

激光海洋湍流传输的光束扩展定标规律

张庆, 孙兴旺, 钟哲强, 张彬*

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 为快速预测和评估海洋湍流对光束扩展的影响及规律,开展了激光海洋湍流传输的光束扩展定标规律研究。利用功率谱反演法生成海洋湍流相位屏,计算模拟了光束扩展随海水参量和激光参数的变化及规律,进而建立了蓝绿波段激光海洋湍流传输的光束扩展定标关系式。结果表明,在海洋湍流传输距离100 m以内、激光波长范围为470~550 nm、高斯光束束腰半径范围为0.001~0.100 m、温度导致海洋湍流与盐度导致海洋湍流的比值范围为-5.0~-0.5等条件下,所建立定标关系式预估的光束扩展规律与数值计算结果的平均误差在5%以内,可为海洋水下激光通信和激光海洋传输等应用提供有效参考。

关键词 海洋湍流; 光束扩展; 光传输; 定标规律

中图分类号 TN012 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS231233

1 引言

水下活动和科学研究日趋频繁,因此,人们对高速度、高质量和高带宽的水下通信服务的需求日益迫切。水下无线光通信具有可用带宽大、保密性好、功耗低、比特率高和体积小等优点^[1],日益受到关注,成为当今通信领域最活跃、最先进的研究领域之一^[2-4]。然而,在海洋水下进行激光通信时会受到海水的散射、吸收以及湍流效应的影响,致使到靶光束质量退化,引起通信误码率增大^[5]。迄今为止,国内外对激光在海洋湍流中的传输特性的研究已取得了一系列成果^[6-11]。2000年, Nikishov等^[12]提出了一种综合考虑海水盐度和温度、适用于各向同性海水的海洋湍流谱。2006年,中国科学院上海光学精密机械研究所的研究人员^[13]首先分析了部分相干光束在海洋湍流中的光束扩展效应; Lu等^[14]、牛超君等^[15]、张凯宁等^[16]随后开展了对激光在海洋湍流中的传输特性的研究。此外,考虑到海水对蓝绿激光的吸收、散射相对最弱,深入研究海洋水下蓝绿激光传输光束质量退化特性具有重要的应用价值^[17]。

值得指出的是,激光在海洋湍流中的传输计算过程较为繁琐和复杂,通常所花费时间较长。因此,建立蓝绿激光海洋湍流传输的光束扩展定标关系式,从而快速

预测和评估光束扩展的影响及规律具有重要意义。目前,激光传输规律的定标规律研究多见于大气工程应用领域^[18],在海洋工程应用中该研究鲜有文献报道。针对这一问题,本文首先基于海洋湍流功率谱对蓝绿激光在海洋湍流中的传输特性进行大量数值计算,定量分析多种典型条件下蓝绿激光在海洋湍流中的传输特性;然后以此为基础,提出蓝绿激光海洋湍流传输的光束扩展定标关系式,并对其适用条件进行讨论。

2 理论模型

首先,建立激光在海洋湍流中的光传输物理模型,进而采用均方和处理方法,提出了蓝绿激光海洋湍流传输的光束扩展定标公式。

2.1 海洋湍流多层相位屏法

多层相位屏方法是用于模拟激光在海洋湍流中传输的典型数值方法^[16,19-20]。当光束传输时,与光束传输方向垂直的横截面上的海水相位频谱^[21]表示为

$$F_{\Phi}(k_x, k_y) = 2\pi v^2 \Delta z \Phi(k_x, k_y), \quad (1)$$

式中: $v = 2\pi/\lambda$ 是光束波数, λ 是光束波长; k_x 和 k_y 分别是 x 、 y 方向上的空间频率; Δz 是光束在海洋湍流中传播的距离; $\Phi(k_x, k_y)$ 是海洋湍流功率谱。

由 Nikishov 提出的海洋湍流功率谱^[7]表示为

$$\Phi(k_x, k_y) = 0.388 \times 10^{-8} \epsilon^{-1/3} \left(\sqrt{k_x^2 + k_y^2} \right)^{-11/3} \left[1 + 2.35 \left(\sqrt{k_x^2 + k_y^2} \eta \right)^{2/3} \right] \frac{\chi_T}{\omega^2} \left(\omega^2 e^{-A_T \delta} + e^{-A_S \delta} - 2\omega e^{-A_{TS} \delta} \right), \quad (2)$$

收稿日期: 2023-07-06; 修回日期: 2023-08-24; 录用日期: 2023-10-13; 网络首发日期: 2023-10-23

基金项目: 国家重大专项应用基础项目(JG2020376)、国家重点研发计划(2021YFC2202203)、中国科学院自适应光学重点实验室基金(LAOF1801)

通信作者: *zhangbinff@sohu.com

$$\delta = 8.284 \left(\sqrt{k_x^2 + k_y^2} \eta \right)^{4/3} + 12.978 \left(\sqrt{k_x^2 + k_y^2} \eta \right)^2, \quad (3)$$

