

# 准均匀光束交叉偏振度传输特征分析

陈斐楠<sup>1</sup> 戚俊<sup>1</sup> 陈晶晶<sup>2</sup> 陈延如<sup>3</sup> 郭凤霞<sup>1</sup> 李燕<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院合肥物质科学研究院应用技术研究部, 安徽 合肥 230031

<sup>2</sup>合肥工业大学仪器科学与光电学院, 安徽 合肥 230009

<sup>3</sup>南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

**摘要** 基于相干偏振统一理论和广义惠更斯-菲涅耳原理,研究了准均匀(QH)光束交叉偏振度(SDCP)在广义大气湍流中传输变化规律,得到光场内不同空间点之间SDCP随距离演化特征。结果显示各点偏振度(DOP)在传输中变化一致的准均匀光源,在受湍流干扰后,不同距离点之间SDCP变化随间隔大小呈现增大和减小两个趋势,使得在某一距离处,各点之间交叉偏振度趋于统一值,而当传输距离继续增大时,不同空间点之间交叉偏振度又显示出明显区别。光场相干度以及光强相关性也有明显不同的变化特征。所得结果揭示了光场高阶统计特性变化之间的密切联系。SDCP反映的光强波动相关的物理内涵为自由或大气空间中关联成像或偏振光通信等应用提供了理论基础。

**关键词** 大气光学; 相干偏振; 交叉偏振度; 广义斯托克斯参量

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0901005

## Propagation Characteristics of Spectral Degrees of Cross-Polarization of Quasi-Homogenous Beams

Chen Feinan<sup>1</sup> Qi Jun<sup>1</sup> Chen Jingjing<sup>2</sup> Chen Yanru<sup>3</sup> Guo Fengxia<sup>1</sup> Li Yan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Applied Technology, Hefei Institutes of Physical Science,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China*

<sup>2</sup>*School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering,  
Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China*

<sup>3</sup>*School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of  
Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China*

**Abstract** The propagation characteristics of spectral degrees of cross-polarization (SDCP) of quasi-homogenous (QH) beams are studied based on the unified theory of coherence polarization and generalized Huygens-Fresnel principle. The characteristics of SDCP changing with propagation distance of different points in the field are obtained. The results show that the quasi-homogenous sources which have same changes of the degree of polarization(DOP) of each position point may have different changes of SDCP between two spatial points. They may increase or decrease with propagation distance increases depend on the distance of two position points due to the perturbations of turbulence, it will have the same value in a special distance, and then will deviate from each other when propagation distance increases continuously. The degree of coherence and the correlation of intensity fluctuations have different characteristics of variations. The results obtained reveal close relationship between high order statistic properties of optical beam field. The physical significance of SDCP will be the foundation of applications like correlation imaging and polarization communications in free space or atmosphere.

**Key words** atmospheric optics; coherence polarization; degrees of cross-polarization; generalized stokes

收稿日期: 2015-04-23; 收到修改稿日期: 2015-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(11404086)、安徽省自然科学基金(1508085QA23)、中央高校基本科研业务费专项资金(2014HGQC0009)、大气成分观测业务规范及数据综合处理系统研究(GYHY201206037-08)、中国科学院合肥物质科学研究院院长基金(YZJJ201330)

作者简介: 陈斐楠(1986—),男,博士研究生,主要从事大气光学检测方面的研究。E-mail: feinanchen617@rntek.cas.cn

导师简介: 戚俊(1971—),男,博士,研究员,主要从事光电测控方面的研究。E-mail: jqj@aiofm.ac.cn(通信联系人)

parameters

OCIS codes 010.1290; 010.1300; 030.1640; 260.5430

## 1 引 言

近年来,偏振光学在工业检测、三维成像等领域的重要作用使之有了巨大发展。2003年,Wolf<sup>[1]</sup>提出的相干偏振统一理论使偏振理论融合到光束二阶统计属性中,即光场的偏振性可以看作是光场正交分量之间的相干性,通过交叉谱密度矩阵的计算,可以得到随机电磁光束在空间传输中的偏振度以及偏振态变化。在此基础上,光场中更为深刻的偏振特性也得到开发和探究,其中基于量子论所提出的 Hanbury Brown-Twiss 效应而衍生出的光波交叉偏振理论受到广泛关注。电磁场交叉偏振的概念于20世纪80年代就有学者提出<sup>[2]</sup>,而在2002年,交叉偏振调制技术被用于光学相干层析成像(OCT)实验,结果显示健康和病变人体组织的后向散射交叉偏振特性具有明显的区别,因而该调制技术有助于诊断疾病<sup>[3]</sup>。2008年,Volkov等<sup>[4]</sup>发表关于利用光强波动相关对光场交叉偏振度(SDCP)进行定义的论文,而光强波动相关是实现关联成像(鬼成像)的基础理论,此外根据Wolf的理论,交叉偏振度由交叉谱密度矩阵的全部4个参量决定,因而包含了光场更加丰富的物理信息,由此可以预见交叉偏振度广阔的应用前景,国内外的众多学者对交叉偏振度的传输和性质做了大量的研究报导。辛煜等<sup>[5]</sup>研究了光源交叉偏振效应对辐射光束偏振度的影响,导出了谱相干度、偏振度和交叉偏振度与光源各参数之间的互相依赖关系,并且指出具有相同相干性和偏振度的一组光源可具有不同的交叉偏振度。Pu等<sup>[6]</sup>对于随机电磁光束交叉偏振度的研究表明光源的所有参数对交叉偏振度演化特性均有影响,而只有当各向相干系数相等时,横截面上交叉偏振度分布才会保持一致,而光源交叉偏振度对辐射光偏振度亦有影响。众所周知,偏振度的理论求解及实验测量可以通过斯托克斯参量获取,而联系 Korotkova 以及 Kanseri 所做的研究,交叉偏振度亦可以通过实际可测量的两点广义斯托克斯参量得到<sup>[7-8]</sup>。

