

中沙海域可靠声路径声传播特性及信道分析

殷敬伟^{1,2,3}, 李伟哲^{1,2,3}, 韩笑^{1,2,3}, 魏笠⁴

(1. 哈尔滨工程大学 水声技术全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学 极地海洋声学与技术应用教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 哈尔滨工程大学 水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 4. 哈尔滨工程大学 青岛创新发展中心, 山东 青岛 266400)

摘要: 为构建海洋浅表层与近底层间的高效跨层通信系统, 本文基于南海中沙海域非完全深海声道环境下的全海深声传播实验数据, 探究了可靠声路径区域在不同声源深度、接收深度和传播距离条件下的信道特性及其物理形成机制。结果表明: 当声源深度位于海底附近共轭深度对应的声速层时, 可实现类似完全深海声道的远距离直达声传播; 可靠声路径区域信道呈现明显的分簇稀疏特征, 且不同簇之间具有显著的时变性差异; 信道多径时延随接收深度和传播距离的增加呈减小趋势; 此外, 较浅声源深度对应的信道结构更为简单, 有利于通信系统优化。本研究不仅揭示了非完全深海声道环境下跨层声传播的物理机制, 同时为中沙海域可靠声路径区水声通信系统的设计与性能优化提供了实验依据和理论参考。

关键词: 可靠声路径; 中沙海域; 深海; 水声信道; 声传播; 直达声区域; 多径特性; 信道时变性

DOI: 10.11990/jheu.202506052

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1390.U.20250701.1145.008>

中图分类号: O427.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2025)08-1475-10

Characterization of acoustic propagation and channel analysis in the reliable acoustic path zone of the Zhongsha Sea area

YIN Jingwei^{1,2,3}, LI Weizhe^{1,2,3}, HAN Xiao^{1,2,3}, WEI Li⁴

(1. National Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Key Laboratory for Polar Acoustics and Application of Ministry of Education (Harbin Engineering University), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150001, China; 3. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 4. Qingdao Innovation and Development Center of Harbin Engineering University, Qingdao 266400, China)

Abstract: To establish an efficient cross-layer communication system between the ocean's near-surface and near-bottom layers, this paper systematically investigates the channel characteristics of the reliable acoustic path region under varying source depths, receiver depths, and propagation distances, based on full-depth acoustic propagation experimental data in the non-fully developed deep-sea sound channel environment of the Zhongsha region in the South China Sea. Furthermore, the underlying physical mechanisms are thoroughly analyzed. The results revealed the following: Long-distance direct sound propagation similar to that under the completely deep-sea sound channel can be realized when the sound velocity at the sound source depth has a conjugate depth near the seafloor. The channel in the RAP zone exhibits a clear split-cluster sparsity characteristic, and there is a notable difference in the time variability between different clusters. The multipath delay of the channel in the direct-arrival zone decreases with an increase in the receiving depth and the receiving distance. Moreover, experimental results showed that in the RAP zone, shallower source depths correspond to simpler channel structures. This study not only reveals the physical mechanism of cross-layer sound propagation in the noncomplete deep-sea sound channel environment but also provides an experimental basis and a theoretical reference for the design and performance optimization of the underwater acoustic communication system in the RAP zone of the Zhongsha waters.

Keywords: reliable acoustic path; zhongsha sea area; deep-sea; underwater acoustic channel; sound propagation; direct sound zone; multipath characteristics; channel time-varying characteristics

深海是地球上最为未知的区域, 其蕴藏着人类

社会未来发展所需的各种战略资源和能源, 是我国的战略新疆域。水声技术在深海环境观测、深海资源开发和深海安全保障等领域发挥着重要作用。随着水声技术的不断发展以及深海开发力度的不断加大, 中远程距离内的水声目标探测以及信息传输已经成为了当前各国研究的热点内容^[1]。然而, 受复杂

收稿日期: 2025-05-05.

网络出版日期: 2025-07-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62422107, 62125104); 黑龙江省自然科学基金优秀青年基金项目(YQ2022F001); 哈尔滨工程大学博士研究生校长创新基金。

作者简介: 殷敬伟, 男, 教授, 博士生导师;

韩笑, 男, 教授, 博士生导师。

通信作者: 韩笑, E-mail: hanxiaol322@hrbeu.edu.cn.

海洋环境背景场以及声传播的影响,深海声传播存在大范围的影区,严重限制了声呐系统的作用距离^[2]。值得注意的是,深海声传输信道具有显著的空间异质性特征,这为基于声传播特性优化设计新型水声信息传输系统提供了创新思路。

作为深海典型声传播形式的一种,可靠声路径(reliable acoustic path, RAP)已经被提出很多年。假设某一海洋的临界深度存在且和海底之间存在深度余量,当声源或接收点位于临界深度和海底之间时其传播将遵循 RAP 声传播^[3]。深海 RAP 的“可靠性”主要体现在以下方面:声线以直达声为主,直达声结构稳定,受声速起伏和界面散射影响较小,传播损失低^[4-5];在临界深度以下环境噪声级低,尤其是低频段^[6]。在我国南海中沙海域,不存在临界深度,但是将声呐设备放在海底附近时,在近距离处的直达声区域也具有 RAP 的上述特性,也可将其作为 RAP 处理^[7-8]。本文将直达声区域和 RAP 区域放在一起讨论。

研究深海环境下的声传播规律是深海探测、定位以及信息传输的基础。早在本世纪初,美国就发现了 RAP 在声传播方面的优势,并依此建立了深海海啸灾害监测系统^[9],该系统利用 RAP 实现对海啸产生声波的观测。为了实现对安静型潜艇的探测,美国国防部依托 RAP 建立了分布式潜艇猎捕系统^[10],该系统将探测节点放置在极深的位置,从而实现了大范围海域的潜艇探测。为了进一步研究 RAP 的声传播特性,2009—2011 年美国先后在菲律宾海组织了 2 次全海深实验,在第 2 次实验中,美国布放了大规模的水声测量基阵,对深海水声环境进行了长达一年的连续观测,目前已有一些关于 RAP 的研究成果^[11],但并未被大量报道。

长期以来,受限于深海实验条件和技术手段的制约,我国在大深度全海深声场特性方面的实验研究相对匮乏,对于可靠声路径声传播特性的研究主要以仿真分析为主^[12-13]。近年来,随着国家深海战略的深入推进和科研投入的持续加大,国内学者在 RAP 领域的研究取得了显著进展。在 RAP 应用研究方面,杨坤德等^[14]利用 RAP 不同位置下直达声和海面反射声的互相关函数实现了单阵元目标的测距。段睿等^[15]分析 RAP 下声线的到达结构,利用直达声和海面反射声的时延差实现了对运动目标的定位。文献^[16]利用直达声线和海底反射声线造成的目标方位角差异实现了目标距离的估计。雷志雄等^[17]通过匹配 2 个不同深度水听器的互相关函数实现了 RAP 区域的被动定位。

