

一般非Kolmogorov大气湍流路径上平面波闪烁的数值模拟分析

李玉杰^{1,2} 朱文越^{1*} 钱仙妹¹ 饶瑞中^{1,2,3}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031

²中国科学院大学, 北京 100049

³中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230031

摘要 利用数值模拟的方法研究了平面波在弱湍流大气中沿水平路径传播时的闪烁特性,得到了传播路径上既包含Kolmogorov湍流(简称K湍流)又包含非Kolmogorov湍流(简称非K湍流)时,平面波的闪烁指数与光传播距离、非K湍流谱标度指数、非K湍流所占百分比等参数之间的关系。对比分析了平面波在混合湍流路径下的闪烁效应与在单独K湍流和非K湍流下的闪烁效应。结果表明:当路径上湍流为K湍流和非K湍流的组合,且非K湍流谱一定时,闪烁指数随传播路径上非K湍流所占百分比的增加而增加,随K湍流所占百分比的增加而下降;当传播路径上只有非K湍流时,闪烁指数随非K湍流谱幂率的增加呈先增加后下降的趋势。

关键词 大气光学; 闪烁指数; 湍流谱; 数值模拟; 幂率

中图分类号 O436; P421

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.0701004

Simulation of the Scintillation Index of Plane Wave Propagating through General Non-Kolmogorov Atmospheric Turbulence Path

Li Yujie^{1,2} Zhu Wenyue¹ Qian Xianmei¹ Rao Ruizhong^{1,2,3}

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

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³School of Environmental Science and Optoelectronic Engineering, University of Science and Technology of Chinese, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract The scintillation index of plane wave propagating through weak turbulent atmosphere, which contains Kolmogorov turbulence and non-Kolmogorov turbulence, are studied by using the numerical methods. The impacts of propagation distance on the irradiance scintillation index are analysed, and the impacts of spectral power law values and the percentage of non-Kolmogorov are also considered. The scintillation effects of plane wave propagation in mix turbulent path and in single turbulent path with Kolmogorov turbulence or non-Kolmogorov turbulence are compared. The results show that the scintillation index increases with the percentage of non-Kolmogorov turbulence increasing for one spectral power law, while Kolmogorov turbulence does the opposite in conditions of mix turbulent path. Besides, as the power law increases, the non-Kolmogorov scintillation index increases with power law up to the peak value, and then decreases with the further increase in power law in weak turbulent atmosphere.

收稿日期: 2015-01-28; 收到修改稿日期: 2015-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(61107066)

作者简介: 李玉杰(1990—), 女, 博士研究生, 主要从事激光大气传输的数值模拟等方面的研究。E-mail: liyujie1017@126.com

导师简介: 饶瑞中(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事激光大气传输、大气湍流、光辐射与图像的大气传播等方面的研究。E-mail: rao@aiofm.ac.cn

*通信联系人。E-mail: zhuwenyue@aiofm.ac.cn

Key words atmospheric optics; scintillation index; turbulent spectrum; numerical simulation; power law

OCIS codes 010.1290; 010.1330; 350.4600

1 引 言

长久以来,湍流大气中光传播特性的研究都是围绕Kolmogorov湍流(简称K湍流)展开的。随着研究的不断深入和测量技术的提升,越来越多的大气湍流测量结果表明K湍流理论不足以描述所测量的实验数据,大气湍流三维功率谱在很多情况下并不严格符合 $-11/3$ 定律^[1-5]。这种不符合K湍流理论但仍然存在标度不变性的湍流称为非K湍流^[3]。目前已有部分学者开展了非K湍流大气中光传播特性的研究,但研究对象仅限于简化的湍流谱模型,且假定光传播路径上的非K湍流谱具有相同的谱幂率^[6-12]。然而,实验测量结果表明:光传播路径上的湍流谱幂率并不全是满足谱幂率 $-11/3$ 的K湍流或者是具有单一谱幂率的非K湍流,实际光传播路径既包含K湍流又包含非K湍流^[2-4,13],而且非K湍流占总传播路径上湍流的百分比(即非K湍流的概率)随地理位置和天气环境的不同而不同。如沿海地区的一维谱标度指数的测量结果表明:夏季,标度指数小于 $-5/3$ 的非K湍流概率接近90%,而冬季标度指数大于 $-5/3$ 的非K湍流概率则超过了80%^[13]。而内陆的结果则与之有较大的差别:如合肥地区9月份的一次测量结果显示,符合 $-5/3$ 的K湍流占总数的 $1/3\sim 1/2$,而西北戈壁地区8月份的一次测量结果显示,满足 $-5/3$ 的K湍流概率则超过了50%^[14]。因此,了解路径上不同的湍流谱对光传播的影响具有重要意义。