式中： ε 是海洋湍流动能耗散率，其取值范围为 $(10^{-10}, 10^{-1}) \text{ m}^2/\text{s}^3$ ； η 是Kolmogorov内尺度； χ_T 是均方温度耗散率，其取值范围为 $(10^{-10}, 10^{-4}) \text{ K}^2/\text{s}$ ； ω 是温度导致海洋湍流与盐度导致海洋湍流的比值^[9,22]，可表示为 $\omega = \alpha dT/\beta dS$ ，其中， T 表示温度， S 表示盐度， α 和 β 分别是温度和盐度的系数扩展。当温度梯度和盐度梯度为常数时， $\omega = \alpha \Delta T/\beta \Delta S$ ，其中， ΔT 和 ΔS 分别是所研究海域上下边界的温度差与盐度差。一般而言，随着海水深度的增加，其盐度会增大而温度会下降，故 $dT/dz < 0$ 、 $dS/dz > 0$ ，其比值 $\omega < 0$ 。通常，比值 ω 越大表明 dS/dz 越大，即盐度所导致的海洋湍流更大， ω 的取值范围为 $(-5, 0)$ 。由此可见， ω 值越大表示盐度所导致的海洋湍流比例越大，海洋湍流也越强，反之亦然。其他参数由大量实验测得^[12]： $A_T = 1.863 \times 10^{-2}$ 、 $A_S = 1.9 \times 10^{-4}$ 、 $A_{TS} = 9.41 \times 10^{-3}$ 。

在此基础上，利用海水相位频谱对一个高斯随机复矩阵 $\mathbf{h}(k_x, k_y)$ 进行滤波，再进行傅里叶变换，可得到等效的随机相位屏，表示为

$$\varphi(x, y) = C \sum_{k_x} \sum_{k_y} \mathbf{h}(k_x, k_y) \sqrt{F_\Phi(k_x, k_y)} \exp[i(k_x x, k_y y)], \quad (4)$$

式中： $x = m\Delta x$ 、 $y = n\Delta y$ ，其中， Δx 、 Δy 是离散化空间域内的抽样间隔， m 和 n 均为整数； $C = (\Delta k_x \Delta k_y)^{1/2}$ 是控制相位屏方差的常数，其中， Δk_x 、 Δk_y 是波数域内的抽样间隔， $k_x = m'\Delta k_x$ 、 $k_y = n'\Delta k_y$ ， m' 和 n' 均为整数。

2.2 海洋湍流传输的光束扩展定标表达式

β 因子可反映实际光束在靶面的能量集中度，激光在经过海洋湍流传输后的光束扩展情况可用 β 因子表示^[23]。接下来，首先利用多层相位屏法模拟激光海洋湍流传输后得到的靶面光场分布，然后再分析其靶面光场的光束扩展情况，最后利用 β 因子对其进行表征。借鉴激光大气工程研究中常采用的均方和处理方法^[24-25]，不妨设激光海洋湍流传输的总光束扩展为

$$\beta^2 = \beta_0^2 + \beta_T^2, \quad (5)$$

式中： β_0 是初始光束质量因子； β_T 是衍射、海洋湍流引起的光束扩展。

在激光大气传输的定标规律研究中，常采用 $(D/r_0)^2$ 作为定标因子(D 是发射系统直径， r_0 是大气相干长度)，这是因为 D/r_0 可定性表示大气湍流强度^[25-27]。类似地，在激光海洋湍流传输中，用 $q = L/v\rho^2$ 表示海洋湍流强弱^[28]，其中， L 是光束传播距离， ρ 是平面波的空间相干长度^[9,29]，表示为

$$\rho = \left[3.603 \times 10^{-7} v^2 L \varepsilon^{-1/3} \frac{\chi_T}{2\omega^2} (1.116\omega^2 - 2.235\omega + 1.119) \right]^{-3/5}. \quad (6)$$

通常， $q < 1$ 且 $q\Delta < 1$ 表示弱湍流， $q \gg 1$ 或者 $q\Delta \gg 1$ 表示强湍流。其中， Δ 是靶面处的光束参数^[22]，表示为

$$\Delta = \frac{\Lambda_0}{\Theta_0^2 + \Lambda_0^2}, \quad (7)$$

式中， Θ_0 和 Λ_0 是发射平面处的光束扩展和衍射参量，表示为

$$\begin{cases} \Theta_0 = 1 - \frac{L}{F_0} \\ \Lambda_0 = \frac{2L}{v\omega_0^2} \end{cases}, \quad (8)$$

式中： ω_0 是高斯光束束腰半径； F_0 是波前曲率半径。当激光束为聚焦传输时， $\Theta_0 = 0$ 。

当激光束为聚焦传输时，将 $\Theta_0 = 0$ 代入式(7)可得 $\Delta = 1/\Lambda_0$ ，进一步结合式(8)可得 $\Delta = 1/\Lambda_0 = \frac{v\omega_0^2}{2L}$ 。

根据 $q = \frac{L}{v\rho^2}$ 和式(7)可得 $q\Delta = \frac{\omega_0^2}{2\rho^2}$ ，将其用作定标因子。参考大气传输定标规律研究中描述湍流引起的光束扩展的形式^[18,26]，进一步考虑海洋湍流功率谱的复杂性，采用多项、多系数进行拟合的效果更佳，于是，提出了激光海洋湍流传输光束扩展的定标表达式，表示为

$$\beta_T = \left(\frac{\omega_0^2}{2\rho^2} \right)^a + b \left(\frac{\omega_0^2}{2\rho^2} \right)^c, \quad (9)$$

