

【引用格式】陈涛. 充分利用海洋环境提升声呐装备性能的研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(2): 156-163.

充分利用海洋环境提升声呐装备性能的研究

陈涛

(中国人民解放军 91966 部队, 北京 100036)

摘要 声呐装备的性能发挥与海洋环境密切相关。研究海洋环境对声呐装备的影响, 积极推动环境适配型声呐装备的发展, 对于综合利用水下探测和通信手段, 提升我国水下信息化能力具有重要意义。着重分析典型海洋环境和过程对声呐性能的影响, 包括不规则海底边界、海水的介质特性以及多尺度海洋动力过程, 通过算例对比说明环境效应对声呐的影响。进而, 针对声呐装备的使用和发展, 围绕环境适应与适配提出相关建议与措施。

关键词 海洋环境; 声呐装备; 性能

中图分类号 TM33

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2024)02-0156-08

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.02.003

Research on Improving Sonar Performance by Making Full Use of Marine Environment

CHEN Tao

(No. 91966 Unit of PLA, Beijing 100036, China)

Abstract The performance of sonar equipment is closely linked to marine environment. Research on the influences of the marine environment on sonar equipment and actively promoting the development of environmental adaptive sonar equipment are of great significance for comprehensive utilization of underwater detection and communication means, as well as for enhancement of our capabilities in underwater information technology. This paper focuses on analyzing the influences of typical marine environment and processes on sonar performance, including irregular seabed boundaries, seawater properties, and multiscale ocean dynamical processes. Finally, suggestions on environmental adaptation are put forward.

Key words marine environment; sonar equipment; performance

0 引言

海洋信息是认知、保护和充分利用海洋的基础, 也是各海洋强国竞相争夺的核心技术高地。声波是目前已知的唯一一种能在海洋中远距离传播的能量形式, 它是海洋探测、通信、导航和测量的主要信息传递方式^[1]。然而, 海洋是一个复杂

多变的环境, 海面和海底的不平整性、海洋内部的不均匀性和多变性对声波的水下传播有着显著影响。因此, 水下声传播和声场分布的规律非常复杂, 这也导致了声呐装备性能的发挥与环境密切相关^[2]。因此, 研究海洋环境条件对声呐性能的影响规律, 对合理使用装备、充分发挥装备性能以及提高水下信息化能力具有十分重要的意义。

收稿日期: 2023-10-17

作者简介: 陈涛 (1964-), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事水声工程方向研究。

1 海洋环境对声呐性能的影响

复杂多变的海洋环境,包括海底地形和地貌造成的不规则性、海底底质变化引起的空间不均匀性,海洋内部的内波和涡旋等海洋动力过程导致了海水介质的不均匀性。这些不均匀性使得海水中的声速场、声传播的顶底边界条件呈现出时空变化,进而引发声场中的复杂现象,如多途、弥散和起伏等,海洋环境的复杂变化将显著影响声呐系统的性能^[3-5]。

1.1 不平整边界及其声学特性对声呐性能的影响

海洋环境的复杂性首先表现在其具有复杂多变的边界,包括上方可能波涛汹涌的海面和下方不规则的海底,以及不同声学特性的海底底质^[6-9]。声信号传播过程中发生的反射、散射受到海底、海面边界条件的影响,海底和海面的不规则性严重影响了声波的传播规律。例如,海底山脉会导致复杂的声波折射、散射和衍射效应^[10],而急剧变化的地形会导致声场分布特征的复杂性和声影区效应的加剧。海底斜坡也可以引发复杂的声波泥流效应^[11]等。图 1 给出了以 5 km 深海不同海底地形声学传播损失 (Transmission Loss, TL) 模型计算结果,由于海底山的影响存在 (图 1 (b)),会聚区和影区的分布规律发生了显著变化。图 2 中给出了上述 2 个海区的声传播损失模型计算结果与实测结果对比,结果表明在 300 m 海深接收条件下,利用深海会聚区 (图 2 (a)),具有 90 dB 的优质因数的声呐最远可在 210 km 外检测到目标。然而,如果存在高度约为 4 km 的海底山脉情况下 (图 2 (b)),声呐的最远检测距离仅为 30 km。

