

doi: 10.3788/gzxb20134209.1107

# 湍流对椭圆偏振激光传输中偏振特性的影响分析

高明, 南妮娜, 吕宏, 倪晋平

(西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

**摘要:** 根据推广的惠更斯-菲涅耳原理和 Rytov 相位结构函数二次近似, 推导出高斯-谢尔模型光束在湍流大气传输中交叉谱密度矩阵的表达式, 研究了湍流对椭圆偏振高斯-谢尔模型光束传输中的偏振特性影响, 并与部分偏振高斯-谢尔模型光束进行了对比分析. 结果表明, 相对于部分偏振高斯-谢尔模型光束, 椭圆偏振高斯-谢尔模型光束在湍流大气传输中偏振度、方位角以及椭圆度的变化受湍流的影响较小. 同时得到椭圆偏振高斯-谢尔模型光束在湍流大气斜程传输中偏振度的变化幅度比部分偏振高斯-谢尔模型光束的小, 而方位角和椭圆度的变化幅度比部分偏振高斯-谢尔模型光束的大.

**关键词:** 大气湍流; 椭圆偏振激光; 偏振特性; 交叉谱密度矩阵

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)09-1107-6

## Analysis on Influence of the Turbulent on Polarization Properties of Elliptically Polarized Laser Beams in Propagation

GAO Ming, NAN Wei-na, LÜ Hong, NI Jin-ping

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Based on the generalized Huygens-Fresnel diffraction principle and the quadratic approximation of Rytov's phase structure function, the analytical expression for the cross-spectral density matrix of the electromagnetic Gaussian Schell-model beams propagating through turbulent atmosphere is derived. The influence of the turbulent on polarization properties of the elliptically polarized electromagnetic Gaussian Schell-model beams in propagation are studied in this paper. In addition, the polarization properties of an elliptically polarized electromagnetic Gaussian Schell-model beam and a partially polarized electromagnetic Gaussian Schell-model beam are contrasted and analyzed. The results show that compared with the changes in the state of polarization of partially polarized electromagnetic Gaussian Schell-model beams, the elliptically polarized electromagnetic Gaussian Schell-model beams have the advantage of the less influence of turbulence strength. Moreover, the variations of the spectral degree of polarization of the elliptically polarized electromagnetic Gaussian Schell-model beams propagating through turbulence atmospheric are smaller than the partially polarized electromagnetic Gaussian Schell-model beams. But the variations of the orientation angle and the degree of ellipticity of the elliptically polarized electromagnetic Gaussian Schell-model beams propagating are larger than the partially polarized electromagnetic Gaussian Schell-model beams.

**Key words:** Atmospheric turbulence; Elliptically polarized laser beams; Polarization properties; The cross-spectral density matrix

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60972005)和陕西省自然科学基金基础研究计划(No. 2012JM8008)资助

第一作者: 高明(1964-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光学设计、激光大气传输理论及技术. Email: minggao1990@sohu.com

导师(通讯作者): 南妮娜(1987-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为激光大气传输理论. Email: nnanweina@163.com

收稿日期: 2013-05-17; 录用日期: 2013-07-11

## 0 引言

偏振特性是激光光束的重要特性之一,利用不同材料目标散射光的偏振特性差异,可以有效地对目标进行探测与识别,在此应用中一般采用完全偏振的激光光束.激光光束通过湍流大气传输时,大气折射率的随机起伏会影响光束传输中的偏振特性,因而研究湍流对完全偏振激光光束传输中偏振特性的影响对于偏振探测目标具有重要的意义.

国内外对激光传输中偏振特性的问题已进行了广泛研究,O. Korotkova等研究了电磁高斯-谢尔模型(Electromagnetil Gauss-Schell Model, EGSM)光束在自由空间传输中的偏振特性<sup>[1-2]</sup>.丁攀峰分析了光源横截面光场相关性(横向相干性)对EGSM光束自由空间传输中偏振态演变的影响<sup>[3]</sup>.H. Roychowdhury和S. A. Ponomarenko等<sup>[4]</sup>研究了EGSM光束在湍流大气中水平传输时偏振度的变化规律.B. Ghafary等<sup>[5]</sup>分析了部分相干平顶光束在湍流大气中水平传输时,光束的偏振度、方位角和椭圆度的变化情况.杨帆等人<sup>[6]</sup>研究了部分相干电磁平顶光束在湍流大气传输中偏振度、相干度以及光谱特性的变化情况.季小玲等<sup>[7]</sup>分析出部分相干电磁厄米-高斯光束在湍流大气中水平传输时,影响偏振度变化的各个因素.M. Charnotskii<sup>[8]</sup>对光波在大气湍流中传播研究方面常见的疏漏和误解等问题进行了阐述.目前多数文献主要对部分偏振激光在湍流大气传输中的偏振特性进行研究,很少对完全偏振激光光束进行详细研究.