由于理论研究的复杂和实验条件的限制,很难通过这两种手段得到期望的结果。而数值模拟不受实验条件的限制,可以在一定的传播条件下,通过对参数设置来模拟多种湍流情况下的结果,因此,本文采用该方法对传播路径上既包含K湍流又包含非K湍流时的平面波光强起伏特性进行了模拟分析。

2 大气湍流折射率谱模型及数值模拟方法

2.1 大气湍流折射率谱模型

为了研究的方便,多种描述大气湍流折射率起伏特性的功率谱被提了出来,最简单也是最常用的是惯性区满足局地均匀各向同性,谱幂率为 $-11/3$ 的K湍流谱 $\Phi_n(K)$,不考虑湍流内外尺度,其形式为^[15]

$$\Phi_n(K) = 0.033C_n^2 K^{-11/3}, K > 0, \quad (1)$$

式中 C_n^2 为大气折射率结构常数,单位为 $m^{-2/3}$, K 为空间波数,单位为 m^{-1} 。

随着湍流研究的不断深入,有必要找到一种合适的折射率谱模型来对非K湍流进行描述。类似于描述K湍流的各种折射率谱模型,多种非K湍流谱模型也相继被提了出来。理论研究和数值模拟中应用最多的是不包含内外尺度的非K湍流谱 $\Phi_n(\alpha, K)$ 为^[6]

$$\Phi_n(\alpha, K) = A(\alpha)\tilde{C}_n^2 K^{-\alpha}, K > 0, \quad (2)$$

式中 α 为三维谱幂率,当研究大气湍流中的光传播特性时,通常取 $3 < \alpha < 4$, \tilde{C}_n^2 为谱幂率 α 在一定范围内所对应的折射率结构常数,称为广义折射率结构常数,单位为 $m^{3-\alpha}$, $A(\alpha)$ 为一致性函数,其作用就是对一定范围内的标度指数 α ,使其结构函数和功率谱间可以进行互换,表示为

$$A(\alpha) = \frac{\Gamma(\alpha - 1)}{4\pi^2} \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right), \quad (3)$$

其中, $\Gamma(\cdot)$ 表示伽玛函数。当 $\alpha \rightarrow 3$ 时, $A(\alpha) \rightarrow 0$, $\Phi_n(\alpha, K) \rightarrow 0$,此时湍流消失。 $\alpha = \frac{11}{3}$ 时, $A(\alpha) = 0.033$, $\tilde{C}_n^2 = C_n^2$, (3)式转化为(1)式,即非K湍流谱转化K湍流谱。

由于实际光传播路径上的湍流并非全是谱幂率为 $-11/3$ 的K湍流或者是具有单一幂率的非K湍流,实际光传播路径上往往既包含K湍流又包含非K湍流。此时,路径上湍流折射率谱模型可表示为

$$\Phi_n(\alpha, K) = \begin{cases} 0.033C_n^2 K^{-11/3}, & z \leq L_1 \\ A(\alpha)\tilde{C}_n^2 K^{-\alpha}, & z > L_1 \end{cases}, \quad (4)$$

式中 z 为光传播距离, L_1 为光传播路径上距离发射点的位置,假设 $z \leq L_1$ 的传播路径上湍流谱为满足均匀各向同性的K湍流谱, $z > L_1$ 的传播路径上湍流谱为满足均匀各向同性具有单一幂率值的非K湍流谱。模拟时

根据路径上 K 湍流谱和非 K 湍流谱的概率来分析路径上不同的湍流谱分布对平面波闪烁指数的影响。

2.2 数值模拟方法

2.2.1 多层相位屏法模拟光传播的过程

数值模拟是从光传播的抛物线方程出发,采用多层相位屏模拟大气湍流特性,利用傅里叶变换求解光场传播过程,这一过程^[16]:

