

# 水下声传播的发展及其应用\*

李凡<sup>1,†</sup> 郭新毅<sup>1</sup> 张毅<sup>2</sup> 胡涛<sup>1</sup>

(1 中国科学院声学研究所 北京 100190)

(2 北京长城电子装备有限责任公司 北京 100082)

2014-07-24收到

† email: lifanyuxin@sina.com

DOI: 10.7693/wl20141003

## Development and applications of underwater acoustic propagation

LI Fan<sup>1,†</sup> GUO Xin-Yi<sup>1</sup> ZHANG Yi<sup>2</sup> HU Tao<sup>1</sup>

(1 Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 Beijing the Great Wall Electronic Equipments Co., Ltd., Beijing 100082, China)

**摘要** 文章介绍了水声学中的基础研究领域水下声传播影响因素和研究进展,分析了海洋环境因素对水下声传播的影响机理,给出了不同类型海域以及不同季节的水下声传播特征。文章还列举了目前水下声传播研究的热点问题:水下三维声传播和复杂海洋环境下的水下声传播不确定性研究,并阐述了它在目标探测研究中的应用。最后文章着重讨论了水下声传播的重要应用之一——自适应匹配场处理技术。

**关键词** 水下声传播, 海洋环境, 三维效应, 不确定性, 匹配场处理

**Abstract** The progress in research on underwater acoustic propagation is reviewed. The factors influencing underwater acoustic propagation are analyzed, and the characteristics of acoustic propagation in different seasons and different sea areas are described. We point out various hot issues, including three-dimensional sound propagation and the uncertainty factors involved in propagation in complex ocean environments. Finally, we discuss an important application, the adaptive matched field processing method.

**Keywords** underwater acoustic propagation, ocean environment, three-dimensional effect, uncertainty, matched field processing

## 1 引言

近年来,随着人们对海洋的关注以及我国周边岛屿纷争等迫切的国际形势需求,水声环境特性研究的重要性越发突显出来,又一次成为研究的焦点。众所周知,在人们熟知的各种能量形式中,声波在水中传播性能最好,目前所知的其他能量形式无论是光波还是无线电波等,在水中传

播衰减都非常大,不能满足人类海洋活动(如水下目标探测、水下通信)等方面的需要。水声环境特性是海洋环境对水下目标声信息特征的响应及其背景特性,其研究主要包括声传播特性、混响特性、海洋环境噪声特性以及作为声场环境条件的海洋学特性4个部分。其中水下声传播特性直接反映了声音在水中的传播过程,是水声环境特性研究的基础。水下声传播研究可以追溯到百余年前,1826年达·芬奇在日内瓦湖上利用喇叭状装置接收到15 km处潜水钟发出的响声。经过百余

\* 国家自然科学基金(批准号:11204344)资助项目

年的发展,随着计算机科学和数值物理学的发展,水下声传播研究在传播理论、算法模型以及不同复杂海洋传播环境等多个方面都获得了长足的发展,成为从浅海到深海、从二维空间到三维空间的更加全面精细化的研究领域,在深海探测、声纳定位、蛙人反恐等多个领域都起到决定性的作用。本文将简要介绍水下声传播的机理和影响因素,列举水下声传播近年来的发展前沿及其在相关的海洋目标探测研究中的应用。

## 2 水下声传播简介

### 2.1 影响水下声传播的海洋环境因素<sup>[1-3]</sup>

在海洋波导中,声传播路径主要受海面、海底以及海水介质影响。海水中声速与温度、盐度和静压力有关,由于压力是深度的函数,声速具有明显的深度分布特征,可表示为温度、盐度和深度的函数,其中温度每增加 $1^{\circ}\text{C}$ ,声速随不同的盐度和深度值增大 $2\sim 4\text{ m/s}$ ,而盐度变化对声速影响较小,因此温度影响最为显著。声速随深度变化情况用声速剖面来表示。海洋声速剖面变化受海域环境和季节等因素影响。一般来说,在近岸浅海及大陆架区域,声速剖面受到很多因素的影响,有比较明显的季节特征,冬季的典型声速剖面是等温层,而夏季则为负梯度。由冬季过渡到夏季,等温层逐渐变为负跃层,跃层深度

逐渐加深,一般在8月份达到最大。图1是3种典型的浅海声速剖面。

对于深海海域声速剖面分布,它大致可以分成三段:(1)在靠近海表面的混合层,声速分布呈现强烈的时间和季节性变化——由于受到阳光的照射,表层温度较高,具有负梯度的声速变化,如果刚经过风浪的搅动混合,形成等温层,还会呈现出微弱的正梯度分布,构成表面声道,混合层厚度约为 $30\sim 100\text{ m}$ ,同季节性的阳光照射和风浪搅动混合效果有关;(2)在表面的混合层之下是主斜温层部分,由于较少受到风浪的搅动,温度分布主要受日照的影响,从而呈现出比较稳定的负梯度;(3)在主斜温层以下的深度(大于 $1000\text{ m}$ )上,海水温度是恒定的,称为深海等温层,该层的声速分布主要取决于静压力的增加,呈现出几乎线性的正梯度(约 $0.16\text{ m/s/m}$ )分布形式。主斜温层的负梯度与深海等温层的正梯度之间存在着一个声速最小值,所在的深度称作深海声道轴。深海声速剖面的测量往往到深海声道轴深度即可,以下深度上的声速可以根据等温层条件计算得到。不同海区的声道轴深度有所不同:在太平洋或者大西洋的温带海域,一般在 $1000\text{ m}$ 左右,地中海海域会浅一些,而在高纬度地带,声道轴可能上升到海面,如北极海域。深海海域典型声速剖面如图2所示。

