

非均匀拉盖尔-高斯关联光束及其传输特性

余佳益 陈亚红 蔡阳健

Nonuniform Laguerre-Gaussian correlated beam and its propagation properties

Yu Jia-Yi Chen Ya-Hong Cai Yang-Jian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 214202 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.214202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.214202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

傅里叶望远镜重构图像虚像分析

[Analysis on reconstruction of virtual images of Fourier telescopy](#)

物理学报.2015, 64(18): 184205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184205>

部分相干径向偏振光束传输中相干性研究

[Research on the coherence of partially coherent radially polarized beam during propagation](#)

物理学报.2015, 64(13): 134201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134201>

抑制孔径间距误差影响的相干场成像质量提升方法研究

[Improving coherent field imaging quality by suppressing the influence of transmitting aperture spacing error](#)

物理学报.2015, 64(12): 124203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124203>

第三代同步辐射光源 X 射线相干性测量研究

[Coherence of X-ray in the third synchrotron radiation source](#)

物理学报.2014, 63(10): 104202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104202>

相干场成像原理局限性分析

[Analyses on limitations of coherent field imaging principle](#)

物理学报.2014, 63(10): 104203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104203>

非均匀拉盖尔-高斯关联光束及其传输特性*

余佳益¹⁾²⁾ 陈亚红¹⁾²⁾ 蔡阳健^{1)2)†}

1) (苏州大学物理与光电·能源学部, 苏州 215000)

2) (苏州大学, 苏州纳米科技协同创新中心, 苏州 215000)

(2016年6月5日收到; 2016年7月5日收到修改稿)

提出了一种新型特殊关联部分相干光束即非均匀拉盖尔-高斯关联光束, 其在 x 和 y 方向上的关联结构函数分别为非均匀关联和拉盖尔-高斯关联函数. 基于广义惠更斯-菲涅耳衍射积分公式, 推导了这种光束交叉谱密度函数在自由空间以及大气湍流中的传输式, 并计算了该光束经过自由空间和湍流大气传输的光强分布和关联结构函数分布演化特性. 研究发现, 该光束光强分布在传输过程中展现出自聚焦、自偏移和自分裂等奇异特性, 同时发现控制关联结构函数参数可以有效地降低湍流大气的影响. 关联结构调控为操控光束传输行为提供了一种新颖而有效的手段, 在大气激光通信、微粒操控等领域具有重要的应用前景.

关键词: 部分相干光束, 关联结构, 自聚焦, 自分裂

PACS: 42.25.Kb, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.65.214202

1 引言

在过去的几十年里, 部分相干光束得到了广泛的研究, 并且被应用在很多领域, 如激光核聚变^[1]、激光扫描^[2]、“鬼”成像^[3]、微粒操控^[4]、大气激光通信^[5]、超分辨成像^[6]等. 但是以往人们所研究的部分相干光束其关联结构函数大部分都是满足高斯分布的^[7]. 自从Gori等^[8,9]在理论上提出构建部分相干光束关联结构函数的充分条件, 一系列具有特殊关联结构函数的部分相干光束被大量提出和产生^[10-18]. 近年来的研究表明, 具有特殊关联结构函数的部分相干光束具有许多奇异性质, 例如: 非均匀关联部分相干光束在传输过程中展现出自聚焦和自偏移特性^[10]; 厄米-高斯关联部分相干光束在传输过程中展现出自分裂特性^[11,12]; 多高斯关联部分相干光束在远场展现出平顶光强分布^[13]; 具有相干格点分布的部分相干光束在传输过程中呈现光强格点分布^[14,15]; 拉盖尔-高斯关联部分相干光束在传输过程中呈现自整形效应, 并且经过聚焦后可以在焦点附近产生三维可控光学囚

笼^[16-18]; 具有特殊关联结构函数的矢量部分相干光束具有偏振自重构特性^[19]. 由于其奇特的传输性质, 特殊关联部分相干光束在大气激光通信、图像传输、光学成像、粒子俘获、微粒操控等领域具有重要的应用价值^[10-25]. 之前有关特殊关联部分相干光束的研究大都设定其在 x 和 y 方向上的关联结构函数形式是相同的或者各向同性的. 本文引入一种新型特殊关联部分相干光束, 即非均匀拉盖尔-高斯关联光束, 其在 x 和 y 方向上的关联结构函数是不同的(即关联结构函数是各向异性的), 分别为非均匀关联和拉盖尔-高斯关联函数. 同时研究了其经过自由空间和湍流大气的传输性质, 发现该光束具有自聚焦、自偏移和自分裂等奇异传输特性.

2 非均匀拉盖尔-高斯关联光束理论模型

在空间-频率域中, 为满足非负正定条件, 部分相干光束交叉光谱密度函数应可以表示为如下积

* 国家杰出青年科学基金(批准号: 11525418)、国家自然科学基金(批准号: 11274005)和江苏高校优势学科建设工程资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yangjiancai@suda.edu.cn

分形式 [8,9]:

$$W(r_1, r_2) = \int p(v)H^*(r_1, v)H(r_2, v)d^2v, \quad (1)$$

其中 H 为任意函数, $p(v)$ 为非负函数, $r_1 \equiv (x_1, y_1)$ 和 $r_2 \equiv (x_2, y_2)$ 表示光源处的位置坐标, $v \equiv (v_x, v_y)$ 表示非相干光的位置坐标. 其关联结构函数 (也称相干度分布函数) 可以表示为

$$\mu(r_1, r_2) = \frac{W(r_1, r_2)}{\sqrt{W(r_1, r_1)W(r_2, r_2)}}. \quad (2)$$

通过选择合适的函数 H 和 p , 我们可以构建物理上可实现的交叉光谱密度函数及相应的关联结构函数.

以往人们所研究的部分相干光束的关联结构函数基本上都是各向同性的. 本文研究一种普适的部分相干光束, 其 x 方向的关联结构函数不同于 y 方向上的关联结构函数 (即关联结构函数是各向异性的). 为研究关联结构函数各向异性的部分相干光束, 我们把 (1) 式变成如下形式:

$$\begin{aligned} W(r_1, r_2) &= \int p_x(v_x)H_x^*(x_1, v_x)H_x(x_2, v_x)dv_x \\ &\quad \times \int p_y(v_y)H_y^*(y_1, v_y)H_y(y_2, v_y)dv_y. \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 式是关联结构各向异性的部分相干光束所需满足的非负正定条件.

(3) 式可以表示成如下等效形式:

$$\begin{aligned} W(r_1, r_2) &= \int W'_x(v_{x1}, v_{x2})H_x^*(x_1, v_{x1}) \\ &\quad \times H_x(x_2, v_{x2})dv_{x1}dv_{x2} \\ &\quad \times \int W'_y(v_{y1}, v_{y2})H_y^*(y_1, v_{y1}) \\ &\quad \times H_y(y_2, v_{y2})dv_{y1}dv_{y2}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中,

$$\begin{aligned} W'_i(v_{i1}, v_{i2}) &= \sqrt{I_i(v_{i1})I_i(v_{i2})}\delta(v_{i1} - v_{i2}) \\ &\quad (i = x, y), \end{aligned} \quad (5)$$

其中 δ 表示狄拉克 δ 函数. 从 (4) 和 (5) 式可以看出, 关联结构函数各向异性的部分相干光束可以通过光强各向异性的非相干光源传输产生. 这里 I_i 表示非相干光源的光强分布, H_i 表示光路的响应函数. 通过调控 I_i 和 H_i , 我们可以调控交叉光谱密度函数和对应的关联结构函数.

