

文章编号 1004-924X(2016)增-0183-07

激光大气湍流传输中的光强闪烁特性

徐春风^{1,2},倪小龙^{2*},刘智²

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学 空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林长春 130022)

摘要:利用激光大气通信系统进行了近地面激光大气传输实验,对不同季节、不同波长下的闪烁因子进行了观测。实验时间均为每天的 8 点~21 点,每隔 10 分钟测量一次,单次测量采集 15 000 幅灰度图像进行处理和分析,选取规律较好的日样本进行对比分析。实验结果表明:闪烁因子随着气温的升高、湍流效应的增强而增加,随着气温的降低、湍流效应的减弱而减小;闪烁因子随着波长的增加而减小,并且波长越长,稳定性越好。实测闪烁因子值与理论上的 Rytov 方差基本吻合,验证了 Rytov 方差在弱起伏条件下的适用性;从统计数据分布的规律中得出光强闪烁概率密度函数服从正态分布。光强起伏功率谱指数在 $-7/3 \sim -12/3$ 之间波动,低于其它文献中给出的实验结果。所得的结果对大气信道的激光通信研究具有一定的借鉴作用。

关键词:激光通信;大气湍流;光强闪烁;闪烁因子

中图分类号:TN929.12 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0183

Scintillation in turbulent atmosphere laser communication

XU Chun-feng^{1,2}, NI Xiao-long^{2*}, LIU Zhi²

(1. School of Optoelectronics Engineering of Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Key Discipline for National Defense of Space-Ground Laser Communication Technology Laboratory, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: nixiaodong@gmail.com

Abstract: The laser atmosphere communication system was employed to carry out near-surface laser atmosphere transmission experiments for observation of scintillation indexes of different seasons and different wavelengths. The measurements were performed every 10 minutes in a period from 8 am to 21 pm. Each time collected 15000 gray level images for processing and analysis, where the daily samples in good regularity were selected for comparison. Experimental result shows that scintillation index increases with the increases of temperature and turbulence effect, but decreases with the decreases of temperature and turbulence effect. In addition, the index decreases with the increases of wavelength. The longer the wavelength is, the better stability will be. The measured scintillation index is basically equal to theoretical Rytov variance, which verifies the feasibility of Rytov variance under weak fluctuation condition. It can be concluded that the scintillation probability density function of

收稿日期:2016-06-04;修订日期:2016-07-10.

基金项目:国防科工局基础科研基金资助项目(No. A362080230)

light intensity conforms to normal distribution according to the statistical data distribution. The exponents of light intensity fluctuation power spectrum vary in the range of $-7/3$ to $-12/3$, being lower than experimental results given in other documents. The results can be a reference for the further research of satellite-ground laser communication.

Key words: laser communication; atmosphere turbulence; scintillation; scintillation index

1 引言

自由空间光通信(Free-Space Optical Communication, FSOC)作为一种新型的宽带无线通信技术,因具有很多的优点而备受关注。大气湍流是大气中的一种重要运动形式,这种运动是随机的。大气湍流对激光传输与接收产生各种影响^[1-4],鉴于湍流运动的复杂性和随机性,光强闪烁是湍流影响大气激光通信性能的主要形式。在大气激光通信中,湍流扰动会引起大气折射率随机起伏,从而导致激光光束的随机漂移、相位随机起伏、接收截面上光强起伏等一系列效应^[5-6],使得接收光信号受到严重干扰,通信误码率上升,甚至出现短时间通信中断,严重影响了大气光通信的稳定性和可靠性。大气湍流对空间光通信在大气中传输特性的影响引起了国内外学者的广泛关注。为了研究闪烁因子的变化趋势和分析接收机收到的光强起伏受接收孔径尺寸、传输距离、发射光束数目等多种因素的影响,本文进行了近半年的实验测量,并根据实验数据分析和研究了光强闪烁因子在不同季节光强闪烁效应在频域上的规律,以及不同波长激光光束在大气信道传输时受到大气湍流的影响情况。

