

# 蓝绿激光气-海跨介质通信信道特征 动态学习传输方案

张子金<sup>1</sup>, 李 卓<sup>2\*</sup>, 邢莉娟<sup>2</sup>

(1. 西安电子科技大学广州研究院, 广东广州 510555; 2. 西安电子科技大学通信工程学院, 陕西西安 710071)

**摘要:** 气-海跨介质通信是实现空-海跨域高速互联的关键技术, 蓝绿光波段(450~550 nm)凭借其良好的海洋穿透特性, 已成为水下无线光通信链路的理想传输窗口, 为跨介质高速通信提供了重要支撑。然而, 受大气、随机海面波浪及海水散射吸收的非线性耦合影响, 跨介质信道呈现出显著的非平稳性与强时变特征。在此类快速时变信道环境中, 依赖信道准静态假设的传统固定编码调制策略, 会因为与实际信道失配而导致系统误码性能下降。针对这一问题, 本文提出一种气-海跨介质通信信道特征动态学习传输方案, 通过构建“周期性探测-动态学习-重构”的闭环反馈机制, 使编码结构能够随海况变化而动态优化。具体而言, 发送端周期性地发送预先设计好的导频序列, 接收端利用该导频信号进行信道估计, 实时统计当前信道的瞬时特征, 进而生成与当前海况最匹配的极化码构造方案; 随后通过反馈链路将该构造信息回传至发送端, 发送端据此完成编码重构, 对待传信息序列实施自适应极化编码。该闭环反馈过程周期性进行, 确保编码重构紧紧跟随跨介质时变信道的非平稳性变化, 从而克服了固定编码策略与真实物理信道失配的问题。为验证系统方案的性能, 搭建了涵盖大气、气-海界面、海水介质的跨介质通信信道, 选取了 Jerlov IB、Jerlov II、Jerlov III 三种典型水质, 分别模拟由弱到强的海水吸收与散射环境。仿真结果表明, 所提信道特征动态学习策略能够适应当前海水介质的变化, 与未编码系统相比, 在相同 Jerlov 水质类型下采用极化编码可获得显著的编码增益, 误比特率(Bit Error Rate, BER)明显降低。与 3GPP-5G 标准中采用的固定极化码构造策略相比, 所提出的信道特征动态学习策略在三种不同 Jerlov 水质条件下均实现了显著的性能提升, 且随着水体浑浊度增加、信道条件恶化, 性能增益越高。上述结果证明, 基于信道特征动态学习的自适应编码传输能够感知并适应海水介质的动态改变, 为构建高可靠性的气-海跨介质自适应通信系统提供了坚实的理论依据与技术支持。

**关键词:** 气-海跨介质通信; 极化码; 信道特征动态学习; 信道估计; 闭环反馈; 自适应编码

**基金项目:** 111 工程基金(No.B08038)

**中图分类号:** TN929.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(XXXX)XX-0001-10

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20260077

## A Transmission Scheme with Dynamic Learning of Channel Characteristics for Blue-Green Laser Air-Sea Cross-Medium Communication

ZHANG Zijin<sup>1</sup>, LI Zhuo<sup>2\*</sup>, XING Lijuan<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Research Institute, Xidian University, Guangzhou, Guangdong 510555, China;

2. School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** Air-sea cross-medium communication is a crucial technology for enabling high-speed air-sea cross-domain interconnection. Owing to its excellent oceanic penetration characteristics, the blue-green light band (450 nm~550 nm) has emerged as an ideal transmission window for underwater wireless optical communication links, providing vital support for high-speed cross-medium communication. However, subjected to the nonlinear coupling effects of the atmosphere, random sea surface waves, and seawater scattering and absorption, the cross-medium channel exhibits significant non-stationarity and strong time-varying characteristics. In such rapidly time-varying channel environments, traditional fixed coding and modulation strategies, which rely on quasi-static channel assumptions, suffer from degraded system error performance due to mismatches with the actual channel conditions. To address this issue, this paper proposes a transmission scheme based on dynamic channel feature learning for air-sea cross-medium communication. By constructing a closed-loop feedback mechanism of "periodic probing—dynamic learning—reconstruction," the coding structure can be dynamically optimized in response to varying sea states. Specifically, the transmitter periodically transmits pre-designed pilot sequences. The receiver utilizes these pilot signals for channel estimation, compiles real-time statistics on the instantaneous characteristics of the cur-

rent channel, and subsequently generates a polar code construction scheme that optimally matches the prevailing sea conditions. This construction information is then fed back to the transmitter via a feedback link. Based on this information, the transmitter executes code reconstruction and applies adaptive polar coding to the information sequence to be transmitted. This closed-loop feedback process operates periodically, ensuring that the code reconstruction closely tracks the non-stationary variations of the cross-medium time-varying channel, thereby overcoming the mismatch between fixed coding strategies and the actual physical channel. To verify the performance of the proposed system, a cross-medium communication channel model encompassing the atmosphere, the air-sea interface, and the seawater medium was established. Three typical water types—Jerlov IB, Jerlov II, and Jerlov III—were selected to simulate oceanic environments with weak to strong absorption and scattering effects, respectively. Simulation results demonstrate that the proposed dynamic channel feature learning strategy can effectively adapt to variations in the seawater medium. Compared to uncoded systems, applying polar coding under the same Jerlov water type yields a significant coding gain, with the bit error rate (BER) markedly reduced. Furthermore, compared to the fixed polar code construction strategy adopted in the 3GPP-5G standard, the proposed dynamic channel feature learning strategy achieves substantial performance improvements across all three Jerlov water conditions. Notably, the performance gain increases as water turbidity rises and channel conditions deteriorate. These results validate that adaptive coded transmission based on dynamic channel feature learning can perceive and adapt to the dynamic changes of the seawater medium, providing a solid theoretical foundation and technical support for the development of highly reliable air-sea cross-medium adaptive communication systems.

