

非 Kolmogorov 大气湍流中的光传播及其对光电工程的影响

饶瑞中^{1,2,3} 李玉杰^{1,3}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031

²中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230031

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 非 Kolmogorov 大气湍流中的光传播及其对光电工程的影响已成为当前应用光学的研究热点之一。详细对比讨论了真实的非 Kolmogorov 大气湍流的光学特性和理论研究中的非 Kolmogorov 湍流谱模型;从一般光传播效应,各向异性湍流中的光传播效应,特殊光源、部分相干光、阵列光源的传播效应以及这些效应对光电工程的影响6个方面分析了光波在非 Kolmogorov 大气湍流中的传播效应及对光电工程影响研究的最新进展和存在的相关问题;从大气湍流测量技术、非 Kolmogorov 大气湍流光传播的数值模拟及其与实际光传播实验的对比分析三个方面提出了对今后这个研究领域重点研究方向的建议。

关键词 大气光学; 大气湍流; 非 Kolmogorov 湍流; 光传播; 光电工程

中图分类号 O436; P421.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0501003

Light Propagation through Non-Kolmogorov-Type Atmospheric Turbulence and Its Effects on Optical Engineering

Rao Ruizhong^{1,2,3} Li Yujie^{1,3}

¹Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

²School of Environmental Science and Optoelectronic Engineering, University of Science and Technology of Chinese, Hefei, Anhui 230031, China

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Light propagation through non-Kolmogorov atmospheric turbulence and its effects on optical engineering are focus of applied optics research. Discussion and comparison are carried out for the optical properties of real atmospheric turbulence and theoretical models of non-Kolmogorov turbulence. Recent research progress in last five years is summarized and related problems are analyzed on general propagation effects, effects in anisotropic turbulence, propagation of special beams, partially coherent beams and beam arrays, and these effects on optical engineering. Suggestions are proposed for next step on the monitoring technology of atmospheric turbulence, numerical simulation of light propagation through non-Kolmogorov turbulence and experimental study in real atmosphere.

Key words atmospheric optics; atmospheric turbulence; non-Kolmogorov turbulence; light propagation; optical engineering

OCIS codes 010.1290; 010.1330; 350.4600

1 引 言

随着现代先进光电技术的飞速发展,制约光电技术系统总体性能的各种单元器件的性能已接近理想极

收稿日期: 2015-01-09; 收到修改稿日期: 2015-01-14

作者简介: 饶瑞中(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事大气光学特性,光波与图像的大气传播等方面的研究。

E-mail: rao@aiofm.ac.cn

限水平,因此,影响地球大气环境中工作的光电技术系统总体性能的主要因素已由大气介质决定,其中大气湍流是一个重要的因素。在统计分析的状态下,早期研究工作中对大气湍流的光学特性的处理都建立在均匀各向同性的假设上,这种理想的湍流状态由 Kolmogorov 的湍流统计理论描述^[1-2]。建立在 Kolmogorov 的湍流统计理论基础上的光波大气传播理论在弱起伏条件下取得了巨大成功^[3-10],为各种光电系统在大气湍流中的应用分析提供了技术手段。

随着大气湍流光学特性研究的不断发展,人们发现,大气湍流并不总是处于均匀各向同性的状态,于是在 Kolmogorov 湍流理论的基础上进行了修正,提出了非 Kolmogorov 湍流的概念,并参照 Kolmogorov 湍流介质中的光传播理论方法,分析了相应的各种传播效应。近年来分析各种类型的光束在非 Kolmogorov 大气湍流中的传播效应及其对各种光电工程影响的研究工作很多,在这些工作中,绝大部分都假定非 Kolmogorov 大气湍流依然是一种各向同性湍流,只不过其功率谱服从幂律部分的幂指数偏离了 Kolmogorov 湍流的幂指数。此外,还都显性或隐性地假设传播路径上非 Kolmogorov 大气湍流的特性相同,都具有相同的幂指数。这两种假设都与实际情况不符。这些工作实际上都是属于理论研究,沿用 Kolmogorov 大气湍流中的光传播研究方法,所得结果与 Kolmogorov 大气湍流中的结果虽然有数量的不同,但没有本质区别,并且至今尚未看到实验验证。因此,有必要对相关工作进行整理分析,为以后开展相关工作提出建议。

本文从非 Kolmogorov 大气湍流的光学特性、光波在非 Kolmogorov 大气湍流中的传播效应及其对光电工程的影响和今后这个研究领域的重点研究方向建议三个方面进行了详细阐述。

2 非 Kolmogorov 大气湍流的光学特性

Kolmogorov 湍流理论描述的是一种理想状态的大气湍流:局地均匀各向同性湍流。任何偏离局地均匀各向同性的湍流都可称为非 Kolmogorov 湍流。非 Kolmogorov 湍流的产生有两种可能:一是初始大气湍流的特征符合 Kolmogorov 理论,但有某种机制改变了湍流状态,如大能量激光束加热空气形成非 Kolmogorov 大气湍流^[11];二是自然状态的大气湍流本身就常常偏离 Kolmogorov 理论,其一般状态更多的情况下是非 Kolmogorov 湍流。

对 Kolmogorov 大气湍流,大气折射率结构函数满足 2/3 幂律,其结构常数 C_n^2 常用来描述湍流的强度,一维湍流功率谱符合 -5/3 幂律(三维谱幂律为 -11/3)。在通常的应用中, C_n^2 及其高度廓线分布的特征都是在大气湍流符合局地均匀各向同性的假设下对观测量进行统计分析的结果。依据局地均匀各向同性假设,测量通常在一定距离上的两点进行,局地不同空间位置上两点测量的统计结果应该是一致的。然而,实际测量结果表明,在同一高度水平和垂直方向上相同距离测量的折射率结构函数也常常明显不同^[12],这表明各向同性假设不准确成立。

大气湍流功率谱在很多情况下也不严格符合 -5/3 幂律^[13-20]。利用飞机在高空进行的长距离的测量得到的一维空间功率谱的幂指数 α 如图 1 所示^[21],图中横坐标为空间位置。功率谱幂值随空间位置而变化,大部分情况下偏离了 -5/3^[21-22]。这些结果表明无论是在近地面受地面因素影响明显的情况下还是在高空自由的大气中,大气湍流大都与各向同性特性有一定的偏离。

