

# 海洋混响特性研究\*

吴金荣<sup>†</sup> 彭大勇 张建兰

(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

<sup>†</sup> email: wujinrong@mail.ioa.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20141104

## The characteristics of ocean reverberation

WU Jin-Rong<sup>†</sup> PENG Da-Yong ZHANG Jian-Lan

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

**摘要** 海洋混响是海洋环境产生的回声。对于目标探测来说,混响是一种严重的干扰;对于大规模海洋生物探测及海洋环境遥感来说,海洋混响是其应用的基础。经过近一个世纪的理论和实验研究,深海混响的产生机理相对明确,基本的特性也较为清楚。浅海环境较深海环境复杂,目前浅海混响研究大多关注混响的平均特性,对其完整特性的研究将成为未来浅海混响特性研究的重点。文章对海洋混响的研究工作进行了综述,介绍了海洋混响的基本理论 and 应用。

**关键词** 海洋混响, 干扰, 机理

**Abstract** Ocean reverberation is the sum of the echoes caused by the ocean environment. For target detection, it is serious interference, but for the detection of biological organisms and remote sensing in the ocean, it is a fundamental tool. After almost a century of theoretical and experimental research, the mechanism and characteristics of deep ocean reverberation has become relatively clear. However, shallow water reverberation is not so clear because of the complexity of shallow ocean environments, and most work has focused on its mean and statistical characteristics; its full nature will be a central topic for research in the near future. In this paper we shall review the basic theory and applications of shallow water reverberation.

**Keywords** ocean reverberation, interference, mechanism

## 1 海洋混响的含义及其研究的重要性

海洋本身及其界面包含不同类型的介质不均匀性和界面不平整性,其尺度小至灰尘那么大的粒子,它使深海成为蓝色,大至海水中的鱼群和海底上的峰峦与海底山脉。这些不均匀性形成介质物理性质上的不连续性,会阻挡照射到它们上面的一部分声能,并把这部分声能再辐射回去。这种声的再辐射称作散射,而来自所有散射体的

散射成分的总和称作混响。混响声听起来像一阵长的、慢慢变弱的、颤动的声响,如图1所示,它紧跟在主动式声纳系统的发射脉冲之后,在高功率和(或)指向性低的系统中特别严重<sup>[1]</sup>。

混响和噪声一样,都是水下主动声纳系统作业时的背景,但是混响有很多区别于噪声的特性<sup>[2]</sup>。混响是声纳自身产生的,因此混响的频谱特性和发射信号的频谱特性基本相同,混响强度随水平距离和发射信号强度的变化而变化。而噪声则不同,它是由海洋中各种噪声源产生的,和水平距

\* 国家自然科学基金(批准号: 11074271, 11374323)资助项目

离与发射信号无关。

根据产生混响的散射体的不同, 可以将混响分为三类: 海面、海底和海洋体积混响。产生海面和海底混响的散射体都是二维分布的, 可以统称为界面混响; 而产生体积混响的散射体则为海洋生物、海洋中分布的无机物和海洋自身的具有细微结构特征的物质等等, 它们都是三维分布的<sup>[3]</sup>。

海洋混响是主动声纳的主要干扰之一, 在水声物理研究中具有重要地位。海洋混响的研究工作可分为两类: 一类是混响抑制研究, 通过混响特性的研究, 找出混响特性与目标回波特性的差异, 进一步利用两种的差异降低混响对主动声纳的干扰; 另一类则是混响信号的应用研究, 通过已知混响特性与海洋环境的关系来进行海洋资源开发, 鱼群探测, 海洋动力过程遥测, 海底地形地貌测量等。因此, 海洋混响特性研究对于国民经济、国防建设和海洋科学研究等方面都具有重要意义。

## 2 体积混响特性研究

海洋中引起体积混响的主要散射体是海洋生物<sup>[4]</sup>。不同的海洋生物影响着主动声纳不同频段的探测。在 30 kHz 以上频段, 主要散射体是海洋中的浮游生物; 在 2—10 kHz 频段, 主要散射体是带有不同气泡的各种类型的鱼。从声学的角度讲, 不同大小的气泡将会与不同的频率产生共振, 继而发生散射, 并产生混响。

Love<sup>[5, 6]</sup>建立了依赖于鱼分布数据的体积混响模型。在 1988 年和 1989 年, Love 领导的课题组分别在挪威海和北大西洋做了频率为 800 Hz—5 kHz 的体积混响测量, 发现体积混响主要是由带有相对较大的气泡的鱼群引起的, 有鱼层的海水的平均体积散射强度  $S_L$  可以写成

$$S_L = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^n \sigma_i(f) \times 10^{-4}, \quad (1)$$

