

DOI:10.16136/j.joel.2022.03.0481

随机电磁涡旋光束在光纤中光谱相干度的变化

赵春刚, 李晋红*, 郭苗军, 杨 晨, 王 静

(太原科技大学 应用科学学院, 山西 太原 030024)

摘要: 基于广义惠更斯菲涅尔原理和相干偏振统一理论, 推导了随机电磁高斯涡旋光束在梯度折射率光纤传输中交叉谱密度矩阵元的解析表达式, 并用以研究了随机电磁高斯涡旋光束在梯度折射率光纤中光谱相干度的变化。研究表明, 随机电磁高斯涡旋光束在梯度折射率光纤中传输时, 光谱相干度分布的周期与梯度折射率系数 β 相关。光束波长越长梯度折射率光纤对光谱相干度分布的聚焦作用越明显。光谱相干度分布暗环数与拓扑荷数 m 相同, 自相关空间长度 σ_{xx} 会改变光谱相干度沿径向的变化速度, 而互相关空间长度 σ_{xy} 不改变光谱相干度分布。本文研究结果对随机电磁涡旋光束在光纤中的传输具有指导意义, 在高速率大容量光纤保密通信方面有参考价值。

关键词: 随机电磁高斯涡旋光束; 梯度折射率光纤; 光谱相干度

中图分类号: O436 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)03-0321-09

Change in the spectral degree of coherence for random electromagnetic vortex beam propagating through fiber

ZHAO Chungang, LI Jinhong*, GUO Miaojun, YANG Chen, WANG Jing

(School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: Based on the generalized Huygens-Fresnel principle and the theory of coherence and polarization of light, it was derived that the analytical expression of the cross spectral density matrix element of random electromagnetic Gaussian vortex beam in gradient-index fiber, the spectral degree of coherence of the random electromagnetic Gaussian vortex beam propagating through gradient-index fiber is studied. The results show that when random electromagnetic Gaussian vortex beam propagating in gradient-index fiber, the period of the spectral degree of coherence is related to the gradient-index coefficient β . the longer beam wavelength is, the more obvious the focusing effect of the gradient-index fiber on the distribution of the spectral degree of coherence is. The number of dark rings in the distribution of the spectral degree of coherence is the same as the topological charge m . The value of spatial correlation length σ_{xx} change the evolutive speed of the spectral degree of coherence along the radial direction, while spatial correlation length σ_{xy} dose not change the distribution of the spectral degree of coherence. The research results of this paper have guiding significance for the propagation of random electromagnetic vortex beams in optical fibers, and have reference value in high-speed and large-capacity optical fiber secure communication.

Key words: random electromagnetic Gaussian vortex beam; gradient-index fiber; spectral degree of coherence

1 引 言

涡旋光束具有螺旋波前、携带相位奇点和轨

道角动量等特性, 在光学操纵^[1]、光通信^[2]、日冕仪^[3]和量子信息纠缠^[4]等领域具有重要的应用。相干光学理论的快速发展, 将相干性作为新的自

* E-mail: jinhongli@live.cn

收稿日期: 2021-07-09 修订日期: 2021-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(11904253)和山西省中央引导地方科技发展资金项目(YDZX20201400001386)资助项目

由度引入涡旋光束中,提出新型涡旋光束即部分相干涡旋光束,已成为学术界的研究热点^[5-7]。相较于完全相干涡旋光束,部分相干涡旋光束具有独特的物理内涵和光学特性,尤其是对其相干性和拓扑荷的联合调控会引发相干奇点、光束整形、偏振态转换、自修复等一系列奇特的新效应^[8]。基于标量方法研究部分相干光时会忽略光束的矢量特性,从而丢失偏振信息,而偏振是光束的一个基本特性,与相干光束相互作用,所以考虑光束的矢量性是十分必要的,矢量部分相干光束的电场振动通常是随机的,故又被称为随机电磁光束^[9]。本文研究的随机电磁高斯涡旋光束就是典型的随机电磁涡旋光束。

相干性表示涨落光场中两点或多点的某些量之间的相关结果,对光场调控有重要作用。光谱相干度能够定量地描述光束的相干性^[10]。WOLF^[11]提出相干偏振统一理论后,研究人员基于此理论讨论随机电磁光束通过不同介质的相干性。ROYCHOWDURY等^[12]证明了电磁高斯谢尔模型光束在梯度折射率光纤中传输时光谱相干度呈周期性变化,自相关空间长度和光强分量比会改变光谱相干度的振荡幅度。WU等^[13]发现相位延迟会改变随机电磁高斯谢尔模型光束光谱相干度变化的单调性,自相关空间长度会改变光谱相干度的振荡幅度,圆相位孔径可以调节随机电磁高斯谢尔模型光束的相干性。XU等^[14]得出了随机电磁拉盖尔高斯涡旋光束在海洋湍流中传输时拓扑荷的取值会影响光谱相干度的振荡幅度。SAHIN等^[15]报道了多色电磁多高斯谢尔模型光束在梯度折射率光纤中传输时光谱相干度分布稳定,光束相关函数的阶数和互相关空间长度的变化会改变光谱相干度的分布。DUAN等^[16]证实了随机电磁高斯涡旋光束在生物组织中传输时光谱相干度变化与选取的参考点位置相关,远红外光束波长可与生物组织中的水分子发生共振,互相关空间长度不改变光谱相干度的分布。SU等^[17]分析了径向偏振拉盖尔高斯涡旋光束在单轴晶体中传输时光谱相干度由源处的圆形分布逐渐演化为远场处的椭圆分布,演化特性与自相关空间长度、拉盖尔径向指数和介质折射率有关。以上研究表明,初始光束的参数和传输介质都会引起光束相干性的变化。另一方面,梯度折射率光纤是一种非均匀的、各向同性的光纤,与阶跃光纤相比具有色散低、弯曲损耗小和自聚焦等优势,可以极大地扩展光纤的传输容量,适用于短距离通信和高速传输,在光通信、光束整形和微创成像等方面具有广阔的应用前景^[18-21]。因此研究随机