水下声传播除受海洋水体介质影响外,还受到海面和海底边界条件的影响。海面作为海洋声

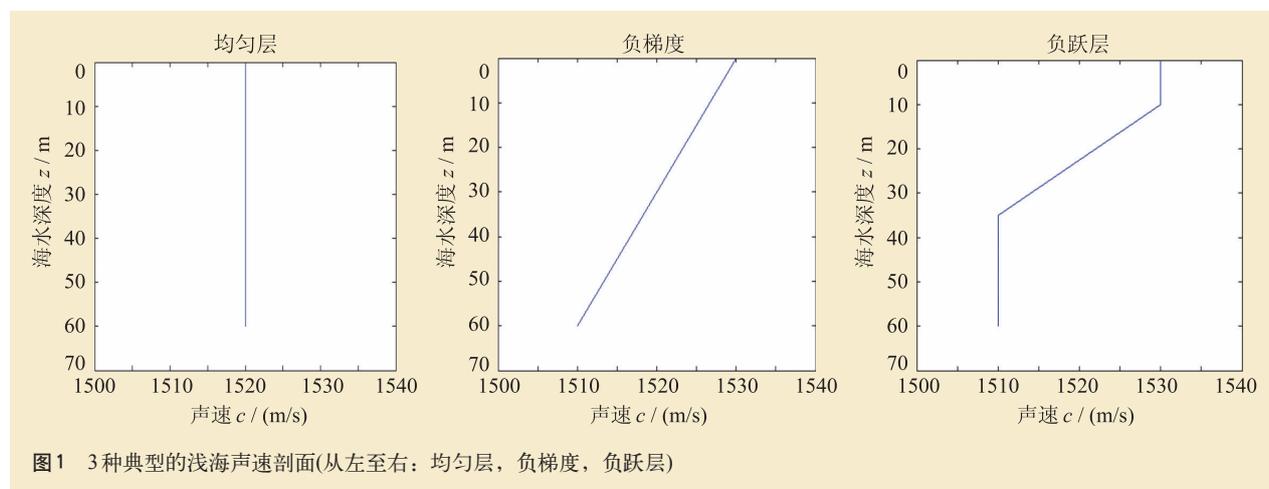


图1 3种典型的浅海声速剖面(从左至右:均匀层,负梯度,负跃层)

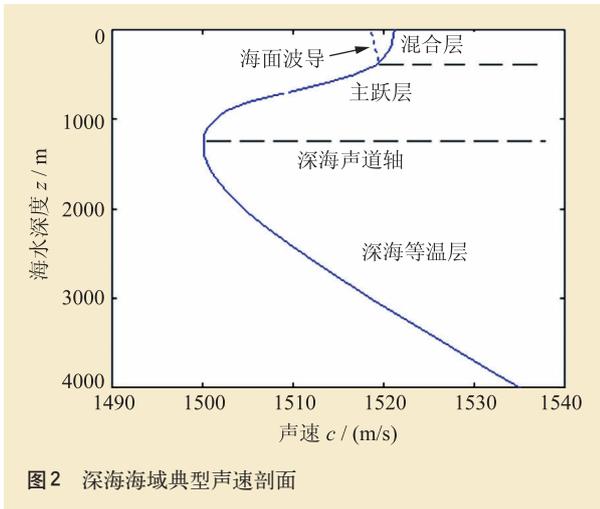


图2 深海海域典型声速剖面

波导的上边界，由于水介质和空气介质声阻抗的显著差异，平整的海面边界一般可近似地认为是理想的绝对软反射边界，即反射系数  $V_s = -1$ 。不过实际海面很少有风平浪静的时候，海表面的风浪状况是影响水下声传播的又一个重要环境因素。关于海面波浪，除采用海浪谱的描述以外，也使用较为方便的简单参数来描述，例如波高与海况都与风速有关。对于海底边界，在深海海域，由于声能传播能够限制在水层中，形成深海声道，几乎不会受到海底的影响，但在浅海海域，海底地形及海底底质特性成为限制水下声传播的重要因素。与海面不同，海底地形大多是不规则的，诸如大陆架陡坡、海底山、海盆等。海底的地质构成也是多种多样，如软泥、细沙、粗砂到岩石等，并且不同的海底底质对声波的反射和吸收也不相同。因此，很难通过直接测量得到可用的声学参数，目前的测量手段主要依靠底质采样和各种声学反演技术。海底底质具有明显的分层结构，并且具有相应的密度、声速、吸收系数的深度分布。对于较高的声波频率，一般只关

