沿深度方向的波导传递函数)。计算选用16个水听器，每个水听器间隔1.5 m，最上面的水听器距海面7.76 m，最下面的水听器距海面30.26 m，海深34 m，噪声源位于海面下0.1 m，水中声速为1500 m/s。

从图3可以看出，噪声场相关被动获取的传递函数时域结果与相应波导中声场的传递函数结果一致，自由空间(图3(a))和只有海面反射(图3(b))的情况基本相同，不同之处是声源的形式，前者是单极子声源(该声场的振幅和相位在球形辐射面上的每一个点都是相同的)，而后者是偶极子

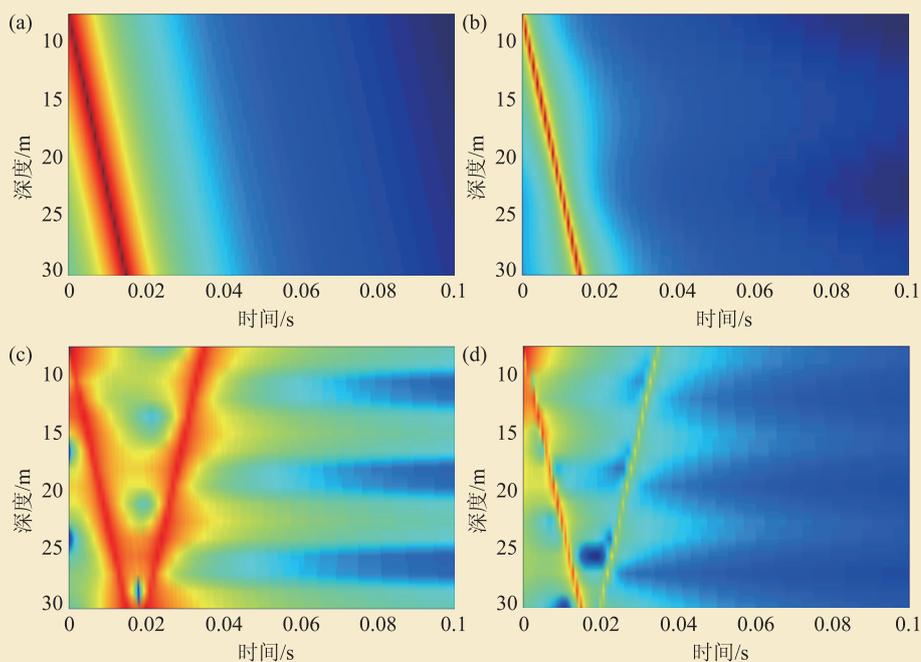


图3 4种简单波导的纵向传递函数时域形式 (a)自由空间；(b)只有海面反射；(c)只有海底反射；(d)同时考虑海面和海底反射

声源(由两个间隔很近且振幅相同、相位相反的单极子声源构成,在二维空间中呈现出8字形辐射方向)。图3(c)和图3(d)两图也有类似情况,海底反射均产生了一条反射的声线,不同的是,图3(c)是由单极子声源发射,图3(d)是由偶极子声源发射。