假定光沿着 z 轴传播,入射到相位屏上的光场为 $\varphi(z_-, \rho)$, z_- 表示光入射到相位屏的位置, ρ 为垂直于光传播方向的平面内的点,光场 $\varphi(z_-, \rho)$ 经相位屏附加相位 $\phi(\rho)$ 后,得到光场 $\varphi(z, \rho)$ 为

$$\varphi(z, \rho) = \varphi(z_-, \rho) \exp[i\phi(\rho)]. \quad (5)$$

光场 $\varphi(z, \rho)$ 经真空衍射传播到达另一个相位屏时的光场为 $\varphi(z', \rho)$, z' 为光到达另一个相位屏的位置,真空衍射传播又可以表示为空间光场先进行傅里叶变换得到频域光场,用 $\Psi(z, K)$ 表示,然后乘上真空传播相位附加因子 $\exp\left[-i\frac{K^2(z' - z)}{2}\right]$,得到到达相位屏处的频域光场分布 $\Psi(z', K)$,经逆傅里叶变换得到空间光场分布 $\varphi(z', \rho)$,如下所示:

$$\varphi(z, \rho) \rightarrow \Psi(z, K), \quad (6)$$

$$\Psi(z', K) = \Psi(z, K) \exp\left[-i\frac{K^2(z' - z)}{2}\right], \quad (7)$$

$$\Psi(z', K) \rightarrow \varphi(z', \rho). \quad (8)$$

该光场再经相位屏附加相位后,再进行真空传播,如此进行下去,直到到达接收平面。

数值模拟中最核心也是最需要注意的问题是所构造的相位屏必须能够正确反映折射率的变化特性^[17]。相位屏最重要的几个参量为网格间距 Δx , 相位屏间距 Δz 和网格数 N 的选择,诸多文献都提出了相位屏参量选取的一些条件^[17-19]。

2.2.2 闪烁指数计算方法

光波在湍流大气中传播时,大气湍流折射率的随机起伏将导致接收面上的光强在时间和空间上随机起伏,归一化的光强起伏方差定义为闪烁,表示为^[16]

$$\beta_i^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}, \quad (9)$$

式中 β_i^2 表示闪烁指数, I 表示光强, $\langle \cdot \rangle$ 表示取系综平均。

K 湍流条件下,平面波的归一化对数光强起伏均方差定义为 Rytov 指数,用 σ_{Rytov}^2 表示,一般用其来描述传播条件,表示为

$$\sigma_{\text{Rytov}}^2(L) = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (10)$$

式中 L 表示光传播距离, k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为光波长。

闪烁指数是通过多层相位屏模拟光在湍流路径上的传播,得到接收位置处的光场分布,然后再根据(9)式计算得到的。

2.2.3 模拟参数设置

平面波在湍流大气中传播的数值模拟涉及到相位屏参数的选择,路径湍流参量的设置,以及光传播参数的设置,具体模拟参量如表 1 所示。

3 平面波光强起伏的数值分析

为研究弱起伏条件下,平面波闪烁指数与湍流起伏强度、非 K 湍流占的百分比的关系,不考虑非 K 湍流谱率的影响,固定谱率 $\alpha=10/3$,表 2 详细地列出了不同传播条件下,得到的闪烁指数值的情况。

表 1 光传播参数、相位屏参数和湍流参数

Table 1 Optical wave, phase screen and atmospheric turbulence parameters

Variable name	Symbol	Value
Optical wave	-	Plane wave
Wavelength	λ	0.5 μm
Propagation distance	L	100~1000 m
Split-step number	N_z	20
Turbulent strength	\tilde{C}_n^2	$1 \times 10^{-15} \text{m}^{-3-\alpha}$
Grid number	N_c	512
Grid interval	$\Delta x, \Delta y$	0.5 mm
Percentage of K and non-K turbulence	-	0%~100%
Power law of non-K spectrum	α	3~4

表 2 非 Kolmogorov 湍流谱幂率固定为 10/3 时的平面波闪烁指数

Table 2 Scintillation index of plane wave propagation through no-Kolmogorov turbulence with a fixed spectral power law 10/3