基于 (3), (4) 和 (5) 式, 我们引入一种关联结构函数各向异性的部分相干光束, 即非均匀拉盖尔-高斯关联光束, 其关联结构函数在 x 方向上为非均匀关联函数 [10], 而在 y 方向上为拉盖尔-高斯关联函数 [16-18]. 为得到非均匀拉盖尔-高斯关联光束, 在 (3) 式中, 我们令

$$p(v_x) = (\pi a^2)^{-1/2} \exp\left(-\frac{v_x^2}{a^2}\right), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} H_x(x, v_x) &= \exp\left(-\frac{x^2}{4\sigma_0^2}\right) \\ &\quad \times \exp[-ik(x - a_0)^2 v_x], \end{aligned} \quad (7)$$

$$p(v_y) = \left[H_m\left(\frac{\sqrt{2}v_y}{\omega_{0y}}\right) \right]^2 \exp\left(-\frac{2v_y^2}{\omega_{0y}^2}\right), \quad (8)$$

$$H_y(y, v_y) = \exp\left(-\frac{y^2}{4\sigma_0^2}\right) \exp(-ikyv_y), \quad (9)$$

其中, a 为大于 0 的实常数, 波数 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长, σ_0 和 a_0 为实常数, 光束宽度 $\omega_{0y} = \lambda f/(\pi\delta_{0y})$, H_m 表示 m 阶的厄米多项式. 经过积分运算, 得到非均匀拉盖尔-高斯关联光束在光源处的交叉谱密度, 即

$$\begin{aligned} W(r_1, r_2) &= \sqrt{I(r_1)I(r_2)}\mu_x(x_1 - x_2)\mu_y(y_1 - y_2), \end{aligned} \quad (10)$$

这里, $I(r)$ 为光源处的强度, μ_x 和 μ_y 分别为 x 和 y 方向上的关联结构函数, 并且,

$$I(r) = \exp(-r^2/2\sigma_0^2), \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \mu_x(x_1, x_2) &= \exp\{-(x_2 - a_0)^2 \\ &\quad - (x_1 - a_0)^2\} / \omega_x^4, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \mu_y(y_1, y_2) &= L_m[(y_2 - y_1)^2/\delta_{0y}^2] \\ &\quad \times \exp[-(y_2 - y_1)^2/2\delta_{0y}^2], \end{aligned} \quad (13)$$

其中 L_m 表示 m 阶拉盖尔多项式.

图 1 为非均匀拉盖尔-高斯关联光束在光源处的归一化关联结构函数分布图. 初始光束的参量设定为 $\lambda = 1064 \text{ nm}$, $\sigma_0 = 10 \text{ mm}$, $\omega_x = 6 \text{ mm}$, $\delta_{0y} = 1 \text{ mm}$ 和 $f = 600 \text{ mm}$. 我们发现, 非均匀拉盖尔-高斯关联光束的关联结构函数呈现出各向异性特性, 当 $a_0 > 0$ 时, 在 x 方向上主斑 (主峰) 的右侧会出现一组对称的旁斑 (侧峰); 当 m 增大时, y 方向上的旁斑会随之增加. 各向异性关联结构函数将引发部分相干光束众多奇异传输特性.

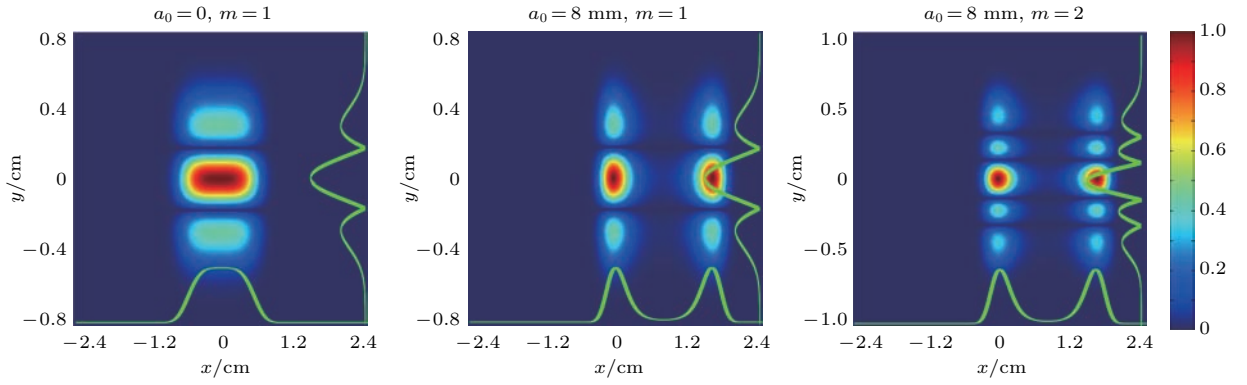


图1 (网刊彩色) 非均匀拉盖尔-高斯关联光束在光源处归一化关联结构函数分布

Fig. 1. (color online) Normalized density plot of the correlation function of a nonuniform Laguerre-Gaussian correlated beam in the source plane.

拉盖尔-高斯关联部分相干光束^[25]和非均匀关联部分相干光束^[26]通过空间光调制器已经分别在实验上产生,基本原理是在空间光调制器上加载计算全息图产生.同理,为产生非均匀拉盖尔-高斯关联部分相干光束,我们可以设计各向异性的计算全息图加载在空间光调制器,使得产生的部分相干光束 x 方向为非均匀关联,而 y 方向为拉盖尔-高斯关联.

3 非均匀拉盖尔-高斯关联光束传输公式

过去几年里,关联结构函数各向同性的部分相干光束经过自由空间和湍流大气的传输特性已经得到了充分的研究^[10–22].本节我们将推导非均匀拉盖尔-高斯关联光束的交叉光谱密度函数经过自由空间和大气湍流的传输公式.

