

基于螺旋谱判决的水下涡旋光束 OAM-SK 通信仿真研究

凡星源, 李晓记*, 刘韩宇

(桂林电子科技大学 认知无线电与信息处理教育部重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对基于机器学习的涡旋光束轨道角动量键控(OAM-SK)通信方案因数据的制备、训练所导致的通信耗时长、离线处理等问题, 提出基于螺旋谱判决的水下涡旋光束 OAM-SK 通信方案。该方案通过对接收端处的涡旋光束光场直接进行螺旋谱计算, 即可实现对其模式的识别, 从而完成信息的传输。仿真结果表明, 虽然所提方案可靠性略低, 但是其极大地提高了通信系统的有效性。

关键词: 涡旋光束; 正交特性; 涡旋光束轨道角动量键控; 螺旋谱

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)01-0058-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.01.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on simulation of underwater vortex beam OAM-SK communication based on spiral spectrum detection

FAN Xingyuan, LI Xiaoji*, LIU Hanyu

(Key Laboratory of Cognitive Radio and Information Processing,

Guilin University of Electronic Science and Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Aiming at the issues of long communication delays and offline processing caused by data preparation and training in machine learning-based vortex beam orbital angular momentum-shift keying(OAM-SK) communication schemes, this paper proposes an OAM-SK communication scheme for underwater vortex beams based on spiral spectrum detection. This scheme enables the recognition of the mode of the vortex beam by directly performing spiral spectrum calculations on the optical field of the received vortex beam at the receiver end, thereby achieving information transmission. The simulation results show that although the proposed scheme has slightly lower reliability, it significantly enhances the effectiveness of the communication system.

Key words: vortex beam, orthogonal characteristics, orbital angular momentum-shift keying, spiral spectrum

0 引言

近年来,随着海洋资源的价值和战略意义日益凸显,对于海洋环境监测、水下资源勘探以及水下军事通信等相关领域的探索活动也愈发频繁。水下无线光通信技术信道容量大、带宽高、时延低且抗电磁干扰

收稿日期: 2024-05-31。

基金项目: 广西自然科学基金面上项目(2024JJA170089)资助; 广西教育厅教改重点项目(2024JGZ127)资助; 认知无线电与信息处理省部共建教育部重点实验室 2021 年度开放基金项目(CRKL210103)资助。

作者简介: 凡星源(1998—), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 现就读于桂林电子科技大学信息与通信工程专业, 研究方向为无线光通信, 主要从事水下涡旋光束轨道角动量键控通信、深度学习、自适应波前校正技术的研究工作。

* **通信作者:** 李晓记(1976—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为新一代信息技术、高等教育发展与改革等。



能力强, 在海洋通信领域展现出巨大的应用前景^[1]。

在光通信领域, 研究人员通常通过复用光束的频率、波长和偏振等特性来提升系统的传输容量^[2]。携带轨道角动量(OAM)的涡旋光束具有螺旋形的相位特性, 其模式值理论上可以是任意整数, 不同模式值的涡旋光束之间具有正交性, 即它们能够彼此独立传输而不互相干扰。因此, 通过复用携带不同模式值的涡旋光束, 可以有效地提高光通信系统的信道容量^[3-4]。目前, 采用涡旋光束提高通信系统容量的方式主要有 2 种^[5]: 一种是将携带不同模式值的涡旋光束作为不同的载波并进行复用, 以此实现对不同码元信息的传输。此种方式被称作涡旋光束 OAM 复用(OAM-DM)通信^[6-7]; 另一种是将不同的码元信息编码为携带不同模式值的涡旋光束。在接收端, 通过检测这些具有不