Non-K /%	Scintillation index									
	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m	600 m	700 m	800 m	900 m	1000 m
0	0.110×10^{-2}	0.395×10^{-2}	0.842×10^{-2}	0.0142	0.0215	0.0305	0.0399	0.0513	0.0636	0.0770
10	0.119×10^{-2}	0.424×10^{-2}	0.893×10^{-2}	0.0152	0.0231	0.0322	0.0424	0.0546	0.0676	0.0815
20	0.136×10^{-2}	0.481×10^{-2}	0.01	0.0171	0.0254	0.0357	0.0467	0.0596	0.0729	0.0898
30	0.159×10^{-2}	0.556×10^{-2}	0.0115	0.0193	0.0287	0.0397	0.0521	0.0664	0.0819	0.0987
40	0.186×10^{-2}	0.644×10^{-2}	0.0132	0.0219	0.0325	0.0451	0.0590	0.0742	0.0911	0.11
50	0.220×10^{-2}	0.743×10^{-2}	0.0151	0.0251	0.0370	0.0508	0.065	0.0841	0.103	0.124
60	0.258×10^{-2}	0.864×10^{-2}	0.0174	0.0286	0.0421	0.0574	0.0756	0.0946	0.116	0.139
70	0.301×10^{-2}	0.994×10^{-2}	0.0199	0.0324	0.0472	0.066	0.0846	0.106	0.131	0.155
80	0.345×10^{-2}	0.0114	0.0225	0.0370	0.0536	0.0727	0.0945	0.119	0.145	0.17
90	0.394×10^{-2}	0.0128	0.0254	0.0412	0.0602	0.0812	0.106	0.132	0.160	0.19
100	0.448×10^{-2}	0.0144	0.0283	0.0465	0.0663	0.091	0.117	0.146	0.175	0.21

图 1 给出了随着湍流强度的变化,闪烁指数与路径上湍流分布的关系,其中,图 1(a)为闪烁指数与 K 湍流占的比例的关系,图 1(b)为闪烁指数与非 K 湍流占的比例的关系。图中的 Rytov 指数的值是由(10)式计算得到的, Rytov 指数的增大对应于光传播距离的增加, Rytov 指数在 0~0.08 变化对应于弱起伏。从图中可以看出,路径上非 K 湍流占任意的百分比时,闪烁指数都随 Rytov 指数的增加而增加,与弱起伏下的光传播理论相符合^[20]。比较图 1(a)和图 1(b)两图可以发现,当路径上 K 湍流占的比例逐渐增加时,随 Rytov 指数的增加,闪烁指数的变化趋于平缓,而当路径上非 K 湍流占的比例增加时,闪烁指数随 Rytov 指数的增大变化越来越剧烈。

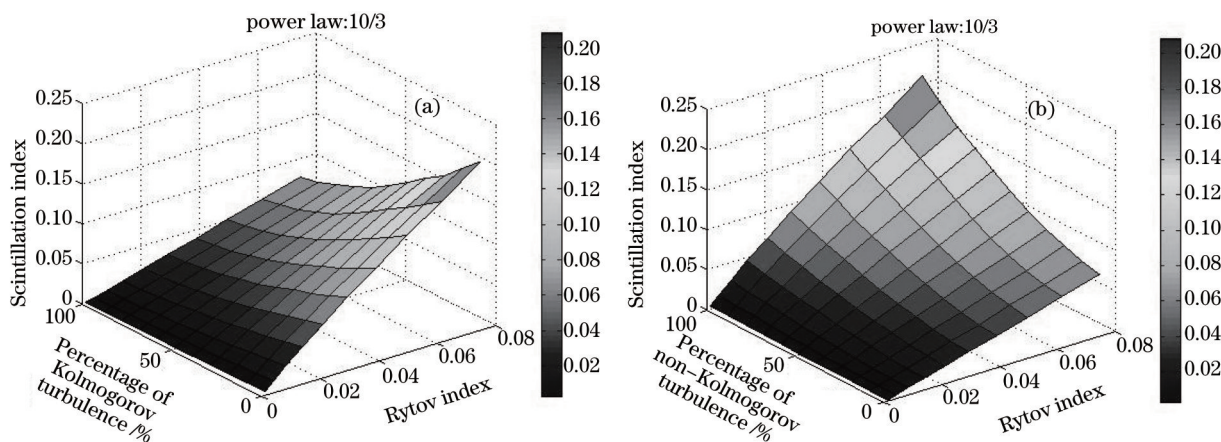


图 1 $\alpha = \frac{10}{3}$ 时,平面波闪烁指数随 Rytov 指数、(a) K 湍流占的百分比和 (b) 非 K 湍流占的百分比的变化

