

doi:10.3788/gzxb20184706.0601002

Non-Kolmogorov 湍流对光强影响的模拟实验

张娜娜¹, 单欣¹, 张燕革¹, 冯阳¹, 郭松²

(1 武汉大学 电子信息学院, 武汉 430072)

(2 上海航天技术研究院, 上海 201109)

摘 要: 基于液晶空间光调制器进行了 Non-Kolmogorov 湍流的室内模拟实验, 并对光强概率密度分布、光强闪烁指数及光强时间频谱进行了分析, 完成了模拟实验结果与相关湍流理论之间的对比验证。实验结果显示: 在弱湍流下, 归一化对数光强近似服从正态分布, 且随着湍流强度的减小, 正态分布拟合系数增大; 光强时间频谱高频段的幂律随着湍流功率谱幂律的减小呈减小趋势, 与理论分析一致, 但具体数值小于理论预测; 闪烁指数则随着大气相干长度的增大而减小, 在大气相干长度小于 0.05 m 的范围内闪烁指数急剧变化, 在大气相干长度大于 0.2 m 之后趋近平缓, 这一变化趋势与湍流幂律无关, 与理论预测一致, 表明湍流模拟实验能较好地再现湍流对无线光通信中接收光强的影响。模拟实验的误差分析表明, 不同强度湍流的模拟实验其误差主要来源不同, 可为实验的进一步改进提供针对性建议。

关键词: 大气湍流; Non-Kolmogorov 谱; 液晶空间光调制器; 概率密度分布; 闪烁指数; 时间频谱

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)06-0601002-9

Simulated Experiment of the Light Intensity Influenced by Non-Kolmogorov Turbulence

ZHANG Na-na¹, SHAN Xin¹, ZHANG Yan-ge¹, FENG Yang¹, GUO Song²

(1 College of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

(2 Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: A Non-Kolmogorov turbulence simulation experiment was carried out in the laboratory, based on the liquid crystal spatial light modulator. The probability density distribution, the scintillation index and the temporal powerspectrum were analyzed, and the experimental results were compared with the the turbulence theory. The results show that the probability density distribution of the normalized logarithmic intensity is more close to the normal distribution under weak turbulence, and the fitting coefficient becomes larger with the decrease of the turbulence strength. In the high frequency band of the intensity temporal power spectrum, the power law reduces as the turbulence spectral power law decreases. Although its value is less than the theoretical analysis, the variation trend does match the theory. The scintillation index decreases with the increase of the atmosphere coherence length. It changes abruptly when the atmosphere coherence length is less than 0.05 m, while it tends to change flattenedly when the atmosphere coherence length is greater than 0.2 m. This changing trend remains the same under different Non-Kolmogorov turbulence spectrum, which is also consistent with the theoretical prediction. The results illustrates that the turbulence simulation experiment can reproduce the turbulence effect on the received light intensity in wireless optical communications. Moreover, the error analysis of the simulation experiment illustrates that the main sources of the experimental error are different under different turbulence strength. It can provides some effective advices for the improvement of further experiments.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11204220)和上海航天科技创新基金(No. SAST2017-103)资助

第一作者: 张娜娜(1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光通信. Email: znn@whu.edu.cn

导 师: 张燕革(1962-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光学探测. Email: zyg@whu.edu.cn

通讯作者: 单欣(1981-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为激光通信, 湍流模拟和光束偏转. Email: sx@whu.edu.cn

收稿日期: 2017-10-23; 录用日期: 2018-01-24

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Atmospheric turbulence; Non-Kolmogorov spectrum; Liquid crystal spatial light modulator; Probability density distribution; Scintillation index; Temporal power spectrum

OCIS Codes: 010.1330; 010.1300; 010.1290; 060.2605

0 引言

在无线激光通信系统中,大气湍流效应会破坏激光光束的相干性,导致接收端光斑抖动、相位畸变、接收光功率起伏,使通信误码率增大,影响通信系统可靠性,因此有必要针对湍流对激光光束以及通信系统的影响进行研究.Kolmogorov 模型是目前大气湍流研究中采用最多、应用最广泛同时也是最成熟的一种,然而越来越多的实验表明 Kolmogorov 湍流谱并不能表征所有的湍流运动^[1].根据地球大气的实际测量数据,国内外学者们提出了 Non-Kolmogorov 湍流并得到了有分层特征的大气信道功率谱模型^[2-4],边界层(1~2 km)的大气湍流是一个湍流功率谱幂律为 11/3 的 Kolmogorov 湍流,而自由对流层(8~10 km)大气湍流则是 Non-Kolmogorov 湍流(幂律为 10/3),平流层区域(20 km 以上)的 Non-Kolmogorov 湍流场的三维功率谱幂律则为 5.因此,在大气激光通信中仅研究 Kolmogorov 湍流无法全面了解信道的真实特性.

迄今为止,对 Non-Kolmogorov 湍流的研究多集中在理论部分,如 Non-Kolmogorov 湍流内外尺度的影响^[5],不同信道条件下 Non-Kolmogorov 谱模型对激光通信的影响^[6-9],以及 Non-Kolmogorov 湍流下的光强和到达角的起伏特性^[10-12]等.在理论研究的基础上,Non-Kolmogorov 湍流对激光光束到达角及光强特性影响的实验仿真也逐步开展起来^[13-15],其中包括对各向异性湍流的研究.但是这些湍流模拟实验研究多是从光强的概率密度分布特性方面研究湍流的影响,而针对光强起伏的时间频谱特性的室内仿真研究较为少见.虽然在文献[16]中也初步研究了各向异性湍流下光强起伏时间频谱的情况,但其采用的是湍流池模拟湍流,这种方法难以稳定控制湍流强度,且可观测的湍流范围也存在一定限制.近些年,随着液晶器件的发展,利用其高像素密度、位相编程实时控制等优越性能^[17],基于液晶空间光调制器(Liquid Crystal Spatial Light Modulator, LC-SLM)的大气湍流模拟,相比湍流池模拟的方法,更便于对湍流参数进行精确控制,有利于模拟结果和理论预测之间的对比验证.