基于拓展惠更斯-菲涅耳衍射积分公式,部分相干光束经过弱湍流大气传输,其交叉光谱密度函数可以表示为^[27–29]

$$\begin{aligned}
 & W(\rho_1, \rho_2) \\
 &= \frac{1}{\lambda^2 z^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W(r_1, r_2) \\
 & \quad \times \exp \left[-\frac{ik}{2z}(r_1 - \rho_1)^2 + \frac{ik}{2z}(r_2 - \rho_2)^2 \right] \\
 & \quad \times \langle \exp[\Psi(r_1, \rho_1) + \Psi^*(r_2, \rho_2)] \rangle d^2 r_1 d^2 r_2, \quad (14)
 \end{aligned}$$

其中 $W(r_1, r_2)$ 和 $W(\rho_1, \rho_2)$ 分别光源面和接收面交叉光谱密度函数, $\rho_1 \equiv (\rho_{1x}, \rho_{1y})$ 和 $\rho_2 \equiv (\rho_{2x}, \rho_{2y})$ 是接收面上的任意两点坐标, $dr_1 dr_2 =$

$dx_1 dy_1 dx_2 dy_2$. (14)式中的统计平均表达式为^[27–29]

$$\begin{aligned}
 & \langle \exp[\Psi(r_1, \rho_1) + \Psi^*(r_2, \rho_2)] \rangle \\
 &= \exp \left\{ -\frac{\pi^2 k^2 z}{3} \times [(\rho_1 - \rho_2)^2 \right. \\
 & \quad \left. + (\rho_1 - \rho_2)(r_1 - r_2) + (r_1 - r_2)^2] T \right\}, \quad (15)
 \end{aligned}$$

其中, $T = \int_0^{\infty} \kappa^3 \Phi(\kappa) d\kappa$, $\Phi(\kappa)$ 表示湍流大气的折射率起伏强度谱. 本文我们选择Tatarskii谱描述折射率起伏强度谱^[27], 即

$$\Phi(\kappa) = 0.033 C_n^2 \kappa^{-11/3} \exp(\kappa^2 / \kappa_m^2), \quad (16)$$

其中, C_n^2 表示折射率起伏的结构常数, $\kappa_m = 5.92/l_0$, l_0 表示湍流的内尺寸. 当 $C_n^2 = 0$ 时, (14)式退化为自由空间中交叉光谱密度函数传输积分公式.

非均匀拉盖尔-高斯关联经过湍流大气的传输公式,我们将(3)式和(6)–(9)式代入到(14)式,为了使积分运算简化,交换积分次序, (14)式等效为

$$\begin{aligned}
 & W(\rho_1, \rho_2) \\
 &= \int p(v_x) p(v_y) W_v(\rho_1, \rho_2) dv_x dv_y, \quad (17)
 \end{aligned}$$

其中,

$$\begin{aligned}
 & W_v(\rho_1, \rho_2) \\
 &= W_{vx}(\rho_{1x}, \rho_{2x}) W_{vy}(\rho_{1y}, \rho_{2y}), \quad (18) \\
 & W_{vx}(\rho_{1x}, \rho_{2x}) \\
 &= \frac{k}{2\pi z} \int H_0^*(x_1, v_x) H_0(x_2, v_x) \\
 & \quad \times \exp \left[-ik \frac{(\rho_{1x} - x_1)^2 - (\rho_{2x} - x_2)^2}{2z} \right]
 \end{aligned}$$

$$\times \exp \left\{ -\frac{\pi^2 k^2 z}{3} [(\rho_{1x} - \rho_{2x})^2 + (y_1 - y_2)^2] T \right\} dy_1 dy_2. \quad (20)$$

$$\begin{aligned} &+ (\rho_{1x} - \rho_{2x})(x_1 - x_2) \\ &+ (x_1 - x_2)^2 T \} dx_1 dx_2, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} &W_{vy}(\rho_{1y}, \rho_{2y}) \\ &= \frac{k}{2\pi z} \int H_0^*(y_1, v_y) H_0(y_2, v_y) \\ &\times \exp \left[-ik \frac{(\rho_{1y} - y_1)^2 - (\rho_{2y} - y_2)^2}{2z} \right] \\ &\times \exp \left\{ -\frac{\pi^2 k^2 z}{3} \times [(\rho_{1y} - \rho_{2y})^2 \right. \\ &\left. + (\rho_{1y} - \rho_{2y})(y_1 - y_2) \right. \end{aligned}$$

(19) 和 (20) 式经过积分运算, 得到

$$\begin{aligned} &W_{vx}(\rho_{1x}, \rho_{2x}) \\ &= \frac{\sigma_0}{\eta_x} \exp \left[-\left(\frac{ik}{2z} + \frac{\sigma_0^2 k^2}{4z^2} + T \right) (\rho_{1x} - \rho_{2x})^2 \right] \\ &\times \exp \left(\frac{1}{\eta_x^2} \left\{ \frac{i}{2} (\rho_{1x} + \rho_{2x}) \right. \right. \\ &\left. \left. + \left[\frac{\sigma_0^2 k}{2} \left(\frac{1}{z} - 2v_x \right) - \frac{z}{k} T \right] (\rho_{1x} - \rho_{2x}) \right. \right. \\ &\left. \left. - 2zi v_x a_0 \right\}^2 \right), \end{aligned} \quad (21)$$