Fig.1 Scintillation index of plane wave changing with Rytov index and the percentages of (a) Kolmogorov turbulence and (b) non-Kolmogorov turbulence with a fixed power law $\alpha=10/3$

为分析路径上 K 湍流和不同湍流谱幂率下的非 K 湍流占比对平面波传播的光强起伏的影响,模拟了非 K 湍流谱幂率在 3~4 之间变化时的闪烁指数,详细的模拟参数和闪烁结果列于表 3。

表 3 传输距离为 1000 m 时,平面波闪烁指数与湍流谱幂率、K 湍流和非 K 湍流占路径的百分比之间的关系

Table 3 Scintillation index of plane wave changing with turbulent spectral power law and the percentage of Kolmogorov turbulence and non-Kolmogorov turbulence with a fixed propagation distance of 1000 m

K and non-K /%	Scintillation index									
	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	
100 0	0.0764	0.0766	0.0767	0.0776	0.0772	0.0764	0.0777	0.0772	0.0765	
90 10	0.0830	0.0838	0.0823	0.0808	0.0780	0.0775	0.0771	0.0766	0.0763	
80 20	0.0928	0.0938	0.0914	0.0863	0.0817	0.0788	0.0767	0.0753	0.0741	
70 30	0.104	0.109	0.102	0.0936	0.0852	0.0802	0.0759	0.0742	0.0709	
60 40	0.116	0.124	0.115	0.103	0.09	0.0823	0.0747	0.0711	0.0677	
50 50	0.130	0.141	0.129	0.113	0.0963	0.0839	0.0740	0.0679	0.0634	
40 60	0.144	0.160	0.146	0.125	0.103	0.0857	0.0731	0.0642	0.0580	
30 70	0.160	0.179	0.163	0.136	0.110	0.0888	0.0727	0.0611	0.0528	
20 80	0.175	0.203	0.182	0.151	0.118	0.0919	0.0710	0.0561	0.0463	
10 90	0.193	0.223	0.203	0.163	0.127	0.0944	0.0694	0.0525	0.0396	
0 100	0.212	0.246	0.225	0.179	0.136	0.0973	0.0683	0.0465	0.0313	

图 2(a)和图 2(b)为闪烁指数分别随路径上 K 湍流占的百分比和非 K 湍流占的百分比变化的三维图。从图中 2(a)可以看出,当 $\alpha < 11/3$ 时,闪烁指数随 K 湍流所占百分比的增加而减小;当 $\alpha > 11/3$ 时,闪烁指数随 K 湍流所占百分比的增加而增加。当路径上非 K 湍流占的百分比变化时的平面波闪烁结果如图 2(b)所示,从图中看出闪烁指数随路径上非 K 湍流占的百分比的变化关系与闪烁指数随 K 湍流占的百分比的变化呈负相关。比较图 2 中(a)和(b)图可以看出,光传播路径上随 K 湍流占的百分比的增加或者非 K 湍流占的百分比的减小,闪烁指数随非 K 湍流谱幂率的变化趋于平缓。此外,在同一湍流所占的百分比相同的条件下,闪烁指数随谱幂率 α 的增加呈先增加后下降的趋势,最大值在 3.2 附近,与之前的非 K 湍流大气中光传播的理论和模拟结果相一致^[8,21]。除此之外,当幂率 $\alpha > 11/3$ 时,闪烁指数随两种谱所占百分比的变化都趋于平缓,从物理意义上来说是当湍流谱的标度指数大于 11/3 时,随标度指数增加,湍流对平面波光强起伏的影响越来越小,这是因为当幂率逐渐趋于 4 时,湍流逐渐转化为平方律湍流,此时强度起伏与相位起伏相比,相位起伏占主要地位,因此光强起伏变小。

