

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514613

基于 GS 算法的水下涡旋光波前校正技术研究*

吴鹏飞¹, 陈 伟¹, 雷思琛¹, 丁德强², 王惠琴³

(1. 西安理工大学自动化与信息工程学院 西安 710048; 2. 信息支援部队工程大学 武汉 430030;
3. 兰州理工大学计算机与人工智能学院 兰州 730050)

摘 要:海洋湍流信道中折射率的随机起伏会引起涡旋光束波前畸变与模间串扰,进而降低轨道角动量模式的传输概率,影响水下光通信系统的稳定性。针对传统 GS 算法依赖远场夫琅和费衍射假设、难以表征水下短距离传播的非涅尔衍射特性,且易陷入局部最优等问题,故提出了一种面向水下涡旋光束波前校正的改进 GS 算法。该算法以菲涅尔正/逆衍射替代夫琅和费衍射,引入理想拉盖尔-高斯涡旋光束振幅作为幅度约束,并结合限制区域与负反馈机制实现了算法的快速及稳定收敛,并进行理论及实验验证。仿真结果表明:在中等强度湍流条件下,拓扑荷数 $L=1$ 的涡旋光束传输概率由 0.40 提升至 0.98;在不同拓扑荷数、传输距离、动能耗散率、均方温度耗散率及温盐比等参数变化下,改进 GS 算法均表现出优于传统 GS 的鲁棒性与校正精度。基于空间光调制器模拟海洋湍流结果表明:改进 GS 算法平均约 120 次迭代收敛,光强相关系数由 0.64 提升至 0.82;相较传统 GS 算法,传输概率提升约 20%,收敛速度提升约 25%,光强相关系数提高约 3.8%。水箱实验中,校正前平均光强相关系数为 0.77、方差 8.2×10^{-5} ,传统 GS 校正后为平均光强相关系数 0.79、方差 3.23×10^{-5} ;改进算法进一步将平均光强相关系数提升至 0.80、方差 1.4×10^{-5} 。研究表明,该方法在多种湍流参数下具备更好的鲁棒性,可为水下涡旋光束光通信系统的波前校正提供参考。

关键词:波前校正;涡旋光束;海洋湍流;GS 算法

中图分类号: TH741 TN929.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Research on underwater vortex beam wavefront correction technology based on the GS algorithm

Wu Pengfei¹, Chen Wei¹, Lei Sichen¹, Ding Deqiang², Wang Huiqin³

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. Information Support Force Engineering University, Wuhan 430030, China; 3. School of Computer Science and Artificial Intelligence, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Refractive-index random fluctuations in the oceanic turbulence channel can cause wavefront distortions and intermodal crosstalk of vortex beams, thereby reducing the transmission probability of orbital angular momentum modes and undermining the stability of underwater optical communication systems. To address the limitations of the conventional GS algorithm—namely, its reliance on the far-field Fraunhofer diffraction assumption, its inability to characterize Fresnel diffraction in short-range underwater propagation, and its tendency to get trapped in local optima—an improved GS algorithm for underwater vortex-beam wavefront correction is proposed. In this algorithm, Fresnel forward/inverse diffraction is used to replace Fraunhofer diffraction; the amplitude of an ideal Laguerre-Gaussian vortex beam is introduced as an amplitude constraint; and a restricted region together with a negative-feedback mechanism is incorporated to achieve rapid and stable convergence. The method is validated theoretically and experimentally. Simulation results show that under moderate turbulence, the transmission probability of a vortex beam with topological charge $L=1$ increases from 0.40 to 0.98. Across variations in topological charge, propagation distance, turbulent kinetic energy dissipation rate, mean-square temperature dissipation

收稿日期:2025-10-23 Received Date: 2025-10-23

* 基金项目:陕西省教育厅服务地方专项计划项目(24JC068)、陕西省重点研发计划工业领域项目(2024GX-YBXM-101)、西安市高校院所科技人员服务企业项目(24GXFW0054)资助

rate, and temperature-salinity ratio, the improved GS algorithm consistently shows better robustness and higher correction accuracy than the traditional GS algorithm. Results based on simulating ocean turbulence using a spatial light modulator indicate that the improved GS algorithm converges in about 120 iterations on average, and the intensity correlation coefficient increases from 0.64 to 0.82. Compared with the conventional GS algorithm, the transmission probability is improved by approximately 20%, the convergence speed by about 25%, and the intensity correlation coefficient by roughly 3.8%. In water-tank experiments, the average intensity correlation coefficient and variance are 0.77 and 8.2×10^{-5} before correction; 0.79 and 3.23×10^{-5} after correction using the traditional GS algorithm; and further improved to 0.80 and 1.4×10^{-5} with the proposed algorithm. These results demonstrate that the proposed method exhibits superior robustness under a wide range of turbulence parameters, providing a useful reference for wavefront correction in underwater vortex-beam optical communication systems.

Keywords: wavefront correction; vortex beam; ocean turbulence; GS algorithm

0 引言

水下无线通信 (underwater wireless communication, UWC) 技术包括水声通信、水下射频通信以及水下无线光通信等多种方式^[1-3]。相比声波和射频通信,水下无线光通信具有带宽大、传输速率高、时延低与保密性强等优势^[4-6],是海洋环境中极具潜力的高速通信手段。涡旋光束因其模式复用能力和空间资源利用效率高,被认为是提升自由空间与水下光通信容量的重要途径。然而,海洋湍流会对涡旋光束产生扩展、漂移、闪烁及衰落等影响^[7-10],进一步导致不同轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 模式间产生串扰^[11],显著降低接收端光束质量并影响水下光通信系统的稳定性^[12]。

传统波前校正系统包括波前传感器、波前控制器和校正器^[13-15],其中 Shack-Hartmann 波前传感器 (Shack-Hartmann wave-front sensor, SH-WFS) 是最常用方案之一^[16]。但由于 OAM 光束存在相位奇点,SH-WFS 难以实现有效的波前重构,限制了其在涡旋光通信中的应用^[17]。另一类基于强度数据的波前恢复方法——相位恢复算法 (phase retrieval algorithm, PRA) 因结构简单、抗干扰能力强、成本低等特点,在光束整形、波前重构方面有着很广泛的应用^[18-19]。盖斯贝格-塞克斯顿算法 (Gerchberg-Saxton, GS) 是应用最为广泛的 PRA 方法之一。早期 Ren 等^[20]将 GS 算法应用于轨道角动量自由空间光通信的波前校正系统中,校正前后光束探测概率提升 50%,结果表明采用 GS 算法可以有效缓解大气湍流引起的相位畸变。Fu 等^[21]提出了一种基于无探针 GS 算法的涡旋光波前校正方法,利用 GS 算法计算出预补偿相位掩模并对光束进行预校正结果表明涡旋光束模式纯度由 41.54% 提升至 87.62%。目前,GS 算法在自由空间 OAM 光通信中能够有效缓解湍流引起的相位畸变^[22-24]。

然而,现有基于 GS 的波前校正研究主要集中在大气湍流条件,其数学模型通常基于远场夫琅禾费衍射假设。水下湍流由盐度梯度和温度变化共同引起,其折射率扰

动更加局部化和强烈,光场传播呈现明显的菲涅尔衍射特性。传统 GS 算法忽略二次相位因子,在水下短距离传输中无法准确描述光场演化;同时,GS 算法易陷入局部最优,收敛速度慢,在处理具有相位奇点的涡旋光束时重构误差较大^[25]。因此,现有方法难以满足水下 OAM 光通信对高精度波前校正的需求。

鉴于上述问题,在传统 GS 算法基础上引入菲涅尔衍射模型,通过构建输入面与输出面之间的正逆衍射过程,将理想涡旋光束振幅作为幅度约束加入迭代过程,并通过限制区域和负反馈机制提升算法稳定性,提出一种适用于水下涡旋光束波前校正的改进 GS 算法。文章首先介绍涡旋光束理论,然后描述算法结构,最后通过仿真与实验验证所提出方法的性能。