同模式值的涡旋光束, 并依据编码规则解调, 从而恢复出原始的码元信息。此种方式被称作涡旋光束 OAM 键控(OAM-SK)通信^[8-9]。在 OAM-SK 通信系统中, 正确解调码元信息的关键在于接收端能否准确检测和识别涡旋光束的模式值。涡旋光束在接收平面上会形成独特的二维光强分布图案, 这些图案各不相同, 因此可以通过分析光强图案来辨识其携带的具体模式值。然而, 现有基于光学的检测手段, 如干涉法、衍射法、相位全息图法及光学几何变换法^[10]等, 在自由空间中检测效果良好, 但当涡旋光束在水下传输时, 会受到水体吸收、散射及湍流等现象的影响, 导致光强分布图案畸变, 增加了模式值识别的难度。

近年来, 由于机器学习技术具备强大的数据解析能力, 越来越多的人将此技术应用于涡旋光束通信领域并取得了一些进展^[11]。CUI X Z 等人^[12]首次将卷积神经网络(CNN)应用于水下涡旋光束 OAM-SK 通信系统中, 使用 8 种拉盖尔-高斯(LG)光束模拟 8 进制通信。研究发现, 在弱至中等湍流条件下(80 m 内), CNN 解码准确率超过 95%, 但在强湍流环境下降至 90% 以下。次年, 该团队^[13]在流动咸水环境中验证了基于 CNN 的 16 进制 OAM-SK 方案, 结果显示在弱湍流下解码准确率高于 99.66%, 但随着湍流强度增加, 准确率显著下降。魏京浩等人^[14]引入里所(RS)码以增强 CNN 系统的可靠性, 仿真表明在弱湍流环境中 RS 码有效提高了系统的稳定性。WANG Z Y 等人^[15]提出的相干解调系统相比非相干解调, 能识别模式值互为相反数的涡旋光束, 从而节省复用通道资源。尽管机器学习技术提升了涡旋光束 OAM-SK 通信系统的性能, 但仍存在数据集构建耗时和依赖离线处理限制实时性的挑战。

基于此, 本文提出一种基于螺旋谱判决的水下涡旋光束 OAM-SK 通信方案。该方案通过计算涡旋光束的光场分布以确定其螺旋谱特性, 并依据螺旋谱中相对能量峰值所对应的模式值进行判决, 从而实现对传输码元信息的有效解调。

1 基于螺旋谱判决的水下涡旋光束 OAM-SK 通信方案

1.1 螺旋谱理论

涡旋光束的螺旋谱定义为涡旋光束自身所携带的不同模式值对应的相对能量分布。该谱能够反映出涡旋光束在通过湍流介质后, 能量弥散和模式间串扰的程度。利用螺旋相位项 $\exp(il\varphi)$ 对涡旋光束光场 $u(r, \varphi, z)$ 进行分解^[16]。这里, $u(r, \varphi, z)$ 表示涡旋光束在

柱坐标系中的表达式, 其中 r 为极径, φ 为方向角, z 为涡旋光束沿 z 轴传播时与原点之间的距离。

$$u(r, \varphi, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{l=-\infty}^{+\infty} a_l(r, z) \exp(il\varphi) \quad (1)$$

其中, l 为模式值, 展开系数 $a_l(r, z)$ 为

$$a_l(r, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{2\pi} u(r, \varphi, z) \exp(-il\varphi) d\varphi \quad (2)$$

结合式(1)和式(2)可计算该螺旋相位项 $\exp(il\varphi)$ 的能量为

$$C_l = \int_0^{\infty} |a_l(r, z)|^2 r dr \quad (3)$$

由此可知, 能量与坐标的 z 值无关, 可进一步得到其相对能量为

$$R_l = \frac{C_l}{\sum_{q=-\infty}^{+\infty} C_q} \quad (4)$$

其中, q 和 l 均为涡旋光束的模式值。

携带不同模式值的单模态和叠加态 LG 光束的螺旋谱如图 1 所示。从图 1(a)~图 1(f)可以看出, 模式值 $|l|$ 相等的单模态 LG 光束在自由空间中进行传输时, 在螺旋谱中其相对能量全部集中在自身, 数值为 1; 从图 1(g)~图 1(i)可以看出, 叠加态 LG 光束在自由空间中进行传输时, 在螺旋谱中其相对能量由其所叠加的 2 束单模态 LG 光束均分, 数值皆为 0.5。因此, 可以通过 LG 光束的螺旋谱识别出其携带的模式值。

