

## 水声通信多径信道建模研究进展与展望

黄思越 李姜辉 刘春山 王俊峰

### Research on modeling of underwater acoustic communication multipath channel

HUANG Siyue, LI Jianghui, LIU Chunshan, WANG Junfeng

在线阅读 View online: <http://www.sxjs.ac.cn/article/doi/10.16300/j.cnki.1000-3630.24072302>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 水声通信中的信道估计与机器学习交叉研究进展

Advances in the intersection of channel estimation and machine learning in underwater acoustic communications

声学技术. 2022, 41(3): 334-345. <https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.03.005>

#### 基于傅里叶扩压频调制技术的水声通信

Underwater acoustic communication based on Fourier transform spread-compression spectrum technique

声学技术. 2024, 43(5): 661-667. <https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2024.05.008>

#### 极化码在OFDM水声通信中的应用研究

Research on the application of Polar codes to underwater acoustic OFDM communication system

声学技术. 2021, 40(1): 29-38. <https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.01.005>

#### OFDM水声通信多普勒估计与跟踪方法

Doppler estimation and tracking method for OFDM underwater acoustic communication

声学技术. 2024, 43(3): 403-411. <https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2024.03.013>

#### OFDM水声通信下行非正交多址接入功率分配方法研究

Research on power allocation method for downlink non orthogonal multiple accesses of OFDM underwater acoustic communication

声学技术. 2022, 41(6): 804-812. <https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.06.003>

#### 索引调制在水声通信中的应用及其研究进展

Survey on index modulation in underwater acoustic communication systems

声学技术. 2022, 41(4): 489-496. <https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.04.002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.24072302 CSTR: 32055.14.sxjs.1000-3630.24072302

引用格式: 黄思越, 李姜辉, 刘春山, 等. 水声通信多径信道建模研究进展与展望[J]. 声学技术, 2025, 46(0): 1-17. [HUANG Siyue, LI Jianghui, LIU Chunshan, et al. Research on modeling of underwater acoustic communication multipath channel[J]. Technical Acoustics, 2025, 46(0): 1-17.]

# 水声通信多径信道建模研究进展与展望

黄思越<sup>1</sup>, 李姜辉<sup>1</sup>, 刘春山<sup>2</sup>, 王俊峰<sup>3</sup>

(1. 厦门大学 海洋与地球学院, 福建厦门 361005; 2. 杭州电子科技大学 通信工程学院, 浙江杭州 310018;  
3. 天津理工大学 集成电路科学与工程学院, 天津 300457)

**摘要:** 在海洋资源勘探、海洋安全维护、军事应用等领域, 水下无线通信技术发挥着不可或缺的关键作用, 其中水下声波通信是实现水下信息长距离稳定传输的主要手段。然而, 当前水下声波通信仍面临诸多挑战, 如何准确描述水声通信信道的实际状态, 并进行恰当的建模, 已成为当前学术界和工程界关注的焦点。因此, 对水声通信多径信道建模方法进行分类和整理显得尤为重要。本文根据建模方法对信道的描述方式, 将其分为确定性信道建模和随机性信道建模; 按照建模原理进一步细化, 确定性信道建模方法可分为基于物理分析的、基于测量的和基于数学理论的信道建模, 随机性信道建模方法可分为几何随机信道建模和非几何随机信道建模。本文对现有信道建模方法进行时间脉络的总结、评述与对比, 为深入研究和应用水声通信多径信道建模提供参考依据。

**关键词:** 水声通信; 水声信道建模; 多径传播; 多普勒效应

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2025)-00-0001-17

## Research on modeling of underwater acoustic communication multipath channel

HUANG Siyue<sup>1</sup>, LI Jianghui<sup>1</sup>, LIU Chunshan<sup>2</sup>, WANG Junfeng<sup>3</sup>

(1. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China;

2. College of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

3. School of integrated circuit science and engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** Underwater wireless communication technology plays an indispensable and crucial role in areas such as marine resource exploration, marine security maintenance, and military applications. Among them, underwater acoustic communication is the main means to achieve stable long-distance transmission of underwater information. However, current underwater acoustic communication still faces many challenges; accurately describing the actual state of underwater acoustic communication channels and conducting appropriate modeling has become a focus of attention in the current academic and engineering circles. Therefore, it is particularly important to classify and organize the multipath channel modeling methods for underwater acoustic communication. This paper categorizes these methods based on their approach to channel description into deterministic channel modeling and stochastic channel modeling. Further refining according to modeling principles, deterministic channel modeling methods are classified into physical analysis-based, measurement-based, and mathematical theory-based channel modeling, while stochastic channel modeling methods are divided into geometry-based stochastic modeling and non-geometry-based stochastic modeling. This paper provides a chronological summary, review, and comparison of the existing channel modeling methods, offering a reference for further research and application of underwater acoustic communication multipath channel modeling.

**Key words:** underwater acoustic communication; underwater acoustic channel modeling; multipath propagation; Doppler effect

## 0 引 言

随着社会经济和科技的快速发展, 当前全球陆

地资源已无法完全满足人类日益增长的物质需求, 这使得对海洋的探索尤为重要。海洋中蕴藏着丰富的矿产、石油、天然气等资源, 可为人类提供源源不断的生产基础, 并且海洋中新发现的各类生物资源亦为现代医疗与科技领域的进一步突破带来希望。自二十一世纪以来, 电磁波通信与光波通信技术经历了显著的创新与变革, 从第三代通信 (3G) 迅速演进至第五代通信 (5G), 并预期在不久的将来

收稿日期: 2024-07-23; 修回日期: 2024-08-28

基金项目: 厦门市自然科学基金项目 (35022202373006)

作者简介: 黄思越 (2001—), 男, 广东佛山人, 硕士, 研究方向为水下声学多径信道建模。

通信作者: 李姜辉, E-mail: jli@xmu.edu.cn

来迈入第六代通信 (6G) 的新纪元<sup>[1]</sup>。这一系列的技术进步不仅推动了我国通信网络的发展, 也为我国建设以 6G 为核心的空-天-地-海一体化空间移动互联通信网络奠定了基础, 而海洋通信技术的发展正是其实现“全覆盖”过程中不可或缺的一环。党的十九大报告中也提出“坚持陆海统筹、加快建设海洋强国”, 强调了加速海洋通信发展的重要性, 发展海洋通信技术刻不容缓。

为更有效地为海洋通信系统设计提供指引, 并为海洋通信系统的性能测试与评估提供科学依据, 减少海洋环境实测中的人力物力投入, 提高研发效率, 采用计算机仿真技术开发精度高、复杂度低的水声信道模型显得尤为重要。水声信道模型可用于模拟真实条件下的接收信号获取, 测试不同的水声信号调制方案或网络协议, 从而推动水下通信技术的发展与应用。在过去数十年内, 众多学者运用多种理论方法对水下声信道进行建模, 包括射线理论和几何随机信道建模方法等。然而, 由于水声信道固有的复杂特性, 包括频率选择性衰落、多普勒频偏、显著延迟以及多径传播等复杂因素, 导致目前无法构建普遍适用于所有海洋环境和各频段的水声通信多径信道模型。

本文在分析水声信道特性的基础上, 对水声通信领域近年来不同环境条件下的水声通信多径信道建模研究工作进行了全面的总结、分析与对比, 为后续研究人员探究精度高、复杂度低的水声通信多径信道建模方法提供应用参考。

## 1 水声通信概述

在海洋环境中, 电磁波衰减迅速, 限制了其在水下的应用范围<sup>[2]</sup>。此外, 光波在水中传播时, 吸收损耗较大且散射效应显著, 这均表明无线电通信和无线光波通信均难以完成水下长距离通信的任务。相对而言, 声波作为机械波, 在水中的传播损耗更小, 甚至能够借助海洋中的波导效应实现更远的传播距离, 因此, 声波在水下长距离通信中展现出无可替代的优越性<sup>[3]</sup>。同时, 水下声波通信 (即水声通信) 能够实现数百米乃至数十公里的远距离通信, 成为目前唯一能够满足水中远距离传输需求的技术手段, 是水下高速、高可靠性数据传输的唯一途径<sup>[4]</sup>。

水声通信技术已广泛应用于多个领域, 包括水下机器人与水面指挥船的数据遥测、海上定位、重大海上事故搜救、海洋开发、水下监测设备的布放与回收以及科研实验等<sup>[5]</sup>。尤其在海洋军事领域,

水声通信技术展现出重要价值, 例如大型水下武器试验场的数据采集等<sup>[6]</sup>。2013 年, 中国载人潜水器“蛟龙号”成功利用水声通信技术实现与水面母船的实时交流, 在全球范围内首次实现了 7000 米水下到海洋表面的图像、人声、数据和文本的水声传输, 其中利用了水声通信建立高速率、高可靠性的水下无线数据传输链路<sup>[7-8]</sup>。水声通信在海上石油工业的远程控制、环境系统污染监测、海底科学数据收集、灾害检测与预警、国家安全以及新资源发现等方面亦展现出重要价值 (图 1)。

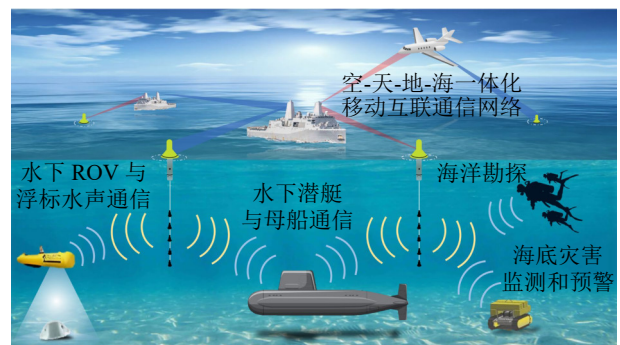


图 1 水声通信应用场景图

Fig.1 Application scenario diagram of underwater acoustic communications

然而, 如何在海洋环境中实现可靠通信是对通信和信号处理技术的挑战。首先, 声波的频带宽度很有限, 经过水中传输到达接收端功率衰减很大<sup>[9]</sup>; 其次, 水声信号在海洋环境的传输存在多径效应, 在海面运动、环境变化 (如水流、潮汐、盐度、海底起伏) 以及水声系统自身运动的影响下, 信道会产生多普勒扩频现象<sup>[10]</sup>。并且水声信道会随水文条件等时变因素产生时变效应, 进一步增加水声信道的复杂性, 造就复杂的水下通信环境 (图 2)<sup>[11]</sup>。

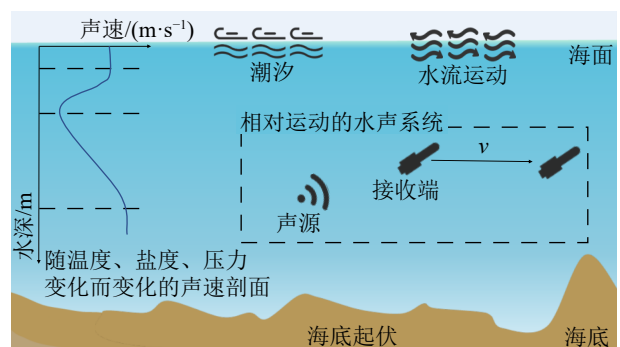


图 2 复杂的水下通信环境

Fig.2 Complex underwater communication environment

## 2 水声信道特性概述

海洋通信由两大核心部分构成: 水上通信与水下通信。水上通信主要涉及浮标之间、舰船之间的

信息传递，其通信环境与陆地通信环境相近，因此仍可采用无线电波作为通信手段。然而，在水下通信领域，情况则复杂得多，需要考虑多径效应、频率扩散、高环境噪声、信道带宽窄和多普勒频移显著等。同时，海洋中各种时间和空间尺度的动力过程导致的水体非均匀性，以及海面的随机波动性和海底的不平整性都会影响水声传播，导致水声信道表现出显著的空间差异和时间波动<sup>[12]</sup>。