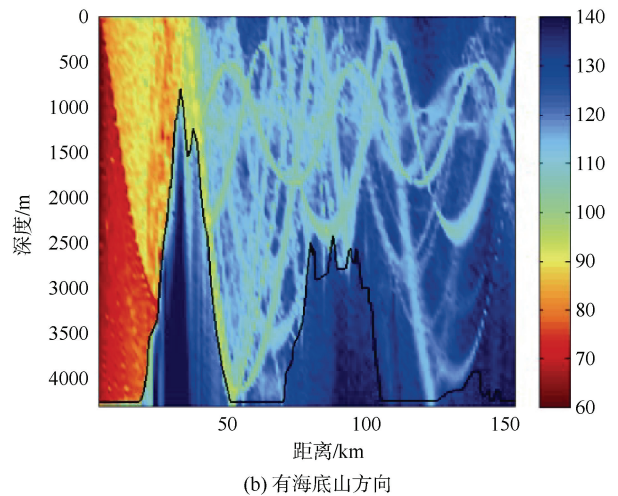
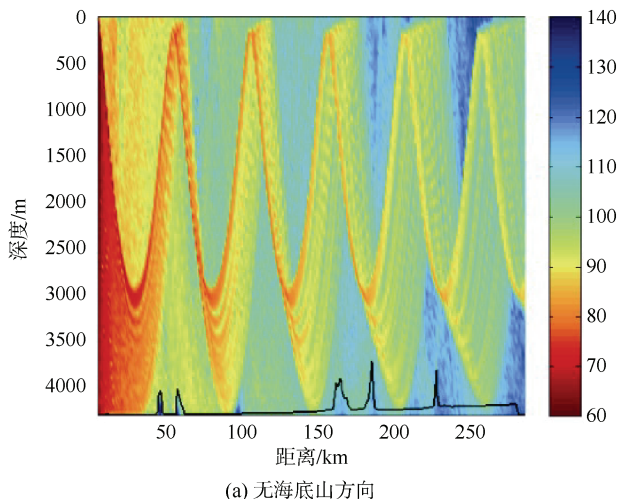


图 1 同样海深不同海底地形下的声传播损失模型计算结果

Fig. 1 Simulation results of transmission loss under different seabed terrains at same depth

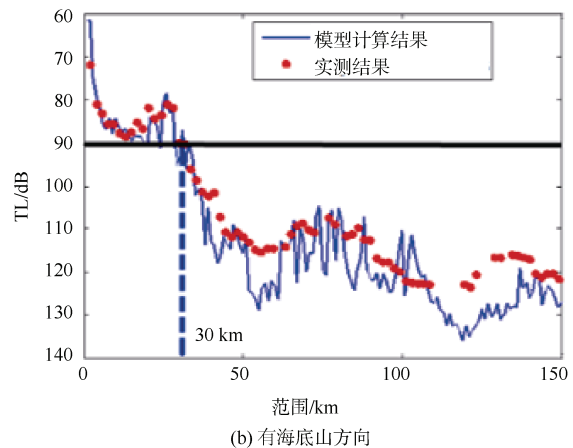
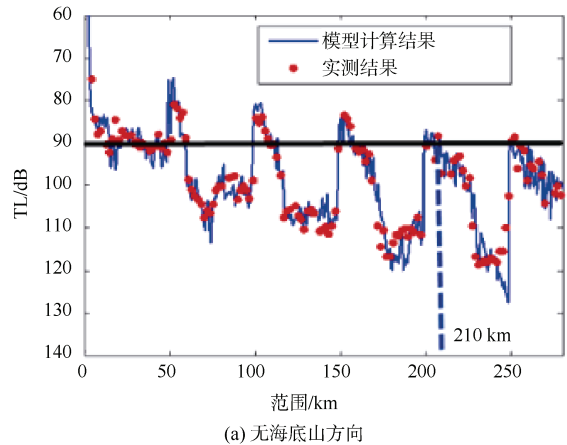


图 2 实测声传播损失与模型计算结果比较

Fig. 2 Comparison between measured transmission loss and simulation results

海底底质的声学特性同样会显著影响声波传播规律。通常海底底质分为 9 类:粗砂、细砂、极

细砂、粘土质砂和粉砂质砂、砂质粉砂、粉砂、砂-粉砂-粘土、粘土质粉砂、砂质粘土和粉砂质粘土，每一种底质对声波都有不同的衰减系数^[12]。随着底质从硬到软的变化，声波的衰减系数逐渐增加。图 3 中给出了在海水具有等声速剖面的条件下，细砂底、泥砂底和泥底的声传播损失仿真算例，随着海底底质的逐渐变软，传播损失也依次增大，对应具有 76 dB 优质因数的声呐系统的探测距离分别为 64 km、33 km 和 22 km。