大气湍流折射率功率谱幂指数的实际测量结果仅局限于近地面或对流层顶等有限的高度,数据量有限且起伏明显,尚不足以建立应用模式。有分析认为平流层大气湍流符合 Kolmogorov 理论,对流层大气湍流不符合 Kolmogorov 理论^[23]。由于某些传播问题涉及斜程路径上非 Kolmogorov 湍流谱的影响,有研究者提出了此类模型^[24],其三维功率谱幂指数的绝对值为

$$\alpha_3(h) = \frac{11/3}{1 + (h/H_1)^{b_1}} + \frac{10/3}{\left[1 + (h/H_1)^{-b_1}\right] \left[1 + (h/H_2)^{b_2}\right]} + \frac{5}{1 + (h/H_2)^{-b_2}}, \quad (1)$$

式中 h 为距离地面的高度, H_1 、 H_2 分别为特征高度, b_1 、 b_2 为拟合系数。图 2 绘出了 $H_1=2$ km、 $H_2=8$ k、 $b_1=8$ 、 $b_2=10$ (实线)和 $b_1=15$ 、 $b_2=20$ (虚线)两种情况下的幂指数廓线分布。这种模型仅供参考。

在光传播研究应用中,进行理论分析时,各种传播效应都通过对湍流功率谱的某种路径以及空间频率双重积分表达出来。因此湍流功率谱的准确表达是保证分析结果可靠的前提,而功率谱解析表达式的复杂程度决定了数学推导的难易程度。局地均匀各向同性湍流功率谱只在惯性区呈现幂律,理想的 Kolmogorov 湍流功

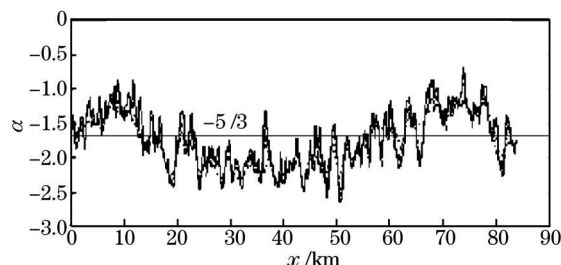


图 1 高空大气湍流一维空间功率谱的幂指数^[22]

Fig.1 Exponent of the power spectrum of turbulence in the upper atmosphere^[22]

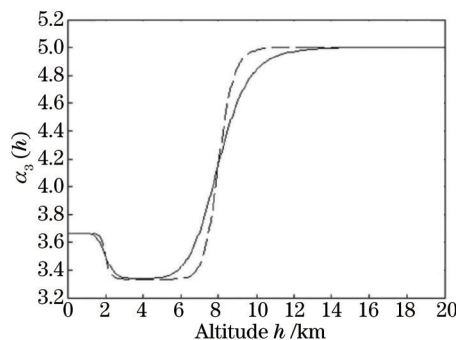


图 2 大气湍流谱幂指数的廓线分布模型

Fig.2 Altitude distribution model for the exponent of the power spectrum of atmospheric turbulence

率谱在全频率空间都用幂律描述,而考虑湍流内外特征尺度的 Tatarskii 功率谱模型、von Karman 功率谱模型等使功率谱数学解析形式进一步复杂化,既为理论分析光传播效应带来了困难,也为研究工作者提供了研究题目。

对各向同性的非 Kolmogorov 湍流,湍流介质的折射率结构函数或功率谱的函数表达式进一步复杂化,结构常数的量纲与幂律相关,成为一个量纲不固定的参数,显然不适宜作为一个描述湍流强度的参量。全面准确地描述湍流特性需要使用折射率起伏方差、功率谱幂指数和湍流外尺度三个独立的参量^[25],其中的关键是采用无量纲的折射率起伏方差,它不受任何其他因素影响、不依赖于理论假设。在这种描述下,光传播效应可以非常直观地表示为几个物理意义明确的相位起伏参量的函数。

然而,上述这种正确的湍流特性描述方法在光传播理论和实验研究中并没有得到广泛采用。实验上可能源于测量技术的缺乏,而理论研究上则可能是研究传统的惯性作用。而后的大量理论研究工作还在探讨一个量纲依赖于功率谱幂律的等效折射率结构常数^[26]。相应地,包含这样一个等效折射率结构常数的功率谱解析表达式也被多次探讨并用于光传播理论研究^[27-30]。在这样的等效处理下,竟然得出湍流内尺度依赖于功率谱幂指数的结果^[30]。

更为复杂的是各向异性的非 Kolmogorov 湍流,对于这种情况,除了一个变化的功率谱幂律,还需要引入描述各个方向相对权重的参量。对于旋转对称的各向异性非 Kolmogorov 湍流,利用功率谱幂律和各向异性参量也可以建立其结构函数和功率谱模型^[31]。

实际大气湍流可能比前面几种情况更为复杂,功率谱并不是具有一个单一幂值的函数,可能是几种幂律的混合^[32]。此外,大气混浊介质(气溶胶粒子)的吸收和散射的起伏也会引起功率谱型的复杂变化^[33]。

3 光在非 Kolmogorov 大气湍流中的传播及其对光电工程的影响

目前广泛用于光传播研究的各向同性且具有单一幂律功率谱的所谓非 Kolmogorov 湍流和理想的 Kolmogorov 湍流一样也是一种非常理想的湍流模型,基于这种模型所开展的各种光传播效应理论分析仅仅是一种数学推理工作,不可能得到物理实质上新的认识。绝大部分工作都假定传播路径上湍流功率谱的幂律相同,但这是实际不存在的情况,如果参照图 1 的结果,传播路径上湍流功率谱的幂律也是随机起伏,其平均状态恰恰最可能是 Kolmogorov 湍流,那么在假定传播路径上湍流功率谱的幂律相同得到的所谓非 Kolmogorov 湍流传播效应则可能没有实际参考意义。