## 2.1 水声信道传输损耗

水声信道呈现非平稳时变信道冲激响应(channel impulse response, CIR)，其中多径时变传播显著制约了水下数据传输速率<sup>[13-14]</sup>。为了在水下环境中实现高效数据传输，深入理解多径效应、低传播速度以及强多径干扰对水声信道产生的频散特性至关重要<sup>[15]</sup>。此外，大时延引起的时域扩展和海面运动造成的频域扩展，均可能产生码间干扰(inter symbol interference, ISI)<sup>[16]</sup>；并且发射端与接收端间的相对运动将导致信道呈现时变特性<sup>[17]</sup>。水声信道有时亦被视为稀疏信道，即在时域响应中零抽头占据显著比例。因此，高精度、低复杂度的稀疏信道估计算法对于水声通信具有重要意义<sup>[18-19]</sup>。构建一个准确的水声通信多径信道模型，需要全面考虑这些复杂的环境因素和信道特性，以提升水下数据传输的可靠性和效率。

水声信道的衰落现象主要分为两大类：大尺度衰落与小尺度衰落。大尺度衰落指的是由于发射端与接收端之间距离变化，导致的接收信号功率在广泛范围内的缓慢变动，这一现象涵盖了吸收损耗和几何扩展损耗。而小尺度衰落则是由于发射信号在传播过程中，通过直射、反射和散射等多种路径后，在接收端处叠加形成的多径传播效应。在时域上，这种衰落表现为接收信号的色散以及较小范围内的显著波动<sup>[20]</sup>。

在水声信道建模领域，常利用空间-时间变化传输函数 $H(t, f, x)$ 对水声信道进行描述以更方便描述不同类型衰落和频率间的关系，其中 $t, f, x$ 分别表示时间、频率以及收发端相对位置。在研究单发射单接收的简单场景时，空间-时间传输函数可以简化为 $H(t, f)$ ，信道传输函数可以表示为：

$$H(t, f) = \sum_{i=1}^I g_i(t, f) e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (1)$$

其中 $I$ 表示多径数，为了在模型精度和计算复杂度之间取得平衡，计算过程中 $I$ 的取值范围通常为 $[5, 20]$ ，范围涵盖了从深海到浅海不同复杂度的水声环境，反映了实际观测和经验数据中多径数的常

见变化情况。此外，随着通信距离增加，多径数也会增多，而多径数取 $[5, 20]$ 能有效模拟从中短程到长程通信的多种场景，同时控制计算量。 $g_i(t, f)$ 表示第 $i$ 条路径上的时变信道增益， $\tau_i$ 表示第 $i$ 条路径的时延。

水声信道通常被精确地描述为一个带宽受限、时变性强且具有显著多径衰落效应的信道<sup>[21-22]</sup>。任何形式的能量在介质中传播时，均会经历能量损耗。正如电磁波在空气中传播时会产生损耗，声波在水中传输时同样会面临类似的损耗，具体表现为振幅的衰减。声波的传输损耗(transmission loss, TL)是一个关键物理量，用于量化信号在传输介质中从发送端到接收端之间的衰减程度，其与信号的频率和传输距离紧密相关，一般表现为接收信号幅度的减小。通过深入了解传输损耗，我们能够更准确地预测信号在水声通信中的强度衰减情况，从而更有效地评估通信系统的性能与可靠性。

传输损耗受到多种因素的影响，如频率、传输距离、水质、水下环境条件等，其中信号的频率和传输距离占主导地位，传输损耗可以用公式简单表示为<sup>[23]</sup>：

$$L_T = 10 \lg \left( \frac{I_a}{I_b} \right) \quad (2)$$

其中 $I_a$ 表示距离声源中心一米处的声强， $I_b$ 表示接收端处的声强；另外，当声波为满足线性声学条件的平面波，在介质密度均匀分布的稳态波场和自由场条件下传播时，声强 $I$ 可以简单表示为<sup>[23]</sup>：

$$I = \frac{P^2}{\rho c} \quad (3)$$

其中 $P$ 表示声压， $\rho$ 表示介质密度， $c$ 表示该介质中的声速。

声波在介质中传播时，其主要传输损耗可明确划分为以下三类：几何扩展损耗；衰减损耗；边界损耗。这些损耗类型共同影响了声波在介质中的传播效果。

### 2.1.1 几何扩展损耗

几何扩展损耗(geometric spreading loss, GSL)是指声波在传播过程中，由于能量向更广阔的波阵面面积扩散，进而导致其振幅逐渐衰减的现象。此现象通常通过观测单位波阵面上声线数目的变化进行量化描述。声波在传播时，会持续向周围介质释放能量，并且受声学衍射与散射作用的影响，声束的扩散使得声波能量的分布更为广泛。当声波遭遇水面或介质界面时，将产生反射与折射现象，进而使声波能量进一步分散至更为广阔的空间，从而加

剧了声波传播的损耗。

几何扩展主要涵盖两种模型，即球面扩展与柱面扩展<sup>[24]</sup>，如图 3 所示。球面扩展是声波在传播过程中，以球面波的形式均匀向外扩散，能量自一点源传播至更为广阔的区域。球面扩展一般用于描述深海环境下的几何扩展，深海环境下的波阵面在到达接收端前未经历任何反射，扩展情况类似球面扩展，用公式可以简单表示为<sup>[24]</sup>：

$$L_{GS} = 20 \lg d \quad (4)$$

其中  $d$  为信号从发射端到接收端之间的传播距离。柱面扩展则是声波在传播过程中呈现出的特定形态，它以柱面波的形式向外延伸。与球面扩展相比，柱面波在垂直于声波传播方向的平面上呈现出明显的圆柱形特征。当声波自声源处开始传播时，其能量沿着以声源为中心轴的圆柱面逐步向外扩散。这种扩展方式体现了声波在空间分布上的独特性和规律性。柱面扩展现象通常发生于浅海水域，在此过程中，波阵面在抵达接收端之前会与反射面产生接触，进而经历反射作用。柱面扩展与球面扩展相比，能量传播更为集中，但也会受到水体特性和环境影响而产生衰减，用公式表示为<sup>[24]</sup>：

$$L_{GS} = 10 \lg d \quad (5)$$

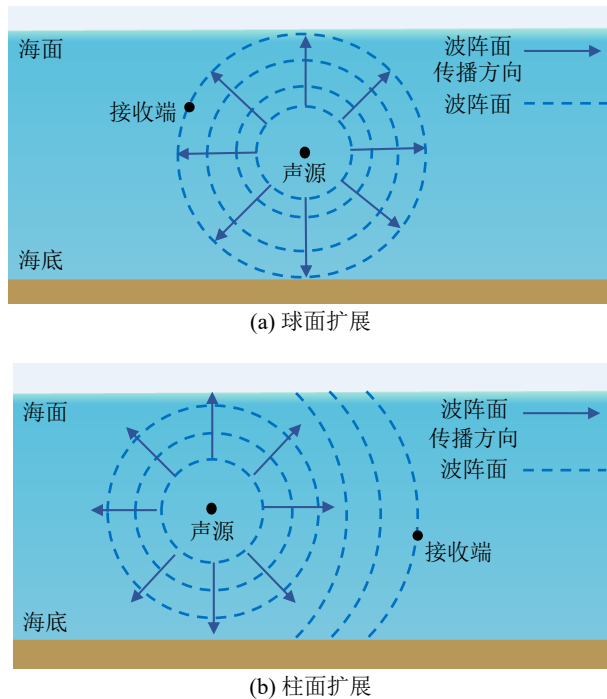


图 3 几何扩展的两种扩展模型

Fig.3 Two extension models for geometric extension

### 2.1.2 吸收损耗

吸收损耗 (Absorption Loss, AL)，即声波在传播过程中，由于介质吸收能量并将其转化为其他形

式能量所导致的能量损失。其原因涵盖分子摩擦、分子吸收、分子弯曲及振动等物理过程。鉴于海水作为一种非理想介质，具有固有的粘性和分子弛豫效应，声波在海水中的传播将伴随能量损耗，其中部分声能将被海水吸收并转化为热能。低频声波在海水短距离传播时，海水吸收对声场的影响几乎可以忽略，但在实际传播中，传播距离可能达到数百上千千米，此时海水吸收会带来较大影响<sup>[25]</sup>。需要明确的是，吸收损耗与几何扩展损耗在性质上存在显著区别。几何扩展损耗主要受到信号传输距离的影响，而与声波频率无直接关联；然而，吸收损耗不仅取决于传输距离，还受到声波频率的显著影响，同时介质的特性如密度和粘性亦对其产生显著作用。吸收损耗的经验公式可以表示为<sup>[24]</sup>：

$$L_A = \alpha(f) * d \quad (6)$$

其中， $d$  是传播距离， $\alpha(f)$  是吸收系数，单位为 dB/km。在海水中，吸收系数可以用公式表示为<sup>[24]</sup>：

$$\alpha(f) = \frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} + \frac{A_2 P_2 f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} + A_3 P_3 f^2 \quad (7)$$

其中  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  为常数， $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  表示压力依赖性， $f_1$ 、 $f_2$  分别表示硼酸、硫酸镁的弛豫频率，等式右边计算的是弛豫吸收贡献，这些参数均与海水温度、盐度和深度有关。已有充分证据表明，频率是影响吸收系数的主导因素，相比之下，温度、盐度以及深度等因素对吸收系数的影响则显得较为有限。在 50 kHz 以下频段的水声通信中，一般采用 Thorp 经验公式计算吸收系数<sup>[23]</sup>：

$$\alpha(f) = \frac{0.11 f^2}{1 + f^2} + \frac{44 f^2}{4100 + f^2} + 2.75 \times 10^{-4} f^2 + 0.003 \quad (8)$$

其中  $\alpha(f)$  的单位是 dB/km，频率  $f$  的单位为 kHz。从公式 (8) 中可以发现， $\alpha(f)$  随着频率升高而显著增加，因此吸收损耗的频率选择性使得水声信道在频域上具有低通特性，这个特点严重限制了远距离水声通信时可用的水声信道带宽<sup>[26]</sup>。为了保障通信效果与稳定性，限制通信频率的上限成为了必要措施。

### 2.1.3 边界损耗

边界损耗，特指在水声传播过程中，由于水体边界 (即海面和海底) 的反射、散射作用所引发的能量衰减。与其他损耗形式相比，边界损耗显著依赖于海洋环境的独特性质，其影响机制亦显得尤为复杂，所以目前尚无统一的计算方法。在计算边界损耗时，需充分考虑海面和海底的特性、波动性、反射和散射机制等因素，边界损耗计算是否合理已

成为水声多径信道建模中不可或缺的重要考量因素。因此在相关建模和分析工作中，需对其进行深入细致的探讨。

在声波传播过程中，海面的影响主要体现在由天气引发的高频噪声、气泡层的衰减、虚源干涉和频率效应，以及前向散射和反射损失等方面，其中前向散射和反射损耗尤为显著。通常，海面被视作自由软边界，当声波遭遇平滑海面时，大部分能量会沿前向反射。然而，受海风影响，海面变得不平整，导致声波散射至其他方向，进而降低前向散射的强度。据 Urick 整理的的数据，当频率低于 1 kHz 时，海面损耗较小（一次反射损耗小于 1 dB）；而当频率高于 25 kHz 时，海面损耗则显著增加（一次反射损耗约 3 dB）<sup>[27]</sup>。