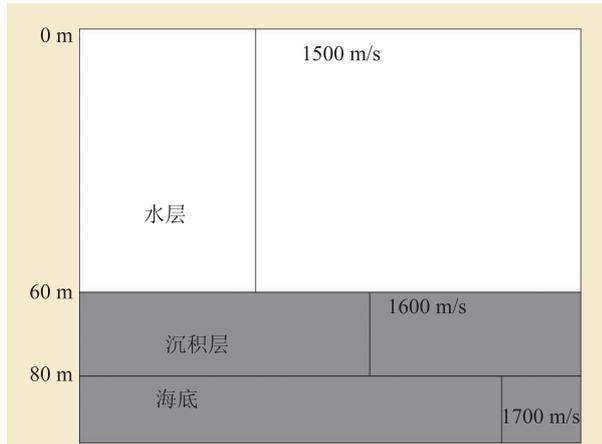


图4 模拟仿真海洋环境

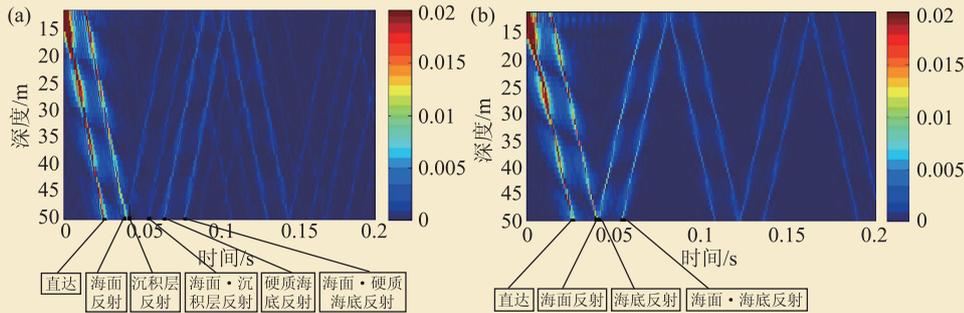


图5 有、无海底分层的垂直阵噪声互相关函数时域结果 (a)有海底分层(分两层,即沉积层和沉积层下面的硬质海底层)结果;(b)无海底分层结果

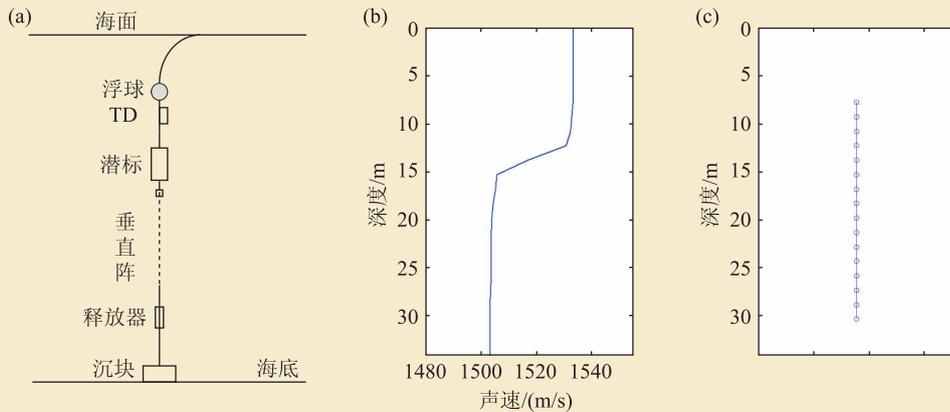


图6 (a)垂直阵海中布放;(b)实验海域声速剖面;(c)垂直阵在水体层中的位置

上面分析的是只含海水层且声速剖面不变的简单海洋波导情况。对于实际的海洋环境,海底参数会对声传播产生很明显的影 响,海洋波导不能简单地考虑为只含水层情况,而非等声速水环境也是造成水下声场复杂多变的重要因素。

4.2 复杂波导情况下波导纵向传递函数被动获取方法仿真分析

在复杂波导情况下,波导纵向传递函数的被动获取方法首先是利用垂直水听器阵列(简称垂直阵,是由水听器按一定空间间距构成的线形传感器阵列)作为海洋环境噪声记录载体,然后以垂直阵顶端水听器作为参考位置,其他水听器单元接收到的噪声数据分别与参考位置接收到的噪声数据做互相关运算,并利用噪声场互相关函数时域结果获得波导的传递函数。经过理论推导可知,噪声场空间相关函数的时间导数与波导传递函数

之间存在正比关系,因此,波导纵向传递函数被动获取的过程,相当于在参考位置存在一个声源,其发射的声波沿垂直阵方向传播并被其他水听器单元接收到的过程。仿真过程如下:

构建一个按不同声速分层的海洋环境,即海深60 m,声速1500 m/s,阵元位于水深10—50 m处,阵元间距为2 m。图4为仿真海洋环境的剖面图,水中声速1500 m/s,在存在沉积层的例子中,沉积层厚度20 m,沉积层声速1600 m/s。在

沉积层下面是声速为1700 m/s的硬质基底层(厚度为无限大);在不存在沉积层的例子中,水层下面即为硬质基底层。

下面讨论沉积层的存在对海洋波导环境下噪声场纵向相关函数时域结果的影响。

对比图5(a)与图5(b)可以发现,有海底分层的互相关函数时域结果多出两条反射条纹,分别代表沉积层下的硬质海底层反射路线以及海面反射加沉积层下硬质海底层反射路线等两种情况,图5(a)中硬质海底与沉积层反射时延为声波在沉积层中传播时间的两倍,因此从理论上可以看出这种方法在海底分层特性研究中具有一定的应用价值。