然而,现有研究主要聚焦于 RAP 的探测与定位应用,针对其水声通信信道特性的系统性研究仍较

为匮乏。在深海 RAP 信道下,李栋等^[18]提出了一种基于向量近似消息传递的迭代接收机,通过蛟龙号在太平洋海域进行了验证;Shimura 等^[19]基于 RAP 信道利用判决反馈均衡器实现了 98.9 kbit/s 的有效数据传输。需要指出的是,这些研究仅局限于近距离的直达声区域,其信道结构相对简单。实际上,深海 RAP 区作为广域传播环境,其信道特性随传播距离和传播深度呈现显著的空间异质性。目前,国内关于深海 RAP 信道结构特征的研究仍处于起步阶段,特别是缺乏覆盖全海深范围的声传播实验数据支撑,这严重制约了深海远程水声通信系统的优化设计。

本文基于 2023 年 5 月在南海中沙海域(水深 4 300 m)开展的全海深声传播实验所获取的通信数据,系统研究了深海 RAP 区域的水声通信信道特性。通过设计多参数组合实验方案,重点研究了声源深度、接收距离和接收深度等对信道结构的综合影响。解析了不同到达时刻多径信号的构成机理及时空演化特征,揭示了 RAP 区信道特性随传播距离和接收深度的变化规律。此外,通过对比分析不同实验布放条件下的声传播特性,还提出了优化深海 RAP 区水声通信实验方案的技术建议。

1 2023 年南海中沙实验介绍

2023 年 5 月在南海中沙附近 4 300 m 海域进行了全海深接收的通信实验,实验场景如图 1 所示。接收端为全海深潜标设计,78 个自容式水听器分布在 288~4 279 m 水深范围,最上端为一个 32 元接收阵列。发射声源从船上部署,发射声源布放深度为 15 和 200 m,接收水平距离分别为 10、20、30 km,实验区域海底较为平坦,平均海深在 4 325 m 左右,海深变化如图 2 所示,实验期间海况约为 3~4 级,海面有较大浪花。

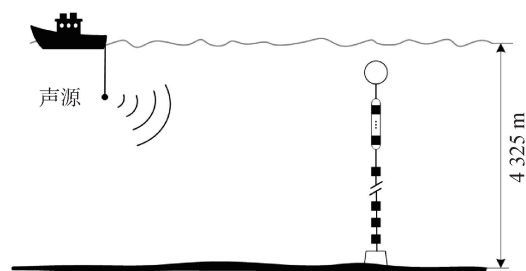


图 1 实验场景示意

Fig. 1 Experimental deployment

实验区域位于中沙南部,为典型深海声道环境,实验期间用 CTD 测量海水声速剖面,如图 3 所示。测量结果显示:声道轴大约位于 1 136 m 深度处,最小声速为 1 484 m/s,海面附近处海水声速为 1 540 m/s,海底附近的海水声速为 1 533 m/s,为典

型的非完全深海声道,即海面附近的海水声速大于海底附近的海水声速,海底附近海水声速在海面附近的共轭深度为 64 m。

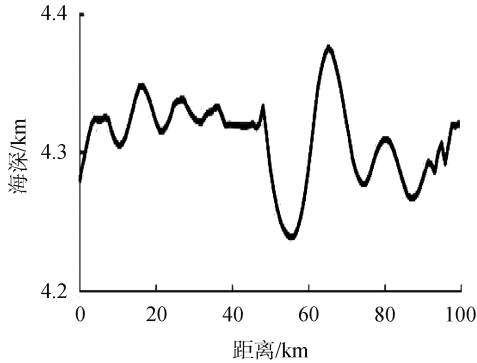


图 2 声传播方向上的海深

Fig. 2 Water depth along the sound propagation path

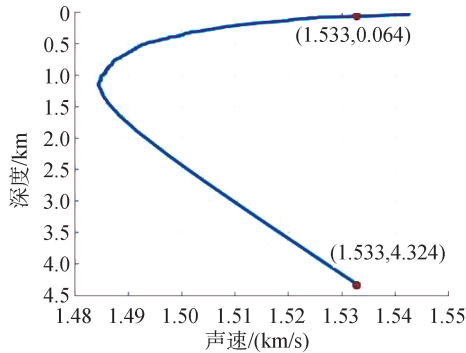


图 3 实验区域声速剖面

Fig. 3 Sound velocity profile in the experimental area

2 实验数据处理

为深入研究深海 RAP 区域的水声通信信道特性,本文考虑一个单载波时域均衡的水声通信系统。通信系统参数为:采样率 20 kHz,带宽 2 kHz,中心频率 3 kHz,调制方式 QPSK,传输符号长度 3 s,同步信号为 0.5 s 的线性调频信号,信号之间的保护间隔为 0.5 s。发送通信信号的时间序列如图 4 所示。

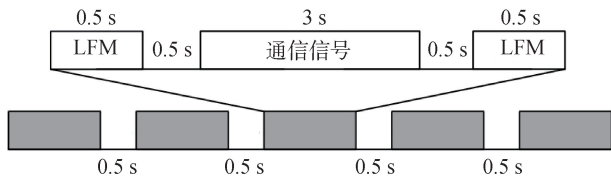


图 4 发射通信信号时间序列

Fig. 4 Transmitted communication signal time series

假设声源发送的通信信号序列为 $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N]^T$, 其中 N 为发送的通信符号个数。在接收端,水听器接收到的基带信号可以表示为:

$$y_k = \sum_{l=1}^L h(k, l)x_{k-l} + \omega_k \quad (1)$$

式中: y_k 表示在时刻 k 接收到的信号; L 表示信道的长度; $h(k, l)$ 表示在时刻 k 的信道冲击响应; l 表示第 l 个抽头; ω_k 是水听器在 k 时刻接收到的加性高

斯白噪声。假设其均值是 0,方差是 γ^{-1} ,当先前检测到的符号序列的持续时间小于信道相干时间时,可以近似认为 $h(k, l) \approx h(l)$ 。

然后,将式(1)对应的系统模型表示为矩阵形式,即:

$$y = Xh + \omega \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_N]^T, \\ h = [h(0) \ h(1) \ \dots \ h(L-1)]^T, \\ \omega = [\omega_1 \ \omega_2 \ \dots \ \omega_N]^T, \\ X = \begin{bmatrix} x_1 & 0 & \dots & 0 \\ x_2 & x_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_N & x_{N-1} & \dots & x_{N-L+1} \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (3)$$