本文主要分析了不同湍流情况时,椭圆偏振EGSM光束在湍流大气传输中偏振特性随传输距离的变化规律.根据推广的惠更斯-菲涅耳原理和Rytov相位结构函数二次近似,推导出了光束传输中交叉谱密度矩阵的表达式,并结合偏振度、方位角以及椭圆度的定义,分别对椭圆偏振EGSM光束斜程传输中的偏振度、方位角以及椭圆度进行了数值计算,并将椭圆偏振EGSM光束与部分偏振EGSM光束传输中偏振特性受湍流的影响进行了对比分析.

## 1 基本原理

设EGSM光束光源位于 $z=0$ 平面,在 $z=0$ 平面,光束的交叉谱密度矩阵为<sup>[9]</sup>

$$\begin{bmatrix} W_{xx} & W_{xy} \\ W_{yx} & W_{yy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中

$$W_{ij}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, 0) = A_i A_j B_{ij} \exp\left[-\left(\frac{r_1^2}{4\sigma_i^2} + \frac{r_2^2}{4\sigma_j^2}\right)\right] \times \exp\left[-\frac{(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)^2}{2\delta_{ij}}\right] \quad (i = x, y; j = x, y) \quad (2)$$

式(2)中 $x$ 和 $y$ 代表 $z=0$ 平面内两个互相垂直的方向, $A_i$ 和 $A_j$ 分别表示光束在 $i$ 方向和 $j$ 方向上电场分量的振幅, $B_{ij}$ 为相位相关因子, $r_1$ 和 $r_2$ 分别表示 $z=0$ 平面上任意两点的位置矢量, $\sigma_i$ 和 $\sigma_j$ 分别表示 $i$ 方向和 $j$ 方向上光谱密度的有效宽度, $\delta_{ij}$ 表征横截面上场的相干长度. $\sigma_i$ 和 $\sigma_j$ 反映了强度分布的变化,当 $\sigma_x \neq \sigma_y$ 时表示各向异性,当 $\sigma_x = \sigma_y$ 时表示各向同性; $\delta_{ij}$ 反映了关联性的变化.

$B_{ij}$ 满足下列条件: $B_{ij} = 1 (i=j)$ ;  $|B_{ij}| \leq 1 (i \neq j)$ ,并且 $B_{ij} = B_{ji}^*$ . $\delta_{ij}$ 满足 $\delta_{xy} = \delta_{yx}$ ,  $\max\{\delta_{xx}, \delta_{yy}\} \leq \delta_{xy} \leq \min\{\delta_{xx}/|B_{xy}|^{0.5}, \delta_{yy}/|B_{xy}|^{0.5}\}$ .

当 $|B_{xy}| = 1$ ,并且 $\delta_{xx} = \delta_{yy} = \delta_{xy}$ 时,EGSM光束的偏振度为1,可以表示完全偏振的EGSM光束.当 $|B_{xy}| < 1$ 且 $|B_{xy}| \neq 0$ 时,EGSM光束的偏振度为0和1之间,可以表示部分偏振的EGSM光束<sup>[10]</sup>.

根据推广的惠更斯-菲涅耳原理,EGSM光束在湍流大气中沿 $z$ 轴正向传输到 $z=L$ 平面时,用 $\boldsymbol{\rho}_1$ 和 $\boldsymbol{\rho}_2$ 分别表示 $z=L$ 平面上任意两点的位置矢量,取 $\boldsymbol{\rho}_1 = \boldsymbol{\rho}_2 = \boldsymbol{\rho}$ ,得到交叉谱密度矩阵元的表达式为<sup>[5]</sup>

$$W_{ij}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\rho}, L) = \left(\frac{1}{\lambda L}\right)^2 \iint d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2 W_{ij}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, 0) \times \exp\left\{-\frac{ik}{2L}[(\mathbf{r}_1^2 - \mathbf{r}_2^2) - 2(\boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{r}_1 - \boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{r}_2)]\right\} \times \langle \exp[\psi(\mathbf{r}_1, \boldsymbol{\rho}, L) + \psi^*(\mathbf{r}_2, \boldsymbol{\rho}, L)] \rangle_m \quad (3)$$