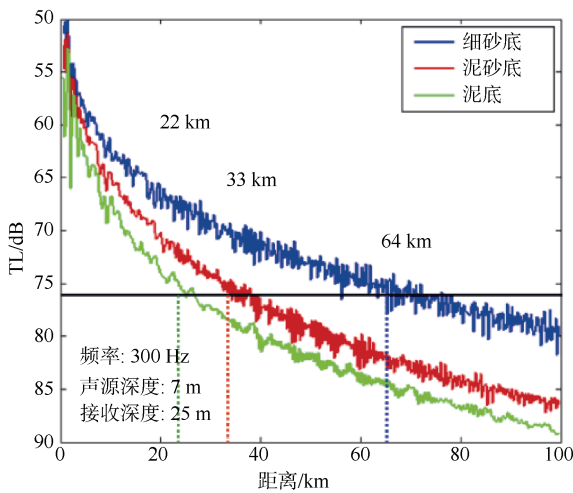


图 3 等声速剖面条件下不同底质对水声传播的影响
Fig. 3 Influences of seabed sediment on sound propagation under same sound speed profile condition

1.2 海水理化性质及声速分布对声呐性能的影响

尽管海洋中声传播规律复杂，但声波总是向声速较低的方向弯曲，这是声传播的基本定性规律。因此，声速剖面的分布会严重影响声呐系统的性能。

1.2.1 典型浅海春夏水声传播特性对比

在浅海区域，通常存在典型的冬季等温层和夏季负梯度或负跃变层分布。海水对夏季阳光热量吸收形成了声呐的“午后效应”，就是声速剖面对声呐性能影响的典型例子。这一现象表现为声呐系统在午后出现性能下降，其原因在于午后海洋表层形成了负梯度分布水层，造成了声线迅速弯曲指向海底影响了小掠射角声线的传播^[13-14]。图 4 给出了同一浅海区域，由于冬季和夏季声速剖面分布的造成传播损失衰减上的差异，同一声呐在冬季和夏季性能之间存在巨大差异，冬季作用距离为 42 km，而夏季仅为 19 km。

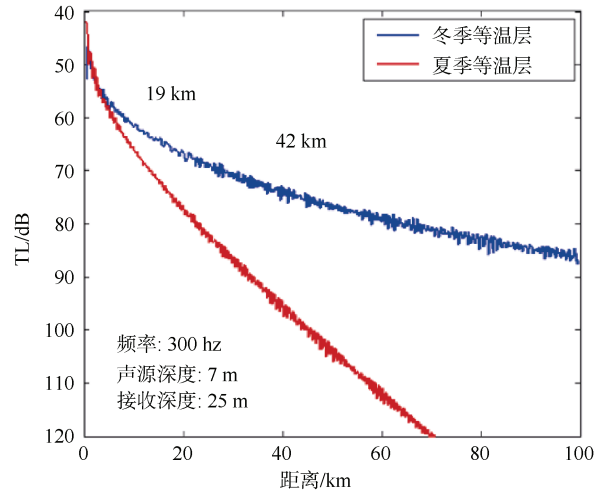


图 4 浅海水文冬夏季对声传播的影响
Fig. 4 Sound propagation characteristics in shallow sea during winter and summer

1.2.2 典型深海传播效应分析

在深海海域，通常存在具有 3 层结构的声速剖面分布^[15]。首先是表面混合层，它在静压力的作用下形成，具有弱正梯度的声速分布，形成了表面声道。表面声道下面是主温跃层和深海等温层，构成深海声道^[16]。在深海声道中，当接收位于声道轴附近时，可以接收目标泄露在深海声道波导中远程传输的信号。然而，当接收远离声道轴并位于浅水区时，会形成会聚区和声影区交替出现的现象。在会聚区内，声呐可以探测到目标，而在声影区内则无法探测到目标，声影区的存在形成声呐探测的盲区。

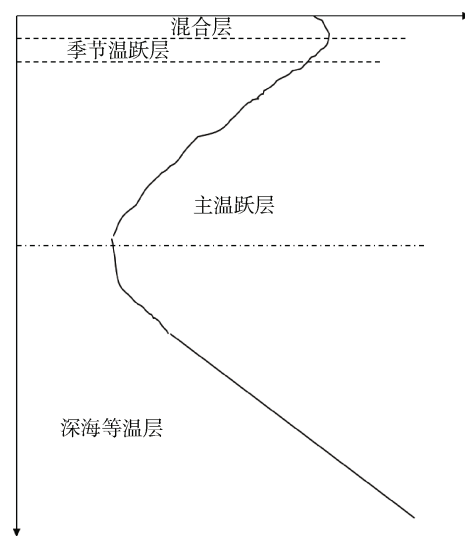


图 5 典型深海声速剖面
Fig. 5 Typical deep sea sound velocity profile

图 6 给出了同样声速条件下(图 5 所示典型深海声速剖面),当声源处于声道轴和表层情况下的可探测区域,可以看到声道轴的存在导致声信号可远程传输,而声源若处于表层,呈现明显的影区、会聚区交替现象。