式中， a 、 b 、 c 是衍射、海洋湍流引起的光束质量变化的定标表达式的拟合系数。式(9)的第一项 $\left(\frac{\omega_0^2}{2\rho^2} \right)^a$ 是衍射、海洋湍流引起的光束质量变化的主要表征项，而第二项 $b \left(\frac{\omega_0^2}{2\rho^2} \right)^c$ 是衍射、海洋湍流引起的光束质量变化的扰动修正项，用于修正海洋湍流扰动引起的微小扰动误差，以提高激光海洋湍流传输光束扩展定标表达式预估结果的准确性。

至此，含初始光束质量因子，衍射、海洋湍流等的高斯光束海洋湍流传输的总光束质量因子的定标表达式可以表示为

$$\beta = \left\{ \beta_0^2 + \left[\left(\frac{\omega_0^2}{2\rho^2} \right)^a + b \left(\frac{\omega_0^2}{2\rho^2} \right)^c \right]^2 \right\}^{0.5}. \quad (10)$$

3 激光海洋湍流传输光束扩展规律及定标

在数值模拟仿真中，选取不同参数下的海洋激光湍流传输规律进行定量分析。计算时，高斯光束束腰半径 ω_0 的取值范围为 $0.001 \sim 0.100 \text{ m}$ ，初始光束质量因子 β_0 的取值范围为 $1.0 \sim 4.0$ ，激光光源采用蓝绿激光^[30]，其波长范围为 $450 \sim 550 \text{ nm}$ 。考虑到海水的高

衰减特性,激光在海水中的有效传输距离受限^[31],因此,传输距离 L 的取值范围为 $0\sim 100$ m, 动能耗散率 ϵ 的取值范围为 $10^{-10}\sim 10^{-1}$ m^2/s^3 , 温差耗散率 χ_T 的取值范围为 $10^{-10}\sim 10^{-4}$ K^2/s 。温度导致海洋湍流与盐度导致海洋湍流的比值 ω 的取值范围为 $-5\sim 0$, Kolmogorov 尺度 $\eta=0.001$ 。

在考虑单一因素对光束扩展的影响时,固定初始光束质量因子 β_0 为 2、光束束腰半径 w_0 为 0.01 m, 光束激光波长 λ 为 470 nm。在研究光束束腰半径、初始光束质量因子、激光光束波长对激光海洋湍流传输的影响时,通过改变不同海洋湍流参数 ϵ 、 χ_T 、 ω 以及传输距离 L 来改变 $w_0^2/(2\rho^2)$ 。在研究海洋湍流参数的影响时,分别控制其他两个参数值不变,通过改变其中一个

海洋参数和传输距离 L 来改变 $w_0^2/(2\rho^2)$ 。然后,利用最小二乘法得到了不同参数下激光海洋湍流传输光束定标关系式的拟合系数 a 、 b 和 c 。

值得指出的是,计算时的相位屏网格数、相位屏间距以及相位屏个数的取值都符合相位屏参数选取的要求^[32]。此外,所有数值计算结果均为经过 300 次激光海洋湍流传输后,在焦面处长曝光的平均结果。

3.1 激光参数的影响及其定标

图 1 展示了不同光束束腰半径下,激光海洋湍流传输中衍射、海洋湍流引起的光束扩展 β_T 和总光束扩展 β 随 $w_0^2/(2\rho^2)$ 的变化规律。其中,曲线为拟合得到的定标表达式的预估结果。

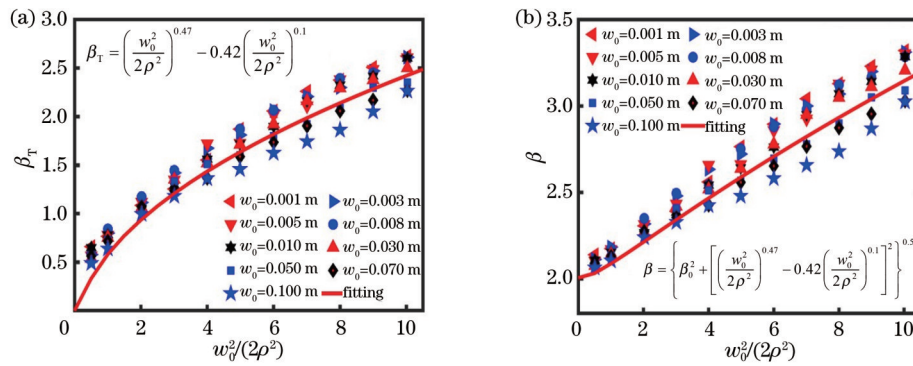


图 1 不同束腰半径下 β_T 和 β 随 $w_0^2/(2\rho^2)$ 的变化情况。(a) β_T ; (b) β

Fig. 1 Variations of β_T and β with $w_0^2/(2\rho^2)$ under different waist radii. (a) β_T ; (b) β