为此,本文在实验室内搭建了基于液晶空间光调制器的大气湍流仿真平台,进行了 Non-Kolmogorov 湍流下激光远场传输 1 km 的模拟实验,分析了不同湍流强度、不同湍流幂律的湍流对接收激光光强概率密度分布、时间频谱及光强闪烁指数的影响;将实验模拟结果和相关湍流理论进行了对比,验证仿真实验的正确性,并进一步分析不同湍流强度下仿真实验误差的来源.

1 Non-Kolmogorov 湍流理论

沿用 Kolmogorov 湍流的思想,各项同性 Non-Kolmogorov 湍流的折射率起伏三维功率谱模型可以定义为^[1]

$$\Phi_n(k, \alpha) = A_\alpha C_{n-n}^2 k^{-\alpha} \quad (1)$$

式中, α 为功率谱函数的幂律, k 为空间波数, C_{n-n}^2 为折射率结构常数,单位是 $m^{3-\alpha}$, A_α 是使折射率结构函数与其功率谱保持一致性的归一化函数,其表达式为

$$A_\alpha = 2^{\alpha-6} (\alpha^2 - 5\alpha + 6) \pi^{-3/2} \frac{\Gamma[(\alpha-2)/2]}{\Gamma[(5-\alpha)/2]} \quad (3 < \alpha < 4) \quad (2)$$

式中, $\Gamma(x)$ 为伽马函数. $\alpha=11/3$ 时,Non-Kolmogorov 湍流谱转化为 Kolmogorov 谱.

光强起伏是大气湍流导致的最明显的光传输效应之一,也是对无线激光通信影响最大的因素之一.闪烁指数和光强起伏的概率密度分布特性常用来作为评估光强起伏理论和实验研究的基本标准.根据 Rytov 近似理论,考虑孔径平均效应下,光束的闪烁指数表达式为^[13]

$$\sigma_I^2(\alpha, D) = 4\pi^2 k^2 L A_\alpha C_{n-n}^2 \cdot \Gamma\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \left[\frac{k}{L} (\Lambda_1 + \Omega_G)\right]^{1-\frac{\alpha}{2}} \times \left\{ \int_0^1 [(1 - \bar{\Theta}_1 \xi)^2 + \Lambda_1 \Omega_G \xi^2]^{\frac{\alpha}{2}-1} d\xi - \right. \\ \left. \operatorname{Re} \int_0^1 [(1 - \bar{\Theta}_1 \xi)^2 + \Lambda_1 \Omega_G \xi^2 + j(\Omega_G - \Lambda_1) \xi (1 - \bar{\Theta}_1 \xi)]^{\frac{\alpha}{2}-1} d\xi \right\} \quad (3)$$

式中, L 为链路长度, $\Omega_G = 2L/kW_G^2$,它是一个和接收口径有关的无量纲参数, $W_G^2 = D^2/8$, D 是接收系统直

径。 Θ_1 和 Λ_1 是光束输出平面(接收端)参数,如果光束为理想平面波,那么其输出参数为 $\Theta_1 = 1, \Lambda_1 = 0$ 。由此可得平面波的闪烁指数表达式为^[14]

$$\sigma_1^2 = 7.995\pi^2 A_a C_n^2 k^{3-\frac{\alpha}{2}} L^{\frac{\alpha}{2}} \Gamma\left(1-\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \left\{ \frac{\alpha}{2} \left(\frac{kD^2}{16L}\right)^{\frac{\alpha}{2}-1} - \left[\left(\frac{kD^2}{16L}\right)^2 + 1\right]^{\alpha/4} \cdot \sin\left[\frac{\alpha}{2} \arctan\left(\frac{16}{kD^2}\right)\right] \right\} \quad (4)$$

闪烁指数主要用于评估光强强弱的变化程度,而光强起伏的时间频谱则反映了光强随时间频率的分布特性,它对大气中应用的各种光学系统,如光通讯系统、相位校正系统和光学跟踪系统等具有重要的影响,是湍流仿真研究中一个十分重要的参数^[18]。湍流理论认为,光强起伏的时间频谱存在一个特征频率,对应着对数光强频谱曲线的转折点。在低于特征频率的低频部分,频谱密度几乎为常量;在高于特征频率的高频部分,光强起伏的时间功率谱可以表示为^[19]

$$W(f) = f^{-\delta} \quad (5)$$

因此高频部分的频谱密度符合 $-\delta$ 的指数率。根据文献[19]的理论推导,Non-Kolmogorov 湍流的光强起伏时间频谱的幂律 δ 与湍流谱的幂律 α 之间满足关系

$$\delta = \alpha - 1 \quad (6)$$

从式(1)中可以看出,幂律 α 的取值决定着湍流谱的类型。因此,通过分析某一链路中的光强起伏的时间频谱幂律 δ ,理论上就可以推测该链路的湍流功率谱模型。

2 Non-Kolmogorov 湍流室内模拟实验

根据远场光斑模拟原理^[19],设计了一套基于液晶空间光调制器的光束湍流传输模拟系统。由于光振幅在透镜焦平面的分布与夫琅禾费衍射下的远场分布表达式形式相同,因此,可以通过傅里叶透镜实现室内的光束远场传播模拟,其等效传输距离 z 满足

$$\frac{\Theta}{\rho f \theta_1} = \frac{\Phi}{z \theta_2} \quad (7)$$

式中, ρ 为傅里叶透镜前的光学放大系统放大倍率, f 为傅里叶透镜的焦距, θ_1 和 θ_2 分别为室内外通信发射端的发散角, Θ 和 Φ 分别为室内外通信接收端的口径。