基于上述建立的单载波时域均衡系统模型,可以采用水声信道估计算法对通信信道特性进行精确分析。本文选择估计性能更好地稀疏贝叶斯学习(sparse Bayesian learning, SBL)算法^[20]作为信道估计方法。

3 RAP 信道多径结构分析

3.1 声源深度 15 m

在中沙海域,由于海深较浅,临界深度不存在,因此不存在典型深海 RAP 区域。但此时将声呐装置放在海面附近时,海底附近也会形成一定范围的直达声区域,该直达声区域也可以当作 RAP 处理。声源深度为 15 m 时,利用射线声学仿真软件 Bellhop 射线模型^[21]仿真得到的声传播损失如图 5 所示,仿真中所用的海底声学参数为:声速 1 565 m/s,密度 1.6 g/cm³,吸收系数 0.3 dB/λ^[22]。根据 Snell 定律,声源位置发射的较大掠射角的直达声线在深海等温层传播时由于折射会向上弯曲,由于海深的限制,声源位置对应的声速不存在共轭深度,因此直达声在到达海底之前不会反转,从而经过海底反射造成能量衰减,此时海底附近的低传播损失区域最大 20 km 左右。

3.1.1 接收水平距离 10 km

当接收水平距离为 10 km 时,从图 5 可以看出直达声区域和声影区在深度上的分界线约为 2 200 m,在 2 200 m 以浅为声影区,在 2 200 m 以深为 RAP 区域。图 6 给出了 RAP 区域不同接收深度的多径信道结构,在这里仅考虑了第 1 组多途信道,因为在 RAP 环境下,只有第 1 组的多途能量高且稳定,在实际中更容易利用^[8,12]。需要说明的是,图 6 中不同颜色的曲线仅用于区分不同接收深度的信道结构,并无其他特殊含义。类似的处理方式也见于后图。

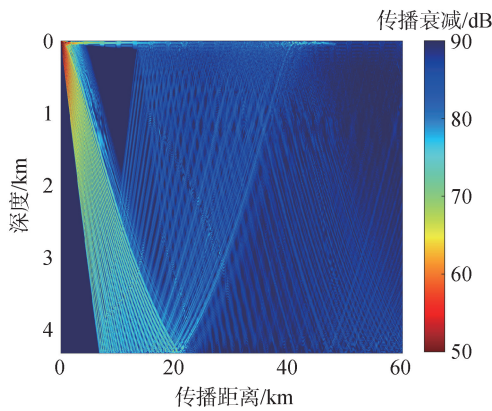


图 5 仿真计算声源深度 15 m 时的传播损失

Fig. 5 Transmission loss simulation results at 15 m source depth

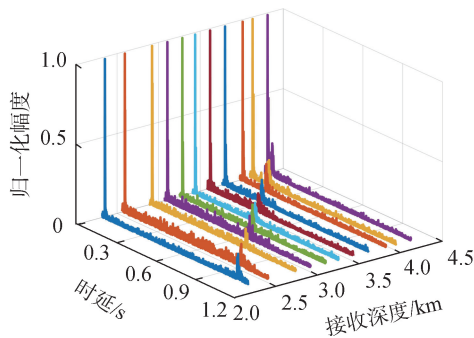


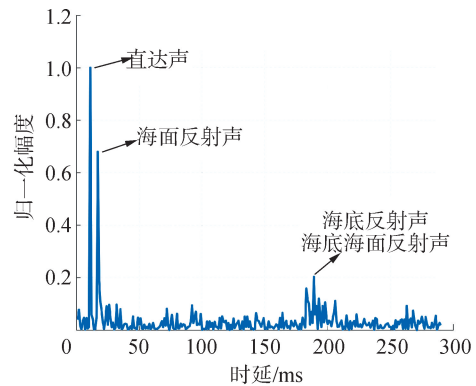
图 6 声源深度 15 m,接收距离 10 km 对应不同接收深度的多径信道结构

Fig. 6 Multipath channel structure at varying reception depths for 15 m source depth and 10 km range

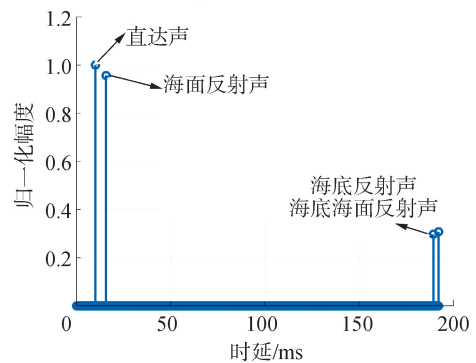
从图 6 可以看出,每个深度的信道都具有类似的结构,呈现明显的分簇稀疏特征,符合深海信道的基本特征^[23]。不同接收深度信道具有不同的时延差,随着深度的增加,信道时延差显著降低。以 3 979 m 为例,图 7(a) 给出了实测信道的多途信道结构,其中前 2 簇能量较高,分别为直达声和海面反射声;第 3 簇能量较低,主要由海底反射声和同时受海底海面反射的声线构成,与图 7(b) 中 Bellhop 理论计算的时间到达结构较为一致。当接收深度较浅时,直达声和海面反射声的传播路径长度显著低于海底反射声和海底海面反射声,因此 2 簇信道的时延差很大;当接收深度较深时,直达声和海面反射声的传播路径增加,而海底反射声和海底海面反射声的传播路径减少,此时 2 簇信道的传播时延差相差很少,对应的信道多途时延较短。

从图 6 可以看出,当声源布放较浅时,信道多径时延较长,尤其是接收深度在最浅的 2 321 m 时,多径时延超过 1 s,此时若保护间隔不足,会造成同步信号和通信信号之间的干扰,甚至会造成数据帧之间的干扰,严重影响通信系统的性能;在保证保护间隔的情况下,多径信道较长时,需要更高阶数和更为复杂的

信道均衡器,这也会大大增加通信系统实现的复杂度。图 7(a) 中的实测结果显示,海底反射声相对于直达声的归一化能量衰减可达 14 dB,当接收信噪比较高或通信信号调制阶数较低时,可以忽略经过海底反射的声线。图 8 给出了不同接收深度下不考虑海底反射声时的多径信道结构,在最浅的 2 321 m 的接收,直达声和海面反射声到达时刻十分接近,随着接收深度的增加,二者的时延差不断增加,这是因为较深的接收器接收到的直达声和海面反射声初始掠射角更大,此时二者的传播路径相差更大一些。