注表层沉积层的影响。表1给出了Hamilton等人在大量的实验测量基础上整理得到的海底沉积层声学参数的平均数值，共分9类。

## 2.2 水下声传播<sup>[4]</sup>

声音在水下传播问题主要利用两种方法进行研究：一种方法是波动理论，研究声信号的振幅和相位在声场中的变化；另一种方法是射线理论，在高频情况下，可以把声波看成声射线束，通常研究声场中声强随射线束的变化。从这两种理论发展出几种经典声场计算模型来表征水下声传播过程，包括简正波模型、射线模型、抛物近似模型等。水下信息感知主要是通过声场特性及声传播过程来表征，在水声学中，声场信号强度随距离变化的标准度量是传播损失。传播损失 ( $TL$ ) 是声场中某一点的声强  $I(r, z)$  与距离声源 1 m 处的声强  $I_0$  之比，可表示为

$$TL = -10 \log \frac{I(r, z)}{I_0} = -20 \log \frac{|p(r, z)|}{|p_0|}, \quad (1)$$

其中  $p(r, z)$  为声场中某一点的声压， $r$  为从声源位置到声场某一点的距离， $z$  为声场某一点的接收深度， $p_0$  为距离声源 1 m 处的声压值， $TL$  为声场的传播损失值，单位为分贝 (dB)。

声场的传播损失与实际海洋环境参数、发射深度和接收深度等有关。在水声传播研究领域研究声场的传播损失时，通常是把海洋环境分为深海和浅海两种类型进行分类研究。

典型的理想深海海洋声速剖面是 Munk 剖面，通常用声速  $c$  和海水深度  $z$  之间的函数关系  $c(z)$  来描述，它的一般形式是： $c(z) = 1500[1.0 + \epsilon(z - 1 + e^{-z})]$ ，其中  $\epsilon = 0.00737$ ，换算深度

表1 海底底质参数分类

类型	砂			泥质砂	砂质泥	泥	砂—泥—粘土	粘泥	泥质粘土
	粗	细	极细						
密度 $\rho / (\text{g/cm}^3)$	2.034	1.941	1.856	1.772	1.771	1.740	1.596	1.488	1.421
平均声速 $\bar{c} / (\text{m/s})$	1836	1749	1702	1646	1652	1615	1579	1549	1520
衰减系数 $K / (\text{dB/m} \cdot \text{kHz})$	0.479	0.510	0.673	0.692	0.756	0.673	0.113	0.095	0.078

$$\bar{z} = \frac{2(z-1300)}{1300}$$

深海声速剖面分布特点给声传播提供了两个有利的条件：表面声道和深海声道。对于声纳工作来说，表面声道更具有现实意义，因为目前潜艇的探测和反探测活动基本上都是在几百米海深范围内进行的。通过给定环境仿真计算得到深海声场分布情况，图3给出的是一组深海有、无表面声道情况下的声传播损失等值线分布情况比较，传播损失

等值线是指在不同深度具有相同的传播损失值，意味着在不同深度上目标探测能力不同。从图中可以看到，在有表面声道存在情况下可以显著提高声传播距离。遗憾的是，表面声道容易受日光照射和风浪混合程度、黑潮、海洋锋面、中尺度涡漩等环境因素的影响，不很稳定。

深海海域除了表面声道还存在深海声道，图4是深海声道的声线传播图，由于声线总是弯向声速极小值处，当声源位于声道轴附近时，在一定角度范围出射的声线被限制在声道内传播，这部分声线不经海面散射和海底反射，损失较小，所以声信号传播很远。深海声道较表面声道要稳定得多，并且没有界面反射/散射损失，利用深海声道可以进行远距离目标的搜索和定位，因此也将深海声道称为SOFAR(sound fixing and ranging)声道。

浅海海域声传播的基本特征是声速剖面为向下折射剖面，只有经由海底反射路径才能进行远程传播。图5是我国南海近岸海域浅海典型的分层介质波导示意图，海水深度为100 m，声源深度为50 m，海底声速为1580 m/s，密度为1.8 g/cm<sup>3</sup>，图6左侧是该海区夏季典型负跃层声速剖面，存在一个暖表面层，使声线向下折射，因而全部声线都反复与海底发生作用。图6右侧是频率为800 Hz的浅海传播声线图，可以看出水下声传播

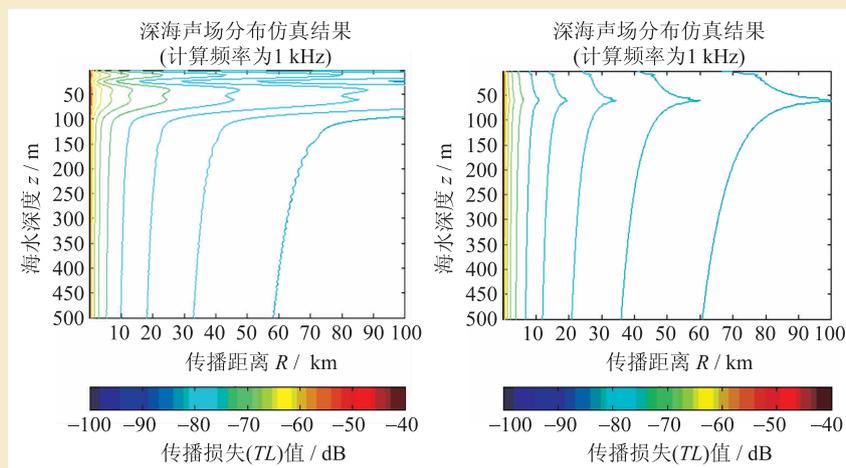


图3 深海有无表面声道情况下的传播损失等值线分布(左图为有表面声道；右图为无表面声道)