4.3 我国某海域垂直阵实测数据分析

在某海域实验中采用潜标垂直阵系统作为环境噪声信号接收设备,垂直阵系统在海水中的布放姿态如图6(a)所示,实验海域的声速剖面如图6(b)所示,图6(c)为垂直阵在水层中位置,垂直阵共16个水听器单元,水听器间隔1.5 m,第一个水听器距海面7.76 m,海深34 m。海底参数通过主动信号反演获得。

实验目的是研究海底沉积层结构与海洋环境噪声垂直相关的关系,因此沉积层厚度、声速和衰减是重点关注的对象。表1为通过地声参数反演获得的海底参数结果,包括沉积层厚度、沉积层声速、密度和衰减。在海图中也将实验海域定为泥沙底,因此反演初始值可采用文献[21]中所介绍的海底参数。

由于实际海洋表面声源并不是均匀的,存在很多非平稳部分,因此处理噪声数据时间的长短决定了非平稳噪声对相关结果的影响大小。海洋表面噪声源非平稳部分大多为短时声源,在较长记录时间相关之后,非平稳部分噪声影响减弱。图7为实际信号噪声垂直相关互相关函数导数计算结果,可以较为清晰地看出海底沉积层和硬质海底的反射。图7中的直达路径条纹与海底反射路径条纹在垂直阵底端的时间差,即为声

表1 地声参数反演获得的海底参数结果

参数	下限	上限	初始值	反演值
声速(m/s)	1560	1700	1668	1667.11
密度(g/cm ³)	1.5	1.9	1.806	1.7685
衰减(dB/λ)	0.1	0.9	0.3114	0.6871
厚度(m)	1.0	50.00	20.0	11.32

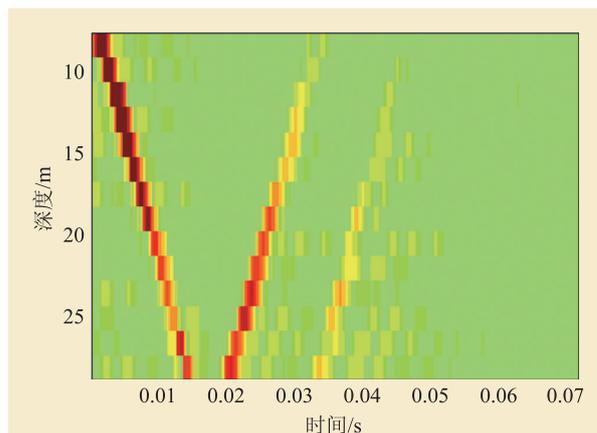


图7 15分钟噪声垂直相关互相关函数导数

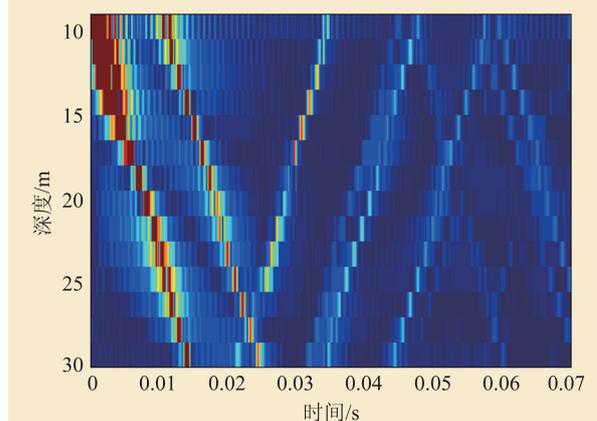


图8 仿真获得互相关函数导数

波在垂直阵最后一个阵元位置与海底之间传播时间的两倍,在已知声速情况下,可推测海洋深度,这就实现了被动获取海底深度和分层厚度的方法。

通过设置与实验相同环境参数得到的仿真结果如图8所示,实验数据处理结果并没有得到海面反射条纹,沉积层反射条纹与沉积层下的硬质海底反射条纹与仿真结果较为接近。图9为实验与仿真过程垂直阵第10号水听器与1号水听器互相关函数导数比较,仿真环境的海底参数采用主