(a) 实验测量结果



(b) 理论计算结果

图 7 声源深度 15 m,接收距离 10 km,接收深度 3 979 m 对应多径信道结构

Fig. 7 Multipath channel structure at 3 979 m reception depth with 15 m source depth and 10 km range

3.1.2 接收水平距离 20 km

水平距离 20 km 位于 RAP 区域的边界处,其直达声区域在深度范围很小。在 20 km 处,直达声区域和声影区的分界深度在 3 950 m 左右,图 9 给出了不同接收深度的多径信道结构,和接收水平距离 10 km 类似,信道呈现明显的分簇结构,且随着接收深度的增加,不同簇信道之间的时延差逐渐降低。不同的是,20 km 处对应的声线初始掠射角较小,直达声、海面反射声的到达时刻十分接近,其多径时延差较小。在图 9 中,第 1 簇为直达声和海面反射声,二者到达时间十分接近,在基带通信符号的采样上二者接近重合,第 2 簇为海底反射声和海底海面反射声,二者的到达时刻也十分接近。

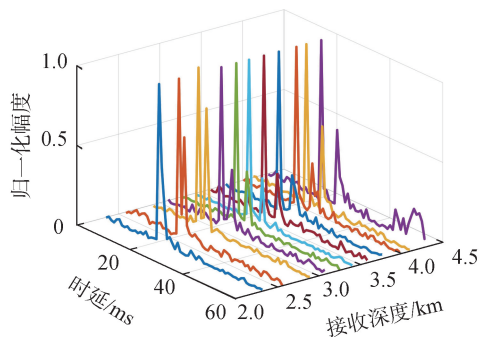


图 8 声源深度 15 m,接收距离 10 km 对应不同接收深度不考虑海底反射声时的多径信道结构

Fig. 8 Multipath channel structure at varying reception depths excluding seabed reflections (15 m source depth, 10 km range)

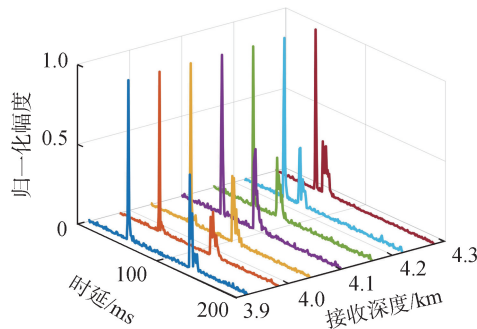


图 9 声源深度 15 m,接收距离 20 km 对应不同接收深度的多径信道结构

Fig. 9 Multipath channel structure at varying reception depths for 15 m source depth and 20 km range

图 10 给出了在 20 km 距离上 Bellhop 仿真得到的接收深度 4 219 m 的声线结构,可以看出,直达声和海面反射声的传播路径接近,其到达时刻接近,海底反射声和海底海面反射声的传播路径接近,略长于直达声,这与实验结果一致。

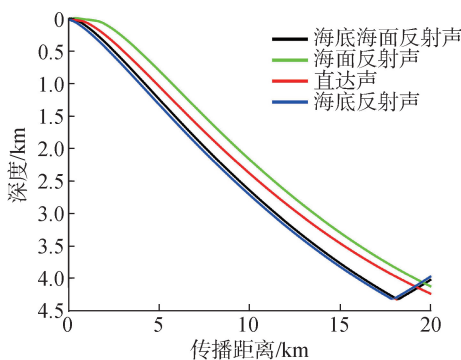


图 10 声源深度 15 m,接收距离 20 km,接收深度 4 219 m 对应仿真声线结构

Fig. 10 Simulated ray paths at 4 219 m reception depth with 15 m source depth and 20 km range

3.2 声源深度 200 m

图 3 的声速剖面显示,海底附近海水声速在海面附近的共轭深度约为 64 m,当声源布放位置深于

该深度时,声源位置在海底附近会存在共轭深度。此时由于深海等温层的存在,浅层声源发射的大掠射角的声线在向下传播的过程中会向上弯曲,根据 Snell 定律,当共轭深度存在的时候,较大掠射角的声线在共轭深度附近由于折射会不经海底作用转而向海面方向传播,此时在海底附近(共轭深度以下的深度余量处)形成较大范围的低传播损失区域。当声源深度为 200 m 时,仿真得到的声传播损失如图 11 所示(海底参数设置同图 5),此时海底附近低传播损失区域可以达到 30 km,在共轭深度处最远可以延伸到近 40 km 的范围。

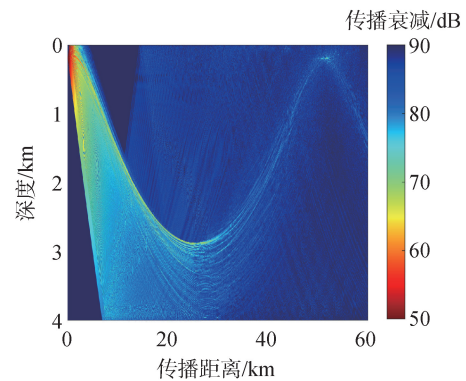


图 11 仿真计算声源深度 200 m 时的传播损失图

Fig. 11 Transmission loss simulation results at 200 m source depth

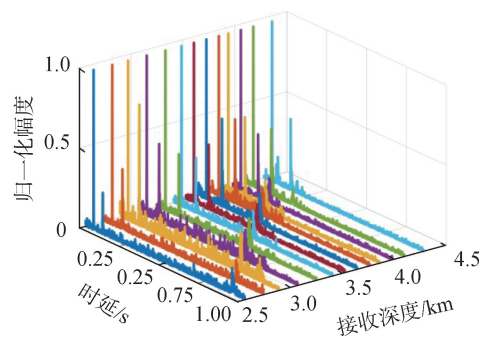


图 12 声源深度 200 m,接收距离 10 km 对应不同接收深度的多径信道结构

Fig. 12 Multipath channel structure at varying reception depths for 200 m source depth and 10 km range

3.2.1 接收水平距离 10 km

当接收水平距离为 10 km 时,直达声区域和声影区在深度上的分界线约为 1 650 m。同样地,仅考虑第 1 组多途,图 12 给出了不同接收深度对应的多径信道结构,和声源深度 15 m 的结果类似,信道呈现明显的分簇稀疏特征,随着接收深度的增加,信道多径扩展时延逐渐降低。图 13(a)给出了接收深度 3 859 m 时实测的多途信道结构,由于声源距离海面较远,各种声线的到达时刻差异性较大,信道分成了明显的 4 簇结构,其中第 1 簇为直达声,第 2 簇为海面反射声,第 3 簇为海底反射声,第 4 簇为同时经过海底和海面