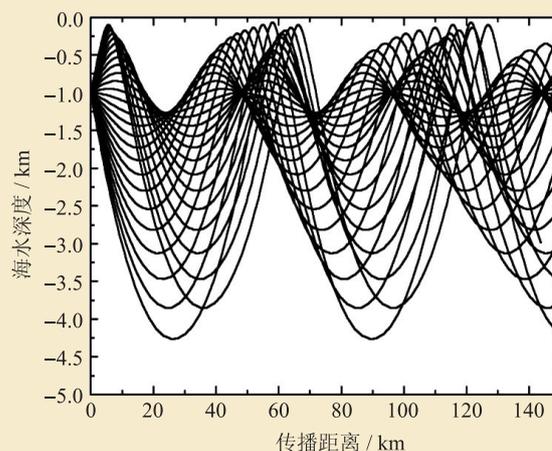


图4 深海声道声线传播图

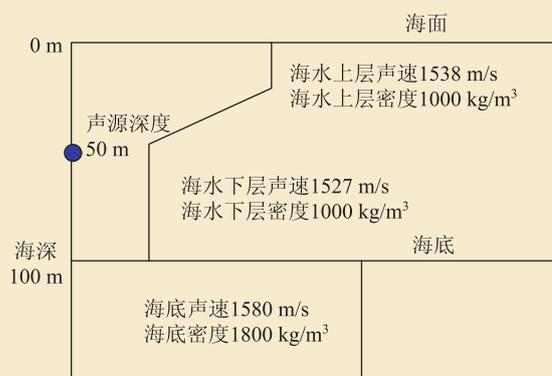


图5 我国南海近岸海域浅海典型的分层介质波导

与海底作用的情况。由于海底是有损界面，所以在中低频率(<1 kHz)，浅海传播主要受海底反射损失控制。

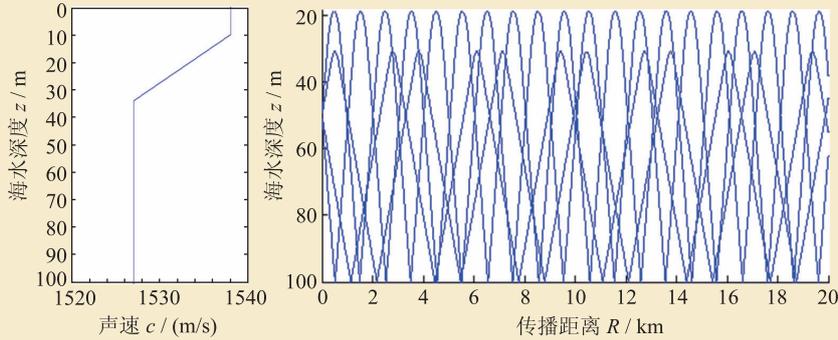


图6 我国南海近岸海域夏季负跃层声速剖面(左图)及浅海声传播声线(右图)

两个传播方向传播损失比较(接收深度为11.7 m)

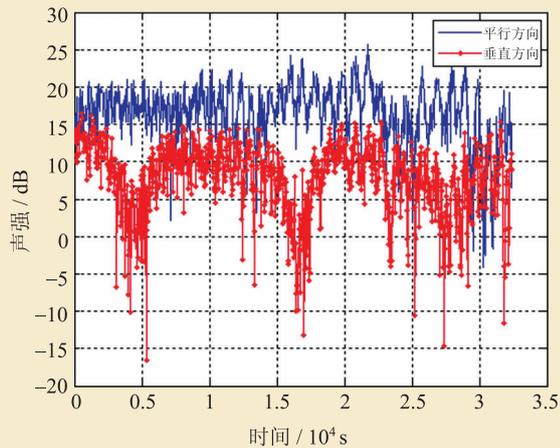


图7 两个传播方向接收信号比较(红色点线为垂直内波方向, 蓝色实线为平行内波方向)

### 3 水下声传播的发展

随着计算机技术的快速发展和海洋水声环境获取手段的日趋成熟, 水下声传播研究也从最初简单的近似理想波导声场计算仿真发展到一个更加符合实际的海洋环境特性的精细化水下声传播研究层面, 出现很多新的研究领域和研究方法, 比如目前比较热门的水下三维声传播问题和复杂海洋环境下的水声传播不确定性研究, 美国以及北大西洋公约组织的其他一些西方国家对水声环境特性研究投入了大量的人力和物力, 并形成稳定的配套研究机构, 其中包括美国的海军研究实验室(NRL)、海军研究办公室(ONR)、伍兹霍尔(Woods Hole)海洋研究所、华盛顿大学应用物理实验室(APL)等。特别是对复杂海洋环境下的水