其中  $n$  是层中鱼的数目,  $\sigma$  是给定频率 ( $f$ ) 上单条鱼的声散射横截面 ( $\text{cm}^2$ )。

下面分别介绍三种引起体积混响的特殊散射结构。

### 2.1 深水散射层

体积散射强度的测量结果显示, 体积散射强度随着深度的增加而减小, 这和海洋中的生物分布刚好一致。但是, 在某个深度上, 体积散射强度经常有显著的增大, 如图 2 所示。引起体积散射强度显著增大的水层我们称之为深水散射层。

深水散射层在深度上具有明显的迁徙特性。白天往往要比晚上深, 在日出和日落时变化非常快; 在中纬度地区, 深水散射层往往分布在

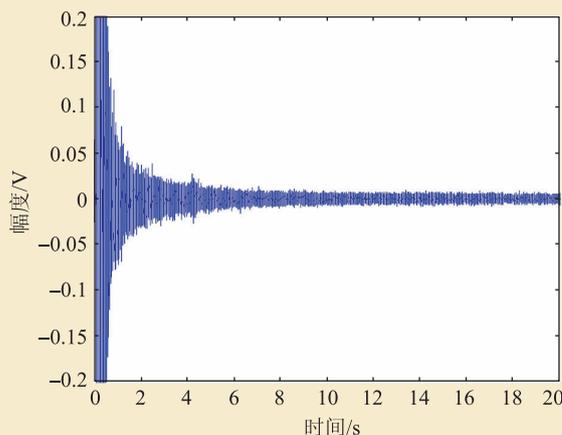


图1 典型浅海爆炸声源混响信号

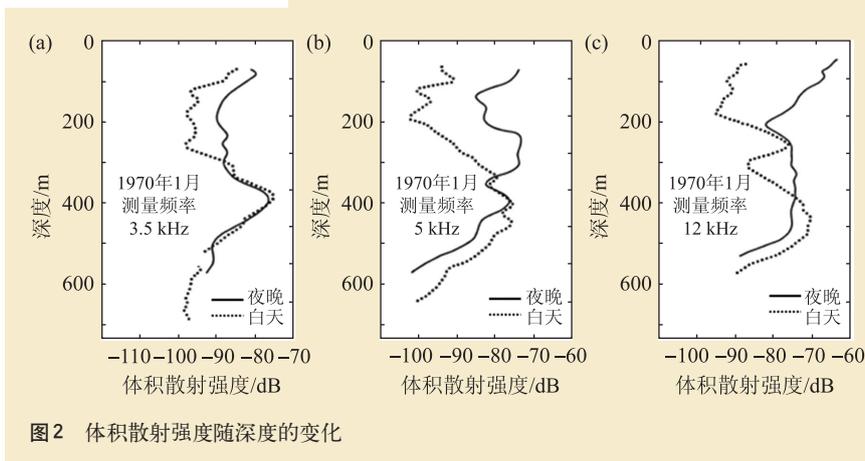


图2 体积散射强度随深度的变化

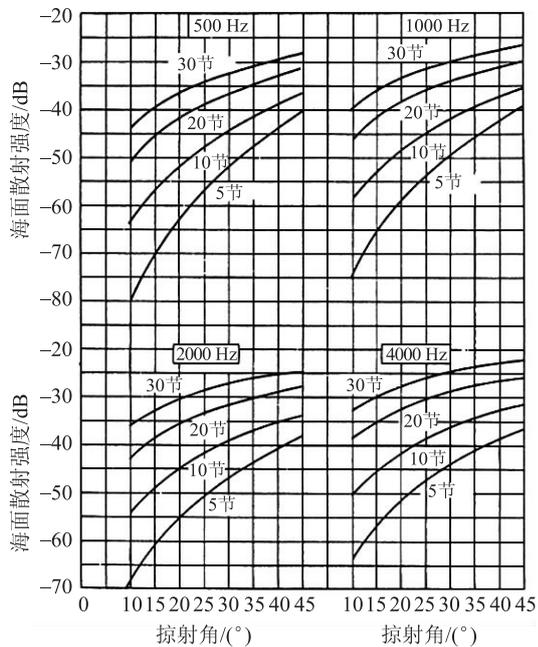


图3 海面散射强度随风速和掠射角的变化关系

180—900 m 的深度上；在北冰洋，深水散射层主要分布在冰下。

Greene 和 Wiebe<sup>[7]</sup>报道了用高频(420 kHz)多波束声测量海洋生物和微小浮游生物的目标强度分布。他们的测量结果和海洋声散射图一致，大部分海洋生物目标的散射强度都在 -70—-62 dB 之间。