海底作为声波的另一个反射和散射边界，其特性与海面类似但更为繁复。海底往往具备分层结构，其密度和声速可能随深度渐变或突变，同时海底的组成成分也可能从硬岩石过渡到软淤泥。在水声传播过程中，海底的这些特性对声波的传播路径和能量衰减具有显著影响，特别是沉积层在其中扮演着核心角色。在海洋环境建模中，通常利用分层结构来描述海底沉积层，其中深海区域的沉积层较薄，而浅海和大陆架海域的沉积层则相对较厚。海底的不同结构会导致声波的反射和散射现象，进而影响声波的传播方向和强度。

## 2.2 水声信道的多径特性

水声通信显著特点在于其传播路径的多样性和复杂性。在通信过程中，发射端信号从不同角度发出，经过各异的路径最终抵达接收端，此现象被称为多径传播。多径传播会在接收端引发接收信号的幅度随机波动和时延扩展问题，同时，这种传播特性会随着海水深度的变化以及收发端位置的变动而呈现不同表现。值得注意的是，海洋声速并非恒定，而是随着海水中的温度、盐度以及水压等环境因素的变化而波动。如图 4 所示，展示了深海与浅海环境中典型的声速剖面图，这些图表直观地反映了声速在不同海域环境下的变化情况。

在海洋环境中，声速的变化与海水深度密切相关。在深海区域，表层海水受到海风影响，其温度与盐度可视为近似不变，导致声速几乎保持恒定。然而，在主跃层内，随着深度的增加，海水温度逐渐降低，尽管海水压力和盐度有所增加，但所引起的声速增加速率小于海水温度降低所引起的声速减小速率，因此声速整体呈现下降趋势，形成声速剖面的负梯度。进一步深入至深海等温层，水温稳定

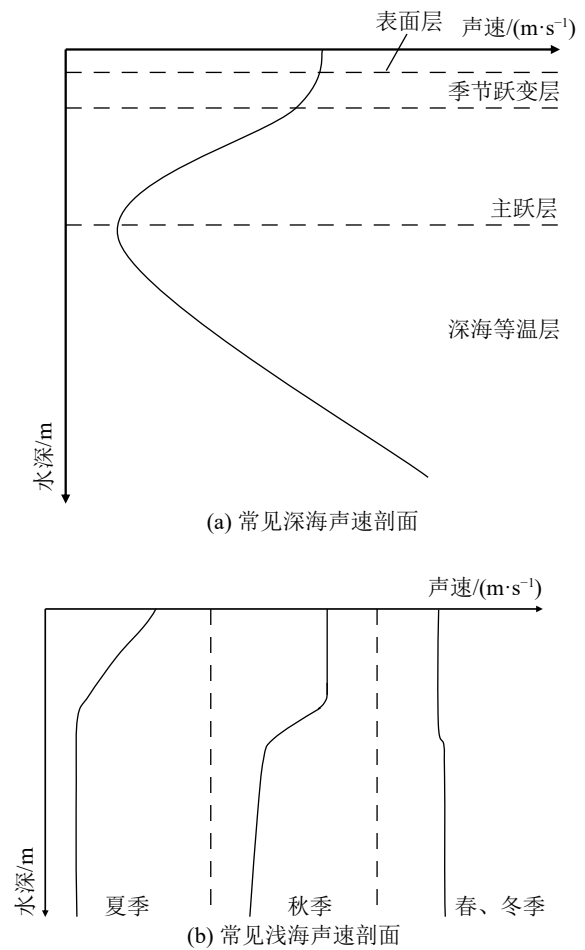


图 4 常见海洋声速剖面图

Fig.4 Common ocean sound velocity profiles

在约 4℃，此时压力成为主导声速变化的关键因素，随着深度的增加，海水压力增大，声速剖面呈现正梯度。相对而言，在浅海环境中，声速剖面随着季节变化而显著变化。夏季时，海洋表面受到太阳照射，表层海水温度升高，形成温度负梯度，从而导致表层声速也呈现出负梯度特征；进入秋季，海风增多，风浪的搅拌作用使得表层海水温度趋于均匀，形成表层等温层，并伴随出现等声速层；冬季则由于海水形成较厚的表面混合层，声速变化相对微弱，整体上声速可近似视为常数。

鉴于声速随海水深度变化的特性，声波在浅海和深海中的传播行为存在显著差异。在浅海环境中，声波的传播路径可近似视为直线，水体类似于一个矩形波导，如图 5 所示。

在深海环境中，声波的传播受到多种复杂因素的交织影响，从而呈现出传播路径的多样性与复杂性。依据斯奈尔反射定律，声线朝声速较低的方向发生弯曲，因此，在深海条件下，声波的传播路径更显曲折与多变。参照深海声速剖面的总体趋势，深海多径传播可能呈现如图 6 所示之情形。在温跃

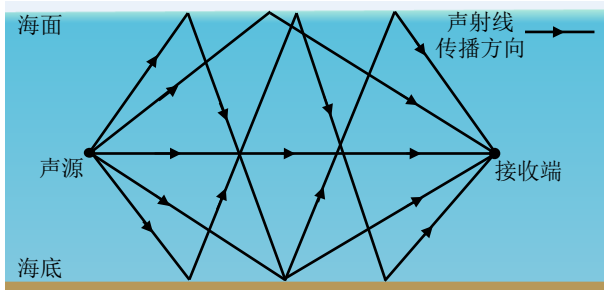


图5 浅海声线多径传播

Fig.5 Multipath propagation of shallow sea sound rays

层与等温层交汇之处，会形成特定的声道轴(Channel Axis)。在声道轴附近，声波因温跃层与等温层交界处声速的显著变化而受到约束，被限制在温跃层与深海等温层之间传播，从而产生波导效应，使声波在较短时间内覆盖更远的距离。

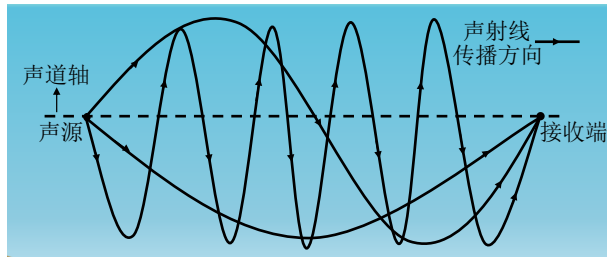


图6 深海声线多径传播

Fig.6 Multipath propagation of deep sea sound rays

除了声道轴之外，深海环境还包含其它多种声波传播机制，如海面声道、海底弹射、深海声道以及可靠声路径等。这些多径传播的特性会根据不同的传播机制以及发射端和接收端的空间位置变化而发生变化，所以，水声信道呈现出显著的空间变化特性。此外，由于声速分布的不均匀性，会导致折射效应的产生，从而在声场中形成声影区(Shadow Zones)和会聚区(Convergence Zones)。在深海声影区环境下，直达波会随着距离的增加而逐渐消失，这使得声影区内的接收机在通信过程中面临较大困难<sup>[28]</sup>；而会聚区则是声强密集的区域，为声波传播和通信提供了有利条件。

由于几何扩展损耗和吸收损耗属于大尺度衰落，边界损耗属于小尺度衰落<sup>[29]</sup>，结合公式(1)可得到更详细的水声信道传输函数：

$$H(t, f) = \sum_{i=1}^I g_a^i(t, f) g_s^i(t, f) g_b^i(t, f) e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (9)$$

其中  $g_a^i(t, f)$  表示第  $i$  条传播路径上的吸收损耗， $g_s^i(t, f)$  表示第  $i$  条传播路径上的几何扩展耗， $g_b^i(t, f)$  表示第  $i$  条传播路径与水体边界接触产生的边界损耗。

### 3 水声通信多径信道建模方法

多径信道建模是通信系统设计中的关键环节，其目标在于通过精确的数学模型或仿真技术，全面描述信道在通信系统中的固有特性和动态行为。这一步骤对于深入理解通信系统的性能表现，进而实现其性能优化至关重要。本节将详细阐述当前水声通信多径信道建模的既有方法，并综述迄今为止水声信道建模领域的研究进展。

#### 3.1 水声通信多径信道建模分类

水声通信多径信道建模方法主要可归纳为两大类，即确定性信道建模与随机性信道建模(图7)。

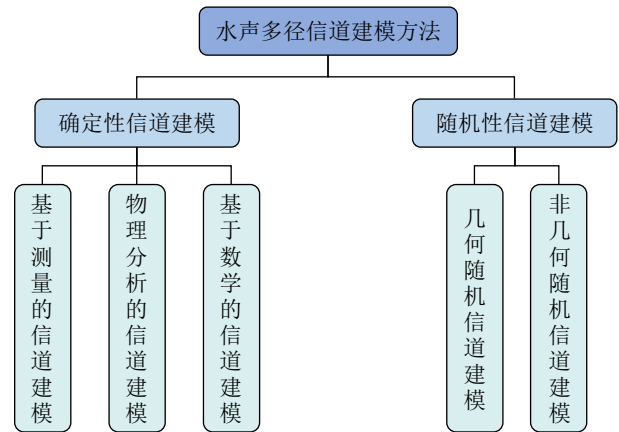


图7 水声通信信道建模分类

Fig.7 Classification of underwater acoustic communication channel modeling

#### 3.1.1 确定性信道建模方法

确定性信道建模以其高精度而著称，但与此同时，其构建流程复杂，且模型的精确度直接受限于对环境条件描述的精确性。确定性信道建模的主要步骤如图8所示。该方法的前提在于假定水声信道所处的水下环境为确定状态，进而基于实际测量数据或水声学理论的数学方法，推测并计算该环境下的信道参数及信号在信道中的传播特性。

确定性信道建模方法根据建模原理又可细分为

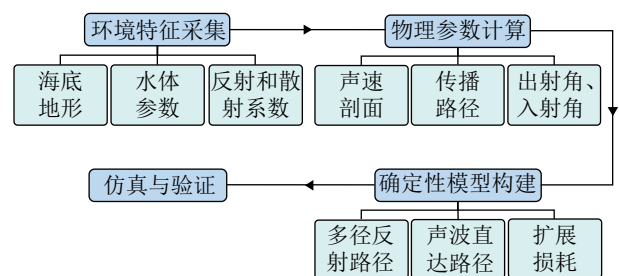


图8 确定性信道建模主要步骤

Fig.8 Main steps for deterministic channel modeling

基于测量的、基于物理分析的以及基于数学原理的信道建模方法。

基于测量的信道建模方法，是通过使用相关探测设备在特定环境中测量并获取信道参数来构建信道模型。一旦测量的信道参数被确定，信道状态即被明确。基于物理分析的信道建模方法则侧重于分析信号在该环境下的传播方式，结合水声学理论及经验公式，精确计算水声信号在多径传播过程中每一条路径上的参数，如几何扩展损耗、吸收损耗和边界损耗等，从而构建精确的信道模型。此外，还有以波动方程为理论基础的数学建模方法，其中包括射线追踪模型、简正波模型、快速声场计算模型和抛物线方程模型等。这些模型在特定条件下具有较高的精确度，但应用范围相对受限。例如，射线追踪模型在深海、高频环境下能较好地与实测数据吻合，但在浅海、低频环境下误差较大，其通用性有待提升。