下三维声传播特性研究都极为重视, 进行了大量三维传播特性海上获取实验, 1995年, 美国的研究人员在新泽西州(New Jersey)典型大陆架海区进行了内波环境下的声传输实验(SWARM), 实验之一就是研究非线性内波引起不同声传播路径上的水声传播三维效应。1995—1996年, 美国进行

海洋气候的声计量学(acoustic thermometry of ocean climate, 简称ATOC)实验, 对水声环境和海洋环境进行同步测量, 时间长达数月。针对水声传播不确定性研究, 美国海军研究办公室从2000年开始, 专门建立了“获取不确定性”的初步研究计划(directed research initiative, 简称DRI), 这个研究计划涉及海洋建模、物理海洋学、海洋声学、信号处理等多个学科研究领域。这些前沿研究的开展<sup>[5-9]</sup>, 为人类对海洋环境的深入探知以及水下目标探测能力增强提供了有力的技术支持。

#### 3.1 水下三维声传播<sup>[10, 11]</sup>

传统意义的水下声传播研究将海洋环境理想化为具有垂直分层结构并和水平方位无关的流体介质, 海面、海底边界往往近似认为是平坦的, 其性质也与水平方位无关, 因此传统的水下声传播研究通常将海洋环境简化为二维空间。而实际海洋波导的海底、海面边界并不平坦, 海底山、海底盆地、大陆架斜坡以及强切割海底等使海底地形具有非常显著的空间三维分布; 实际的海水不是垂直分层的, 也不是和水平方位无关的, 由于海洋介质的随机不均匀性, 海洋中内波、冷热涡流、锋面、黑潮等各种中尺度现象的活动, 都会引起声速在某些水平方向上的剧烈变化。这些海洋环境的三维特性, 使水下声传播具有显著的三维特征, 如声线的水平折射效应, 声线水平聚焦与反聚焦, 混响及海洋环境噪声中的三维环境效应等。图7是我国黄海夏季在内波存在条件下

平行于内波传播方向和垂直于内波传播方向两个不同方向传播路径接收的信号比较，可以看出，由于传播路径不同而引起的接收信号差异很大，因此传统的二维水声传播并不能完全真实地反映出实际海洋环境时间空间水声传播特性变化。

国内近年来也进行了部分三维水声环境特性研究，但大都是借助二维声传播构建由多个二维声传播切片组成(简称 $N \times 2D$ 模型)的“伪”三维水声传播特性，这种处理方法忽略了声波在水平方位之间的耦合，带来了较大的误差，不能准确地预报真实三维水声环境特性。目前水下三维声传播研究是要考虑声波在水平方位之间的耦合，获得实际三维海洋环境下的真三维水下声传播特性研究。下面举几个典型的水下三维声传播实例。

### 3.1.1 内波存在的水下三维声传播

南中国海是中国大陆、中国台湾岛和菲律宾包围下的半封闭海域，内波活动频繁，图8中黑色曲线就是南中国海北部海域位置在北纬 $20^\circ$ — $22^\circ$ ，东经 $117^\circ$ — $118^\circ$ 之间出现的非线性内波。内波活动期间声速剖面剧烈变化，在这种具有强烈三维效应的海洋波导环境中，用二维模型分析会产生误差。利用2012年青岛黄海内波通过期间获得的实验数据进行分析处理，可以看出，在内波活动期间，信号强度有明显的起伏，将实验结果与 $N \times 2D$ 模型和三维模型计算结果分别进行比较，实验结果和三维模型计算结果接近，而 $N \times 2D$ 模型没有考虑水平折射的影响，产生6 dB左右的误差。因此，在海洋水体介质参数变化强烈的环境中，三维水下声传播模型是非常必要的，是不能用二维模型或 $N \times 2D$ 模型替代的。

### 3.1.2 复杂海底地形条件下的水下三维声传播<sup>[12]</sup>

这里以台湾以东海域为例，如图9所示，该海域位于第一岛链，海底起伏变化强烈，该海域水声传播研究

具有重要的战略意义。红色方框标记的是海域等深线1000—2000 m，纬度跨越 $33'$ (约61 km)。图9右图为该海域海底地形模型。由于海底地形环境影响，二维和三维声场计算模型得到的传播损失结果差异很大。图10为二维和