美国海军研究生院的 Stribling^[34]采用 Kolmogorov 湍流中传统的光传播研究方法,系统地推导了假定传播路径上湍流功率谱的幂律相同得到的所谓非 Kolmogorov 湍流传播效应的理论结果,基本上完成了这种理想情况下的主要工作,以后的类似工作无非是针对不同光源和应用的具体运用而已。

即使对 Kolmogorov 湍流,理论上也只是解决了弱起伏条件下的传播问题以及特殊条件下的强起伏问题,而对于中等起伏条件,则没有合适的理论方法。1999年,Andrews等^[35]提出了等效湍流谱闪烁理论,在这个理论中,他们根据对闪烁效应物理过程的定性分析,设计了一个不仅依赖于湍流特性同时也依赖于传播条件的等效功率谱,将之代入弱起伏条件下光传播效应的理论,得到了中等起伏条件下的结果,从此开启了此方法的滥觞,不仅被用于闪烁以外的效应研究中(如相位起伏、到达角起伏等),更被广泛应用于部分相干光的传播研究。同样地,这个方法也被用于在假定传播路径上湍流功率谱的幂律相同的非 Kolmogorov 湍流传播效应研究^[36-38]。

从2010年爆发式地开始了非 Kolmogorov 大气湍流中光传播的理论研究,主要研究者包括美国、俄罗斯、德国、土耳其、智利等国的几个零星学者,以及相当数量的来自中国高等院校的学者。研究的内容可分为以下几个方面:

1) 非 Kolmogorov 大气湍流中光传播的一般效应。如高斯光束的对数振幅起伏方差^[39]、弱起伏条件下高斯光束的闪烁^[40]、中等到强起伏条件下的闪烁方差^[41-42]、Gauss-Schell光束的扩展和漂移^[43]、到达角起伏方差^[44]、到达角和闪烁的功率谱^[45]、弱起伏条件下到达角起伏功率谱^[46]、高阶模式激光束的闪烁^[47]等,以及相干、偏振、光谱频移等二阶特性^[48-49]、光脉冲的时域展宽^[50]、两条平行传播激光束的漂移特性^[51],还涉及湍流介质的调制传递函数(MTF)^[52]、非 Kolmogorov 湍流下望远镜的分辨力^[53]、天文成像抖动的间歇性^[54]等。这类研究都采用传统光传播的理论研究方法,即在 Rytov 近似下(或修正的 Rytov 近似)下,把可变幂律的非 Kolmogorov 湍流功率谱代入相关理论公式中求得有关结果,然后看有关效应随湍流功率谱幂值的变化情况。

2) 各向异性非 Kolmogorov 大气湍流中的光传播效应。Toselli等^[55]的研究采用的各向异性湍流模型对应的结构函数和功率谱密度分别具有以下形式:

$$D_n(\mathbf{r}) = \beta \cdot C_n^2 \cdot \left(\frac{\Delta x^2 + \Delta y^2}{s} + \Delta z^2 \right)^{\frac{\gamma}{2}}, \quad (2)$$

$$\Phi_n(\boldsymbol{\kappa}, \alpha) = A(\alpha) \cdot \tilde{C}_n^2 \cdot s^2 \left[\kappa_z^2 + s(\kappa_x^2 + \kappa_y^2) \right]^{\frac{\alpha}{2}}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{r} 为空间矢量, β 为常数,单位为 $\text{m}^{-\gamma+2/3}$,当 $\gamma=2/3$ 时, $\beta=1$, γ 为结构函数幂率, $A(\alpha)$ 为依赖于幂值 α 的系数, s 为各向异性因子, Δx , Δy , Δz 分别表示 x , y , z 方向上的空间距离, $\boldsymbol{\kappa}$ 为波矢量, κ_x , κ_y , κ_z 分别为相应方向上的波数, α 为湍流功率谱幂值, $\alpha=3+\gamma$, \tilde{C}_n^2 为非 Kolmogorov 折射率结构常数,单位为 $\text{m}^{-\gamma}$ 。将此各向异性模型应用于 Rytov 近似下的光传播理论,得到了沿水平方向(z)传播的效应,结果表明:长曝光光束扩展和闪烁方差较各向同性 Kolmogorov 湍流下的对应值改变了一个 $s^{2-\alpha}$ 因子。

此外, Gudimetla等^[56-57]获得了一种各向异性非 Kolmogorov 湍流中平面波和球面波对数振幅相关函数的解析表达式。Yao等^[58]针对 Gauss-Schell 光束研究了各向异性非 Kolmogorov 湍流中的一些传播效应。

3) 各种特殊光源在非 Kolmogorov 大气湍流中的传播效应。如部分相干平顶涡旋光束的传播效应^[59]、Laguerre-Gaussian 光束的传播效应^[60]、厄米-高斯光束的传输性质^[61]、平顶光束的光强起伏^[62-64]、偏心环状光束的传播效应^[65]、余弦 Gaussian-Schell 光束的传播因子^[66-67]、sinc-Schell 光束的传播特性^[68]、高斯谢尔模型光束的光谱变化^[69]、超连续谱光源的传输特性^[70]。

4) 部分相干光在非 Kolmogorov 大气湍流中的传播效应。如部分相干双曲正弦-Gauss 涡旋光束叠加形成的合成相干涡旋在非 Kolmogorov 大气湍流中的动态演化^[71]、部分空间相干光束在非 Kolmogorov 湍流大气中的有效曲率半径^[72]、部分相干贝塞尔高斯光束的传播特性^[73]、截断部分相干双曲余弦高斯光束的传输特性^[74]、携带光学涡旋的部分相干光束的相关性演化^[75]、部分相干厄米高斯光束传输因子的变化^[76]、部分相干平顶光束湍流距离的变化^[77]。

在上面这两部分研究中,大都采用扩展的 Huygens-Fresnel 原理,或在交叉谱密度函数的基础上求取传播效应的统计平均值,所得结果反映不出起伏特征。这种方法在部分相干光在湍流大气中的传播研究中广

泛采用,产生了数量庞大的论文。

这些特殊形态的光源目前多处于理论研究状态,实际的光源及其在湍流大气中的应用尚难预测何时到来,因此这方面的研究工作大都属于超前研究,理论研究结果都无法得到实验的验证。