由图 1(a)可知,衍射、海洋湍流引起的光束扩展 β_T 随着束腰半径 w_0 的增大而减小,且拟合得到的定标表达式的预估结果与数值计算结果吻合较好,计算的最大误差在 9% 以内。分析其原因在于:随着 w_0 的增大,为确保定标因子 $w_0^2/(2\rho^2)$ 不变,则要改变海洋湍流参数使空间相干长度 ρ 增大,故海洋湍流强度相对减弱,引起的光束扩展也相对较小。进一步分析图 1(b)可知,定标表达式预估得到的总光束扩展 β 与数值计算结果误差缩小到 7% 以内。这是因为在式(10)中,

总光束扩展由初始光束质量和光束扩展 β_T 的平方和共同决定,因而总误差有所减小。

图 2 展示了不同初始光束质量下,激光海洋湍流传输中衍射、海洋湍流引起的光束扩展 β_T 和总光束扩展 β 随 $w_0^2/(2\rho^2)$ 的变化规律。其中,曲线为拟合得到的定标表达式的预估结果。

分析图 2(a)可知:衍射、海洋湍流引起的光束扩展 β_T 随着初始光束质量因子 β_0 的增大而变大;当 β_0 较小时,衍射、海洋湍流引起的光束扩展比较小;然而,当

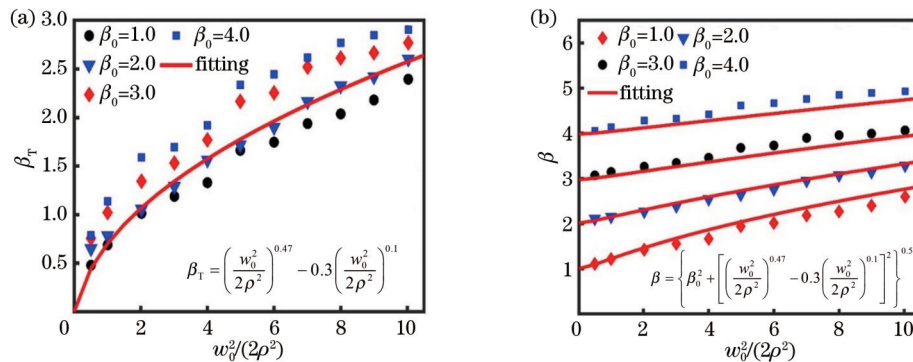


图 2 不同初始光束质量下 β_T 和 β 随 $w_0^2/(2\rho^2)$ 的变化情况。(a) β_T ; (b) β

Fig. 2 Variations of β_T and β with $w_0^2/(2\rho^2)$ under different initial beam qualities. (a) β_T ; (b) β

β_0 较大时,定标表达式的预估结果与数值计算结果相对偏差较大。需要指出的是,根据总光束扩展的均方和公式,当 $\beta_0 > 3$ 时,对光束扩展起主要影响的是初始光束质量 β_0 。由图2(b)可知,定标表达式预估得到的

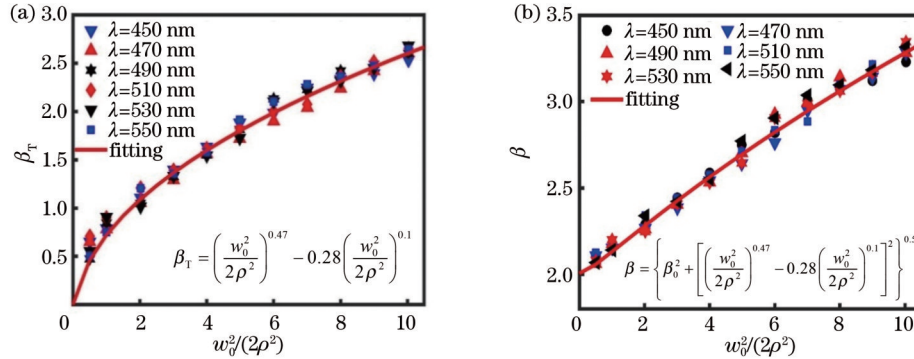


图3 不同激光光束波长下 β_T 和 β 随 $w_0^2/(2\rho^2)$ 的变化情况。(a) β_T ;(b) β

Fig. 3 Variations of β_T and β with $w_0^2/(2\rho^2)$ under different laser beam wavelengths. (a) β_T ; (b) β

从图3(a)可以看出,衍射、海洋湍流引起的光束扩展 β_T 随着激光光束波长 λ 的增大而略有增大,且定标表达式预估结果 β_T 和数值计算结果吻合较好,计算的最大误差在5%以内。进一步分析图3(b)可知,定标表达式预估得到的总光束扩展 β 与数值计算结果吻合较好,误差减小到3%以内。

3.2 海洋湍流参数的影响及其定标

图4展示了不同海洋湍流参数下,激光海洋湍流传输中衍射、海洋湍流引起的光束扩展 β_T 和总光束扩展 β 随 $w_0^2/(2\rho^2)$ 的变化规律。其中,曲线为拟合得到的定标表达式的预估结果。