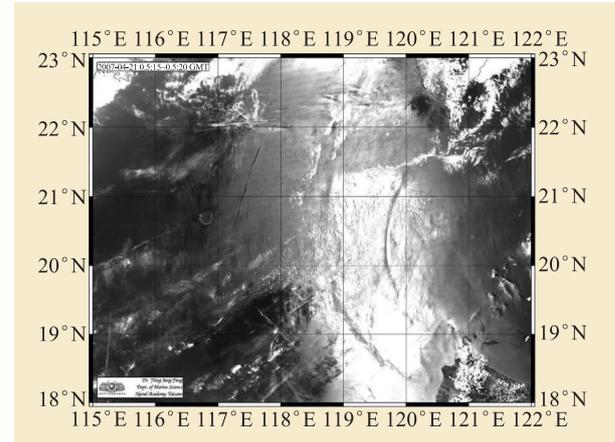


图8 南中国海北部非线性内波

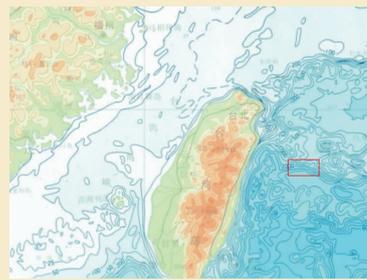


图9 台湾以东海域楔形海底以及海底模型

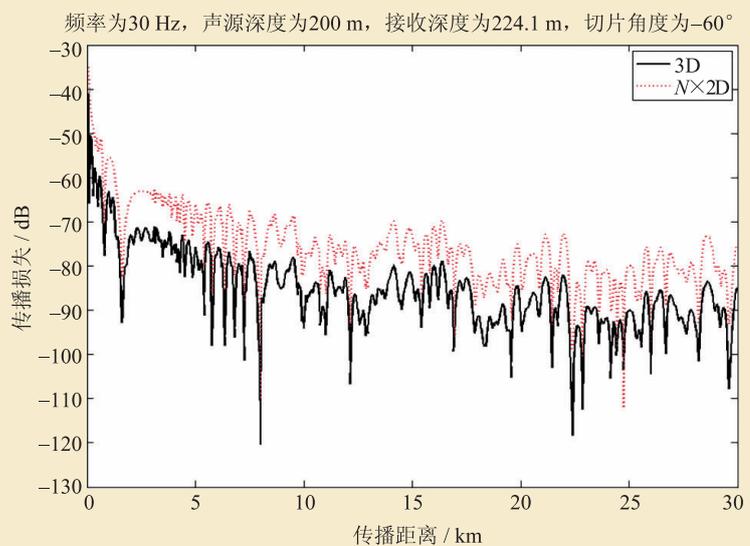


图10  $-60^\circ$ 声场切片传播损失曲线比较

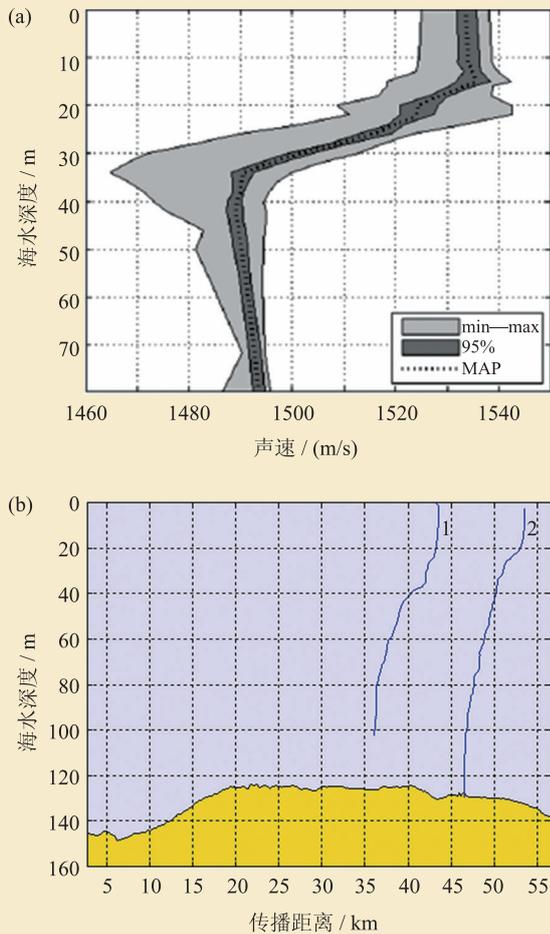


图 11 引起水声传播声场不确定性的海洋环境参数 (a)声速剖面不确定性变化(图例中的 min—max 为最小声速到最大声速范围, 95%为声速出现的概率, MAP 为声速平均值); (b)海底地形不确定性变化

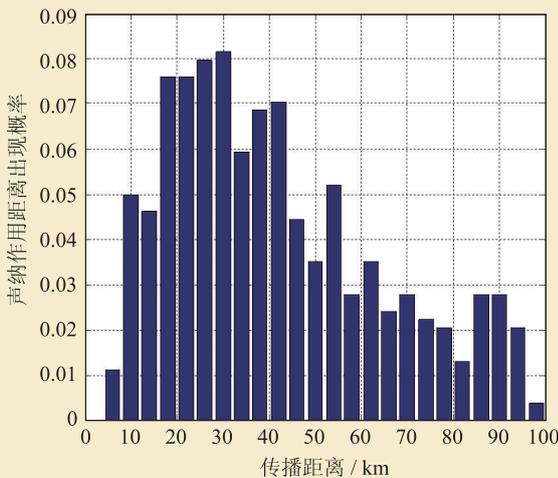


图 12 在不确定海洋环境参数情况下(频带 300—600 Hz, 优质因子 90 dB)声纳作用距离概率分布图

三维声场的传播损失比较曲线, 其中声源频率为 30 Hz, 声源深度为 200 m, 接收深度为 224.1 m, 三维声场选取  $-60^\circ$  切片的传播损失结果, 黑色曲线代表三维声场计算结果, 红色曲线是二维声场计算结果, 从图中可以看出, 两者最大可相差十几分贝。