**Keywords:** air-sea cross-medium communication; polar codes; channel characteristic dynamic learning; channel estimation; closed-loop feedback; adaptive coding

**Foundation Item(s):** 111 Project (No.B08038)

## 0 引言

随着“空-天-地-海”一体化通信网络概念的提出,构建跨越气-海界面的高速数据链路已成为实现全球无缝覆盖与跨域协同作战的核心一环。Mao等人<sup>[1]</sup>在关于空间-空-海综合网络的综述中指出,跨介质通信是打破水下信息孤岛、实现天基与海基网络互联的关键瓶颈技术。相比于传统的水声通信和射频通信,激光跨介质通信具有不可比拟的优势。水声通信受限于极窄的带宽和严重的多径效应,难以支持高速传输;而射频信号在海水中衰减剧烈,仅极低频能穿透但效率低下。相反,可见光波段(特别是蓝绿光)拥有巨大的带宽潜力和较低的传输延迟。2025年,Zha等人<sup>[2]</sup>使用483 nm激光在复杂的“冰-水-空气”跨介质通道中可实现高达 $3 \times 10^9$  bit/s的通信速率,证明了光通信在解决跨域高速互联方面的巨大潜力。同年,为应对长距离传输中的环境干扰问题,Jiao等人<sup>[3]</sup>采用蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)模拟方法建立了非均匀大气-海洋信道模型。该研究指出,以532 nm波长的蓝绿激光作为发射光源,并通过优化接收机视场角与孔径参数,即使在强太阳辐射背景下仍可有效维持链路的信噪比与通信深度。

气-海跨介质链路是一个由大气、随机界面及海水构成的多物理场耦合系统,具有高度的复杂性与时变性。为了揭示其信号传输机理,国内外学者在介质信道建模方面开展了大量工作。2009年,Dong等人<sup>[4]</sup>基于MC与光子追踪方法建立了全链路的跨介

质信道模型,量化了云层厚度、海浪起伏及水质参数对光脉冲传输的联合影响,进一步揭示了该信道强烈的非平稳特性。同年,Nistazakis等人<sup>[5]</sup>对大气湍流信道下的自由空间光通信系统性能进行了理论分析。该研究针对弱至中度以及中至强度湍流条件,分别建立了基于对数正态分布和Gamma-Gamma分布的统计信道模型,准确描述由大气折射率起伏引起的光强闪烁效应,该理论工作为评估和设计湍流信道中的光通信系统提供了重要的分析基础与数学工具,对水下无线光通信(Underwater Wireless Optical Communication, UWOC)系统亦具有参考价值。2019年,Nabavi等人<sup>[6]</sup>引入了具备单光子检测能力的高灵敏度单光子雪崩二极管(Single Photon Avalanche Diode, SPAD)接收机技术。他们建立了随机海面波浪斜率与水下散射特性的链路模型,深入评估了在不同风速与浑浊度条件下,利用SPAD阵列捕获微弱光信号、克服界面光束扩散带来的性能优势。

为保障通信传输高可靠性,前向纠错技术在水下光通信领域已得到了广泛应用。早期的研究多采用经典的Reed-Solomon码,利用其纠突发错误能力来抵抗气泡或湍流引起的信号中断<sup>[7]</sup>。2016年,Sun等人<sup>[8]</sup>提出了一种具有兼容性的Turbo码光通信系统,为解决水下并行光传输中的非对称信道损失提供了一种有效的编码与资源联合优化思路。2021年,Wu等人<sup>[9]</sup>针对UWOC系统中因吸收、散射及湍流等因素引起的光强起伏与光束偏移导致的信号衰落问题,提

出了一种基于极化码与脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM)的联合编码方案,极化码能有效抑制光束离轴漂移引起的衰落,为复杂海洋环境下高速、高可靠激光通信提供了一种有效的编码调制解决方案。近年来,低密度奇偶校验(Low-Density Parity-Check, LDPC)码因其稀疏矩阵特性与优秀的并行处理能力,成为水下光通信的主流选择。2022年,邢莉娟等人<sup>[10]</sup>进一步证实,在强多径、剧烈起伏的水声通信信道中,极化码的纠错性能与编码增益也显著优于传统的LDPC码。2023年,Guo等人<sup>[11]</sup>系统分析了LDPC码的正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)系统在服从指数韦布尔分布的水下湍流信道中的性能,量化了BER与闪烁系数、信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)、LDPC码长以及OFDM子载波调制阶数等多参数之间的关系,在湍流条件下实现了可靠的高速率水下光通信。2024年,Padala等人<sup>[12]</sup>引入了空间耦合(Spatially Coupled, SC)-LDPC码,其凭借其独特的阈值饱和特性,在信道条件变化迅速时仍能保持优异的纠错能力,显著提升了通信链路的鲁棒性。同年,在水下OFDM系统中,Abdulameer等人<sup>[13]</sup>和Chen等人<sup>[14]</sup>分别验证了极化码相比传统LDPC码和未编码系统在BER和信道容量上的显著优势。而对于跨介质光通信技术的研究目前正处于起步阶段。2025年,Li等人<sup>[15]</sup>针对激光-声学跨介质通信,设计了极化码与PPM的联合编码方案,获得了约2 dB的额外增益。同年,Xing等人<sup>[16]</sup>聚焦于蓝绿激光跨介质通信这一特定场景,深入探讨了基于极化码的高效编码方案,进一步在理论与仿真层面验证了极化码结构在对抗跨介质复杂干扰方面的巨大潜力。

上述研究在验证水下与跨介质链路可行性与提升吞吐量方面取得了显著进展,但现有适用于水下或跨介质光通信传输的编码方案,普遍采用静态的传输策略。气-海跨介质信道本质上是一个受海浪动态起伏主导的快时变、强随机系统。这种“静态”的预设配置在面对瞬息万变的复杂海况时显得极不灵活。当水质环境变化时,信道的实际容量将迅速偏离预设参数,导致传输策略与信道状态发生失配,造成传输性能下降。因此,本文提出了一个“周期性探测-动态学习-重构”的闭环系统传输方案。系统利用周期性导频信号探测信道,结合蒙特卡罗光子追踪模型周期性学习气-海界面的动态特征,进而设计出适合当前信道场景的传输方案。与现有静态方案相比,该方案能精准跟随信道时变特征,灵活调整传输策略。仿真结果表明,该机制在复杂海况下能快速适应水质环境变化,实现比传统静态传输方案更优的BER性能与鲁棒性。

本文的章节组织结构安排如下:第二节简要阐述

了极化码编译码原理及信道可靠性计算方法,并基于蒙特卡罗光子追踪算法,构建了包含近海大气、动态海面及水下散射特性的跨介质全链路信道模型;第三节提出了信道特征动态学习传输方案,阐述了基于导频探测的信道特征更新机制;第四节主要做了相关的仿真模拟与性能分析;第五节根据本文的仿真实验得出结论。

## 1 基础理论

### 1.1 极化码编译码原理与信道可靠性计算

极化码由Arikan于2009年首次提出<sup>[17]</sup>,是编码理论领域中第一种被严格证明可以达到二进制输入离散无记忆信道(Binary-input Discrete Memoryless Channel, B-DMC)香农极限的构造性编码方案。其核心思想在于“信道极化”现象,这一过程包含信道分裂与信道合并两个部分,将两个独立的信道副本 $W$ ,化为两个新的极化信道( $W'$ ,  $W''$ ),其信道转移概率分别为

$$W'(y_1, y_2 | u_1) = \sum_{u_2} \frac{1}{2} W(y_1 | u_1 \oplus u_2) W(y_2 | u_2) \quad (1)$$

$$W''(y_1, y_2, u_1 | u_2) = \frac{1}{2} W(y_1 | u_1 \oplus u_2) W(y_2 | u_2) \quad (2)$$

