

部分相干厄米高斯光束在海洋湍流中光束传输质量的变化

陈斐楠 陈延如 赵琦* 陈晶晶 辛煜

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 利用近年来发展的描述海洋湍流的空间功率谱函数, 结合数值积分的方法计算并绘制了广义惠更斯菲涅耳积分中湍流项的大小随湍流参数变化的曲面图。继而通过魏格纳分布函数和光束二阶矩的定义模拟了部分相干厄米高斯(PCHG)光束的 M^2 因子在海洋湍流中的变化情况, 分析了光源参数的选择对于光束传输质量因子的影响。最后通过 M^2 因子矩阵, 计算了非旋转对称二维 PCHG 光束传输质量随旋转角 α 变化的轨迹图。发现随着传输距离的增大, 在接收面上, 光斑因 x, y 方向上模式的不同而造成轨迹图的形状的不同将逐渐消失, 趋近于相同的圆形轨迹。

关键词 海洋光学; 空间功率谱函数; 部分相干厄米-高斯光束; M^2 因子矩阵

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0413002

Change of Propagation Quality Factor of Partially Coherence Hermite-Gaussian Beams Traveling through Oceanic Turbulence

Chen Feinan Chen Yanru Zhao Qi Chen Jingjing Xin Yu

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract The spatial power spectrum function of oceanic turbulence is used to calculate the variations of turbulence perturbation item with turbulence parameters in extended Huygens-Fresnel integral by numerical methods. Then, the change of propagation quality factor of partially coherence Hermite-Gaussian (PCHG) beam traveling in oceanic turbulence is calculated by Wigner distribution function and the second moment definition of the beam. The affection of beam parameters on M^2 factor is also analyzed. At last, the matrix of M^2 factor is used to calculate the track of M^2 factor of nonsymmetrical two-dimensional PCHG beam. It is found that the track plots of two dimensional PCHG beams' spots on the receive plane are different from each other because of different models on x direction and y direction, but the difference decreases with the increase of propagation distance, and finally tends to same circular track.

Key words oceanic optics; spatial power spectrum function; partially coherence Hermite-Gaussian beam; M^2 factor matrix

OCIS codes 010.4450; 010.4455; 010.7060

1 引 言

由于激光通信以及光学成像设备在大气中的各种应用, 各类型的光束在大气湍流中的传输性质已经被广泛研究, 包括接受面上光强分布、光束宽度、相干偏振特性以及光斑的闪烁特性等^[1~4]。而近年来的发展趋势也从研究光束变化的理论分析向实用技

术应用方面过渡, 包括研究大气中图像的调制传递函数(MTF), 激光通信中的信噪比(RSN)以及误码率(BER)等^[5~7]。而海洋湍流作为另一种影响光束传播性质的随机介质亦有重要的研究意义, 但由于海洋湍流的复杂性, 所以至今对于光束在水下湍流的传输性质研究的广度和深度都远远小于大气光学

收稿日期: 2012-11-19; 收到修改稿日期: 2012-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(61077012, 61107011, 61205121)资助课题。

作者简介: 陈斐楠(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事大气光学、气动光学方面的研究。E-mail: feinanchen@yahoo.cn

导师简介: 陈延如(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学工程方面的研究。E-mail: yrchen2002@yahoo.com