1.2 方案原理

本文提出的基于螺旋谱判决的水下涡旋光束 OAM-SK 通信方案原理图如图 2 所示。

在该通信系统中, 发射端生成码元 1 和 0, 并将这些码元分别映射为模式值 l_1 和模式值 l_2 的 LG 光束, 以此来实现双路信息传输。携带不同模式值的 LG 光束经过海洋湍流信道传输后, 接收端对畸变的 LG 光束进行螺旋谱计算并输出模式值 l , 如果输出的模式值 $l=l_1$, 则判决码元为 1; 若输出的模式值 $l=l_2$, 则判决码元信息为 0; 如果输出的模式值 $l \neq l_1$ 或者 $l \neq l_2$, 则判定系统有误码产生。

本文设计了 2 种不同的涡旋光束 OAM-SK 通信系统, 分别为基于单模态和叠加态的 LG 光束。这 2 种系统通过检测光束的模式值来区分码元信息。

在单模态涡旋光束 OAM-SK 通信系统中, 所选取的模式值为 $l_1=1$ 和 $l_2=3$ 。在螺旋谱中, 若单模态 LG 光束的相对能量最大值对应的模式值 $l=1$, 则码元信息判决为 1; 若单模态 LG 光束的相对能量最大值对应的

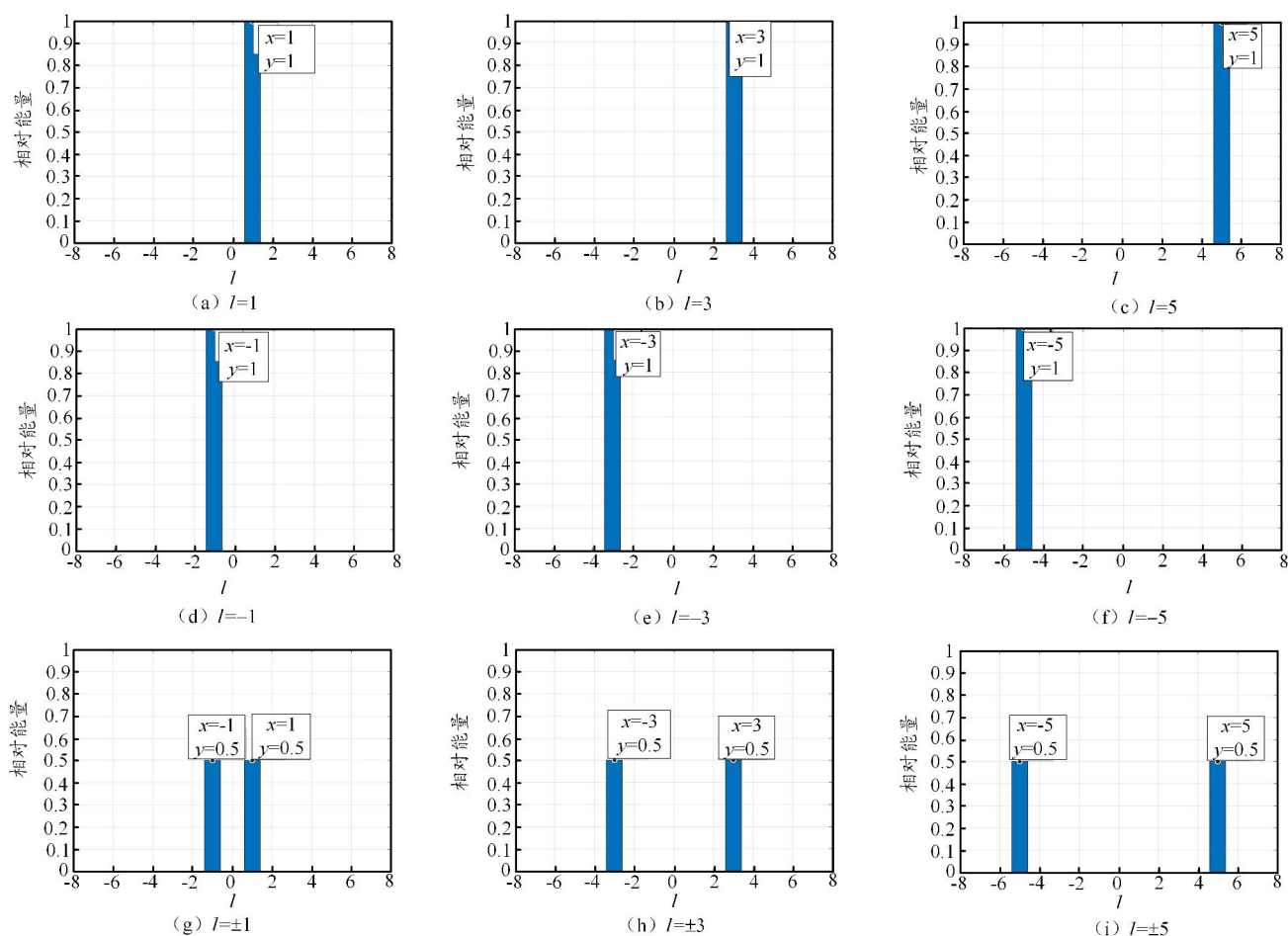


图1 LG光束的螺旋谱分布图

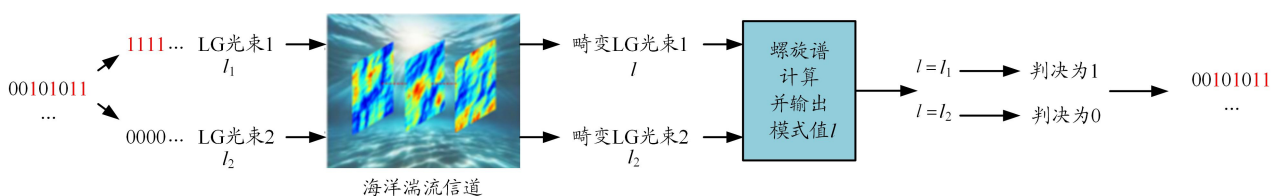


图2 基于螺旋谱判决的涡旋光束 OAM-SK 通信方案原理图