1 理论分析

1.1 涡旋光束经海洋湍流传输和波前校正

涡旋光束在海洋湍流环境中传输并进行波前校正过程的示意图如图 1 所示。由于海洋湍流的影响,涡旋光束在传输过程中,发生了光斑扭曲,强度分布不均等不良影响。导致光束传输概率下降,主模态能量转移到其他 OAM 模式上。通过在接收端对畸变的光斑进行波前校正,有效提高了光强分布的均匀性,并将光斑形状变得规整,且提高了目标 OAM 模式的占比。

拉盖尔-高斯 (Laguerre-Gaussian, LG) 光束,其在 z 方向传输的电场表达式^[26]为:

$$E_p^L(r, \varphi, z) = \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p + |L|)!}} \times \frac{1}{\omega(z)} \times \left(\frac{\sqrt{2}r}{\omega(z)}\right)^{|L|} \times \exp\left(\frac{-r^2}{\omega^2(z)}\right) \times L_p^{|L|}\left(\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right) \times \exp(iL\varphi) \times \exp\left(\frac{-ikr^2z}{2(z^2 + z_R^2)}\right) \times \exp\left[i(2p + |L| + 1)\tan^{-1}\left(\frac{z}{z_R}\right)\right] \quad (1)$$

其中, z 为沿轴传输距离, p 为径向量子数, L 为角向量子数即拓扑荷数, $\omega(z)$ 为 $z > 0$ 时高斯光束半径, λ 为

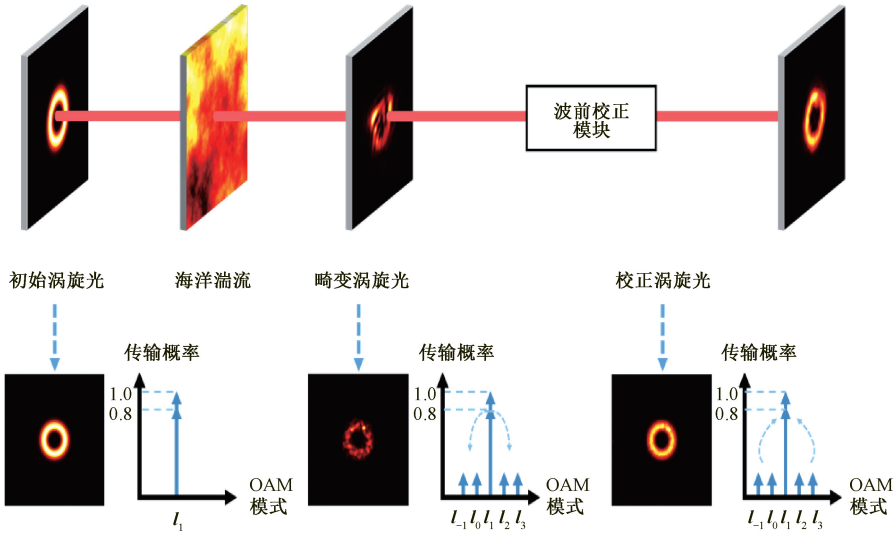


图 1 涡旋光束经海洋湍流畸变及波前校正过程

Fig. 1 Diagram of the vortex beam distortion and wavefront correction process in oceanic turbulence

波长, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, $z_R = \pi\omega_0^2/\lambda$ 为瑞利范围, ω_0 为束腰半径, $L_p^{l|L|}(\cdot)$ 为广义拉盖尔多项式, $(2p + |L| + 1) \tan^{-1}(z/z_R)$ 为古依相位。

由于不同阶的 OAM 态是正交的, 不同轨道角动量一起可构成一组正交基, 且任意光束都可以按照此正交基进行分解, 故任意光场的复振幅 $u(r, \varphi, z)$, 可按螺旋谐波函数 $\exp(iL\varphi)$ 进行展开^[27], 即:

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

其中, $a_L(r, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{2\pi} u(r, \varphi, z) \exp(iL\varphi) d\varphi$, L 为

拓扑荷数。

对 $a_L(r, z)$ 积分得各单一 OAM 态所占的相对功率为:

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

传输概率 η_l 表示光束各 OAM 模式所占的比例, 其表达式为:

$$\eta_L = P_L / \left(\sum_{q=-\infty}^{\infty} P_q \right) \quad (4)$$

1.2 改进的涡旋光束波前校正相位算法

在 GS 算法^[28]的基础上, 提出了一种改进 GS 算法流程图如图 2 所示。

步骤 1: 用理想 LG 光束的光场幅度 $U_0(x, y)$ 作为输入光场幅度, 理想 LG 光束的相位 $\varphi_0(x, y)$ 作为初始相位, 将 $U_0(x, y)$ 和 $\varphi_0(x, y)$ 组成得到输入光场分布 $E_0(x, y)$ 作为菲涅尔衍射的输入, 即:

$$E_0(x, y) = U_0(x, y) \exp[i\varphi_0(x, y)] \quad (5)$$

步骤 2: 对输入光场分布 $E_0(x, y)$ 进行菲涅尔衍射传

输运算, 得到衍射后光场分布 $F_k(x, y)$, 即:

$$F_k(x, y) = g_k(x, y) \exp[i\varphi'_k(x, y)] \quad (6)$$

其中, $g_k(x, y)$ 和 $\varphi'_k(x, y)$ 分别是输入光场分布 $E_0(x, y)$ 进行菲涅尔衍射传输运算得到的振幅和相位;

步骤 3: 使用 $U'(x, y)$ 构造下一次进行菲涅尔逆衍射部分迭代的输入 $F_{k+1}(x, y)$, 即:

$$F_{k+1}(x, y) = [a \cdot U'(x, y) + (1 - a) \cdot |F_k(x, y)|] \exp[i\varphi'_k(x, y)] \quad (7)$$

其中, a 为加权系数, $U'(x, y)$ 为发生波前畸变的拉盖尔高斯涡旋光束的光场幅度; $\varphi'_k(x_i, y_i)$ 为 $F_k(x, y)$ 的相位;

步骤 4: 对 $F_{k+1}(x, y)$ 进行菲涅尔逆衍射运算, 得到光场分布 $E_k(x, y)$, 即:

$$E_k(x, y) = U_k(x, y) \exp[i\varphi_k(x, y)] \quad (8)$$

其中, $E_k(x, y)$ 表示对 $F_{k+1}(x, y)$ 进行菲涅尔逆衍射传输运算得到光场分布, $U_k(x, y)$ 为 $E_k(x, y)$ 的振幅, $\varphi_k(x, y)$ 为 $E_k(x, y)$ 的相位;

步骤 5: 根据 $E_k(x, y)$ 构造下一次进行菲涅尔衍射部分迭代的光场分布 $E_{k+1}(x, y)$, 即:

$$E_{k+1}(x, y) = \begin{cases} U_0(x, y) \exp[i\varphi_k(x, y)], & (x, y) \in \gamma \\ E_k(x, y) - \beta \cdot U_k(x, y) \exp[i\varphi_k(x, y)], & (x, y) \notin \gamma \end{cases} \quad (9)$$

其中, γ 代表空间域的限制区域, β 为反馈系数, x, y 为空间域坐标;

步骤 6: 判断 N 是否大于 k , 如果是, 则退出迭代过程; 若不足, 以步骤 5 得到的光场分布 $E_{k+1}(x, y)$ 作为输入再次执行步骤 2, 直到达到定义的最大迭代次数时,