* 通信联系人。E-mail: zhaoqi@njjust.edu.cn

传输。Hanson 等^[8]分析了水下湍流对激光传输的影响,并且给出了塑料水管中的光束光斑尺寸的变化情况。他指出洁净海水的光谱窗为蓝绿光,且由于海水的吸收以及散射,使得光学设备的可用范围大多数集中在 100 m 之内。文献[9]和[10]分别计算了海洋湍流对高斯光束的光强和相干度的影响以及电磁高斯谢尔光束(EGSM)的偏振态变化。文献[11]分析了海洋湍流中温度和盐度变化对高斯谢尔模型(GSM)光束发散情况的影响。文献[12]和[13]分别设计了用于测量海水表面温度的多波段红外辐射系统以及对水下气泡高速摄影的光学系统,文献[14]则用蒙特卡罗法分析了波动水面对激光水下目标探测的影响。这些研究使得人们逐渐将对光束在湍流中传输的研究兴趣扩展到海水介质。另一方面,部分相干厄米高斯光束(PCHG)是一种重要的高模光束,在实验室中可通过梯度相位镜以及光纤耦合的激光器来实现,是实现平顶光束、空心光束等光束的基础,因此它的传输性质受到很多关注。描述光束质量的参数有很多种^[15,16],其中由 Siegman^[17]提出的 M^2 因子是一个重要参数,它是用魏格纳分布函数(WDF)的二阶矩定义的,在自由空间中保持恒定,因此被广泛用于衡量光束传输质量的变化。文献[18~20]计算了大气湍流干扰下,相干和部分相干一维厄米高斯(HG)光束的 M^2 因子变化。李玮等^[21,22]利用旋转矩阵将 M^2 因子扩展到二维的非旋转对称 HG 光束的传输质量分析。本文利用广义惠更斯菲涅耳原理和 WDF 二阶矩的计算分析了一维 PCHG 光束在海洋湍流中传输质量的变化,并且模拟光源参数的选择对传输质量变化的影响,据此选择具有较好光学传输质量的光源参数和较弱的湍流参数,利用 M^2 因子矩阵,展示了几种典型模式的二维 PCHG 光束 M^2 因子的轨迹图随着传输距离增大的演化过程。

2 一维部分相干厄米高斯光束传输质量因子

PCHG 光束光源平面上的一维电场分布可以表示为

$$E_x(x,0) = H_m\left(\frac{\sqrt{2}x}{w_0}\right)\exp\left(-\frac{x^2}{w_0^2}\right), \quad (1)$$

式中 H_m 为厄米多项式, w_0 为光束的束宽。当 $m = 0$ 时, $H_0(x) = 1$, (1)式即变为高斯光束的分布形式。

如果将(1)式写为交叉谱密度函数的形式,

则有:

$$W_0(x_1, x_2, 0) = H_m\left(\frac{\sqrt{2}x_1}{w_0}\right)H_m\left(\frac{\sqrt{2}x_2}{w_0}\right) \times \exp\left(-\frac{x_1^2 + x_2^2}{w_0^2}\right)\exp\left(-\frac{x_1^2 - x_2^2}{\sigma^2}\right), \quad (2)$$

式中 x_1, x_2 为光源面上的任意两点, σ 代表相干长度。

在近轴近似下,根据广义惠更斯菲涅耳原理,一维光束通过湍流介质的交叉谱密度变化可以表示为

$$W(r, r_d, z) = \frac{k}{2\pi z} \iint W_0(x, x_d, 0) \times \exp\left[\frac{ik}{z}(r-x)(r_d-x_d) - H(r_d, x_d, z)\right] dx dx_d, \quad (3)$$

式中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数, $r = \frac{r_1 + r_2}{2}$, $r_d = r_1 - r_2$; r_1, r_2

是距离光源面 z 处接收面上的两点, $x = \frac{x_1 + x_2}{2}$, $x_d = x_1 - x_2$ 。光束经过湍流介质传输一段距离 z 后,其交叉谱密度的 WDF 可以表示为

$$h(r, \theta_r, z) = \frac{k}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} W(r, r_d, z) \exp(-ik\theta_r r_d) dr_d, \quad (4)$$

式中 $k\theta_r$ 为波矢量沿 x 轴的分量。基于 WDF 矩的定义, WDF 沿 x 方向上的二阶矩可以表示为

$$\langle x^s \theta_x^s \rangle = \frac{1}{P} \iint x^s \theta_x^s h(r, \theta, z) dr d\theta, \quad (5)$$

式中 $P = \iint h(r, \theta, z) dr d\theta$ 为光束总功率。光束 M^2 因子的表达式可用(5)式中的二阶矩定义为

$$M_x^2(z) = 2k(\langle x^2 \rangle \langle \theta_x^2 \rangle - \langle x\theta_x \rangle^2)^{1/2}. \quad (6)$$

根据文献[18~20]的推导,令(5)式中 $s_1 + s_2 = 2$, 则得到距离光源面为 z 的接收面上沿 x 方向上的空间二阶矩 $\langle x^2 \rangle$ 、空间频率域二阶矩 $\langle \theta_x^2 \rangle$ 以及混合矩 $\langle x\theta_x \rangle$ 分别为

$$\langle x^2 \rangle = m\left(\frac{2z^2}{w_0^2 k^2} + \frac{w_0^2}{2}\right) + c_k z^2 + \frac{w_0^2}{4} + \frac{2}{3} z^3 T, \quad (7)$$

$$\langle \theta_x^2 \rangle = m\frac{2}{w_0^2 k^2} + c_k + 2zT, \quad (8)$$

$$\langle \theta_x x \rangle = m\frac{2z}{w_0^2 k^2} + c_k z + z^2 T, \quad (9)$$

