

引用本文: 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.

基于 GS 算法的海洋湍流环境下涡旋光束偏移测量方法

曹又升, 李晓记 *

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对海洋湍流环境下涡旋光束偏移测量精度下降的问题, 提出一种基于 Gerchberg-Saxton(GS)算法的涡旋光束偏移测量方法。通过 GS 算法从畸变光强中恢复涡旋光束的原始相位分布, 结合预构建的湍流信道模板库进行互相关匹配计算, 实现偏移量的高精度定位。仿真结果表明: 该算法在无湍流或弱湍流条件下性能较传统算法差, 但在强湍流条件下优于传统算法; 且拉盖尔-高斯(LG)光束的模式值越大, 测量时的均方误差也越大。

关键词: 涡旋光束; 海洋湍流; 光束偏移; 轨道角动量; 无线光通信

中图分类号: TN91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)04-0064-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.04.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Vortex beam displacement measurement method in ocean turbulence based on GS algorithm

CAO Yousheng, LI Xiaoji*

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guxangxi 541004, China)

Abstract: To address the issue of reduced measurement accuracy for vortex beam displacement in ocean turbulence, this paper proposes a vortex beam displacement measurement method based on the Gerchberg-Saxton (GS) algorithm. By reconstructing the original phase distribution of the vortex beam from distorted intensity profiles using the GS algorithm and performing cross-correlation matching with a pre-established turbulence channel template library, high-precision displacement localization is achieved. Simulation results show that the performance of this algorithm is inferior to traditional algorithms under no or weak turbulence conditions, but outperforms traditional algorithms under strong turbulence conditions; moreover, the larger the mode value of the Laguerre-Gaussian (LG) beam, the greater the mean square error in measurement.

Key words: vortex beam, ocean turbulence, beam misalignment, orbital angular momentum, wireless optical communication

0 引言

无线光通信因其传输速率高、安全性好等优势受到广泛关注。然而, 激光束的方向性强、光束窄的特点要求光发射机与接收机必须保持严格对准和实时跟

收稿日期: 2024-10-08。

基金项目: 广西自然科学基金面上项目(2025GXNSFAA069513)资助; 广西教育厅 2024 年度教改重点项目(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: 曹又升(1999—), 男, 硕士研究生, 湖南郴州人, 现就读于桂林电子科技大学信息与通信学院新一代电子信息专业, 主要研究方向为水下光通信。

* **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。



踪, 这对光束偏移的精准测量提出了极高要求。目前, 研究人员已提出多种光束偏移测量方法, 包括光斑质心算法^[1]、函数拟合法^[2]和无穷积分法^[3]等。这些方法虽针对自由空间光通信的失准问题设计, 却难以应对水下无线光通信的新挑战。

水下环境存在复杂的水流、湍流等因素^[4], 这些因素不仅会导致光束失准, 还会引起光信号衰减、弥散和波前畸变等问题, 使得传统测量算法的准确性大幅降低。针对这一难题, 轨道角动量(OAM)涡旋光束的特殊空间幅度和相位结构使其在光学操控^[5-6]、传感测量^[7]和量子科学^[8]等领域获得广泛应用。近年来, 学者们开始探索利用其空间特性进行光束偏移测量; LIN J 等人^[9]提出了涡旋光束错位检测方法, 从理论上分析了光谱在错位影响下的对称特性; HUANG C 等人^[10]采

用 Shack-Hartmann 波前传感器测量涡旋光束的螺旋相位结构, 但系统过于复杂且未考虑信道环境影响; YAN X 等人^[11-12]提出了一种基于光强分布互相关的偏移测量算法, 但该算法在海洋湍流环境下的可靠性会降低。研究发现, 相比于易受湍流影响的光强分布, 相位分布能更好地保持螺旋波前和相位奇点特征^[13], 这为解决水下测量难题提供了新思路。

Gerchberg-Saxton (GS) 算法作为一种经典的相位恢复算法^[14], 通过空间域和频域的交替迭代优化, 能够从强度信息中恢复高质量相位分布。基于该算法特性, 本文提出一种适用于海洋湍流环境的涡旋光束偏移测量方法。