在光束调制与整形技术日益飞速发展的今天,多种光束类型的理论及应用得到了广泛和深入研究。而准均匀(QH)光源由于简洁的数学形式和简便的实现方法,以及其对统计光学性质研究的广泛代表性,自其光场分布函数被确立以来就被很多研究者用为光束性质分析的光源形式,特别是其远场偏振和相干特性以及散射特性等方面的研究报导更凸显了其独特的光学特征<sup>[9-10]</sup>。在大气空间传输应用中,准均匀光束的光谱密度分布不变性使其极具应用价值<sup>[11]</sup>。而它在自由空间中以及折射率随机波动介质中更为深入的交叉偏振度的变化是否有其独特的规律与特征规律迄今未见研究,基于这一现状,本研究基于相干偏振统一定理,以广义斯托克斯参量为工具,结合广义惠更斯-菲涅耳原理进行积分推演高斯-谢尔型光束的远场交叉谱密度传输模型,借此分析不同横向空间点处交叉谱偏振度的变化规律,结合光源偏振系数和相关系数以及随机介质干扰量的变化来分析不同参量对交叉偏振度变化的影响和其中的内在联系,得到了较有意义的结果。

## 2 光束传输模型推演与分析

### 2.1 准均匀光源交叉谱密度湍流传输模型构造与推演

#### 2.1.1 准均匀光源模型

假设在光源平面  $z=0$  上,光场波动在是统计平稳的,那么其二阶相关性质可用  $2 \times 2$  的交叉谱密度矩阵表示为

$$\mathbf{W}^{(0)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2; \omega) = \begin{bmatrix} W_{xx}^{(0)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2; \omega) & W_{xy}^{(0)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2; \omega) \\ W_{yx}^{(0)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2; \omega) & W_{yy}^{(0)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2; \omega) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$  表示光源面上空间位置矢量,  $\omega$  为光频率。

在交叉谱密度矩阵中,每一个矩阵元素可以用两个正交方向上的光谱密度及相关系数表示,在满足准均匀光源的相关条件时,交叉谱密度的各元素表示为

$$\mathbf{W}^{(0)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2; \omega) = \begin{bmatrix} \alpha_{xx} S^{(0)}[(\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2)/2, \omega] \mu_{xx}^{(0)}(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2, \omega) & \alpha_{xy} S^{(0)}[(\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2)/2, \omega] \mu_{xy}^{(0)}(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2, \omega) \\ \alpha_{yx} S^{(0)}[(\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2)/2, \omega] \mu_{yx}^{(0)}(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2, \omega) & \alpha_{yy} S^{(0)}[(\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2)/2, \omega] \mu_{yy}^{(0)}(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2, \omega) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中上标(0)表示为光源相关量,  $S^{(0)}[(\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2)/2, \omega]$  为光谱密度,  $\mu_{ij}^{(0)}(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2, \omega)$  为相关系数,  $\alpha_j$  为控制光源偏振

态的相关系数,可以表示为

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{1+\alpha}, & i=j=x \\ \frac{\alpha}{1+\alpha}, & i=j=y, \\ \frac{\sqrt{\alpha}}{1+\alpha}, & i \neq j \end{cases}$$

当  $\alpha=0$  时,为  $x$  方向上线偏光,  $\alpha \rightarrow \infty$  时,为  $y$  方向上线偏光。根据 Korotkova 的研究,在  $S_y^{(0)}(\mathbf{r}, \omega) = \alpha(\omega)S_x^{(0)}(\mathbf{r}, \omega)$  时,光源每一点的偏振态和偏振度与位置无关,即为“统一偏振”。 $\alpha$  的实际取值可以根据 Shirai 等<sup>[12]</sup>所做的实验光路中对 1/2 波片进行旋转来获得。而根据之前的研究,发现准均匀光束在圆偏振时,其偏振度和偏振态参数在传输中变化特征较为明显,与之相反,线偏振时,偏振参数变化则较为稳定<sup>[13]</sup>。因而在之后的仿真实验中,均设定  $\alpha=1$ ,即方位角为 45° 的准均匀圆偏光进行研究。为简便且不失一般性,本研究假设光谱密度和相干系数均为空间位置矢量的高斯函数:

$$\begin{aligned} S^{(0)}(\mathbf{r}, \omega) &= A \exp(-r^2/2\sigma^2), \\ \mu(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) &= B_{ij} \exp\left[-\frac{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2}{2\delta_{ij}^2}\right], \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $A$  和  $B_{ij}$  均为与频率无关的系数,  $A$  为实数,而  $B_{ij}$  为复数形式,  $\sigma$  为光源宽度,  $\delta_{ij}$  为相干宽度。根据准均匀光束定义,光谱密度相对于空间位置矢量的变化要远小于光场各分量相干系数相对于空间位置矢量的变化,对于上述的高斯-谢尔型光束而言,即  $\sigma_i \gg \delta_{ij}$ 。此外在实际实现过程中,光束参数受到“可实现条件”约束,即物理上可实现的光束的充分条件为<sup>[14]</sup>

$$\begin{aligned} \delta_{xy} &= \delta_{yx}, \quad |B_{xy}| = |B_{yx}|, \\ \frac{1}{4\sigma_i^2} + \frac{1}{\delta_{ii}^2} &\ll \frac{2\pi^2}{\lambda^2}, \\ \max\{\delta_{xx}, \delta_{yy}\} &\leq \delta_{xy} \leq \min\left\{\frac{\delta_{xx}}{\sqrt{|B_{xy}|}}, \frac{\delta_{yy}}{\sqrt{|B_{yx}|}}\right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

根据上述条件限制,在本实验中,光源参数设置为  $A_x = 2, A_y = 1, B_{xy} = 0.15 \exp(i\frac{\pi}{6}), B_{yx} = 0.15 \exp(-i\frac{\pi}{6})$ ,  $\lambda = 0.532 \mu\text{m}, \sigma = 4 \text{ cm}, \delta_{xy} = 2 \text{ mm}, \delta_{xx} = 0.5\delta_{xy}, \delta_{yy} = 0.6\delta_{xy}$ .