式中 $c_k = \left(\frac{1}{w_0^2} + \frac{1}{\sigma^2}\right) / k^2$, $T = \pi^2 \int_0^\infty \Phi_n(\kappa) \kappa^3 d\kappa$, $\Phi_n(\kappa)$

为功率谱函数, κ 为空间频率。综合(6)~(9)式,接受收面上沿 x 方向的一维 m 阶光束的 M^2 因子经过简化后的表达式为

$$M_x^2 = 2k \left[\left(\frac{m^2}{k^2} + \frac{m}{2k^2} + \frac{\omega_0^2 c_k}{4} + \frac{\omega_0^2 c_k m}{2} \right) + \left(m\omega_0^2 + \frac{\omega_0^2}{2} \right) Tz + \left(\frac{4m}{3\omega_0^2 k^2} + \frac{2c_k}{3} \right) z^3 T + \frac{z^4 T^2}{3} \right]^{1/2} \quad (10)$$

由(10)式可知, M^2 因子的大小与光源参数、湍流项以及传输距离有着密切的联系。 M^2 因子的值与距离和湍流项的函数关系显然是单调递增关系, 而与光源的宽度和相干度的关系则需要进一步的分析。

3 海洋湍流的功率谱函数

在洁净无杂质、无气泡、无悬浮粒子干扰的海洋湍流中, 对光学传输性质的干扰主要由温度变化和盐度变化两个因素引起。文献[9~11]给出了描述了海洋湍流的空间功率谱函数:

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

式中, ϵ 为湍流动能耗散率, 取值范围为 $10^{-4} \sim 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ 。 χ_T 为温度方差耗散率, 从海洋表面到深水层的取值范围为 $10^{-2} \sim 10^{-10} \text{ K}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。 $\eta =$

10^{-3} m 是柯尔莫哥诺夫尺度。 ω 是用来描述温度变化与盐度变化对功率谱变化贡献大小的相对比值, 其取值范围是 $-5 \sim 0$, -5 代表完全由温度变化引起的光学湍流, 0 代表完全由盐度变化引起的光学湍流。而两者的共同作用使得取值在区间内变化。其他参数为: $A_T = 1.863 \times 10^{-2}$, $A_S = 1.9 \times 10^{-4}$, $A_{TS} = 9.41 \times 10^{-3}$, $\delta = 8.284(\kappa\eta)^{4/3} + 12.978(\kappa\eta)^2$ 。

综合(10)式和(11)式可知, T 与功率谱函数中的 χ_T , ϵ 和 ω 有关, 而(11)式的复杂性使得描述 T 的解析形式难以求得, 通过数值积分求得的 T 值随湍流参数变化的曲面如图 1。

在图 1(a)中, 当 χ_T 趋近于 $10^{-2} \text{ K}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 湍流中的温度梯度增大, 当 ϵ 趋近于 $10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ 时, 湍流的最小流体结构(最小涡旋)的尺寸增大, 所对应的湍流的干扰也越强。相反, 当 χ_T 趋近于 $10^{-10} \text{ K}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, ϵ 趋近于 $10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ 时, 所对应的湍流越弱。在区间 $\chi_T: 10^{-2} \sim 10^{-4} \text{ K}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $\epsilon: 10^{-10} \sim 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ 内的湍流相对于其他区间来说要强很多。而图 1(b)说明了在较弱的湍流区间内盐度变化对湍流强弱的影响要大于温度变化的影响。