从图4(a)可以看出,衍射、海洋湍流引起的光束扩展 β_T 随着动能耗散率 ϵ 的减小而增大。这是由于 ϵ 越小,湍流越强,引起的光束扩展 β_T 也越大。然而, β_T 整体相差不大,预估结果与数值计算结果的最大误差在15%以内。分析图4(b)可知,总光束扩展 β 的预估结果与数值计算结果的误差进一步减小到5%以内。根据图4(c)可得,衍射、海洋湍流引起的光束扩展 β_T 随着温差耗散率 χ_T 的增大而增大。这是因为 χ_T 越大,湍流越强,引起的光束扩展 β_T 也越大。预估结果与数值计算结果的最大误差在6%以内。由图4(d)可知,定标表达式预估得到的总光束扩展 β 与数值计算结果吻合较好,误差减小到4%以内。由图4(e)可知,衍射、海洋湍流引起的光束扩展 β_T 随着温度导致海洋湍流与盐度导致海洋湍流的比值 ω 的增大而增大。这是由于 ω 值越大,由盐度导致的海洋湍流比例越大,湍流也越强,引起的光束扩展 β_T 也越大。值得注意的是:当 $\omega = -0.05$ 时,湍流较强,引起的光束扩展 β_T 较大,预估结果与数值计算结果的相对误差达到15%;当 ω 进一步增大到 -0.01 时,湍流已经非常强,引起的光束扩展 β_T 进一步增大,预估结果与数值计算结果的相

总光束扩展 β 与数值计算结果吻合较好。

图3展示了不同激光光束波长下,激光海洋湍流传输中衍射、海洋湍流引起的光束扩展 β_T 和总光束扩展 β 随 $w_0^2/(2\rho^2)$ 的变化规律。

对误差达到25%以上。为保证定标表达式预估结果的准确性,限定 ω 的取值范围为 $-5.0 \sim -0.5$ 。由图4(f)可知,此时的总光束扩展 β 的预估结果与数值计算结果的误差进一步减小到6%以内。

4 光束扩展定标系数确定及定标误差分析

在讨论不同激光参数和海洋湍流参数下的光束扩展规律时发现,定标关系式中 a 、 b 、 c 的均值分别为0.47、 -0.29 、0.1。由于 c 的变化范围相对较小,故将 c 固定为0.1,再进一步利用最小二乘法拟合得到 a 、 b 。最终确定 $a=0.45$ 、 $b=-0.19$ 、 $c=0.1$ 。于是,含有初始光束质量因子,衍射、海洋湍流等的高斯光束海洋湍流传输的光束扩展定标关系式为

$$\beta = \left\{ \beta_0^2 + \left[\left(\frac{w_0^2}{2\rho^2} \right)^{0.45} - 0.19 \left(\frac{w_0^2}{2\rho^2} \right)^{0.1} \right]^2 \right\}^{0.5} \quad (11)$$

为进一步分析该光束扩展定标关系式的适用范围及误差,给出了不同参数下,激光海洋湍流传输中衍射、海洋湍流引起的光束扩展 β_T 和总光束扩展 β 随 $w_0^2/(2\rho^2)$ 的变化规律,如图5所示。其中,曲线为拟合得到的定标表达式的预估结果。

根据图5可进一步得到各关键参数的取值范围及相对误差,如表1所示,其中, V_{Range} 表示参数取值范围, V_{Max} 、 V_{Ave} 表示定标关系式预估的光束扩展与数值计算结果之间的最大误差和平均误差。值得注意的是,为获得定标关系式,首先开展了蓝绿激光光束扩展受激光参数(束腰半径、初始光束质量因子、波长等)和海洋湍流参数(动能耗散率、温差耗散率、温度导致海洋湍流与盐度导致海洋湍流的比值等)的影响及变化规律