## 2.2 水平散射层

海洋中的一些散射体，如深水散射层下的或海面下的气泡层，就是一个有厚度的水平散射层。这种水平散射层引起的层混响很容易考虑为边界混响。但是当层的厚度为无限大时，就变为一个柱体，这时的散射强度被认为是柱体散射强度。

## 2.3 垂直散射体

海洋浮游生物容易形成特定的分布规律，并形成散射层。但是在一些特定的海域，从海底泄漏的天然气或液体会形成垂直散射体，这种散射体在 10—1000 kHz<sup>[8]</sup>频段能被探测到。还有些海底山脉也会形成垂直散射体，夏威夷群岛的 Han-

cock 海山就是其中的一个例子，这个垂直体的高度达到 300 m。这些海底泄漏或垂直体同时还会吸引不同的海洋生物，从而进一步增强了其垂直方向的散射特性。

## 3 界面混响特性研究

常见的界面混响有三类：海面混响、冰下混响和海底混响。下面分别予以介绍。

### 3.1 海面混响

粗糙海面和气泡可以使海面变成一个有效而又复杂的散射体，通常考虑的海面散射不是在一个平面上，而是在一个层里。

海面散射强度典型的测量方法是：用一个能量在各方向上均匀分布的无指向性的声源(通常用爆炸声源)和接收声波的水听器组成的阵或可接收某一方向上声波的指向性声纳来完成。研究结果表明，海面散射强度和掠射角、声频率以及海面的粗糙度有关。测量结果显示，海面散射强度在低频和低掠射角时有很强的频率依赖性，在高频和大掠射角时，海面散射强度的频率依赖性则很弱。

Chapman 和 Harris<sup>[9]</sup>进行了一系列的海面散射测量，并且分析了从 0.4—6.4 kHz 的海面散射强度，如图 3 所示，他们总结出一个海面散射强度的经验公式：

$$S_{CH} = 3.3\beta \log_{10} \frac{\theta}{30} - 42.2 \log_{10} \beta + 2.6, \quad (2)$$

$$\beta = 158[vf^{1/3}]^{-0.58}, \quad (3)$$

其中  $S_{CH}$  是海面散射强度(dB)， $\theta$  是掠射角(°)， $v$  是风速(knot, 节)， $f$  是频率(Hz)。

在文献[10]中，McDaniel 回顾了收发合置条件下，频段从 200 Hz 到 60 kHz 时，海面混响物理建模的研究概况。他在文中指出，海面混响的散射声源包括粗糙界面散射、气泡的散射或气泡云的散射，其中粗糙界面散射包括大尺度粗糙界面散射和小尺度粗糙界面散射，McDaniel 还给出了复合粗糙海面的微扰散射理论。

Ogden 和 Erskine<sup>[11]</sup>将微扰散射理论和 Chapman—Harris 经验公式联合起来, 提出了海面总的散射强度  $S_{\text{total}}$  的计算公式:

$$S_{\text{total}} = \alpha S_{\text{CH}} + (1 - \alpha) S_{\text{pert}}, \quad (4)$$

$$S_{\text{pert}} = 10 \log_{10} \left[ 1.61 \times 10^{-4} \tan^4 \theta \exp \left( -\frac{1.01 \times 10^6}{f^2 U^4 \cos^2 \theta} \right) \right], \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{U - U_{\text{pert}}}{U_{\text{CH}} - U_{\text{pert}}}, \quad (6)$$

其中  $S_{\text{CH}}$  是 Chapman—Harris 经验公式中的海面散射强度,  $S_{\text{pert}}$  为海面扰动散射强度,  $U$  为风速,  $U_{\text{CH}}$  为 Chapman—Harris 经验公式适用的风速下限,  $U_{\text{pert}}$  为微扰散射理论适用的风速上限。

这个公式的适用范围是: 掠射角  $\theta$  小于  $40^\circ$ , 海面风速  $U$  小于 20 m/s, 频率  $f$  的范围是 50—1000 Hz。

在美国海军研究办公室(ONR)主持的海面混响测量实验中, 在风速为 1.5—13.5 m/s, 掠射角从  $5^\circ$ — $30^\circ$  的范围内, 研究人员做了大量的低频 (70—950 Hz) 海面反向散射特性测量<sup>[11]</sup>。这些测量结果验证了上面介绍的两种散射理论((2)式和(5)式): 对于平静海面的高频散射和各种海况的低频散射, 微扰散射理论<sup>[12]</sup>可以充分解释海面散射现象; 当气泡云被认为是散射过程的主要散射源时, Chapman—Harris 经验公式可以描述高频海面粗糙度散射。在过渡区域, 这两种散射理论((4)式)都可以描述海面散射现象, 这主要决定于海面和风速特性。