光强闪烁实验测量时光束经过缩束,再通过直径为 25 mm 的透镜进行一定程度的汇聚(人为的进行一定程度的离焦)照射到观测相机的光敏面上,目的是防止光斑能量过强而超过探测器的测量动态范围。相机连接的计算机以 18 000 Hz 的采样频率对图像上各像素的灰度值进行采集,以 15 000 帧图像作为一个实验样本。2014 年 7~12 月进行了的测量实验,在研究中尽量选取天气状况良好、能见度较高的实验样本进行分析。实验测量时间每天从 8 点~21 点,每隔 10 min 测量一次。由于样本足够多,故选取的样本为规律较好或典型的数据进行对比分析大气湍流对激光光束传输时光强闪烁效应的影响。选取 4 个波

长激光器分别采用相同的准直扩束装置发出,在接收端用不同波长探测器进行接收,分别计算了不同波长的闪烁因子。通过归一化光强起伏方差验证了 Rytov 方差在弱起伏条件下的适用性,光强起伏功率谱指数在 $-7/3 \sim -12/3$ 之间波动,低于其它文献中给出的实验结果。

2 不同季节、不同波长下闪烁因子的变化

2.1 不同季节闪烁因子随着时间的变化趋势

夏季随着太阳的升高,地表附近大气升温较快,空气与地表之间存在热交换作用,并且随着太阳的升高趋势逐渐增强,湍流效应更加明显。闪烁因子随着太阳的升高而增加,在中午达到一天中的最大值;在太阳落山之前,闪烁因子为一天中的最低值。秋冬季的变化趋势和夏天比较相似,最高值出现在中午前后,最低值为日落前;不同的是秋冬季日出和日落的时间分别较夏天相比有一定程度的延后和提前。图 1 列举了 9 月 12 日、9 月 16 日、9 月 17 日以及 9 月 28 日 4 天的数据,这 4 天的天气变化趋势较为一致,天气晴朗,能见度为 16 km 左右。

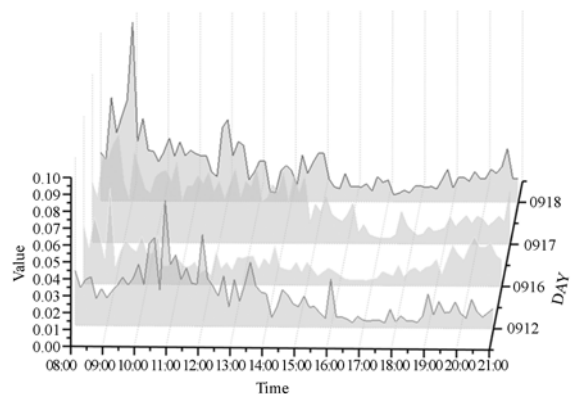


图 1 闪烁因子随时间的变化趋势

Fig. 1 Variation of scintillation index with time

2.2 不同波长条件下的闪烁因子

大气湍流对激光光束传输时的光强闪烁效应的影响与波长有很大的关系。选择在 8 月 14 日 前后和 9 月 13 日 前后进行了一系列测量实验,选取 532,808,1 064 以及 1 550 nm 4 个波长的激光器发射端采用相同的准直扩束装置,在接收端用不同波长探测器进行接收探测,采样频率分别为 1 736 Hz(532,808 nm)、1 698 Hz(1 064,1 550 nm),计算得到不同波长的闪烁因子如图 2 所示(夏季)。

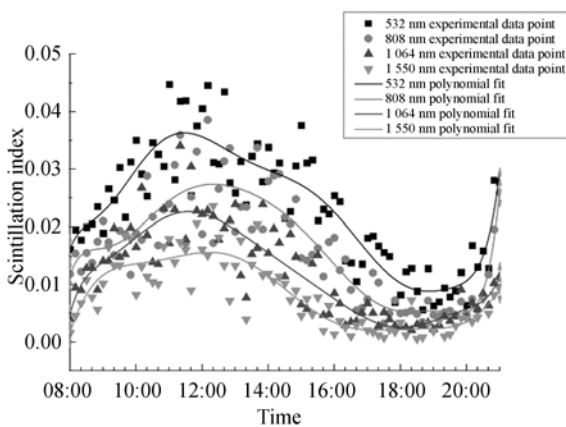


图 2 不同波长下激光光束闪烁因子的变化情况

Fig. 2 Variation of scintillation index for laser beam with different wavelengths