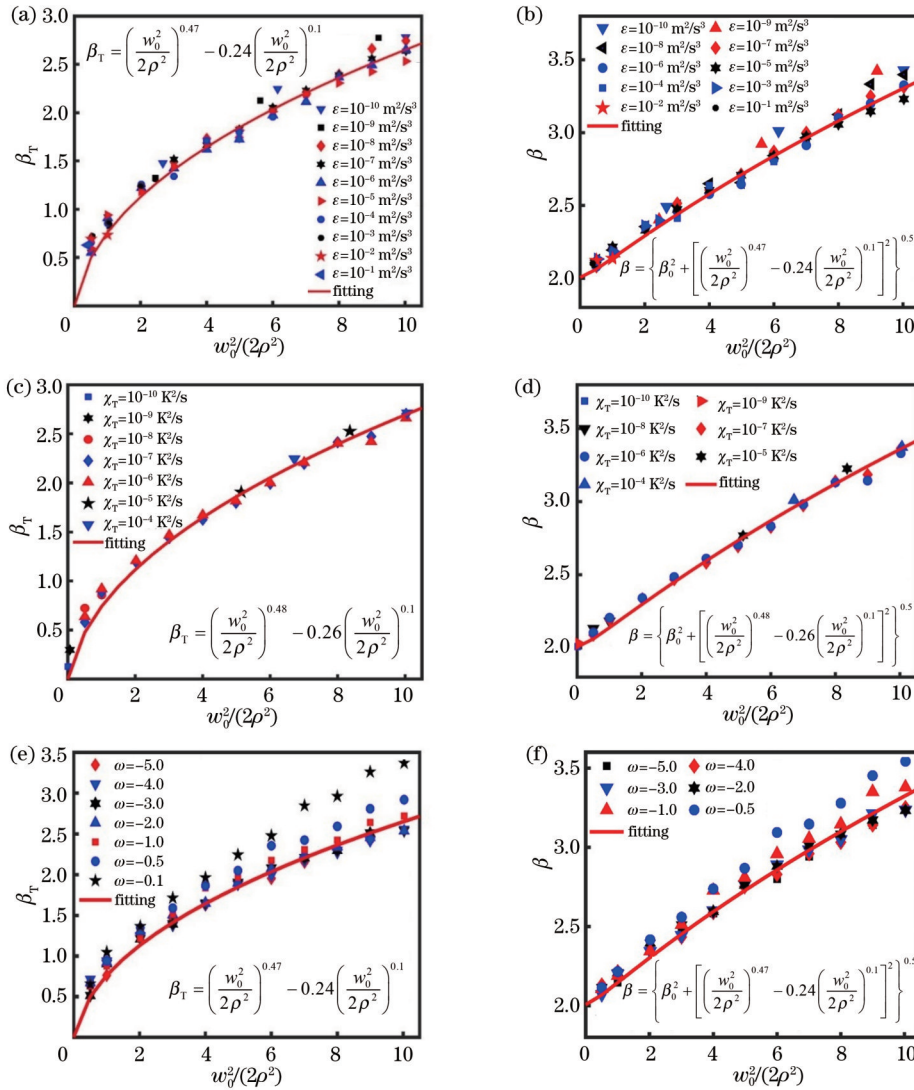


图 4 不同海洋湍流参数(ϵ, χ_T, ω)下 β_T 和 β 随 $w_0^2/(2\rho^2)$ 的变化情况。(a)(b) 不同 ϵ 下 β_T 和 β 的变化情况；(c)(d) 不同 χ_T 下 β_T 和 β 的变化情况；(e)(f) 不同 ω 下 β_T 和 β 的变化情况

Fig. 4 Variations of β_T and β with $w_0^2/(2\rho^2)$ under different ocean turbulence parameters (ϵ, χ_T, ω). (a)(b) Variations of β_T and β for different ϵ ; (c)(d) variations of β_T and β for different χ_T ; (e)(f) variations of β_T and β for different ω

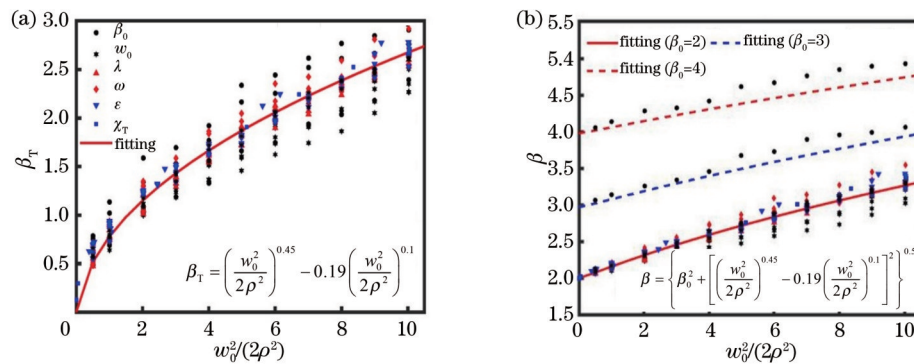


图 5 不同参数下 β_T 和 β 随 $w_0^2/(2\rho^2)$ 的变化情况。(a) β_T ; (b) β

Fig. 5 Variations of β_T and β with $w_0^2/(2\rho^2)$ under different parameters. (a) β_T ; (b) β

研究,通过大量数值计算并取计算结果的平均值获得了其光束扩展规律。在此基础上,运用最小二乘法拟

合得到了定标关系式中的各拟合参数。因此,定标关系式预估的光束扩展与数值计算结果之间的误差是由

数值计算结果的统计误差和最小二乘法的拟合误差共同造成的。由表 1 可知,对于总光束扩展 β ,定标关系式预估的光束扩展与数值计算结果之间的最大误差为

10.90%、最大平均误差为 4.70%,证明定标关系式能较为准确地预估高斯光束海洋湍流传输的光束扩展规律。

表 1 建议的参数取值范围及误差
Table 1 Suggested value range of parameters and errors

Parameter	ω_0	β_0	λ	ϵ	χ_T	ω
V_{Range}	0.001-0.100 m	>1	470-550 nm	10^{-10} - 10^{-1} m ² /s ³	10^{-10} - 10^{-4} K ² /s	-5.0-0.5
$V_{\text{Max}}/\%$	10.90	6.60	3.20	7.40	4.00	9.00
$V_{\text{Ave}}/\%$	4.70	3.30	1.40	1.60	1.30	2.20

5 结 论

为了快速和准确地预估高斯光束海洋湍流传输的光束扩展规律,首先详细分析了光束扩展随海水参量和激光参数的变化及规律,进而建立了蓝绿波段内的激光波长在海洋湍流中传输的光束扩展定标关系式。在此基础上,利用最小二乘法确定了定标关系式中的各个系数,进而分析了不同参数下定标关系式预估的光束扩展与数值计算结果之间的误差。结果表明,在传输距离 100 m 以内、激光波长范围为 470~550 nm、光束束腰半径范围为 0.001~0.100 m、温度导致海洋湍流与盐度导致海洋湍流的比值 ω 的范围为-5.0~-0.5 等条件下,所建立定标关系式预估的光束扩展规律和数值计算结果的平均误差在 5% 以内。