模式值 $l=3$, 则码元信息被判决为 0, 否则出现误码; 若单模态 LG 光束的相对能量最大值对应的模式值既不是 $l=1$ 也不是 $l=3$, 则认为系统出现了误码。

在叠加态涡旋光束 OAM-SK 通信系统中, 所选取的模式值分别为 $l_1=\pm 1$ 、 $l_2=\pm 3$ 。若叠加态 LG 光束的相对能量的最大值所对应的模式值 $l=l_1$ 或 $l=l_2$, 码元信息被判决为 1; 若叠加态 LG 光束的相对能量的最大值所对应的模式值 $l=l_3$ 或 $l=l_4$, 码元信息被判决为 0; 否则, 若出现其它模式值, 则表示系统存在误码。

1.3 基于 CNN 的涡旋光束 OAM-SK 通信方案

基于机器学习的涡旋光束 OAM-SK 通信方案的基本原理是使用 N 个不同的模式值的涡旋光束来代

表 N 个不同的码元符号, 由于不同模式值的涡旋光束所形成的光强分布不同, 所以接收端可以根据不同光强图案识别出涡旋光束的模式值进而恢复所传输的码元信息。本文利用不同模式值的单模态、叠加态 LG 光束进行 OAM-SK 通信编码, 编码规则如图 3 和图 4 所示。

从图 3 可以看出, 单模态 LG 光束的归一化光强分布呈现出环状结构分布, 且模式值越大, 环状结构半径越大。从图 4 可以看出, 模式值 l 互为相反数的叠加态 LG 光束的归一化光强分布呈现出花瓣状结构, 且模式值越大, 花瓣个数越多, 花瓣的个数为 $|2l|$ 。