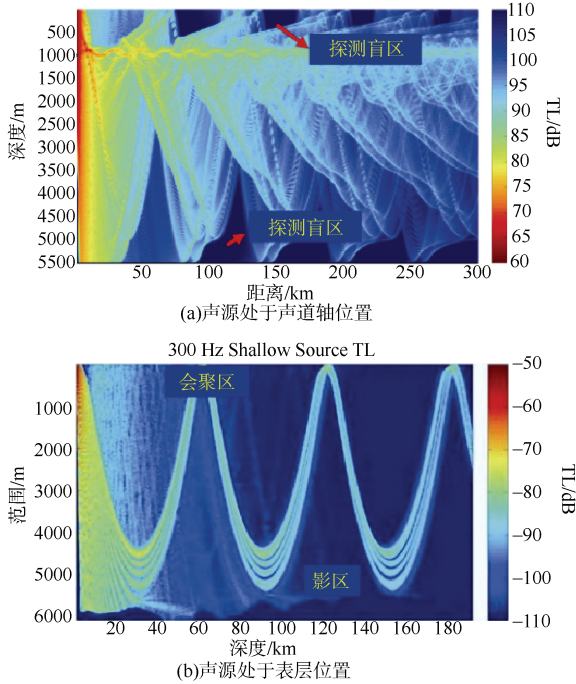


图 6 深海声源深度对声传播的影响

Fig. 6 Influence of sound source depth in deep sea on sound propagation

1.2.3 季节与深度联合影响下的传播损失分析

某海垂直温度分布主要以垂直均匀型、正温型和逆温型为主,其中垂直均匀型现在 11 月份到次年 2 月份,2-4 月份以逆温型为主,5-11 月份以正温型为主;而盐度主要表现为垂直均匀型和正盐型,其中,垂直均匀型出现在 10 月份到次年 2 月份,正盐型出现在 2-9 月份。

影响声速分布因素的主要是介质的温度和盐度,以某海中部一处穿过海外陆架、陆坡和冲绳海槽和大陆架区域的海域为例,根据上文分析可知,在不同的季节下,东海温度-盐度分布主要有 4 种情况,恒温恒盐型、正温恒盐型、逆温正盐型和正温正盐型,根据经验公式,其对应的声速梯度如图 7 所示。