式(3)中 $\Psi(\mathbf{r}, \boldsymbol{\rho}, L)$ 表示大气湍流对球面波影响的随机相位因子, $\langle \rangle$ 表示系综平均.采用Rytov相位结构函数,并进行二次近似可以得到<sup>[11]</sup>

$$\langle \exp[\psi(\mathbf{r}_1, \boldsymbol{\rho}, L) + \psi^*(\mathbf{r}_2, \boldsymbol{\rho}, L)] \rangle_m \cong \exp[-(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2 / R_T^2] \quad (4)$$

式(4)中 $R_T$ 表示湍流介质中传播光波的空间相干长度.当光束水平传输时,球面波在湍流介质中的空间相干长度为 $R_T = (0.545k^2 L C_n^2)^{-3/5}$ ,其中 $C_n^2$ 是大气折射率结构常数,表征大气湍流的强弱.当光束斜程传输时,受风速、温度、气压等众多因素的影响, $C_n^2$ 一般是随高度变化的.国际电信联盟提出的ITU-R大气湍流结构模型,将水平传输的修正Rytov方法扩展到了斜程传输问题中,球面波在湍流介质中的空间相干长度 $R_T$ 为 $C_n^2(h)$ 的路径积分函数,其表达式为<sup>[12]</sup>

$$R_T = [0.545k^2 L \int_0^1 (1-\eta)^{5/3} C_n^2(\eta L \cos\alpha) d\eta]^{-3/5} \quad (5)$$

式(5)中  $\alpha$  是天顶角,若接收端的高度为  $H$ ,地面以上的高度为  $h$ ,令  $\eta = h/H$ ,则  $h = \eta L \cos\alpha$ .

国际电信联盟提出的 ITU-R 大气湍流结构模型的表达式为<sup>[13]</sup>

$$C_n^2(h) = 8.148 \times 10^{-56} v_{\text{RMS}}^2 h^{10} e^{-h/1000} + 2.7 \times 10^{-16} e^{-h/1500} + C_0 e^{-h/100} \quad (6)$$

式中  $V_{\text{RMS}}^2 = (v_g^2 + 30.69v_g + 348.91)^{1/2}$  是垂直路径风速,  $v_g$  是近地面风速(未知时可近似为  $v_g = 2.87$  m/s),  $C_0$  是地面附近的大气结构常数(其典型值为  $1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ).

将式(2)和式(4)代入式(3),计算后得到

$$W'_{ij}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\rho}, L) = \frac{A_i A_j B_{ij}}{(\lambda L)^2} \frac{\pi}{\sqrt{\alpha_{ij} \chi}} \exp(\xi_{ij} \boldsymbol{\rho}^2) \quad (7)$$

式中

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{16\sigma_i^2} + \frac{1}{16\sigma_j^2} + \frac{1}{2\delta_{ij}^2} + \frac{1}{R_T^2}$$

$$\beta_{ij} = \frac{1}{8\sigma_i^2} - \frac{1}{8\sigma_j^2} + \frac{ik}{2L}$$

$$\chi_{ij} = \frac{1}{4^2\sigma_i} + \frac{1}{4\sigma_j^2} - \frac{\beta_{ij}^2}{\alpha_{ij}}$$

$$\xi_{ij} = -\frac{k^2}{4L^2} \left( \frac{\beta_{ij}^2}{\alpha_{ij}^2 \chi_{ij}} + \frac{1}{\alpha_{ij}} \right)$$

用斯托克斯(Stokes)参量描述光束的偏振度,其表达式为<sup>[14]</sup>

$$P = \sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}{S_0^2}} \quad (8)$$

式中 Stokes 参量  $S_0, S_1, S_2, S_3$  用交叉谱密度矩阵元分别表示为<sup>[15]</sup>

$$S_0 = W'_{xx}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\rho}, L) + W'_{yy}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\rho}, L)$$

$$S_1 = W'_{xx}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\rho}, L) - W'_{yy}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\rho}, L)$$

$$S_2 = W'_{xy}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\rho}, L) + W'_{yx}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\rho}, L)$$

$$S_3 = i(W'_{yx}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\rho}, L) - W'_{xy}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\rho}, L))$$