参 考 文 献

- [1] 孙雨. 激光水下传输和信道特性对通信性能影响研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
Sun Y. Study on the influence of laser underwater transmission and channel characteristics on communication performance[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
- [2] 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.
- [3] Noh Y, Lee U, Lee S, et al. HydroCast: pressure routing for underwater sensor networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(1): 333-347.
- [4] 程明建. 典型湍流环境中空间结构光场传输特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
Cheng M J. Study on transmission characteristics of spatial structure light field in typical turbulent environment[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [5] 傅玉青, 段琦, 周林. Gamma Gamma 强海洋湍流和瞄准误差下水下无线光通信系统的性能研究[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(2): 0203013.
Fu Y Q, Duan Q, Zhou L. Performance of underwater wireless optical communication system in Gamma Gamma strong oceanic turbulence with pointing error[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(2): 0203013.
- [6] Hammel S, Kichura D. Turbulence effects on laser propagation in a marine environment[J]. Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2008, 7090: 70900K.
- [7] Wu Y Q, Zhang Y X, Li Y, et al. Beam wander of Gaussian-Schell model beams propagating through oceanic turbulence[J].

- Optics Communications, 2016, 371: 59-66.
- [8] Chen M Y, Zhang Y X. Effects of anisotropic oceanic turbulence on the propagation of the OAM mode of a partially coherent modified Bessel correlated vortex beam[J]. Waves in Random and Complex Media, 2019, 29(4): 694-705.
- [9] Baykal Y. Expressing oceanic turbulence parameters by atmospheric turbulence structure constant[J]. Applied Optics, 2016, 55(6): 1228-1331.
- [10] 王明军, 屠思凯. 基于反向传播神经网络盲均衡算法的水下涡旋光复用系统性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(17): 1701001.
Wang M J, Tu S K. Performance research of underwater vortex optical multiplexing system based on back propagation neural network blind equalization algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(17): 1701001.
- [11] 吴鹏飞, 张咪, 王姣, 等. 海洋湍流下涡旋光束经粗糙面的回波特性[J]. 光学学报, 2023, 43(12): 1201007.
Wu P F, Zhang M, Wang J, et al. Echo characteristics of vortex beam passing through rough surface under oceanic turbulence[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(12): 1201007.
- [12] Nikishov V V, Nikishov V I. Spectrum of turbulent fluctuations of the sea-water refraction index[J]. International Journal of Fluid Mechanics Research, 2000, 27(1): 82-98.
- [13] Lu W, Liu L R, Sun J F. Influence of temperature and salinity fluctuations on propagation behaviour of partially coherent beams in oceanic turbulence[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2006, 8(12): 1052-1058.
- [14] Lu L, Ji X L, Li X Q, et al. Influence of oceanic turbulence on propagation characteristics of Gaussian array beams[J]. Optik, 2014, 125(24): 7154-7161.
- [15] 牛超君, 卢芳, 韩香娥. 相位屏法模拟高斯阵列光束海洋湍流传输特性[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0601004.
Niu C J, Lu F, Han X E. Propagation properties of Gaussian array beams transmitted in oceanic turbulence simulated by phase screen method[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0601004.
- [16] 张凯宁, 刘永欣, 蒲继雄. 涡旋光束在海洋湍流中传输的闪烁因子[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0705001.
Zhang K N, Liu Y X, Pu J X. Scintillation index of vortex beams propagating in oceanic turbulence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0705001.
- [17] 商艳婷. 蓝绿光水下传输特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
Shang Y T. Study on underwater transmission characteristics of blue-green light[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [18] 黄印博, 王英俭. 聚焦光束大气传输光束扩展定标规律的数值分析[J]. 物理学报, 2006, 55(12): 6715-6719.
Huang Y B, Wang Y J. Numerical analysis of the scaling laws about focused beam spreading induced by the atmosphere[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(12): 6715-6719.
- [19] 张冬晓, 陈志斌, 肖程, 等. 基于引力搜索算法的湍流相位屏生成方法[J]. 物理学报, 2019, 68(13): 134205.