其中, $u_1$ 与 $u_2$ 代表信道输入, $y_1$ 与 $y_2$ 代表信道输出, $f(y_1, y_2)$ 表示这两个输出值的一个映射。

在编码构造上,极化码利用核心的 $2 \times 2$ 核矩阵进行 $n$ 次克罗内克积运算,并结合比特反转排列,递归地生成 $N$ 维生成矩阵。随着码长的增加,这种递归结构使得子信道发生两极分化:一部分子信道的信道容量趋近于1,成为近乎无噪的完美信道,用于传输信息比特;另一部分子信道的容量则趋近0,成为完全噪化的信道,用于放置固定的冻结比特。在译码端,为了弥补传统串行抵消译码(Successive Cancellation, SC)在有限码长下易受错误传播影响的缺陷,本文采用串行抵消列表(Successive Cancellation List, SCL)<sup>[18]</sup>译码算法。SCL译码算法在每一步译码过程中保留 $l$ 条最可能的候选路径,通过计算基于对数似然比(Log-likelihood Ratio, LLR)的路径度量值来动态筛选最佳路径,从而显著提升了译码性能。

为了在动态变化的气-海跨介质信道中实现自适应传输,系统必须精准识别上述“好信道”与“坏信道”的分布,这依赖于对信道可靠性的定量评估。本文采用巴氏参数(Bhattacharyya Parameter)是衡量信道可靠性的通用指标。对于二进制输入离散无记忆信道 $W$ ,其巴氏参数 $Z(W)$ 定义为

$$Z(W) = \sum_{y \in \mathcal{Y}} \sqrt{W(y|0)W(y|1)} \quad (3)$$

其中,  $W(y|0)$ ,  $W(y|1)$  分别表示发送 0 收到  $y$  与发送 1 收到  $y$  的转移概率,  $Z(W)$  的取值范围为  $[0, 1]$ , 其数值大小与信道可靠性呈现负相关关系。即当  $Z(W)$  接近 0 时, 表示信道质量优良, 错误概率低; 而当  $Z(W)$  接近 1 时, 则意味着信道质量恶劣, 传输过程中极易产生误码。

## 1.2 气-海跨介质信道模拟过程

为描述光在信道中的传输特性, 本文基于蒙特卡罗光子追踪思想<sup>[19]</sup>建立了气-海跨介质通信信道模拟模型。该模型能够全面考虑光子在近海大气层、气-海界面以及海水介质中经历的吸收、散射与折射等多物理过程, 并通过统计分析方法对光子在不同路径上的能量衰减与角度分布进行模拟, 从而实现跨介质信道的传输过程<sup>[3]</sup>。下面将具体说明。

### 1.2.1 光子包初始化

每个光子包的初始状态由其空间坐标  $r_0$ 、归一化方向向量  $\mathbf{u}_{\text{air}}$  以及初始能量  $E_0 = 1$  来确定。假设发射端光源为沿  $z$  轴传播的高斯光束, 光子在发射平面  $z = 0$  上的横向空间分布遵循高斯统计规律。在仿真实验中, 使用采样法确定光子的初始径向位置  $r_0$ , 其数学表达式为

$$r_0 = \sigma_{\text{spot}} \sqrt{-2\ln(1 - \zeta_r)} \quad (4)$$

其中,  $\sigma_{\text{spot}}$  代表初始光斑的标准差,  $\zeta_r$  为服从  $[0, 1]$  区间内均匀分布的随机变量。结合随机方位角  $\varphi_0 \in [0, 2\pi]$ , 光子包的初始笛卡尔坐标可确立为  $x_0 = r_0 \cos \varphi_0$ ,  $y_0 = r_0 \sin \varphi_0$ ,  $z_0 = 0$ 。

为了精确表征激光束在 100 m 传输距离上的发散特性, 模型对光子的初始发射方向进行了概率建模。定义光子出射的发散角  $\theta_{\text{div}}$  服从均值为零、方差与设定光束发散半角相关的正态分布, 即  $\theta_{\text{div}} \sim N(0, \sigma_\theta^2)$ ; 出射方位角  $\phi$  则服从  $[0, 2\pi]$  的均匀分布。据此, 光子在大气层中传输的初始方向余弦向量  $\mathbf{u}_{\text{air}}$ , 可通过球坐标变换得出:

$$\begin{cases} u_{x, \text{air}} = \sin \theta_{\text{div}} \cos \phi \\ u_{y, \text{air}} = \sin \theta_{\text{div}} \sin \phi \\ u_{z, \text{air}} = \cos \theta_{\text{div}} \end{cases} \quad (5)$$

### 1.2.2 近海大气信道传输

在气-海跨介质通信系统的链路中, 近海大气层构成了光信号传输的首个物理环节。设定大气信道传输距离为  $L_{\text{air}} = 100$  m, 尽管传输距离较短, 为了保证模型的物理完备性, 本文考虑了大气介质对光束的衰减作用。光子在到达海面时的剩余能量为  $E_{\text{seaface}}$ , 依据比尔-朗伯定律 (Beer-Lambert Law) 进行更新:

$$E_{\text{seaface}} = E_0 \exp(-k_{\text{atm}} L_{\text{path}}) \quad (6)$$

其中,  $E_0 = 1$  为初始归一化能量,  $k_{\text{atm}}$  为对应 532 nm 波

长的大气消光系数,  $L_{\text{path}}$  光子在近海空气介质中的实际传输路径长度,  $E_{\text{seaface}}$  光子到达海面时的能量。

### 1.2.3 动态气海界面处理

气-海界面处的随机性采用 Cox-Munk 波浪模型进行描述。海面波浪的倾斜程度由风速驱动, 其波浪斜率的均方根  $\sigma_{\text{slope}}$  定义为

$$\sigma_{\text{slope}}^2 = 0.003 + 0.00512 \cdot V_{\text{wind}} \quad (7)$$

其中  $V_{\text{wind}}$  为海面风速。海面单位法向量  $\mathbf{n}$  由倾角  $\beta$  和方位角  $\alpha$  决定。根据 Cox-Munk 波浪模型, 倾角  $\beta$  的正切值平方服从指数分布, 由下式确定:

$$\beta = \arctan\left(\sqrt{-\sigma_{\text{slope}}^2 \ln(\zeta_\beta)}\right) \quad (8)$$

其中  $\zeta_\beta \sim U(0, 1)$ , 方位角  $\alpha$  服从  $[0, 2\pi]$  的均匀分布。因此, 海面单位法向量  $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$  在笛卡尔坐标系下的计算公式为

$$\begin{cases} n_x = -\sin \beta \cos \alpha \\ n_y = -\sin \beta \sin \alpha \\ n_z = \cos \beta \end{cases} \quad (9)$$