5) 各种阵列光源在非 Kolmogorov 大气湍流中的传播效应。如直线阵列光束的扩展效应^[78-79]、轴对称阵列高斯光束的扩展效应^[80]、相干合成阵列激光束的传播效应^[81]、自分割光束的传播效应^[82]、非 Kolmogorov 大气湍流对高斯阵列光束扩展的影响^[83]。在这些研究中,大都采用扩展的 Huygens-Fresnel 原理求取传播效应的统计平均值,所得结果反映不出起伏特征。

阵列光源目前有重要的潜在应用,有关它们在湍流大气中传播问题的研究很有必要,重要的不在于大气湍流是否满足 Kolmogorov 理论描述,而是阵列光源和单一光源的传播特性的区别。

6) 非 Kolmogorov 大气湍流对各种光电工程的影响。大气湍流对各种应用在大气中的光电系统的性能都有影响,相关的研究工作起步很早,也涉及到方方面面,而明确以非 Kolmogorov 湍流的影响为主题的研究只涉及到自适应光学、无线光通信和量子信息传递三种技术。

非 Kolmogorov 湍流对自适应光学技术的影响也主要限制在理论研究,有探讨分布式信标对校正能力的影响^[84],或去除不同阶次像差 Zernike 多项式的校正能力变化^[85]。

近年来无线光通信的再度兴起也引发了大气湍流对误码率、信道容量等无线光通信性能影响的理论研究,而明确以非 Kolmogorov 湍流的影响为主题的研究论文也相继出现^[86-90]。

依照传统光传播研究方法开展非 Kolmogorov 大气湍流中光传播效应的研究工作可能用于信息传递的 Laguerre-Gauss 光束纠缠角动量特性^[91],以及 Hankel-Bessel、Whittaker-Gauss 光束轨道角动量特性^[92-93]。

5年间(2010~2014)Optics InfoBase 收录关于“non-Kolmogorov turbulence”的期刊论文 40 余篇,有关统计特性列于表 1。

表 1 2010~2014 5 年间 Optics InfoBase 收录的非 Kolmogorov 大气湍流光传播的论文统计

Table 1 Optics InfoBase articles on light propagation through non-Kolmogorov-type atmospheric turbulence in 2010~2014

Year	2010	2011	2012	2013	2014	Total
Opt Lett	3	2	1	0 (COL:1)	1	8
JOPT Soc Am A	0	4	3(+2)	3	5	15
Appl Opt	0	0	1	1	1	3
Opt Express	4	4	3	2	6	19
Foreign author	2, America: 1 Russia: 1 (cooperation)	2, America: 1, Turkey: 1	3, America: 1, Turkey: 1, Chile: 1	0	4, America: 1, Turkey: 1×2, Germany: 1(from America)	11
Chinese author	5	8	5	7	9	34
Total	7	10	8(+2)	7	13	45(+2)

表 1 中(+2)指对一篇论文另有两篇质询与回应文章。从统计表中可以看出,活跃在这个方向上发表论文的主要是中国学者。在寥寥的几个国外学者中,Gudimetla 供职于美国空军研究实验室定向能部,其研究工作应该有一定的应用需求背景,发表 2 篇论文。Toselli 在美国海军研究生院学习,后在德国夫琅禾费光电子学、系统技术和图像处理研究所工作,两个时期各发表 1 篇论文。Baykal 在土耳其 Cankaya 大学电子与通讯工程系工作,发表 3 篇论文,与其合作的 Gercekcioglu 发表 1 篇论文。Korotkova 在美国迈阿密大学物理系工作,俄罗斯 Samara 州立航天大学的 Shchepakina 曾与 Korotkova 一起工作过,她们各发表 1 篇论文。智利的 Perez 发表 1 篇论文。

而中国学者全部来自高等院校,计有北京航空航天大学(包括两个团队,第一个团队以 Cui 为第一作者发表 7 篇论文,Xue 为第一作者发表 2 篇论文,另一团队发表 1 篇)、江南大学(Zhang 等 4 篇)、湖州师院(Mei 3 篇)、国防科技大学(3 篇)、浙江大学(Cang 2 篇)、哈尔滨工业大学(2 篇)、四川大学(两个团队各 1 篇)、安徽师范大学(Xu 2 篇)、四川师范大学、西安电子科技大学、长春理工大学、华中科技大学、北京邮电大学、浙江外国语学院各 1 篇。

除了 Optics InfoBase 收录的期刊外,国内的一些学术刊物也发表了一些有关非 Kolmogorov 大气湍流中光传播效应的研究论文。

除了上述几个光学刊物发表的正式论文, Optics InfoBase 还收录了美国光学学会召开的一些会议上的论文。最近每年召开一个 Propagation Through and Characterization of Distributed Volume Turbulence (PCDVT) 的会议。主要是由 MURI (Multidisciplinary University Research Initiative): Wave Optics of Deep Atmospheric Turbulence 的研究项目的承担单位举办的。这些研究单位分别隶属于 5 所大学: University of Dayton, Air Force Institute of Technology, Michigan Technological University, North Carolina State University 和 University of Miami。会议论文的主题涵盖了湍流理论、湍流特性、传播效应的数值模拟和实验研究, 这些研究要比上述主流学术期刊上发表的论文更具实际意义。如非 Kolmogorov 湍流中闪烁效应的实验研究^[94]、非 Kolmogorov 湍流功率谱幂值对闪烁效应的实验研究^[95]、三层非 Kolmogorov 湍流中的长距离水平光传播的数值模拟^[96]、包含内外尺度的非 Kolmogorov 相位屏的模拟^[97-98]、从相位方差和相关信息估算路径平均的非 Kolmogorov 湍流折射率结构常数^[99]等。

4 重点研究方向建议

考虑到传播路径上湍流功率谱的幂律的随机起伏, 实质性地开展非 Kolmogorov 湍流传播效应的研究工作不能采用解析方法, 而只可能采用数值模拟的方法。在模拟过程中, 必须考虑功率谱的幂律的随机起伏特性, 而这些幂值的实际情况只能通过实验测量获得。非 Kolmogorov 湍流传播效应的数值模拟结果的最终验证必须在有实际监测折射率起伏方差、幂律、外尺度条件下开展的实验研究来完成。因此建议在以下三个方面开展相关工作:

1) 发展高灵敏度、高时空分辨率的大气折射率起伏测量技术。最近发展的光纤湍流传感器就是一项性能良好的测量仪器^[100], 通过连续的实际大气湍流测量, 不但可以获得功率谱的幂律, 还可以获得许多更基本的湍流特性, 如间歇性、空间相关特性、湍流特征等^[101]。长时间的测量, 可以获得这些湍流特性与其他环境参量、气象参量的关系, 这些实际测量数据可以为建立用于光传播数值模拟的非 Kolmogorov 湍流模型打下基础。

2) 非 Kolmogorov 大气湍流中的光传播数值模拟。传播路径上的湍流特性符合实际测量的起伏特性, 根据测量结果建立起功率谱幂律、特征尺度等概率分布的定量模拟, 通过大量的数值模拟, 获得非 Kolmogorov 大气湍流中的光传播效应统计特性。

3) 利用光纤湍流传感器实际监测折射率起伏方差、幂律、外尺度等参数, 利用各种大气探测仪器检测温度、气压、风速、能见度、太阳辐射量等参数, 在各种传输距离上开展光波在实际大气湍流中的实验研究, 同时将大气湍流等参数输入数值模拟程序, 进行传播效应的数值模拟, 用实际实验结果验证非 Kolmogorov 湍流传播效应的数值模拟结果, 发现问题, 进一步深入探讨有关理论问题。

5 结 论

非 Kolmogorov 大气湍流中光传播效应以及这些效应对各种光电工程影响的研究工作的难点在于对非 Kolmogorov 大气湍流本身特性的可靠认识, 以及非 Kolmogorov 大气湍流中的光传播理论研究结果的实验验证。而沿用 Kolmogorov 大气湍流中的光传播理论研究方法开展非 Kolmogorov 大气湍流中的光传播理论研究固然需要去做, 但这只是一种数学推导工作, 虽然过程比较复杂, 但没有物理本质上的区别。2010~2014 年, 许多工作集中在这些方面。

今后相关工作的重点应该放在: 实际大气湍流特性的可靠测量、基于实际大气湍流特性的光传播数值模拟和实际大气中光传播(包括光电系统工作性能)的实验研究与光传播数值模拟的对比较验证三个方面。

参 考 文 献

- 1 Kolmogorov A N. A refinement of previous hypotheses concerning the local structure of turbulence in a viscous incompressible fluid at high Reynolds number[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1962, 13(01): 82-85.
- 2 Kolmogorov A N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1991, 434(1890): 9-13.
- 3 Tatarskii V I. Wave Propagation in Turbulent Medium[M]. RA Silverman, Transl. New York: McGraw-Hill, 1961.
- 4 Tatarskii V I. The Effects of the Turbulent Atmosphere on Wave Propagation[M]. Jerusalem: Israel Program for Scientific

- Translations, 1971.
- 5 Strohbehn J W. Laser Beam Propagation in the Atmosphere[M]. Berlin: Springer, 1978.
 - 6 Ishimaru A. Wave Propagation and Scattering in Random Media[M]. New York: Academic Press, 1978.
 - 7 Sasiela R J. Electromagnetic wave propagation in turbulence: Evaluation and application of Mellin transforms[C]. SPIE, 2007.
 - 8 Andrews L C, Phillips R L. Laser Beam Propagation through Random Media[M]. Bellingham: SPIE Press, 1998.
 - 9 Rao Ruizhong. Light Propagation in the Turbulent Atmosphere[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 2005.
饶瑞中. 光在湍流大气中的传播[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005.
 - 10 Rao Ruizhong. Modern Atmospheric Optics[M]. Beijing: Science Press, 2012.
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
 - 11 Yahel R Z. Turbulence effects on high energy laser beam propagation in the atmosphere[J]. Applied Optics, 1990, 29(21): 3088–3095.
 - 12 Tatarskii V I, Ishimaru A, Zavorotny V U. Wave Propagation in Random Media (Scintillation)[C]. Wave Propagation in Random Media (Scintillation), 1993.
 - 13 Zeng Zongyong, Yuan Renmin, Tan Kun, *et al.*. The spectrum of temperature in the surface layer over complicated terrain[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1998, 15(2): 134–139.
曾宗泳, 袁仁民, 谭 锐, 等. 复杂地形近地面温度谱[J]. 量子电子学报, 1998, 15(2): 134–139.
 - 14 Rao C, Jiang W, Ling N. Measuring the power-law exponent of an atmospheric turbulence phase power spectrum with a Shack Hartmann wave-front sensor[J]. Optics letters, 1999, 24(15): 1008–1010.
 - 15 Mei Haiping, Wu Xiaoqing, Rao Ruizhong. Measurement and analysis of temperature power spectrum scaling exponent in non-Kolmogorov turbulent atmosphere[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(9): 1423–1427.
梅海平, 吴晓庆, 饶瑞中. 非 Kolmogorov 大气湍流温度谱标度指数的测量与分析[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(9): 1423–1427.
 - 16 Ma Xiaoshan, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Comparison of refractive index structure constants of atmospheric turbulence deduced from scintillation and beam wander effects[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(4): 538–542.
马晓珊, 朱文越, 饶瑞中. 利用闪烁和漂移效应测量大气折射率结构常数的对比分析[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(4): 538–542.
 - 17 Mei H, Li B, Huang H, *et al.*. Piezoelectric optical fiber stretcher for application in an atmospheric optical turbulence sensor[J]. Applied Optics, 2007, 46(20): 4371–4375.
 - 18 Yuan Kee, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Influence of different refractive index spectrums on scintillation and phase fluctuation power spectrum of light wave propagation in atmosphere[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(7): 1462–1466.
苑克娥, 朱文越, 饶瑞中. 湍流折射率谱型对大气闪烁和相位起伏功率谱的影响[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(7): 1462–1466.
 - 19 Wu Xiaoqing, Huang Honghua, Qian Xianmei, *et al.*. Thermosonde measurement of temperature structure parameter and temperature spectral power-law exponent profile in the lower 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.
 - 20 Wu Xiaoqing, Huang Yinbo, 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.
 - 21 Papanicolaou G C, Sølna K. Wavelet based estimation of local Kolmogorov turbulence[J]. Theory and Applications of Long-Range Dependence, 2003: 473–505.
 - 22 Papanicolaou G C, Solna K, Washburn D C. Segmentation-independent estimates of turbulence parameters[C]. Aerospace/Defense Sensing and Controls. International Society for Optics and Photonics, 1998: 256–267.
 - 23 Belen'kii M S. Effect of the stratosphere on star image motion[J]. Optics Letters, 1995, 20(12): 1359–1361.
 - 24 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.
 - 25 Rao R. Description and measurement of the strength of an optical turbulence[C]. Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems VII. 2004, 5572: 45–48.
 - 26 Baykal Y, Gerçekcioğlu H. Equivalence of structure constants in non-Kolmogorov and Kolmogorov spectra[J]. Optics Letters, 2011, 36(23): 4554–4556.
 - 27 Xue B, Cui L, Xue W, *et al.*. Theoretical expressions of the angle-of-arrival variance for optical waves propagating through non-Kolmogorov turbulence[J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8433–8443.
 - 28 Cui L, Xue B, Zheng S, *et al.*. Atmospheric spectral model and theoretical expressions of irradiance scintillation index for optical