### 3.1.2 随机性信道建模方法

随机性信道建模凭借其较低的复杂度和更高的灵活性，亦有其独特的优势。图 9 展示了随机性信道建模的主要步骤。随机性信道建模的核心在于利用随机过程来模拟和描述信道特性，能够更准确地反映实际通信环境中存在的多样性和随机性。

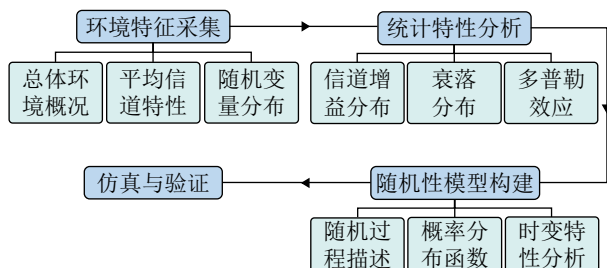


图 9 随机性信道建模主要步骤

Fig.9 Main steps for modeling stochastic channels

随机性信道模型主要划分为两大类：几何随机信道模型 (geometry-based stochastic model, GBSM) 和非几何随机信道模型 (non-geometry-based stochastic model, NGSM)。GBSM 通过几何模型来抽象信道的传播环境，其中散射体在模型中随机分布，以此模拟实际通信环境的多样性和随机性。通过调整模型参数，GBSM 能够适应不同的通信场景。相对而言，NGSM 则通过统计分布来描述信道特性，而不依赖于具体的几何关系。在水声通信中，常见的随机模型包括最大熵模型和马尔可夫模型等。此外，非几何随机信道建模方法还涵盖了对确定性模型进行多次运算，从而分析得到信道参数的统计特性这一途径。

### 3.1.3 确定性信道建模与随机性信道建模对比

在水声通信领域，确定性信道建模方法与随机性信道建模方法各自展现出不同的应用优势与局限性。这两种建模方法的全面对比详见于表 1。

表 1 确定性信道建模与随机性信道建模对比  
Table 1 Comparison between deterministic channel modeling and stochastic channel modeling

	确定性信道建模	随机性信道建模
方法原理	基于数学、物理定理	基于信道统计特性
环境	对环境具体模拟	描述概率分布、随机过程
处理方法	对地点和特定信道	广泛环境下的动态信道
适用环境	特定地点和特定信道	广泛环境下的动态信道
数据依赖性	依赖确定的环境参数	依赖统计数据
主要参数	传播速度、反射折射系数等	信道增益、衰落分布

确定性信道建模基于具体的物理和几何特性，通过数学方程或物理模型，对环境参数的敏感性较高。具体而言，声速剖面、海底特性 (如地形和底质) 以及环境条件 (如温度、盐度和深度) 都是关键的敏感参数。海洋声速的微小变化会显著影响声波的传播路径和强度，而海底地形和底质类型则直接决定了声波的反射、散射和衰减。因此，准确测量和描述这些关键参数对于确保模型的高精度至关重要。通过对声速分布、传播路径和海底特性等因素的精确建模 (图 10)，确定性信道建模能够详细描绘水声通信中的多径信道特性，模型结果具有较高的可重复性和精确性，尤其适用于稳定的信道条件和特定的地理位置<sup>[30]</sup>。

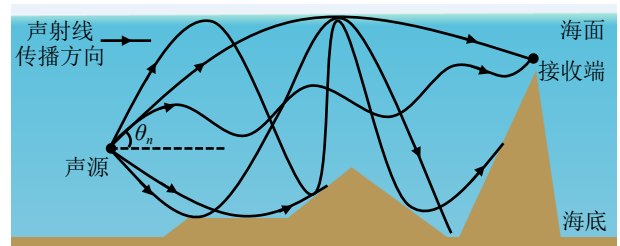


图 10 确定性信道建模环境模拟 ( $\theta_n$  为确定参数)

Fig.10 Deterministic channel modeling environment simulation ( $\theta_n$  is the deterministic parameter)

相比之下，随机性信道建模关注的是信道的统计特性，对多径效应、衰落特性以及噪声干扰的统计特性表现出较高的敏感性，而非对精确环境参数的依赖，因此随机性信道建模过程中对实际传播环境进行简化处理，如等声速假设和理想平坦海底等 (图 11)。多径效应的统计分布，如延迟和强度的变化，直接影响信号的接收和处理；衰落特性，如瑞利衰落和莱斯衰落，影响信号的质量和传输性能；噪声和干扰的强度及其统计特性则影响信号的

接收效果。在随机性信道建模中，多径信号的统计分布、适当的衰落模型和信道容量等用于描述信道在随机条件下的特性，模型结果具有随机性和统计特性，适用范围广泛且简化，模拟声波传播过程中至少有一个参数表现为随机分布。

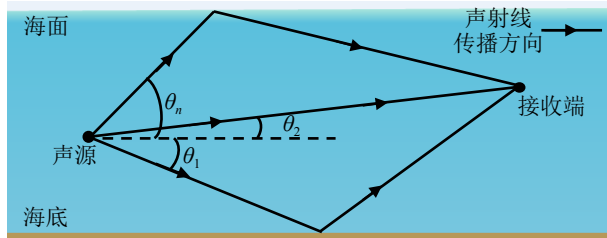


图 11 随机性信道建模环境模拟 ( $\theta_1, \theta_2 \dots \theta_n$  随机分布)  
Fig.11 Simulation of Random Channel Modeling Environment ( $\theta_1, \theta_2 \dots \theta_n$  is randomly distributed)

确定性模型强调具体环境的精确描述，用于验证和校准统计信道模型，而随机性模型则用于广泛的信道性能评估和快速分析。两者在理论基础、建模方法和应用场景上存在显著差异。

### 3.2 确定性信道建模

确定性信道建模为研究人员提供了准确的水声信道预测工具，通过考虑水下声波传播的物理特性，如声速分布、多径效应和海底海面反射等，能够精确地模拟水声信道的行为，为水声通信系统的

设计和优化提供科学依据。其次，确定性信道建模为水声信号处理技术的发展提供支持，通过在仿真环境中验证和改进各种信号处理技术，如信道均衡、多径抑制和多普勒补偿等，提高水声通信系统的抗干扰能力和鲁棒性。此外，确定性信道建模还有助于降低实验成本，通过提供可靠的信道预测，减少水声通信技术对昂贵且难以重复的海上实验的依赖。

本节对确定性信道建模方法所得到的模型进行了系统性的总结，详情如表 2 所示。

在致力于获取高精度信道仿真结果的过程中，确定性信道建模不可避免地遭遇了计算复杂度显著提升的难题。接下来，本文将系统性地介绍表中列出的各个模型，并深入探究其针对计算复杂度这一挑战所采取的举措。

#### 3.2.1 基于物理分析的信道建模方法

2007 年，新加坡国立大学声学研究实验室的 Chitre<sup>[31]</sup> 提出了温暖浅水声学通信信道 (Warm Shallow Water Acoustic, WSWA) 模型。WSWA 模型将信道建模为一个由等声速层 (模拟海水) 和等声速半空间 (模拟海底) 组成的 Pekeris 波导，简化了传播环境；同时，模型基于射线声学理论，利用镜像法模拟计算声射线在海洋中的传播路径和传播

表 2 确定性信道建模方法汇总  
Table 2 Summary of deterministic channel modeling methods

年份	模型名称	优点	缺点
2007 <sup>[31]</sup>	WSWA	物理原理与统计效应结合，准确度高；仿真过程考虑非高斯噪声，通过镜像法优化计算效率。	时间相关性模拟不足，影响长数据包性能评估，且适用范围受环境条件和信号带宽限制。
2008 <sup>[32]</sup>	UAN-POM	利用闭合表达式和凸优化特性简化计算复杂度，提供网络编码下界，便于评估其他方案性能。	模型高斯噪声假设不完全符合实际情况，环境参数变化时，模型参数调整较复杂。
2009 <sup>[21]</sup>	\	全面分析了水下声学信道的特性，为设计水声通信系统提供了重要参考，并讨论提高传输速率和节能的策略，具有实际应用价值。	主要关注水声信道的静态特性，未充分考虑信道的动态变化。
2010 <sup>[33]</sup>	ME-UAC	模型遵循最大熵原理，确保不同建模者基于相同环境参数能得出一致结果，且模型依赖较少的环境参数，降低了模型复杂度。	模型通过求解非线性方程组和拉格朗日乘数法等复杂的数学运算推导信道概率密度函数和功率谱密度，通常需要较高的计算资源和时间，导致模型数据处理有延迟，实时性较差。
2013 <sup>[34]</sup>	SPM	模型避免重复射线追踪，通过统计参数快速生成传输损失，大幅减少仿真时间；模型便于集成到网络仿真工具中，支持高效协议和资源分配策略实验。	模型基于对数正态分布等假设，对于复杂的多径传播现象，预测精度有限，预测结果不完全符合实际水声信道特性。
2012 <sup>[35]</sup>	Waymark	可以集成除BELLHOP之外的不同水声信道传播模型，且仿真对通信信号时长没有限制。	对于具有许多点对点链路的水声网络模拟，计算复杂度较高，适用性较低。
2014 <sup>[36]</sup>	Waymark (更新算法)	在基带频率上进行信号处理和信道建模操作，降低了采样率，进一步减小计算复杂度。	对于具有许多点对点链路的水声网络模拟，计算复杂度较高，适用性较低。
2017 <sup>[37]</sup>	Watermark	基于实际测量的时变冲激响应，利用信道重放技术，提供高保真度的水下声信道模拟。	仅提供特殊地点处的水声信道模型，若需要增添新的信道，需要额外的大量实测数据。

基于物理  
分析的信道  
建模

基于测量的  
信道建模

续表

年份	模型名称	优点	缺点
2008 <sup>[38]</sup>	Kirchhoff 近似模型	模型能处理时间变化的粗糙海面，适用于长时间信号传输；并在计算过程中采用基尔霍夫近似，降低计算复杂度。	基尔霍夫近似忽略高阶散射效应，影响模型结果的精度。
2009 <sup>[39]</sup>	PE-UWAC	模型引入抛物方程方法降低计算复杂度，进而能准确模拟动态粗糙海面对声波传播的影响。	模型基于二维平面传播和恒定声速场假设，适用性受到限制；且模型缺乏与实验数据的详细对比验证。
2010 <sup>[40]</sup>	BELLHOP-SSC	模型能够针对特定海洋区域的环境数据进行精确建模，相比一般模型基于通用假设，提高了信道描述的准确性。	模型高度依赖于特定海洋区域的环境数据，数据获取成本高或数据不准确限制模型的应用。
基于数学理论的信道建模	2012 <sup>[41]</sup> IRSIM	模型综合考虑了海浪和气泡的动态效应，且引入气泡消光效应，提高了模型在高频段的适用性。	模型中缺少对气泡前向散射的考虑，需要更多实验数据来验证和校准模型的准确性和可靠性。
	2013 <sup>[42]</sup> SAM	SAM 基于频率无关的几何射线追踪，计算效率高，适用于大规模网络仿真。	模型预测结果受环境输入准确性影响，且主要适用于分层海洋介质，可能不适用于其他类型海洋环境。
	2013 <sup>[43]</sup> VirTEX	考虑了节点和海面运动引起的多普勒效应；与静态 BELLHOP 相比，提供了更准确的水下声学信道表示。	对于具有许多点对点链路的水声网络模拟，适用性/可行性较低。
	2013 <sup>[44]</sup> VirTEX (更新算法)	针对声源和接收器运动以及考虑海面运动影响的条件，提出两种优化算法，进一步减小计算复杂度。	模型适用范围被进一步缩小，且对于具有许多点对点链路的水声网络模拟，适用性/可行性较低。