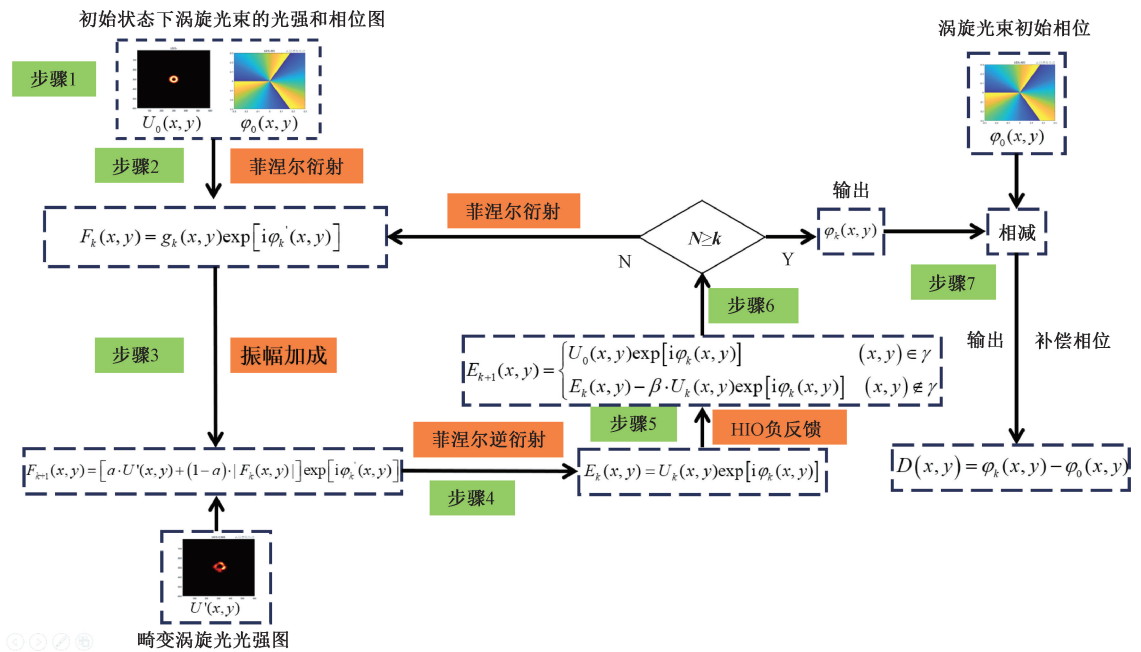


图 2 改进 GS 算法

Fig. 2 The improved GS algorithm

计算终止, 将最后一次迭代步骤 4 到 $E_k(x, y)$ 对应的相位 $\phi_k(x, y)$ 作为重构光束畸变相位, N 为最大迭代次数;

步骤 7: 根据重构光束畸变相位 $\phi_k(x, y)$ 得到最终的补偿相位 $D(x, y)$ 。

$$D(x, y) = \phi_k(x, y) - \phi_0(x, y) \quad (10)$$

2 实验与仿真

2.1 仿真结果分析

对 LG 光束在海洋湍流作用下的传播进行了仿真分析, 并对改进 GS 算法的性能进行了验证。湍流引起的相位扰动采用功率谱反演法与次谐波补偿方法进行建模。系统参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

参数	值
波长 λ/nm	532
束腰半径 ω_0/m	0.01
采样范围 S/m	0.1
传输距离 Z/m	30
动能耗散率 $\mathcal{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3})$	10^{-3}
温度耗散率 $\chi_T/(\text{K}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	1×10^{-5}
温度含盐度诱导海洋湍流贡献度比值	$\tau = -3$

在表 1 给出的参数下, 拓扑荷数为 1 和 5 的 LG 光束, 无海洋湍流无波前校正、有海洋湍流无波前校正、GS 算法进行波前校正以及改进 GS 算法进行波前校正前后的强度、相位、传输概率图如图 3(a) 和 3(b) 所示, C 为光强相关系数。

从图 3 光强分布和相位分布可以看出, 畸变的 LG 光束在采用 GS 算法或改进 GS 算法后, 其光强分布显著更趋均匀, 环形中心强度提升; 相位跃迁处 (即“相位奇点”) 更加清晰。这表明波前相位校正能够有效缓解海洋湍流对 OAM 光束造成的相位畸变。未进行校正时, 拓扑荷数 $L=1$ 与 $L=5$ 的传输概率分别为 0.40 和 0.15, 光强相关系数分别为 0.69 和 0.71。经 GS 算法校正后传输概率提升至 0.82 和 0.54, 光强相关系数提升至 0.94 和 0.90 采用改进 GS 算法后传输概率进一步提升至 0.98 和 0.83, 光强相关系数进一步提升至 0.99 和 0.96。综上可以更好的说明改进 GS 算法相比于传统的 GS 算法可以更好的缓解海洋湍流对 OAM 光束的影响。

改进 GS 算法和 GS 算法校正前后 LG 光束传输概率与不同拓扑荷数的变化曲线如图 4 所示。由于海洋湍流存在随机性, 所以每次校正前后 LG 光束传输概率存在波动。为了验证算法的有效性, 进行了 500 次同参数重复性仿真, 图 4 中每一不同参数对应的传输概率值均为 500 次同参数重复性仿真后的平均值。

从图 4 可以看出随着涡旋光束随着拓扑荷数的增加, 无论是否采用波前校正算法, 光束的传输概率均有所下降, 具体分析如下在束腰半径相同的情况下随着拓扑

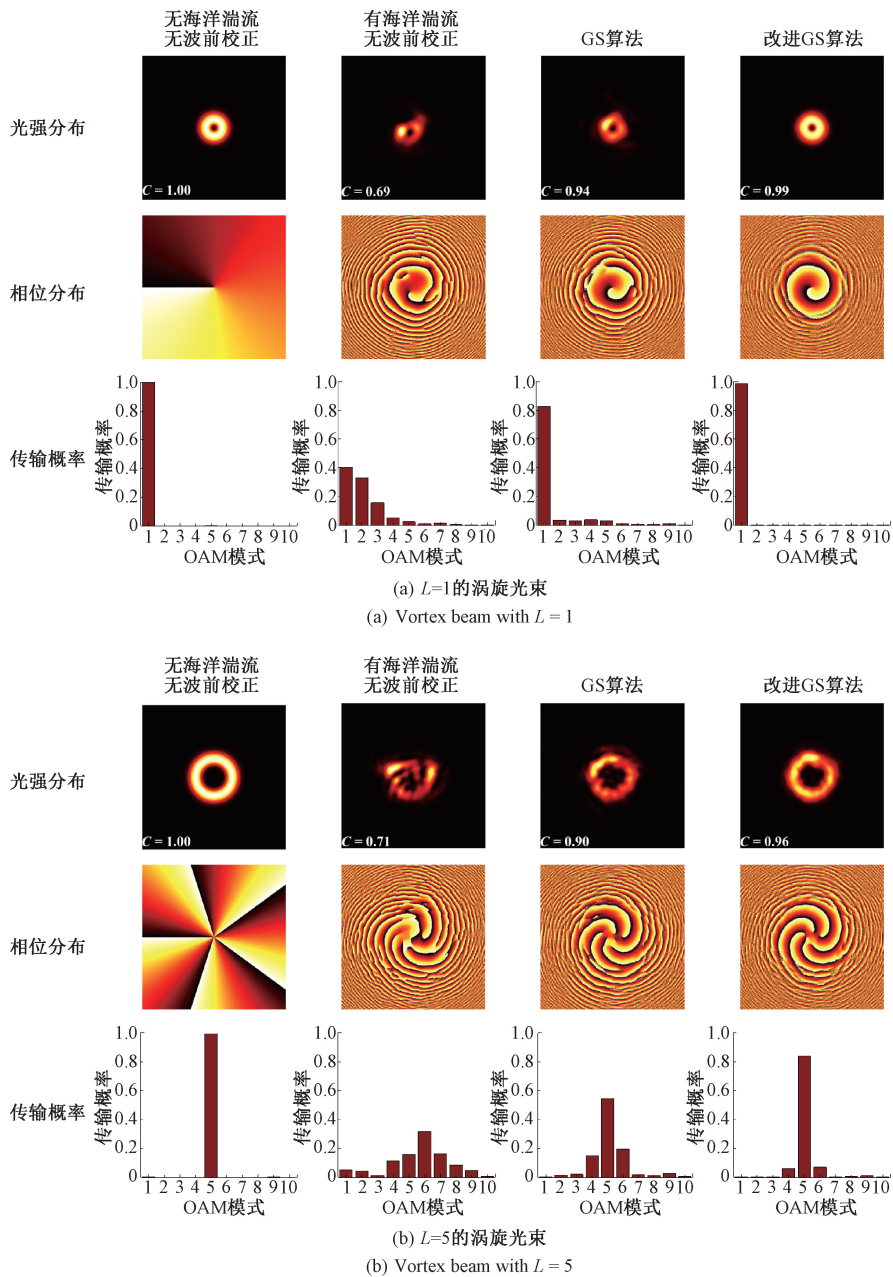


图 3 涡旋光束的强度、相位、传输概率分布图

Fig. 3 Intensity, phase, and transmission probability distributions of the vortex beam