### 3.2 冰下混响

主动声纳在冰下进行探测、定位和目标分类时, 会被冰产生的混响所掩盖。海冰是北冰洋海域混响的主要产生源, 3 kHz 信号在没有融化的冰面下产生的混响, 和同样频率无冰情况下 30 节海风引起的粗糙海面产生的混响相当。

由于冰层下界面的多变性, 对散射强度随掠射角变化的测量可揭示冰层下界面的不同特性。当冰层下界面相对光滑时, 散射强度随掠射角的

增加而增大, 和无冰海面的情况相当; 当冰层下界面有很多棱角时, 小掠射角声散射会和垂直入射的情况相当, 甚至会出现镜反射。Brown<sup>[13]</sup>和 Milne<sup>[14]</sup>分别总结了两个不同北冰洋海域的散射强度测量实验, 他们的数据显示, 散射强度随频率和掠射角的增大而增加。用高指向性声源和水听器可以通过优化声线路径的方法使冰下混响减到最小。这种声线优化的方法可以给出冰下目标回声与混响的差别。

### 3.3 海底混响

海底和海面一样, 是声的有效反射和散射体。海底散射不但会在声源、散射体和水听器的垂直平面发生, 而且还会在垂直平面以外发生散射。海底散射强度和海底粒子的尺度有关<sup>[15]</sup>。根据海底沉积层的组成(沙、泥土、淤泥等)可以对海底进行分类。海底分类和散射强度有关, 例如, 淤泥海底一般很平, 并且和水比起来有较低的阻抗特性, 而粗沙海底则会很粗糙, 和水比起来也会有很高的阻抗。即使是相同类型的海底, 所测量的散射强度数据也会有很大的差别, 这可能是由于海底沉积层的声折射和反射特性不同的缘故。

当掠射角小于  $45^\circ$  时, Lambert 散射定律可以很好地描述深海海底反向散射强度和掠射角的关系。Lambert 散射定律参考了光在粗糙界面上散射后能量在角度上的分布关系, 根据 Lambert 散射定律, 散射强度和掠射角正弦的平方成正比。Mackenzie<sup>[16]</sup>分析了深海两个频率(530 Hz 和 1030 Hz)的混响测量数据, 发现海底散射强度满足 Lambert 散射定律:

$$S_{\text{B}} = 10 \log_{10} \mu + 10 \log_{10} \sin^2 \theta, \quad (7)$$

其中  $S_{\text{B}}$  是海底散射强度,  $\mu$  是海底散射常数,  $\theta$  是掠射角。530 Hz 和 1030 Hz 对应的  $10 \log_{10} \mu$  值都是  $-27$  dB, 这个值被其他大量的实验数据所证实。

美国海军研究办公室(ONR)组织了一次美国海军海洋混响特别研究项目(ARSRP), 作为 ARSRP

项目的一部分,他们选择大西洋山脊以北的海域作为一个天然实验室。之所以将这个海区选为天然实验室,是因为这一海区有陡峭的岩石倾斜,海底的地质结构和沉积层结构给海底混响研究提供了各种海底特性。其采集的发射点、接收点位于同一位置的收发合置混响数据,和发射点、接收点位于不同位置的收发分置混响数据,均与数值预报的结果吻合很好<sup>[17]</sup>。

Ellis 和 Crowe<sup>[18]</sup>综合了 Lambert 散射定律和基于 Kirchhoff 近似的粗糙界面散射函数,得到适用于收发分置混响计算的三维散射函数。三维散射函数考虑了方位角关系、分离近似和半角近似等情况,这无疑是在经验散射函数的一大进步。

在深海远距离声传播问题上,声波和海底的相互作用都是在临界角以下,在光滑玄武岩表面和小掠射角条件下,水中声能量的大部分都会被反射。而且散射函数与掠射角的关系很简单,可以用 Lambert 散射定律来描述。但是,如果海底是平坦玄武岩的话,观察到的散射函数和掠射角的关系将不会那么简单,散射函数在压缩波和剪切波头处可能会出现大的高峰。为了研究这种非常规的现象,Swift 和 Stephen<sup>[19]</sup>建立了包括海底介质体积不均匀性的散射模型。他们将这个模型应用到很多情况,如掠射角为 15° 时的高斯波束的发射信号,在这个角度上,由玄武岩组成的真实平坦海底会产生全内反射。但是,他们发现海底模型包含了 10% 的速度扰动,这 10% 的速度扰动会产生向上的散射能量。事实上,只有声能掠射角小于临界角时,海底能量泄漏才以渐消相位的形式损失,而且这样的能量只能穿透到几个波长厚。这种能量和海底不均匀性的相互作用会激发出表面波。Swift 和 Stephen 还发现散射函数与海底压缩波、剪切波的声速梯度有关。如果海底没有声速梯度的话,海底传播能量就不会向上折射。因此,声波与声速不均匀的海底介质相互作用时会产生较强的散射。