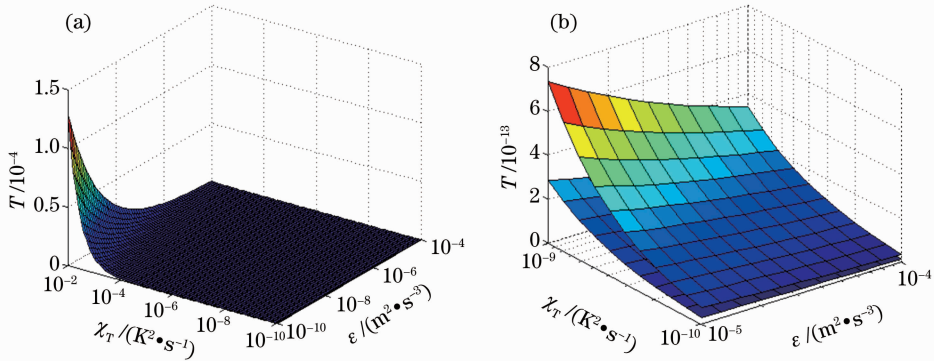


图 1 T 随不同海洋湍流参数 χ_T 和 ϵ 的变化关系。(a) $\omega = -3.5$; (b) $\omega = -1.5$ (上曲面) 和 $\omega = -3.5$ (下曲面)

Fig. 1 Variation of T with different parameters of oceanic turbulence χ_T and ϵ . (a) $\omega = -3.5$; (b) $\omega = -1.5$ (top surface) and $\omega = -3.5$ (below surface)

4 一维部分相干厄米高斯光束在海洋湍流中光束质量因子的变化

利用上面所求得湍流项, 综合(10)式, 可以推导出在海洋湍流中, 各阶部分相干厄米高斯光束的传输质量因子随距离以及湍流参数的变化。

根据上述对图 1 的分析, 分别取湍流干扰相对强、弱的两组参数值, 作为计算的已知量, 分别计算

出 0, 2, 4 阶部分相干厄米高斯光束在不同强度的海洋湍流中 M^2 因子随着距离的变化情况, 各阶光束已经将 $z=0$ 处 M^2 值归一化。在图 2 中, 光源宽度设置为 $\omega_0 = 1 \text{ mm}$, 光源相干长度为无穷大, 即为相干光, 波长 $\lambda = 415 \text{ nm}$ 。

图 2 为 0, 2, 4 阶 PCHG 光束在强弱两种干扰下 100 m 范围之内的归一化 M^2 因子的变化情况。图 2(a) 的光束质量衰减很严重, 100 m 处衰减增至

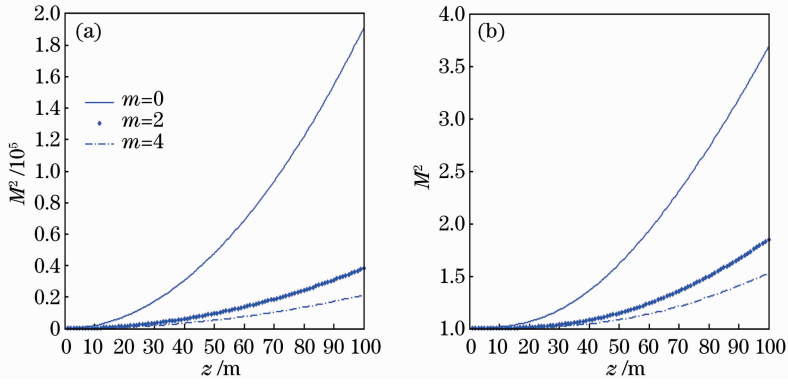


图 2 不同参数条件下光束传输质量因子随距离的变化。(a) $\chi_T = 10^{-4} \text{ K}^2 \cdot \text{s}^{-1}, \epsilon = 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}, \omega = -1.5$;

(b) $\chi_T = 10^{-8} \text{ K}^2 \cdot \text{s}^{-1}, \epsilon = 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}, \omega = -3.5$

Fig. 2 Variation of beam propagation factor with distance under different conditions. (a) $\chi_T = 10^{-4} \text{ K}^2 \cdot \text{s}^{-1},$

$\epsilon = 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}, \omega = -1.5$; (b) $\chi_T = 10^{-8} \text{ K}^2 \cdot \text{s}^{-1}, \epsilon = 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}, \omega = -3.5$

上万倍,而图 2(b)的光束质量衰减则很小。对于不同阶的光束来说,0 阶光束的传输质量的衰减最大,而 4 阶光束的光束质量很好。这个结论与 PCHG 光束在大气中的传输质量的变化规律相同。只是在海洋湍流中,光束质量的衰减速度随距离增加而迅速增大。以弱湍流条件为例,即选择参数为 $\chi_T = 10^{-8} \text{ K}^2 \cdot \text{s}^{-1}, \epsilon = 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}, \omega = -3.5$ 的湍流,研究不同光源宽度、不同相干长度的 4 阶一维 PCHG 光束在海洋湍流中传输了 100 m 后的光束质量的变化。