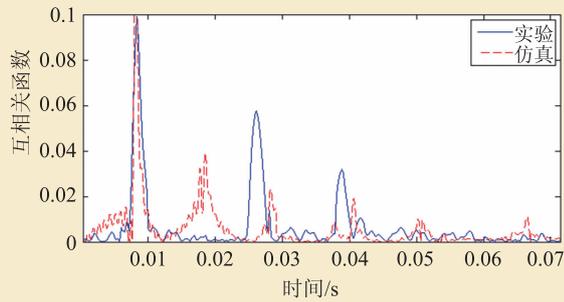


图9 实验与仿真过程10号与1号阵元相关函数导数比较

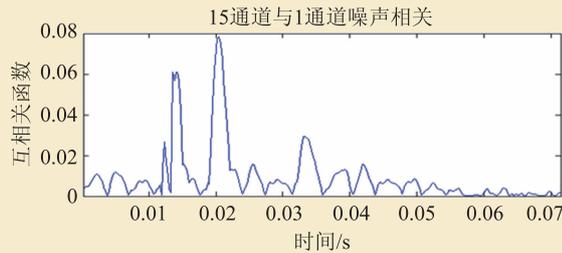
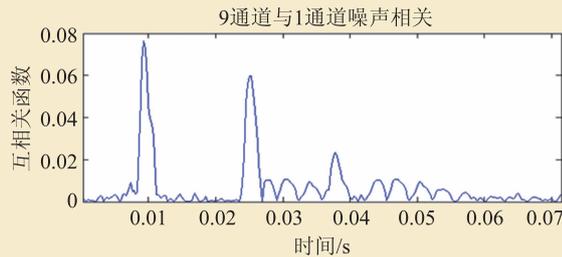
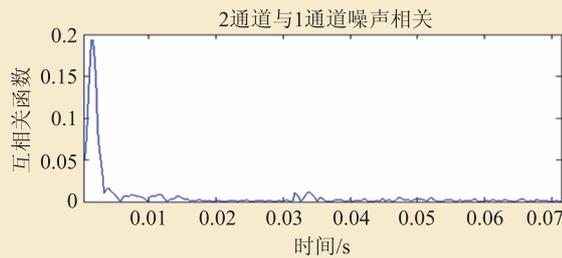


图10 第2, 9, 15号水听器噪声与1号水听器噪声相关结果

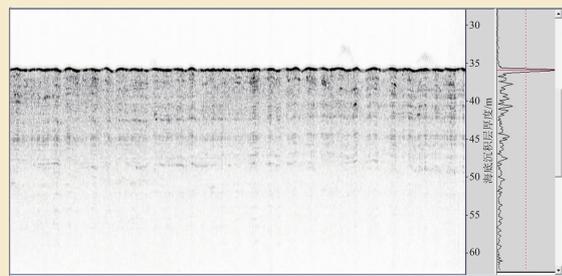


图11 实验海域浅层剖面仪测量结果

动声源反演结果(见表1), 经过海底反射的到达时间存在较小误差。

图10分别为垂直阵2, 9, 15通道与1通道噪

声互相关函数导数, 9通道与15通道中的3个较为明显的峰依次代表直达路径、沉积层反射路径和硬质海底反射路径, 可以根据第二、第三个峰值的时间差来获取沉积层的厚度。

从图7和图10中得到海底与硬质海底之间沉积层中声波的传播时间约为0.013 s, 根据前面表1中主动方式反演获得的海底沉积层声速, 获取海底沉积层的厚度, 得到的结果是10.75 m, 与表1中主动声源反演的11.32 m差0.57 m, 与主动反演结果比较接近。

另外, 在同一海域的其他实验中, 利用浅层剖面仪对海底进行测量, 图11为实验海域浅层剖面仪测量结果, 可以看出, 海底存在沉积层厚度在10—15 m左右, 与反演结果接近。

5 结束语和展望

文章首先回顾了海洋环境噪声研究发展历史, 分别介绍了海洋环境噪声测量、特性分析以及建模表征等方面的研究成果。重点介绍了目前海洋环境噪声物理特性应用的成果——信道传递函数被动获取方法, 以及在实际海洋环境下的实验结果。研究表明, 这种被动测量方法明显有别于其他的海洋声传播和信道特性研究方法, 在信道参数估计、海底分层特性、阵型自修正以及波导时空变化等研究方面具有一定的应用前景, 为有效利用海洋环境噪声提供了一种新途径。