荷数的增加,受到的海洋湍流的影响就越大,体现便是传输概率的下降。但在相同的拓扑荷数下,改进的 GS 算法传输概率明显高于传统的 GS 算法。

为了进一步探讨海洋湍流各参数对 LG 光束校正前后传输概率的影响,改进 GS 算法和 GS 算法校正前后 LG 光束传输概率与湍流动能耗散率、均方温度耗散率、传输距离、和温度含盐度诱导海洋湍流贡献度比值的变化曲线如图 5(a) ~ (d) 所示。

图 5(a) 可以看出随着湍流动能耗散率的增加 LG 光束校正前后的传输概率增加,此外,从图 5(b)、(c) 中进

一步观察可知,随着均方温度耗散率或者传输距离的增加 LG 光束校正前后的传输概率减少。具体分析为:湍流动能耗散率的增大会导致海洋湍流的强度随之减小,相同,均方温度耗散率增大或者传输距离的增加会导致海洋湍流的强度增大,至此可以得到随着湍流强度的增加,光束所受的影响越大,这是因为海洋湍流强度的增大会导致光束的散射和衍射增强,从而导致 LG 的相位破坏严重,传输概率随之减低。在湍流强度较弱时改进 GS 算法和 GS 算法校正都能展现出很好的校正能力,但随着湍流强度的增强改进 GS 算法的校正能力优于 GS 算法。

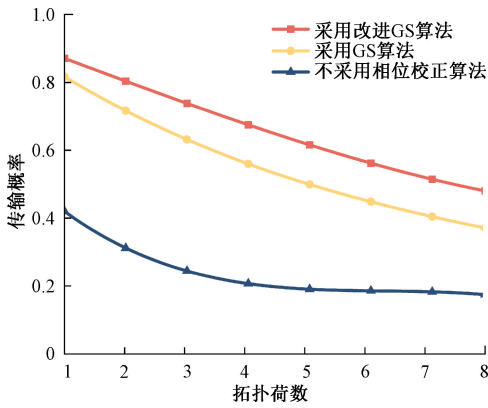
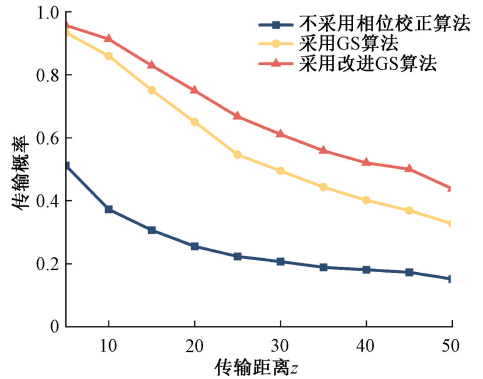


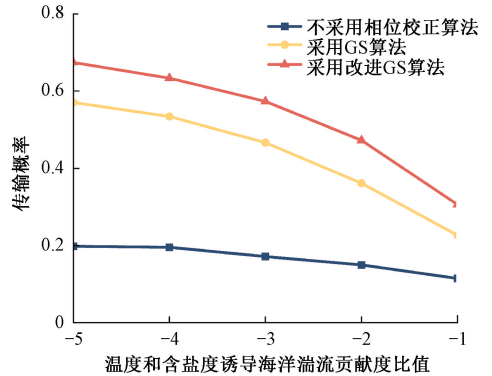
图 4 不同拓扑荷数与传输概率的变化曲线

Fig. 4 Variation curves of transmission probability with different topological charges

从图 5(d)中可以看出 LG 光束校正前后传输概率随温盐比的增大而减小,但随着温盐比的增加改进 GS 算法的校正能力优于 GS 算法。这是因为温盐比的取值范围为 $[-5, 0]$, 当温盐比趋向于 -5 时, 海洋湍流主要由温度主导, 而当温盐比趋向于 0 时, 海洋湍流主要由盐度主导且由盐度驱动的海洋湍流强度高于温度驱动的海洋湍流强度。这与从图 5(a) ~ (c) 中所得的结论一致。

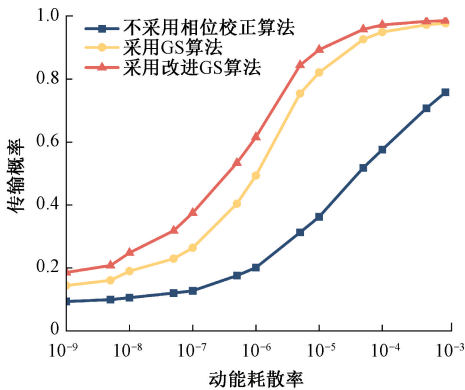


(c) 传输概率与传输距离的变化曲线
(c) Variation curves of transmission probability with transmission distance

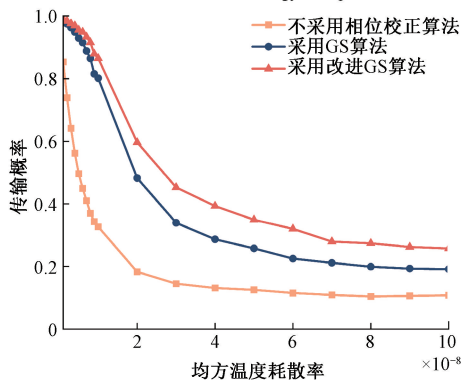


(d) 传输概率与温度含盐度诱导海洋湍流贡献度比值的变化曲线
(d) Variation curves of transmission probability with the contribution ratio of temperature-salinity-induced oceanic turbulence

图 5 不同海洋湍流参数对光束校正前后传输概率的影响
Fig. 5 Influence of different oceanic turbulence parameters on the transmission probability of beams before and after correction



(a) 传输概率与湍流动能耗散率的变化曲线
(a) Variation curve of transmission probability with turbulent kinetic energy dissipation rate



(b) 传输概率与均方温度耗散率的变化曲线
(b) Variation curve of transmission probability with mean-square temperature dissipation rate

2.2 空间光调制器模拟海洋湍流实验结果分析

应用改进 GS 算法的涡旋光束波前畸变校正系统实验方案如图 6 所示。本实验采用 532 nm 固体激光器(LR-GSP-532/300 mW)作为光源,输出高斯光束。光束经由 4-f 扩束系统进行扩束准直(透镜焦距分别为 25 和 125 mm),以确保光束在传输过程中的质量稳定。随后通过光阑选取光斑中心区域(通光孔径 8 mm),进一步改善光束均匀性,有效抑制杂散光和背景噪声,提高光束信噪比。