图 3(a)显示 M^2 随光源宽度的变化有极值点,即在 $w_0 = 2.8 \text{ mm}$ 时达到最小值,说明此束宽对应的光束有着最佳的传输质量。而对于相干长度来说,当 $\sigma > 5 \text{ mm}$ 时,相干长度对于传输质量的影响已经很小了,这从图 3(b)中近似于直线的分布可以看出。在仿真中假设光源满足的条件为 4 阶 PCHG 光束,光源条件为: $w_0 = 2.8 \text{ mm}, \sigma = 1 \text{ mm}$ 。利用 Matlab 软件,模拟出在传输距离 100 m 之内的 4 个不同距离处,光束传输质量在较弱的海洋湍流内随湍流参数变化的三维曲面图。

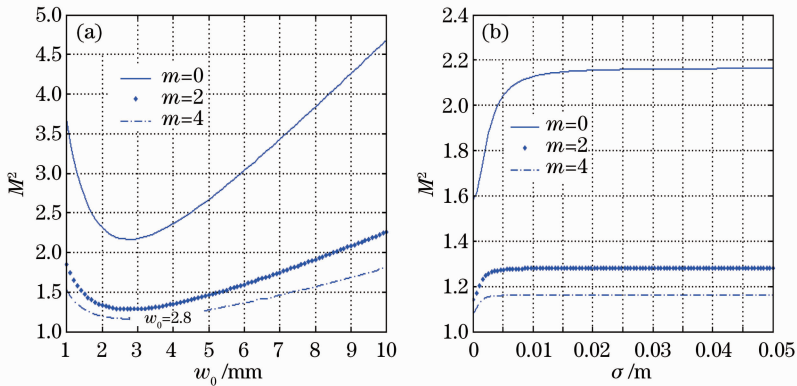


图 3 光源参数对于光束传输质量因子的影响。(a)光源束宽的影响;(b)光源相干长度的影响

Fig. 3 Effect of source parameters on the beam propagation factor. (a) Effect of source beam width;

(b) effect of source coherence length

图 4 的结果显示,光束在海洋湍流中,随传输距离的增大,光束质量的下降非常明显,在 25 m 处和 100 m 处,同一个湍流参数下的 M^2 因子增大了几十倍。根据第 2 节中对湍流模型的分析以及图 2 和图 4 的结果可知,在靠近海洋表面处,盐度变化大于温度变化,且有较小的动能耗散率的湍流对光束传