反射的声线,其能量依次降低,与图 13(b)中 Bellhop 理论计算的时间到达结构较为一致。从图 12 可以看出,随着接收深度的增加,直达声和海面反射声的到达时延差越来越大,这是因为当接收深度较深时,直达声和海面反射声的掠射角也在增加,对应的传播距离增加,海面反射声传播距离增加的更多;相反,随着接收深度的增加,海底反射声的传播距离逐渐减小,因此其与直达声的时延差越来越小。特别地,在靠近海底的接收位置,由于传播路径更短,海底反射声较海面反射声更早到达,如图 14 所示。

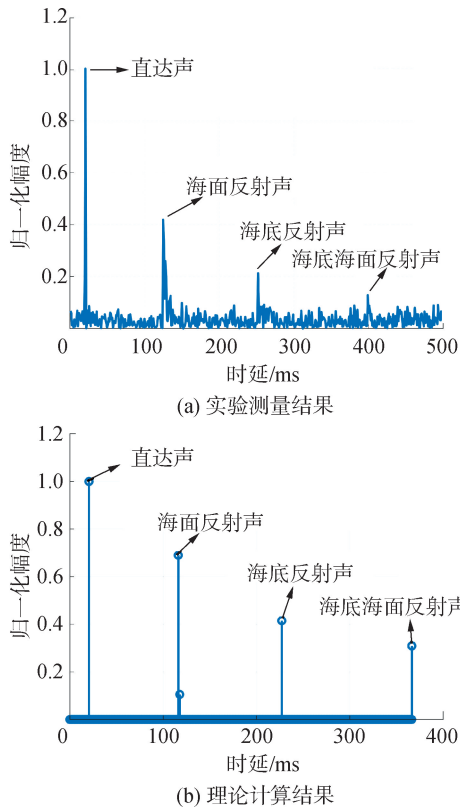


图 13 声源深度 200 m,接收距离 10 km,接收深度 3 859 m 对应多径信道结构

Fig. 13 Multipath channel structure at 3 859 m reception depth with 200 m source depth and 10 km range

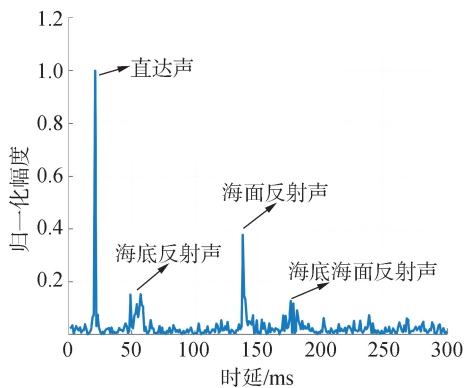


图 14 声源深度 200 m,接收距离 10 km,接收深度 4 279 m 对应多径信道结构

Fig. 14 Multipath channel structure at 4 279 m reception depth with 200 m source depth and 10 km range

3.2.2 接收水平距离 20 km

当声源深度 200 m 时,在水平距离 20 km 处观测到显著的声线反转现象,此时直达声即将由于折射作用而发生反转,在该位置直达声区域和声影区的分界深度在 2 800 m 左右。相对于 10 km 处的接收,20 km 处接收声线的掠射角较小。从图 3 可以看出,在 200 m 以浅区域,声速随深度减少而急剧降低,此时向海面方向传播的一些小掠射角声线由于折射作用迅速反转向海底方向传播,从而不经海面反射继续以直达声的形式存在,此时在海底接收点可以观测到 5 类显著声线:2 种直达声(一种初始向海面传播由于折射转而向海底传播、另一种初始就向海底传播)、海面反射声、海底反射声和同时经过海底和海面反射的声线。

图 15 给出了不同接收深度的多径信道结构,和 10 km 位置类似,随着接收深度的增加,信道的多径扩展时延逐渐降低。

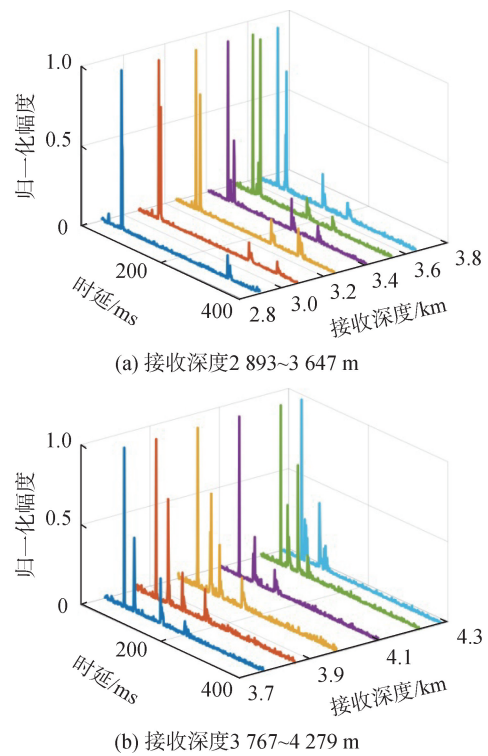


图 15 声源深度 200 m,接收距离 20 km 对应不同接收深度的多径信道结构

Fig. 15 Multipath channel structure at varying reception depths for 200 m source depth and 20 km range

在图 15(a)中,以最浅的 2 893 m 信道为例,最前面的一小簇多径为海面反射声,其能量很低,因为较浅的水听器接收到的信号掠射角较低,而向海面方向传播的小掠射角声线大部分由于折射而不经海面反射继续以直达声的形式存在;第 2 簇多径为直达声,该位置处于 RAP 区域的边界处,2 种直达声到达时刻十分接近;后面第 3 簇多径和第 4 簇多径

分别为海底反射声和同时受海底和海面反射的声线。随着接收深度的增加,其信道展现出如下变化:海面反射声的能量逐渐增加并且到达时刻逐渐变迟,在某一深度上开始迟于直达声;2种直达声逐渐分离,其中向海面方向传播的直达声到达时刻越来越迟;海底反射声和海底海面反射声相对于直达声的到达时刻逐渐降低,且海底反射声和海底海面反射声之间的时延差逐渐降低。值得注意的是,图 15(a)中的两簇直达声能量都较强,在某些情况下可能会呈现非因果信道,即后到达的直达声能量较强。

在图 15(b)中,以最浅的 3 767 m 信道为例,第 1 簇为向海底方向传播的直达声,第 2 簇为海面反射声和向海面方向传播的直达声,二者到达时刻接近,第 3 簇为海底反射声,第 4 簇为海底海面反射声。随着接收深度的增加,信道变化规律如下:接收声线的掠射角逐渐增加,此时向海面方向传播的直达声越来越弱,渐进消失,而海面反射声越来越强,逐渐取代向海面方向传播的直达声;向海底方向传播的直达声线和海面反射声线之间时延差越来越大;此外,随着接收深度的增加,经过海底反射的声线到达时刻越来越早,在海底附近,其到达时刻早于海面反射声。