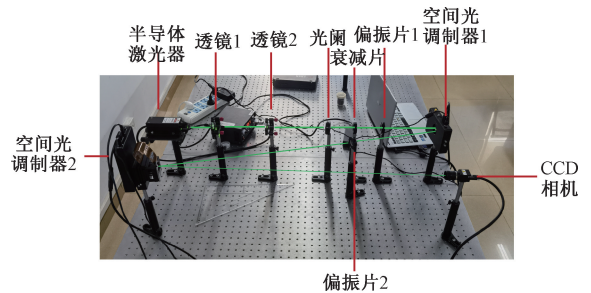


图 6 实验装置

Fig. 6 Diagram of experimental setup

为了保证入射到空间光调制器的光束偏振方向与其液晶光轴一致,在光路中加入了两片偏振片,角度分别为 3° 与 5° (通过旋转偏振片可以看到经空间光调制器的高斯光逐渐变成涡旋光且涡旋光束中心黑色区域不在增加记录此时偏振片的角度)。该设置可确保光束在通过偏振片后获得正确的偏振态,从而实现入射光的有效调制。此外,为防止电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)过曝,在系统中加入了一片透过率为50%的衰减片以降低光束强度。

实验所选用的空间光调制器来自 Meadowlark Optics 公司,属于纯相位反射式类型,分辨率为 $1\ 920 \times 1\ 152$ 。其中,空间光调制器1用于生成具有特定拓扑荷数的涡旋光束;空间光调制器2用于模拟湍流并对畸变的LG光束进行恢复。在接收端,利用CCD相机(STC-MCS231U3V,分辨率 $1\ 920 \times 1\ 200$)记录光束在传输过程中的演变特性。

为了恢复畸变的LG光束,在空间光调制器1上加载涡旋光束的螺旋相位,在空间光调制器2上不加载任何相位信息。经过CCD相机进行接收之后,可以得到已知复振幅的LG光束 $E_0(x, y) = \sqrt{I_0(x, y)} \exp[i\varphi_0(x, y)]$,其中 $I_0(x, y)$ 为CCD接收到涡旋光束的光强分布。随后在空间光调制器2上加载海洋湍流相位屏灰度图用来模拟海洋湍流,并用CCD采集畸变的LG光束光场分布 $U'(x, y) = \sqrt{I_d(x, y)}$ 。作为改进GS算法的输入,通过改进GS算法计算后得到补偿相位 $D(x, y)$ 。最后在空间光调制器2上加载对应的海洋湍流相位和经改进GS算法得到的补偿相位,并用CCD采集光斑。

研究表明,涡旋光束的传输概率与其光强相关系数呈单调递增的关系,故将光强相关系数作为系统性能评价函数^[29]。

海洋湍流的统计特性通常可通过结构函数表征,因此可将相位结构函数作为利用空间光调制器验证模拟相位屏准确性的一项评价指标。海洋湍流相位结构函数的理论表达式^[30]为:

$$D(r) = 2 \left[\frac{1 - \Delta z^2(1.84\omega^2 - 40.341\omega + 2\ 077)}{3.063 \times 10^{-7}k^2(1.116\omega^2 - 2.235\omega + 1.119)} \right] \left(\frac{r'}{r_0} \right)^{5/3} \quad (11)$$

式中: ω 为光束的束腰半径; r' 为波平面两点之间的距离; r_0 为海洋湍流的相干长度,可表示为:

$$r_0 = \left[3.603 \times 10^{-7}k^2 \Delta z \varepsilon^{-1/3} \frac{\chi_r}{2\omega^2} (1.116\omega^2 - 2.235\omega + 1.119) \right]^{-3/5}, \quad r_0 \gg \eta \quad (12)$$

依据海洋湍流随机相位屏的理论模型,结合数值模拟可以获得相位结构函数,其表达式定义为:

$$D(r) = \langle [\varphi(\rho + r) - \varphi(\rho)]^2 \rangle \quad (13)$$

式中: ρ 和 r 为二维坐标的变量。

由功率谱反演法加次谐波补偿生成的500张海洋湍流相位屏取平均的实际相位屏结构函数和理论相位结构函数的曲线如图7所示,从图7中可以看到实际相位结构函数值与理论值较为接近,结果表明,将该方法生成的相位屏加载至空间光调制器后,能够准确模拟海洋湍流对光束相位的扰动作用。

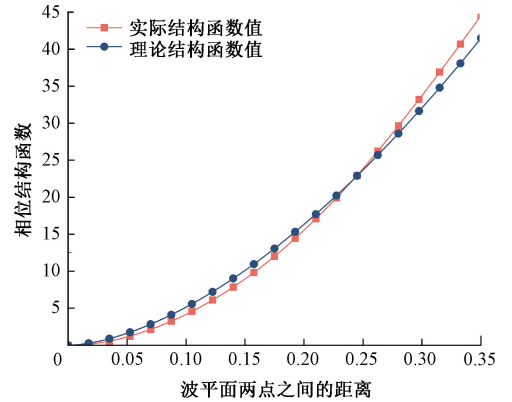


图7 实际相位结构函数和理论相位结构函数关系曲线
Fig. 7 Relationship curve between the measured and theoretical phase structure functions

在拓扑荷 $L=5$ 条件下,不同温度含盐度诱导海洋湍流贡献度比值下的湍流传输情形中,CCD捕获的LG光束在改进GS算法与传统GS算法校正前后的光强分布对比及光强相关系数如图8所示。在相同湍流条件下,不同拓扑荷数 L 的LG光束经湍流传输后CCD捕获的LG光束在改进GS算法与传统GS算法校正前后的光强分布对比及光强相关系数如图9所示。

从图8和9可以看出,LG光束在湍流传播后,其环形强度分布出现扭曲与畸变;而经过GS算法和改进GS算法的校正后,LG光束的强度分布趋于均匀,光斑形态也更加规整。从图8和9光强相关系数可以看出,经两种不同算法校正后光强相关系数都上升,且经过改进GS算法的光强相关系数比传统GS算法高。

由图8光强相关系数可以看出,校正前后光强相关系数呈现递减关系,这是由于在海洋环境中,盐度往往是湍流形成的主要因素,同时盐度诱导的湍流作用通常比温度诱导更为显著。这与图5(d)仿真结果一致。由图9光强相关系数可以看出在未校正之前不同拓扑荷数的涡旋光束在传输之后光强相关系数相差不大,这是由于在具体实验中涡旋光束传输距离较短,不同拓扑荷数的涡旋光束的发散在较短传输距离下没有明显体现。

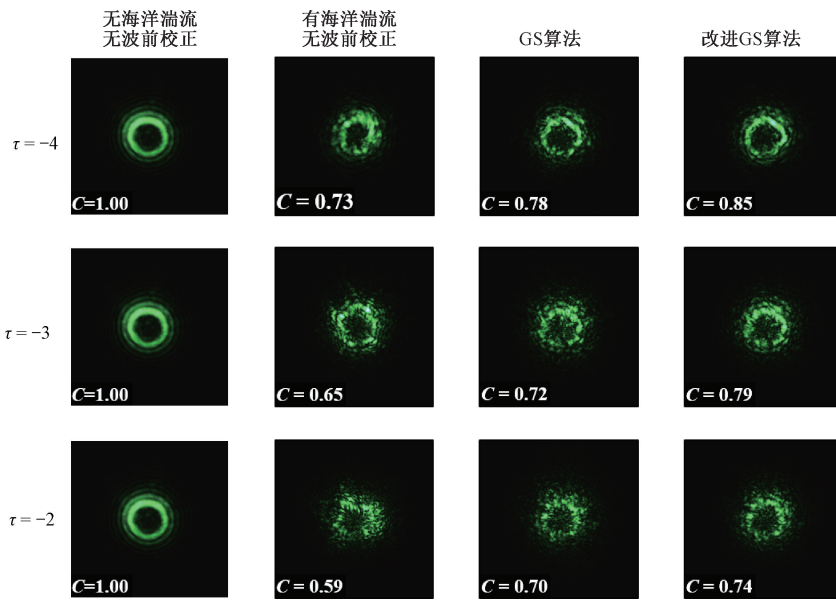


图 8 不同温度含盐度诱导海洋湍流贡献度比值校正前后光强图及光强相关系数

Fig. 8 Intensity distributions before and after correction under different temperature-salinity-induced oceanic turbulence contribution ratios and Intensity correlation coefficients