偏振度  $P$  不能完全描述光束的偏振特性,利用方位角  $\theta$  和椭圆度  $\epsilon$  可以对光束的偏振特性进一步说明.方位角  $\theta$  定义为振动椭圆的长轴和坐标轴  $x$  的夹角,表征了振动椭圆的方位,其表达式用交叉谱密度矩阵元表示为<sup>[2]</sup>

$$\theta(\boldsymbol{\rho}, L) = \frac{1}{2} \arctan \left[ \frac{2\text{Re}(W'_{xy})}{W'_{xx} - W'_{yy}} \right] \quad (9)$$

椭圆度  $\epsilon$  定义为振动椭圆的短半轴和长半轴振幅之比,表征了振动椭圆的形状,其表达式为

$$\epsilon = \frac{A_S}{A_M} \quad (10)$$

振动椭圆短半轴振幅  $A_S$  和长半轴振幅  $A_M$  的平方分别用交叉谱密度矩阵元表示为

$$A_S^2 = \frac{1}{2} \sqrt{(W'_{xx} - W'_{yy})^2 + 4|W'_{xy}|^2} -$$

$$\frac{1}{2} \sqrt{(W'_{xx} - W'_{yy})^2 + 4[\text{Re}(W'_{xy})]^2} \quad (11)$$

$$A_M^2 = \frac{1}{2} \sqrt{(W'_{xx} - W'_{yy})^2 + 4|W'_{xy}|^2} +$$

$$\frac{1}{2} \sqrt{(W'_{xx} - W'_{yy})^2 + 4[\text{Re}(W'_{xy})]^2} \quad (12)$$

将式(11)和式(12)代入式(10),得到椭圆度  $\epsilon$  的表达式为

$$\epsilon = \frac{\sqrt{(W'_{xx} - W'_{yy})^2 + 4|W'_{xy}|^2}}{2\sqrt{|W'_{xy}|^2 - [\text{Re}(W'_{xy})]^2}} - \frac{\sqrt{(W'_{xx} - W'_{yy})^2 + 4[\text{Re}(W'_{xy})]^2}}{2\sqrt{|W'_{xy}|^2 - [\text{Re}(W'_{xy})]^2}} \quad (13)$$

## 2 数值分析

设椭圆偏振 EGSM 光束和部分偏振 EGSM 光束具有以下相同的参数:波长  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ ,电场分量的振幅比  $A_x/A_y = 1/2$ .另外椭圆偏振 EGSM 光束的相位相关因子  $B_{xx} = B_{yy} = 1, B_{xy} = B_{yx}^* = \exp(i\pi/3)$ ,相干长度  $\delta_{xx} = \delta_{yy} = \delta_{xy} = \delta_{yx} = 2 \text{ mm}$ ;部分偏振 EGSM 光束的相位相关因子  $B_{xx} = B_{yy} = 1, B_{xy} = B_{yx}^* = 0.4\exp(i\pi/3)$ ,相干长度  $\delta_{xx} = \delta_{yy} = 2 \text{ mm}, \delta_{xy} = \delta_{yx} = 3 \text{ mm}$ .

不同湍流情况分别为接收机高度  $H$  为 1 000 m 的斜程路径,强湍流 ( $C_n^2 = 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ ),中等湍流 ( $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ),弱湍流 ( $C_n^2 = 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ ),自由空间 ( $C_n^2 = 0$ ).考察光束传输到  $z=L$  平面  $\boldsymbol{\rho}$  点(0, 0)的偏振特性.

### 2.1 湍流强度对各向同性光束偏振特性的影响

$x$  方向和  $y$  方向上光谱密度的有效宽度相等时,EGSM 光束为各向同性.取  $\sigma_x = \sigma_y = 1 \text{ cm}$ ,对比分析各向同性的椭圆偏振 EGSM 光束和各向同性的部分偏振 EGSM 光束在湍流大气中传输时偏振度  $P$ 、方位角  $\theta$  以及椭圆度  $\epsilon$  随传输距离的变化趋势,数值仿真的结果分别如图 1、图 2 与图 3 所示.