距离，结果聚焦于直达路径、海面反射路径和海底反射路径等关键传播路径，显著减少了需计算的路径数量，降低了计算复杂度。

2008 年，美国麻省理工大学与东北大学的 Lucani 等<sup>[32]</sup>针对水下声网络的设计与优化，开发了水下声学网络传输功率优化模型 (underwater acoustic network power optimization model, UAN-POM)。模型的凸性首先被证明，确保在水声网络优化过程中能使用高效的凸优化算法，简化计算过程；模型着重考虑传播损耗和环境噪声对信道容量的限制，通过迭代的数值评估，拟合得到水声网络传输功率和最优频率带宽关于传输距离和信道容量的闭合表达式，极大提高了计算效率，使水声网络优化和性能评估变得更加方便和高效。

2009 年，美国东北大学的 Stojanovic 与伍兹霍尔海洋研究所的 Preisig<sup>[21]</sup>在实验室环境下深入探讨了水声信道的物理特性，提出路径传播损耗、环境噪声等关于频率和传播距离的函数，并详细分析了多径传播的形成机制和多普勒效应对信号传播的影响。这些模型能够量化信道特性对通信系统性能的影响。其通过揭示水声信道的复杂性和挑战性，为后续研究人员设计水声通信系统提供重要参考和指导。

传统确定性信道建模过程中，面对复杂多样的水声通信环境时，往往依靠各种假设来构建水声信道，导致不同模型的不一致性。

2010 年，法国欧洲布列塔尼大学的 Socheleau

等<sup>[33]</sup>提出了基于最大熵原理的水下声学信道模型 (maximum entropy underwater acoustic channel, ME-UAC)。模型仅通过水声信道的部分已知条件 (如平均功率和多普勒扩展)，并结合最大熵原理推导水声信道的概率密度函数和功率谱密度，就能生成目标信道的冲激响应。这对于水声通信应用非常重要，因为水下声学通信中实时的环境数据往往难以获取，避免了模型构建中的不一致性和非理性假设。该模型满足了一致性、简洁性和开放性的要求，因此它是水下声学通信信道标准化的一个良好候选。

同样采用统计学建模的还有西班牙米格尔赫尔南德斯大学的 Llor 和 Malumbres，他们在 2013 年提出了用于大规模水声网络信号路径损失的统计预测模型 (Statistical Prediction Model, SPM)<sup>[34]</sup>。该模型利用确定性信道模型 BELLHOP 一次性完成变化环境条件下的计算，并编译出传输损失的统计特性，从而避免每次水声网络节点状态变化时都需重复计算的复杂度。模型假设传输损失服从对数正态分布，通过估计均值和标准差等参数，减少计算负担，在网络模拟中仅需调用高斯随机数生成器即可生成符合分布的传输损失值。这种方法不仅大大降低了计算复杂度，还易于集成到现有网络模拟器中，支持大规模网络仿真，有效解决了确定性传播模型准确但计算量大，不适合大规模水声网络模拟的问题。

2012 年，英国约克大学的 Liu 和 Zakharov 等<sup>[35]</sup>

提出了 Waymark 模型。其通过与真实海洋实验(涵盖浅海与深海环境)的数据对比,验证了模型的有效性,并展示了模拟数据与实验数据在多普勒谱和 OFDM 信号接收性能方面的高度相似性。Waymark 模型基于水声信道在水下变化相对缓慢的原理,对发射器/接收器轨迹进行稀疏采样(采样率远低于信号采样率),并计算稀疏采样点上的信道冲激响应。随后,利用局部样条对这些稀疏采样的冲激响应进行插值,以恢复出每个信号采样点的信道冲激响应。模型通过减少直接计算的点数,并仅利用局部信息插值,显著降低了计算复杂度和内存需求。

2014 年,英国约克大学的 Henson 等<sup>[36]</sup>对 Waymark 模型进行了扩展,将信号处理和信道建模转换到了基带频率。这一转换允许 Waymark 在处理信号时采用较低的采样率,因为基带信号的带宽通常远小于载频。因此,通过降低采样率,减少了计算复杂度,缩短了仿真时间,并能够模拟更长的信道冲激响应,以适应更复杂和极端的水下环境。

Waymark 模型的成熟应用也促进了我国学者在水下声学通信算法和模型研究领域的深入探索。2014 年,中山大学的万智萍和浙江工业大学之江学院的陈伟杰提出了结合环境因素的分布式路由算法(distributed routing algorithms with environmental elements for underwater sensor networks, EE-UDRA)<sup>[45]</sup>,并分析了不同水下传播环境和环境因素对路由算法的影响。2016 年,南京理工大学的顾晨、孟庆功提出了基于分布式的导频放置策略<sup>[46]</sup>,通过 Waymark 仿真结果验证了分布式导频放置在误码率性能上的优势。2020 年,哈尔滨工程大学的孙大军、洪小平等人证明了其提出的符号级通带多普勒跟踪和补偿算法在动态多普勒变化场景中的准确性<sup>[47]</sup>。2021 年,武汉大学的张宇、江鹏等人提出了利用两阶段学习模型的水下声学阵列定位方法,并验证了其鲁棒性和精确度<sup>[48]</sup>。同年,沈阳化工大学计算机学院的李莉和路晨贺等将世界海洋仿真系统法(world ocean simulation system, WOSS)与声射线模型 Bellhop 结合并引入海洋噪声经验公式对传统仿真系统的水声信道建模方法进行扩展,实验采用 3 种仿真方法验证了扩展后的水声信道建模方法更具实时动态性<sup>[49]</sup>。

### 3.2.2 基于测量的信道建模方法

基于精确测量的信道建模方法相对较少,其中 Watermark 作为一个典型且成熟的模型,其应用尤为突出。Watermark 由挪威国防研究机构的 van

Walree 和法国欧洲布列塔尼大学的 Socheleau 等于 2017 年开发,旨在为水下声学通信领域提供基准测试工具<sup>[37]</sup>。Watermark 的初始版本信道库包含了在挪威(两个站点)、法国和夏威夷测量的五个信道数据,覆盖了不同的频段(4-8 kHz、10-18 kHz 和 32.5-37.5 kHz)和接收器配置(单水听器 and 阵列接收器)。Watermark 采用 Mime 通道模拟器的直接回放模式,该模式直接使用测量的通道数据与用户输入的发射信号完成卷积操作,避免了复杂的随机过程模拟;此外,水声信道的时变脉冲响应是预先测量并存储的,因此在测试时不需要实时计算通道响应,大大降低了实时测试的计算复杂度。

Watermark 作为一款功能强大的基准测试工具,通过提供现实且可控的测试环境,不仅提高了算法开发的效率,还确保了测试结果的可比性和复现性,为相关领域的研究和应用提供了有力的支持。2023 年,华中科技大学的李渝舟、黄运龙等人提出了部分单频率校正快速傅里叶变换的新型载波间干扰(inter-carrier interference, ICI)抑制方法,通过 Watermark 仿真结果的验证,该方法在大多数多普勒频偏的情况下展现出了更好的 ICI 抑制性能<sup>[50]</sup>。

### 3.2.3 基于数学理论的信道建模方法

2007 年,厦门大学的童峰、许肖梅以及东南大学的方世良提出了一种针对单频水声信号的多径时延估计算法,该算法引入多径径数,建立由多径时延、幅度系数及径数组成的水声信道多径参数模型<sup>[51]</sup>。该模型针对多径参数的不同属性,精心设计了参数的编码方式和约束条件,如采用实数编码多径幅度、正整数编码多径时延,简化了参数处理过程;其次,模型定期删除归一化幅度低于设定阈值的小幅值多径分量,减轻了计算负担;最后,在进化规划过程中,应用了高效的高斯变异操作,并结合实际多径时延的有界性进行约束处理,既保证了变异的有效性,又限制了变异范围,进一步降低了模型计算复杂度。

2008 年,美国热、光与声学研究所(heat, light and sound research inc., HLS)的 Siderius 与 Porter 采用时域建模方法,成功构建了一种 Kirchhoff 近似模型,旨在模拟宽带海洋声学传输<sup>[38]</sup>。该模型扩展了二维射线方法,通过在稀疏的网格点上预先计算到达幅度和延迟,并在模拟过程中对接收点处的值进行插值,从而避免了在每个时间步长都重新进行完整的射线追踪计算;同时,模型采用基尔霍夫近似来模拟宽带信号与粗糙海面的相互作用,避免

了大型矩阵的求逆运算；此外，模型计算过程仅考虑有限数量的传播路径，进一步降低计算复杂度；在模拟宽带信号时，模型考虑了信号的频率依赖性，并没有对每个频率分量都进行独立的完整模拟，相反，通过合理的近似和插值方法，模型在保持足够准确性的同时，有效地降低了模拟宽带海洋声学传输的计算复杂度。

2009年，美国约翰·霍普金斯大学应用物理实验室的 Rosenberg 等率先运用抛物线方程 (parabolic equation, PE) 模型处理移动粗糙海面上的多次散射问题，提出了基于抛物线方程的水下声学信道模型<sup>[39]</sup>。该模型结合了 Elfouhaily 等通过表面谱分析模型生成的风生海面统计特性，以描述海面的粗糙度和波动特性<sup>[52]</sup>。同时，模型应用 PE 方法，将椭圆型边值问题简化为初值问题，并在前向传播计算时，忽略了源和接收器垂直平面外的前向散射和后向散射，这种简化在平面外的散射效应相对较小的高频情况下尤其有效，显著降低了高频宽带水下声传播模拟的计算复杂度。

2010年，加拿大纽芬兰纪念大学的 King 等<sup>[40]</sup>提出使用实际环境数据来建模浅海水声通信信道。模型通过收集特定区域的海洋环境数据 (如温度、盐度、水深等)，对这些数据进行预处理和参数化，可以大大降低实时计算的负担；同时，模型在应用之前利用 BELLHOP 程序进行离线计算，完成大部分计算密集型的任务 (如声线的追踪和路径计算)，并为仿真中需要频繁查询的数据 (如路径损耗、传播延迟等) 构建查找表以避免在仿真或实时应用中重复计算，减少计算量。

2012年，荷兰声学与声呐部门的 Dol 等<sup>[41]</sup>联合提出了一种用于水下声学通信信道模拟的集成建模方法，该方法融合了 Hall-Novarini 模型、海洋波浪分析工具箱 (wave analysis for fatigue and oceanography, WAFO)、BELLHOP 模型等。该模型考虑了海风导致的表面波和气泡对信道的影响，并使用实际数据和相关模型模拟，对声学传播特性的描述更为全面，能更准确反映真实海洋环境。模型对于二维的海表面高度分布，采用垂直横截面 (从发射器到接收器) 的一维化处理，避免了完全的三维声学计算；此外，在对气泡消光效应建模时，气泡被模拟为水平弥散的云，而不是离散的气泡柱，并且将海表面动态和 underwater 声传播问题分离开来，进行声学计算时不考虑海表面和气泡的瞬时速度。这种方法避免了复杂的空间和时间依赖性，以达到简化模型和降低计算复杂度的目的。