电磁高斯涡旋光束在梯度折射率光纤中的传输行为具有十分重要的意义。

本文研究了随机电磁高斯涡旋光束在梯度折射率光纤传输中光谱相干度的变化,基于广义惠更斯菲涅尔原理和相干偏振统一理论,得出了随机电磁高斯涡旋光束在径向梯度折射率光纤中交叉谱密度矩阵元的解析表达式。本文数值仿真了随机电磁高斯涡旋光束在径向梯度折射率光纤中光谱相干度的变化,重点分析了初始光束的参数和梯度折射率系数对光谱相干度变化的影响,最后对光谱相干度的变化做出了总结。

2 理论模型

随机电磁光束在源平面处的交叉谱密度矩阵可表示为^[11]:

$$W(s_1, s_2, 0) = \begin{bmatrix} W_{xx}(s_1, s_2, 0) & W_{xy}(s_1, s_2, 0) \\ W_{yx}(s_1, s_2, 0) & W_{yy}(s_1, s_2, 0) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中,矩阵元 $W_{ij}(s_1, s_2, 0) = \langle E_i^*(s_1, 0) E_j(s_2, 0) \rangle$ ($i, j = x, y$), s_1 和 s_2 是源平面上的 2 维位置矢量, E_x 和 E_y 是电场矢量,表示 2 个互相垂直、且垂直于光轴方向(z 轴)的解析信号, $*$ 表示复共轭, $\langle \cdot \rangle$ 表示统计系统。

随机电磁高斯涡旋光束在源平面处的交叉谱密度矩阵元可表示为^[22]:

$$W_{ij}(s_1, s_2, 0) = \frac{A_i A_j B_{ij}}{2^{2m}} \sum_{r_1=0}^m \sum_{r_2=0}^m i^{r_2-r_1} \binom{m}{r_1} \binom{m}{r_2} \times \\ H_{m-r_1} \left(\frac{\sqrt{2} s_{1x}}{\omega_0} \right) H_{m-r_2} \left(\frac{\sqrt{2} s_{2x}}{\omega_0} \right) H_{r_1} \left(\frac{\sqrt{2} s_{1y}}{\omega_0} \right) H_{r_2} \left(\frac{\sqrt{2} s_{2y}}{\omega_0} \right) \times \\ \exp \left(-\frac{s_1^2 + s_2^2}{\omega_0^2} \right) \exp \left[-\frac{(s_1 - s_2)^2}{2\sigma_{ij}^2} \right], \quad (2)$$

式中, m 为拓扑荷, A_i 和 A_j 表示光场在 x 方向和 y 方向上的电场分量振幅, B_{ij} 是光场分量间的关联系数, ω_0 表示束腰宽度, σ_{ij} 表示相关空间长度, $H(\cdot)$ 表示 Hermite 多项式, $\binom{\cdot}{\cdot}$ 表示二项式系数。

基于广义惠更斯-菲涅尔原理,随机电磁高斯涡旋光束通过 ABCD 光学系统的交叉谱密度矩阵元表达式为^[23]:

$$W_{ij}(\rho_1, \rho_2, z) = \left(\frac{k}{2\pi B} \right)^2 \iiint W_{ij}(s_1, s_2, 0) \\ ds_{1x} ds_{1y} ds_{2x} ds_{2y} \times \\ \exp \left\{ -\frac{ik}{2B} [A(s_1^2 - s_2^2) - 2(s_1 \rho_1 - s_2 \rho_2) + D(\rho_1^2 - \rho_2^2)] \right\}, \quad (3)$$

式中, $\rho_1 = (\rho_{1x}, \rho_{1y})$, $\rho_2 = (\rho_{2x}, \rho_{2y})$ 是输出平面上的任意两点, $k = 2\pi/\lambda$ 是波数, λ 为波长。将式(2)代入式

(3),并经过一系列积分,可以得到随机电磁高斯涡旋光束在 ABCD 光学系统中传输时交叉谱密度矩阵元的解析表达式为:

$$\begin{aligned}
 W_{ij}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, z) = & \left(\frac{k}{2B}\right)^2 \frac{A_{ij}B_{ij}}{2^{2m}M_1M_2} \left(\frac{1-G^2}{2}\right)^{\frac{m}{2}} \exp\left(\frac{-k^2\rho_2^2}{4M_1B^2}\right) \exp\left[\frac{-ikD}{2B}(\boldsymbol{\rho}_1^2 - \boldsymbol{\rho}_2^2)\right] \times \\
 & \left[\left(\frac{ik\rho_{1x}}{2B\sqrt{M_2}} - \frac{ik\rho_{2x}}{4M_1\sqrt{M_2}B\sigma_{ij}^2}\right)^2\right] \exp\left[\left(\frac{ik\rho_{1y}}{2B\sqrt{M_2}} - \frac{ik\rho_{2y}}{4M_1\sqrt{M_2}B\sigma_{ij}^2}\right)^2\right] \times \\
 & \sum_{r_1=0}^m \sum_{r_2=0}^m \binom{m}{r_1} \binom{m}{r_2} \sum_{d_1=0}^{m-r_1} \sum_{l_1=0}^{\frac{d_1}{2}} \sum_{j_1=0}^{r_2} \sum_{d_2=0}^{\frac{r_2}{2}} \sum_{l_2=0}^{\frac{d_2}{2}} i^{r_2-r_1} (-1)^{l_1+j_1+l_2+j_2} \binom{m-r_2}{d_1} \binom{r_2}{d_2} \times \\
 & \frac{(m-r_1)!}{l_1!(m-r_1-2l_1)!} \frac{d_1!}{j_1!(d_1-2j_1)!} \frac{r_1!}{l_2!(r_2-2l_2)!} \frac{d_2!}{j_2!(d_2-2j_2)!} \left(\frac{2\sqrt{2}}{w_0\sqrt{M_2}}\right)^{m-2l_1-2l_2} \times \\
 & \left[\frac{2(1-G^2)^{-\frac{1}{2}}}{w_0M_1\sigma_{ij}^2\sqrt{M_2}}\right]^{d_1+d_2-2j_1-2j_2} (2i)^{-m-d_1-d_2+2l_1+2l_2+2j_1+2j_2} \times \\
 & H_{m-r_2-d_1}\left(-\frac{ik\rho_{2x}}{w_0M_1B\sqrt{1-G^2}}\right) H_{m-r_1+d_1-2l_1-2j_1}\left(\frac{k\rho_{2x}}{4\sqrt{M_2}BM_1\sigma_{ij}^2} - \frac{k\rho_{1x}}{2B\sqrt{M_2}}\right) \times \\
 & H_{r_2-d_2}\left(-\frac{ik\rho_{2y}}{w_0M_1B\sqrt{1-G^2}}\right) H_{r_1+d_2-2l_2-2j_2}\left(\frac{k\rho_{2y}}{4\sqrt{M_2}BM_1\sigma_{ij}^2} - \frac{k\rho_{1y}}{2B\sqrt{M_2}}\right), \quad (4)
 \end{aligned}$$

式中,

$$M_1 = \frac{1}{w_0^2} + \frac{1}{2\sigma_{ij}^2} - \frac{ikA}{2B}, \quad (5a)$$

$$M_2 = \frac{1}{w_0^2} + \frac{1}{2\sigma_{ij}^2} + \frac{ikA}{2B} - \frac{1}{4M_1\sigma_{ij}^4}, \quad (5c)$$

$$G = \frac{\sqrt{2}}{w_0\sqrt{M_1}}. \quad (5c)$$

在近轴条件下,径向梯度折射率光纤的 ABCD 传输矩阵为^[12]:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta z) & \frac{\sin(\beta z)}{n_0\beta} \\ -n_0\beta\sin(\beta z) & \cos(\beta z) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中, β 是梯度折射率系数, n_0 是纤芯中心折射率。

设包层折射率为 n_1 ,则 β 可表示为^[12]:

$$\beta = \frac{1}{R_0} \left[1 - \frac{n_1^2}{n_0^2}\right]^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

本文中研究的梯度折射率光纤的纤芯是掺杂硅的二氧化硅(纤芯中心掺杂率为7.9%)、包层是纯二氧化硅。光纤折射率通过塞尔方程计算^[12]为:

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{f=1}^3 \frac{B_f\omega_f^2}{\omega_f^2 - \omega^2}, \quad (8)$$

式中, $\omega_f = 2\pi c/\lambda_f$, c 为光速。

对于纯二氧化硅有 $B_1 = 0.6961663$, $B_2 = 0.4079426$, $B_3 = 0.8974794$, $\lambda_1 = 0.0684043 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0.1162414 \mu\text{m}$, $\lambda_3 = 9.896161 \mu\text{m}$ 。对于掺杂7.9%氧化锗的二氧化硅有 $B_1 = 0.7136824$, $B_2 = 0.4254807$, $B_3 = 0.8964226$, $\lambda_1 = 0.0617167 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0.1270814 \mu\text{m}$, $\lambda_3 = 9.896161 \mu\text{m}$ 。光纤的纤芯半径为 $25 \mu\text{m}$,通过计算可得出 $n_0 = 1.46977$, $n_1 = 1.45702$, $\beta = 5.257 \text{ mm}^{-1}$,从而确定光纤的 ABCD

传输矩阵。

光束在传输过程中的光谱相干度表示为^[11]:

$$\begin{aligned}
 \mu(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, z) = & \frac{\text{Tr} \mathbf{W}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, z)}{\sqrt{\text{Tr} \mathbf{W}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_1, z)} \sqrt{\text{Tr} \mathbf{W}(\boldsymbol{\rho}_2, \boldsymbol{\rho}_2, z)}}, \quad (9)
 \end{aligned}$$