湍流实验光路如图 1 所示,激光器输出的 808 nm 单模高斯光束,经透镜组(Lens₁ 和 Lens₂)扩束准直后,光束的尺寸和发散角分别约为 4.2 mm 和 250 μ rad。准直光束经偏振棱镜后获得偏振光,使光束偏振方向与液晶长轴平行,目的是保证液晶对光束的纯相位调制。在 LC-SLM(HOLOEYE Pluto-NIR-2)上加载不同湍流强度的相位屏对光束相位进行调制,反射回的光束波面发生畸变,模拟经湍流影响后的激光波面。畸变光束经傅里叶透镜(Lens₃)聚焦到高帧频 CMOS 相机上(相机帧频为 37~3 500 fps),通过计算机采集光斑数据。

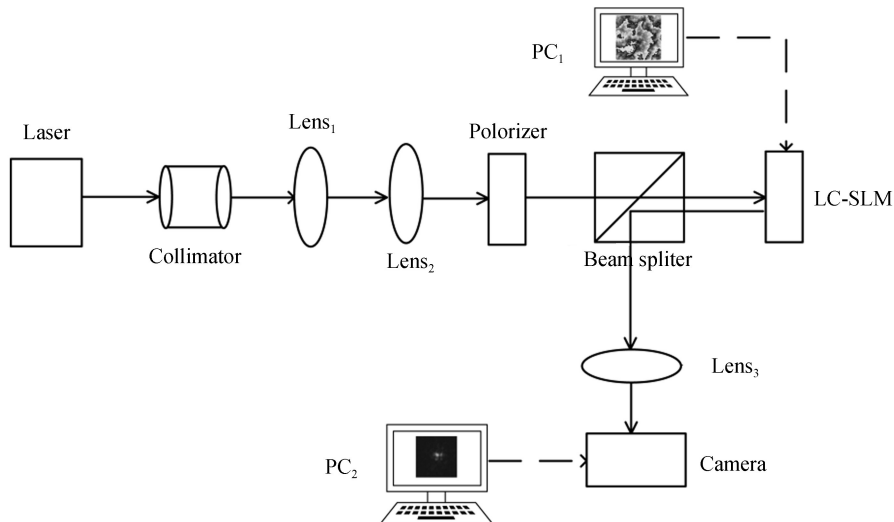


图 1 湍流模拟系统光路

Fig.1 Experiment setup of the turbulence simulation system

设计实验平台所模拟的无线光通信链路长度为 1 km, 激光的发散角为 $50 \mu\text{rad}$, 接收系统望远镜口径大小为 0.05 m; 实验平台无光学放大系统(即 $\rho=1$), 平台上傅里叶透镜的焦距为 0.5 m. 为了与实际通信系统等效, 根据式(7), 湍流模拟系统接收口径大小约为 $125 \mu\text{m}$, 可以通过调节相机的开窗大小实现. 由于实验采用的 CMOS 相机像元尺寸为 $10.6 \mu\text{m}$, 根据模拟的外场链路情况, 相机的窗口设为 12×12 像素.

湍流畸变相位屏经由功率谱反演法生成, 由于该方法具有低频成分不足的问题, 因此需通过次谐波补偿的方法进行改善. 图 2 所示的是加载到液晶空间光调制器上的 Non-Kolmogorov 湍流($\alpha=10/3$)畸变相位屏灰度图, 图中 $0 \sim 255$ 的灰度值对应 $0 \sim 2\pi$ 的相位. 相位屏采样点数为 700×700 , 采样间隔约为 $1.4 \times 10^{-4} \text{ m}$, 传输距离为 1 km, 大气相干长度 r_0 为 0.025 m, 对应大气结构常数为 $1.3107 \times 10^{-14} \text{ m}^{-1/3}$. 通过相位屏的相位结构函数可以验证仿真结果的有效性, 由图 3 可知, 模拟结果表明叠加 2 级次谐波后, 低频成分得到补偿, 具有较为合理的高低频谱成分, 与理论值较为接近.

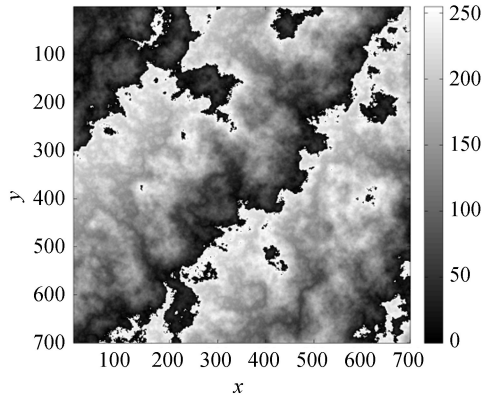


图 2 $\alpha=10/3$, $r_0=0.025 \text{ m}$ 时的相位屏灰度图
Fig.2 Gray-scale map of phase screen for $\alpha=10/3$, $r_0=0.025 \text{ m}$

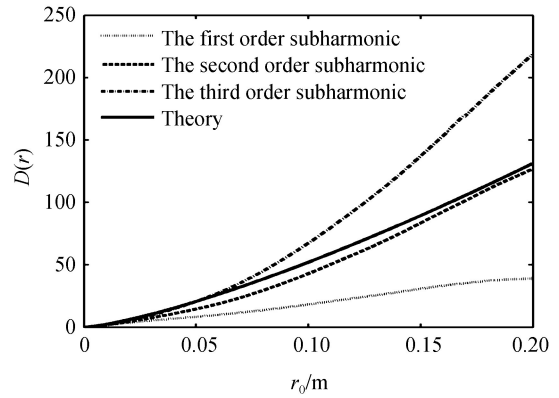


图 3 不同次谐波补偿后的相位屏结构函数对比
Fig.3 Comparison of structure functions for different subharmonic methods

实际大气信道中, 边界层、自由对流层和平流层的幂律分别为 $11/3$, $10/3$ 和 5, 对应不同的湍流模型, 但由于式(2)中幂律取值范围仅为 $3 \sim 4$, 因此, 本实验除了选取大气信道典型的幂律值 $\alpha=10/3$ 和 $\alpha=11/3$ 之外, 还选取了 $\alpha=3.1$ 和 $\alpha=3.2$ 两组对比幂律, 以研究不同的 Non-Kolmogorov 湍流幂律对接收光强统计特性的影响. 为了充分研究光束经湍流传输后的光强变化, 将从光强分布、光强时间频谱和光强闪烁指数三个方面开展研究. 实验过程中, 将湍流相位屏动态地加载到液晶空间光调制器上, 相位屏播放间隔为 0.02 s, 在接收端用 CMOS 相机实时采集光斑变化的情况, 并对光强数据进行分析. 对于每一组湍流模拟实验, 加载 300 幅相位屏, 并循环播放两次; 采集数据时相机帧频设为 110 fps, 因此相机每次实验可以采集约 1320 张光斑图片. 而在数据的处理过程中为了保证数据的可靠性, 仅对中段约 1000 幅图片数据进行分析.