海底的植物也会使海底散射变得特别复杂。Shenderov<sup>[20]</sup>从理论上对此复杂现象进行了研究,

并将海藻的散射认为是三维的、弹性体的、随机系统的声衍射,这个方法考虑了海藻的统计特性。McCarthy 和 Sabol<sup>[21]</sup>用军用和环境监测系统描述了海底水生植物。

## 4 浅海混响特性的研究

上两节中介绍了体积混响和界面混响的基本概念、基本研究内容和最新研究进展,但是大多数的工作还是针对深海混响而言的。在过去的几十年中,中低频主动声纳又重新成为水声界的研究热点,尤其是在冷战结束之后,随着以美国为首的西方国家海军战略的转移,混响研究热点自然转移到了浅海的情况<sup>[22]</sup>。本节重点介绍国内外浅海简正波混响建模研究的概况。

早期的混响理论是针对深海混响建立的,其基础是射线理论。然而在浅海信道中,根据射线理论来研究浅海远程混响时,不能给出满意的结果。在传播建模中,简正波理论对于浅海信道十分有效,因此利用简正波理论研究浅海混响就成了浅海混响研究的一个重要方向。早在上世纪 60 年代,Bucker 和 Morris<sup>[23]</sup>就首先提出这种利用简正波理论进行海洋混响计算的方法;张仁和与金国亮<sup>[24]</sup>推广了这种方法,使得它可以计算声速剖面为任意形式的分层介质中的混响;Ellis<sup>[25]</sup>总结了这种混响计算方法,并且利用群速度给出了时域上的混响强度变化曲线;Lepage<sup>[26]</sup>又继续发展了这种方法,并研究了收发合置混响时域特性与声源宽度、声源—接收水听器深度和波导传播特性的关系;最近,俄罗斯的 Grigor'ev 等<sup>[27]</sup>在以往工作的基础上,给出了一个描述浅海混响场(反向散射场)统计特性和声场干涉现象的混响模型,李风华<sup>[28]</sup>提出了利用简正波相干叠加的方法可以预报浅海混响场的干涉结构。但是上述混响模型在海底散射问题的处理上都是基于经验散射函数。

早在上世纪的 80 年代,中国科学院声学研究所的高天赋教授率先给出了浅海粗糙界面的全波动混响模型<sup>[29]</sup>。之后相继出现了若干关于

粗糙界面和海底不均匀性的全波动混响模型<sup>[30-34]</sup>。Ivakin<sup>[35]</sup>将这两种不同散射机制纳入同一个理论体系中。上述全波动混响模型都没有经过实验数据的验证。吴金荣<sup>[36]</sup>在全波动混响模型的基础上,结合周纪浚教授给出的浅海角度谱混响模型<sup>[37]</sup>,提出了一种物理意义更加清晰的浅海新能流混响模型,该模型利用容易获取的海底反射系数快速预报波导中混响能量平均衰减规律,且可利用实测模型参数和混响数据进行验证。

针对浅海混响产生机理分析和混响特性建模,美国海军研究办公室资助举办了多个混响研讨会,如1999年举办了浅海混响建模研讨会<sup>[38]</sup>,该会议归纳了浅海混响主要的产生机理有:海底粗糙界面、海底不均匀介质、沉积层内部的粗糙界面、大尺度海底地形特性、大尺度海底介质特性等,提出的混响信号中的杂波现象已成为近几年的浅海混响研究热点<sup>[39]</sup>。

2006年,在美国海军研究办公室召开的浅海混响建模研讨会上,确定了20个浅海混响建模标准问题,其中考虑了二维和三维海面散射、海底粗糙界面散射、海底体积介质不均匀性散射、经验散射函数、不同水文剖面、不同海底地形等情况,这些标准可用于建立混响模型研究的基准;2008年,在浅海混响建模研讨会上,讨论了2006年提出的20个问题的答案,并比较了同一问题不同混响模型的预报结果,分析了不同混响模型的优劣。

2010年,美国海军研究办公室联合欧洲主要海洋混响研究国家在英国剑桥举办了声纳性能评估研讨会,在研讨会上,混响建模者将混响模型置于主动声纳模型中,使得混响特性模型距离应用越来越近。