输质量的干扰相对较强;相反,在海水深处,盐度变化小于温度变化,且有较大动能耗散率的湍流对光束传输质量的干扰相对较弱。

5 M^2 因子矩阵的计算和轨迹图仿真

上述所计算的 M^2 因子只是 x 轴上的一维分

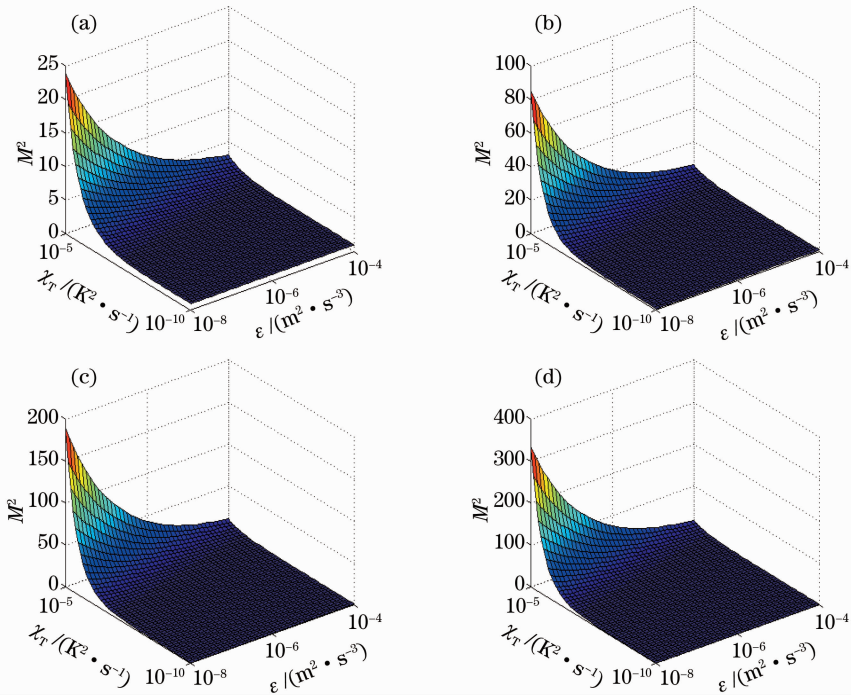


图 4 M^2 因子在不同距离上随海洋湍流参数的变化。(a) $z=25$ m; (b) $z=50$ m; (c) $z=75$ m; (d) $z=100$ m
 Fig. 4 Variation of M^2 factor with oceanic turbulence parameters at different distances. (a) $z=25$ m; (b) $z=50$ m; (c) $z=75$ m; (d) $z=100$ m

布,而实际应用中的光束为二维平面分布,对于 TEM_m 模 PCHG 光束来说,当 $m \neq n$ 时, x, y 维度上的模数不同,属于非旋转对称形光束,因此两个方向上对应的 M_x^2 和 M_y^2 是不同的,所以,在文献[21, 22]中,采用了 M^2 因子矩阵描述二维非旋转对称光束的光束质量。其形式为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_x^2 & M_{xy}^2 \\ M_{yx}^2 & M_y^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_x^2 & 0 \\ 0 & M_y^2 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

在同一直角坐标系下,将光场绕 z 轴顺时针旋转 α 角后,得到各方向上新的 M^2 的变化可以表示为

$$\begin{aligned} M_{x'}^2 &= M_x^2 \cos^2 \alpha + M_y^2 \sin^2 \alpha, \\ M_{y'}^2 &= M_x^2 \sin^2 \alpha + M_y^2 \cos^2 \alpha, \\ M_{x'y'}^2 &= M_{y'x'}^2 = (M_y^2 - M_x^2) \sin \alpha \cos \alpha. \end{aligned} \quad (13)$$

新的 M^2 因子矩阵可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{M}' &= \mathbf{\Theta}^{-1} \mathbf{M} \mathbf{\Theta}, \\ \mathbf{\Theta} &= \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (14)$$

在旋转 $\frac{\pi}{2}$ 的角度后,实际上是 M_x^2 和 M_y^2 互换了位置,而(12)式的主对角线元素和 $M_y^2 + M_x^2$ 是保持不变的,由这个性质很容易做出二维平面上 TEM_m 模 HGB 光束在旋转角度 $0 \sim 2\pi$ 内质量因子变化的轨迹图。

根据上节所介绍的 x 轴向的 M^2 因子的解析表达式,可以计算出不同传输距离处的接受面上 x 方向上 m 模的光束质量因子 M_x^2 ,如果假设两个方向的光束除了光束的模数不同外,其他参数相同的话,只要将 m 以 n 代替,就可算出 y 方向上的质量因子 M_y^2 ,再通过(13)式的旋转变换,可以在二维直角坐标系内画出 M^2 因子随旋转角度 α 变化轨迹图。本文计算了 TEM_{44} 、 TEM_{34} 、 TEM_{24} 和 TEM_{40} 模的 PCHG 光束在与图 3 相同的湍流参数条件下,不同距离上二维 M^2 因子的轨迹图变化。

从图 5 可以看出,由于采用了前文计算好的光束束宽和相干长度,在 100 m 的范围之内,各阶模式光束的轨迹图与光源面上的轨迹图相比变化很小,而在 200 m 和 500 m 传输距离上轨迹图的面积相应的扩大,说明 x 轴和 y 轴方向上的光束质量都有了明显的降低。 TEM_{44} 光束是不断扩大的圆形, TEM_{40} 模光束由倒 8 字型逐渐变化为椭圆形, TEM_{24} 和 TEM_{34} 模光束则由椭圆形渐渐向圆形变化。这说明在传输过程中,沿低模方向的光束传输质量的降低更为迅速。根据整个变化趋势,不难推测,更远距离处的二维平面上的光强分布,沿各个方向所测得的光束传输质量将趋于相同。即使在相对较弱的海洋湍流下,对光源参数进行合理的选择后,其光束传输质量维持稳定的范围也局限于 200 m