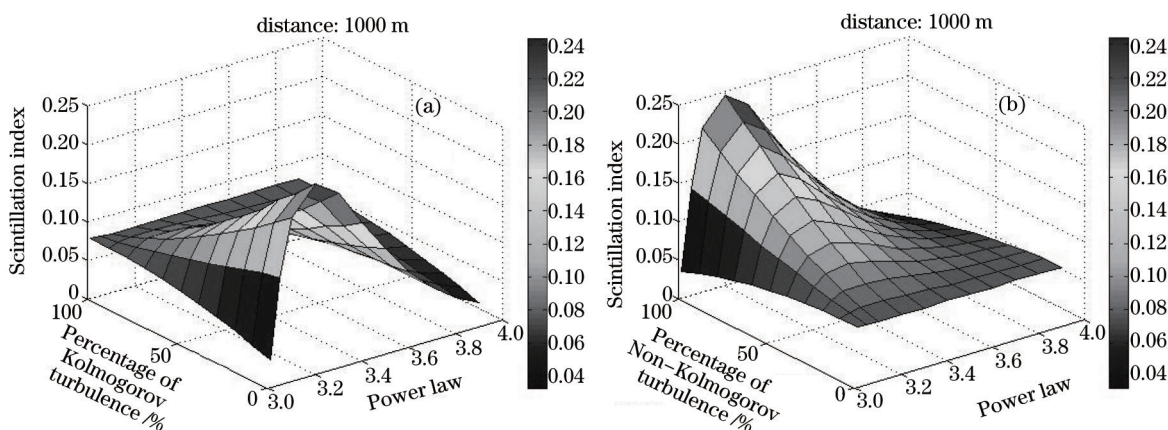


图 2 传播距离一定时,平面波闪烁指数随路径上。(a) K 湍流和 (b) 具有不同湍流谱幂率的非 K 湍流占的百分比的关系
Fig.2 Scintillation index of plane wave changing with the percentage of (a) Kolmogorov turbulence and (b) non-Kolmogorov turbulence with different power laws with a fixed distance

4 结 论

利用数值模拟方法研究了平面波在 K 湍流和非 K 湍流混合分布的大气中传播时,闪烁指数与 Rytov 指

数, K(非 K)湍流概率以及非 K 湍流谱幂率的关系, 结果表明:

1) 固定非 K 湍流谱幂率 $\alpha=10/3$, 闪烁指数随传播距离的增加而增加; 同一传播距离下, 闪烁指数随路径上 K 湍流占的百分比的增加而下降, 随路径上非 K 湍流占的百分比的增加而增加。

2) 弱湍流条件下, 路径上 K 湍流或非 K 湍流占任意的百分比, 闪烁指数都随 Rytov 指数的增加而增加; 当非 K 湍流占的比例增加时, 闪烁指数随 Rytov 指数的增加速率变大, 而随 K 湍流占的比例增加时, 闪烁指数随 Rytov 指数的变化趋于平缓。

3) 当路径上 K 湍流或者非 K 湍流占某一固定百分比时, 闪烁指数随谱幂率 α 的增加呈先增加后下降的趋势, 最大值在 3.2 附近。当 $\alpha < 11/3$ 时, 闪烁指数随着 K 湍流占的百分比的增加而减小, 当 $\alpha > 11/3$ 时, 闪烁指数随 K 湍流占的百分比的增加而增加。而闪烁指数随非 K 湍流占的百分的变化与 K 湍流时的情况相反, 且当幂率 $\alpha > 11/3$ 时, 闪烁指数随两种谱百分比的变化都趋于平缓。

综上所述, 平面波传播路径上不同的湍流分布对平面波光强起伏的影响不同。所研究的光传播的湍流路径只是考虑非 K 湍流后的一种较为简单的模型, 较为复杂的情况可能是路径上包含多种谱幂率的非 K 湍流谱, 更复杂的情况可能是路径上湍流谱幂率的分布是随机的。研究了路径上湍流强度一定时, 湍流谱模型变化时对平面波光强起伏的影响, 事实上, 即使光沿水平路径传播, 由于折射率结构常数并不是一个独立的参量, 而是与谱幂率相关, 路径上湍流谱模型变化时湍流的强度也可能在变化。因此, 在实际应用中不仅要知道光传播路径上湍流谱的情况, 也要知道路径上湍流强度的分布情况。