依据图 3 和图 4 的编码规则, 码元信息被映射为

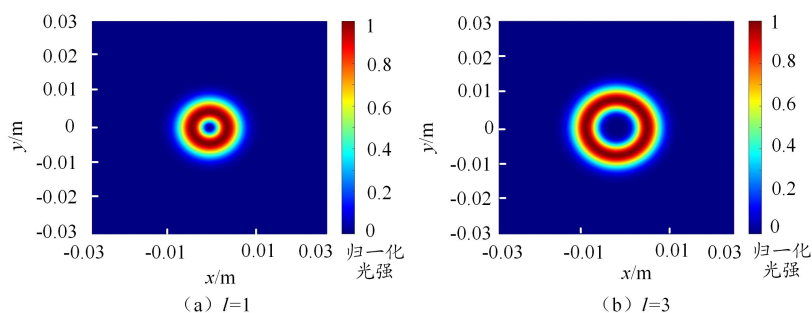


图3 单模态 LG 光束编码规则

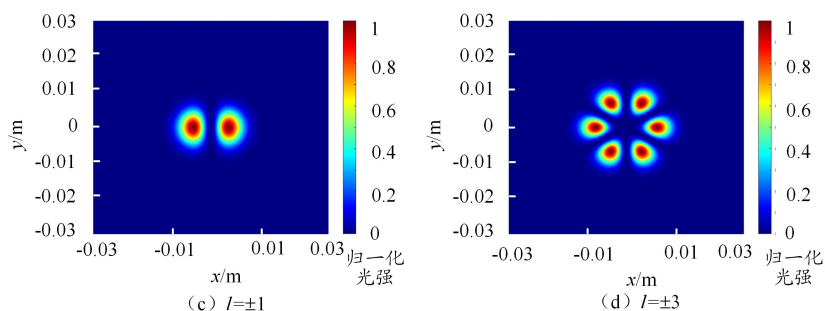


图4 叠加态 LG 光束编码规则

不同模式值的 LG 光束。传输过程中,接收端负责接收这些 LG 光束,并通过分析其特有的光图案来识别对应的模式值,从而实现码元信息的准确传输。对于单模态 LG 光束而言,机器学习算法识别出的单模态 LG 的模式值 $l=1$,则判决码元信息为 1;若识别出的模式值 $l=3$,则判决码元信息被判决为 0;若识别出的模式值既不是 1 也不是 3,则判定为误码。对于叠加态 LG 光束而言,机器学习算法识别出的叠加态 LG 的模式值 $l=\pm 1$,则判决码元信息为 1;模式值 $l=\pm 3$,则判决码元信息为 0;若识别出的模式值不在上述范围内,则同样判定为误码。

本文采用的机器学习算法为 CNN,其主要是由卷

积层、池化层、全连接层等模块组成,并且每个模块都有其特定的功能。卷积层通过卷积运算实现对图像特征的提取,池化层通过采样实现对图像特征的压缩,全连接层则是对卷积层和池化层中提取出来的特征信息进行处理,用于回归和分类等任务。

本文设计的 CNN 结构包括 10 层:1 个输入层、4 个卷积层、3 个最大池化层、1 个全连接层以及 1 个输出层,框架如图 5 所示。为了避免 CNN 反向传播时存在梯度消失的问题,本文在所有卷积层和全连接层中采用了 ReLU 作为激活函数。同时,为了解决训练过程中可能出现的过拟合问题,在每个卷积层之后使用了批量归一化处理。此外,为了避免输出层在进行指数计算时因前一层的输出值过大或过小而导致数值溢出,本文还使用了 Softmax 函数来输出分类结果。