2011年9月,北大西洋公约组织(简称北约)水下研究中心举办了宽带主动声纳杂波的识别和抑制研讨会,并给混响研究者量身定制了一个针对主动声纳训练的项目。

从上面列举的美欧混响机理和建模研究工作中,可以看出浅海混响研究的发展趋势,即掌握

浅海混响形成机理,应用混响特性,使得主动声纳尽可能地避开混响和杂波的干扰,增强探测性能。

## 5 混响特性的应用研究进展

海洋混响特性研究主要包括主动声纳、探鱼声纳、海底遥感。下面分别介绍这3个方向上的混响应用研究。

### 5.1 主动声纳应用

众所周知,海洋混响是主动声纳的主要干扰之一。有用的目标信号总是叠加在混响信号中,有时海底断层或突起也会在混响信号中产生和有用信号极其相似的包络,使得探测质量明显下降,如图4所示。

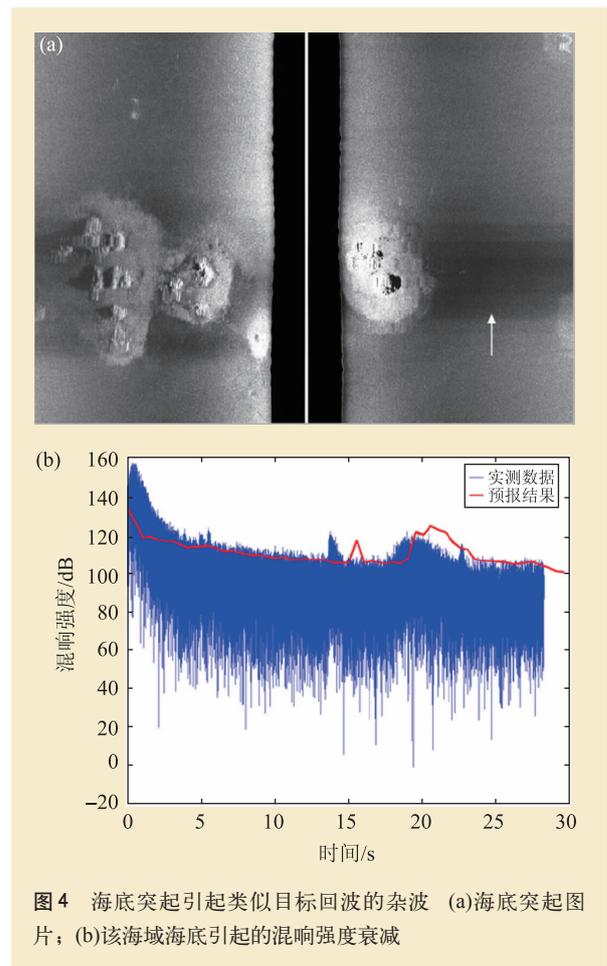


图4 海底突起引起类似目标回波的杂波 (a)海底突起图片; (b)该海域海底引起的混响强度衰减

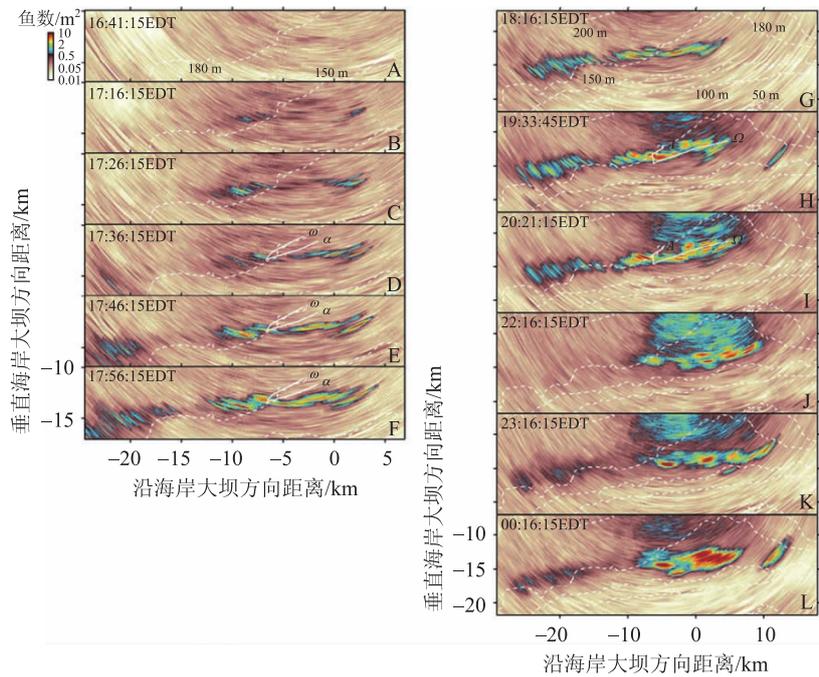


图5 不同时刻低频混响信号中含有的鱼群信息(图中 EDT 为美国东部夏季时间, A—L 为不同时刻同一海域鱼群的分布信息, 左上角的色棒表示每平方米海域中鱼的数量, 图 D, E, F 中的  $\alpha$  和图 H, I 中的  $A$  为传统探鱼声纳研究的起始线,  $\omega$  和  $\Omega$  为传统探鱼声纳研究的终止线, 本文未给出传统探鱼声纳的探测结果, 有兴趣的读者可以参阅文献[41])

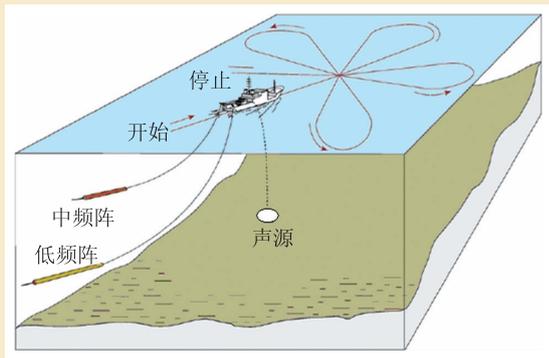


图6 常见海洋混响测量示意图