### 3.2 水下声传播不确定性<sup>[13-17]</sup>

海洋是复杂的随机非均匀声学介质, 实际海洋环境中存在很多不确定性因素, 各种海洋环境参数的不确定性直接导致声场计算的不确定性, 目前不确定性研究主要是建立环境不确定条件下的声场评估算法模型, 研究不确定海洋环境参数声场及其对声纳性能的影响, 为我国侦查声纳、鱼雷报警声纳等各类型声纳的海上应用提供符合实际海洋情况的合理指标范围。前面已经提到声速与海水温度和盐度分布等因素有关, 海面波浪起伏及降雨、海流、潮汐、中尺度涡、锋面和内波等海洋动力学过程都会引起海水随机起伏, 扰动声速剖面, 从而增加其不确定性。海底底质特性对声场分布同样有着重要影响, 包括海底地形、沉积层类型和分层结构等。海深变化是由于地壳运动造成海底地质构造不同引起的, 海底地形地貌呈现多样性的特点, 包括海脊、海盆、海崖、大陆架等多种特征结构, 在声纳工作的海区, 其海深通常是不平坦的, 甚至有剧烈变化。海底底质由于直接获取困难较大也需要利用反演得到, 因此水下声传播存在很多因素的不确定性。图 11 显示了引起水声传播声场不确定性的海洋环境参数变化。图 12 是根据我国黄海海域夏季海洋环境参数不确定性变化范围计算得到的不确定海洋环境条件下 300—600 Hz 频段声纳作用距离概率分布图。

## 4 水下声传播的应用

水下声传播研究是水声环境特性研究的基础, 其研究成果为水声环境特性建模提供支持,

为水下目标探测定位技术提供模型支撑。水下声传播研究是水下战场环境特性研究的重要组成部分，其研究成果可以为海军装备研制和海军作战提供水声环境信息，可用于声纳装备的研制，声纳系统性能辅助分析系统的研制以及海洋战场环境的准备等方面，以提升海军装备水平。匹配场处理技术就是一个典型代表。匹配场处理(MFP)技术自上世纪80年代末开始被广泛研究和应用，它是在水声传播声场建模和阵接收基础上发展起来的一种场信号处理技术，能够充分利用浅海声信道的复杂多途结构，获得接近理想的阵处理增益，实现对目标的距离、深度、方位三维定位。由于对环境和模型的依赖，匹配场处理容易受到所谓的“失配”影响，包括环境参数不确实性和测量误差、声场模型误差、接收信号统计特性估计偏差、阵形不准确等方面因素的影响。目前匹配场技术研究已经针对失配问题，发展并建立了多种能够容忍环境不确实性影响或者将环境和目标参数联合一起反演的处理算法，形成了环境自适应匹配技术，这种技术承认环境不确实性的客观存在，从环境参数获取和估计的输入端而不是信号接收处理端，来自适应环境变化的影响，建立相应的环境匹配处理方法，并应用到声纳系统的信号处理和实际运行使用过程当中，获得最大的空间处理增益，提高了声纳在复杂环境中的探测能力。下面介绍一个自适应匹配场处理的实例。环境变化模型为：海面和海底附近水层声速分别为1500 m/s和1480 m/s，不确实性变化范围分别为 $\pm 2.5$  m/s和 $\pm 2.0$  m/s；水深为100 m，不确实性变化范围为 $\pm 2$  m；海底介质密度为1.771 g/cm<sup>3</sup>，吸收系数为0.3 dB/ $\lambda$ ，声速为1640 m/s，不确实性变化范围为 $\pm 10$  m/s。数值计算中声源真实位置位于距离接收阵5.9 km、深度72 m处，环境参数不确实性变化按随机均匀分布抽取，垂直接收阵接收。图13是对应的目标定位计算结果。图13(a)是传统的定位方法(选取参数平均值)，从图中可以看出，用这种方法几乎不能够正确定位，并且旁瓣也很高；而图13(b)利