1 涡旋光束偏移测量方法

在海洋湍流环境下, 涡旋光束传输时因湍流扰动导致波前畸变, 传统基于光强分布的偏移测量方法 (如质心法、光强模板匹配) 因光强弥散而失效。针对此问题, 本文提出一种基于 GS 算法的偏移测量方法, 其核心思想分为 2 步:

- 1) 相位恢复: 利用 GS 算法从畸变光强中重构涡旋光束的原始螺旋相位, 克服湍流导致的相位噪声;
- 2) 相关匹配: 将恢复后的相位分布与预存的湍流信道模板库匹配, 通过互相关计算精确定位光束中心偏移。

1.1 GS 算法相位校正

GS 算法^[15]能够实现光束波前校正, 其原理是基于光场输入平面与输出平面之间的傅里叶变换与逆傅里叶变换交替迭代, 通过光强信息的反向传播重构波前相位 (相位恢复)。该算法的具体实施步骤如下:

- 1) 选择理想光场 $U(x, y)\exp(i\phi_0)$ 作为初始输入光场;
- 2) 对 $U(x, y)\exp(i\phi_0)$ 进行傅里叶变换, 将输入光场的初始相位信息变换到变换域, 获取幅度谱 $A(k_x, k_y)$ 和相位谱 $\varphi(k_x, k_y)$;
- 3) 采用畸变涡旋光束的实测幅度 $U_0(x, y)$ 替换 $A(k_x, k_y)$, 使光强分布符合实际测量结果, 形成新的光场复振幅 $U_0(x, y)\exp(i\phi(k_x, k_y))$;
- 4) 对 $U_0(x, y)\exp(i\phi(k_x, k_y))$ 进行逆傅里叶变换, 将光强信息转换回空间域, 获得幅度谱 $a(k_x, k_y)$ 和相位谱 $H(x, y)$;
- 5) 使用 $U_i(x, y)\exp(i\phi_0)$ 中的幅度谱 $U_i(x, y)$ 替代 $a(k_x, k_y)$, 生成下一次迭代的初始光场 $U_i(x, y)\exp(iH(x, y))$ 。通过循环迭代, 当满足预设条件或达到最大迭代次数时终止计算, 输出校正后的相位分布 $H(x, y)$ 。

1.2 模板匹配与偏移计算

基于 GS 算法的涡旋光束偏移测量方法流程如图 1 所示。当拉盖尔-高斯 (LG) 光束通过海洋湍流信道传输与接收端出现失准时, 接收到的光束波前光强分布会产生显著畸变, 导致其与初始光强分布的相关性降低, 若直接计算将引入较大误差。相比之下, 相位分布受海洋湍流影响较小, 能够较好地保持螺旋波前和相位奇点特征。因此, 本文首先采用 GS 算法对畸变 LG 光束进行相位恢复校正, 随后将校正结果与预先建立的模板矩阵进行互相关计算。GS 算法在此过程中仅作为预处理手段, 并不直接参与偏移量的测量。

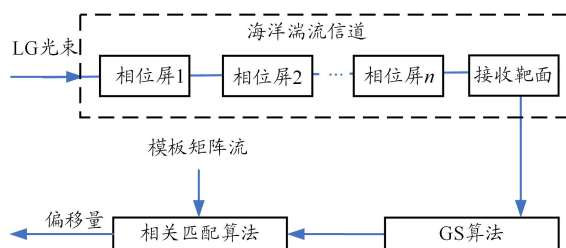


图1 基于GS算法的涡旋光束偏移测量方法流程

模板矩阵的构建方法如下: 采集 LG 光束在理想对准状态下通过不同强度的海洋湍流信道传输后的相位分布图, 每种信道条件下取 10 次传输的平均结果, 并采用 GS 算法校正后存储。在匹配阶段, 算法从模板库中选择与待测光束相位分布相似度最高的矩阵作为匹配模板。相似度计算采用以下公式:

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{\left[\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2 \right] \left[\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2 \right]}} \quad (1)$$

其中, A_{mn} 、 B_{mn} 为矩阵 A 、 B 中第 m 行第 n 列的元素值 (A 为经 GS 算法校正后的光束波前相位分布, B 为不存在偏移的光束波前相位分布, 这里也称为模板矩阵, 与 A 大小相同), m 和 n 是 A 的维数, $\bar{A}$ 和 $\bar{B}$ 分别为 A 和 B 的平均值。 r 的取值范围为 $-1 \sim 1$, r 值越高表示两个矩阵的相似度越高。进行计算时, 将偏移光束的相位分布分别与模板矩阵流进行相似度计算, 取 r 值最大的相位分布作为最终输出的模板矩阵。

相关匹配计算流程如图 2 所示。该算法首先对经过 GS 算法校正后的偏移光束波前相位分布 A 和模板矩阵 B 分别进行傅里叶变换 (FFT), 得到频域数据 A_{FFT} 和 B_{FFT} 。随后, 对这 2 个频域数据进行复共轭乘法运算, 并将运算结果通过傅里叶逆变换 (IFFT) 转换回空间域, 生成互相关矩阵 C 。在最终计算阶段,

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

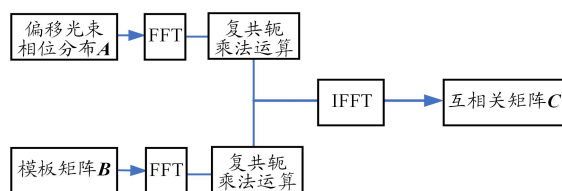


图2 相关匹配计算流程图

算法定位互相关矩阵 C 中元素绝对值的最大值点,该点坐标即为偏移光束的相位奇点位置。基于此坐标数据,可精确计算出光束的偏移量及偏移方向。

2 支撑模型与参数

2.1 海洋湍流信道模型

基于功率谱反演法在频域内生成零均值、单位方差为 1 的 Hermitian 复高斯随机数矩阵,采用合适的海洋湍流折射率功率谱函数对其进行滤波,最后进行 IFFT 得到海洋湍流随机相位屏,以此模拟光束通过海洋湍流通道时受到的环境影响^[17]。常见的海水折射率波动谱是由 NIKISHOV V V 等人^[18]提出的,其表达式为

$$\Phi_n(\kappa) = 0.388 \times 10^{-8} \chi_T \xi^{-1/3} \kappa^{-11/3} [1 + 2.35(\kappa\eta)]^{2/3} \times [\exp(A_T \delta) + \omega^{-1} \exp(-A_S \delta) - 2\omega^{-1} \exp(-A_{Ts} \delta)] \quad (2)$$

其中, χ_T 为温度影响因子 (数值越大表示湍流增强),从稳定的深水区到湍流较强的海洋表面, $\chi_T \in [10^{-10} \text{ K}^2/\text{s}, 10^{-4} \text{ K}^2/\text{s}]$; ξ 为单位体积时间内的动能耗散率,数值增大表示湍流起伏加剧, $\xi \in [10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}^3, 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}^3]$; η 为海洋湍流的内部尺度, $\eta \in [6 \times 10^{-5} \text{ m}, 10^{-2} \text{ m}]$; κ 为空间折射率波动。其它参数 $A_T = 1.863 \times 10^{-2}$, $A_S = 1.9 \times 10^{-4}$, $A_{Ts} = 9.341 \times 10^{-3}$, $\delta = 8.284(\kappa\eta)^{4/3} + 12.978(\kappa\eta)^2$; ω 为温度-盐度比,用来表征温度梯度和盐度梯度引起的海洋湍流的比值, $\omega \in [-5, 0]$ 。其中, -5 表示海洋湍流主要由温度引起, 0 表示海洋湍流主要由盐度引起。