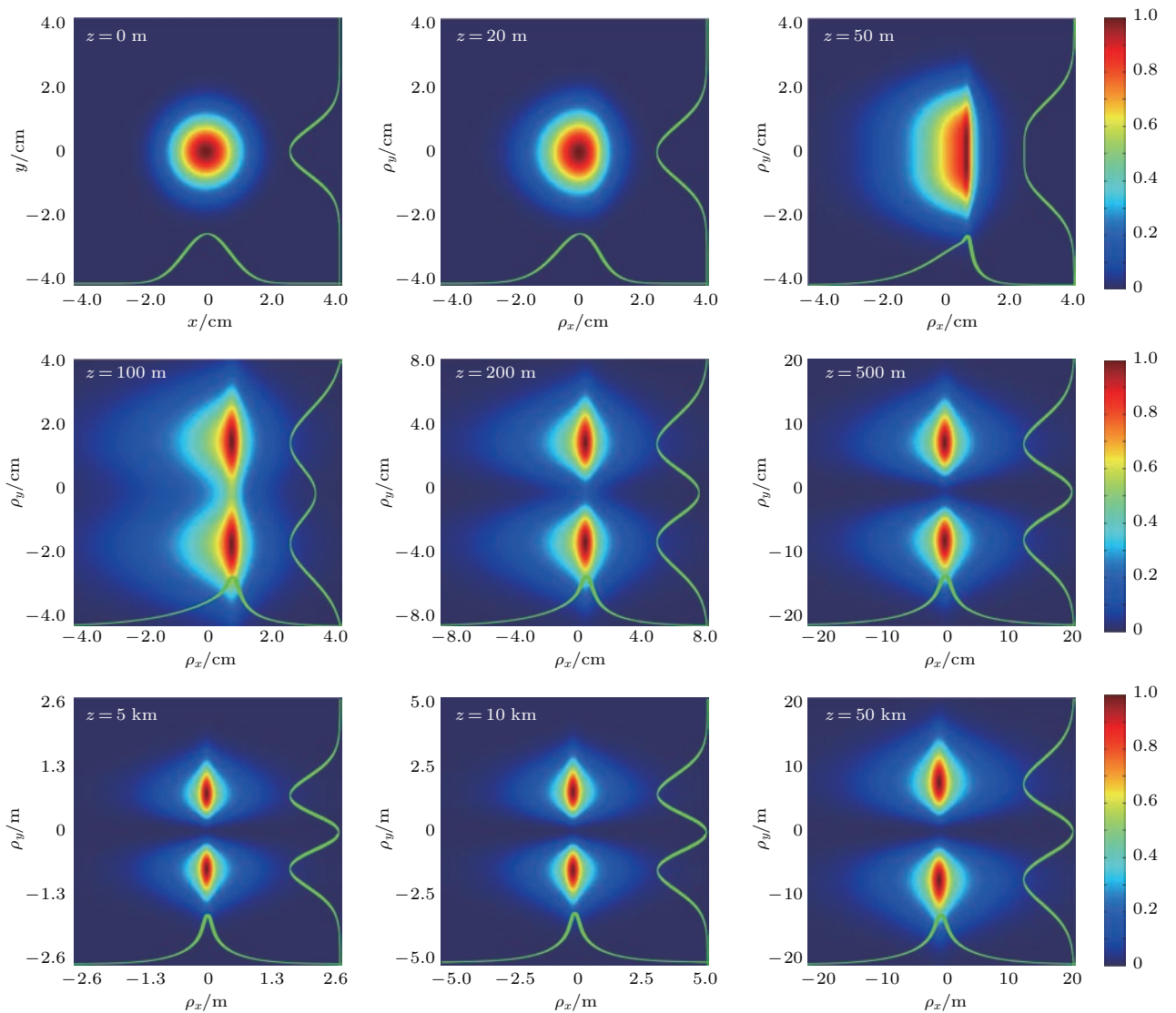


图2 (网刊彩色) 一阶非均匀拉盖尔-高斯关联光束 ($m = 1, a_0 = 8 \text{ mm}$) 在自由空间中传输时归一化光强分布演化
 Fig. 2. (color online) Normalized intensity distribution of a nonuniform Laguerre-Gaussian correlated beam on propagation in free space with $m = 1$ and $a_0 = 8 \text{ mm}$.

$$\begin{aligned}
 &W_{vy}(\rho_{1y}, \rho_{2y}) \\
 &= \frac{\sigma_0}{\eta_y} \exp \left[- \left(\frac{ik}{2z} + \frac{k^2\sigma_0^2}{4z^2} + T \right) (\rho_{1y} - \rho_{2y})^2 \right] \\
 &\times \exp \left\{ \frac{1}{\eta_y^2} \left[\frac{i}{2} (\rho_{1y} + \rho_{2y}) \right. \right. \\
 &\left. \left. + \left(\frac{k\sigma_0^2}{2z} - \frac{z}{k} T \right) (\rho_{1y} - \rho_{2y}) + izv_y \right]^2 \right\}, \quad (22)
 \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
 \eta_x^2 &= \sigma_0^2(1 - 2zv_x)^2 + \frac{z^2}{k^2\sigma_0^2} + \frac{4}{3}\pi^2z^3T, \\
 \eta_y^2 &= \sigma_0^2 + \frac{z^2}{k^2\sigma_0^2} + \frac{4}{3}\pi^2z^3T. \quad (23)
 \end{aligned}$$

根据 (17) 式可以计算非均匀拉盖尔-高斯关联

光束经过湍流大气传输后在接收面上的交叉光谱密度函数, 并根据交叉光谱密度函数, 得到接收面上光强为

$$I(\rho) = W(\rho, \rho). \quad (24)$$

同理, 接收面上的关联结构函数 (即相干度分布函数) 表示为

$$\mu(\rho_1, \rho_2) = \frac{W(\rho_1, \rho_2)}{\sqrt{W(\rho_1, \rho_1)W(\rho_2, \rho_2)}}. \quad (25)$$

当 $C_n^2 = 0$ 时, (17) 和 (25) 式退化为非均匀拉盖尔-高斯关联光束经过自由空间传输后在接收面上的交叉光谱密度函数和关联结构函数.

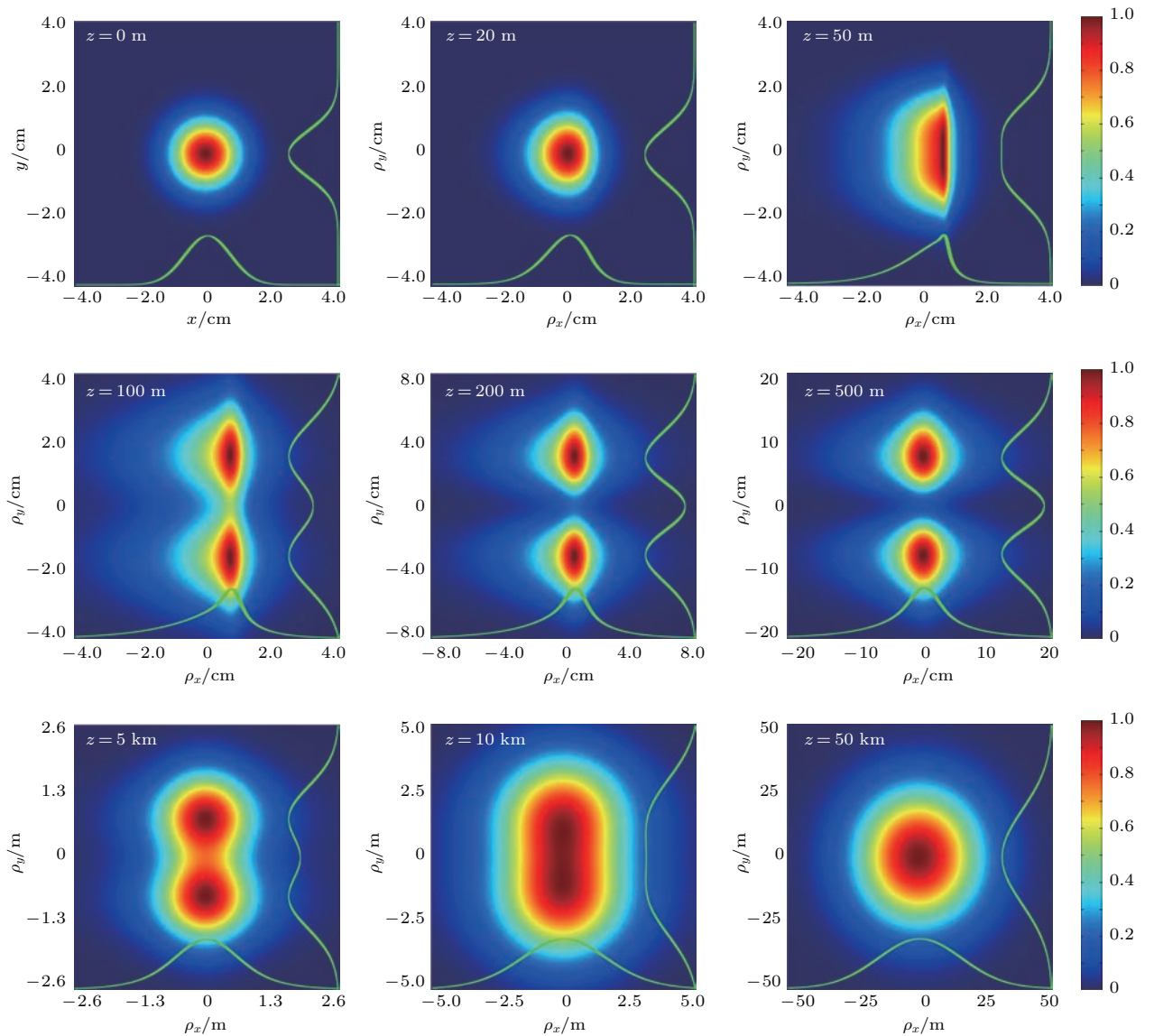


图3 (网刊彩色) 一阶非均匀拉盖尔-高斯关联光束 ($m = 1, a_0 = 8 \text{ mm}$) 在湍流大气中传输时归一化光强分布演化
 Fig. 3. (color online) Normalized intensity distribution of a nonuniform Laguerre-Gaussian correlated beam on propagation in turbulent atmosphere with $m = 1$ and $a_0 = 8 \text{ mm}$.