式中,Tr 为矩阵的迹。

将式(4)代入式(9)中数值仿真随机电磁高斯涡旋光束通过径向梯度折射率光纤的光谱相干度分布,并讨论初始光束的参数和梯度折射率系数对光谱相干度分布的影响。

3 数值模拟与分析

图1为随机电磁高斯涡旋光束通过径向梯度折射率光纤的光谱相干度分布图,计算参数为 $m=1$, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $A_x = A_y = \sqrt{0.5}$, $B_{xx} = B_{yy} = 1$, $B_{xy} = 0.3 \exp(i\pi/3)$, $B_{yx} = B_{xy}^*$, $w_0 = 100/k$, $\sigma_{xx} = 100/k$, $\sigma_{yy} = 125/k$, $\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = 150/k$, $\boldsymbol{\rho}_1 = -\boldsymbol{\rho}_2$ 。光束参数的选择满足限定性条件^[24]。图1(a)是随机电磁高斯涡旋光束通过径向梯度折射率光纤的光谱相干度分布剖面图,图1(b1)~(b9)分别对应图1(a)中随机电磁高斯涡旋光束在 $z=aL/2$ ($a=0,1,2,\dots,8$)处的光谱相干度分布横截面图,图1(b1)~图1(b9)中的实线为 $y=0$ 时对应的光谱相干度变化曲线,从图1(a)可以得出随机电磁高斯涡旋光束在径向梯度折射率光纤中传输时光谱相干度变化呈周期性,周期为 $L = 597.57 \mu\text{m}$ 。光谱相干度沿轴向关于焦平面($z=L/2$)对称分布,沿径向关于光纤纤芯中心对称分布,经过一个传输周期后光谱相干度会恢复到初始分布状态。在一个传输周期内,由图1(b1)、(b3)、(b5)、(b7)和(b9)可知光谱相干度在源处和周期处沿径向

呈高斯分布,由图 1(b2)、(b4)、(b6)和(b8)可知在焦

平面处光谱相干度沿径向呈振荡分布,且存在暗环。

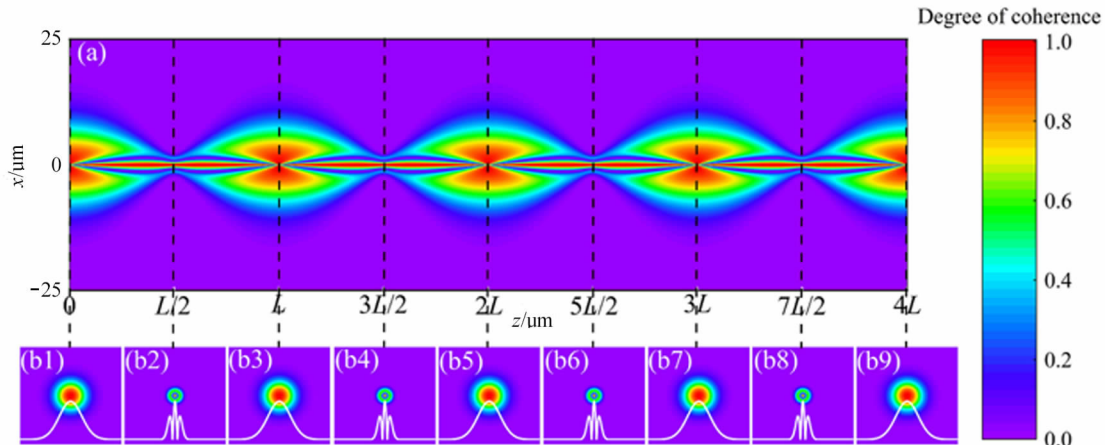


图 1 随机电磁高斯涡旋光束通过径向梯度折射率光纤的光谱相干度分布:

(a) 随机电磁高斯涡旋光束的光谱相干度分布剖面图;

(b1)—(b9) 分别对应(a)中随机电磁高斯涡旋光束在不同距离处的光谱相干度分布横截面图

Fig. 1 Distribution in the spectral degree of coherence for random electromagnetic Gaussian vortex beam propagating through radial gradient-index fiber: (a) The distribution profile in the spectral degree of coherence for the beam; (b1)—(b9) The distributions in the spectral degree of coherence for the beam at different distances in (a)

图 2 为不同拓扑荷数 m 的随机电磁高斯涡旋光束通过径向梯度折射率光纤的光谱相干度分布图,图 2(a)、(c)和(e)分别为 $m=1,2,3$ 时光束通过径向梯度折射率光纤的光谱相干度分布剖面图,图 2(b)、(d)和(f)分别为 $m=1,2,3$ 时 $z=bL/4$ ($b=0,1,2,3,4$) 处的光谱相干度分布横截面图,其他计算参数与图 1 相同,图 2 使用的颜色标尺与图 1 相同。从图 2(a)、(c)和(e)可以得出不同拓扑荷数 m 的光束,其光谱相干度分布均具有相同的周期和对称性, z 轴上的光谱相干度始终保持为最大值。从图 2(b1)、(d1)和(f1)可以得出在一个传输周期内,不同拓扑荷 m 的光束在源处的光谱相干度分布相同。从图 2(b5)、(d5)和(f5)可以得出周期处光谱相干度分布与源处相同。图 2(b2)—(b4)中各有 1 个暗环,图 2(d2)—(d4)中各有 2 个暗环,图 2(f2)—(f4)中各有 3 个暗环,由此可以得出光谱相干度分布中出现的暗环个数与拓扑荷数 m 相同,可通过检测暗环个数获得光束的拓扑荷数。

图 3 为不同自相关空间长度 σ_{xx} 的随机电磁高斯涡旋光束通过径向梯度折射率光纤的光谱相干度分布图,图 3(a)—(e)分别为光束在 $z=bL/4$ ($b=0,1,2,3,4$) 处的光谱相干度图,实线对应 $\sigma_{xx}=100/k$ 、虚线对应 $\sigma_{xx}=125/k$ 、点划线对应 $\sigma_{xx}=150/k$,其他计算参数与图 1 相同。由图 3 可知,自相关空间长度

σ_{xx} 的不同取值会影响光谱相干度沿径向的变化速度,在源处和周期处光谱相干度沿径向逐渐减小, σ_{xx} 取值越大光谱相干度的衰减速度越慢。在 $z=L/4$ 和 $z=3L/4$ 处光谱相干度沿径向不再是均匀变化而是呈振荡分布, σ_{xx} 越大光谱相干度的极大值就越大。在焦平面处 σ_{xx} 对光谱相干度的影响最小。除此之外,从图 3 可以更加明确地得出光谱相干度沿轴向关于焦平面对称分布。