由图 2 可知,不同波长激光测得的闪烁因子的日变化趋势基本相同,但幅值不同。闪烁因子随着波长的增加而减小,并且波长越长,稳定性越好。

3 归一化光强起伏方差和 Rytov 方差关系

光波在湍流大气中的传播特性的研究可以在弱湍流和中到强湍流条件下进行。用 Kolmogorov 幂率谱模型描述光湍流,对于平面波和球面波,Rytov 方差 σ_R^2 为:

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (1)$$

式中: C_n^2 为大气折射率结构常数, $k=2\pi/\lambda$, λ 为光束波长, L 为链路距离。Rytov 方差 σ_R^2 为区分弱湍流和强湍流条件的标准,弱湍流对应 $\sigma_R^2 < 1$,此时 Rytov 方差等于闪烁因子;中、强湍流条件对

应 $\sigma_R^2 \geq 1, \sigma_R \rightarrow \infty$ 则代表湍流进入饱和区。这里在弱湍流条件下对 Rytov 方差的准确性进行了验证。采用实验数据生成图 3 曲线,其中 y 轴为测得的大气折射率结构函数 C_n^2 , x 轴为光强闪烁因子值,离散点为一定 C_n^2 值下所测得的光强闪烁因子值。由图 3 可知,实验测得的闪烁因子与理论的 Rytov 方差基本吻合,由此验证了 Rytov 方差在弱起伏条件下的适用性。

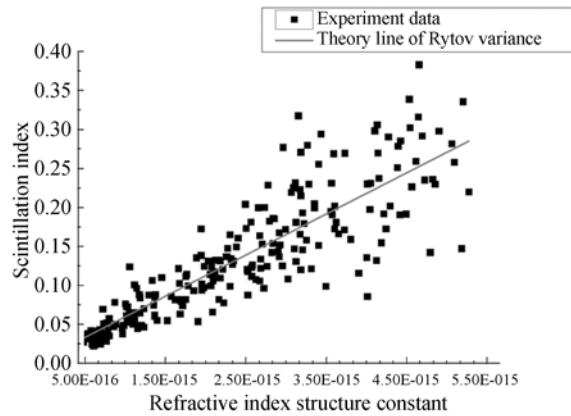


图 3 实验测得闪烁因子与 Rytov 方差之间的关系曲线

Fig. 3 Experiment data and theory line of the Rytov variance

4 光强闪烁概率密度函数

从大量的实验数据中抽取典型的样本进行分析,基于样本的平均值对样本中的采样灰度值进行归一化处理得到相对光强。将相对光强的取值范围划分为一定数目的等分区间,计算落在每个区间的相对光强个数,区间的中心值为一个序列 $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$,区间中相对光强的个数也组成一个序列 $Y=(Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$,以 X 和 Y 分别作为横纵坐标即可得到该样本的归一化光强直方图。如图 4 所示,直方图与拟合曲线十分吻合,实验数据与拟合曲线的相关系数都在 0.985 以上。其中,图 4(a)、4(b)、4(c)、4(d)和 4(e)采用对数正态分布进行拟合,图 4(f)、4(g)和 4(h)采用正态分布进行拟合。由此可见:光强闪烁指数比较大时,光强闪烁服从对数正态分布;光强闪烁指数较小时,光强闪烁服从正态分布。