- wave propagating through moderate-to-strong non-Kolmogorov turbulence[J]. *J Opt Soc Am A*, 2012, 29(6): 1091–1098.
- 29 Farrell T, Sanchez D, Holzman J, *et al.*. A General mathematical model for non-Kolmogorov turbulence[C]. *Adaptive Optics: Methods, Analysis and Applications*. Optical Society of America, 2013: JW2A. 5.
- 30 Farrell T, Sanchez D J, Kelly P, *et al.*. Modifying the inner scale equation of the boundary layer turbulence model to account for non-Kolmogorov turbulence[C]. *Propagation Through and Characterization of Distributed Volume Turbulence*. Optical Society of America, 2014: PM2E.2.
- 31 Toselli I. Introducing the concept of anisotropy at different scales for modeling optical turbulence[J]. *J Opt Soc Am A*, 2014, 31(8): 1868–1875.
- 32 Lukin V P, Nosov V V, Nosov E V, *et al.*. Non-Kolmogorov's and Kolmogorov's solitonic hydrodynamical turbulence[C]. *Propagation Through and Characterization of Distributed Volume Turbulence*. Optical Society of America, 2014: PM4E. 2.
- 33 Yuan R, Luo T, Sun J, *et al.*. A new method for measuring the imaginary part of refractive index structure parameter in the urban surface layer[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2014, 14(15): 21285–21314.
- 34 Stribling B E. *Laser Beam Propagation in Non-Kolmogorov Atmospheric Turbulence*[D]. Anchorage: Air Force Institute of Technology, 1994.
- 35 Andrews L C, Phillips R L, Hopen C Y, *et al.*. Theory of optical scintillation[J]. *J Opt Soc Am A*, 1999, 16(6): 1417–1429.
- 36 Cui L, Xue B, Cao X. Analysis of optical waves propagating through moderate-to-strong non-Kolmogorov turbulence[J]. *J Opt Soc Am A*, 2013, 30(9): 1738–1745.
- 37 Cui L, Xue B, Zhou F. Analytical expressions for the angle of arrival fluctuations for optical waves' propagation through moderate-to-strong non-Kolmogorov refractive turbulence[J]. *J Opt Soc Am A*, 2013, 30(11): 2188–2195.
- 38 Cui L, Xue B, Cao X, *et al.*. Angle of arrival fluctuations considering turbulence outer scale for optical waves' propagation through moderate-to-strong non-Kolmogorov turbulence[J]. *J Opt Soc Am A*, 2014, 31(4): 829–835.
- 39 Tan L, Du W, Ma J, *et al.*. Log-amplitude variance for a Gaussian-beam wave propagating through non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 451–462.
- 40 Cui L, Xue B, Cao L, *et al.*. Irradiance scintillation for Gaussian-beam wave propagating through weak non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 16872–16884.
- 41 Cui L, Xue B, Zheng S, *et al.*. Atmospheric spectral model and theoretical expressions of irradiance scintillation index for optical wave propagating through moderate-to-strong non-Kolmogorov turbulence[J]. *J Opt Soc Am A*, 2012, 29(6): 1091–1098.
- 42 Yi X, Liu Z, Yue P. Inner-and outer-scale effects on the scintillation index of an optical wave propagating through moderate-to-strong non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 4232–4247.
- 43 Wu G, Guo H, Yu S, *et al.*. Spreading and direction of Gaussian-Schell model beam through a non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(5): 715–717.
- 44 Xue B, Cui L, Xue W, *et al.*. Generalized modified atmospheric spectral model for optical wave propagating through non-Kolmogorov turbulence[J]. *J Opt Soc Am A*, 2011, 28(5): 912–916.
- 45 Du W, Tan L, Ma J, *et al.*. Temporal-frequency spectra for optical wave propagating through non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optics Express*, 2010, 18(6): 5763–5775.
- 46 Cui L, Xue B, Zhu W, *et al.*. Temporal power spectral models of angle of arrival fluctuations for optical waves propagating through weak non-Kolmogorov turbulence[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(11): 110102.
- 47 Baykal Y. Cross beam scintillations in non-Kolmogorov medium[J]. *J Opt Soc Am A*, 2014, 31(10): 2198–2202.
- 48 Shchepakina E, Korotkova O. Second-order statistics of stochastic electromagnetic beams propagating through non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 10650–106580.
- 49 Korotkova O, Shchepakina E. Color changes in stochastic light fields propagating in non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(22): 3772–3774.
- 50 Chen C, Yang H, Lou Y, *et al.*. Temporal broadening of optical pulses propagating through non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7749–7757.
- 51 Pérez D G, Funes G. Beam wandering statistics of twin thin laser beam propagation under generalized atmospheric conditions[J]. *Optics Express*, 2012, 20(25): 27766–27780.
- 52 Cui L, Xue B, Cao X, *et al.*. Generalized atmospheric turbulence MTF for wave propagating through non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optics Express*, 2010, 18(20): 21269–21283.