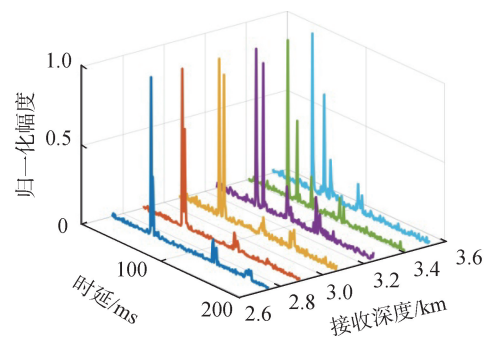
3.2.3 接收水平距离 30 km

当声源深度 200 m 时,在水平距离 30 km 处观测到独特的声线反转现象。此时直达声由于折射作用已经发生反转从而向海面方向传播,该位置直达声区域和声影区的分界深度在 2 800 m 左右。图 16 给出了不同接收深度的多径信道结构,和其他距离结论类似,随着接收深度的增加,信道多径扩展时延逐渐降低。以图 16(a)中最浅的接收为例,信道呈现明显的 4 簇结构特征,第 1 簇和第 2 簇为直达声,一簇为向海面方向传播的,一簇为向海底方向传播的,两簇直达声的到达时刻接近,第 3 簇和第 4 簇分别为海底反射声和海底海面反射声。随着接收深度的增加,两簇直达声的时延差逐渐增大,海底反射声和海底海面反射声与直达声之间的时延差逐渐减小,在图 16(b)中较深的接收位置海底反射声甚至早于向海面方向传播的直达声先到达。值得注意的是,在 30 km 的位置几乎不存在单次海面反射声,因为向海面方向传播的小掠射角声线在到达海面之前反转从而以直达声的形式存在,较大掠射角的声线经由海面反射转而向下传播,在传播到 30 km 之前到达海底经由海底反射转而向海面方向传播。

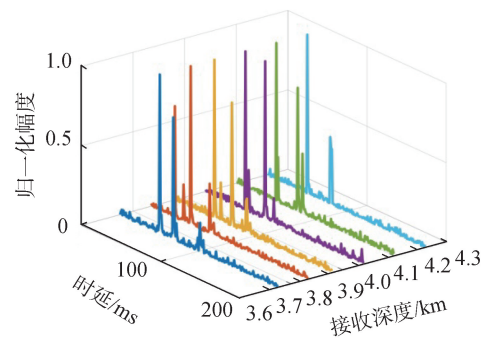
3.3 不同声源深度下的多径结构

3.1 节和 3.2 节分别对比了 2 种声源条件下在不同接收深度和接收距离上的多径信道结构。当声源深度和接收距离固定时,信道整体多径时延随接

收深度的增加而逐渐减小,其中能量较强的直达声和海面反射声的到达时延差随接收深度的增加而逐渐增加;当声源深度和接收深度固定时,信道整体多径时延随接收距离的增加而逐渐减小,对应的直达声和海面反射声之间的时延差随接收距离的增加也在逐渐减小,此外,随着接收距离的增加,接收声线的掠射角逐渐减小,海底反射声的传播路径逐渐较小,此时由于海底附近海水声速较快,会出现海底反射声快于海面反射声先到达的现象。



(a) 接收深度 2 741~3 527 m



(b) 接收深度 3 647~4 219 m

图 16 声源深度 200 m,接收距离 30 km 对应不同接收深度的多径信道结构

Fig. 16 Multipath channel structure at varying reception depths for 200 m source depth and 30 km range

上述分析给出了不同接收深度和不同接收距离时对应的信道结构对比。接下来,固定接收距离和接收深度,对比不同声源条件下的信道结构对比。在图 17(a)中,2组信道的接收深度分别为 3 767 m 和 4 219 m,在图 17(b)中,2组信道的接收深度分别为 3 979 m 和 4 279 m。对比图 17 的结果可以看出 2 种声源深度条件下,直达声和海底反射声之间的时延差是基本相同的,而声源深度 200 m 时对应的海面反射声与直达声之间的时延差明显大于声源深度 15 m 时,造成这种差异的原因是海面反射声初始向上传播,此时海面反射声的传播距离受声源深度影响较大。综上,保证接收在 RAP 区域时,声源深度 15 m 对应的信道时延较声源深度 200 m 更短,但是声源深度 200 m 时可以实现更远距离的直达声传播。

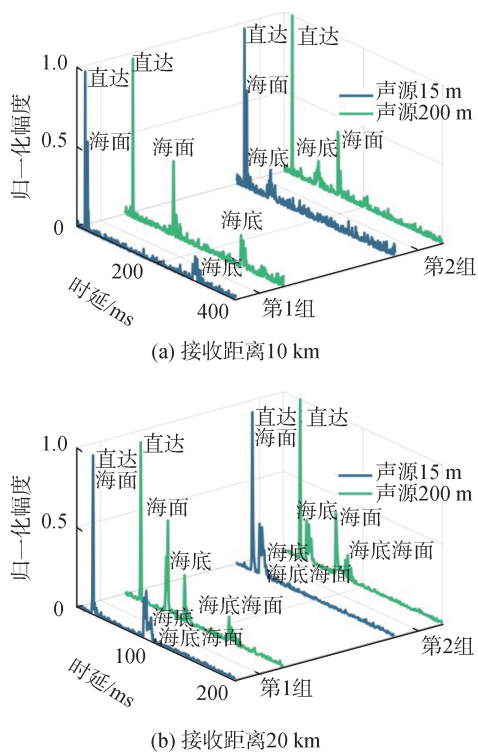


图 17 不同声源深度下的多径信道结构对比
Fig. 17 Comparison of multipath channel structures across varying source depths

3.4 多径信道时变性分析

在深海 RAP 区域,水声信道呈现明显的分簇结构,其中不同簇信道对应的声线组成不同,其信道

时变性也不相同。水声通信中通常利用信道的时相干函数表征信道的时变性特征,信道相干函数可以表示为:

$$\Gamma(\tau) = E\left(\frac{[h^*(t)h(t+\tau)]}{\sqrt{[h^*(t)h(t)][h^*(t+\tau)h(t+\tau)]}}\right) \quad (4)$$

式中: $h(t)$ 表示参考水声信道; $h(t+\tau)$ 表示延迟时间 τ 后的水声信道; $[ab]$ 表示信号 a 与 b 互相关系数的最大值; “*” 表示共轭运算。