- Zhang D X, Chen Z B, Xiao C, et al. Generation of turbulence phase screen based on gravitational search algorithm[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(13): 134205.
- [20] 尹涵, 宋英雄, 李迎春, 等. 基于 MIMO 模式分集相干接收的自由空间光通信大气湍流补偿技术研究[J]. 中国激光, 2022, 49(23): 2306002.
- Yin H, Song Y X, Li Y C, et al. Free-space optical communication atmospheric turbulence compensation based on multiple input multiple output mode diversity coherent reception[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(23): 2306002.
- [21] 杨天星, 赵生妹. 海洋湍流随机相位屏模型[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1201001.
- Yang T X, Zhao S M. Random phase screen model of ocean turbulence[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1201001.
- [22] 牛超君. 阵列光束在湍流中的传输及合成光束自适应优化整形[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- Niu C J. Propagation of array beams in turbulence and adaptive optimal shaping of composite beams[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [23] 高卫, 乔广林, 王云萍. 激光光束质量的评价参数及其特性分析[J]. 飞行器测控学报, 2002, 21(2): 17-21.
- Gao W, Qiao G L, Wang Y P. Evaluation parameters and characteristics analysis of laser beam quality[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2002, 21(2): 17-21.
- [24] Breaux H, Evers W, Sepucha R, et al. Algebraic model for cw thermal-blooming effects[J]. Applied Optics, 1979, 18(15): 2638-2644.
- [25] 乔春红, 范承玉, 黄印博, 等. 高能激光大气传输的定标规律[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 433-437.
- Qiao C H, Fan C Y, Huang Y B, et al. Scaling laws of high energy laser propagation through atmosphere[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(2): 433-437.
- [26] 孙兴旺, 张庆, 钟哲强, 等. 高能激光大气传输光束扩展的定标规律研究[J]. 光学学报, 2022, 42(24): 2401008.
- Sun X W, Zhang Q, Zhong Z Q, et al. Scaling law for beam spreading during high-energy laser propagation in atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(24): 2401008.
- [27] 王英俭, 黄印博. 聚焦平台光束大气传输光束扩展的定标参数分析[J]. 量子电子学报, 2006, 23(3): 274-281.
- Wang Y J, Huang Y B. Analysis of the scaling laws about focused uniform beam spreading induced by real atmosphere[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2006, 23(3): 274-281.
- [28] Farwell N, Korotkova O. Intensity and coherence properties of light in oceanic turbulence[J]. Optics Communications, 2012, 285(6): 872-875.
- [29] Lu L, Ji X L, Baykal Y. Wave structure function and spatial coherence radius of plane and spherical waves propagating through oceanic turbulence[J]. Optics Express, 2014, 22(22): 27112-27122.
- [30] Smith R C, Baker K S. Optical properties of the clearest natural waters (200-800 nm)[J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 177-184.
- [31] 丁春全. 水下无线光通信关键技术研究[J]. 光学与光电技术, 2017, 15(6): 14-18.
- Ding C Q. Research on solutions of underwater optical wireless communication[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2017, 15(6): 14-18.
- [32] 牛超君, 王晓斌, 卢芳, 等. 相位屏法仿真海洋湍流激光传输特性有效性[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(7): 20190452.
- Niu C J, Wang X B, Lu F, et al. Validity of beam propagation characteristics through oceanic turbulence simulated by phase screen method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(7): 20190452.

Scaling Laws of Beam Spreading in Laser Ocean Turbulence

Zhang Qing, Sun Xingwang, Zhong Zheqiang, Zhang Bin*

College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China

Abstract

Objective As underwater military activities and scientific research are increasingly frequent, the demand for high-speed, high-quality, and high-bandwidth underwater communication has become urgent. However, laser communication effectiveness in seawater is hampered by the scattering, absorption, and turbulence effects, which causes degraded beam quality and increased communication error rates. Consequently, it is of application significance to study the beam quality degradation characteristics of blue-green lasers in seawater. However, laser propagation calculation in seawater turbulence is quite complex and time-consuming. Therefore, it is of significance to establish a beam expansion calibration formula, especially for blue-green laser propagation in seawater turbulence. This scaling law will enable the rapid prediction and evaluation of beam expansion influence and patterns.

Methods First, we build a rigorous physical model to comprehend the propagation of blue-green lasers in seawater turbulence. By adopting the power spectrum inversion method, phase screens of seawater turbulence are generated to enable the numerical calculation of beam expansion variation, with both seawater parameters and laser parameters considered. Second, the β factor is employed to evaluate the energy concentration of laser beams on the target plane and thus revealing the beam expansion of lasers by seawater turbulence. Finally, a beam expansion calibration formula for blue-green lasers propagating in seawater turbulence is proposed via the processing method of the mean square sum.

Results and Discussions The estimation results of the scaling law obtained by fitting are compared with those of numerical calculation. The results show that the scaling law matches well with the numerical calculation under certain laser and seawater turbulence parameters. This is under the scenario that the laser parameters fall within the ranges of 0.001-

0.100 m for the beam waist radius, 1.0–4.0 for the initial beam quality factor, 470–550 nm for the wavelength, and -5.0 – -0.5 for the value range of temperature-induced seawater turbulence to salinity-induced seawater turbulence. Additionally, the seawater turbulence parameters are kinetic energy dissipation rate of 10^{-10} – 10^{-1} m^2/s^3 , and 10^{-10} – 10^{-4} K^2/s for the dissipation rate of temperature difference. After imposing this limitation, for the total beam expansion, the maximum error between the beam expansion estimated by the scaling law and the numerical calculation results is 10.90%, with a maximum average error of 4.70%. Consequently, the scaling law can accurately predict the beam expansion laws of Gaussian beams propagating in seawater turbulence.

Conclusions To rapidly and accurately predict the beam expansion law of Gaussian beams propagating in seawater turbulence, we first analyze the variation of beam expansion with laser and seawater parameters. Subsequently, the scaling law for beam expansion of blue-green lasers in seawater turbulence is proposed. On this basis, the coefficients in the scaling law are determined by employing the least squares method. The scaling law is then utilized to estimate the errors between the beam expansion estimated by the scaling law and the numerical calculation results under different parameters. The results show that within the specified parameter range, the error between the estimated beam expansion law by the scaling law and the numerical calculation results is within 5%.

Key words ocean turbulence; beam spreading; optical propagation; scaling law