### 2.1.2 广义大气湍流模型及交叉谱密度传输推演

随着激光使用范围的扩展,介质对光传输性质的影响越来越受到重视,而广义惠更斯-菲涅耳原理是基于受扰球面波衍射积分理论的常用积公式。对于二阶光学性质,该原理同样适用,电磁光束交叉谱密度在随机介质中传输的广义惠更斯-菲涅耳积分表示为

$$\begin{aligned} W_{ij}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, z; \omega) &= \frac{k^2}{4\pi^2 z^2} \iint d^2 r_1 \iint d^2 r_2 W_{ij}^{(0)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) \exp\left[-ik \frac{(\boldsymbol{\rho}_1 - \mathbf{r}_1)^2 - (\boldsymbol{\rho}_2 - \mathbf{r}_2)^2}{2z}\right] \\ &\quad \left\langle \exp[\psi^*(\boldsymbol{\rho}_1, \mathbf{r}_1) + \psi(\boldsymbol{\rho}_2, \mathbf{r}_2)] \right\rangle_m, \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $\boldsymbol{\rho}_1$  和  $\boldsymbol{\rho}_2$  表示接收面上空间位置矢量,  $\left\langle \exp[\psi^*(\boldsymbol{\rho}_1, \mathbf{r}_1) + \psi(\boldsymbol{\rho}_2, \mathbf{r}_2)] \right\rangle_m$  表示湍流的相位干扰,在惯性区域内,可以用折射率功率谱函数积分表征[如图 1(a) 所示]:

$$\left\langle \exp[\psi^*(\boldsymbol{\rho}_1, \mathbf{r}_1) + \psi(\boldsymbol{\rho}_2, \mathbf{r}_2)] \right\rangle_m = \exp\left\{-\frac{\pi^2 k^2 z \int_0^\infty \kappa^3 \Phi_n(\kappa) d\kappa}{3} [(r_1 - r_2)^2 + (r_1 - r_2)(\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_2) + (\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_2)^2]\right\}, \quad (6)$$

其中,  $\Phi_n$  为功率谱函数,  $k$  为波数,  $\kappa$  为空间频率。

自 Kolmogorov 提出第一个折射率功率谱模型后,人们就一直不断与实验数据相联系以改善模型的普适性,包括所提出的 Hill、Von-Karman 等模型。而最近所提出的非柯氏(non-Kolmogorov)湍流模型也大大拓展了柯氏(Kolmogorov)模型的应用范围,得到了广泛使用。国内外的学者也普遍关注这一模型的应用与理论分析<sup>[15-19]</sup>。由图 1(a)可知,在离耗散区更加接近时,涡旋尺度更小,对应的空间频率更高,而描述此类湍流时,Andrews<sup>[20]</sup>所使用的修正湍流模型是唯一经过实验验证的模型,在经过后人的继续研究后,通过加入非柯氏模型的参量使之成为适用性更为广泛的广义修正湍流模型<sup>[21]</sup>,其功率谱函数表示为

$$\Phi_n(\kappa, \alpha) = A(\alpha) \tilde{C}_n^2 \kappa^{-\alpha} f(\kappa, l_0, L_0, \alpha),$$

$$f(\kappa, l_0, L_0, \alpha) = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\kappa^2}{\kappa_0^2}\right) \right] \left[ 1 + a_1 \left(\frac{\kappa}{\kappa_l}\right) - b_1 \left(\frac{\kappa}{\kappa_l}\right)^{7/6} \right] \exp\left(-\frac{\kappa^2}{\kappa_l^2}\right), \quad (7)$$

式中  $\kappa_l = c(\alpha)/l_0$ ,  $\kappa_0 = C_0/L_0$ ,  $C_0$  可根据需要取不同值,  $C_0 = 4\pi$ ,  $c(\alpha)$  为尺度常数,  $L_0$  和  $l_0$  为湍流外尺度和内尺度,  $\tilde{C}_n^2$  为广义折射率结构常数,  $\alpha$  为湍流幂律,主要随大气层高度和湍流强度变化, Ziberan<sup>[22]</sup>曾于 2008 年对大气层不同高度建立了一个 3 层模型用以描述  $\alpha$  的变化。根据(5)式,设定衡量湍流干扰强度的量为  $H = \frac{1}{3} \pi^2 k^2 z \int_0^\infty \kappa^3 \Phi_n(\kappa) d\kappa$ , 其随功率谱函数幂律的变化(采用 Matlab 数值积分工具箱)如图 1(b)所示。对于经典的柯氏模型,  $\alpha = 11/3$ , 对应位置为对流层及以下区域,处于湍流总体干扰较强的区域,而在接近同温层区域,  $\alpha = 5$ , 处于总体干扰较弱的区域。

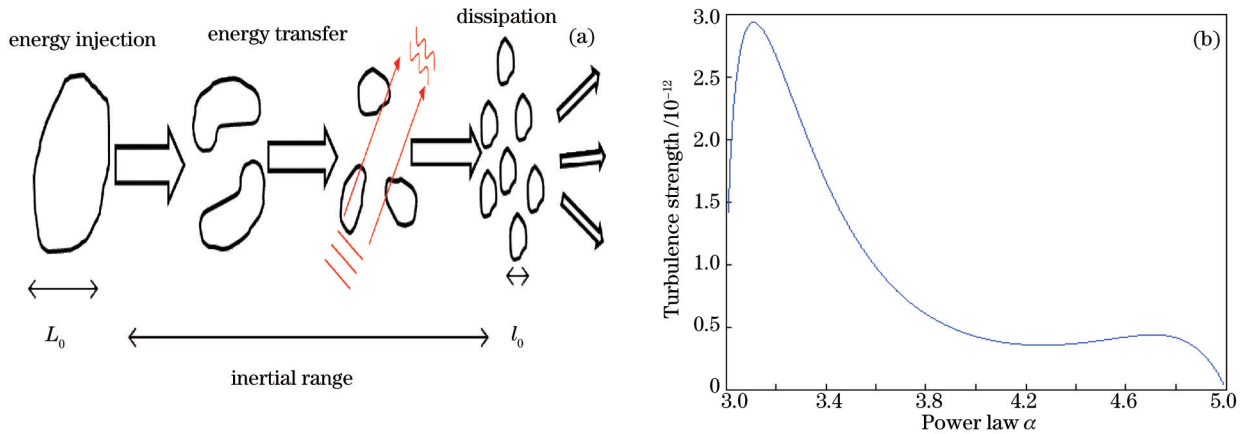


图 1 大气湍流对光束干扰影响示意图。(a) 统计模型内的光学湍流干扰;(b) 广义非柯氏模型的湍流干扰随幂律的变化

Fig.1 Schematic of turbulence influence on beam propagation. (a) Perturbation of optical turbulence in statistic model;