当声源频率为 200 Hz 时,设置发射深度 100 m,当接收深度为 100 m 时该海域在不同季节下不同声速梯度的传播损失比较如图 8 所示。

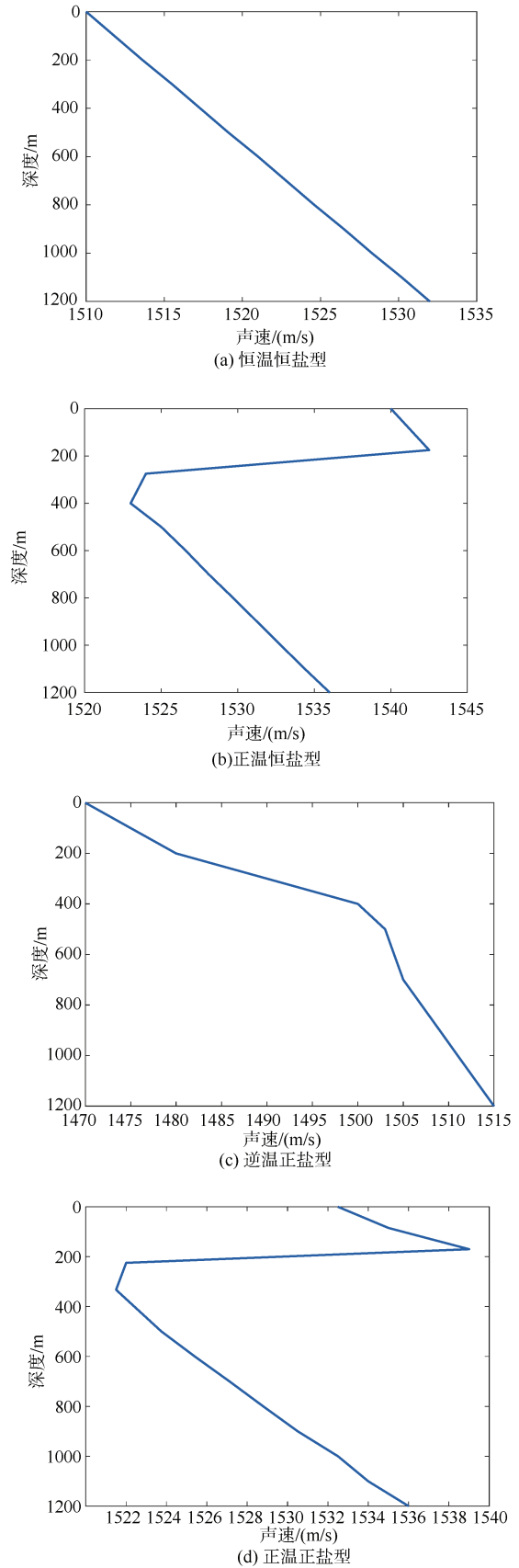


图 7 不同季节的声速梯度

Fig. 7 Sound speed profiles in different seasons

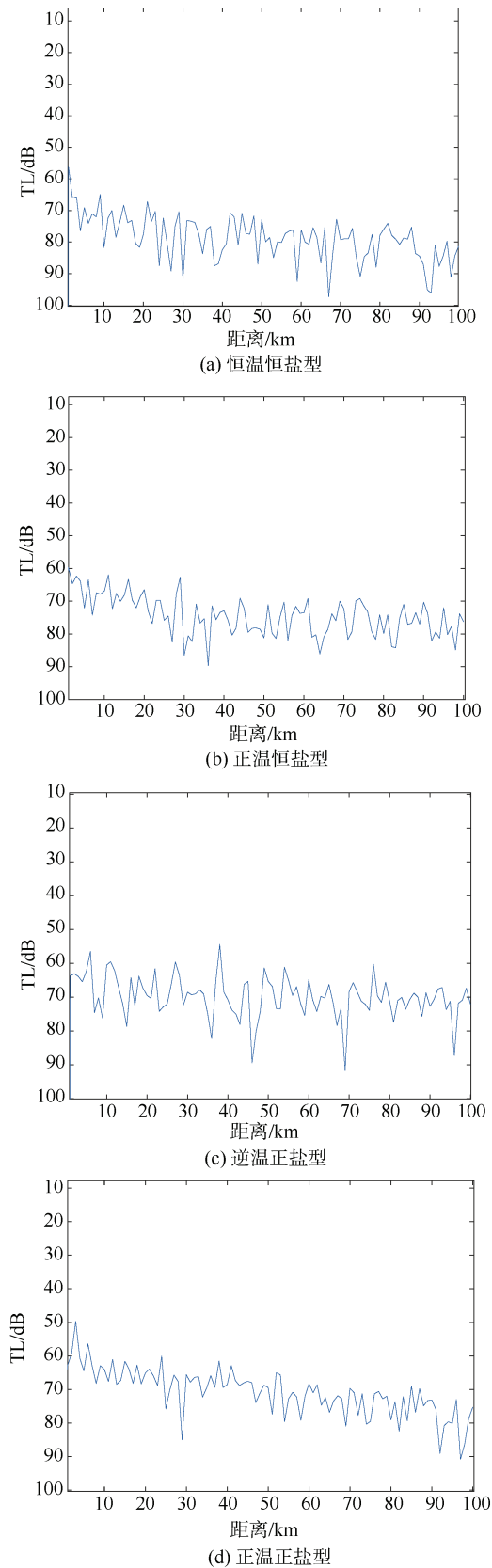


图 8 不同声速梯度的传播损失
Fig. 8 Transmission loss of different sound speed gradients

从以上各图可以看出,同一海域在不同季节下的传播损失有较大的差异,其中逆温正盐型的传播损失波动最大,正温恒盐型的传播损失波动较为平缓。受到传播损失波动影响,声呐装备在使用效果方面也会呈现出不一致、不稳定等效果。

在图 8 (d) 声速剖面下,同样设声源深度为 200 m,接收深度分别为 10 m, 200 m, 500 m 下传播损失算例结果如图 9。

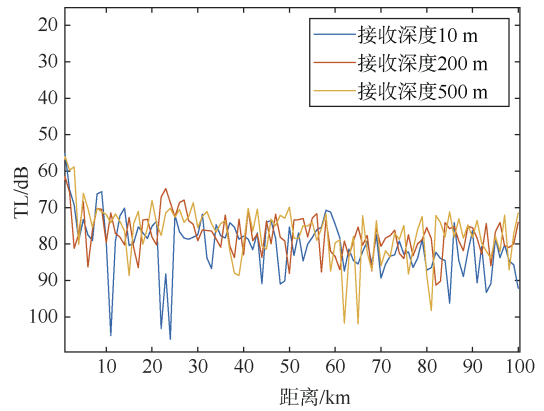


图 9 不同声源深度的传播损失
Fig. 9 Transmission loss at different depths of sound sources

从图 9 可以看出,当接收平台所处深度发生变化时,传播损失会发生较大变化,越接近海面干涉起伏效应越显著,起伏越剧烈,部分点位传播损失相差高达 30 dB。意味同样装备所处同一海域下,探测性能受深度要素影响存在较为强烈的起伏。