- 53 Peng Qi, Chen Hongbin, Wang Jihong, *et al.*. Analysis of solving power of telescopes for non-Kolmogorov turbulence[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0113002.
彭 起, 陈洪斌, 王继红, 等. 非科尔莫戈罗夫湍流下望远镜的分辨力分析[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0113002.
- 54 Lukin V P, Kovadlo P G, Nosov V V, *et al.*. Intermittency of jitter of the astronomical images is non-Kolmogorov's turbulence effect[C]. Propagation Through and Characterization of Distributed Volume Turbulence. Optical Society of America, 2014: PM4E. 3.
- 55 Toselli I, Agrawal B, Restaino S. Light propagation through anisotropic turbulence[J]. J Opt Soc Am A, 2011, 28(3): 483-488.
- 56 Gudimetla V S, Holmes R B, Riker J F. Analytical expressions for the log-amplitude correlation function for plane wave propagation in anisotropic non-Kolmogorov refractive turbulence[J]. J Opt Soc Am A, 2012, 29(12): 2622-2627.
- 57 Gudimetla V S, Holmes R B, Riker J F. Analytical expressions for the log-amplitude correlation function for spherical wave propagation through anisotropic non-Kolmogorov atmosphere[J]. J Opt Soc Am A, 2014, 31(1): 148-154.
- 58 Yao M, Toselli I, Korotkova O. Propagation of electromagnetic stochastic beams in anisotropic turbulence[J]. Optics Express, 2014, 22(26): 31608-31619.
- 59 He X, Lv B. Propagation of partially coherent flat-topped vortex beams through non-Kolmogorov atmospheric turbulence[J]. J Opt Soc Am A, 2011, 28(9): 1941-1948.
- 60 Xu H, Cui Z, Qu J. Propagation of elegant Laguerre-Gaussian beam in non-Kolmogorov turbulence[J]. Optics Express, 2011, 19(22): 21163-21173.
- 61 Huang Yongping, Zeng Anping. Propagation properties of Hermite-Gaussian beams in non-Kolmogorov turbulence[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(7): 818-823.
黄永平, 曾安平. 厄米-高斯光束在非 Kolmogorov 大气湍流中的传输性质[J]. 光子学报, 2012, 41(7): 818-823.
- 62 Gerçekcioğlu H, Baykal Y. Intensity fluctuations of flat-topped beam in non-Kolmogorov weak turbulence[J]. J Opt Soc Am A, 2012, 29(2): 169-173.
- 63 Charnotskii M. Intensity fluctuations of flat-topped beam in non-Kolmogorov weak turbulence: comment[J]. J Opt Soc Am A, 2012, 29(9): 1838-1840.
- 64 Gerçekcioğlu H, Baykal Y. Intensity fluctuations of flat-topped beam in non-Kolmogorov weak turbulence: reply[J]. J Opt Soc Am A, 2012, 29(9): 1841-1842.
- 65 Li X, Ji X. Propagation characteristics of decentered annular beams through non-Kolmogorov turbulence[J]. J Opt Soc Am A, 2014, 31(1): 172-182.
- 66 Xu H, Zhang Z, Qu J, *et al.*. Propagation factors of cosine-Gaussian-correlated Schell-model beams in non-Kolmogorov turbulence[J]. Optics Express, 2014, 22(19): 22479-22489.
- 67 Mei Z, Shchepakina E, Korotkova O. Propagation of cosine-Gaussian-correlated Schell-model beams in atmospheric turbulence[J]. Optics Express, 2013, 21(15): 17512 ~ 17519
- 68 Mei Z, Mao Y. Electromagnetic sinc Schell-model beams and their statistical properties[J]. Optics Express, 2014, 22(19): 22534-22546.
- 69 Peng Yanyan, Li Jinhong, Wei Jilin, *et al.*. Influence of non-Kolmogorov atmospheric turbulence on the spectral changes of Gaussian-Schell model beams[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 010102.
彭艳艳, 李晋红, 魏计林, 等. 非 Kolmogorov 大气湍流对高斯谢尔模型光束光谱变化的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 010102.
- 70 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.
- 71 He Xuemei, Lv Baida. Dynamic evolution of composite coherence vortices by superimpositions of partially coherent hyperbolic-sine-Gaussian vortex beams in non-Kolmogorov atmospheric turbulence[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(5): 054201.
何雪梅, 吕百达. 部分相干双曲正弦-Gauss 涡旋光束叠加形成的合成相干涡旋在非 Kolmogorov 大气湍流中的动态演化[J]. 物理学报, 2012, 61(5): 054201.
- 72 Huang Yongping, Zhao Guangpu, Xiao Xi, *et al.*. Effective radius of curvature of spatially partially coherent beams propagating through non-Kolmogorov turbulence[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(14): 144202.
黄永平, 赵光普, 肖 希, 等. 部分空间相干光束在非 Kolmogorov 湍流大气中的有效曲率半径[J]. 物理学报, 2012, 61(14): 144202.
- 73 Jiang Yuesong, Zhang Xingang, Wang Shuaihui, *et al.*. Propagation of partially coherent Bessel-Gaussian beams in non-