(b) turbulence perturbation variation with power law in generalized non-Kolmogorov model

综合(4)~(7)式,并对空间位置矢量做以下数学变换:

$$\mathbf{r}^+ = (\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2)/2, \quad \boldsymbol{\rho}^+ = (\boldsymbol{\rho}_1 + \boldsymbol{\rho}_2)/2,$$

$$\mathbf{r}^- = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2, \quad \boldsymbol{\rho}^- = \boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_2.$$

经过积分解析推导,得到传输距离  $z$  处接收面上衍射场交叉谱密度分布为

$$W_{ij}(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2, z; \omega) = \frac{k^2 \sigma^2 \alpha_{ij} A_i A_j B_{ij}}{2z^2 M_{ij}} \exp\left[\left(\frac{N}{M_{ij}} - 1\right) \frac{ki}{z} \boldsymbol{\rho}^- \boldsymbol{\rho}^+\right] \cdot \exp\left\{\left[\frac{N^2}{M_{ij}^2} - \frac{k^2 \sigma^2}{2z^2} - H(\alpha, z)\right] (\boldsymbol{\rho}^-)^2 - \frac{k^2}{4z^2 M_{ij}} (\boldsymbol{\rho}^+)^2\right\}, \quad (8)$$

式中

$$M_{ij} = \frac{1}{2\delta_{ij}^2} + H(\alpha, z) + \frac{k^2 \sigma^2}{2z^2},$$

$$N = \frac{k^2 \sigma^2}{2z^2} - \frac{H(\alpha, z)}{2}.$$

## 2.2 交叉偏振度仿真实验及传输特征分析

### 2.2.1 交叉偏振度仿真分析

根据相干偏振统一定理,光场的偏振参量与光强相干性之间存在紧密联系,而交叉谱密度矩阵是描述光



场二阶统计性质的基础参量,通过空间相干度的频域变换得到,它与广义斯托克斯参量之间存在以下关系:

$$S_i(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2) = \text{Tr}[W(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2; \omega) \cdot \boldsymbol{\sigma}_i], \quad i = 0, 1, 2, 3, \quad (9)$$

式中  $S_i(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2)$  表示广义斯托克斯参量,  $\boldsymbol{\sigma}_i$  为泡利矩阵,  $\boldsymbol{\sigma}_0$  为单位矩阵, 具体形式为

$$\boldsymbol{\sigma}_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \boldsymbol{\sigma}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \boldsymbol{\sigma}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \boldsymbol{\sigma}_3 = \begin{pmatrix} 0 & i \\ -i & 0 \end{pmatrix}.$$

交叉偏振度与交叉谱密度之间存在以下关系:

$$P(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2; \omega) \equiv \sqrt{1 - \frac{4 \det[W(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2; \omega)]}{\{\text{Tr}[W(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2; \omega)]\}^2}}, \quad (10)$$

式中  $P(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2; \omega)$  表示两点之间的交叉偏振度。结合(8)式,交叉偏振度可以用归一化广义斯托克斯参量表示为

$$P(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2) = \sqrt{s_1^2(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2) + s_2^2(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2) + s_3^2(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2)}, \quad (11)$$

式中  $s_i = S_i(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2)/S_0(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2)$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

为模拟不同光源空间矢量点的交叉偏振度演化特性,选取两个不同的空间点对(根据准均匀光束定义,光场两点之间的关联性质实际上只与两点的相对距离有关):  $\boldsymbol{\rho}_1 = (0, 0)$ ,  $\boldsymbol{\rho}_2 = (0, y)$ ,  $y$  取 0~0.04 m 不同数值,利用颜色条表示不同  $y$  坐标点与 0 点之间的交叉偏振度曲线,得到的仿真图如图 2 所示。