4 非均匀拉盖尔-高斯关联光束经过自由空间和湍流大气的传输特性

本节我们利用推导得到的传输公式研究非均匀拉盖尔-高斯关联光束经过自由空间以及大气湍流的传输特性. 在下面的数值模拟中, 初始光束参数的取值参照第二节, 湍流大气参数设为 $C_n^2 = 6 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 和 $l_0 = 50 \text{ mm}$.

图2和图3分别为一阶非均匀拉盖尔-高斯关联光束 ($m = 1, a_0 = 8 \text{ mm}$) 在自由空间和湍流大气中传输时归一化光强分布演化图, 图4为二阶非

均匀拉盖尔-高斯关联光束 ($m = 1, a_0 = 8 \text{ mm}$) 在湍流大气中传输时归一化光强分布演化图. 从图2可以发现, 非均匀拉盖尔-高斯关联光束在自由空间中传输时具有奇异的传输特性, 该光束光强分布在光源处具有高斯光束形状, 随着传输距离的增大, 光斑在 x 方向上出现自聚焦和自偏移 (光强峰值偏移) 现象, 而光斑在 y 方向上出现自分裂现象, 这是由于光源处各向异性的特殊关联结构函数分布引起的. 此外, 在自由空间中传输时, 光斑传输到远场始终呈自分裂状态. 在湍流大气中传输时, 短距离传输光斑同样呈现出自聚焦、自偏移、自分裂等现象, 但是随着传输距离的增大, 光束展现出

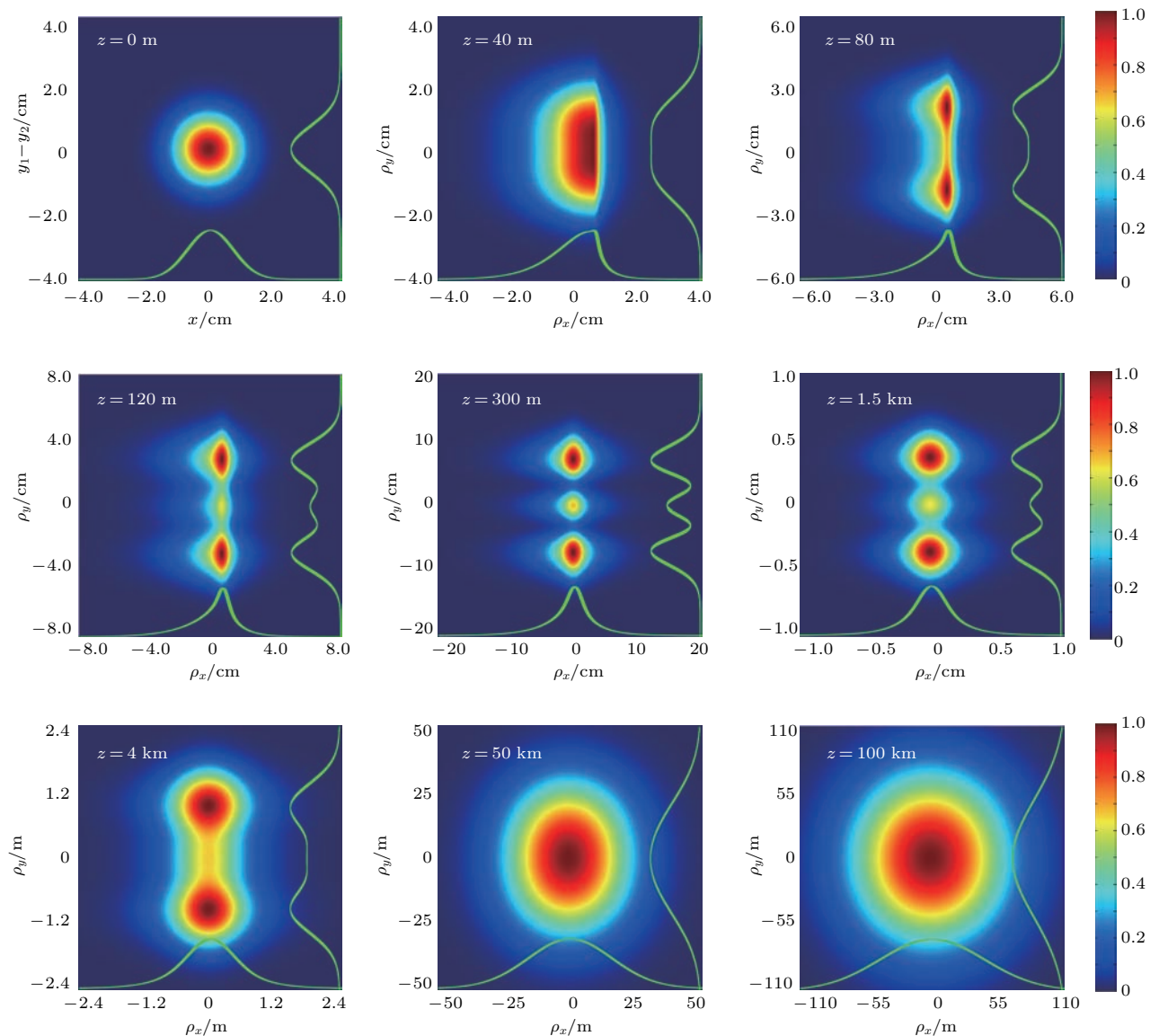


图4 (网刊彩色) 二阶非均匀拉盖尔-高斯关联光束 ($m = 2, a_0 = 8 \text{ mm}$) 在湍流大气中传输时归一化光强分布演化
 Fig. 4. (color online) Normalized intensity distribution of a nonuniform Laguerre-Gaussian correlated beam on propagation in turbulent atmosphere with $m = 2$ and $a_0 = 8 \text{ mm}$.

愈合现象, 光斑在远场退化为高斯光斑 (见图3和图4). 这是因为在传输很短的距离时, 湍流大气的影响可以忽略不计, 光束在自由空间中的衍射效应起主导作用, 因此在短距离传输时, 光束在湍流中和自由空间中的传输性质类似; 但随着传输距离的增大, 湍流大气的影响逐渐累积而且是各向同性的, 逐渐起主导作用, 所以湍流中的光斑会逐步的退化为高斯光斑. 比较图3和图4可以发现, 关联结构函数阶数 m 越大, 传输过程中光斑在 y 方向上分裂出来的子光斑个数越多, 同时在远场变高斯光斑的速度越慢, 这意味着调控关联结构函数及其阶数大小不仅可以操控光束传输行为, 而且可以在一

定程度上可以抗拒湍流大气的影响.