在本研究中,本文分别构建了 2 个数据集,每个数据集包含不同类型的 LG 光束图像。第二个数据集则由 10 种叠加态 LG 光束构成,其 l 的取值从 $\pm 1 \sim \pm 10$ 。每种模态下各包含 200 张图片,因此每个数据集总共包含 2 000 张图片(对于叠加态 LG 光束而言, $l=\pm 1$ 为 1 种模态取值)。对于训练、验证和测试的数据分割比例设定为 7:2:1,即 70% 的图片用于模型训练,20% 用于验证模型性能以调整超参数,剩下的 10% 用于最终评估模型的泛化能力。CNN 的训练参数设置如下:初始学习率为 0.01,训练周期(Epoch)数为 10,批处理大小为 20。

当固定温度盐度比 $\omega=-2$ 时,单模态、叠加态 LG 光束在不同湍流信道环境下的模式识别率如图 6 所

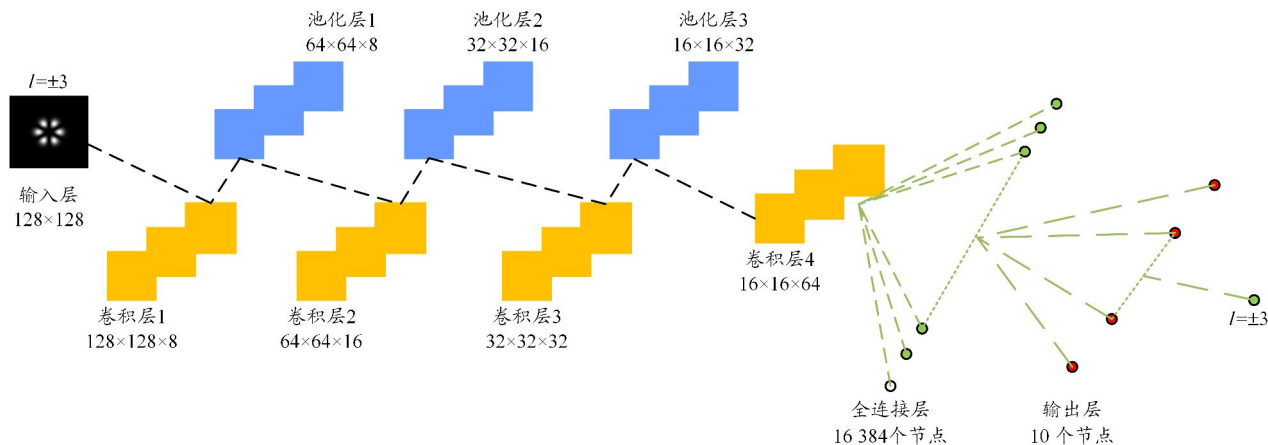


图5 CNN 框架

凡星源, 李晓记, 刘韩宇: 基于螺旋谱判决的水下涡旋光束 OAM-SK 通信仿真研究

示。可以看出, 无论是单模态 LG 光束还是叠加态 LG 光束, 在海洋湍流强度增加的情况下, 都会经历更严重的光强畸变, 从而导致识别率下降。然而, 相比于单模态 LG 光束, 叠加态 LG 光束由于具有更为丰富且易于区分的光强特征分布, 因此在同一湍流环境下能够保持更高的模式识别率。

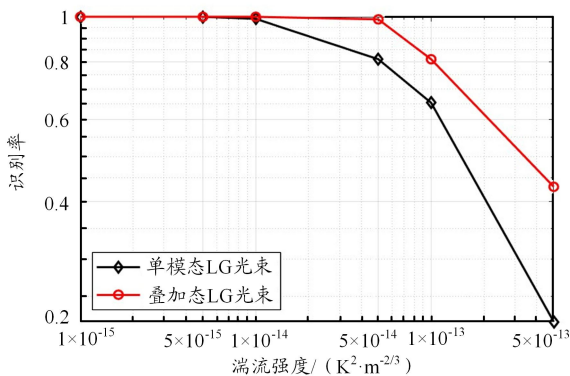


图6 LG光束在不同湍流信道环境下的模式识别率

2 仿真结果及分析

本文所采用的 LG 光束波长 $\lambda=532\text{ nm}$, 束腰半径 $\omega_0=0.03\text{ m}$; 海洋湍流相位屏大小为 0.06 m , 相位屏个数为 10, 光束传输距离为 100 m 。本实验涉及二进制数据传输, 共传输 512 个二进制码元, 其中“1”的数量为 244 个, “0”的数量为 268 个。