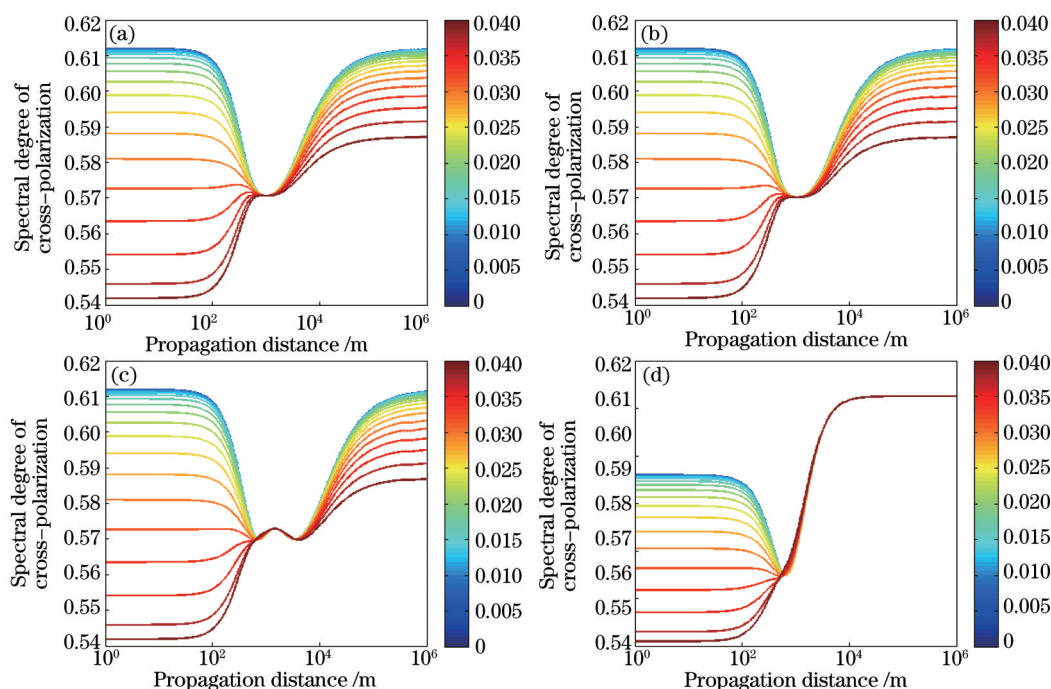


图 2 不同湍流条件下交叉偏振度演化特征(不同颜色曲线对应于不同空间点)。(a) 湍流空间:  $\alpha = 3.01$ ;  
(b) 湍流空间:  $\alpha = 3.3$ ; (c) 湍流空间:  $\alpha = 3.7$ ; (d) 自由空间

Fig.2 Characteristics of evolution of spectral degree of cross-polarization under different turbulence conditions (different position points illustrated by different color curves). (a) Turbulence space:  $\alpha = 3.01$ ;  
(b) turbulence space:  $\alpha = 3.3$ ; (c) turbulence space:  $\alpha = 3.7$ ; (d) free space

通过以上的仿真实验可以发现不同横向空间点交叉偏振度在变化过程中在某一距离范围内会趋向于一个相同值,而湍流干扰的强弱则会影响这个区间的位置及两侧的变化方式。在自由空间中传输时,不同交叉偏振度将会趋向于同一值,即这一区间会“无限延伸”。

当  $\boldsymbol{\rho}_1 = \boldsymbol{\rho}_2$  时,交叉偏振度“退化”为经典的偏振度定义,这时的变化曲线为经典偏振度变化曲线,如图 3 所示,反映出介质干扰的偏振度的自恢复特性,与 2004 年 Korotkova 等<sup>[23]</sup>对高斯-谢尔模型电磁光束所做的研究相吻合。

通过不同幂律下交叉偏振度的仿真可以发现光场上不同横向位置上的交叉偏振度,而不同距离处横向偏振度(DOP)与横向交叉偏振度分布曲线如图 4 所示。

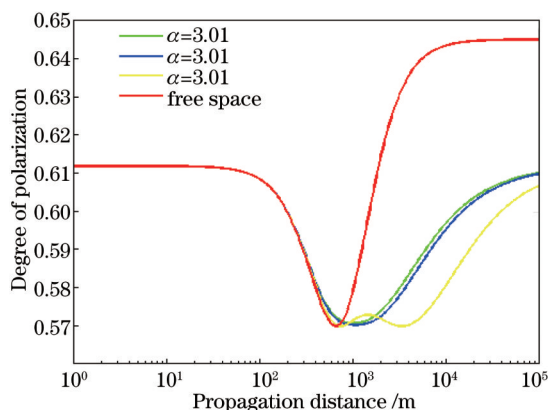


图 3 QH 光束在不同湍流干扰条件下偏振度变化曲线

Fig.3 Variation curves of the degree of polarization of QH beam under different turbulence perturbations