以声源深度 200 m,接收距离 10 km,接收深度 3 859 m 的水听器为例,图 18 分离不同簇信道分别给出了各簇信道的时变结果以及时间相关性系数。从图 18 可以看出,直达声能量高且稳定,其时变性很弱,在整帧信号持续时间内几乎不存在变化,其多普勒扩展小于 0.1 Hz,相干时间大于 10 s;受随机起伏海面的影响,声波在经海面反射时的位置和掠射角不同,导致海面反射声到达接收位置的时间和幅度也不同,而且不平整海面可能会造成不同掠射角的声信号在接收位置聚焦,此时聚焦后的叠加信号能量甚至会强于直达声,这更是导致了海面反射声的时变性,从图 18 可以看出实验条件下海面反射声的相干时间不足 0.5 s(信道时间相关性系数大于 0.7 的时间),海面反射声的多普勒扩展可达 1.2 Hz;海底反射声能量很低,其时变性介于直达声和海面反射声之间。

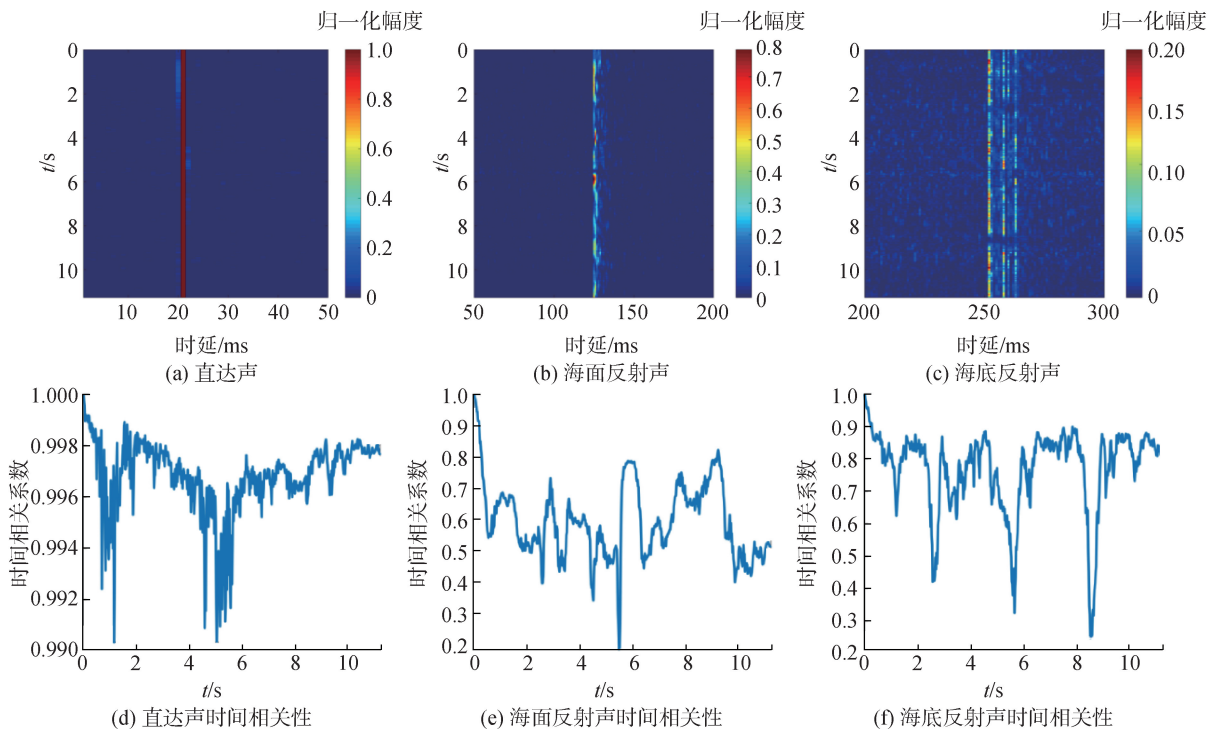


图 18 声源深度 200 m,接收距离 10 km 接收深度 3 859 m 对应水声信道

Fig. 18 Multipath channel at 3 859 m reception depth with 200 m source depth and 10 km range

水声信道相干时间的测量对于水声通信系统的设计具有重要意义。当信道时变性较弱时,即信道

相干时间大于 10 s,可以尽可能增加信号帧的长度,避免频繁地插入探测信号,从而提高通信的效率;当

信道时变性较强时,即信道相干时间仅为几秒甚至更短时间,需要减小信号帧的长度,避免时变信道导致帧内通信信号之间的复杂码间干扰,从而提高通信的稳健性。

3.5 RAP 信道下的通信系统设计分析

根据第 3.4 节的分析,深海 RAP 下的通信信道呈现显著的长时延扩展、分簇稀疏以分簇时变差异特征。针对上述特征,RAP 区域通信系统设计可以遵循以下适配性原则:

1) 在近距离处,当接收器布放深度较浅时,多径时延扩展可达数百毫秒至秒级(见图 6、图 12 实测数据)。此时需配置长保护间隔及高冗余探测信号(如 LFM、HFM 前导码)以保证信号同步鲁棒性;随着接收深度和接收距离的增加,信道时延扩展显著降低,可动态缩短保护间隔以提升频谱效率;

2) RAP 区域经过海底反射之后的信号能量很低,当接收信噪比较高或者信号调制阶数较低时可以考虑直达声和海面反射声,此时信道多径时延仅为几十毫米,可以简化均衡器设计;

3) 在直达声传播条件满足的情况下,声源深度与直达声和海面反射声之间的时延差呈近似反比关系。声源深度越浅,直达声和海面反射声之间的时延差越小,此时接收机均衡器设计的复杂度越低;

4) RAP 区域不同簇信道之间具有显著不同的时变特性(见图 18),其中直达声由于传播介质稳定性表现出弱时变特性(多普勒扩展小于 0.1 Hz),而界面反射路径受海面波动影响呈现强时变性(多普勒扩展可达 1.2 Hz),这种簇间时变差异性要求接收机采用分簇估计及均衡策略。

4 结论

1) 在非完全深海声道下,海面附近的声源在海底附近形成的直达声区域较小;当声源位置在海底附近存在共轭深度时,在海底附近可以实现类似完全深海声道下的直达声范围,在共轭深度附近直达声的水平距离可以达到近 40 km。

2) RAP 区域的信道呈现明显的簇稀疏特征,信道多径时延随着接收水平距离以及接收深度的增加而逐渐减小。可以依据多径信道信息灵活的设计通信信号帧结构。

3) 在 RAP 区域,海底反射声能量很低,当接收信噪比较高或者信号调制阶数较低时可以考虑直达声和海面反射声,从而简化均衡器设计。此外,在保证目标区域存在直达声的情况下,声源深度越浅,直达声和海面反射声之间的时延差越小。