3 实验结果分析

3.1 光强概率密度分布

实验首先分析了湍流强度对接收光强概率密度分布模型的影响. 由于大气相干长度 r_0 同时考虑了传输距离和湍流强弱两方面因素, 因此在大气激光通信中多用 r_0 来表征某一大气信道中的湍流的强弱, r_0 越小代表整个链路上湍流越强, 反之则越弱. 实验过程中, 固定激光光束传输距离 1 km 不变, 改变激光链路中的湍流强度, 研究不同大气链路信道下湍流对接收光束的影响. 实验选取 4 组不同的湍流幂律, 每组 11 个不同强度的湍流, 采集激光光束经不同幂律、不同强度湍流传输后的接收光强, 计算其归一化对数光强, 给出对数光强的直方图及正态拟合曲线, 分析其接收光强概率密度分布模型的变化. 图 4 展示的是 11 组数据中的两组对比数据, 分别为 $r_0=0.015 \text{ m}$ 和 $r_0=0.45 \text{ m}$, 对应强、弱两种情况的湍流.

图中的 R^2 为正态分布的拟合确定系数. 大气相干长度 r_0 为 0.015 m 时, 拟合确定系数分别为 Non-Kolmogorov 湍流时的 0.737 68(图 4(a))、0.804 67(图 4(c)), 0.786 07(图 4(e))以及 Kolmogorov 湍流($\alpha=11/3$)时的 0.83884(图 4(g)), 对应的大气结构常数 C_{n-n}^2 均在 10^{-14} 量级; 大气相干长度 r_0 为 0.45 m 时, 拟合确定系数分别为 Non-Kolmogorov 湍流时的 0.909 51(图 4(b))、0.917 38(图 4(d)), 0.964 61(图 4(f))以

及 Kolmogorov 湍流时的 0.929 17(图 4(h)),对应的大气结构常数 C_{n-n}^2 均在 10^{-16} 量级.在湍流较强时,拟合系数在 0.8 左右浮动;在湍流较弱时,拟合系数均达到 0.9 以上.从拟合系数的变化来看,在同一个湍流强度下,不论是 Kolmogorov 湍流还是 Non-Kolmogorov 湍流模型(即对应不同的湍流幂律 α)对光强概率密度分布模型的变化影响不大.而该分布模型主要受湍流强弱的影响:当 r_0 越大即湍流越弱时,光强分布越集中、强弱变化不明显,其进行正态分布拟合时拟合系数明显大于强湍流情况.对数光强概率密度分布结果显示在弱湍流阶段,光强概率分布模型更符合对数正态分布;而湍流变强时,光强概率分布模型则逐渐偏离对数正态分布.这一变化趋势和相关湍流理论一致.