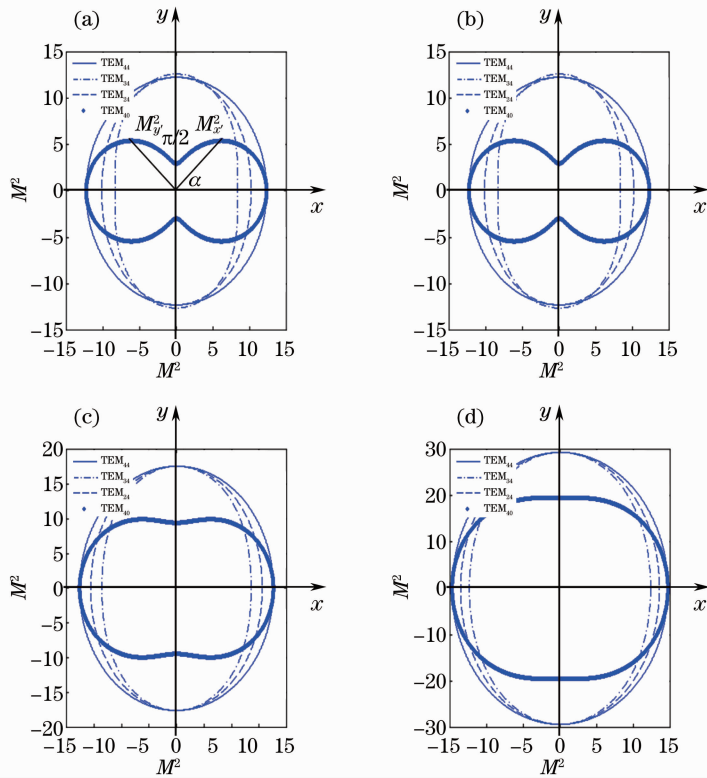


图 5 海洋湍流干扰下二维 PCHG 光束 M^2 因子轨迹图随传输距离的演化。(a) $z=0$; (b) $z=100$ m; (c) $z=200$ m; (d) $z=500$ m

Fig. 5 Evolution of the track of M^2 factor of two-dimensional PCHG beam with distance under oceanic turbulence perturbation. (a) $z=0$; (b) $z=100$ m; (c) $z=200$ m; (d) $z=500$ m

之内,而在更强的湍流干扰下,这个范围将进一步的缩小。

6 结 论

根据光束 M^2 因子的定义,计算了海洋湍流的干扰下一维 PCHG 光束传输质量的变化规律,并且分析了不同的光源束宽和相干长度对这种变化规律的影响。结果显示,在海洋湍流的干扰下,光束传输质量的衰减将比大气湍流中更为严重,而随参数的变化,海洋湍流强弱的相对变化也很强烈,在相对强的湍流区,选择光源的参数对于提高光束传输质量的意义不大。而在相对弱的湍流区,这种选择可以使光束传输质量在 100 m 的范围内维持稳定。当用 M^2 因子矩阵将光束质量的分析扩展到二维情况时,也与一维的情况相吻合,在光源平面上时,低模方向的质量因子要低于高模方向上的质量因子,这是造成其轨迹图成 8 字形和椭圆形的原因,但经过有干扰的介质进行传输的时候,低模方向上的传输质量的衰减更为严重,因此最终将趋向于圆形的轨迹图。本文研究对于水下成像和水下激光通信等光学设备的发展有一定的理论价值。

参 考 文 献

- 1 Larry C. Andrews, Ronald L. Phillips. Laser Propagation through Random Media[M]. SPIE: United States of America, 2005. 83~133
- 2 Greg Gbur, Emil Wolf. Spreading of partially coherent beams in random media [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(8): 1592~1598
- 3 Qiao Na, Dan Youquan, Zhang Bin. Propagation properties of elegant Hermite-Gaussian beam in atmosphere turbulence [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **30**(6): 1542~1547
乔 娜, 但有全, 张 彬. 复宗量部分相干厄米高斯光束在大气湍流中的传输特性[J]. *中国激光*, 2009, **30**(6): 1542~1547
- 4 Chen Feinan, Chen Jingjing, Zhao Qi. Properties of high order Bessel Gaussian beam propagation in non-Kolmogorov atmosphere turbulence [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(9): 0913001
陈斐楠, 陈晶晶, 赵 琦. 高阶贝塞尔高斯光束在非柯尔莫哥诺夫大气中的传输特性[J]. *中国激光*, 2012, **39**(9): 0913001
- 5 Jennifer C. Ricklin, Frederic M. Davidson. Atmospheric turbulence effects on a partially coherent Gaussian beam; implications for free-space laser communication [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2009, **19**(6): 1794~1802
- 6 B. E. Stribling, B. M. Welsh, M. C. Roggemann. Optical propagation in non-Kolmogorov atmospheric turbulence [C]. *SPIE*, 1995, **2471**: 2471~2472
- 7 Fu Qiang, Jiang Huilin, Zeng Zongyong. Research on influence of atmospheric turbulence for laser communication at high data rate by simulation experiments [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(s1): s105007