光子包与海面的相互作用遵循矢量形式的斯涅尔定律 (Snell's Law)。设空气和海水的折射率分别为  $n_{\text{air}}$  和  $n_{\text{water}}$ , 入射光方向为  $\mathbf{u}_{\text{air}}$ , 界面法向为  $\mathbf{n}$ 。折射光方向向量  $\mathbf{u}_{\text{water}}$  计算如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{\text{water}} = & \frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{water}}} (\mathbf{u}_{\text{air}} - (\mathbf{u}_{\text{air}} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}) \\ & - \mathbf{n} \sqrt{1 - \left(\frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{water}}}\right)^2 (1 - (\mathbf{u}_{\text{air}} \cdot \mathbf{n})^2)} \end{aligned} \quad (10)$$

光子包穿透气海界面之后的能量为  $E_{\text{water}}$ , 其能量传输遵循菲涅尔定律 (Fresnel Laws)。由非偏振光的菲涅耳公式进行更新, 根据垂直极化分量  $T_s$  与平行极化分量  $T_p$  可以得出:

$$E_{\text{water}} = \frac{1}{2} E_{\text{seaface}} (T_s^2 + T_p^2) \quad (11)$$

### 1.2.4 水下信道传输

光子穿过气-海界面进入水下信道后, 其传输行为主要受海水介质的吸收与散射效应影响。吸收效应导致光能量的耗散, 而散射效应则改变光子的运动方向, 导致时间展宽与空间弥散。本文采用随机游走模型来描述光子在水下的多重散射传输过程, 设定水下传输距离为  $L_{\text{water}} = 100$  m。假设海水介质是光学均匀的, 其固有光学性质由吸收系数  $a$ , 散射系数  $b$  以及总衰减系数  $c = a + b$  来描述, Jerlov 三种水质参数如表 1 所示。

光子包在两次散射事件之间的自由传输距离服从指数分布, 其步长更新公式为

$$s = -\frac{\ln(\zeta_s)}{c} \quad (12)$$

其中  $\zeta_s \sim U(0, 1)$ 。散射偏转角  $\theta_{\text{scat}}$  通过对 H-G 函数的

表1 水质参数表  
Table 1 Water Quality Parameters Table

参数	Jerlov IB	Jerlov II	Jerlov III
吸收系数 $a$	0.060	0.076	0.104
散射系数 $b$	0.084	0.227	0.452
衰减系数 $c$	0.144	0.303	0.556

累积分布函数求逆获得:

$$\theta_{\text{scat}} = \arccos \left\{ \frac{1}{2g} \left[ 1 + g^2 - \left( \frac{1 - g^2}{1 - g + 2g\zeta_{\text{hg}}} \right)^2 \right] \right\} \quad (13)$$

其中,  $g$  为不对称因子 (Asymmetry Factor), 取值为 0.924,  $\zeta_{\text{hg}} \sim U(0, 1)$ 。散射方位角  $\theta_{\text{scat}}$  服从  $[0, 2\pi]$  上的均匀分布, 则碰撞后的方向向量  $\mathbf{u}'_{\text{water}}$  为下式:

$$\begin{cases} u'_{x, \text{water}} = \frac{\sin \theta_{\text{scat}}}{\sqrt{1 - u_{z, \text{water}}^2}} (u_{x, \text{water}} u_{z, \text{water}} \cos \phi_{\text{scat}} - u_{y, \text{water}} \sin \phi_{\text{scat}}) + u_{x, \text{water}} \cos \theta_{\text{scat}} \\ u'_{y, \text{water}} = \frac{\sin \theta_{\text{scat}}}{\sqrt{1 - u_{z, \text{water}}^2}} (u_{y, \text{water}} u_{z, \text{water}} \cos \phi_{\text{scat}} + u_{x, \text{water}} \sin \phi_{\text{scat}}) + u_{y, \text{water}} \cos \theta_{\text{scat}} \\ u'_{z, \text{water}} = -\sqrt{1 - u_{z, \text{water}}^2} \sin \theta_{\text{scat}} \cos \phi_{\text{scat}} + u_{z, \text{water}} \cos \theta_{\text{scat}} \end{cases} \quad (14)$$

在接收端, 光子包在每次发生散射碰撞时会根据单次散射反照比进行每次散射后的能量更新, 设光子包在第  $i$  次散射前的能量为  $E_i$ , 则散射后的能量更新公式为

$$E_{i+1} = E_i \cdot \omega_0 \quad (15)$$

其中  $E_i$  与  $E_{i+1}$  表示碰撞前后的光子能量,  $\omega_0$  表示单次散射反照比, 由  $\omega_0 = (1 - a/c)$  计算。当  $z \geq L_{\text{water}}$  时, 终止当前光子包的追踪, 得到最终光子包剩余能量  $E$ 。

## 2 气-海跨介质通信信道特征动态学习传输方案

气-海跨介质光通信是连接空域与水域的重要信息桥梁, 其信道特性受到空气介质中的能量衰减、海面扰动以及海水散射等多重物理因素的共同影响, 表现出强烈的时变性、非线性与随机性。为实现高效可靠的气-海跨介质光通信传输, 本文提出一种信道特征动态学习的传输方案。该方案包含信道特征动态学习过程 (蓝色部分) 与信号传输过程 (绿色部分), 构成一个完整的单周期处理流程。系统将每隔固定周期, 重新执行学习过程并对信道参数进行更新, 从而构建起一个端到端的闭环式信道特征动态学习与传输系统, 如图 1 所示。

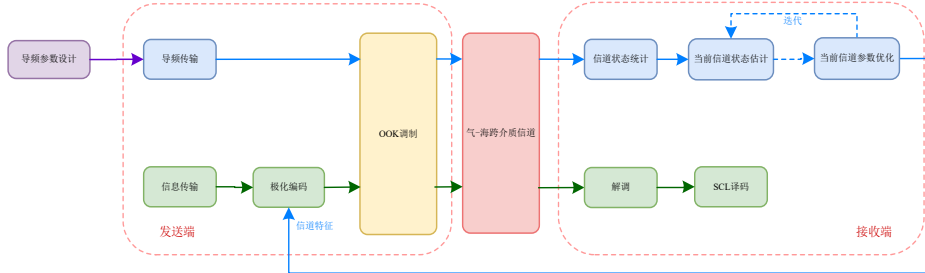


图1 气-海跨介质通信信道特征动态学习传输方案流程

Figure 1 Flowchart of air-sea cross-medium communication channel characteristic dynamic learning transmission scheme communication system

### 2.1 导频设计

在气-海跨介质光通信中, 导频信号设计是动态学习系统的关键环节。用于在每个固定周期内估计气-海跨介质信道的统计特性。导频设计的参数需要兼顾系统性能与复杂度, 主要包括量化级数与导频长度的设计。