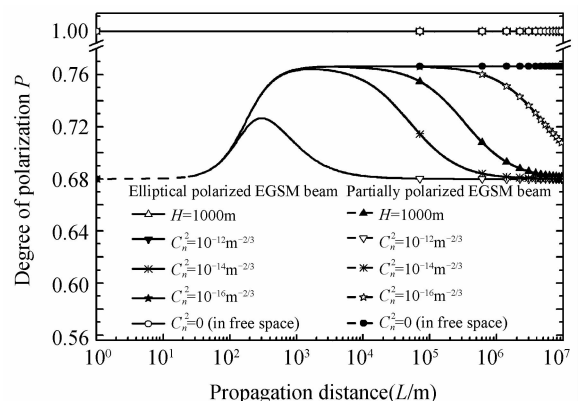


图 1 不同湍流时各向同性光束偏振度随传输距离的变化  
Fig. 1 Changes in the degree of polarization of isotropic beams versus propagation distance with different turbulence strength

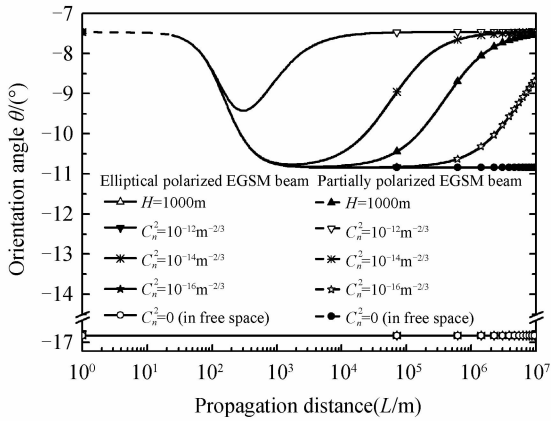


图2 不同湍流时各向同性光束方位角随传输距离的变化

Fig. 2 Changes in the orientation angle of isotropic beams versus propagation distance with different turbulence strength

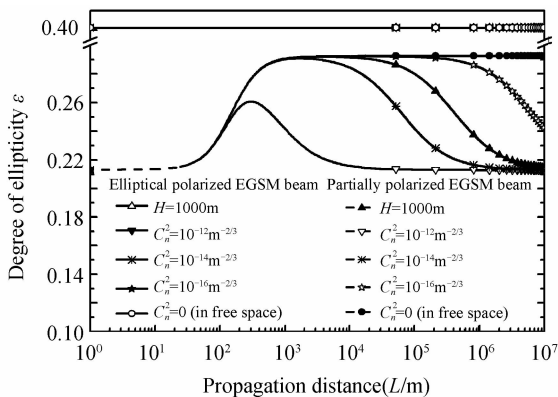


图3 不同湍流时各向同性光束椭圆度随传输距离的变化

Fig. 3 Changes in the degree of ellipticity of isotropic beams versus propagation distance with different turbulence strength

其中图1为不同湍流时各向同性光束偏振度随传输距离的变化情况,图2为不同湍流时各向同性光束方位角随传输距离的变化情况,图3为不同湍流时各向同性光束椭圆度随传输距离的变化情况。

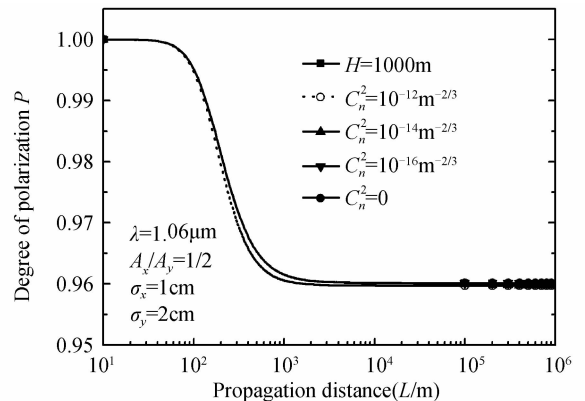
分析图1、图2、图3可知,各向同性( $\sigma_x = \sigma_y$ )的椭圆偏振EGSM光束,偏振度 $P$ 、方位角 $\theta$ 以及椭圆度 $\epsilon$ 在传输过程中保持初始值不变;而各向同性( $\sigma_x \neq \sigma_y$ )的部分偏振EGSM光束在传输距离小于100 m时,偏振度 $P$ 、方位角 $\theta$ 以及椭圆度 $\epsilon$ 几乎保持不变,当传输距离大于100 m时光束的偏振特性发生变化,并且湍流强度越强,偏振度 $P$ 、方位角 $\theta$ 以及椭圆度 $\epsilon$ 的变化曲线越偏离其在自由空间中的变化曲线。据此得到湍流强度对各向同性的椭圆偏振EGSM光束传输中的偏振特性并不产生影响。