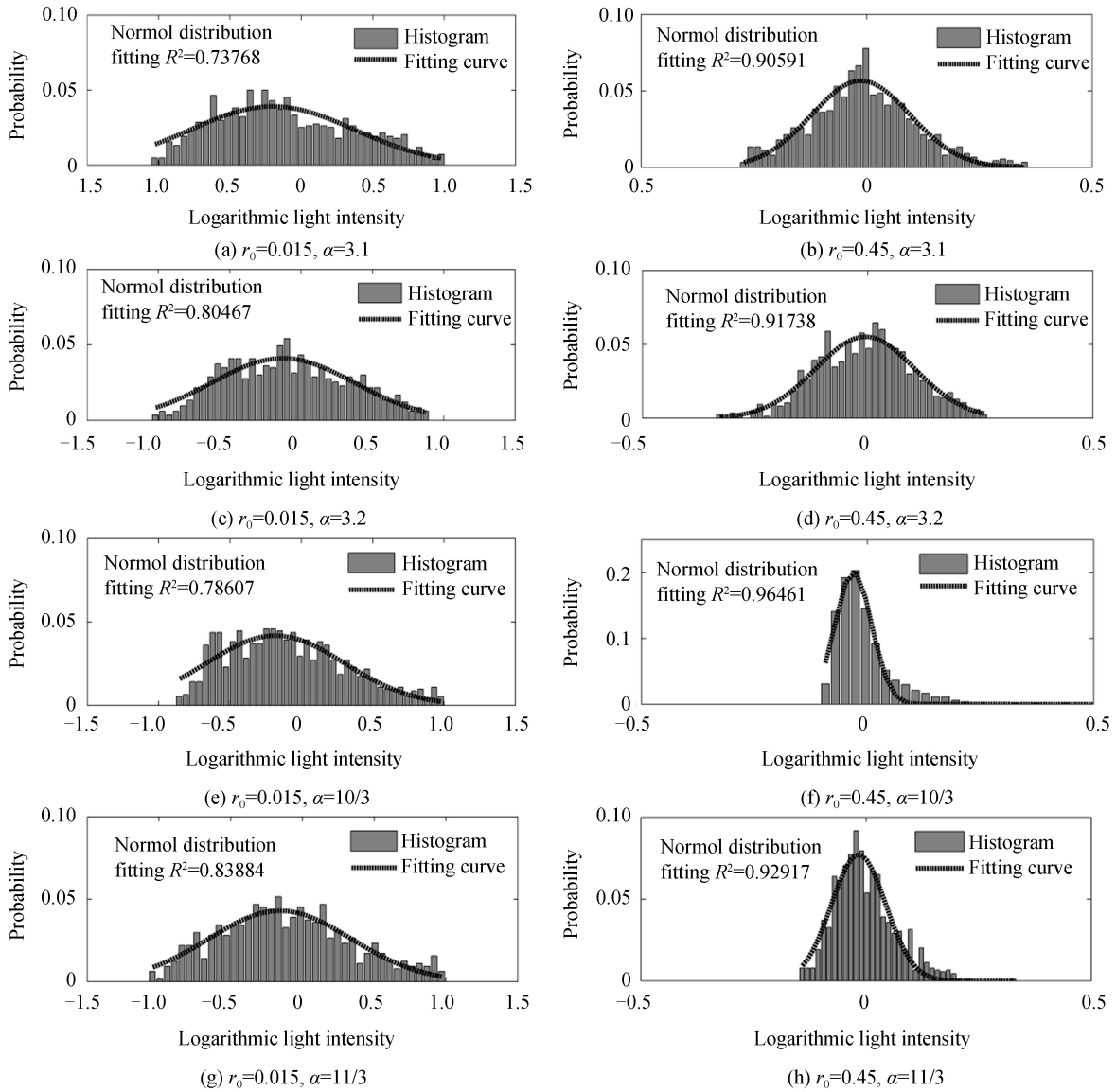


图 4 对数光强概率密度分布
Fig.4 Probability density distributions of normalized logarithmic intensity

表 1 进一步给出了不同湍流模型下光强概率密度分布正态拟合曲线的曲线方差变化情况.当大气相干长度为 $r_0=0.015$ m 时,方差较大,说明此时光强起伏较为明显,不同模型下的方差变化范围从 0.46 到 0.65;当大气相干长度为 $r_0=0.45$ m 时,方差明显减小,此时光强分布更为集中,但也存在一定变化范围.方差数据说明,尽管湍流模型对接收光强概率密度的对数正态分布特性的影响不明显;但是同一湍流强度下正态分布的方差波动,反映出湍流模型幂律的变化也在一定程度上影响接收光强的起伏特性.为此,进一步分析接收光强的时间频谱和光强闪烁指数.

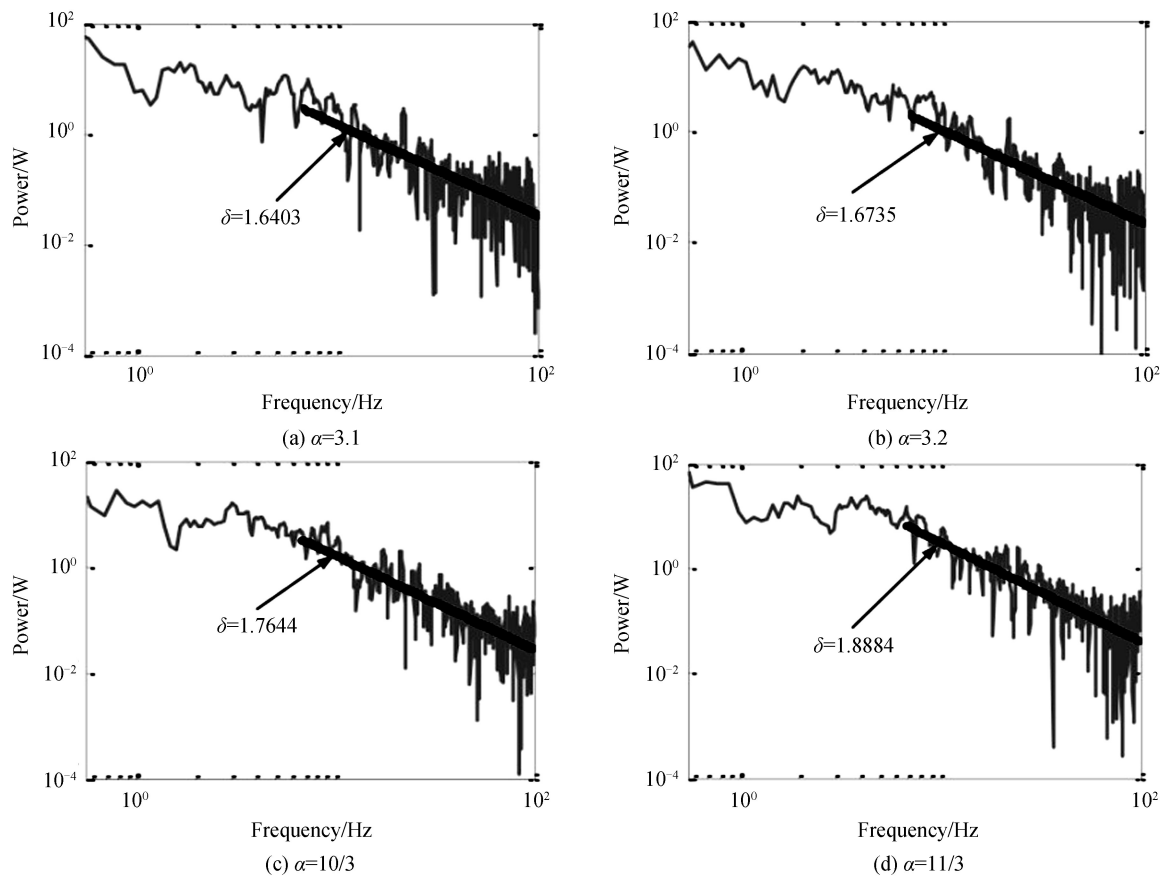
表 1 不同湍流模型下的对数光强概率密度分布正态拟合曲线方差

Table 1 Variation of the normal fitting curve of logarithmic intensity probability density distributions under different turbulence models