考虑到导频序列的开销, 若选取较长的码长会影响传输效率, 选择码长较短会导致信道特征估计不够可靠, 综合考虑本节实验选取码长为 512。值得指出的是, 本文仿真使用的是输入信噪比而不是常用的输出信噪比, 原因在于海洋水体中散射比较严重, 因此

到达接收端输出能量波动范围较大, 不方便统计。我们在未编码的情况下对系统进行 BER 分析, 如图 2 所示。

从图 2 中可以看出, 当输入信噪比约为 1 000 dB 时, BER 曲线开始出现下降趋势, 表明此处为系统性能改善的起始数据点。因此本文选取在 900~1 500 dB 范围内进行仿真。

利用蒙特卡罗光子追踪算法经过气-海跨介质信道仿真得到的接收能量分布结果, 将接收端在气-海跨质信道传播后的光子能量区间划分为若干区间, 以此来统计信道传输特征。具体而言, 接收端获得能量

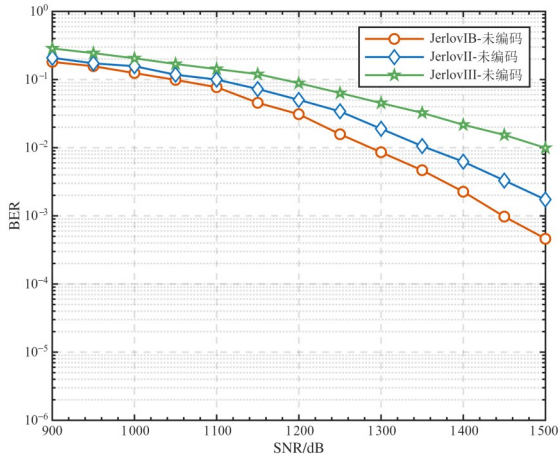


图2 未编码气-海跨介质通信系统 BER 曲线

Figure 2 BER curves of uncoded air-sea cross-medium

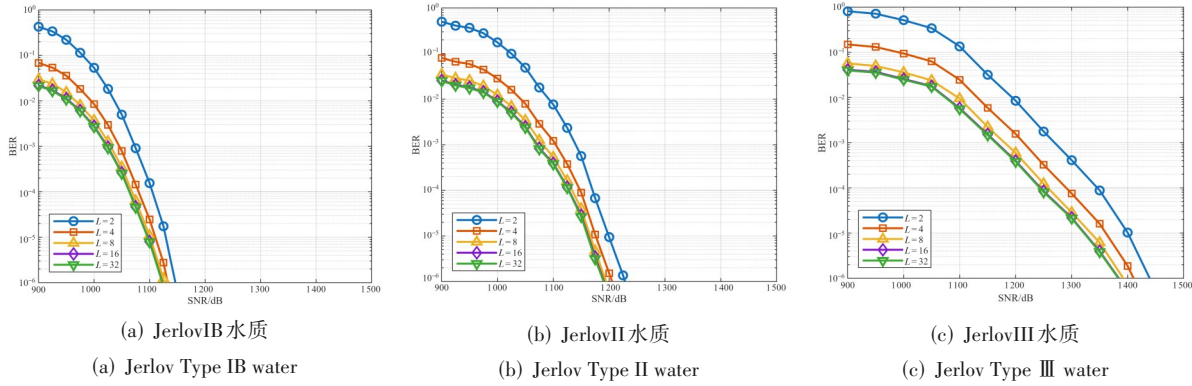


图3 JerlovIB, JerlovII, JerlovIII水质下不同量化级数BER仿真结果

Figure 3 BER for varying quantization levels in Jerlov IB, II, and III waters

从图3中可以看出,在相同信噪比条件下,接收能量区间的划分精度直接决定了系统对信道能量衰减和统计特性的辨识能力。在Jerlov IB、II与III三种典型水质下,随着量化级数的增加,BER曲线逐渐向低误码区间收敛。当量化级数达到8时,系统的BER显著下降,性能提升明显。如果继续增加量化级数,曲线基本重合,性能改善有限。因此,在性能与复杂度之间的平衡考虑下,选取8量化作为导频设计最优方案,仿真中量化区间划分为 $b_0=0, b_1=10^{-175}, b_2=10^{-150}, b_3=10^{-125}, \dots, b_7=10^{-25}, b_8=1$ 。

在本文所提出的方案中,巴氏参数被用于衡量信道的可靠性,其大小直接反映了信道的可靠程度,参数值越小信道越可靠。为了获得稳定、准确的信道特征描述,在传输信息之前,需要引入导频来学习信道的特征。因此,在输入信噪比取1000 dB时,分别在Jerlov三种水质中实验仿真了动态学习次数与信道可靠度(巴氏参数)之间的关系,结果如图4所示。

在图4中三种不同水质条件下,巴氏参数的变化

$E$  随入射角、海面扰动及水质不同而呈现显著差异。为便于后续信道学习与导频控制,可以将 $E$ 的取值划分为 $L$ 个区间,定义 $b_0=0 < b_1 < b_2 < \dots < b_L=1$ 为量化边界点,则量化函数 $Q(E)$ 可以定义为

$$Q(E)=i-1, \quad b_{i-1} < E \leq b_i, \quad i=1, 2, \dots, L \quad (16)$$

其中, $E \in [0, 1]$ 为归一化接收能量, $i$ 表示第 $i$ 个量化区间, $L$ 表示量化级数

接收能量在各量化区间的分布直接反映了信道传输特征。因此,在气-跨介质激光通信系统中,量化级数的选取会影响系统的性能。为了研究量化级数对系统性能的影响,针对三种不同的Jerlov系列水质,分别把接收端能量分布划分为2、4、8、16与32个区间,以此对气-海跨介质通信系统传输性能进行仿真,仿真结果如图3所示。

曲线呈现出一定规律。当输入信噪比为1000 dB时,该参数在迭代过程中迅速降低,之后逐渐趋于稳定并收敛。若输入信噪比进一步提高,巴氏参数收敛所需的迭代次数还会减少。这一现象说明,学习次数越多越好,但继续增加学习次数,会使导频长度增加,降低整体的传输效率。因此,将学习次数设定为4次,是较为合理的选择,这时导频长度即为2048 bit。

## 2.2 气-海跨介质通信信道特征动态学习过程

气-海跨介质信道特征动态学习过程如图2中蓝色部分所示,包括导频传输、OOK调制、气海跨介质信道、信道状态统计、当前信道状态估计、当前信道参数优化等六个模块。

导频传输过程:在发送端,系统首先执行导频传输过程,通过周期性地发送导频信号,以固定周期内感知气-海跨介质信道的瞬时变化特征。导频信号采用与数据信号相同的波长与发射功率设置,以确保后续估计具有一致的物理响应特性。光信号经由OOK调制后进入气-海跨介质信道。该信道由近海空气