本文将光束在海洋湍流信道中的传播过程等效为 2 个阶段:第一阶段是光束在自由空间传输,此阶段被视为光束在真空中的菲涅耳衍射;第二阶段是光束经过海洋湍流随机相位屏,这一过程被视为信道对光束施加的纯相位扰动。相位扰动带来的变化经由菲涅耳衍射后会导致光束复振幅的变化,从而引起光束光强和相位分布的畸变。

2.2 LG 光束与仿真参数

本文选取涡旋光束中较为普遍的 LG 光束^[15]作为研究对象。假设光束与接收机中心仅存在横向偏移 d ,接收机中心坐标为 $(0, 0)$,光束中心坐标为 (x_0, y_0) 。其

中, $x_0 = d \sin \psi$, $y_0 = d \cos \psi$, 则横向偏移 d 的 LG 光束^[16]表达式 $u(r, \theta, z)$ 为

$$u(r, \theta, z) = \frac{C}{\sqrt{1 + \frac{z^2}{z_R^2}}} \exp \left[-\frac{r^2 + d^2 - 2rd \cos(\theta - \psi)}{\omega^2(z)} \right] \times \left[\frac{\sqrt{2} [re^{i\theta} - de^{i\psi}]}{\omega(z)} \right] \exp(i\theta) \times \exp \left[i(l+1) \arctan\left(\frac{z}{z_R}\right) - i \frac{r^2 + d^2 - 2rd \cos(\theta - \psi)}{\omega^2(z)} \frac{z}{z_R} \right] \quad (3)$$

其中, θ 为方位角, C 为归一化因子, $\omega(z)$ 为传输了 z 的距离后的束腰半径, z_R 为瑞利长度, l 为光束模态值, ψ 为光束轴的偏移方向角, z 为传输距离。

本文采用功率谱反演法模拟海洋湍流信道, 仿真参数设置如下: 波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$, 传输距离 $z = 50 \text{ m}$, 相位屏间距 $\Delta z = 10 \text{ m}$, 相位屏尺寸 $L = 0.06 \text{ m}$, 相位屏单边采样点数 $N = 512$, 海洋湍流强度 $C_n^2 \in [1 \times 10^{-15} \text{ K}^2 \cdot \text{m}^{-2/3}, 1.2 \times 10^{-14} \text{ K}^2 \cdot \text{m}^{-2/3}]$ 。

3 结果分析

图 3 为不同光束偏移测量算法在海洋湍流信道下的均方误差对比情况。可以看出, 在无湍流或湍流较弱时, 光斑质心算法和光强模板匹配法的性能优于所提算法; 然而, 当湍流增强时, 所提算法的均方误差明显比其它算法更低, 表现出更强的鲁棒性。

图 4 为不同模态值的 LG 光束在海洋湍流强度 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ K}^2 \cdot \text{m}^{-2/3}$ 下传输时的光束偏移测量的均方误差