1.3 多尺度海洋动力过程对声呐性能的影响

海洋中存在着众多复杂的海洋动力过程,这些过程不断改变海水介质条件变化,导致声速分布的时空瞬态变化,进而引发声场的复杂变化和声呐性能的不可预测性。在已知的大中尺度海洋动力现象中,内波,特别是孤立子内波和中尺度涡对声呐性能的影响较为显著^[17]。

孤立子内波在我国南海北部表现出极高的活跃性,可以在海洋中形成温度和密度的陡峭梯度,对水下航行器构成巨大威胁。孤立子内波会导致声场出现剧烈的波动,声波在传播过程中遇到海洋内波时,会产生复杂且剧烈的波动现象。强烈的内波可引发 20~40 dB 的声场不均匀性,从而导致声呐系统性能严重下降。

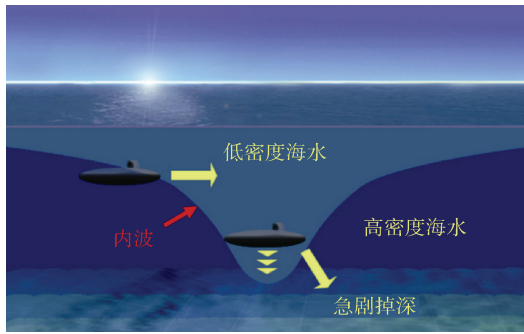


图 10 孤生子内波-水下断崖

Fig. 10 Soliton internal waves-underwater cliffs

中尺度涡广泛分布于世界各大洋，特别是在大洋环流两侧。中尺度涡可以分为 2 种类型：一种是顺时针旋转的反气旋式中尺度涡，其涡中心温度高于周边水域，因此也称为暖涡；另一种是逆时针旋转的气旋式中尺度涡，其涡中心温度低于周边水域，也称为冷涡。图 11 中，分析了冷涡的声波辅聚和暖涡的声波辅散效应。通常认为，强烈的中尺度涡会导致 20~30 dB 的声场不均匀性，严重影响声呐系统的性能。

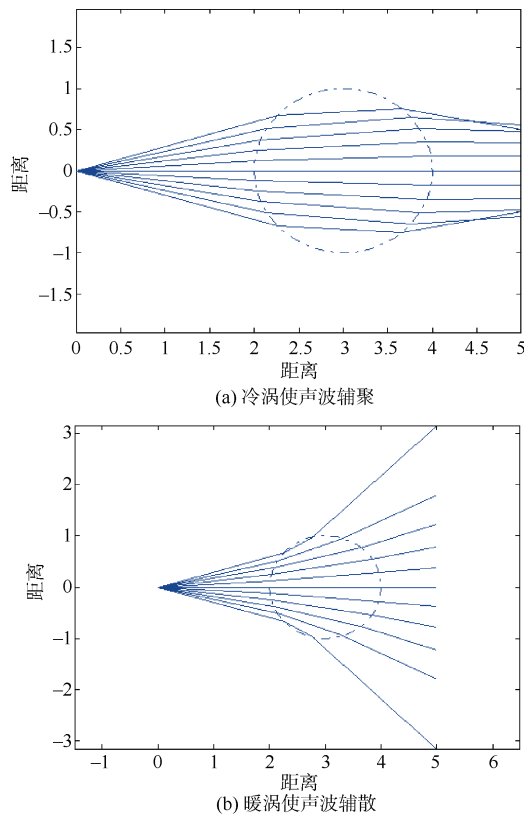


图 11 中尺度涡对声波的作用

Fig. 11 Effects of mesoscale eddies on sound waves

2 利用海洋环境提升声呐性能效果分析

以某区域内海洋环境噪声场条件下的水声通信声呐作用距离为例，分析充分利用海洋环境对声呐性能提升的助益。

基本通信声呐方程为

$$SL - TL - (NL - DI) = DT$$

式中：SL 是发射换能器的声源级；NL 是噪声级；DI 是指向性指数；TL 是传播损失；DT 是检测阈。根据声呐方程可以对通信距离进行预估。

系统主要工作的在某海域，其区域环境特点为海表下方有约 50 m 厚度的等温层，受压力作用声速正梯度分布。50~200 m 受温度等因素影响声速呈负梯度分布。已知发射换能器被固定在深度为 20 m 位置，该区域的声速剖面图和声传播示意图如图所示。