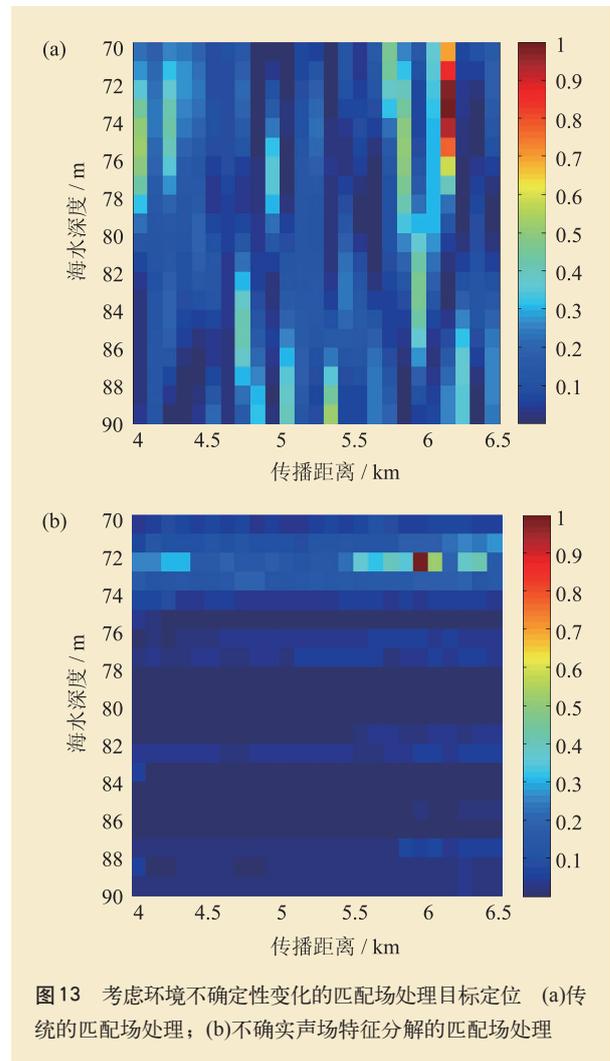


图13 考虑环境不确定性变化的匹配场处理目标定位 (a)传统的匹配场处理；(b)不确实声场特征分解的匹配场处理

用声场特征建模的匹配场处理方法，则可以对目标进行探测和定位<sup>[18-20]</sup>。

## 5 结束语

综上所述，随着水下声传播研究的不断发展和深入，其测量数据、传播规律以及水下声传播模型可以为声纳装备研制提供直接性的技术支持，为人类海洋探测开发以及与环境匹配的新型声纳设计，为在特定环境下进行武器性能的评估，在特定环境下进行新型武器系统的研究，以及在水下战场环境姿态评估的支持系统设计等方面提供依据，具有重要的军事需求背景和实用价值。

## 实验室低温制冷系统



超低振动

4K-1100K

显微应用

光谱学应用

## 纳米应用低温探针台

超低振动 (3-5nm)

5K样品台温度



纳米平移台



**Advanced Research Systems**

Email: [ars@arscryo.com](mailto:ars@arscryo.com)

[www.arscryo.com](http://www.arscryo.com)

## 参考文献

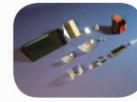
- [1] 刘伯胜, 雷家. 水声学原理. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1993
- [2] 汪德昭, 尚尔昌. 水声学. 北京: 科学出版社, 2013
- [3] R J. 尤立克著, 洪申译. 水声原理. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990
- [4] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B *et al.* Computational Ocean Acoustic, AIP series in Modern Acoustic and Signal Processing. New York: AIP Press, 1994
- [5] Robinson A R, Abbot P A, Lermusiaux P F J *et al.* Transfer of Uncertainties through Physical-acoustical-sonar End-to-end Systems: A Conceptual Basia. In: Impact of Littoral Environmental Variability on Acoustic Predictions and Sonar Performance (Eds. Pace and Jensen). Kluwer Academic Publishers, 2002
- [6] Abbot P A, Celuzza S, Dyer I *et al.* IEEE J. Ocean. Eng., 2003, 28(2): 192
- [7] Duda T F, Lynch J F, Newhall A E *et al.* IEEE J. Ocean. Eng., 2004, 29(4): 1264
- [8] Holland C. Intra and Inter-regional Geoacoustic Variability in the Littoral. In: Impact of Littoral Environmental Variability on Acoustic Predictions and Sonar Performance (eds. Pace N, Jensen F). Kluwer Academic Publishers, 2002
- [9] Lepage K D, Holland C, Goff J A. J. Acoust. Soc. Am., 2003, 114(4): 2311
- [10] Thode A. J. Acoust. Soc. Am., 2004, 115(6): 2824
- [11] Badiey M, Katsnelson B G. J. Acoust. Soc. Am., 2005, 117(2): 613
- [12] Heaney K D, Murray J J. J. Acoust. Soc. Am., 2009, 125(3): 1394
- [13] Sha L, Nolte L W. J. Acoust. Soc. Am., 2005, 117(4): 1942
- [14] Sha L, Nolte L W. J. Acoust. Soc. Am., 2005, 117(4): 1954
- [15] Finette S. J. Acoust. Soc. Am., 2006, 120(5): 2567
- [16] James K R, Dowling D R. J. Acoust. Soc. Am., 2005, 118(5): 2802
- [17] Shorey J A, Nolte L W, Krolik J L. J. Comput. Acoust., 1994, 2: 285
- [18] 李启虎. 声呐信号处理引论. 北京: 海洋出版社, 2000
- [19] Richardson A M, Nolte L W. J. Acoust. Soc. Am., 1991, 89: 2280
- [20] Bucker H P. J. Acoust. Soc. Am., 1976, 59: 368

## 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](mailto:optics@goldway.com.cn)