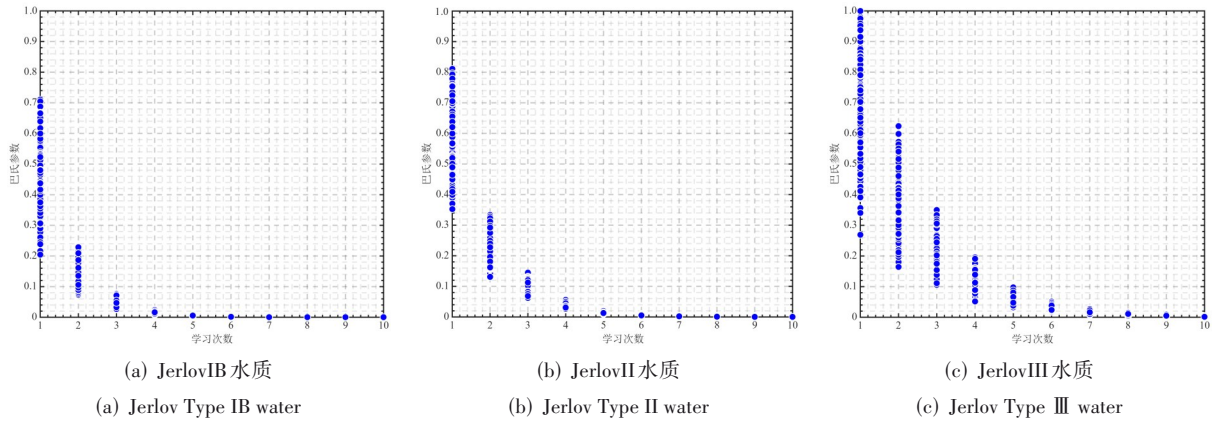


图4 输入信噪比为1 000 dB时三种Jerlov水质条件下学习次数与巴氏参数关系

Figure 4 Relationship between learning iterations and Bhattacharyya parameter for three Jerlov water types at an input SNR of 1 000 dB

层、气-海界面以及海水介质三部分组成。光信号在界面处经历反射、折射与能量分配,并在海水中受到吸收与散射的共同作用,使得接收端光能量呈现显著的时变性与空间扩散特征。该过程在物理上对应光子追踪仿真模型中的气-海界面处与水体散射环节,是影响系统性能的关键因素。

**接收端统计、估计与优化过程:**在接收端,首先对接收到的导频信号进行信道状态统计,通过对信道接收能量统计分析,构建信道的能量分布模型。随后,基于多次迭代观测结果,对当前信道状态进行动态估计。该过程采用2.1节提出的“8量化级数+导频长度2 048 bit”策略,通过所传输的导频获得信道特征。最后,系统根据得到的信道水质环境特征执行当前信道参数优化,通过调整极化码冻结位配置,实现对跨介质信道时变特性的快速跟踪与补偿。下面给出单周期蓝绿激光气-海跨介质通信信道特征动态学习算法步骤,如算法1所示。

通过对气-海跨介质信道特征的动态学习与参数优化,系统已建立起适应时变信道的闭环反馈机制。在此基础上,系统随即转入信息传输阶段,利用动态学习所获得的信道特征与优化参数,实现对当前信道条件的自适应传输。

### 2.3 信息传输过程

如图1中绿色部分所示,传输阶段主要包括极化编码、OOK调制、解调、SCL译码等四个过程。利用动态学习阶段获得的信道特征进行信息传输,可实现针对当前信道参数的更新机制。

在发送端,编码过程会根据上一导频学习周期内得到的信道可靠性序列,自适应地选择冻结位与信息位分布,从而生成与当前信道状态相匹配的编码方案。经OOK调制过后,光信号在穿越气-海界面时经历折射与反射,其能量在界面处重新分配;进入海水

介质后,又受到吸收与散射的联合作用,传播特性受水质参数(如Jerlov系列水质类型)等环境因素显著影响。在接收端解调后,系统采用SCL译码算法对接收码字进行译码,输出恢复后的信息比特。

综上所述,信息传输过程由信道特征动态学习模块周期性驱动更新,从而在时间维度上实现对信道变化的连续跟踪与自适应编码。具体而言,系统在每个导频学习周期结束后,根据估计的信道可靠性序列与水质参数,重新配置极化码的冻结位与信息位分布,使编码结构始终与当前信道状态保持最优匹配。这种“学习—调整—传输”的闭环耦合机制,使通信系统能够根据气-海跨介质信道的动态特性主动调整传输策略,有效抵消信道时变带来的性能退化。

## 3 仿真结果分析

本小节系统评估了气-海跨介质激光通信中基于信道特征动态学习的传输方案在多种典型Jerlov水质类型下的综合性能。首先,通过仿真分析了不同水体光学特性下系统的BER表现,并重点比较了引入极化码编码与未编码配置之间的性能差异,从而定量评估了极化码结构在跨介质信道中所带来的编码增益。进一步地,为验证所提动态学习机制的有效性,本研究将其与5G标准中定义的固定极化码传输策略在相同信道条件下进行对比,从误码性能展开分析。仿真结果表明,动态学习策略在各类水质环境下均表现出更优的自适应能力与系统灵活性,能够有效应对气-海界面附近信道条件的时变特性,具备重要的实用价值。

### (1) 编码与未编码比较

本节所有仿真参数设置如下:极化码码长 $N=512$ ,码率 $R=1/2$ ,调制方式采用OOK调制,SCL译码算法列表宽度 $l=8$ ,量化级数 $L$ 为8,导频长度为