图 4 为不同互相关空间长度 σ_{xy} 的随机电磁高斯涡旋光束通过径向梯度折射率光纤的光谱相干度分布图,图 4(a)—(e)分别为光束在 $z=bL/4$ ($b=0,1,2,3,4$) 处的光谱相干度图,实线对应 $\sigma_{xy}=125/k$ 、虚线对应 $\sigma_{xy}=150/k$ 、点划线对应 $\sigma_{xy}=175/k$,其他计算参数与图 1 相同。从图 4 可以得出光束在径向梯度折射率光纤中传输时,在一个传输周期内的不同位置处,互相关空间长度 σ_{xy} 不同取值的三条曲线完全重合,说明互相关空间长度 σ_{xy} 的取值对光谱相干度变化完全无影响。图 4 所得结果与式(9)相符,光谱相干度的取值由交叉谱密度矩阵的迹决定,迹为 W_{xx} 和 W_{yy} 的和,而 W_{xx} 和 W_{yy} 分别与 σ_{xx} 和 σ_{yy} 有关,与 σ_{xy} 无关。

图 5 为不同波长 λ 的随机电磁高斯涡旋光束通过径向梯度折射率光纤的光谱相干度分布剖面图,图 5(a)、(b)和(c)中波长分别为 $0.564 \mu\text{m}$ 、 0.6328

μm , $1.550\ \mu\text{m}$, 其他计算参数与图1相同, 图5使用的颜色标尺与图1相同。从图5(a)、(b)和(c)可以得出不同波长的光束在径向梯度折射率光纤中传输时, 随着波长 λ 的增大, 光谱相干度的分布宽度会变宽, 在焦平面处光谱相干度的分布宽度受波长的影响最小。在一个传输周期内波长越长, 光谱相干度的分布宽度变化越大, 说明光束的波长越长, 其光谱相干度受径向梯度折射率光纤的聚焦作用越明显。

图6为随机电磁高斯涡旋光束通过不同梯度折

射率系数 β 径向梯度折射率光纤的光谱相干度分布剖面图, 图6(a)、(b)和(c)中梯度折射率系数分别为 $5\ \text{mm}^{-1}$, $7\ \text{mm}^{-1}$, $9\ \text{mm}^{-1}$, 其他计算参数与图1相同, 图6使用的颜色标尺与图1相同。从图6(a)、(b)和(c)可以得出传输相同的距离时, 图6(a)中有4个完整周期, 图6(b)中有6个完整周期, 图6(c)中有8个完整周期, 说明梯度折射率系数 β 会改变光谱相干度的变化周期, β 的值越大光谱相干度的周期越短, 周期 $L = \pi/\beta$ 。

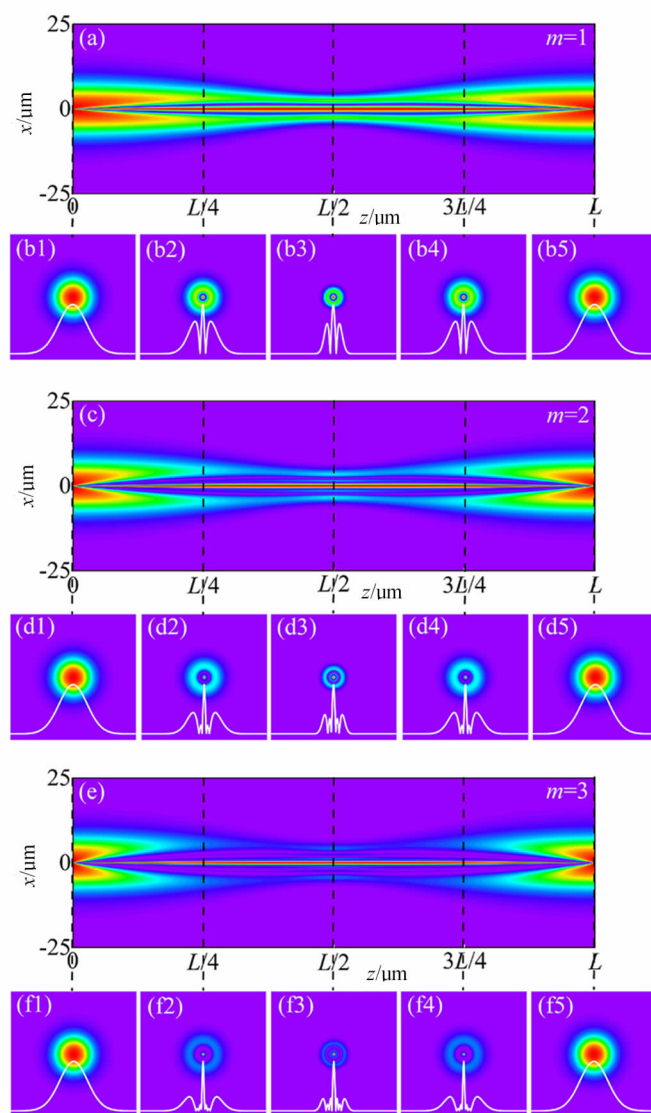


图2 不同拓扑荷数 m 的随机电磁高斯涡旋光束通过径向梯度折射率光纤的光谱相干度分布:

(a) $m=1$; (c) $m=2$; (e) $m=3$; (b1)—(b5), (d1)—(d5), (f1)—(f5)分别对应(a), (c), (e)中随机电磁高斯涡旋光束在不同距离处的光谱相干度分布横截面图

Fig. 2 Distribution in the spectral degree of coherence for random electromagnetic Gaussian vortex beams with different topological charge m propagating through radial gradient-index fiber:

(a) $m=1$; (c) $m=2$; (e) $m=3$; (b1)—(b5), (d1)—(d5), (f1)—(f5)

The distributions in the spectral degree of coherence for the beams at different distances in (a), (c) and (e)

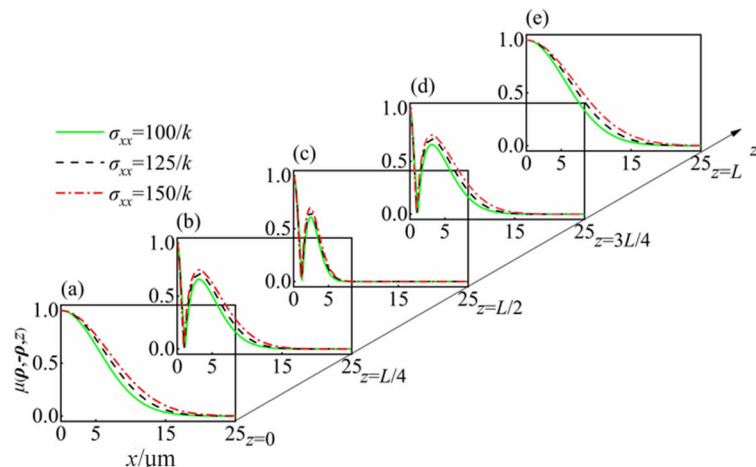


图 3 不同自相关空间长度 σ_{xx} 的随机电磁高斯涡旋光束通过径向梯度折射率光纤的光谱相干度分布：

(a) — (e) 为不同传输距离处的光谱相干度分布图

Fig. 3 Distribution in the spectral degree of coherence for random electromagnetic Gaussian vortex beams with different spatial correlation length σ_{xx} propagating through radial gradient-index fiber;

(a) — (e) The distribution in the spectral degree of coherence for the beam at different distances

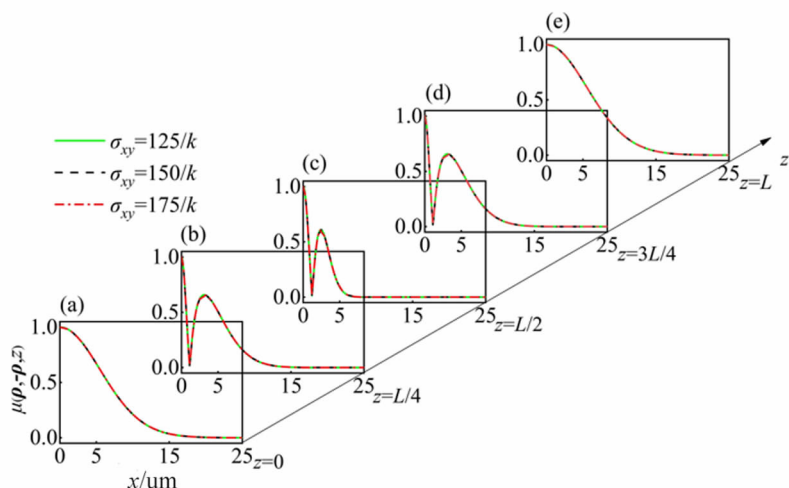
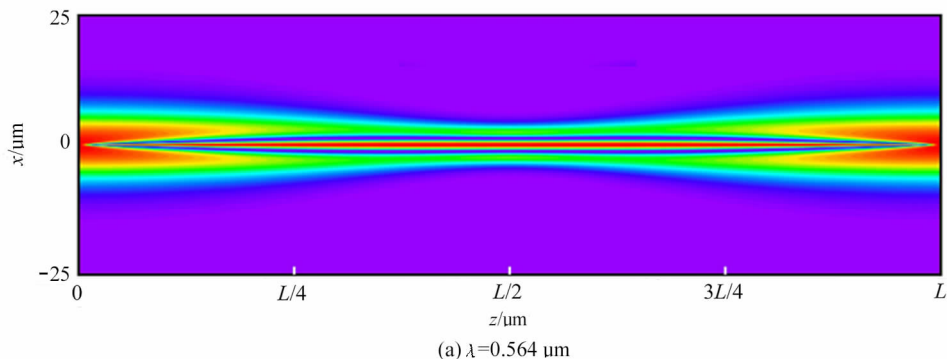


图 4 不同互相关空间长度 σ_{xy} 的随机电磁高斯涡旋光束通过径向梯度折射率光纤的光谱相干度分布：

(a) — (e) 为不同传输距离处的光谱相干度分布图

Fig. 4 Distribution in the spectral degree of coherence for random electromagnetic Gaussian vortex beams with different spatial correlation length σ_{xy} propagating through radial gradient-index fiber;

(a) — (e) The distribution in the spectral degree of coherence for the beam at different distances