- 付强, 姜会林, 曾宗泳. 大气湍流对高速激光通信影响模拟实验研究[J]. 中国激光, 2012, **39**(s1): s105007
- 8 Frank Hanson, Mark Lasher. Effects of underwater turbulence on laser beam propagation and coupling into single-mode optical fiber[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(16): 3224~3230
- 9 N. Farwell, O. Korotkova. Intensity and coherence properties of light in oceanic turbulence[J]. *Opt. Commun.*, 2012, **285**(6): 872~875
- 10 Olga Korotkova, Nathan Farwell. Effect of oceanic turbulence on polarization of stochastic beams[J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(7): 1740~1746
- 11 Wei Lu, Liren Liu, Jianfeng Sun. Influence of temperature and salinity fluctuations on propagation behaviour of partially coherence in oceanic turbulence[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2006, **8**(12): 1052~1058
- 12 Zhang Jian, Qu Enshi, Cao Jianzhong. Study on a multi-spectral-band infrared sea surface temperature radiometer system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0401003
张 建, 屈恩世, 曹剑中. 自动多波段红外海洋表面温度辐射系统研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(4): 0401003
- 13 Xie Zhengmao, Gao Limin, He Junhua. Design of high-speed photography optical system for air bubbles in water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0422002
谢正茂, 高立民, 何俊华. 水下气泡高速摄影光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, **32**(4): 0422002
- 14 Zhang Xi, Li Peijun, Wu Fangping. Influence of wavy sea surface on laser detection of underwater target with Monte Carlo method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(7): 0702003
章 曦, 李配军, 吴方平. 基于蒙特卡罗方法的波动水面对激光水下目标探测的影响[J]. 中国激光, 2012, **39**(7): 0702003
- 15 Feng Guoying, Zhou Shouhuan. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1643~1653
- 冯国英, 周守桓. 激光光束质量综合评价的探讨[J]. 中国激光, 2009, **36**(7): 1643~1653
- 16 Lv Baida, Ji Xiaoling, Luo Shirong *et al.*. Parametric characterization of laser beams and beam quality[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(1): 14~17
吕百达, 季小玲, 罗时荣 等. 激光的参数描述和光束质量[J]. 红外和激光工程, 2004, **33**(1): 14~17
- 17 A. E. Siegman. *Lasers* [M]. California: University Science Books, 1986. 624~803
- 18 Yangsheng Yuan, Yangjian Cai, Jun Qu *et al.*. Propagation factors of Hermite-Gaussian beams in turbulence atmosphere[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, **42**(8): 1344~1348
- 19 Huang Yongping, Zhang Bin, Dan Youquan. Changes of M^2 factor for Hermite-Gaussian beams in turbulence atmosphere [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(1): 59~64
黄永平, 张 彬, 但有全. 湍流大气中部分相干厄米高斯光束 M^2 因子的变化[J]. 强激光与粒子束, 2011, **23**(1): 59~64
- 20 Huang Yongping, Zhao Guangpu, Duan Zhichun. M^2 factor for the partially coherent Hermite-Gaussian beams in a turbulence atmosphere[J]. *Journal of Ningxia University (Natural Science Edition)*, 2011, **32**(3): 226~230
黄永平, 赵光普, 段志春. 部分相干厄米-高斯光束在湍流大气中的 M^2 因子[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2011, **32**(3): 226~230
- 21 W. Li, G. Feng, Y. Huang *et al.*. Matrix formulation of the beam quality of the Hermite-Gaussian beam[J]. *Laser Physics*, 2009, **19**(3): 455~460
- 22 Li Wei, Feng Guoying, Huang Yu. M^2 factor matrix for two-dimensional Hermite-Gaussian beam[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(4): 2461~2462
李 玮, 冯国英, 黄 宇. 部分相干厄米高斯光束的 M^2 因子矩阵[J]. 物理学报, 2009, **58**(4): 2461~2462

栏目编辑: 王晓球