对于完全偏振的EGSM光束,参数满足要求:  $|B_{xy}| = 1, \delta_{xx} = \delta_{yy} = \delta_{xy}$ ,此外当光束为各向同性,即参数满足条件 $\sigma_x = \sigma_y$ 时,用式(7)交叉谱密度矩阵元表示Stokes参量 $S_0, S_1, S_2, S_3$ ,并代入式(8)偏振度的表达式,分析得到光束传输到所有场点

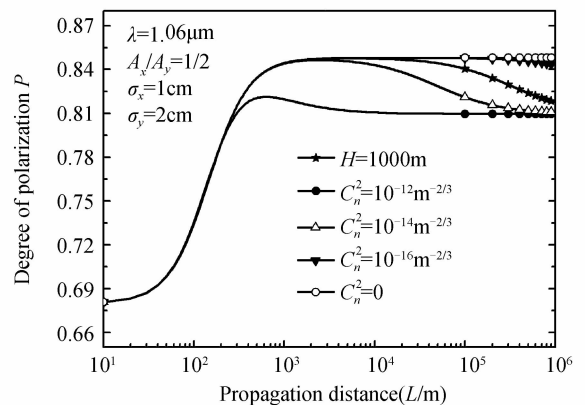
的偏振度值均为数值1,由此可得到完全偏振EGSM光束在大气传输中保持偏振度不变的条件为 $\sigma_x = \sigma_y$ 。

## 2.2 湍流强度对各向异性光束偏振特性的影响

$x$ 方向和 $y$ 方向上光谱密度的有效宽度不相等时,EGSM光束为各向异性。取 $\sigma_x = 1 \text{ cm}, \sigma_y = 2 \text{ cm}$ ,对比分析各向异性的椭圆偏振EGSM光束和各向异性的部分偏振EGSM光束在湍流大气中传输时偏振度 $P$ 、方位角 $\theta$ 以及椭圆度 $\epsilon$ 随传输距离的变化趋势,数值仿真的结果分别如图4、图5与图6所示。其中图4为不同湍流时各向异性光束偏振度随

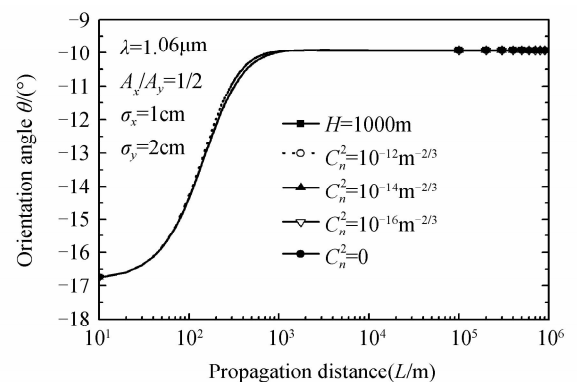


(a) Anisotropic elliptical polarized EGSM beams



(b) Anisotropic partially polarized EGSM beams

图4 不同湍流时各向异性光束偏振度随传输距离的变化  
Fig. 4 Changes in the degree of polarization of anisotropic beams versus propagation distance with different turbulence strength



(a) Anisotropic elliptical polarized EGSM beams

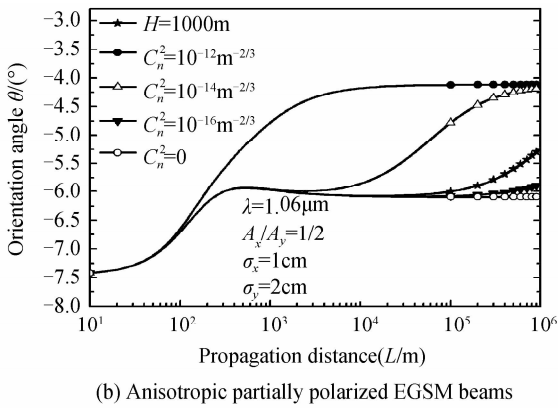
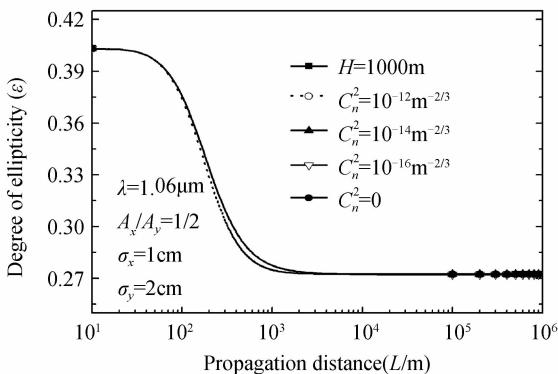
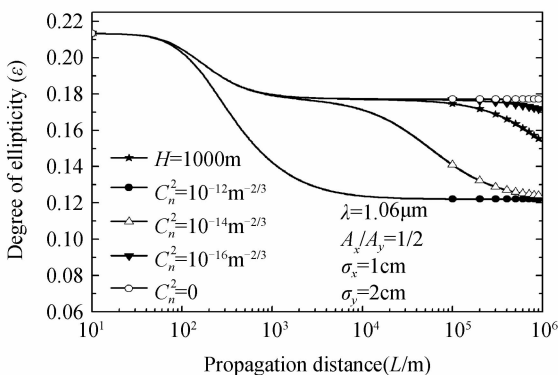