4) 在深海 RAP 区域,信道呈现显著的分簇时变特征,不同簇信道之间的时变性差异很大,直达声能

量高且稳定,界面反射声能量较低且时变性强。后续深海 RAP 区水声通信的相关研究可以基于分簇信道估计及均衡开展。

参考文献:

- [1] 沈同圣, 郜永帅, 罗再磊. 可靠声路径传播特性及目标定位方法研究现状[J]. 应用声学, 2022, 41(4): 503-511.
SHEN Tongsheng, GAO Yongshuai, LUO Zailei. Research status of reliable acoustic path propagation characteristics and target localization methods[J]. Journal of applied acoustics, 2022, 41(4): 503-511.
- [2] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 2 版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010: 129-132.
LIU Bosheng, LEI Jiayu. Principles of underwater acoustics[M]. 2nd ed. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2010: 129-132.
- [3] 杨坤德, 李辉, 段睿. 深海声传播信道和目标被动定位研究现状[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 314-320.
YANG Kunde, LI Hui, DUAN Rui. Research status of deep-sea acoustic propagation channels and passive target localization[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(3): 314-320.
- [4] QI Yubo, ZHOU Shihong, LIU Changpeng, et al. Depth estimation for broadband sources with a vertical line array in deep water[J]. The journal of the acoustical society of America, 2024, 155(2): 1103-1118.
- [5] KNIFFIN G P, BOYLE J K, ZURK L M, et al. Performance metrics for depth-based signal separation using deep vertical line arrays[J]. The journal of the acoustical society of America, 2016, 139(1): 418-425.
- [6] GAUL R D, KNOBLES D P, SHOOTER J A, et al. Ambient noise analysis of deep-ocean measurements in the north-east pacific[J]. IEEE journal of oceanic engineering, 2007, 32(2): 497-512.
- [7] QIU Chunyu, MA Shuqing, CHEN Yu, et al. Reliable acoustic path and direct-arrival zone spatial gain analysis for a vertical line array[J]. Sensors, 2018, 18(10): 3462.
- [8] 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.
LI Weizhe, HAN Xiao, CAO Ran, et al. Research on underwater acoustic channel characteristics and communication technology in deep-sea reliable acoustic path environment[J]. Digital ocean and underwater warfare, 2022, 5(5): 397-406.
- [9] MEINIG C, STALIN S, NAKAMURA A, et al. Technology developments in real-time tsunami measuring, monitoring and forecasting[C]//Oceans-IEEE, Washington, 2005, 1673-1679.
- [10] 段睿. 深海环境水声传播及声源定位方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
DUAN Rui. Research on underwater acoustic propagation and sound source localization methods in deep-sea environment[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016.

- [11] WORCESTER P F, DZIECIUCH M A, MERCER J A, et al. The north pacific acoustic laboratory deep-water acoustic propagation experiments in the philippine sea [J]. The journal of the acoustical society of America, 2013, 134(4): 3359-3375.
- [12] DUAN Rui, YANG Kunde, MA Yuanliang, et al. A reliable acoustic path: Physical properties and a source localization method[J]. Chinese physics B, 2012, 21(12): 124301.
- [13] 邱春燊, 陈羽, 马树青, 等. 基于可靠声路径的深海声场垂直相关性研究[J]. 声学技术, 2019, 38(3): 270-277.
QIU Chunyu, CHEN Yu, MA Shuqing, et al. Research on vertical correlation of deep-sea acoustic field based on reliable acoustic path[J]. Technical acoustics, 2019, 38(3): 270-277.
- [14] YANG Kunde, LI Hui, DUAN Rui, et al. Analysis on the characteristic of cross-correlated field and its potential application on source localization in deep water[J]. Journal of computational acoustics, 2017, 25(2): 1750001.
- [15] DUAN Rui, YANG Kunde, MA Yuanliang, et al. Moving source localization with a single hydrophone using multipath time delays in the deep ocean[J]. The journal of the acoustical society of America, 2014, 136(2): 159-165.
- [16] WU Junnan, ZHOU Shihong, PENG Zhaohui, et al. Bearing splitting and near-surface source ranging in the direct zone of deep water[J]. Chinese physics B, 2016; 25(12): 124311.
- [17] LEI Zhixiong, YANG Kunde, MA Yuanliang. Passive localization in the deep ocean based on cross-correlation function matching[J]. The journal of the acoustical society of America, 2016, 139(6): EL196.
- [18] LI Dong, WU Yanbo, ZHU Min, et al. An enhanced iterative receiver based on vector approximate message passing for deep-sea vertical underwater acoustic communications[J]. The journal of the acoustical society of America, 2021, 149(3): 1549-1558.
- [19] SHIMURA T, KIDA Y, DEGUCHI M, et al. High-rate underwater acoustic communication at over 600 kbps×km for vertical uplink data transmission on a full-depth lander system[C]//2021 Fifth Underwater Communications and Networking Conference, Lercici, 2021, 1-4.
- [20] 殷敬伟, 高新博, 韩笑, 等. 稀疏贝叶斯学习水声信道估计与脉冲噪声抑制方法[J]. 声学学报, 2021, 46(6): 813-824.
YIN Jingwei, GAO Xinbo, HAN Xiao, et al. Sparse Bayesian learning method for underwater acoustic channel estimation and impulsive noise suppression [J]. Acta acustica, 2021, 46(6): 813-824.
- [21] PORTER Michael, BUCKER Homer. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1987, 82(4): 1349-1359.
- [22] WU Shuanglin, LI Zhenglin, QIN Jixing. Geoacoustic inversion for bottom parameters in the deep-water area of the South China Sea[J]. Chinese physics letters, 2015, 32(12): 124301.
- [23] 王悦悦, 王海斌, 台玉朋, 等. 深海远程正交频分复用水声通信块间迭代稀疏信道估计方法. 声学学报, 2023, 48(1): 16-26.
WANG Yueyue, WANG Haibin, TAI Yupeng, et al. Inter-block iterative sparse channel estimation method for long-range OFDM underwater acoustic communication in deep sea[J]. Acta acustica, 2023, 48(1): 16-26.

本文引用格式:

殷敬伟, 李伟哲, 韩笑, 等. 中沙海域可靠声路径声传播特性及信道分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(8): 1475-1484.

YIN Jingwei, LI Weizhe, HAN Xiao, et al. Characterization of acoustic propagation and channel analysis in the reliable acoustic path zone of the Zhongsha Sea area[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(8): 1475-1484.