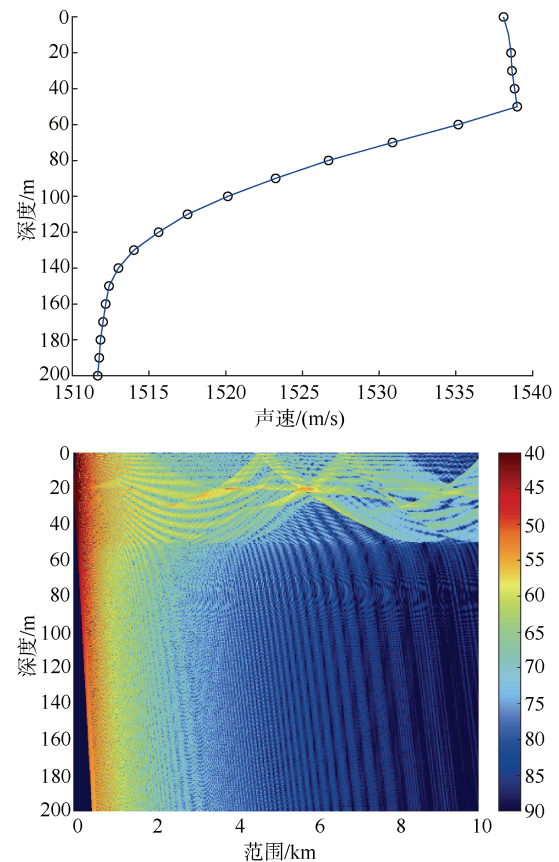


图 12 某区域声场分析结果

Fig. 12 Analysis of acoustic field in certain sea area

发射换能器的声源级 $SL=190$ dB，噪声级 $NL=65$ dB，采用无指向性的水听器接收信号，指向性指数 $DI=0$ ，检测阈 $DT=10$ dB，通信频段中心

频率为 14 kHz, 接收机带宽 3 kHz。计算其优质因数公式如下:

$$FOM=SL-(NL-DI+DT)$$

经过计算优质因数为 80 dB, 通信声呐优质因数为允许的最大单程传播损失。对当前海域进行声场分析, 比较接收端布放深度为 40 m 和 140 m 条件下的传播损失, 如图 13 所示。

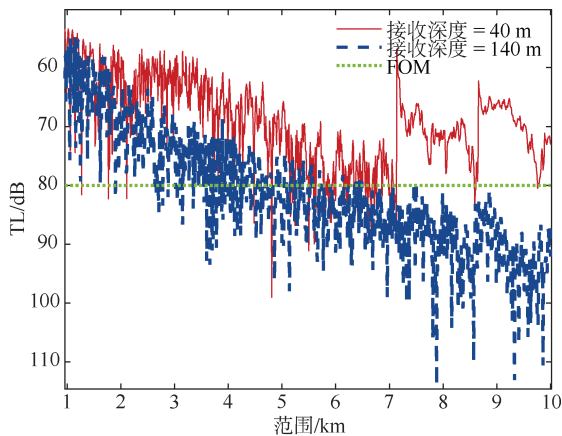


图 13 接收端布放深度不同时的传播损失
Fig. 13 Calculation results of transmission loss for hydrophones at different depths

将接收端布放在 140 m 深度处时, 通信距离约在 4~6 km。充分利用海洋环境, 将接收端布放深度更改为 40 m, 通信距离可达到不小于 10 km。证明通过提前对声呐设备工作区域的声场进行测量、估计和分析, 充分利用海洋环境, 有助于提升声呐设备性能。

3 声呐装备应用的措施与建议

3.1 充分利用海洋环境, 从适应环境到利用环境发挥声呐装备的使用效能

我国周边的大部分海域包括典型的浅海和深海区域, 还有少部分是过渡海域、岛礁等复杂环境区域, 声波传播在这些区域变得相对复杂^[18], 因此通信和接收平台的位置需要经过精心策划。

3.1.1 针对不平整的海底边界

以大陆斜坡海区水下通信通联为例, 我方的水声通信应尽量避免跨越斜坡进行发射和接收, 而应选择沿着等深线的方向进行通信, 以规避潜在问题。在浅海大陆架区域, 我方也要避免通信链路穿越衰减系数较高的软泥海底区域。在探测中, 利用

斜坡, 接收设备“坐深望浅”, 增加探测距离。在不同的海底地貌情况下, 合理规划和布设设备至关重要, 成功攻防在于正确的应用。

3.1.2 针对海水介质特性

以通信传输为例, 应尽量避免通信发射和接收穿越温跃层, 最好使它们都位于同一侧以减少干扰。从探测角度, 接收设备尽可能下放到表面声道以下, 有利于远程探测。在深海环境下, 根据装备性能和布放条件, 充分利用深海反弹波、可靠声路径、声道轴传播等效应提高探测效能。

3.1.3 针对多尺度海洋动力过程

以内波为例, 我们应尽量避免通信设备位于内波存在的深度范围内。如果我们的活动海域位于海洋涡旋中, 声呐设备的布设位置应根据目标位置相对于涡旋的位置来选择。如果涡旋是冷涡, 那么声呐设备最好远离涡旋中心。而如果涡旋是暖涡, 建议将设备布设在涡旋中心附近。