Spectral power law α	3.1	3.2	10/3	11/3
Variance σ^2 of $r_0=0.015$ m	0.649 234	0.499 056	0.465 179	0.490 691
Variance σ^2 of $r_0=0.45$ m	0.023 929	0.024 232	0.003 185	0.007 250

3.2 光强时间频谱估计

为了分析光强信号功率在时间上的变化特性,实验对光强的时间频谱特性进行了估计.利用接收到的光强信号分析其功率谱密度(Power Spectral Density, PSD).对 PSD 的分析方法有很多,如最简单的周期图法、改进的周期图法以及更现代的多锥体法等.其中多锥体法通过降低时间-带宽积,能够有效提高分辨率,因此实验选取多锥体法对光强进行谱估计.以同一湍流强度、不同湍流幂律的影响结果为例进行分析,其功率谱图样如图 5 所示,图中 δ 为采用非线性最小二乘法拟合得到的功率谱高频段线性区的下降斜率,其中 $\alpha = 11/3$ 为 Kolmogorov 湍流,其余为 Non-Kolmogorov 湍流,图(a)~(d)对应的大气结构常数依次为 $1.7873 \times 10^{-14} \text{ m}^{-1/10}$, $1.3245 \times 10^{-14} \text{ m}^{-1/5}$, $1.3107 \times 10^{-14} \text{ m}^{-1/3}$, $1.8275 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$.

图 5 $r_0=0.025$ m 时,不同 Non-Kolmogorov 湍流模型下的光强时间频谱Fig.5 Temporal power spectra of light intensity under different Non-Kolmogorov turbulence models for $r_0=0.025$ m

由时间频谱图样可以看出,无论是在 Kolmogorov 湍流还是 Non-Kolmogorov 湍流的影响下,光强的谱密度在对数坐标中均分为两段,低频段下降趋势缓慢,高频段呈现明显的线性下降趋势.但是图 5 的数据显示,在同一个湍流强度下,不同湍流模型影响下的光强时间频谱高频段的幂律不同.为了进一步分析其高频段幂律 δ 与湍流功率谱幂律 α 之间的关系,实验统计了四种不同 Non-Kolmogorov 湍流模型(α 分别取 3.1、3.2、10/3、11/3)下的接收光强波动的时间特性,利用多锥体法分析其高频段幂律 δ .对于每个湍流模型(对应不同的功率谱幂律 α),分析每组 11 个不同强度下的时间频谱高频段幂律数据.从数据结果可以看出,在同一个湍流模型下,光强时间频谱的高频段幂律在不同湍流强度下并不是一个固定值,而是存在一定的波动范围

的.如在 Kolmogorov 湍流下高频段幂律波动范围为 1.357~2.468,在 $\alpha=10/3$ 的 Non-Kolmogorov 湍流下高频段幂律波动范围为 1.308~1.906.为此,将 11 组不同湍流强度下的时间频谱高频段幂律数据求平均,并分析其变化方差,所得数据见表 2.从表 2 的方差结果看, δ 的波动范围不大,这主要是由湍流的随机特性所决定的.高频段幂律 δ 的平均值从 1.879 减小至 1.642,对应湍流功率谱幂律从 Kolmogorov 湍流的 11/3 减小至 Non-Kolmogorov 湍流的 3.1.因此可以看出,时间频谱高频段幂律 δ 随 α 的减小呈现单调减小的趋势,两者间的变化关系与理论保持一致.但是仿真实验结果和理论预测之间存在一定差距,可能源于两方面因素:一方面是在不同情况下湍流频率具有较大变化范围,而实验采用的液晶器件的帧频最高只能达到 60 Hz,考虑实验过程中其他因素的影响,设置相位屏的播放频率为 50 Hz,与实际大气湍流频率存在一定差距,因而导致实验与理论之间的偏差;另一方面,由于湍流的随机性,对光场统计特性的分析需要基于大量的样本来完成,而实验仅选取了 11 组不同强度的湍流,每组实验时间仅为 10 s 左右,也存在数据量不够的问题.因此得到的仿真实验结果和理论预测之间存在一定差距,相较于理论预测值偏小,今后将在样本量和实验条件方面进行改进.

表 2 不同湍流模型下 δ 的均值和方差Table 2 Mean values and variance of δ under different turbulence models

Spectral power law α	3.1	3.2	10/3	11/3
Mean value of δ	1.642	1.668	1.784	1.879
Variance of δ	0.037	0.038	0.046	0.068

3.3 光强闪烁指数

实验最后通过对 4 组不同幂律湍流影响下的接收光强数据进行分析,计算接收光强的闪烁指数,并将其与理论值进行对比.根据模拟实验平台的设计光路和光束参数,可以得到实验所采用的光束输出参数 $\Theta_1 = 0.986$ 、 $\Delta_1 = 0.119$,与理想平面波输出参数非常接近,可以将其等效为平面波.但是考虑到模拟实验数据验证的准确性,将实验数据与高斯光束闪烁指数理论值进行对比,给出其随大气相干长度 r_0 的变化规律,结果如图 6 所示.