主动声纳方程中有混响背景级这一项, 该方程如下式所示:

$$SL - RL - 2TL + TS + G_s + G_T = M \quad (8)$$

其中  $SL$  为声源级,  $RL$  是混响背景级,  $TL$  为声传播损失,  $TS$  为目标强度,  $G_s$  为空间增益,  $G_T$  为时间增益,  $M$  为检测阈<sup>[1]</sup>。

优质因素及作用距离的估算也与混响有密切关系, 所以混响场的精确预报对主动声纳的设计

至关重要。

## 5.2 探鱼声纳应用

探鱼声纳是一种高频主动声纳。它利用高频声波的回声(即混响声)可以判断近处是否存在鱼群。近年来, 美国 MIT 的 Makris 教授领导的课题组利用低频混响研究的成果, 探测远处的鱼群<sup>[40]</sup>, 并进一步观察到鱼群的迁徙习性<sup>[41]</sup>, 如图 5 所示。

## 5.3 海洋声遥感

实际上, 海洋混响信号中包含了大量的环境信息, 因为浅海混响形成过程包括信号前向传播、海底散射和反向传播三个主要过程, 所以海洋混响信号中包含了大范围的声信道信息

以及水文参数、海底参数、海底散射强度等信息。从混响信号中提取这些信息就成了非常有意义的课题。因为一方面混响信号相对于传播信号来说容易获取, 单船实验即可, 从而节约了大量的人力、物力和财力; 另一方面, 混响信号中有用信息量大, 从混响信号中可以提取出大量的有用信息, 这是其他信号都不具备的内在特性。

图 6 为北约水下研究中心在地中海开展的混响实验示意图, 该实验的主要目的是通过混响数据, 快速反演相关环境参数, 进一步预报实验海域的水声环境特性。通常称该实验为水声环境快速评估(REA)。图 7 为混响强度理论预报误差分布。