- Kolmogorov turbulence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(1): 0101001.
江月松, 张新岗, 王帅会, 等. 部分相干贝塞尔高斯光束在非柯尔莫哥诺夫湍流中的传输特性[J]. *光子学报*, 2013, 43(1): 101001.
- 74 Tao Rumao, Si Lei, Ma Yanxing, *et al.*. Propagation of truncated partially coherent cosine-Gaussian beam in non-Kolmogorov turbulence[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0502008.
陶汝茂, 司磊, 马阎星, 等. 截断部分相干双曲余弦高斯光束在非Kolmogorov湍流中的传输[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0502008.
- 75 Qin Z, Tao R, Zhou P, *et al.*. Coherence evolution of partially coherent beams carrying optical vortices propagating in non-Kolmogorov turbulence[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(33): 8176-8183.
- 76 Wang Weiwei, Li Jinhong, Lai Yunzhong, *et al.*. Influence of non-Kolmogorov atmospheric turbulence on propagation factors of partially coherent Hermite-Gaussian beams[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(3): 031010.
王伟伟, 李晋红, 赖云忠, 等. 非Kolmogorov大气湍流对部分相干厄米高斯光束传输因子的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(3): 031010.
- 77 Huang Yongping, Duan Zhichun, He Yehuan, *et al.*. Change of turbulence distance for partially coherent flat-topped beams propagating through non-Kolmogorov turbulence[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 245-250.
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 (9): 245-250.
- 78 Zhou P, Ma Y, Wang X, *et al.*. Average spreading of a Gaussian beam array in non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(7): 1043-1045.
- 79 Huang Y, Zhang B. Turbulence distance for laser beams propagating through non-Kolmogorov turbulence[J]. *J Opt Soc Am A*, 2013, 30(11): 2339-2346.
- 80 Tang H, Ou B, Luo B, *et al.*. Average spreading of a radial Gaussian beam array in non-Kolmogorov turbulence[J]. *J Opt Soc Am A*, 2011, 28(6): 1016-1021.
- 81 Tao R, Si L, Ma Y, *et al.*. Propagation of coherently combined truncated laser beam arrays with beam distortions in non-Kolmogorov turbulence[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(23): 5609-5618.
- 82 Mei Z. Light sources generating self-splitting beams and their propagation in non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13029-13040.
- 83 Lu Lu, Ji Xiaoling, Deng Jinping, *et al.*. Influence of non-Kolmogorov turbulence on the spreading of Gaussian array beams[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(1): 014207.
陆璐, 季小玲, 邓金平, 等. 非Kolmogorov大气湍流对高斯阵列光束扩展的影响[J]. *物理学报*, 2014, 63(1): 014207.
- 84 Rao C, Jiang W, Ling N. Adaptive-optics compensation by distributed beacons for non-Kolmogorov turbulence[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(21): 3441-3449.
- 85 Toselli I, Gladysz S. Efficiency of adaptive optics correction for Gaussian beams propagating through non-Kolmogorov turbulence[C]. *Propagation Through and Characterization of Distributed Volume Turbulence*, Optical Society of America, 2014: PM3E. 6.
- 86 Cang J, Liu X. Scintillation index and performance analysis of wireless optical links over non-Kolmogorov weak turbulence based on generalized atmospheric spectral model[J]. *Optics Express*, 2011, 19(20): 19067-19077.
- 87 Cang J, Liu X. Average capacity of free-space optical systems for a partially coherent beam propagating through non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(17): 3335-3337.
- 88 Deng P, Kavehrad M, Liu Z, *et al.*. Capacity of MIMO free space optical communications using multiple partially coherent beams propagation through non-Kolmogorov strong turbulence[J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 15213-15229.
- 89 Cheng M, Zhang Y, Gao J, *et al.*. Average capacity for optical wireless communication systems over exponentiated weibull distribution non-Kolmogorov turbulent channels[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(18): 4011-4017.
- 90 Jiang Yuesong, Wang Shuaihui, Ou Jun, *et al.*. Average capacity of free-space optical systems for a Laguerre-Gaussian beam propagating through non-Kolmogorov turbulence[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(21): 214201.
江月松, 王帅会, 欧军, 等. 基于拉盖尔-高斯光束的通信系统在非Kolmogorov湍流中传输的系统容量[J]. *物理学报*, 2013, 62(21): 214201.
- 91 Sheng X, Zhang Y, Zhao F, *et al.*. Effects of low-order atmosphere-turbulence aberrations on the entangled orbital angular momentum states[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2607-2609.

- 92 Zhu Y, Liu X, Gao J, *et al.*. Probability density of the orbital angular momentum mode of Hankel-Bessel beams in an atmospheric turbulence[J]. Optics Express, 2014, 22(7): 7765-7772.
- 93 Zhang Y, Cheng M, Zhu Y, *et al.*. Influence of atmospheric turbulence on the transmission of orbital angular momentum for Whittaker-Gaussian laser beams[J]. Optics Express, 2014, 22(18): 22101-22110.
- 94 Korotkova O. Intensity and power statistics of laser and random beams in non-Kolmogorov turbulence[C]. Propagation Through and Characterization of Distributed Volume Turbulence Optical Society of America, 2014: PM3E. 2.
- 95 Xiao X, Korotkova O, Voelz D G. Laboratory investigation of the spectral exponent effect on scintillation in non-Kolmogorov turbulence[C]. Propagation Through and Characterization of Distributed Volume Turbulence. Optical Society of America, 2014: PM3E. 3.
- 96 Bos J P, Gudimetla V S. Simulation of long-path horizontal propagation through a three-layer non-Kolmogorov atmosphere model[C]. Propagation Through and Characterization of Distributed Volume Turbulence • Optical Society of America, 2014: PM3E. 5.
- 97 Roggemann M C. Simulating non-Kolmogorov phase screens with finite inner and outer scales[C]. Propagation Through and Characterization of Distributed Volume Turbulence. Optical Society of America, 2014: PM3E. 1.
- 98 Roggemann M C. Simulating non-Kolmogorov phase screens with finite inner and outer scales[C]. Propagation Through and Characterization of Distributed Volume Turbulence. Optical Society of America, 2014: PM4E. 1.
- 99 Gudimetla V S, Bos J P. Estimating path-averaged refractive index structure constant in non-Kolmogorov deep turbulence using the unwrapped phase variance and correlation information[C]. Propagation Through and Characterization of Distributed Volume Turbulence • Optical Society of America, 2014: PM3E. 4.
- 100 Mei Haiping, Yuan Kee, Rao Ruizhong. Fiber optical sensing technology and its applications in measuring atmospheric optical turbulence parameters[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(1): 1-5.
梅海平, 苑克娥, 饶瑞中. 光纤传感技术用于大气光学湍流测量[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(1): 1-5.
- 101 Wang Qian, Mei Haiping, Xiao Shumei, *et al.*. Fractal and intermittency analysis of atmospheric optical turbulence near ground[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(2): 57-62.
王 倩, 梅海平, 肖树妹, 等. 近地层大气光学湍流的分形和间歇性特征分析[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(2): 57-62.

栏目编辑: 史 敏