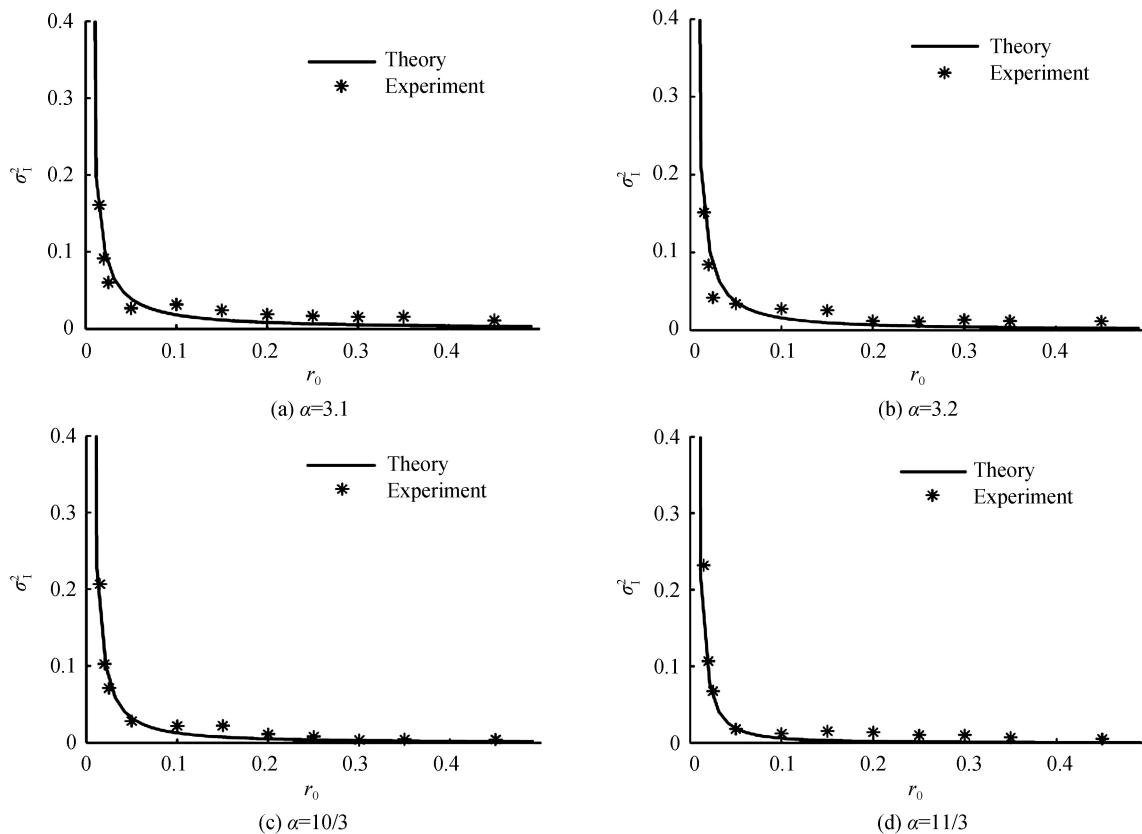


图 6 不同湍流模型下闪烁指数随大气相干长度变化

Fig.6 Scintillation index for different atmospheric coherence length under different turbulence models

从实验模拟结果可以看出:闪烁指数均随大气相干长度的增大而减小;在 r_0 小于 0.05 m 的范围内闪烁指数急剧减小,在 r_0 大于 0.2 m 之后趋近平缓,与理论预测趋势也保持一致,与湍流模型无关.从具体的实验数据看,在 r_0 从 0.015 m 到 0.05 m 的范围内,不同湍流模型下闪烁指数随大气相干长度减小的速度不同.幂律 α 为 11/3 时,闪烁指数的范围从 0.232 下降到 0.018;幂律 α 分别为 3.1、3.2 和 10/3 时,闪烁指数的范围分别从 0.161 下降到 0.027,从 0.152 下降到 0.034,从 0.207 下降到 0.029.从整体趋势上看,幂律 $\alpha=11/3$ 时,闪烁指数随大气相干长度减小的速度远大于其他三组幂律,说明在相同的大气相干长度变化范围内,Kolmogorov 湍流相较于其他三种 Non-Kolmogorov 湍流来说,对闪烁指数变化速度的影响更大.

对比实验模拟数据和理论值可以发现,两者的变化趋势保持一致,说明实验通过控制加载在 LC-SLM 上的相位屏参数可以较为准确地再现大气湍流的影响,相比于湍流池模拟的方法更具优势.但是,实验值与理论值相比也存在一定的偏差.经分析发现,不同湍流强度下,误差的主要来源不同.在强湍流下,实验值相较于理论值略偏小,此时误差主要来源于液晶器件本身的限制.这是因为,在强湍流模拟时,相位屏所给出的相位调制要求小区域范围内的液晶分子快速偏转以实现相位的急剧变化.而对于液晶器件来说,相邻像素的相位差越大,相位交连作用越强^[20],这种作用有些类似一个低通滤波器,它使得液晶器件实际输出的湍流相位屏的相位变化趋于平滑,从而造成实际模拟生成的湍流强度减弱,造成光强闪烁偏小.对于弱湍流的情况,可以看到实验所得闪烁指数高于理论值,这是由于在弱湍流的情况下,加载的湍流相位屏对于光束闪烁指数的影响较小,而此时实验误差的影响增大,例如激光光源或平台的不稳定都会对实验引入误差,导致实验值偏大.

4 结论

本文采用基于液晶空间光调制器的方法进行了室内的湍流模拟实验,模拟了光束在 Non-Kolmogorov 湍流下远场传输 1 km 的情况,对大气湍流影响下的光强变化特性进行了充分的研究.主要针对 4 组不同的湍流模型,对不同湍流强度下的接收光强起伏分布、光强时间频谱和光强闪烁指数进行了分析,并将实验数据和理论值进行了对比,分析了误差的来源.从接收光强分布特性来看,概率密度分布特性主要受湍流强弱的影响,随着湍流的增强,光强概率密度分布逐渐偏离对数正态分布;但是从拟合曲线的方差看,湍流模型对光强起伏强弱也存在一定影响.光强时间频谱结果表明,不同的湍流模型主要影响了时间频谱高频段的下降幂律 δ ;幂律均值随湍流功率谱幂律的减小从 1.879 降低至 1.642,Kolmogorov 湍流时 δ 最大.高频段幂律 δ 尽管数值上与理论预测存在一定差距,但是 δ 随湍流幂律 α 减小而降低的规律与理论保持了较好的一致性.另外,对比实验得到的闪烁指数与理论曲线可以看到,闪烁指数均随大气相干长度的增大而减小,不同的湍流模型具有同样的规律.但从具体数据可以看出,不同的湍流模型对光强闪烁指数的影响不同,在大气相干长度的变化范围相同时,Kolmogorov 湍流相较于 Non-Kolmogorov 湍流对闪烁指数变化速度的影响更大.