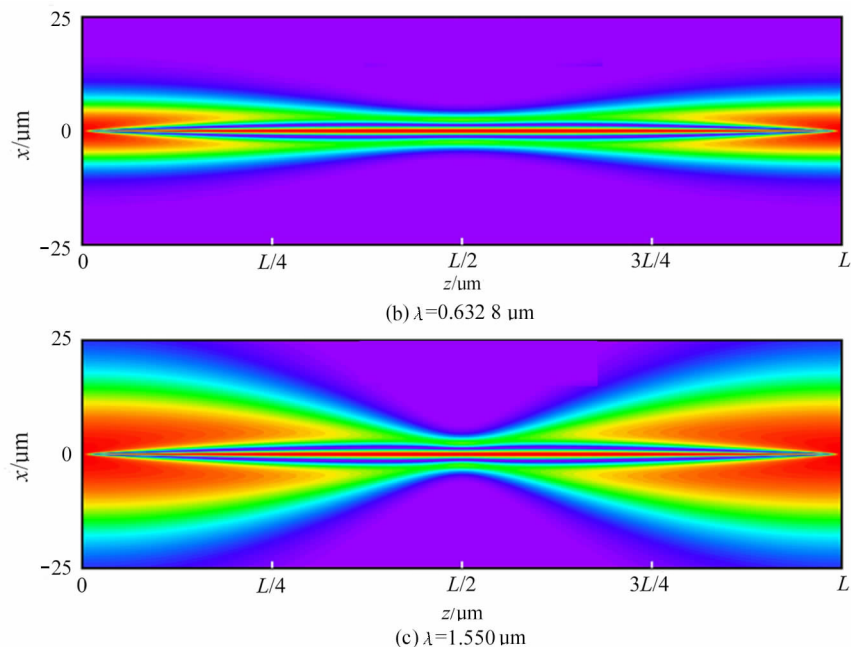


图5 不同波长 λ 的随机电磁高斯涡旋光束通过径向梯度折射率光纤的光谱相干度分布

Fig. 5 Distribution in the spectral degree of coherence for random electromagnetic Gaussian vortex beams with different wavelength λ propagating through radial gradient-index fiber

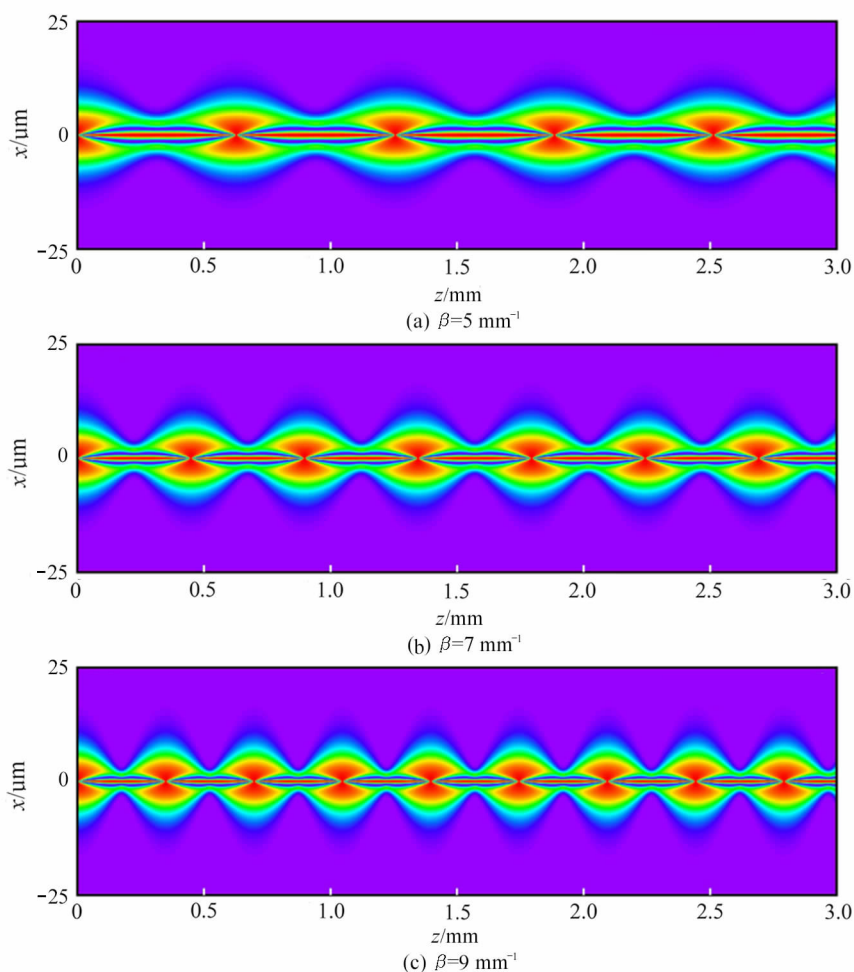


图6 随机电磁高斯涡旋光束通过不同梯度折射率系数 β 的径向梯度折射率光纤的光谱相干度分布

Fig. 6 Distribution in the spectral degree of coherence for random electromagnetic Gaussian vortex beam propagating through radial gradient-index fiber with different refractive index coefficient β

4 结 论

本文基于广义惠更斯菲涅尔原理,推导了随机电磁高斯涡旋光束在径向梯度折射率光纤传输中交叉谱密度矩阵元的解析表达式,并用数值仿真了随机电磁高斯涡旋光束在径向梯度折射率光纤中光谱相干度的变化,详细分析了初始光束的参数和梯度折射率系数对光谱相干度变化的影响。研究结果表明随机电磁高斯涡旋光束在径向梯度折射率光纤中传输时,光谱相干度分布具有周期性,在一个传输周期内,光谱相干度沿轴向关于焦平面对称分布,沿径向分布关于光纤纤芯中心对称,在源处光谱相干度沿径向呈高斯分布,在焦平面处光谱相干度沿径向呈非均匀分布,经过一个传输周期后光谱相干度会恢复到初始分布状态。光谱相干度分布中存在的暗环数与拓扑荷数 m 相同,可用此方法检测随机电磁高斯涡旋光束的拓扑荷数。自相关空间长度 σ_{xx} 的变化会改变光谱相干度沿径向的变化速度,且在焦平面处对光谱相干度的作用最小,互相关空间长度 σ_{xy} 对光谱相干度的变化完全无影响。光束波长越长,其光谱相干度分布受径向梯度折射率光纤的聚焦作用越明显,光纤的梯度折射率系数 β 会改变光谱相干度的变化周期。此研究结果对随机电磁涡旋光束在光纤中的传输具有指导作用,在高速率大容量光纤保密通信方面有参考价值。