2.1 系统可靠性分析

当固定温度盐度比 $\omega=-2$ 时, 在不同湍流强度下, 基于螺旋谱判决的涡旋光束 OAM-SK 通信方案与基于 CNN 的涡旋光束 OAM-SK 通信方案的误码率曲线如图 7 所示。可以看出, 随着湍流强度增加, LG 光束波前畸变加剧, 导致 2 种通信方案的误码率上升。强湍流引发严重信号干扰和失真, 影响数据传输准确性。在相

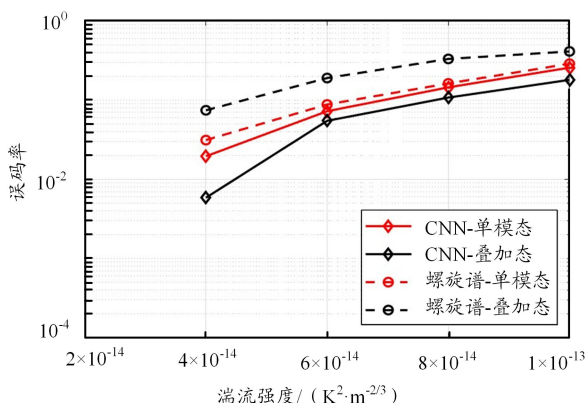


图7 不同的涡旋光束 OAM-SK 通信方案的误码率

同的湍流条件下, 基于 CNN 的 OAM-SK 方案对叠加态 LG 光束模式的识别率显著优于单模态识别。因此, 该方案能够实现更低的误码率。这主要得益于 CNN 通过深度学习算法对多模态 LG 光束模式进行优化识别, 有效降低了海洋湍流引起的随机干扰。相比之下, 传统的螺旋谱判决方法在处理经湍流影响后的 LG 光束时, 由于直接解析信号而面临较大的不确定性。特别是在强湍流环境中, 携带不同模式值的多个单模态 LG 光束构成的叠加态光束间会出现严重的模式串扰。这种串扰增加了错误判决的概率, 从而导致较高的误码率。

综上所述, 由于 CNN 能够从大量数据中学习, 并优化对复杂模式的识别, 从而有效地降低了湍流信道带来的随机性干扰。因此, 在相同的湍流环境下, 基于 CNN 的 OAM-SK 通信方案相较于基于螺旋谱判决的方法, 表现出更低的误码率。

2.2 系统有效性分析

计算机的 CPU 型号为 Intel(R)Core(TM)i5-9400 CPU@2.90 GHz, 其中不包括数据制备所花费的时间。基于螺旋谱判决、CNN 的涡旋光束 OAM-SK 通信方案的通信速率如表 1 所示。

表 1 基于螺旋谱判决、CNN 的
涡旋光束 OAM-SK 通信方案的通信速率

参数	螺旋谱	CNN
计算时间/s	238.87	550.43
解码时间/s	0.11	4.44
总时间/s	238.98	554.87
信息量/bit	512	512
通信速率/(bit/s)	2.14	0.92

对比分析表 1 的数据可以看出, 基于螺旋谱判决的涡旋光束 OAM-SK 通信方案通过直接计算接收端畸变的 LG 光束的螺旋谱, 能够迅速恢复传输的码元信息。由于这一过程直接且高效, 在实际应用中提供了较短的处理延迟和较高的通信速率。相比之下, 基于 CNN 的 OAM-SK 通信方案在部署前需经历训练阶段, 期间系统学习数据集以提高 LG 光束模式识别精度。完成训练并部署后, 模型可实现实时信息传输, 无需重复训练。虽然初次部署因复杂算法需要更多准备时间, 但这不影响后续信息传输速度。对于已训练好的 CNN 模型, 其通信效率主要取决于硬件性能和网络条件等因素, 因此其实际通信速率未必低于螺旋谱判决方法。