2013年，清华大学电子工程系的 Wang 等<sup>[42]</sup>

考虑到海洋介质在垂直方向上的层状结构以及声射线在传播过程中的相位偏移，提出了几何射线追踪的分层声学模型 (stratified acoustic model, SAM)。该模型将海洋介质划分为多个水平分层，每层内的声速被近似为线性函数，并且通过分类不同类型的特征射线 (如直接射线、海面反射射线、海底反射射线等)，SAM 无需对所有可能的传播路径进行全面搜索也能有效地模拟多径效应，在后续处理中，只有被认定为特征射线的路径才会被详细计算。这种方法避免了在每个点上单独计算声速的同时，也减少了需要追踪的射线数量，消除了不必要的计算量。此外，SAM 通过相对简单的公式来计算边界反射和折射引起的相位变化，避免了复杂的数值积分或迭代求解过程。

在数学理论框架下，信道建模领域已发展出多种模型，其中 VirTEX 模型以其成熟度和可靠性而备受认可。VirTEX 采用射线追踪计算方法，借助环境快照 (Temporal Snapshots) 精准描述信道传播环境随时间的动态变化，从而在时间域内对信道进行细致划分，并精确计算声波传播路径的特征射线。

2013年，韩国声纳科技有限公司的 Oh 和韩国海事大学海洋工程系的 Eom 等通过在东海的海上实验获取的误比特率 (Bit error rate, BER) 统计数据与 VirTEX 模拟结果进行对比分析，进一步证实了 VirTEX 在预测水声信道系统在实际海洋环境中的性能及系统设计前需求分析中的卓越适用性<sup>[43]</sup>。同年，美国 HLS 研究所的 Peterson 和 Porter 提出了 VirTEX for platform motion 和 VirTEX for sea-surface dynamics 两种新算法，以模拟在时变环境中已知时间序列的传播<sup>[44]</sup>。这两种算法特别针对稳定声源、移动接收器和移动海面等场景进行了优化，相较于原始 VirTEX 模型，它们在运行时间性能上有所提升，但相应地在一定程度上增加了限制并牺牲了部分准确性。

VirTEX 为水下声学通信领域的研究和工程实践提供了强有力的工具支持，协助研究者和工程师深入理解并预测复杂海洋环境中声波的传播特性，进而优化通信系统设计，提高系统整体性能和可靠性。

2018年，中国舰船研究设计中心与华中科技大学的赵蕊、许建等在研究多自主式水下机器人 (multiple autonomous underwater vehicles, MAUV) 集群分布式控制时，提出采用类似 VirTEX 的模块进行多普勒计算，能满足高效且准确的需求<sup>[53]</sup>。2024年，哈尔滨工业大学的刘志勇、金子皓等则利用 VirTEX 模型计算水声信道冲激响应，将其应

用于其提出的基于深度学习的水声信道联合多分支合并与均衡算法的仿真中,验证了新算法在水声信道条件下的优越性能<sup>[54]</sup>。同年,大连测控技术研究所的朱艺佳、梁喆等通过 VirTEX 模拟了平静海面及正弦起伏海面条件下的时变水声信道,深入研究了其传输特性,为提高声纳系统的检测效果和识别能力提供了重要依据<sup>[55]</sup>。

### 3.3 随机性信道建模

随机性信道建模显著提高了通信系统性能预测的准确性,使设计者在系统开发初期就能通过模拟真实信道环境来优化系统参数,从而降低了现场试验的成本和风险。此外,随机性信道建模支持了多种通信场景下的应用,无论是浅海、深海还是移动平台通信,都能提供适应性强且准确的信道描述。

本节对随机性信道建模方法所得到的模型进行系统性的总结,详情如表 3 所示。

随机性信道建模的灵活性很大程度上取决于其对传播环境的简化假设,同时也伴随着其结果准确性的牺牲。因此,如何尽可能准确地刻画传播环境成为了随机性信道建模的关键问题。下面本文将系统地介绍表中列出的各个模型,并重点阐述其是如何解决环境刻画这一问题。

#### 3.3.1 非几何随机信道建模

2011 年,法国欧洲布列塔尼大学 Socheleau 等提出了基于经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 的趋势平稳信道模型<sup>[56]</sup>。该模型基

于大西洋和地中海收集到的实际数据,估计水声信道的统计特性,并以此刻画实际的传播环境;同时,模型通过 EMD 扩展宽平稳不相关散射 (wide-sense stationary uncorrelated scattering, WSSUS) 假设,基于经验模态分解理论<sup>[62]</sup>,将水声信道建模为趋势项和随机项的和,趋势项用于刻画水声信道较为稳定的物理特性,而随机项则能很好地反映了信道中多径效应等,有利于模型在时变的水声通信环境中刻画水声信道行为。

2013 年,美国东北大学的 Qarabaqi 和 Stojanovic 利用 BELLHOP 计算在给定几何结构和信号频率下水声信道的确定性参数,并结合声传播过程中的物理因素及随机信道的影响,构建了一个水声通信信道的统计模型<sup>[57]</sup>。该模型基于底层随机位移的概念,通过将信道变化细分为小尺度和大尺度变化来刻画实际传播环境,其中小规模建模用于处理小位移及相应短时间间隔内的随机信道变化,而大规模建模则应对由收发端位置偏离或环境条件改变所引起的信道变化;此外,模型还通过引入随机过程来描述信道的时变特性:表面波动、发射器和接收器的移动等可以通过随机过程(如自回归过程)来模拟,这些过程具有特定的时间相关性函数,如贝塞尔型函数等。

#### 3.3.2 几何随机信道建模

2011 年,美国佐治亚理工学院的 A. G. Zajic<sup>[22]</sup>提出了多输入多输出的移动端前水声学多径衰落信

表 3 随机性信道建模方法汇总  
Table 3 Summary of random channel modeling methods

年份	模型名称	优点	缺点
非几何随机建模	2011 <sup>[56]</sup> EMD-TSC	基于实际测量数据,生成的随机项保留原始数据统计特性,提高仿真准确性。	模型的效果需要大量的高质量数据输入,且模型的随机重放技术和趋势平稳性假设涉及复杂的计算过程,仿真时间长。
	2013 <sup>[57]</sup> 水声信道统计模型	模型将物理分析与统计方法结合,建模过程区分大小尺度效应,提供细致信道分析更准确反映信道特性。	模型假设散射点延迟为高斯分布,且未考虑表面曲率和破碎波对信号的影响,模型特定性较强。
	2011 <sup>[22]</sup> MIMO-MtoM-GBSM	详细考虑了声波在水中的多次反射路径(宏散射和微散射),并推导了时间-频率相关函数。	模型包含多个物理参数(如角度扩展、垂直位移方差等),这些参数的准确估计需要复杂的测量和计算过程。
几何随机建模	2014 <sup>[58]</sup> MESS-GBSM	提出的 MESS 方法在计算效率和模型匹配度上均优于传统 LPNM 方法,能更快速准确的信道模拟。	采用了精确的几何散射模型,计算复杂度相对较高,不适合实时系统或资源受限的环境,且模型缺乏实际海洋环境下的实验数据验证。
	2017 <sup>[59]</sup> SOB	首个考虑海底坡度的几何随机模型,模型结果与实际测量数据匹配度高。	主要考虑宏观反射,忽略了微观散射效应,再高频段环境下准确性受到影响。
	2018 <sup>[60]</sup> Nonisovelocity Model	非等声速条件下进行信道建模,全面考虑水声信号的镜面反射和漫散射效应,模型有效性和准确性已被验证。	模型考虑非等速条件和随机散射效应,需要更高的计算资源和更长的计算时间,增加,且主要适用于浅海水环境。
	2021 <sup>[61]</sup> Modified non-stationary GBSM	模型明确考虑了信道的时变非平稳特性,相比一般的几何随机模型,其仿真过程时长不受限制。	模型主要针对浅海水域,且模型中的多个参数需要通过实验测量或估计获得,增加了模型应用的难度。

道的几何基础统计模型 (geometrical-based statistical model for MIMO mobile-to-mobile underwater acoustic multipath fading channels, MIMO-MtoM-GBSM)。在刻画实际传播环境时, 模型考虑声波在浅海水体中的二维波导传播特性, 将传播路径分解为直达路径和多反射路径, 反射路径又进一步由多条微观特征射线组成, 以模拟由于表面和底部粗糙度引起的微散射效应; 同时, 模型基于实际测量的海洋环境数据或经验公式更新反射路径的参数 (如反射点位置、反射系数等) 来模拟多径的时变性, 并允许根据实时测量的海洋环境数据或通过自适应算法进行在线动态更新其参数。通过这种方式, 模型能够更准确地反映水声信道的时变特性。

2014年7月, 挪威阿格德大学的 Naderi, Pätzold 以及美国佐治亚理工学院 A. G. Zajić 共同提出了浅水水下声学信道模型<sup>[58]</sup>。该模型通过假设海洋表面和底部粗糙, 且散射体随机分布在海洋表面和底部, 并利用几何散射理论刻画声波在实际海洋环境中的传播路径和特性, 包括分析出射角和入射角的概率分布函数以及时间-频率相关函数, 从而准确模拟了声波在浅水环境下的多径效应和频率选择性衰落, 有效刻画了实际的海洋传播环境; 同时, 模型计算过程中散射体的位置和分布会随时间发生变化, 并利用等间距散射体法 (method of equally spaced scatters, MESS) 来优化调整仿真模型中散射体的位置和数量等参数, 从而更准确地模拟信道的时变特性。

上述所提到的几种随机性信道建模方法, 为了便于分析和计算, 都做出了简化的假设。它们普遍认定在浅海水域中, 声波的传播速度保持恒定, 并且假设海底地形是理想的平坦状态。然而, 在实际情况中, 海洋中的声速剖面以及海底的地形往往复杂多变, 远非理想中的等声速、平坦海底。

挪威阿格德大学的 Naderi, Pätzold 以及突尼斯高级通信学院的 Hicheri 等<sup>[59]</sup>于 2017 年提出了斜坡海洋底部模型 (sloped ocean bottom, SOB)。在刻画实际传播环境时, 该模型将传播路径分类并参数化为直达、向下到达和向上到达等路径, 在使用几何公式计算每条路径的总传播距离中, 考虑海底坡度对声波反射和传播距离的影响, 从而确定声波的时延特性, 综合所有路径上的损耗叠加用于生成信道冲激响应; 此外, 该模型还通过考虑发射器与接收器的运动状态 (包括速度及方向) 以及海底坡度对声波传播路径的影响, 来模拟水声信道的时变特性。同年, 东北农业大学的尹艳玲以及哈尔滨工程大学的乔钢、刘淞佐等<sup>[63]</sup>在分析传统时变信道模型

的基础上, 从时域角度对已有的浅水时变多径信道模型中的小尺度衰落分量进行修正, 并通过湖试验证了修正模型与实验结果的一致性。

随后, 在 2018 年, 挪威阿格德大学的 Naderi 以及美国佐治亚理工学院 Zajić 等<sup>[60]</sup>提出了非等声速剖面的几何随机模型 (Nonisovelocity Model)。模型假设声速随深度变化, 声速剖面被划分为多个等宽的具有不同声速的水平分层, 同时引入多条传播路径, 并根据斯奈尔定律计算声波在分层分界面处的反射角或折射角, 从而模拟非等声速条件下的复杂传播环境。