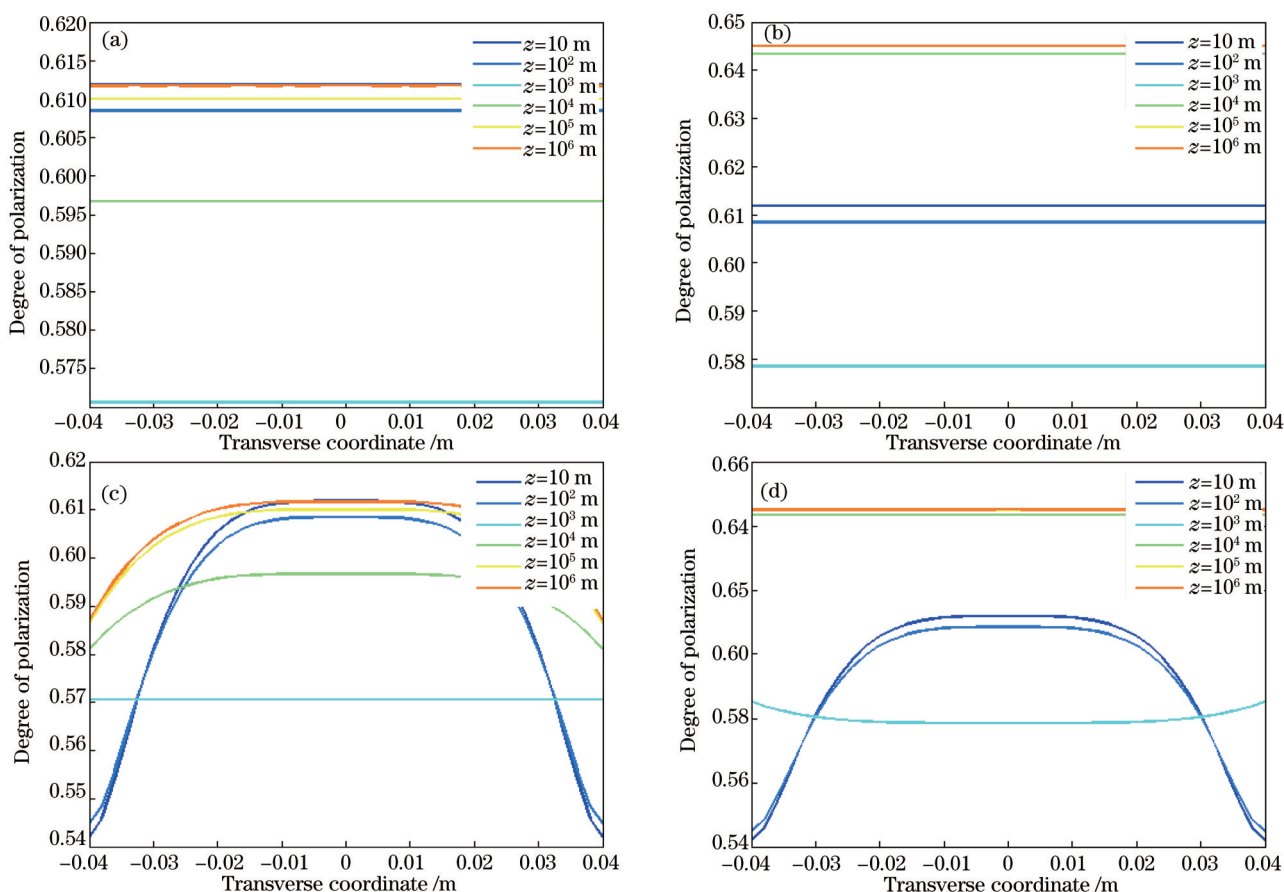


图 4 QH 光束在不同距离处的横向 DOP 与横向 SDCP 分布曲线。(a) 湍流空间:  $\alpha = 3.01$ , 横向 DOP 分布变化; (b) 自由空间, 横向 DOP 分布变化; (c) 湍流空间:  $\alpha = 3.01$ , 横向 SDCP 变化; (d) 自由空间横向交叉偏振度变化

Fig.4 Distribution curves of transverse DOP and transverse SDCP of QH beam in different distances.

(a) Turbulence space:  $\alpha = 3.01$ , variations of transverse DOP; (b) free space, variations of transverse DOP; (c) turbulence space:  $\alpha = 3.01$ , variations of transverse SDCP; (d) free space, variations of transverse SDCP

图 4 的实验结果揭示了湍流干扰下准均匀光场横向上交叉偏振度与偏振度变化的区别。图 4(a)和 (b) 的不同说明了横向偏振度相同的光源在湍流干扰下不同空间点偏振度演化一致。但交叉偏振度的演化却呈现出边缘的弯曲型分布, 在特定距离范围内(见图 2 的分析), 边缘与中心交叉偏振度差异较小( $z=10^4$  m,  $z=10^5$  m), 而在其他距离(具体体现在较近处  $z=10$  m、 $z=10^2$  m 和较远处  $z=10^6$  m)横向分布差异较大。

### 2.2.2 广义斯托克斯参量与相干度演化分析

通过分析广义斯托克斯参量独自变化规律, 发现参量  $s_3$  在变化过程中始终保持不变, 而  $S_0$  参量呈衰退

特性,  $s_1$  和  $s_2$  参量的变化类似于各自条件下偏振度的变化, 如图 5 所示。

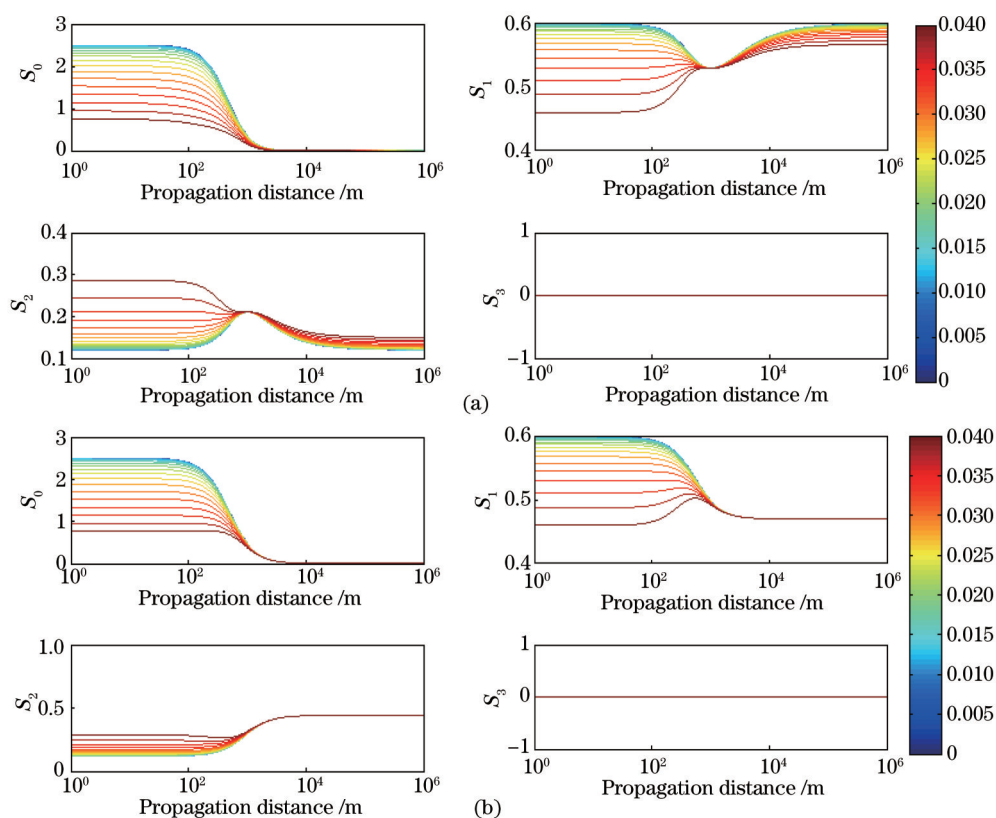


图 5 QH 光束的归一化广义斯托克斯参量变化规律。(a) 湍流空间:  $\alpha=3.01$ ; (b) 自由空间

Fig.5 Variations of normalized generalized Stokes parameters of QH beam. (a) Turbulence space:  $\alpha=3.01$ ; (b) free space

交叉偏振度的物理含义为描述了基于两点间光强波动的相关性。仿真实验分析中, 考察两对点之间的交叉偏振度涉及到光场中 3 个点之间的独立的偏振和相关性质, 根据偏振相干性质之间的联系, 这种变化的不同可以归结于相关度的变化。而光场强度相关是众多新型光学检测和成像技术的理论基础, 表示为交叉偏振度、相干度及平均光场强度的函数:

$$\langle I(\rho_1, \omega) I(\rho_2, \omega) \rangle = \frac{1}{2} [1 + P(\rho_1, \rho_2; \omega)] \times |\eta(\rho_1, \rho_2; \omega)|^2 \langle I(\rho_1, \omega) \rangle \langle I(\rho_2, \omega) \rangle, \quad (12)$$