图5和图6分别为一阶非均匀拉盖尔-高斯关联光束 ($m = 1, a_0 = 8 \text{ mm}$) 在自由空间和湍流大气中传输时归一化关联结构函数分布演化图, 图7为二阶非均匀拉盖尔-高斯关联光束在湍流大气中传输时归一化关联结构函数分布演化图. 从图5可以看出, 在自由空间传输时, 随着传输距离的增大, x 方向上关联结构函数分布的旁斑逐渐向中心位置靠拢, 在逐渐靠拢的同时, 会出现第三组旁斑, 最后在远场关联结构函数分布呈类高斯分布; 而 y 方向上关联结构函数分布随着传输距离的增

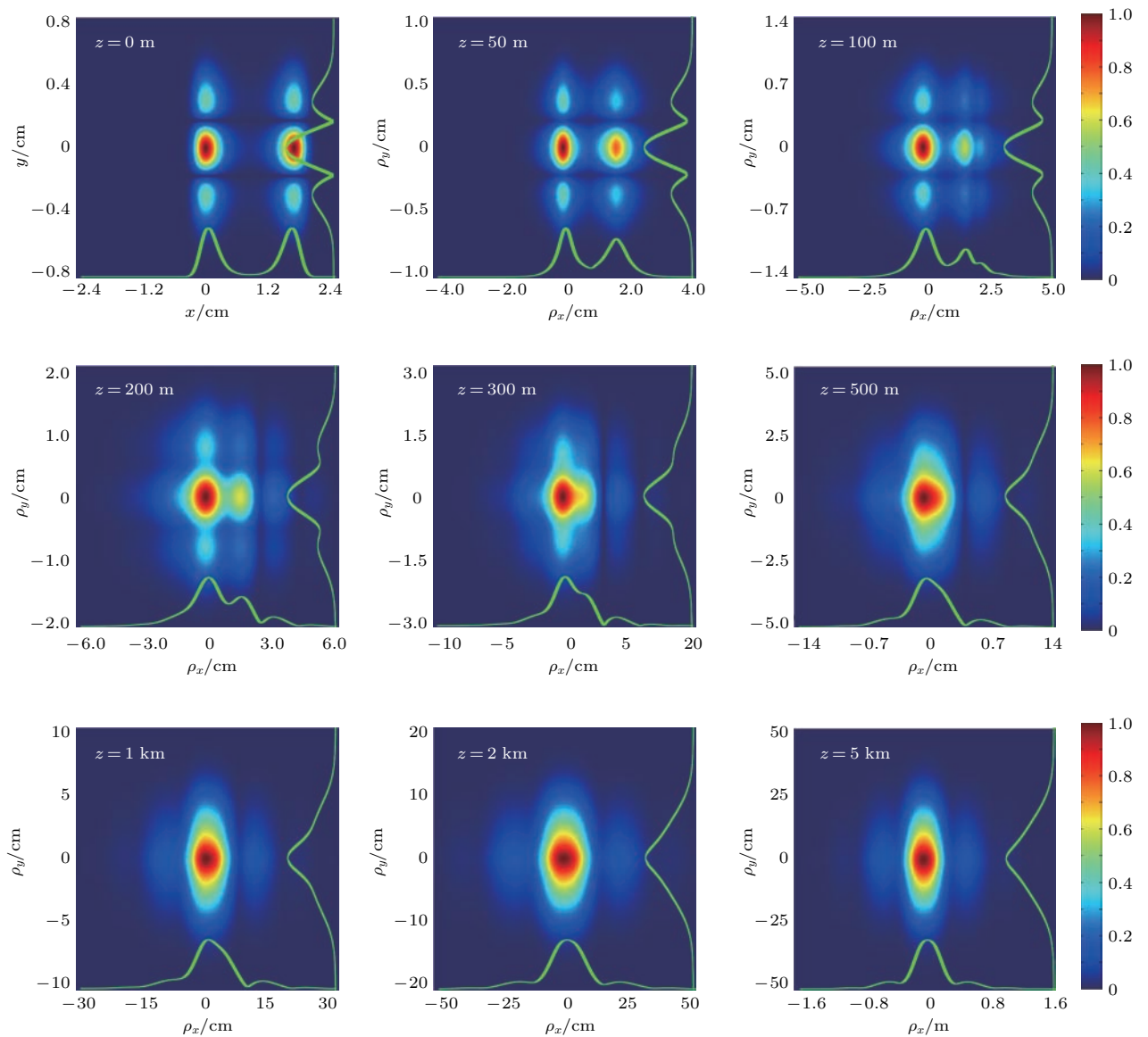


图5 (网刊彩色) 一阶非均匀拉盖尔-高斯关联光束 ($m = 1, a_0 = 8 \text{ mm}$) 在自由空间中传输时归一化关联结构函数分布演化
 Fig. 5. (color online) Normalized density plot of the correlation function of a nonuniform Laguerre-Gaussian correlated beam on propagation in free space with $m = 1$ and $a_0 = 8 \text{ mm}$.

大, 在主峰两侧的旁斑会逐渐消失, 最后关联结构函数在远场只存在一个主峰, 但分布不是高斯分布. 在湍流大气中, 关联结构函数分布在短距离传输的演化特性类似于自由空间, 但是在远场, 关联结构函数分布在湍流大气的影响下, 演化成高斯分

布(见图6和图7). 同时可以发现, 随着关联结构函数阶数的增大, 关联结构函数分布在远场变为高斯分布的速率减慢, 这同样意味着调控关联结构函数阶数可以在一定程度上可以抗拒湍流大气的影响.