### 算法 1 气-海跨介质通信信道特征动态学习算法

输入: 迭代层数, 信息位个数  $K$ , 噪声标准差  $\sigma$ , 仿真次数  $T$ , 码长  $N < 2^m$

输出: 信息位集合  $\mathcal{A}$

1. FOR  $t = 0$  TO  $N - 1$  DO
2. 随机生成信息序列  $u[j] \in \{0, 1\}$  并进行极化编码得到  $x[j] \in \{0, 1\}, j = 0, 1, 2, \dots, N - 1$
3. FOR  $i = 0$  TO  $N - 1$  DO
4. 初始化光子权重:  $E_0 \leftarrow \begin{cases} 1.0 & \text{if } x[i] = 1 \\ 0.0 & \text{if } x[i] = 0 \end{cases}$
5. 经过 2.2 节气-海跨介质信道进行传输, 得到信道输出权重  $E$
6. 加噪:  $y \leftarrow E + \mathcal{N}(0, \sigma^2)$
7. 根据 3.1 节定义的 8 量化规则将  $y$  映射到某量化区间, 对应一个量化值  $q$ ;
8. IF  $u[i] = 0$  THEN
9. 更新发 0 收到  $q$  的光子包计数与发 0 总次数:  $num_{0q} ++, total_0 ++$
10. ELSE
11. 更新发 1 收到  $q$  的光子包计数与发 1 总次数:  $num_{1q} ++, total_1 ++$
12. END IF
13. END FOR
14.  $p(q|0) \leftarrow num_{0q}/total_0$   $p(q|0)$  表示发送为 0 接收为  $q$  的转移概率;
15.  $p(q|1) \leftarrow num_{1q}/total_1$   $p(q|1)$  表示发送为 1 接收为  $q$  的转移概率;
16.  $p_0[0][k] \leftarrow p(q|0)$   $p_0[0][k]$  表示第 0 层第  $k$  个子信道的似然概率,  $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$
17.  $p_1[0][k] \leftarrow p(q|1)$   $p_1[0][k]$  表示第 0 层第  $k$  个子信道的似然概率,  $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$
18. 依据  $p_0[0][k], p_1[0][k]$  递归计算第  $m$  层子信道似然概率  $p_0[m][k], p_1[m][k]$
19. IF  $u[k] = 1$  THEN
20.  $ratio[k] \leftarrow \sqrt{\frac{p_0[m][k]}{p_1[m][k]}}$
21. ELSE
22.  $ratio[k] \leftarrow \sqrt{\frac{p_1[m][k]}{p_0[m][k]}}$
23. END IF
24. 累加  $z[k] \leftarrow z[k] + ratio[k]$
25. 求均值  $z[k] \leftarrow z[k]/T$
26. END FOR
27. 对数组  $z$  升序排序并取前  $K$  个索引  $\rightarrow$  信息位集合  $\mathcal{A}$

2 048 bit。首先研究极化码编码方案与未编码情况下跨介质通信系统误比特率对比结果, 如图 5 所示。根据图 5 可知, 在仿真的信噪比范围内, 未编码系统的误比特率均高于采用极化码的编码系统。随着信噪比逐渐提升, 三种水质下极化码系统的误比特率呈现明显的快速下降趋势, 并且下降幅度随着水质条件改善而更加显著。当系统处于 Jerlov IB、Jerlov II 和 Jerlov III 水质环境, BER 为  $10^{-2}$  时, 与未编码的方案相比, 分别能够实现约 322、346、403 dB 的编码增益, 继

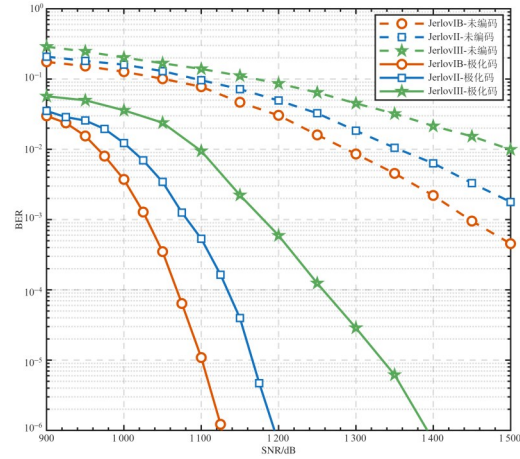


图 5 三种水质下编码与未编码系统 BER 对比

Figure 5 BER comparison between coded and uncoded systems under three water types

续增加信噪比, 极化码所带来的性能优势将进一步扩大。

对于编码系统而言, 不同的 Jerlov 水质环境会显著影响误比特率的性能表现。当 BER 下降到  $10^{-6}$  水平时, Jerlov IB 水质下的系统相比于更恶劣的 Jerlov II 与 Jerlov III 水质分别获得约 66、265 dB 的性能增益。

该实验结果表明, 极化编码在跨介质水下光通信中能够显著提升系统误码性能, 其增益受信噪比水平与水质条件共同影响。在较低输入信噪比下, 噪声主导通信性能, 编码增益尚不明显; 随着信噪比提高, 极化码的纠错能力快速增强, 系统误比特率大幅下降, 并在清澈水域中表现出更快的性能改善。此外, 在水质较差的环境中, 极化码编码对系统性能的改善作用较为显著, 说明该编码方案尤其适用于水下信道衰减较强的环境, 具有良好的适应性。

#### (2) 验证自适应性

为了验证本文提出的信道特征动态学习策略在跨介质激光通信系统中的有效性, 我们进一步对不同水质条件下的极化码的 BER 进行了对比实验。实验分别选取 Jerlov IB、Jerlov II 和 Jerlov III 三种典型海水类型, 针对每种水质条件, 我们分别采用 5G 标准中极化码编码方案与本文提出的信道特征动态学习方案进行 BER 对比, 如图 6 所示。从图 6 的 BER 曲线中可以看出, 在所测试的三种典型海水水质条件下,  $10^{-6}$  基于信道特征动态学习的极化码构造策略的 BER 性能均优于 3GPP-5G 标准的固定极化码构造方案。在整个输入信噪比变化范围内, 动态学习策略相对于固定极化码构造方法在不同水质环境中均带来了编码增益。当 BER 要求为  $10^{-6}$  时, 与 3GPP-5G 标准极化码构造方案相比, 动态学习策略在 Jerlov IB 水质中可带来约 82 dB 编码增益; 在 Jerlov II 水质中的编码增益提

升至约 116 dB, JerlovII 中增益进一步增加至约 137 dB。

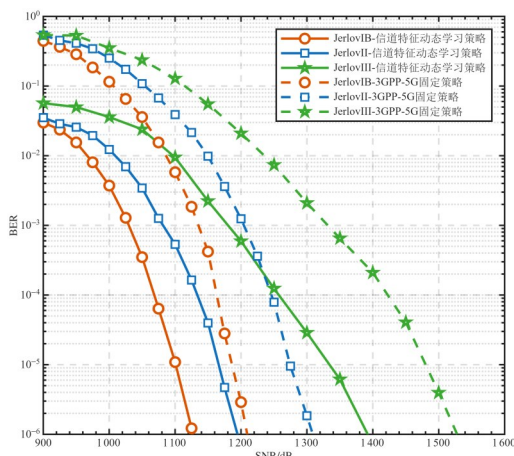


图6 信道特征动态学习策略与5G极化码固定策略BER对比

Figure 6 BER comparison between the channel characteristic dynamic learning strategy and the 5G polar code fixed strategy

这些仿真表明,海水水质从良好到恶化(JerlovIB—JerlovIII),动态学习策略相对固定方案的性能增益呈上升趋势。即水质越差,系统编码增益越大。原因在于较差水质环境下信道不确定性增大,固定极化码无法及时适配信道变化,而动态学习策略能根据实时的信道可靠性更匹配地选择冻结位与信息位,相比于固定策略方案在复杂信道环境中表现出更强的鲁棒性,进一步验证了该动态学习策略在跨介质通信场景中的自适应性。