图 5 不同湍流时各向异性光束方位角随传输距离的变化  
Fig. 5 Changes in the orientation angle of anisotropic beams versus propagation distance with different turbulence strength



(a) Anisotropic elliptical polarized EGSM beams



(b) Anisotropic partially polarized EGSM beams

图 6 不同湍流时各向异性光束椭圆度随传输距离的变化  
Fig. 6 Changes in the degree of ellipticity of anisotropic beams versus propagation distance with different turbulence strength

传输距离的变化情况,图 5 为不同湍流时各向异性光束方位角随传输距离的变化情况,图 6 为不同湍流时各向异性光束椭圆度随传输距离的变化情况。

由图 4(a)、图 5(a)、图 6(a)可知,各向异性的椭圆偏振 EGSM 光束在传输过程中,当传输距离  $L < 10^3$  m,偏振度  $P$  和椭圆度  $\epsilon$  随传输距离的增加而减小,而方位角  $\theta$  随传输距离  $L$  的增加而变大;当  $L > 10^3$  m,光束偏振度  $P$ 、方位角  $\theta$  以及椭圆度  $\epsilon$  随传输距离的增加均保持不变。

另外从图 4(a)、图 5(a)以及图 6(a)可以分析得到,斜程传输、中等湍流( $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ )中传输、以及弱湍流( $C_n^2 = 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ )中传输时,各向异性的椭圆偏振 EGSM 光束偏振特性(偏振度  $P$ 、方位角  $\theta$  以及椭圆度  $\epsilon$ )的变化都与自由空间( $C_n^2 = 0$ )中传输时光束偏振特性的变化基本相同,强湍流( $C_n^2 = 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ )中传输时光束偏振特性的变化与自由空间( $C_n^2 = 0$ )中传输时的差别很小,说明各向异性的椭圆偏振 EGSM 光束在湍流大气中传输时,光束偏振特性受湍流影响很小。分析图 4(b)、图 5(b)、图 6(b)可以得到,各向异性的部分偏振 EGSM 光束在强湍流( $C_n^2 = 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ )中传输  $10^2$  m 以后,光束偏振特性的变化相对自由空间( $C_n^2 = 0$ )传输时有很大差异,说明各向异性的部分偏振 EGSM 光束在湍流大气中传输时,湍流的强弱对光束偏振特性的变化影响较大。

通过对光束传输中偏振度  $P$ 、方位角  $\theta$  以及椭圆度  $\epsilon$  的变化幅度分析发现,当斜程传输到  $10^3$  m 时,各向异性椭圆偏振 EGSM 光束的偏振度  $P$ 、方位角  $\theta$  以及椭圆度  $\epsilon$  的变化量分别为  $0.04$ 、 $6.8^\circ$ 、 $0.13$ ,各向异性部分偏振 EGSM 光束的偏振度  $P$ 、方位角  $\theta$  以及椭圆度  $\epsilon$  的变化量分别为  $0.16$ 、 $1.4^\circ$ 、 $0.03$ 。对比分析得到各向异性椭圆偏振 EGSM 光束在湍流大气传输中偏振度的变化幅度比各向异性部分偏振 EGSM 光束的小,而方位角和椭圆度的变化幅度比各向异性部分偏振 EGSM 光束的大。

对于各向异性的完全偏振 EGSM 光束,由光束的光谱密度诱导会引起光束的偏振特性发生变化,即各向异性完全偏振 EGSM 光束光源的光谱密度特性会影响光束传输过程中偏振特性的变化,光束在传输过程中由完全偏振状态变为部分偏振状态。