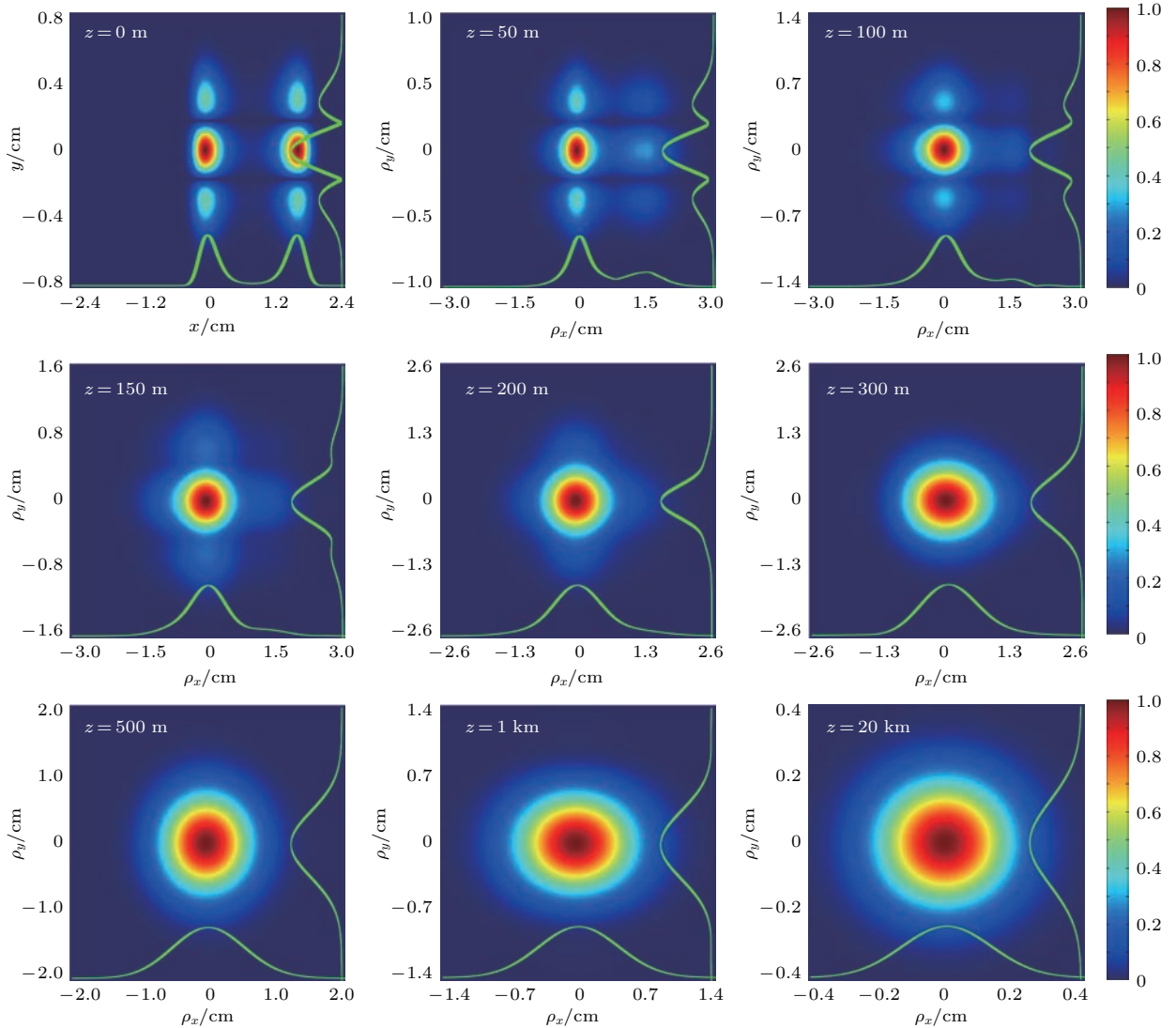


图6 (网刊彩色) 一阶非均匀拉盖尔-高斯关联光束 ($m = 1, a_0 = 8 \text{ mm}$) 在湍流大气中传输时归一化关联结构函数分布演化
 Fig. 6. (color online) Normalized density plot of the correlation function of a nonuniform Laguerre-Gaussian correlated beam on propagation in turbulent atmosphere with $m = 1$ and $a_0 = 8 \text{ mm}$.

5 结 论

以往人们所研究的部分相干光束其关联结构函数都是各向同性的, 本文引入一种关联结构函数各向异性的新型部分相干光束, 即非均匀拉盖尔-高斯关联光束, 并且研究了其经过自由空间和湍流大气的传输特性. 研究发现, 非均匀拉盖尔-高斯

关联光束呈现出自聚焦、自偏移和自分裂等奇异传输特性, 并且发现这些传输特性和关联结构函数及其阶数密切相关, 因此调控关联结构函数分布可以操控光束传输行为. 此外, 我们研究发现, 调控非均匀拉盖尔-高斯关联光束关联结构函数的阶数在一定程度上可以降低湍流的影响. 本文研究结果在大气激光通信、微粒操控等领域具有一定的应用前景.

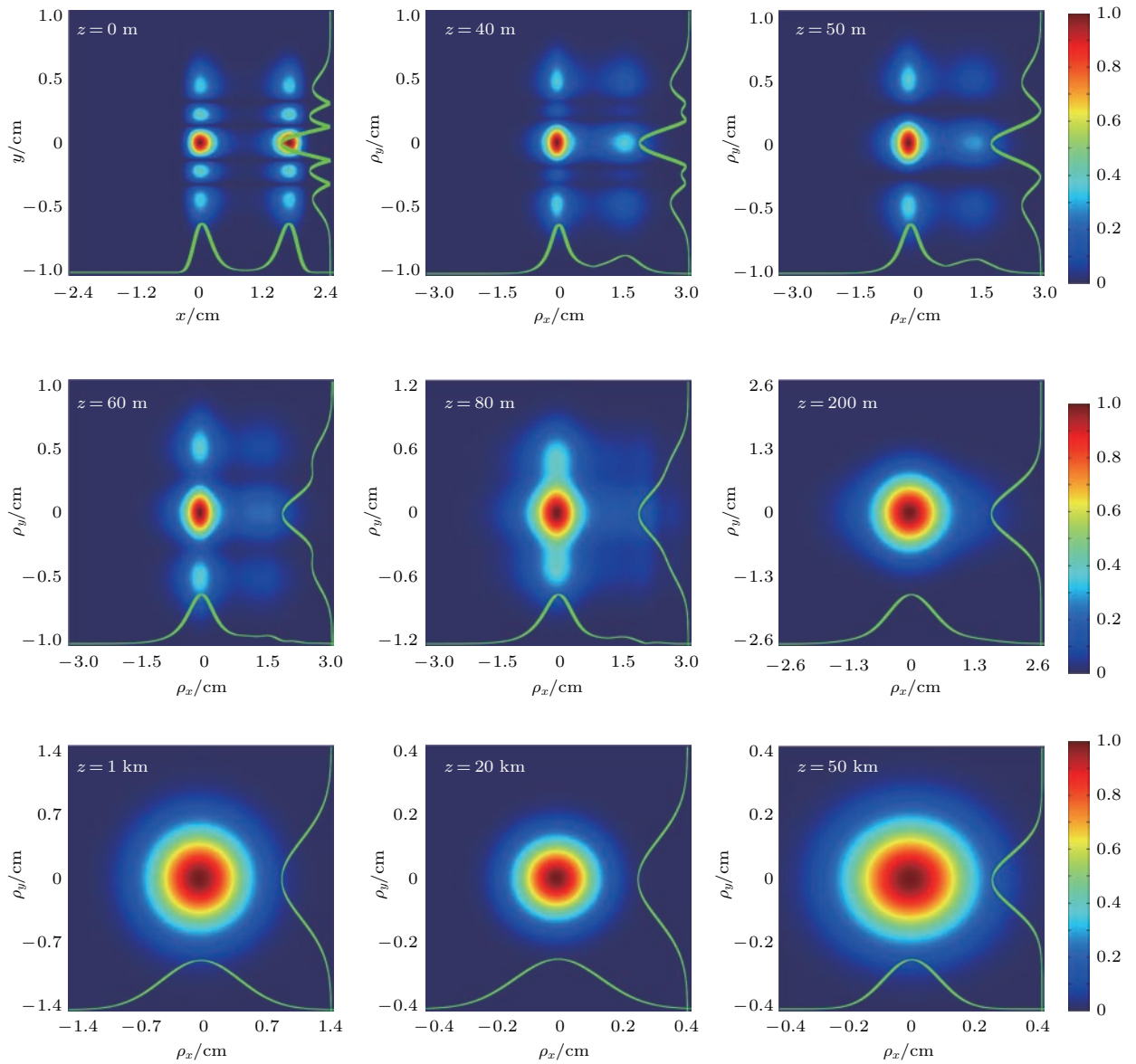


图7 (网刊彩色) 二阶非均匀拉盖尔-高斯关联光束 ($m = 2$, $a_0 = 8$ mm) 在湍流大气中传输时归一化关联结构函数分布演化
 Fig. 7. (color online) Normalized density plot of the correlation function of a nonuniform Laguerre-Gaussian correlated beam on propagation in turbulent atmosphere with $m = 2$ and $a_0 = 8$ mm.