#### 4 结论

针对气-海跨介质通信信道受环境扰动影响显著、时变性强而导致通信可靠性下降的问题,本文设计了一种面向气-海跨介质光通信的信道特征动态学习传输机制。该方法将蒙特卡罗光子追踪建模与自适应极化码相结合,构建了由“周期性导频探测-信道特征学习-编码重构”组成的闭环优化框架。通过周期性导频对跨介质信道进行探测,在接收端统计并提取当前信道状态特征,并将其用于动态调整极化码的构造方案,以提升编码与实际信道条件的匹配度。仿真结果表明,所提出的动态学习方法在性能上明显优于传统静态构造策略。相较于未采用信道编码的情况,在相同 Jerlov 水质条件下引入极化编码可显著降低系统误比特率。进一步与 3GPP-5G 标准中基于固定构造的极化码方案对比,本文所提动态学习方法在三类不同 Jerlov 水质环境中均表现出更优的误码性能,且随着水体散射与吸收效应增强,其性能优势更加突出,在复杂与恶劣信道环境下展现出卓越的鲁棒性与自适应能力。

最后需要指出的是,在实际的工程应用中,所提方案还需要考虑以下两方面问题。一是需要建立可靠的上行反馈链路来保障信道特征信息的有效传输。由于在气-海跨介质环境中,上行链路的实现往往较下行链路更为困难。为保证反馈信息的准确性和及时性,我们可以设计一个特殊反馈帧结构,采用多次重复发送提高上行链路的传输可靠性等。二是导频参数设置须具备动态调整能力,以适应不同海况下的信道变化速率。导频发送的周期在实际工程应用中需要结合信道的具体环境来调整,比如在信道变化较快的场景下(高海况)可相应缩短导频发送的周期,以确保在信道相干时间内完成一轮“探测-统计-反馈-重构”过程。而在信道相对稳定的环境(如低海况或平静水域)中,则可适当延长周期以降低系统开销,从而适用于不同海况场景。

#### 参考文献

- [1] Mao Bomin, Tang Fengxiao, Kawamoto Y, et al. Optimizing computation offloading in satellite-UAV-served 6G IoT: A deep learning approach[J]. IEEE Network, 2021, 35(4): 102-108.
- [2] Zha Lulu, Gu Zhenqian, Li Zengxin, et al. Across ice-water-air visible light communications[J]. Optics Express, 2025, 33(6): 13816-13828.
- [3] Jiao Chongmiao, He Yan, Hu Shanjiang, et al. Effects of solar radiation on the performance of long-distance atmosphere-ocean laser communication links[J]. Optics Communications, 2025, 574: 131051.
- [4] Yan Dong, Xue Qingji. Atmosphere-ocean laser communication channel simulation and modeling[C]//2009 ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management. Piscataway: IEEE, 2009: 554-557.
- [5] Nistazakis H E, Tsiftsis T A, Tombras G S. Performance analysis of free-space optical communication systems over atmospheric turbulence channels[J]. IET Communications, 2009, 3(8): 1402-1409.
- [6] Nabavi P, Yuksel M. Performance analysis of air-to-water optical wireless communication using SPADs[C]//2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE, 2019: 1-6.
- [7] Cox W C, Simpson J A, Domizioli C P, et al. An underwater optical communication system implementing Reed-Solomon channel coding[C]//OCEANS 2008. Piscataway: IEEE, 2008: 1-6.
- [8] Sun Ran, Habuchi H, Kozawa Y. Underwater Turbo-code

- optical communication system compatible with partial erasure channel[C]//2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON). Piscataway: IEEE, 2016: 2066-2069.
- [9] Wu Chenchen, He Ning, Jiang Hongyan, et al. BER performance of the polar-coded underwater wireless optical communication[C]//Proceedings of SPIE 11763, Seventh Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications. Bellingham: SPIE, 2021: 117637X.
- [10] 邢莉娟, 李卓, 张泽栋. 水声通信中极化码的应用研究[J]. 电子学报, 2022, 50(9): 2096-2101.  
Xing Lijuan, Li Zhuo, Zhang Zedong. Research on the application of polar codes in underwater acoustic communication[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(9): 2096-2101. (in Chinese)
- [11] Guo Jianzhong, Xiao Jinpeng, Chen Jing, et al. Performance analysis of LDPC-coded OFDM in underwater wireless optical communications[J]. Photonics, 2023, 10(3): 330.
- [12] Padala S K, D'souza J. Performance of spatially coupled LDPC codes over the underwater wireless optical channel with strong turbulence and pointing errors[J]. IEEE Access, 2024, 12: 58256-58274.
- [13] Abdulameer S D, Taher N A, Alatab S R, et al. Optimization of underwater channel performance through polar code-OFDM models[C]//2024 35th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). Piscataway: IEEE, 2024: 3-10.
- [14] Chen Rouchi, Wu Wenlong, Zeng Qitian, et al. Construction and application of polar codes in OFDM underwater acoustic communication[J]. Applied Acoustics, 2023, 211: 109473.
- [15] Li Wenting, Tang He, Meng Shaolong, et al. Joint coding of polar code for laser-acoustic underwater communication[C]//Proceedings of SPIE 13542, Fourth International Computational Imaging Conference (CITA 2024). Bellingham: SPIE, 2025: 135421M.
- [16] Xing Lijuan, Li Zhuo, Huang Yanbiao, et al. Efficient coding schemes for blue-green laser cross-medium communication based on polar codes[J]. Optical Engineering, 2025, 64(5): 058106.
- [17] Arikan E. Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(7): 3051-3073.
- [18] Tal I, Vardy A. List decoding of polar codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 61(5): 2213-2226.
- [19] Plass G N, Kattawar G W. Monte Carlo calculations of light scattering from clouds[J]. Applied Optics, 1968, 7(3): 415-419.

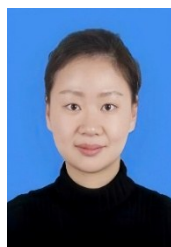
### 作者简介



**张子金** 男, 2001年5月出生于黑龙江省哈尔滨市。现为西安电子科技大学广州研究院硕士研究生。主要研究方向为跨介质通信与信道编码。  
E-mail: 1981158324@qq.com



**李卓** 男, 1980年4月出生于陕西省西安市。现为西安电子科技大学教授。主要研究方向为量子计算、量子信息论、5G中的编码调制技术。  
E-mail: lizhuo@xidian.edu.cn



**邢莉娟** 女, 1982年9月出生于陕西省宝鸡市。现为西安电子科技大学副教授。主要研究方向为信道编码与调制技术、量子信息论。  
E-mail: ljxing@mail.xidian.edu.cn