参考文献:

- [1] DUAN M L, ZHANG H H, LI J H, et al. Trapping two types of particles using a focused partially coherent modified bessell-gaussian beam[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 110: 308-314.
- [2] XIE Z W, GAO S C, LEI T, et al. Integrated (de)multiplexer for orbital angular momentum fiber communication[J]. Photonics Research, 2018, 6(7): 743-749.
- [3] LEE J H, FOO G, JOHNSON E G, et al. Experimental verification of an optical vortex coronagraph[J]. Physical Review Letters, 2006, 97(5): 053901.
- [4] MAIR A, VAZIRI A, WEIHS G, et al. Entanglement of the orbital angular momentum states of photons[J]. Nature, 2001, 412: 313-316.
- [5] DONG M, ZHAO C L, CAI Y J, et al. Partially coherent vortex beams: Fundamentals and applications[J]. Science China: Physics, Mechanics and Astronomy, 2021, 64(2): 224201.
- [6] GUO X, LI J H, DUAN M L, et al. Propagation of gaussian vortex beam in gain and absorbing media[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2021, 32(6): 674-679.
- [7] 郭鑫, 李晋红, 段美玲, 等. 高斯涡旋光束在增益和吸收介质中的传输特性[J]. 光电子 · 激光, 2021, 32(6): 674-679.
- [8] WANG J, YANG S, GUO M J, et al. Change in phase singularities of a partially coherent gaussian vortex beam propagating in a grin fiber[J]. Optics Express, 2020, 28(4): 4661-4673.
- [9] ZENG J, CHEN Y H, LIU X L, et al. Research progress on partially coherent vortex beams[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0126004.
- [10] 曾军, 陈亚红, 刘显龙, 等. 部分相干涡旋光束研究进展[J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0126004.
- [11] ZHU S J. Theoretical and experimental study of scalar and vectorial partially coherent beams[D]. Suzhou: Suzhou University, 2014: 2.
- [12] 朱时军. 标量和矢量部分相干光束的理论及实验研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2014: 2.
- [13] WOLF E. Introduction to the theory of coherence and polarization of light[M]. Pu J X, Transl. Beijing: Peking University Press, 2014: 28-29.
- [14] 埃米尔·沃尔夫. 光的相干与偏振理论导论[M]. 蒲继雄, 译. 北京: 北京大学出版社, 2014: 28-29.
- [15] WOLF E. Unified theory of coherence and polarization of random electromagnetic beams[J]. Physics Letters A, 2003, 312(5): 263-267.
- [16] ROCHOWDHURY H, AGRAWAL G P, WOLF E. Changes in the spectrum, in the spectral degree of polarization, and in the spectral degree of coherence of a partially coherent beam propagating through a gradient-index fiber[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2006, 23(4): 940-948.
- [17] WU G F, CAI Y J. Modulation of spectral intensity, polarization and coherence of a stochastic electromagnetic beam[J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8700-8714.
- [18] XU J, ZHAO D M. Propagation of a stochastic electromagnetic vortex beam in the oceanic turbulence[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 57: 189-193.
- [19] SAHIN S, ZHANG M H, CHEN Y H, et al. Transmission of a polychromatic electromagnetic multi-gaussian schell-model beam in an inhomogeneous gradient-index fiber[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2018, 35(9): 1604-1611.
- [20] DUAN M L, WU Y G, ZHANG Y M, et al. Coherence properties of a random electromagnetic vortex beam propagating in biological tissues[J]. Journal of Modern Optics, 2019, 66(1): 59-66.

- [17] SU J B, XU C A, XU H F, et al. Evolution properties of the radially polarized laguerre-gaussian correlated schell-model beams propagating in uniaxial crystals[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2020, 37(4): 529-539.
- [18] GARLOS-REINO C, PEREZ M V, BAO C. Gradient-index optics fundamentals and applications[M]. Berlin: Springer, 2002: 209.
- [19] PONOMARENKO S A. Self-imaging of partially coherent light in graded-index media[J]. Optics Letters, 2015, 40(4): 566-568.
- [20] KUNKEL W M, LEGER J R. Gradient-index design for mode conversion of diffracting beams[J]. Optics Express, 2016, 24(12): 13480-13488.
- [21] FLAES D E B, STOPKA J, TURTAEV S, et al. Robustness of light-transport processes to bending deformations in graded-index multimode waveguides[J]. Physical Review Letters, 2018, 120(23): 233901.
- [22] YANG C, GUO X, GUO M J, et al. Influence of gain or absorption media on transmission of partially coherent vortex beams[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2021, 38(5): 675-682.
- [23] SIEGMAN A E. Lasers[M]. California: University Science Books, 1986: 777-811.
- [24] ROYCHOWDHURY H, KOROTKOVA O. Realizability conditions for electromagnetic gaussian schell-model sources[J]. Optics Communications, 2005, 249(4-6): 379-385.

作者简介:

李晋红 (1980—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光传输与控制 and 奇点光学方面的研究。