仿真实验结果充分说明了基于液晶空间光调制器方法模拟大气湍流的可行性和可靠性.通过控制液晶器件所加载的大气畸变相位屏参数,可以较为准确地再现各类湍流模型对无线光通信系统接收光强的影响,为无线光通信系统的设计和优化打下了良好的基础.当然,为了进一步改进仿真实验平台的湍流模拟效果,可以从仿真平台系统设计入手,减小液晶器件性能对强湍流仿真的实验误差,并增大实验样本量,而对于弱湍流仿真误差方面,可以考虑采用预先扣除诸如光源抖动、平台抖动所造成的背景噪声等方法来改善.

参考文献

- [1] LI Yu-jie, ZHU Wen-yue, RAO Rui-zhong. Simulation of random phase screen of non-Kolmogorov atmospheric turbulence[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **12**(45): 169-176.
李玉杰, 朱文越, 饶瑞中. 非 Kolmogorov 大气湍流随机相位屏模拟[J]. 红外与激光工程, 2016, 12(45): 169-176.
- [2] TOSELLI I, ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Free space optical system performance for laser beam propagation through non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optical Engineering*, 2007, **47**(2): 122-122.
- [3] YI Xiang, LIU Zeng-ji, YUE Peng. Uplink laser satellite-communication system performance for a Gaussian beam propagating through three-layer altitude spectrum of weak-turbulence[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, **124**(17): 2916-2919.
- [4] RAO Rui-zhong, LI Yu-jie. Light propagation through non-Kolmogorov-type atmospheric turbulence and its effects on optical engineering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(5): 18-28.

- 饶瑞中,李玉杰.非Kolmogorov大气湍流中的光传播及其对光电工程的影响[J].光学学报,2015,**35**(5):18-28.
- [5] CUI Lin-yan. Temporal power spectra of plane wave considering finite turbulence inner and outer scales in anisotropic turbulence[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, **127**(19): 8153-8162.
- [6] LIU Zheng, WEI Hong-yan, CAI Dong-mei, *et al.* Spiral spectrum of Laguerre-Gaussian beams in slant non-Kolmogorov atmospheric turbulence[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, **142**: 103-108
- [7] TANG Hua, XU Wei, WU Guo-hua. Average capacity of OAM-multiplexed FSO system with vortex beam propagating through non-Kolmogorov turbulence[J]. *China Communications*, 2016, **13**(10): 153-159.
- [8] WANG Yi, ZHANG Ao, MA Jing, *et al.* Effect of non-Kolmogorov turbulence on BER performance in uplink ground-to-satellite laser communication[J]. *Optics Communications*, 2016, **380**: 134-139.
- [9] ZHANG Lei, LI Bo, ZHAO Xin, *et al.* Influence of atmosphere turbulence to tracking system in space laser communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(9): 0901001.
张雷,李勃,赵馨,等.大气湍流对空间激光通信跟踪系统的影响[J].光子学报,2017,**46**(9):0901001.
- [10] CUI Lin-yan. Irradiance scintillation index for Gaussian beam based on the generalized anisotropic von Karman spectrum [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, **77**: 431-439.
- [11] BAYKAL Y, LUO Yu-juan, JI Xiao-ling. Scintillations of higher order laser beams in anisotropic atmospheric turbulence[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(33): 9422-9426.
- [12] CUI Lin-yan. Analysis of angle of arrival fluctuations for optical waves' propagation through weak anisotropic non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(5): 6313-6325.
- [13] TOSELLI I, KOROTKOVA O, XIAO Xi-feng, *et al.* SLM-based laboratory simulations of Kolmogorov and non-Kolmogorov anisotropic turbulence[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(15): 4740-4744.
- [14] LI Yan, QIANG Xi-wen, ZONG Fei, *et al.* Effect of turbulence inner scale on light-wave temporal spectra[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(10): 2276-2280.
李岩,强希文,宗飞,等.湍流内尺度对光波起伏频谱的影响[J].强激光与粒子束,2010,**22**(10):2276-2280.
- [15] SHAN Xin, LIU Min, ZHANG Na-na, *et al.* Laboratory simulation of non-Kolmogorov turbulence based on a liquid crystal spatial light modulator[J]. *Optical Engineering*, 2017, **56**(2): 026111.
- [16] FUNES G, OLIVARES F, WEINBERGER C G, *et al.* Synthesis of anisotropic optical turbulence at the laboratory[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(24): 5696-5699.
- [17] SHAN Xin, DUAN Meng-yun, AI Yong, *et al.* Calibration approaches of the phase nonlinearity of the phase-only liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(6): 78-82.
单欣,段梦云,艾勇,等.纯相位液晶空间光调制器相位校正方法[J].光子学报,2014,**43**(6):78-82.
- [18] TAN Li-ying, ZHAI Chao, YU Si-yuan, *et al.* Temporal power spectrum of irradiance fluctuations for a Gaussian-beam wave propagating through non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(9): 11250-11263.
- [19] DU Wen-he, TAN Li-ying, MA Jing, *et al.* Temporal-frequency spectra for optical wave propagating through non-Kolmogorov turbulence[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(6): 5763-5775.
- [20] CAI Dong-mei, XUE Li-xia, LING Ning, *et al.* Characteristics of phase only liquid crystal spatial light modulator[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(11): 19-23.
蔡冬梅,薛丽霞,凌宁,等.液晶空间光调制器相位调制特性研究[J].光电工程,2007,**34**(11):19-23.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No.11204220), Shanghai Aerospace Science and Technology Innovation Fund(No.SAST2017-103)

引用格式:ZHANG Na-na, SHAN Xin, ZHANG Yan-ge, *et al.* Simulated Experiment of the Light Intensity Influenced by Non-Kolmogorov Turbulence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(6):0601002

张娜娜,单欣,张燕革,等.Non-Kolmogorov 湍流对光强影响的模拟实验[J].光子学报,2018,**47**(6):0601002