3.2 深化开展新技术研究, 发展环境适配的新型声呐装备

深化水声物理学、海洋环境学等基础研究, 结合平台机动能力和设备布设调整能力, 充分发挥环境适应、适配和利用能力, 积极发展适应环境的声呐装备。这将促进新型智能化和信息化攻防力量的发展。这对于提升水下信息化能力具有重要意义。例如, 近年来, 基于基础研究成果利用声道轴的低频远程水声通信装备的研发应用^[19], 增强了对水下远距离通信通联能力。随着技术迭代发展, 超远程通信的环境稳健性和环境适应性能力将逐步提升。

重视复杂海洋环境条件下的水声传播研究, 发展精细化海洋模式与三维声场联合预报模型, 加强模型预报精度的验证。开展全球海洋声学基础参数数据库的建设, 发展全球海洋环境和声场特性演变快速获取手段。基于高精度声场模型和环境数据库, 不断完善声场效应与声呐效能评估方法及辅助决策系统, 以数据支持下的算力提升环境适应性, 有望大幅提升声呐装备应用实际效能。

顺应海上无人化、信息化和智能化发展, 力争在水下预警探测、通信组网、导航定位、环境监测、长航程 UUV 等关键技术方面取得突破; 大力发展海洋环境与信息技术, 取得关注区域的信息单向透

明优势, 支撑新型智能化、信息化力量, 整体提高我国海洋信息化能力, 形成全局优势。

4 结束语

海洋环境对声呐装备性能和使用具有巨大影响。为满足未来水下探测和通信的需求, 我们不仅在开展现有声呐装备对海洋环境的适应性研究方面取得进展, 还迫切需要大力发展精细化的海洋模型与三维声场联合预报模型, 研制适应环境的体系化、无人化、信息化和智能化新型声呐装备, 以实现我国水下信息化能力的显著提升。

参考文献

- [1] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1993.
- [2] 张仁和. 水声物理、信号处理与海洋环境紧密结合是水声技术发展的趋势[J]. 应用声学, 25(6): 325-327.
- [3] 刘今, 彭朝晖, 张灵珊, 等. 浅海涌浪对表面声道声传播的影响[J]. 物理学报, 2021, 70(5): 189-198.
- [4] 李伟哲, 韩笑, 曹然, 等. 深海 RAP 下的水声信道特性与通信技术研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(5): 397-406.
- [5] 陈友淦, 许肖梅, 张兰, 等. 浅海水声信道模型差异对纠错码性能分析的影响[J]. 兵工学报, 2013, 34(11): 1404-1411.
- [6] 王鲁军, 彭朝晖, 袁延艺, 等. 斜坡海底对声场水平纵向相关性影响[J]. 声学技术, 2011, 30(4): 311-315.
- [7] 邵炫, 孙超. 陆架斜坡海域信号水平纵向相关特性实验研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学. 2016, 46(9): 094307.
- [8] 谢磊, 孙超, 刘雄厚, 等. 陆架斜坡海域声场特性对常规波束形成阵增益的影响[J]. 物理学报, 2016, 65(14): 144303-1-144303-11.
- [9] 胡治国, 李整林, 张仁和, 等. 深海不平海底对声场水平纵向相关性的影响[J]. 声学学报, 2016, 41(5): 758-767.
- [10] 李文. 海底山环境下声传播规律研究[D]. 北京: 中国科学院声学研究所, 2016.
- [11] 郭兴森, 年廷凯, 范宁, 等. 低温环境下南海海底泥流的流变试验及模型[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(1): 161-167.
- [12] 金翔龙. 海洋地球物理研究与海底探测声学技术的发展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1243-1249.
- [13] 苏晓星, 李风华, 简水生. 浅海低频声场的水平纵向相关性[J]. 声学技术, 2007, 26(4): 579-583.
- [14] 宋军. 浅海远程声信道建模仿真与试验研究[M]. 武汉: 中国舰船研究院, 2013.
- [15] 周士弘, 张仁和, 陶晓东, 等. 深海声场的垂直相干特性[J]. 自然科学进展, 1998, 8(3): 342-349.
- [16] 张风珍, 李桂娟, 胡文帅, 等. 利用深海回声多途结构匹配估计目标深度[J]. 声学学报, 2022, 47(6): 789-799.
- [17] 宋俊, 李风华, 胡永明. 孤子内波对声场水平纵向相干特性的影响[J]. 声学技术, 2007, 26(2): 199-205.
- [18] 秦继兴, 张仁和, 骆文于, 等. 大陆坡海域二维声传播研究[J]. 声学学报, 2014, 39(2): 145-153.
- [19] 郭威, 杨德森. 声波导中空间类自弯曲波束构建研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(8): 1083-1088.

(责任编辑: 张曼莉)