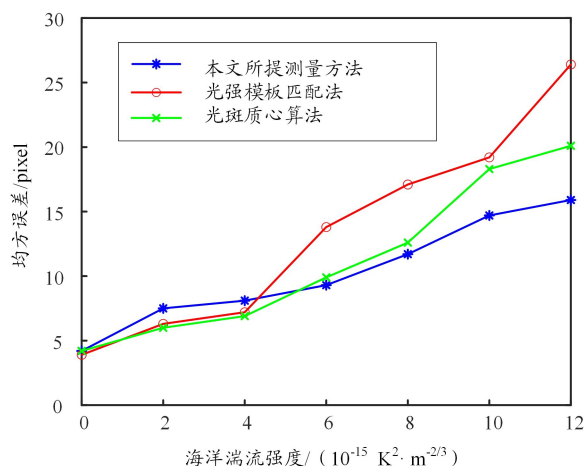


图3 海洋湍流环境下不同算法均方误差性能比较

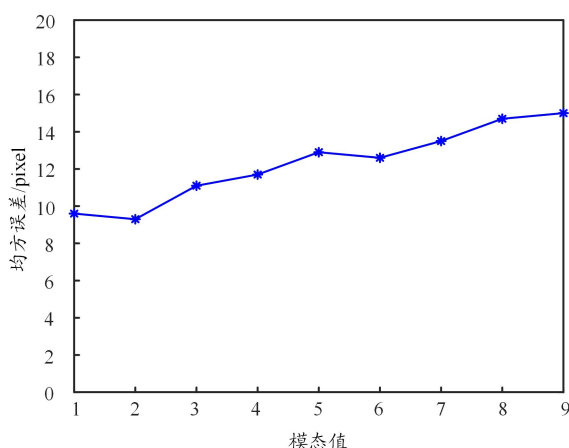


图4 不同模态值的 LG 光束测量的均方误差

比较情况。可以看出,随着模态值的增加,测量误差逐渐增大。由于模态值越大的 LG 光束在传输过程中发散越严重,因此本文选取模态值较小的 LG 光束波前分布作为计算对象,以提高算法精度。

4 结束语

本文提出了一种基于 GS 算法的海洋湍流环境下涡旋光束偏移测量方法。仿真结果表明,在无湍流或湍流较弱时,所提算法的性能较传统光束偏移测量算法差;在湍流较强时,所提算法性能优于传统算法。通过分析该算法对不同模态 LG 光束的适应性,发现模态值越大,测量均方误差越大。本文通过数学建模和仿真分析,为水下光通信的捕获跟踪对准系统设计提供了参考,拓展了海洋湍流环境下光束偏移测量的研究思路,对水下激光定位工作具有参考价值。

参考文献:

- [1] 陈少杰,张亮,吴金才,等. 空间激光通信中精跟踪系统的实现与优化[J]. 红外与毫米波学报,2018,37(1):35-41,46.
- [2] 吴佳彬. 基于四象限探测器的高精度激光光斑位置检测技术研究[D]. 长春:中国科学院研究生院,2016.

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

- [3] 李千. 基于阵列探测器的空间激光通信光斑位置检测技术研究[D]. 长春:中国科学院大学,2020.
- [4] 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.
- [5] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes [J]. Physical Review A: Atomic, Molecular and Optical Physics, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [6] DORNEY K M, REGO L, BROOKS N J, et al. Controlling the polarization and vortex charge of attosecond high-harmonic beams via simultaneous spin-orbit momentum conservation[J]. Nature Photonics, 2018,13(2): 123-130.
- [7] DENG D, ZHAO H, NI J C, et al. A phase-to-intensity strategy of angular velocity measurement based on photonic orbital angular momentum[J]. Nanophotonics, 2021, 11 (4): 865-872.
- [8] STAV T, FAERMAN A, MAGUID E, et al. Quantum entanglement of the spin and orbital angular momentum of photons using metamaterials[J]. Science, 2018, 361: 1101-1104.
- [9] LIN J, YUAN X C, CHEN M Z, et al. Dainty application of orbital angular momentum to simultaneous determination of tilt and lateral displacement of a misaligned laser beam[J]. Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision, 2010, 27(10): 2337-2343.
- [10] HUANG C, HUANG H, TOYODA H, et al. Correlation matching method for high-precision position detection of optical vortex using Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. Optics Express, 2012, 20(24): 26099-26109.
- [11] YAN X, WEI S B, KOU S S, et al. Misalignment measurement of optical vortex beam in free space [J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(9): 31-36.
- [12] 潘孙翔,赵生妹,王乐,等. 水下轨道角动量态传输特性的实验研究[J]. 光学学报,2018,38(6):72-77.
- [13] LI X J, SUN L M, HUANG J M, et al. Research on orbital angular momentum recognition technology based on a convolutional neural network [J]. Sensors, 2023, 23(2): 971-971.
- [14] HUANG G Q, WU DX, LUO J W, et al. Generalizing the Gerchberg-Saxton algorithm for retrieving complex optical transmission matrices [J]. Photonics Research, 2020, 9 (1): 34-34.
- [15] GERCHBERG R W. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. Optik, 1972, 35: 237-250.
- [16] 黎芳,江月松,唐华,等. 光束偏移对轨道角动量信息传输系统的影响[J]. 物理学报,2009,58(9):6202-6209.