值得注意的是, 前述模型均基于宽平稳假设, 对信道的时变性未给予足够关注。为弥补这一不足, 中国东南大学的 Zhu、Wang 以及哈尔滨工业大学的 Ma 于 2021 年提出了 2D 非平稳水下声学信道模型 (Modified non-stationary GBMSM)<sup>[61]</sup>。模型引入发射器和接收器的多种运动状态, 包括有意运动和无意漂移, 这些运动导致信号传输路径和距离随时间不断变化; 同时, 模型还考虑水面波动对信号散射的影响, 将水面视为动态变化的散射体集合。在这些因素共同作用下, 信号的传输延迟和增益不再保持恒定, 而是随时间动态变化, 模型通过计算动态变化, 推导出信道具有时间依赖性的关键统计特性, 进而准确描述浅水环境下水声信道的时非平稳特性。

## 4 面临的挑战与展望

尽管水声通信多径信道建模技术已发展多年, 但无论是确定性信道建模还是随机性信道建模方法均存在诸多共性问题, 比如在处理大规模组网问题或是高维度问题时计算复杂度过大、由于水声信道理论体系不够完善导致对其描述不够准确、建模所得结果实时性不强, 适用场景有限, 在不同环境下的适用性有待进一步验证等。

### 4.1 确定性信道建模面临的挑战

确定性信道建模方法历经长时间的发展, 其在构建水声信道模型时, 对于海洋环境因素的考量相较于随机性信道建模方法更为全面, 因而所得结果的精度也更高。然而, 该方法仍存有一定的不足之处。

首先, 如第三节所提到, 确定性信道建模的高精度特性往往伴随着较高的计算复杂度。尽管该模型能够提供精确的预测结果, 但其构建过程需要对环境进行详尽的刻画和建模, 涵盖海洋结构、水声

传播特性等多个方面,这无疑增加了模型的复杂度和计算成本。此外,当前多数确定性信道建模方法在海洋环境刻画或建模过程中均采用了声射线追踪模型 BELLHOP 来计算信道确定参数。这一选择主要源于 BELLHOP 能够直观地反映声射线在海洋中的多径传播情况。然而,几何声学近似使 BELLHOP 的射线理论方法只限于在高频范围有效,同时 BELLHOP 在计算过程中并未考虑衍射以及波导传播的低频依赖性,造成其计算结果中声影区和边界处的声场强度偏低,低频声波的传播损耗偏大以及波导效应反射形成的稳定路径也会被忽略,决定了 BELLHOP 无法对浅海环境下低频信号的传播过程进行较为精确的仿真,这也导致了采用 BELLHOP 的确定性信道建模方法往往不适用于浅海低频声波,其通用性不强。

#### 4.2 随机性信道建模面临的挑战

随机性信道建模方法相较于确定性信道建模虽在计算复杂度和灵活性上有所优势,但牺牲了部分结果精确度。然而,其在实际应用中面临一定局限性。

首先,多数随机性信道建模所得的模型主要适用于介质均匀的环境(如平坦海底、等声速剖面等),研究焦点多集中于水体边界条件(如海底或海面的粗糙度、海底坡度等)。其次,鉴于水声信道的时变性及其相对于信号中心频率的较大带宽使用,通常呈现出非平稳特性。然而,目前多数几何随机性信道建模方法多基于 WSSUS 假设,较少考虑水声信道的时-空-频非平稳性,这导致大部分现有模型难以进行长时间仿真。然而,实际海洋环境中存在众多散射体(如鱼群、虾类生物、海洋微生物等),它们对水声信号传播的影响不容忽视,这部分散射多径的功率在总接收功率中占有显著地位。最后,当前几何随机水声信道模型多在二维空间下进行研究,而实际中接收端与发射端的相对运动往往呈现三维特性,这使得二维模型在描述实际信道时存在较大的局限性。

#### 4.3 展 望

在未来的研究中,确定性信道建模技术应致力于在结果精确性与计算复杂度之间达到均衡,一方面,通过简化模型复杂度、利用插值和近似方法以及采用分层建模与逐步细化的策略,可以在保持一定精度的同时显著降低计算量,如前文所述的 Waymark 模型和 VirTEX 模型均是通过在时间或空间上对整体水声信道进行细分,随后利用插值方法来获得最终的水声信道建模结果。另一方面,利用

实际测量的信道响应进行插值估计或预处理,以及先对整体网络进行粗粒度建模再对关键区域细化等也能在保证精确度的前提下减小计算复杂度,如前文所提的 Watermark 模型。

此外,为解决几何声学近似对建模方法的限制,在建模流程中,可以引入更多种类的声传播模型接口,诸如简正波模型、抛物方程模型、快速场模型等,以适应多样化的海洋环境条件和频段需求,并根据环境与需求选取适当的模型,从而弥补通用性不足的问题。例如,声射线模型不适用于浅海低频声波传播,但在深海高频条件下则较为合适。在浅海低频声波的情况下,可以选用简正波模型、抛物方程模型或快速场模型。简正波模型虽然在近场描述方面存在不足,但在远距离通信中则表现优越;抛物方程模型在一定范围内忽略了边界条件,因此在仅需关注目标附近声场状况时,它能够在较短时间内提供较为准确的结果;快速场模型虽然计算结果精准,但无法处理复杂的海底地形,因此在浅海中较为平坦的地形条件下使用更为合适。

针对随机性信道建模技术,首先,提高建模过程中对信道几何形状(如水体、边界条件等)的描述精度,进而提高模型结果的真实可信度,如前文提到的基于斜坡海底和非等声速条件下的几何随机模型;其次,为准确描述水声信道的非平稳特性,随机性建模过程中应综合考虑发射器与接收器运动状态等动态因素,以及水面波动对信号散射的影响,精确计算其导致的信号传输延迟和增益的动态变化,从而全面捕捉并准确描述浅水环境下水下声学信道的时-空-频非平稳特性;最后,要实现二维到三维的转变,可利用水声信道变化缓慢这一特点,将多个二维平面上的仿真结果进行插值得到三维空间上的水声信道模型结果。

同时,未来科技的发展也为解决水声通信多径信道建模的共性问题提供了新的视角和手段。首先,快速发展的人工智能、大数据和云计算技术能帮助训练具有普适性核准确性的自适应水声多径信道模型、挖掘海量水声数据中的规律以帮助随机性信道建模方法优化模型参数,还能提供强大算力和存储空间帮助确定性信道建模进一步缩短仿真时间,并使大规模水声网络模型的训练和部署成为可能;其次,微纳技术也为水声多径信道研究工作提供新工具。微纳技术是指在微米和纳米尺度上设计、制造和操作材料、结构和器件的技术,旨在通过精确控制物质在微观尺度上的特性,开发出具有新颖功能和优越性能的材料、器件和系统<sup>[64]</sup>在无线通信领域内,利用微纳技术可以制造出高性能、低

功耗、小尺寸的硬件组件, 其在无线网络中具有重要应用, 如高性能传感器、执行器、射频微机电系统器件等<sup>[65]</sup>。同样, 微纳技术也能够为水声通信研究提供高性能传感器、换能器和信号处理器的设计与制造, 这些设备能够实现更精确的数据采集和信号处理, 并具备实时获取高质量数据的能力。通过先进器件, 信道建模研究可以更精确地刻画水声传播环境, 确保模型准确反映水下环境的实际特性, 并根据环境变化自适应地调整参数, 从而增强模型在复杂水体条件下的可靠性和效率。此外, 微纳技术制造的高性能器件还能升级水下实验平台, 使其在不同环境下采集更全面、更精细的水声信道数据, 进一步优化和修正模型。

### 参 考 文 献

- [1] 夏明华, 朱又敏, 陈二虎, 等. 海洋通信的发展现状与时代挑战[J]. *中国科学: 信息科学*, 2017, **47**(6): 677-695.  
XIA Minghua, ZHU Youmin, CHEN Erhu, et al. The state of the art and challenges of marine communications[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2017, **47**(6): 677-695.
- [2] WANG C X, HUANG J, WANG H M, et al. 6G wireless channel measurements and models: trends and challenges[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, **15**(4): 22-32.
- [3] KIM S M, BYUN S, KIM S G, et al. Underwater acoustic channel characterization at 6kHz and 12kHz in a shallow water near Jeju Island[C]//2013 OCEANS, San Diego: IEEE, 2013.
- [4] 贾宁, 黄建纯. 水声通信技术综述[J]. *物理*, 2014, **43**(10): 650-657.  
JIA Ning, HUANG Jianchun. An overview of underwater acoustic communications[J]. *Physics*, 2014, **43**(10): 650-657.
- [5] 董晓, 方世良. 水下声信标信号的多脉冲匹配滤波改进方法[J]. *声学技术*, 2022, **41**(3): 363-368.  
DONG Xiao, FANG Shiliang. Improved method of multiple matched filtering for underwater acoustic beacon signal[J]. *Technical Acoustics*, 2022, **41**(3): 363-368.
- [6] 付振华, 李杰, 季飞, 等. 面向海工装备智能化的海洋异构物联网架构[J]. *电信科学*, 2021, **37**(7): 34-39.  
FU Zhenhua, LI Jie, JI Fei, et al. Architecture of a heterogeneous marine internet of things for intelligent offshore engineering[J]. *Telecommunications Science*, 2021, **37**(7): 34-39.
- [7] 朱维庆, 朱敏, 武岩波, 等. 载人潜水器'蛟龙'号的水声通信信号处理[J]. *声学学报*, 2012, **37**(6): 565-573.  
ZHU Weiqing, ZHU Min, WU Yanbo, et al. Signal processing in underwater acoustic communication system for manned deep submersible[J]. *Acta Acustica*, 2012, **37**(6): 565-573.
- [8] 王承祥, 黄杰, 王海明, 等. 面向 6G 的无线通信信道特性分析与建模[J]. *物联网学报*, 2020, **4**(1): 19-32.  
WANG Chengxiang, HUANG Jie, WANG Haiming, et al. 6G oriented wireless communication channel characteristics analysis and modeling[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2020, **4**(1): 19-32.
- [9] 高路, 贺志强, 田宝玉, 等. 高速水声通信系统仿真研究[J]. *声学学报*, 2003, **28**(1): 33-39.  
GAO Lu, HE Zhiqiang, TIAN Baoyu, et al. Research on the simulation of high speed underwater acoustic communication systems[J]. *Acta Acustica*, 2003, **28**(1): 33-39.
- [10] CATIPOVIC J A. Performance limitations in underwater acoustic telemetry[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1990, **15**(3): 205-216.
- [11] STOJANOVIC M, CATIPOVIC J, PROAKIS J G. Adaptive multichannel combining and equalization for underwater acoustic communications[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1993, **94**(3): 1621-1631.
- [12] 王海斌, 汪俊, 台玉朋, 等. 水声通信技术研究进展与技术水平现状[J]. *信号处理*, 2019, **35**(9): 1441-1449.  
WANG Haibin, WANG Jun, TAI Yupeng, et al. Development and the state of the art in underwater acoustic communication[J]. *Journal of Signal Processing*, 2019, **35**(9): 1441-1449.
- [13] STOJANOVIC M. Underwater acoustic communications[M]. New York: American Cancer Society, 2009.
- [14] PREISIG J C, DEANE G B. Surface wave focusing and acoustic communications in the surf zone[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2004, **116**(4): 2067-2080.
- [15] QU F Z, WANG Z D, YANG L Q, et al. A journey toward modeling and resolving Doppler in underwater acoustic communications[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, **54**(2): 49-55.
- [16] KILFOYLE D B, BAGGEROER A B. The state of the art in underwater acoustic telemetry[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **25**(1): 4-27.
- [17] EGGEN T H, BAGGEROER A B, PREISIG J C. Communication over Doppler spread channels. part I: channel and receiver presentation[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **25**(1): 62-71.
- [18] BERGER C R, ZHOU S L, PREISIG J C, et al. Sparse channel estimation for multicarrier underwater acoustic communication: from subspace methods to compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, **58**(3): 1708-1721.
- [19] 梁仕杰, 王彪, 张岑. 基于稀疏约束的 DCD 滑动窗 RLS 水声信道估计算法研究[J]. *声学技术*, 2021, **40**(1): 123-127.  
LIANG Shijie, WANG Biao, ZHANG Cen. Acoustic channel estimation algorithm based on DCD sliding window RLS with norm constraint[J]. *Technical Acoustics*, 2021, **40**(1): 123-127.
- [20] RAPPAPORT T S. Wireless communications: principles and practice[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2024.
- [21] STOJANOVIC M, PREISIG J. Underwater acoustic communication channels: propagation models and statistical characterization[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, **47**(1): 84-89.
- [22] ZAJIC A G. Statistical modeling of MIMO mobile-to-mobile underwater channels[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **60**(4): 1337-1351.
- [23] 许肖梅. 声学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 114-140.
- [24] BREKHOVSKIKH L M, LYSANOV Y P. Fundamentals of Ocean Acoustics[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1991.
- [25] 周益清, 骆文于. 海水吸收对远距离水下声场计算的影响[J]. *声学技术*, 2022, **41**(1): 21-27.  
ZHOU Yiqing, LUO Wenyu. The influence of water absorption on long-distance underwater acoustic field computation[J]. *Technical Acoustics*, 2022, **41**(1): 21-27.
- [26] 徐立军, 鄢社锋, 曾迪, 等. 全海深高速水声通信机设计与试验[J]. *信号处理*, 2019, **35**(9): 1505-1512.  
XU Lijun, YAN Shefeng, ZENG Di, et al. Design of the full-depth high rate underwater communication modem[J]. *Journal of Signal Processing*, 2019, **35**(9): 1505-1512.
- [27] URICK R J. Sound propagation in the sea[M]. Commonwealth of Virginia: Office of the Secretary of Defense, Defense