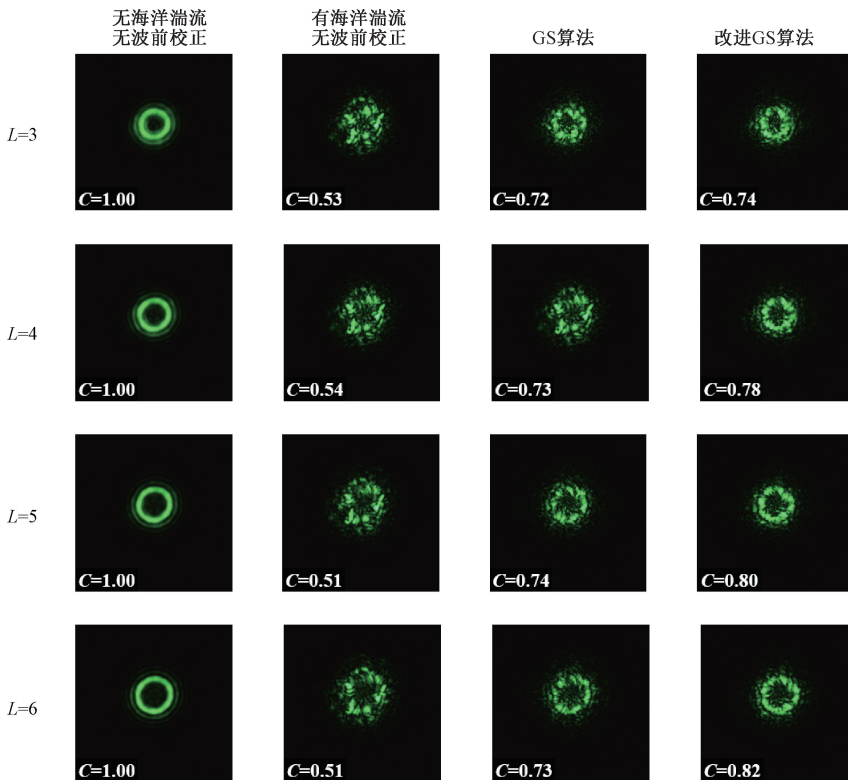


图 9 不同拓扑荷数校正前后光强图及光强相关系数

Fig. 9 Intensity distributions before and after correction for different topological charges and intensity correlation coefficients

为了监控改进 GS 算法和 GS 算法的校正过程,在一次校正实现时, LG 光束探测概率与算法迭代次数的关系曲线如图 10 所示。

图 10 表明与 GS 算法相比,改进 GS 算法收敛效果更好,具体表现为改进 GS 算法校正后光强相关系数更高。从收敛速度来看,改进 GS 算法在迭代步数为 120 左

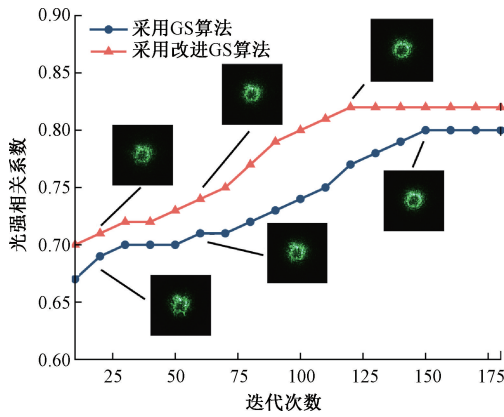


图 10 光强相关系数随迭代次数的变化关系

Fig. 10 Variation of intensity correlation coefficient with iteration number

右达到收敛,光强相关系数基本保持不变,而 GS 算法缓慢增长,且光强相关系数低于改进 GS 算法。这是因为改进 GS 算法在重构畸变涡旋光束相位时,将理想光场振幅

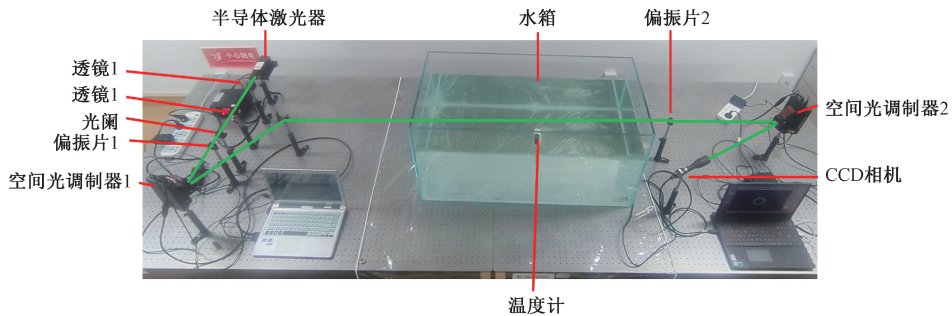


图 11 水下涡旋光束波前校正实验

Fig. 11 Experimental setup for wavefront correction of an underwater vortex beam

为保证入射到空间光调制器 (Meadowlark Optics, 分辨率 1920×1200) 的光束偏振方向与其液晶光轴一致,光束首先通过偏振片 1 (角度 3°), 确保空间光调制器 1 能够对光束进行正确调制,从而生成稳定的 LG 涡旋光束。经反射镜反射后,光束透过水箱并通过偏振片 2 (角度 5°) 进入空间光调制器 2 进行相位校正,以补偿经盐度梯度湍流介质后的波前畸变。接收端采用 CCD 相机 (STC-MCS231U3V, 分辨率 1920×1200) 记录光束在传播过程中的演变。

实验所使用的水箱长 1 m、宽 0.5 m、高 0.5 m,壁厚 1 cm。光束高度相对于光学平台为 28.3 cm。水箱下层注入高度为 25 cm 的盐水,通过加入 625 g 食盐配置 5% 盐溶液并充分搅拌形成均匀浓度;随后在其上方缓慢加入 15 cm 的淡水,形成稳定的盐度分层结构。实验过程中水体温度为 15.7°C 。

在拓扑荷 $L = 5$ 条件下、涡旋光束经过水箱后未注入

加入迭代环节,使得每次迭代均结合输入、输出的光场信息,加速算法的迭代速度;设定限制区域并引入负反馈设计,确保相位恢复具备良好的收敛性。

2.3 水下实验结果分析

在海洋介质中,折射率波动主要受到盐度和温度扰动的影响^[31]。为模拟水下湍流,在实验中采用具有一定盐度差的水体。盐水注入淡水后会扩散,使水体折射率呈现非均匀分布,从而模拟由盐度差引起的湍流效应。随着盐度差的增大,由扩散形成的盐度梯度也随之增强,使水体折射率起伏更加明显,等效湍流强度随之增大。

实验装置的结构示意图如图 11 所示。实验采用 532 nm 固体激光器 (LR-GSP-532/300 mW) 产生高斯光束,并利用 $4-f$ 扩束系统 (透镜焦距分别为 25 和 125 mm) 对光束进行扩束与准直,以确保其在传输过程中的质量稳定。同时,在光路中加入通光孔径为 8 mm 的光阑,用于截取光斑的中心区域,改善光束均匀性,抑制杂散光与背景噪声,从而提高信噪比。

水、注入盐度梯度的水、经 GS 算法校正、改进 GS 算法校正的光强图和对应的光强相关系数如图 12 所示。

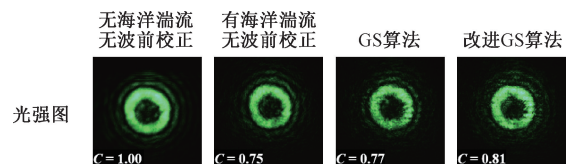


图 12 涡旋光束经湍流校正前后光强及光强相关系数

Fig. 12 Intensity profiles and intensity correlation coefficients of the vortex beam before and after turbulence correction