参考文献

[1] Kato Y, Mima K, Miyanaga N, Arinaga S, Kitagawa Y, Nakatsuka M, Yamanaka C 1984 *Phys. Rev. Lett.* **53** 1057
 [2] Kermisch D 1975 *J. Opt. Soc. Am.* **65** 887
 [3] Cai Y J, Zhu S Y 2005 *Phys. Rev. E* **71** 056607
 [4] Dong Y M, Wang F, Zhao C L, Cai Y J 2012 *Phys. Rev. A* **86** 013840
 [5] Ricklin J C, Davidson F M 2002 *J. Opt. Soc. Am. A* **19** 1794
 [6] Redding B, Choma M A, Cao H 2012 *Nat. Photon.* **6** 355
 [7] Mandel L, Wolf E 1995 *Optical Coherence and Quantum Optics* (Cambridge: Cambridge University Press) pp33-39
 [8] Gori F, Santarsiero M 2007 *Opt. Lett.* **32** 3531
 [9] Gori F, Sanchez V R, Santarsiero M, Shirai T 2009 *J. Opt. A* **11** 085706
 [10] Lajunen H, Saastamoinen T 2011 *Opt. Lett.* **36** 4104
 [11] Chen Y H, Gu J X, Wang F, Cai Y J 2015 *Phys. Rev. A* **91** 013823
 [12] Yu J Y, Chen Y H, Liu L, Liu X L, Cai Y J 2015 *Opt. Express* **23** 13467
 [13] Sahin S, Korotkova O 2012 *Opt. Lett.* **37** 2970
 [14] Ma L, Ponomarenko S A 2014 *Opt. Lett.* **39** 6656
 [15] Chen Y H, Ponomarenko S A, Cai Y J 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 061107
 [16] Mei Z R, Korotkova O 2013 *Opt. Lett.* **38** 91
 [17] Wang F, Liu X L, Yuan Y S, Cai Y J 2013 *Opt. Lett.* **38** 1814
 [18] Chen Y H, Cai Y J 2014 *Opt. Lett.* **39** 2549

- [19] Chen Y H, Wang F, Liu L, Zhao C L, Cai Y J, Korotkova O 2014 *Phys. Rev. A* **89** 013801
- [20] Yuan Y S, Liu X L, Wang F, Chen Y H, Cai Y J, Qu J, Eyyubođu H T 2013 *Opt. Commun.* **305** 57
- [21] Tong Z S, Korotkova O 2012 *Opt. Lett.* **37** 3240
- [22] Gu Y L, Gbur G 2013 *Opt. Lett.* **38** 1395
- [23] Brown D P, Brown T G 2008 *Opt. Express* **16** 20418
- [24] Liu X Y, Zhao D M 2015 *Opt. Commun.* **354** 250
- [25] Chen Y H, Yu J Y, Yuan Y S, Wang F, Cai Y J 2016 *Appl. Phys. B* **122** 1
- [26] Cui S W, Chen Z Y, Zhang L, Pu J X 2013 *Opt. Lett.* **38** 4821
- [27] Andrews L C, Phillips R L, Hopen C Y 2001 *Laser Beam Scintillation with Applications* (Vol. 99) (Washington: SPIE Press) pp35–37
- [28] Gbur G 2014 *J. Opt. Soc. Am. A* **31** 2038
- [29] Wang F, Liu X L, Cai Y J 2015 *Prog. Electromagn. Res.* **150** 123

Nonuniform Laguerre-Gaussian correlated beam and its propagation properties*

Yu Jia-Yi¹⁾²⁾ Chen Ya-Hong¹⁾²⁾ Cai Yang-Jian^{1)2)†}

1) (College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou 215006, China)

2) (Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China)

(Received 5 June 2016; revised manuscript received 5 July 2016)

Abstract

The conventional partially coherent beam has a Gaussian correlated Schell-model function. In 2007, Gori and Santarsiero [Gori F, Santarsiero M 2007 *Opt. Lett.* **32** 3531] discussed the sufficient condition for devising a genuine correlation function of a partially coherent beam. Since then, a variety of partially coherent beams with nonconventional correlation functions, such as nonuniform correlated beam, Hermite-Gaussian correlated beam, Laguerre-Gaussian correlated beam and beam with optical coherence lattices, have been introduced, and such beams display many extraordinary propagation properties, such as self-focusing, self-shifting, self-splitting, self-shaping and periodicity reciprocity, and they have useful applications in many areas, such as free-space optical communication, particle trapping, image transmission and optical encryption.

In most of previous studies, the correlation function of the partially coherent beam was assumed to be isotropic. In this paper, we introduce a new kind of partially coherent beam with anisotropic correlation function, which is named nonuniform Laguerre-Gaussian correlated (NLGC) beam. The NLGC beam has a nonuniform correlated function in the x -direction and Laguerre-Gaussian correlated Schell-model function in the y -direction. Furthermore, we explore the propagation properties of the NLGC beam in free space and in turbulent atmosphere comparatively with the help of the extended Huygens-Fresnel integral. In free space, it is found that the intensity distribution of the NLGC beam displays self-focusing and self-shifting behaviors in the x -direction and self-splitting properties in the y -direction during its propagation, which may be useful for particle trapping, and the distribution of the degree of coherence also varies during its propagation. In turbulent atmosphere, the NLGC beam displays similar propagation properties at short propagation distance because the influence of turbulence can be neglected, while with the further increase of the propagation distance, the influence of turbulence accumulates and both the intensity distribution and the degree of coherence distribution evolve into Gaussian profiles. We also find that the evolution properties of the intensity distribution and the degree of coherence are closely related to the mode order m of the correlation function, e.g. the intensity distribution and the degree of coherence distribution evolve into Gaussian profiles more slowly as the mode order m increases, which means that the NLGC beam with larger m is less affected by turbulence, which may be useful in free-space optical communication.

Our results clearly show that modulating the correlation function of a partially coherent beam provides a novel way of manipulating its propagation properties, and will be useful in many applications, where light beam is required to possess a prescribed beam profile and controlled propagation properties. In this paper, only the NLGC beam is treated theoretically, and such a beam deserves further experimental investigation.

Keywords: partially coherent beam, correlated function, self-focusing, self-splitting

PACS: 42.25.Kb, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.65.214202

* Project supported by the National Natural Science Fund for Distinguished Young Scholar (Grant No. 11525418), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11274005), and the Project of the Priority Academic Program Development (PAPD) of Jiangsu Higher Education Institutions, China.

† Corresponding author. E-mail: yangjiancai@suda.edu.cn