- Advanced Research Projects Agency, 1979.
- [28] 徐丽亚, 杨坤德. 基于深海声影区海底反射损失的地声参数反演方法[J]. 声学技术, 2020, **39**(1): 28-33.  
XU Liya, YANG Kunde. Geoacoustic parameter inversion based on seabed reflection loss in the shadow zone of deep ocean[J]. Technical Acoustics, 2020, **39**(1): 28-33.
- [29] ISTEPANIAN AND MILICA STOJANOVIC R S H. Underwater acoustic digital signal processing and communication systems[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [30] PÄTZOLD M. Mobile fading channels[M]. West Sussex: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [31] CHITRE M. A high-frequency warm shallow water acoustic communications channel model and measurements[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2007, **122**(5): 2580-2586.
- [32] LUCANI D, MEDARD M, STOJANOVIC M. Underwater acoustic networks: channel models and network coding based lower bound to transmission power for multicast[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, **26**(9): 1708-1719.
- [33] SOCHELEAU F X, LAOT C, PASSERIEUX J M. A maximum entropy framework for statistical modeling of underwater acoustic communication channels[C]//OCEANS'10 IEEE SYDNEY. Sydney, Australia. IEEE, 2010: 1-7.
- [34] LLOR J, MALUMBRES M P. Statistical modeling of large-scale signal path loss in underwater acoustic networks[J]. *Sensors*, 2013, **13**(2): 2279-2294.
- [35] LIU C S, ZAKHAROV Y V, CHEN T Y. Doubly selective underwater acoustic channel model for a moving transmitter/receiver[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **61**(3): 938-950.
- [36] HENSON B, LI J H, ZAKHAROV Y V, et al. Waymark baseband underwater acoustic propagation model[C]//2014 Underwater Communications and Networking (UComms). Sestri Levante, Italy. IEEE, 2014: 1-5.
- [37] Van WALREE P A, SOCHELEAU F X, OTNES R, et al. The watermark benchmark for underwater acoustic modulation schemes[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **42**(4): 1007-1018.
- [38] SIDERIUS M, PORTER M B. Modeling broadband ocean acoustic transmissions with time-varying sea surfaces[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, **124**(1): 137-150.
- [39] ROSENBERG A P, CHIZHIK D, ZHANG Q Q. High frequency rough surface parabolic equation modeling for underwater acoustic communications[C]//MILCOM 2009 - 2009 IEEE Military Communications Conference. Boston, MA, USA. IEEE, 2009: 1-6.
- [40] KING P, VENKATESAN R, LI C. Modeling a shallow water acoustic communication channel using environmental data for seafloor sensor networks[J]. *Wireless Communications & Mobile Computing*, 2010, **10**(11): 1521-1532.
- [41] DOL H S, COLIN M E G D, AINSLIE M A, et al. Simulation of an underwater acoustic communication channel characterized by wind-generated surface waves and bubbles[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **38**(4): 642-654.
- [42] WANG P, ZHANG L, LI V O. A stratified acoustic model accounting for phase shifts for underwater acoustic networks[J]. *Sensors*, 2013, **13**(5): 6183-6203.
- [43] OH S H, EOM M J, KIM J S, et al. Application of an underwater communication channel simulator to performance evaluation[C]//2013 Fifth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). Danang, Vietnam. IEEE, 2013: 30-31.
- [44] PETERSON J C, PORTER M B. Ray/beam tracing for modeling the effects of ocean and platform dynamics[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **38**(4): 655-665.
- [45] 万智萍, 陈伟杰. EE-UDRA: 带环境元素的水下传感器网络分布式路由算法[J]. 传感技术学报, 2014, **27**(8): 1100-1106.  
WAN Zhiping, CHEN Weijie. EE-UDRA: distributed routing algorithms with environmental elements for underwater sensor networks[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2014, **27**(8): 1100-1106.
- [46] 顾晨, 孟庆功, 束锋, 等. 水声通信系统基于分布式的导频放置[J]. 电子器件, 2016, **39**(1): 144-147.  
GU Chen, MENG Qinggong, SHU Feng, et al. Distributed pilot pattern for underwater acoustic communication system[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2016, **39**(1): 144-147.
- [47] SUN D J, HONG X P, CUI H Y, et al. A symbol-based pass-band Doppler tracking and compensation algorithm for underwater acoustic DSSS communications[J]. *Journal of Communications and Information Networks*, **5**(2): 168-176.
- [48] 张宇, 江鹏, 郭文飞, 等. 一种利用两阶段学习模型的水下阵列定位方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, **46**(12): 1889-1899.  
ZHANG Yu, JIANG Peng, GUO Wenfei, et al. An underwater array localization method using two-stage learning model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, **46**(12): 1889-1899.
- [49] 李莉, 路晨贺, 王桐, 等. 基于 WOSS 的 NS-Miracle 水声信道模拟方法扩展[J]. 声学技术, 2021, **40**(1): 21-28.  
LI Li, LU Chenhe, WANG Tong, et al. Extension of simulation method for underwater acoustic network channel based on NS-Miracle and WOSS[J]. *Technical Acoustics*, 2021, **40**(1): 21-28.
- [50] 李渝舟, 黄运龙, 桂正泰, 等. PC-FFT: 一种时频协同的差分水声 OFDM 信号 ICI 抑制方法[J]. 信号处理, 2023, **39**(10): 1842-1856.  
LI Yuzhou, HUANG Yunlong, GUI Zhengtai, et al. PC-FFT: a time-frequency-cooperative ICI mitigation method for differential underwater acoustic OFDM signals[J]. *Journal of Signal Processing*, 2023, **39**(10): 1842-1856.
- [51] 童峰, 许肖梅, 方世良. 一种单频水声信号多径时延估计算法[J]. 声学学报, 2008, **33**(1): 62-68.  
TONG Feng, XU Xiaomei, FANG Shiliang. Multipath time-delay estimation of underwater acoustic sinusoidal signals[J]. *Acta Acustica*, 2008, **33**(1): 62-68.
- [52] ELFOUHAILY T, CHAPRON B, KATSAROS K, et al. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1997, **102**(C7): 15781-15796.
- [53] 赵蕊, 许建, 向先波, 等. 多自主式水下机器人的路径规划和控制技术综述[J]. 中国舰船研究, 2018, **13**(6): 58-65.  
ZHAO Rui, XU Jian, XIANG Xianbo, et al. A review of path planning and cooperative control for MAUV systems[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2018, **13**(6): 58-65.
- [54] 刘志勇, 金子皓, 杨洪娟, 等. 基于深度学习的水声信道联合多分支合并与均衡算法[J]. 电子与信息学报, 2024, **46**(5): 1-7.  
LIU Zhiyong, JIN Zihao, YANG Hongjuan, et al. Deep learning-based joint multi-branch merging and equalization algorithm for underwater acoustic channel[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2024, **46**(5): 1-7.
- [55] 朱艺佳, 梁喆, 侯朋, 等. 时变信道模型及传输特性分析[J]. 舰船科学技术, 2024, **46**(8): 137-142.

- ZHU Yijia, LIANG Zhe, HOU Peng, et al. Time-varying channel model and transmission characteristics analysis[J]. *Ship Science and Technology*, 2024, **46**(8): 137-142.
- [56] SOCHELEAU F X, LAOT C, PASSERIEUX J M. Stochastic replay of non-WSSUS underwater acoustic communication channels recorded at sea[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, **59**(10): 4838-4849.
- [57] QARABAQI P, STOJANOVIC M. Statistical characterization and computationally efficient modeling of a class of underwater acoustic communication channels[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **38**(4): 701-717.
- [58] NADERI M, PATZOLD M, ZAJIC A G. A geometry-based channel model for shallow underwater acoustic channels under rough surface and bottom scattering conditions[C]//2014 IEEE Fifth International Conference on Communications and Electronics (ICCE). Danang, Vietnam. IEEE, 2014: 112-117.
- [59] NADERI M, PATZOLD M, HICHERI R, et al. A geometry-based underwater acoustic channel model allowing for sloped ocean bottom conditions[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, **16**(4): 2394-2408.
- [60] NADERI M, ZAJIC A G, PATZOLD M. A nonisovelocity geometry-based underwater acoustic channel model[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **67**(4): 2864-2879.
- [61] ZHU X M, WANG C X, MA R F. A 2D non-stationary channel model for underwater acoustic communication systems [C]//2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring). Helsinki, Finland. IEEE, 2021: 1-6.
- [62] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, **454**(1971): 903-995.
- [63] 尹艳玲, 乔钢, 刘淞佐, 等. 浅水时变多途信道特性分析与模型实验研究[J]. *声学学报*, 2019, **44**(1): 96-105.
- YIN Yanling, QIAO Gang, LIU Songzuo, et al. Shallow water time-varying multipath channel characteristic analysis and model amendment[J]. *Acta Acustica*, 2019, **44**(1): 96-105.
- [64] ZIAIE B, BALDI A, ATASHBARM Z. Introduction to micro-/nanofabrication[M]//Springer Handbook of Nanotechnology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010: 231-269.
- [65] IANNACCI J, POOR H V. Review and perspectives of micro/nano technologies as key-enablers of 6G[J]. *IEEE Access*, 2022, **10**: 55428-55458.