式中  $\eta(\rho_1, \rho_2; \omega)$  为光场相干度, 表示为交叉谱密度  $\vec{W}$  及光谱密度  $S$  的函数,

$$\eta(\rho_1, \rho_2; \omega) = \frac{\text{Tr}[\vec{W}(\rho_1, \rho_2; \omega)]}{\sqrt{S(\rho_1, \omega)} \sqrt{S(\rho_2, \omega)}}. \quad (13)$$

准均匀光束相干度传输变化如图 6 所示。

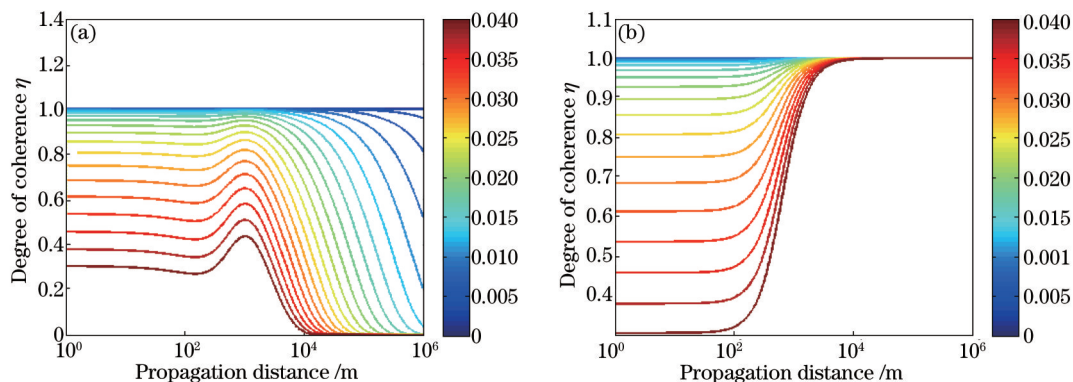


图 6 准均匀光束相干度传输变化。(a) 湍流空间:  $\alpha=3.01$ ; (b) 自由空间

Fig.6 Variations of the degree of coherence of QH beam. (a) Turbulence space:  $\alpha=3.01$ ; (b) free space

由上面两组实验可以发现,在有干扰时,不同点之间的相干度将随着距离的变化而趋近于0,两点间距离越大,则这种相干度“衰退”越为迅速。此外,不同点对之间的变化曲线中,在一定距离处都会有一定的“平缓”区域,而正是在这一区域,各点交叉偏振度趋于一致。对于自由空间,各点相干度随距离的增加将一致显示为“增强”特性。相干度的研究是光强波动相关性的变化规律的基础,在图7中,在介质干扰和自由空间中的准均匀光场中不同空间点的光强波动相关变化特征曲线说明传输距离增大将使光强之间的相关性减小直至无相关性,在有干扰时,各点的变化速度将有明显区别,表现为相距较远的点相关性衰减较快。而无干扰时,各点光强波动相关性的变化速度趋于一致。在足够长距离处,各点相关性将趋近于0值,介质干扰将不再影响这种相关性。

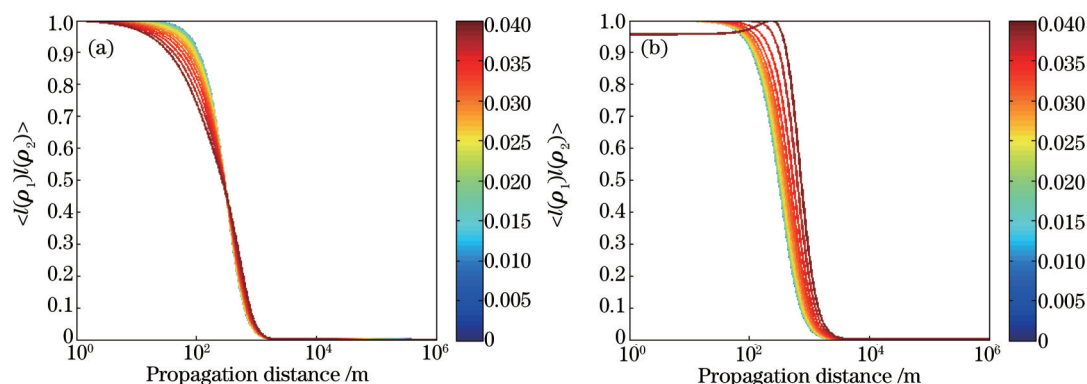


图7 准均匀光束光强波动相关性的变化特征曲线。(a) 湍流空间:  $\alpha = 3.01$ ; (b) 自由空间

Fig.7 Character curves of correlation of variations of intensity fluctuations of QH beam. (a) Turbulence space:  $\alpha = 3.01$ ; (b) free space

### 3 结 论

根据准均匀光束以及高斯-谢尔型光谱密度和光谱相干度的定义可知,在光源平面上,给定光束宽度和相干宽度时,两点之间的距离越大,其相干度越小,同样,交叉偏振度也越小。然而随着传输距离增大,在有介质干扰时,相干度将随着传输距离增大而衰减为0,这种衰减速度与两点间距离成正比,但交叉偏振度变化规律与之不同,在特定传输距离处各点交叉偏振度将一致,而在传输恒定距离后,交叉偏振度的分布将类似于光源的梯度分布,介质干扰实际上对交叉偏振度分布起了“压缩”作用。无介质干扰时,各点之间的交叉偏振的变化将趋近于统一值。通过深入分析每一个广义斯托克斯参量规律,发现交叉偏振度的变化规律主要取决于  $s_1$  和  $s_2$  分量的变化。此外光束相干度以及光强相关性的波动都有各自独特的特征,关于偏振度和相干度及光谱密度的变化之间的联系,Wolf等已经做过分析,而本课题组深入分析了交叉偏振度与高阶统计特性各自变化特征以及之间的联系,为准均匀光束在鬼成像领域或偏振调制光通信领域的应用开发提供了理论依据,而如何在大气、海洋等复杂环境的应用中精确控制光束宽度、偏振系数及相干宽度以实现光束高阶性质的最佳利用则是未来空间光调控与传输的发展方向之一。