实际的大气湍流通常是存在有限的内外尺度的, 下一步将深入考虑湍流内外尺度的影响, 对复杂大气湍流路径中的光强闪烁, 光束扩展以及到达角起伏等其他光传播效应作进一步研究, 并结合大气光传输实验, 对上述数值模拟结果进行对比验证。

参 考 文 献

- 1 Mikhail S Belen'kii, Stephen J Karis, James M Brown II, *et al.*. Experimental study of the effect of non-Kolmogorov stratospheric turbulence on star image motion[C]. SPIE, 1997, 3126: 113-123.
- 2 Wu Xiaoqing, Wang Yingjian, Zeng Zongyong, *et al.*. Measurement of the spectrum of atmospheric temperature fluctuations[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(2): 134-139.
吴晓庆, 王英俭, 曾宗泳, 等. 大气温度起伏谱的测量[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(2): 134-139.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 Bruce E Stribling, Byron M Welsh, Michael C Roggemann. Optical propagation in non-Kolmogorov atmospheric turbulence[C]. SPIE, 1995, 2471: 181-196.
- 7 Italo T, Larry C Andrews, Ronald L Phillips, *et al.*. Scintillation index of optical plane wave propagating through non Kolmogorov moderate-strong turbulence[C]. SPIE, 2007, 6747: 67470B.
- 8 V S Rao Gudimetla, Richard B Holmes, Thomas C Farrell, *et al.*. Phase screen simulations of laser propagation through non-kolmogorov atmospheric turbulence[C]. SPIE, 2011, 8038: 803808.
- 9 Cui Linyan, Xue Bindang, Cao Lei, *et al.*. Irradiance scintillation for Gaussian-beam wave propagating through weak non-Kolmogorov turbulence[J]. Optics Express, 2011, 19(18): 16872-16884.
- 10 Tao Rumao, Si Lei, Ma Yanxing, *et al.*. Propagation of truncated partially coherent cosh-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.

- 11 Sun Haiyue, Wu Wuming, Jin Aijun, *et al.*. Propagation performance of supercontinuum source in non-Kolmogorov turbulence[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 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(5): 0413001.
- 12 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): 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.
- 13 Zhu Wenyue. Statistical Characteristics of Laser Propagation in a Coastal Turbulent Atmosphere and Its Applications[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2006: 73-75.
朱文越. 沿海地区激光大气传输湍流效应统计特征及其应用分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006: 73-75.
- 14 Wu Xiaoqing. Investigation of Optical Turbulence Characteristic and Model in Atmospheric Boundary Layer[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2004: 98-102.
吴晓庆. 大气边界层光学湍流特性与模式研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004: 98-102.
- 15 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.
- 16 J M Martin, Stanley M Flatte, Intensity images and statistics from numerical simulation of wave propagation in 3-D random media[J]. Appl Opt, 1988, 27(11): 2111-2126.
- 17 Rao Ruizhong. Modern Atmospheric Optics[M]. Beijing: Science Press, 2012: 382-386.
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012. 382-386.
- 18 Qian Xianmei, Zhu Wenyue, Huang Yinbo, *et al.*. Selection of computing parameters in numerical simulation of laser beam propagation in turbulent atmosphere[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(10): 1986-1991.
钱仙妹, 朱文越, 黄印博, 等. 激光湍流大气传输数值模拟中计算参量的选取[J]. 光子学报, 2008, 37(10): 1986-1991.
- 19 Huang Yinbo, Wang Yingjian. Choosing computing parameters in the numerical simulation of thermal blooming effects[J]. High Laser Power and Particle Beams, 2005, 17(1): 1-4.
黄印博, 王英俭. 热晕效应数值模拟中对计算参量的选取[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(1): 1-40
- 20 Larry C Andrews, R L Phillips. Laser Beam Propagation through Random Media[M]. Bellingham: SPIE press, 1998: 333.
- 21 Italo Toselli, Larry C Andrews, Ronald L Phillips, *et al.*. Free space optical system performance for laser beam propagation through non-Kolmogorov turbulence[J]. Optical Engineering, 2008, 47(2): 026003.

栏目编辑: 史 敏