4 结束语

本文提出了一种基于螺旋谱判决的水下涡旋光束 OAM-SK 通信方案, 并设计了单模态和叠加态 2 种 LG 光束, 通过仿真验证了该方案在相同湍流信道条件下的可靠性。仿真结果显示, 相较于叠加态涡旋光束, 单模态的 OAM-SK 通信方案表现出更高的稳定性。此外, 本文还比较了所提出的基于螺旋谱判决的水下涡旋光束 OAM-SK 通信方案与基于 CNN 的涡旋光束 OAM-SK 通信方案性能。仿真结果表明: 在相同的湍流信道条件下, 虽然本方案的可靠性略逊于基于 CNN 的方法, 但它成功避免了后者存在的处理时间较长和对离线处理依赖的问题, 从而提升了涡旋光束 OAM-SK 通信系统的实时性和效率。此外, 本文提出的基于螺旋谱判决的水下涡旋光束 OAM-SK 通信方案简化了系统实现, 增强了实际应用中的有效性, 为未来涡旋光束通信的发展提供了一个注重实时性的方向。

参考文献:

- [1] 郑桐. 海洋湍流信道轨道角动量复用光通信系统性能研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- [2] NEUNER B. Undersea laser communication using polarization and wavelength modulation[J]. *Applied Optics*, 2016, 53(11): 2283–2289.
- [3] LEI T, ZHANG M, LI Y, et al. Massive individual orbital angular momentum channels for multiplexing enabled by Dammann gratings[J]. *Light Science & Applications*, 2015, 4(3): 463–469.
- [4] BAGHDADY J, MILLER K, MORGAN K, et al. Multi-gigabit/s underwater optical communication link using orbital angular momentum multiplexing[J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9794–9805.
- [5] 张国文. 基于机器学习的轨道角动量键控仿真研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2022.
- [6] ZHANG J R, FAN F, ZENG J W, et al. Prototype system for underwater wireless optical communications employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Optics Express*, 2021, 29(22): 35570–35578.
- [7] HEI X B, ZHU Q M, GAI L, et al. Photon-counting-based underwater wireless optical communication employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Optics Express*, 2023, 31(12): 19990–20004.
- [8] WANG J. High-dimensional structured light coding/decoding for free space optical communications free of obstructions[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 4827–4830.
- [9] WANG W, WANG P, CAO T, et al. Performance investigation of underwater wireless optical communication system using M-ary OAMSK modulation over oceanic turbulence[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 1–15.
- [10] 郭忠义, 龚超凡, 刘洪郡, 等. OAM 光通信技术研究进展[J]. *光电工程*, 2020, 47(3): 95–128.
- [11] 王健, 王仲阳. 水下轨道角动量光通信[J]. *光学学报*, 2024, 44(4): 9–39.
- [12] CUI X Z, YIN X L, CHANG H, et al. Analysis of an adaptive orbital angular momentum shift keying decoder based on machine learning under oceanic turbulence channels[J]. *Optics Communications*, 2018, 429: 138–143.
- [13] CUI X Z, YIN X L, CHANG H, et al. Experimental study of machine-learning-based orbital angular momentum shift keying decoders in optical underwater channels[J]. *Optics Communications*, 2019, 452: 116–123.
- [14] 魏京浩. 基于深度学习的水下轨道角动量无线通信应用研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2023.
- [15] WANG Z Y, CHEN M, WAN M Y, et al. Coherent demodulated underwater wireless optical communication system based on convolutional neural network[J]. *Optics Communications*, 2023, 534: 129–316.
- [16] 高春清, 付时尧, 著. 涡旋光束[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.