## 6 结束语

海洋混响是海洋环境产生的回声, 它严重

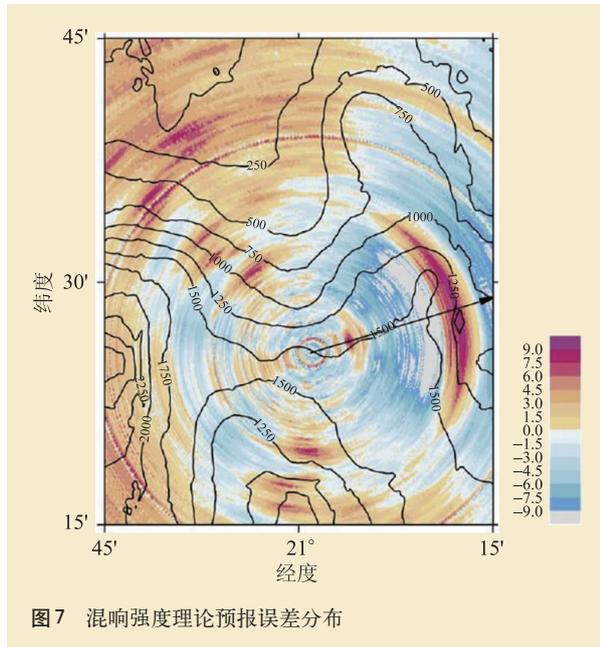


图7 混响强度理论预报误差分布

## 参考文献

- [1] 尤立克 R J. (著), 洪申 (译). 水声原理. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990
- [2] Bartberger C L. Lecture Notes on Underwater Acoustics. Nav. Air Devel. Ctr, Rept NADC-WR-6509. 1965
- [3] Paul C E. Underwater Acoustic Modeling and Simulation (Third edition). London and New York: Spon Press, 2003
- [4] Saenger R A. Volume Scattering Strength Algorithm: A First Generation Model. Nav. Underwater Syst. Ctr, Tech. Memo. 841193, 1984
- [5] Love R H. J. Acoust. Soc. Am., 1975, 57: 300
- [6] Love R H. J. Acoust. Soc. Am., 1993, 94: 2255
- [7] Greene C H, Wiebe P H. Sea Technol., 1988, 29(8): 27
- [8] Hovland M. EOS, Trans. Amer. Geophys. Union, 1988, 69: 760
- [9] Chapman R P, Harris J H. J. Acoust. Soc. Am., 1962, 34: 1592
- [10] McDaniel S T. J. Acoust. Soc. Am., 1993, 94: 1905
- [11] Ogen P M, Erskine F T. J. Acoust. Soc. Am., 1994, 95: 746
- [12] Thorsos E I. J. Acoust. Soc. Am., 1990, 88: 335
- [13] Brown J R. J. Acoust. Soc. Am., 1964, 36: 601
- [14] Milne A R. J. Acoust. Soc. Am., 1964, 36: 1551
- [15] Hines P C. J. Acoust. Soc. Am., 1990, 87: 324
- [16] Mackenzie K V. J. Acoust. Soc. Am., 1961, 33: 1498
- [17] Smith K B, Tappert F D, Hodgkiss W S. J. Acoust. Soc. Am., 1993, 94: 1766
- [18] Ellis D D, Crowe D V. J. Acoust. Soc. Am., 1991, 89: 2207
- [19] Swift S A, Stephen R A. J. Acoust. Soc. Am., 1994, 96: 991
- [20] Shenderov E L. J. Acoust. Soc. Am., 1998, 104: 791
- [21] McCarthy E M, Sabol B. Acoustic Characterization of Submerged Aquatic Vegetation: Military and Environmental Monitoring Applications. Proc. MTS/ IEEE Oceans 83 Conf., 2000, 85
- [22] Ellis D D, Preston J R, Urban H G. Ocean Reverberation. DORDRECHT/BOSTON/LONDON: Kluwer Academic Publishers, 1993
- [23] Bucker H P, Morris H E. J. Acoust. Soc. Am., 1968, 44: 827
- [24] Zhang R H, Jin G L. J. Sound Vib., 1987, 119(2): 215
- [25] Ellis D D. J. Acoust. Soc. Am., 1995, 97(5): 2804
- [26] Lepage K. J. Acoust. Soc. Am., 1999, 106: 3240
- [27] Grigor'ev V A, Kuz'kin V M, Petnikov B G. Acoustical Physics, 2004, 50(1): 37
- [28] 李风华, 刘建军, 李整林等. 中国科学(G辑), 2005, 35(2): 140
- [29] 高天赋. 声学学报, 1989, 14(2): 126
- [30] Ingenito F. J. Acoust. Soc. Am., 1987, 82: 2051
- [31] Kuperman W A, Schmidt H. J. Acoust. Soc. Am., 1989, 86: 1511
- [32] Mourad P D, Jackson D R. J. Acoust. Soc. Am., 1993, 94: 344
- [33] Ivakin A N. Sov. Phys. Acoust., 1986, 32: 492
- [34] Shang E C, Gao T F, Wu J R. IEEE, Journal of Oceanic Engineering, 2008, 33(4): 451
- [35] Ivakin A N. J. Acoust. Soc. Am., 1998, 103: 827
- [36] Wu J R, Shang E C, Gao T F. Journal of Computational Acoustics, 2010, 18(3): 209
- [37] 周纪浚. 声学学报, 1980, (2): 86
- [38] John R P. Shallow Water Ocean Reverberation Data Extraction of Seafloor Geo-acoustic Parameters Below 4kHz. Doctor Thesis, The Pennsylvania State University, 2002
- [39] Reeder D B. J. Acoust. Soc. Am. Express Letters, 2014, 135(1): EL.1
- [40] Nicholas C M *et al.*, Science, 2006, 311: 660
- [41] Nicholas C M *et al.*, Science, 2009, 323: 1734