从图 12 可以看出, LG 光束经水箱传输后,其中心环状强度分布发生扭曲光环变暗,当采用 GS 算法和改进 GS 算法校正后,光斑形状变得规整和均匀且未校正之前光强相关系数为 0.75,经 GS 算法校正后光强相关系数上升至 0.77,经过改进 GS 算法的光强相关系数进

一步上升到 0.81。

在实验中,通过 CCD 相机采集涡旋光束经过盐度梯度水、GS 算法校正、改进 GS 算法校正各 1 000 帧图片的光强相关系数曲线如图 13 所示。

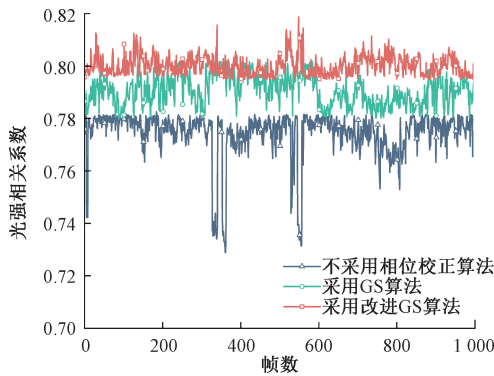


图 13 涡旋光束经湍流校正前后光强相关系数曲线

Fig. 13 Intensity patterns and intensity correlation coefficients of the vortex beam before and after turbulence correction

从图 13 中看到在校正前涡旋光束的光强相关系数范围在 0.73~0.78,当采用 GS 算法校正后光强相关系数范围在 0.78~0.80,与 GS 算法相比采用改进 GS 算法可将光强相关系数进一步提升至 0.80~0.82,校正前平均光强相关系数为 0.77、方差 8.2×10^{-5} ;传统 GS 校正后为 0.79、方差 3.23×10^{-5} ;改进算法进一步提升至 0.80、方差 1.4×10^{-5} 。

3 结 论

本研究提出了一种改进的 GS 算法,用于水下涡旋光束的波前校正。通过相位屏传输法模拟拉盖尔-高斯涡旋光束在海洋湍流中的传播过程,结合仿真、空间光调制器模拟湍流实验、实际水箱实验,系统分析了 GS 算法和改进 GS 算法在湍流引起的波前畸变校正中的性能差异。仿真结果表明,在拓扑荷为 $L=1$ 的情况下,GS 算法将传输概率从 0.40 提升至 0.82,而改进 GS 算法可进一步提升至 0.98。进一步研究不同拓扑荷数、传输距离、动能耗散率、均方温度耗散率和温盐比等环境参数对探测概率的影响表明,改进 GS 算法在各类湍流条件下均表现出优于传统 GS 的鲁棒性和校正精度。在空间光调制器模拟湍流实验中,畸变涡旋光束的光强相关系数为 0.64。GS 算法迭代 150 次后收敛,将相关系数提升至 0.79;而改进 GS 算法仅需 120 次迭代即可收敛,相关系数提升至 0.82。在实际水箱环境中,校正前涡旋光束光强相关系数为 0.73~0.78,GS 算法校正后可提升至 0.78~0.80,而改进 GS 算法可进一步提升至 0.80~0.82。相比 GS

算法,改进 GS 算法不仅校正效果更优,且收敛速度更快,能够更有效地校正海洋湍流引起的相位畸变。

参考文献

- [1] 宋跃才,林海涛,卞媛,等. 基于移动信标的水下无线传感器网络定位算法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(5):44-49.
SONG Y C, LIN H T, BIAN Y, et al. Localization algorithm for underwater wireless sensor networks based on mobile beacons [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(5):44-49.
- [2] 蒋佳佳,杨绪宝,郭同同,等. 基于 SFTRLS 算法的水下自干扰抑制方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(7):225-234.
JIANG J J, YANG X B, GUO T T, et al. Study on an underwater self-interference suppression method based on the SFTRLS algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(7):225-234.
- [3] 秦欢欢,王梦凡,柯熙政. 工业互联网下的无线光通信研究进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(10):1-13.
QIN H H, WANG M F, KE X ZH. Research progress of wireless optical communication in the industrial Internet[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(10):1-13.
- [4] HAN X T, WANG W, LI P, et al. Demonstration of anti-diffracting optical pin-like beam enabled 5 Gbit/s OFDM underwater wireless optical communication system[J]. Optics Communications, 2025, 579: 131582.
- [5] DONG X H, ZHANG K K, SUN C M, et al. Towards 250-m gigabits-per-second underwater wireless optical communication using a low-complexity ANN equalizer[J]. Optics Express, 2025, 33(2): 2321-2337.
- [6] 张建磊,张友为,华丹琪,等. 动态水下环境无线光通信自适应合并接收技术[J]. 光学学报, 2025, 45(2): 169-179.
ZHANG J L, ZHANG Y W, HUA D Q, et al. Adaptive combining reception technique for underwater wireless optical communication in dynamic underwater environments[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(2):169-179.
- [7] 王明军,张妍. 阵列涡旋光束在不稳定分层海洋中的远距离传输[J]. 中国激光, 2024, 51(8):154-163.
WANG M J, ZHANG Y. Long-distance transmission of array vortex beams in an unstable stratified ocean[J].

- Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(8):154-163.
- [8] 吴鹏飞,李成毓,雷思琛,等. 弱风条件下斜程海洋湍流中涡旋光束的传输特性[J]. 红外与激光工程, 2024,53(2):156-166.
- WU P F, LI CH Y, LEI S CH, et al. Transmission characteristics of vortex beams in slant-path ocean turbulence under weak wind conditions[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(2):156-166.
- [9] 刁鲁欣,王明军,黄朝军,等. 海洋湍流下双拉盖尔-高斯涡旋光束的闪烁指数与误码率研究[J]. 光子学报,2024,53(2):217-229.
- DIAO L X, WANG M J, HUANG CH J, et al. Scintillation index and bit error rate of dual Laguerre-Gaussian vortex beams in ocean turbulence[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(2):217-229.
- [10] 侯彦佐,于龙洋,徐震,等. 基于蒙特卡罗方法的涡旋光束水下传输研究[J]. 光学学报,2025,45(19):207-219.
- HOU Y Z, YU L Y, XU ZH, et al. Underwater transmission of vortex beams based on the Monte Carlo method[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(19):207-219.
- [11] 谢炎辰,梁静远,丁德强,等. 无线光通信系统轨道角动量技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2023,60(21):58-99.
- XIE Y CH, LIANG J Y, DING D Q, et al. Research progress of orbital angular momentum technology in wireless optical communication systems[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(21):58-99.
- [12] HAO N CH, XU Y G, XU Q, et al. Propagation properties of partially coherent vortex beams with twist phase in oceanic turbulence[J]. Journal of Russian Laser Research, 2024, 45(3):332-342.
- [13] 梁静远,庞明志,柯熙政. 无线光通信中大气湍流抑制方法[J]. 电子测量与仪器学报,2024,38(11):1-14.
- LIANG J Y, PANG M ZH, KE X ZH. Atmospheric turbulence mitigation methods in wireless optical communication[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(11):1-14.
- [14] 梁静远,毛双双,柯熙政,等. 无线光通信系统中的噪声模型研究进展[J]. 电子测量与仪器学报,2024,38(10):1-15.
- LIANG J Y, MAO SH SH, KE X ZH, et al. Research progress on noise models in wireless optical communication systems[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(10):1-15.
- [15] 杨尚君,赵晏民,邹曙光,等. 自适应光学在水下无线光通信系统应用研究进展[J]. 电波科学学报,2025,40(6):999-1013,1035.
- YANG SH J, ZHAO Y M, ZOU SH G, et al. Research progress on applications of adaptive optics in underwater wireless optical communication systems[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2025, 40(6):999-1013,1035.
- [16] 于千茜,李阳阳,秦明,等. Shack-Hartmann波前传感器研究进展及应用(特邀)[J]. 光学学报,2025,45(21):9-33.
- YU Q Q, LI Y Y, QIN M, et al. Research progress and applications of Shack-Hartmann wavefront sensors (invited)[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(21):9-33.
- [17] 常欢. 轨道角动量空间光通信系统自适应光学关键技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2020.
- CHANG H. Research on key adaptive optics technologies for orbital angular momentum space optical communication systems[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [18] 张玉莹,赵帅,郑昕. 基于改进GS算法设计DOE制备紫外波段微米级均匀光斑[J]. 光学学报,2023,43(7):119-126.
- ZHANG Y Y, ZHAO SH, ZHENG X. Design of a DOE using an improved GS algorithm to generate a micron-scale uniform spot in the ultraviolet band[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(7):119-126.
- [19] 魏金文,李儒佳,吴佳琛,等. 相位恢复波前重构技术的发展与应用(特邀)[J]. 激光与光电子学进展,2024,61(2):21-37.
- WEI J W, LI R J, WU J CH, et al. Development and applications of phase-retrieval wavefront reconstruction technology (invited)[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(2):21-37.
- [20] REN Y X, HUANG H, YANG J Y, et al. Correction of phase distortion of an OAM mode using GS algorithm based phase retrieval[C]. 2012 Conference on Lasers and Electro-Optics, 2012: 1-2.
- [21] FU SH Y, WANG T L, ZHANG SH K, et al. Non-probe compensation of optical vortices carrying orbital angular momentum[J]. Photonics Research, 2017, 5(3):251-255.