### 参 考 文 献

- 1 Wolf E. Unified theory of coherence and polarization of random electromagnetic beams[J]. *Physics Letters A*, 2003, 312(5-6): 263-267.
- 2 Simon R, Sudarshan E C, Mukunda N. Cross polarization in laser beams[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(9): 1589-1593.
- 3 Kuranov R, Sapozhnikova V, Turchin I, *et al.*. Complementary use of cross-polarization and standard OCT for differential diagnosis of pathological tissues[J]. *Optics Express*, 2002, 10(15): 707-713.
- 4 Volkov S N, James D F V, Shirai T, *et al.*. Intensity fluctuations and the degree of cross-polarization in stochastic electromagnetic beams [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2008, 10(5): 055001.
- 5 Xin Yu, Chen Yanru, Zhao Qi. Effects of cross polarization of electromagnetic sources on the polarization degree of radiation beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(s1): 89-92.  
辛 煜, 陈延如, 赵 琦. 光源交叉偏振效应对辐射光束偏振度的影响[J]. *光学学报*, 2009, 29(s1): 89-92.
- 6 Pu J, Korotkova O. Propagation of the degree of cross-polarization of a stochastic electromagnetic beam through the turbulent atmosphere [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(9): 1691-1698.



- 7 Korotkova O, Wolf E. Generalized Stokes parameters of random electromagnetic beams[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(2): 198–200.
- 8 Kanseri B, Rath S, Kandpal H C. Direct determination of the generalized Stokes parameters from the usual Stokes parameters[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(6): 719–721.
- 9 Korotkova O, Hoover B G, Gamiz V L, *et al.*. Coherence and polarization properties of far fields generated by quasi-homogeneous planar electromagnetic sources[J]. *JOSA A*, 2005, 22(11): 2547–2556.
- 10 Chen Jingjing, Xin Yu, Chen Yanru, *et al.*. Coherence properties of the three-dimensional scattering field generated by an anisotropic quasi-homogeneous medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 31(12): 1203001.  
陈晶晶, 辛 煜, 陈延如, 等. 各向异性准均匀介质三维散射场相干特性研究[J]. *光学学报*, 2012, 31(12): 1203001.
- 11 Roychowdhury H, Wolf E. Invariance of spectrum of light generated by a class of quasi-homogenous sources on propagation through turbulence[J]. *Optics Communications*, 2004, 241(1–2): 11–15.
- 12 Shirai T, Korotkova O, Wolf E. A method of generating electromagnetic Gaussian Schell-model beams[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2005, 7(5): 232–237.
- 13 Chen F, Zhao Q, Chen J, *et al.*. Evolutions of polarization of quasi-homogeneous beams propagating in Kolmogorov and non-Kolmogorov atmosphere turbulence[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 11(s2): s20102.
- 14 Roychowdhury H, Korotkova O. Realizability conditions for electromagnetic Gaussian Schell-model sources[J]. *Optics Communications*, 2005, 249(4–6): 379–385.
- 15 Wu Xiaoqing, Huang Honghua, Qian Xianmei, *et al.*. Thermosonde measurement of temperature structure parameter and temperature spectral power-law exponent profile in the low stratosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0501001.  
吴晓庆, 黄宏华, 钱仙妹, 等. 低平流层下温度结构常数和温度起伏谱幂率廓线的探空测量[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0501001.
- 16 Tang Mingyue, Li Binzhong, Wang Yufeng, *et al.*. Influence of non-Kolmogorov turbulence on the Rayleigh range and turbulence distance of Gaussian-Schell beams[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1013002.  
汤明玥, 李宾中, 王宇峰, 等. 非 Kolmogorov 湍流对高斯-谢尔光束的瑞利区间和湍流距离的影响[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1013002.
- 17 Wu Xiaoqing, Huang Yingbo, Mei Haiping, *et al.*. Measurement of non-Kolmogorov turbulence characteristic parameter in atmospheric surface layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0601001.  
吴晓庆, 黄印博, 梅海平, 等. 近地面层大气非 Kolmogorov 湍流特征参数测量[J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0601001.
- 18 Huang Yongping, Duan Zhichun, He Yehuan, *et al.*. Change of turbulence distance for partially coherent flat-topped beams propagating through non-Kolmogorove turbulence[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0913002.  
黄永平, 段志春, 贺也洹, 等. 部分相干平顶光束在非 Kolmogorov 大气湍流中湍流距离的变化[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0913002.
- 19 Sun Haiyue, Wu Wuming, Jin Aijun, *et al.*. Propagation performance of supercontinuum source in non-Kolmogorov turbulence[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0413001.  
孙海跃, 吴武明, 靳爱军, 等. 非科尔莫哥罗夫湍流下超连续谱光源的传输特性[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0413001.
- 20 Andrews L C. An analytical model for the refractive index power spectrum and its application to optical scintillations in the atmosphere[J]. *Journal of Modern Optics*, 1992, 39(9): 1849–1853.
- 21 Xue B, Cui L, Xue W, *et al.*. Generalized modified atmospheric spectral model for optical wave propagating through non-Kolmogorov turbulence[J]. *JOSA A*, 2011, 28(5): 912–916.
- 22 Zilberman A, Golbraikh E, Kopeika N S. Propagation of electromagnetic waves in Kolmogorov and non-Kolmogorov atmospheric turbulence: Three-layer altitude model[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(34): 6385–6391.
- 23 Korotkova O, Salem M, Wolf E. The far-zone behavior of the degree of polarization of electromagnetic beams propagating through atmospheric turbulence[J]. *Optics Communications*, 2004, 233(4–6): 225–230.

栏目编辑: 史 敏