### 3 结论

利用 EGSM 光束在湍流大气传输中的交叉谱密度矩阵,研究了椭圆偏振 EGSM 光束在不同湍流情况时偏振度、方位角以及椭圆度随传输距离的变化关系,并与部分偏振 EGSM 光束传输中的偏振特性进行了对比分析。得到湍流强度对各向同性椭圆偏振 EGSM 光束传输中的偏振特性并不产生影响,对各向异性椭圆偏振 EGSM 光束传输中偏振特性的影响比各向异性部分偏振 EGSM 光束更小;各向异性椭圆偏振 EGSM 光束在湍流大气斜程传输中偏振度的变化幅度比各向异性部分偏振 EGSM 光束的小,而方位角和椭圆度的变化幅度比各向异性部分偏振 EGSM 光束的大。

## 参考文献

- [1] KOROTKOVA O, VISSER T D, WOLF E. Polarization properties of stochastic electromagnetic beams [J]. *Optics Communication*, 2008, **281**: 515-520.
- [2] KOROTKOVA O, WOLF E. Change in the state of polarization of a random electromagnetic beam on propagation [J]. *Optics Communication*, 2005, **246**: 35-43.
- [3] DING Pan-feng. Degree of polarization of partial coherent random Gaussian Schell-model source and its propagation [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, **38**(5): 49-52.  
丁攀峰. 部分相干高斯谢尔模型光束的偏振态及传输演变 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, **38**(5): 49-52.
- [4] ROYCHOWDHURY H, PONOMARENKO S A, WOLF E. Change in the polarization of partially coherent electromagnetic beams propagating through the turbulent atmosphere [J]. *Journal of Modern Optics*, 2005, **52**(11): 1611-1618.
- [5] GHAFARY B, ALAVINEJAD M. Changes in the state of polarization of partially coherent flat-topped beam in turbulent atmosphere for different source conditions [J]. *Applied Physics B*, 2011, **102**: 945-952.
- [6] YANG Fan, JI Xiao-ling. Influence of atmospheric turbulence on the propagation of partially coherent electromagnetic flat-topped beams [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2948-2952.  
杨帆, 季小玲. 大气湍流对部分相干电磁平顶光束传输的影响 [J]. 光子学报, 2009, **38**(11): 2948-2952.
- [7] JI Xiao-ling, CHEN Sen-hui, LI Xiao-qing. Polarization properties of partially coherent electromagnetic Hermite-Gaussian beams in atmospheric turbulence [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(1): 67-72.  
季小玲, 陈森会, 李晓庆. 部分相干电磁厄米-高斯光束通过湍流大气传输的偏振特性 [J]. 中国激光, 2008, **35**(1): 67-72.
- [8] CHARNOTSKII M. Common omissions and misconceptions of wave propagation in turbulence: discussion [J]. *Journal of the Optical Society of America A: Optics Image Science and Vision*, 2012, **29**(5): 711-721.
- [9] ROYCHOWDHURY H, KOROTKOVA O. Realizability conditions for electromagnetic Gaussian Schell-model sources [J]. *Optics Communication*, 2005, **249**: 379-385.
- [10] SALEM M, KOROTKOVA O, DOGARIU A, et al. Polarization changes in partially coherent electromagnetic beams propagating through turbulent atmosphere [J]. *Waves Random Media*, 2004, **14**: 513-523.
- [11] JI Xiao-ling, ZHANG En-tao, LV Bai-da. Changes in the spectrum and polarization of polychromatic partially coherent electromagnetic beams in the turbulent atmosphere [J]. *Optics Communication*, 2007, **275**: 292-300.
- [12] LIU Jun, WU Peng-li, Gao Ming. Wander and spreading of polarized and partially coherent laser propagation on slant path in turbulence atmospheric [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(10): 1013001-1-6.  
刘钧, 吴鹏利, 高明. 偏振部分相干激光斜程湍流大气传输的漂移扩展 [J]. 中国激光, 2012, **39**(10): 1013001-1-6.
- [13] ITU-R DOCUMENT 3J/31-E. On propagation data and prediction methods required for the design of space-to-earth and earth-to-space optical communication systems [C]. Radio Communication Study Group Meeting, Budapest, 2001, **206**: 277-293.
- [14] ZHAO Xin-hui, YAO Yong, SUN Yun-xu, et al. Condition for Gaussian Schell-model beam to maintain the state of polarization on the propagation in free space [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(20): 17888-17894.
- [15] KOROTKOVA O, WOLF E. Generalized Stokes parameters of random electromagnetic beams [J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(2): 198-200.