海洋环境噪声研究虽然起步较早, 但是由于其具有时一空一频随机特性, 且全频带范围皆存在, 因此人们所掌握的海洋环境噪声特性仅为冰山一角。随着水声物理和水声装备研究的进展, 对海洋环境噪声研究也提出了越来越多的需求, 研究频段逐渐向低频发展, 噪声特性及建模逐渐精细化。另外, 随着海洋环境噪声特性研究的进步, 研究者们也开始将噪声当做“有用”的信号来研究, 并取得一定成果。因此, 未来海洋环境噪声研究一定会伴随着人类对海洋的开发利用越来越受到关注。

参考文献

- [1] Fredricks A, Colosi J A, Lynch J F *et al.* J. Acoust. Soc. Amer., 2005, 117(3): 1038
- [2] Ramji S, Ramakrishanan S, Latha G. Analysis of Short Term Temporal Fluctuations in Noise Power Spectrum of Shallow Water Ambient Noise. In: Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies. Tokyo, 2007. 17-21
- [3] Ruey-Chang W, Chi-Fang C, Newhall A E *et al.* IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(4): 1308
- [4] 林柏沧. 亚洲海域国际声学南海实验之低频环境噪音垂直方向性分析. 台湾中山大学硕士论文
- [5] 刘志升. 南海低频环境噪音之分析. 台湾中山大学硕士论文
- [6] Hsiang-Chih C, Chi-Fang C, Ruey-Chang W. Analysis of the Significantly Statistical Duration to Clarify the Uncertainty of Ambient Noises Due to Environmental Changes. OCEANS 2008 MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean, 1-5
- [7] Cron B F, Sherman C H. J. Acoust. Soc. Amer., 1962, 34(11): 1732
- [8] Chapman D M F. J. Acoust. Soc. Amer., 1989, 85(2): 648
- [9] Chapman N R. J. Acoust. Soc. Amer., 1983, 73(6): 1979
- [10] Talham R J. J. Acoust. Soc. Amer., 1964, 36(8): 1541
- [11] Kuperman W A, Ingenito F. J. Acoust. Soc. Amer., 1980, 67(6): 1988
- [12] Buckingham M J, Jones S A S. J. Acoust. Soc. Amer., 1987, 81(4): 938
- [13] Hamson R M. Appl. Acoust., 1997, 51(3): 251
- [14] Hamson R M. An Ambient-noise Model That Includes Coherent Hydrophone Summation for Sonar System Performance in Shallow Water. SACLANT ASW Res.Ctr., Rept SR-70, 1988
- [15] Carey W M. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1990, 15(4): 324
- [16] Carey W M. J. Acoust. Soc. Amer., 1986, 80(5): 1523
- [17] Carey W M. J. Acoust. Soc. Amer., 1987, 82(1): S63
- [18] Perkins J S, Kuperman W A. J. Acoust. Soc. Amer., 1993, 93(2): 739
- [19] Harrison C H. J. Acoust. Soc. Amer., 1997, 102(5): 2655
- [20] Wagstaff R A. RANDI: research ambient noise directionality model. Naval Undersea Center, Research report. 1973
- [21] 汪德昭, 尚尔昌. 水声学. 北京: 科学出版社, 1981

标准光学元件库存---供您随时选用

总量多达10万片，
超过700个品种规格的透镜，
棱镜，反射镜，窗口，
滤光片等常用光学器件；
涵盖紫外，可见，
近红外，
红外等光学应用领域。



光学透镜



光学棱镜



可见光学元件



红外元件



颜色滤光片



窄带干涉滤光片



北京欧普特科技有限公司
Beijing Golden Way Scientific Co., Ltd

地址: 北京市朝阳区酒仙桥东路1号M7栋5层东段
电话: 010-88096218/88096099 传真: 010-88096216
邮箱: optics@goldway.com.cn

Cryocoolers and Cryostats

Visit us at booth #310 at the MRS
Fall Meeting



High Power
Cryocoolers
1.5 W @ 4.2 K



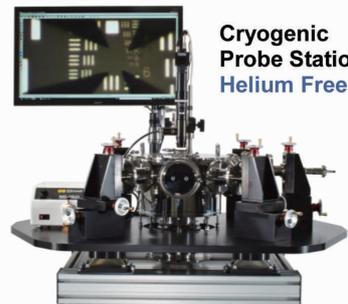
ARS Manufactured
Closed Cycle
3 K — 1100 K



Top Loading
Fast Sample
Change



Cryogenic
Probe Station
Helium Free



Advanced Research
Systems

www.arscryo.com
ars@arscryo.com