- [22] CHANG H, YIN X L, CUI X ZH, et al. Performance analysis of adaptive optics with a phase retrieval algorithm in orbital-angular-momentum-based oceanic turbulence links[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(22): 6085-6090.
- [23] FU SH Y, WANG T L, ZHANG ZH Y, et al. Pre-correction of distorted Bessel-Gauss beams without wavefront detection[J]. *Applied Physics B. Lasers and Optics*, 2017, 123(12): 275.
- [24] 金兆祥, 宋芝依, 陈建飞, 等. 基于 GS 算法的多贝塞尔高斯光束畸变波前校正方法[J]. *光通信技术*, 2023, 47(3): 18-22.
- JIN ZH X, SONG ZH Y, CHEN J F, et al. Distorted wavefront correction method for multi-Bessel-Gaussian beams based on the GS algorithm [J]. *Optical Communication Technology*, 2023, 47(3): 18-22.
- [25] FAN W Q, GAO F L, XUE F CH, et al. Experimental recognition of vortex beams in oceanic turbulence combining the Gerchberg-Saxton algorithm and convolutional neural network [J]. *Applied Optics*, 2024, 63(4): 982-989.
- [26] 吴鹏飞, 贾致远, 雷思琛, 等. 改进 CNN-Transformer 结合双缝干涉的轨道角动量模态识别方法[J]. *光学学报*, 2025, 45(6): 153-162.
- WU P F, JIA ZH Y, LEI S CH, et al. Orbital angular momentum mode recognition method based on an improved CNN-Transformer combined with double-slit interference[J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45(6): 153-162.
- [27] 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[J]. *光通信技术*, 2025, 49(1): 58-63.
- FAN X Y, LI X J, LIU H Y. Simulation study of underwater vortex-beam OAM-SK communication based on spiral-spectrum decision [J]. *Optical Communication Technology*, 2025, 49(1): 58-63.
- [28] 曹又升, 李晓记. 基于 GS 算法的海洋湍流环境下涡旋光束偏移测量方法[J]. *光通信技术*, 2025, 49(4): 64-67.
- CAO Y SH, LI X J. Offset measurement method for vortex beams in ocean-turbulence environments based on the GS algorithm [J]. *Optical Communication Technology*, 2025, 49(4): 64-67.
- [29] HUANG H, REN Y X, YAN Y, et al. Phase-shift interference-based wavefront characterization for orbital angular momentum modes [J]. *Optics letters*, 2013,

38(13): 2348-2350.

- [30] 吴鹏飞, 卫阳, 谭振坤, 等. 递进式 $N \times N$ 型采样方式次谐波海洋湍流相位屏模拟方法[J]. *激光杂志*, 2024, 45(2): 146-151.
- WU P F, WEI Y, TAN ZH K, et al. Subharmonic ocean-turbulence phase-screen simulation method using a progressive $N \times N$ sampling scheme [J]. *Laser Journal*, 2024, 45(2): 146-151.
- [31] 王明军, 余文辉, 黄朝军. 水下拉盖尔-高斯涡旋光束及其叠加态传输特性[J]. *光学学报*, 2023, 43(6): 317-325.
- WANG M J, YU W H, HUANG CH J. Transmission characteristics of underwater Laguerre-Gaussian vortex beams and their superposition states [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(6): 317-325.

作者简介



吴鹏飞, 2003 年于西安理工大学获得学士学位, 2008 年于兰州理工大学获得硕士学位, 2015 年于西安理工大学获得博士学位, 现为西安理工大学教授, 主要研究方向为现代通信技术。特别是无线光通信和信号处理领域。

E-mail: wupengf@xaut.edu.cn

Wu Pengfei received his B. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2003, his M. Sc. degree from Lanzhou University of Technology in 2008, and his Ph. D. degree from Xi'an University of Technology in 2015. He is currently a professor at Xi'an University of Technology. His main research interests include modern communication technologies, especially wireless optical communication and signal processing.



陈伟, 2022 年于西安航空学院获得学士学位, 现为西安理工大学硕士研究生, 主要研究方向为水下无线光通信方向。

E-mail: 2285491219@qq.com

Chen Wei received his B. Sc. degree from Xi'an Aeronautical University in 2022. He is currently a master's student at Xi'an University of Technology. His main research interest is underwater wireless optical communication.



雷思琛, 2010 年于西安工业大学获得学士学位, 2013 年于西安理工大学获得硕士学位, 2016 年于西安理工大学获得博士学位, 现为西安理工大学副教授, 主要研究方向为无线光通信及其微纳集成技术。

E-mail: lsc@xaut.edu.cn

Lei Sichen received her B. Sc. degree from Xi'an Technological University in 2010, her M. Sc. and Ph. D. degrees both from Xi'an University of Technology in 2013 and 2016, respectively. She is currently an associate professor at Xi'an University of Technology. Her main research interests include wireless optical communication and micro-/nano-integrated technologies.



丁德强(通信作者), 2002 年于西安通信学院获得学士学位, 2005 年于西安理工大学获得硕士学位, 2010 年于西安理工大学获得博士学位, 现为信息支援部队工程大学教授, 主要研究方向为光纤通信、无线光通信。

E-mail: dingdeqiang17@nudt.edu.cn

Ding Deqiang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xi'an Communications Institute in 2002, his M. Sc.

and Ph. D. degrees both from Xi'an University of Technology in 2005 and 2010, respectively. He is currently a professor at Information Support Force Engineering University. His main research interests include optical fiber communication and wireless optical communication.



王惠琴, 1996 年于兰州交通大学获得学士学位, 2011 年于西安理工大学获得博士学位, 现为兰州理工大学教授, 主要研究方向为无线光通信理论与技术。

E-mail: whq1222@lut.edu.cn

Wang Huiqin received her B. Sc. degree from Lanzhou Jiaotong University in 1996, and her Ph. D. degree from Xi'an University of Technology in 2011. She is currently a professor at Lanzhou University of Technology. Her main research interests include the theory and technology of wireless optical communication.