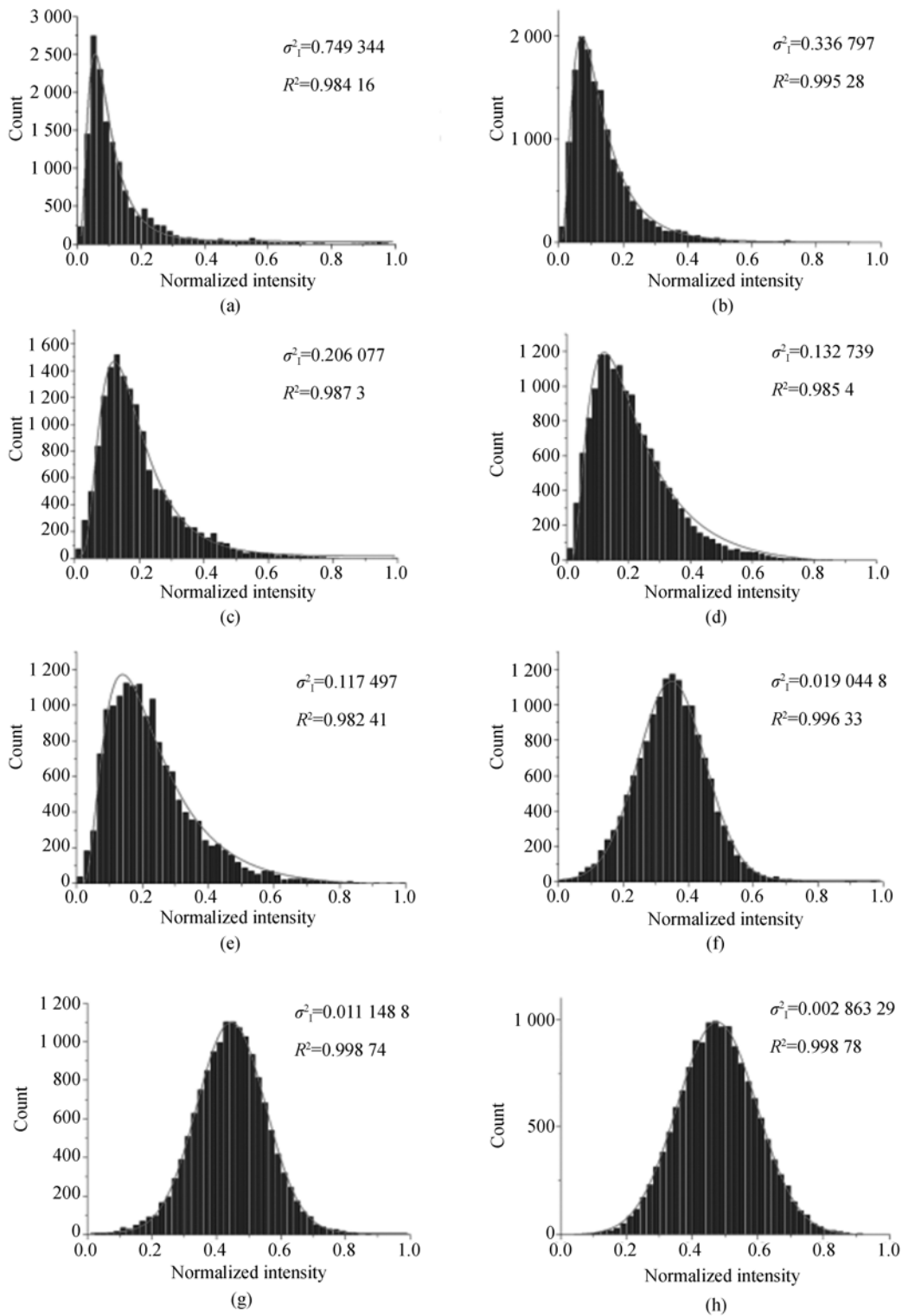


图 4 光强闪烁概率密度函数的变化趋势

Fig. 4 Trends of probability density function of scintillation

由图 4 可知,光强闪烁指数在 0.1~0.2 附近为指数正态和正态分布的交接区间,此时光强闪烁概率密度函数的相关系数较低为 0.988 左右;

当闪烁因子不在该区间时,相关系数均在 0.995 以上,得出光强闪烁概率密度函数能很好地拟合和描述光强闪烁的强度分布。

5 光强闪烁功率谱密度

激光在大气中传输的理论认为光强起伏功率谱的规律为:低频部分的幅值较高,高频部分的幅值较低,且高频部分随着频率的升高,幂指

数呈下降趋势,其幂率为 $-8/3$ 。但是一些对高斯光束光强起伏功率谱的研究给出了不同的结果,文献[7-10]分别给出了功率谱服从 $-11/3$ 、 $-14/3$ 和 $-17/3$ 等幂率的研究结果^[7-10]。如图 5 所示,实验数据分析的幂值在 $-7/3 \sim -12/3$ 之间波动。

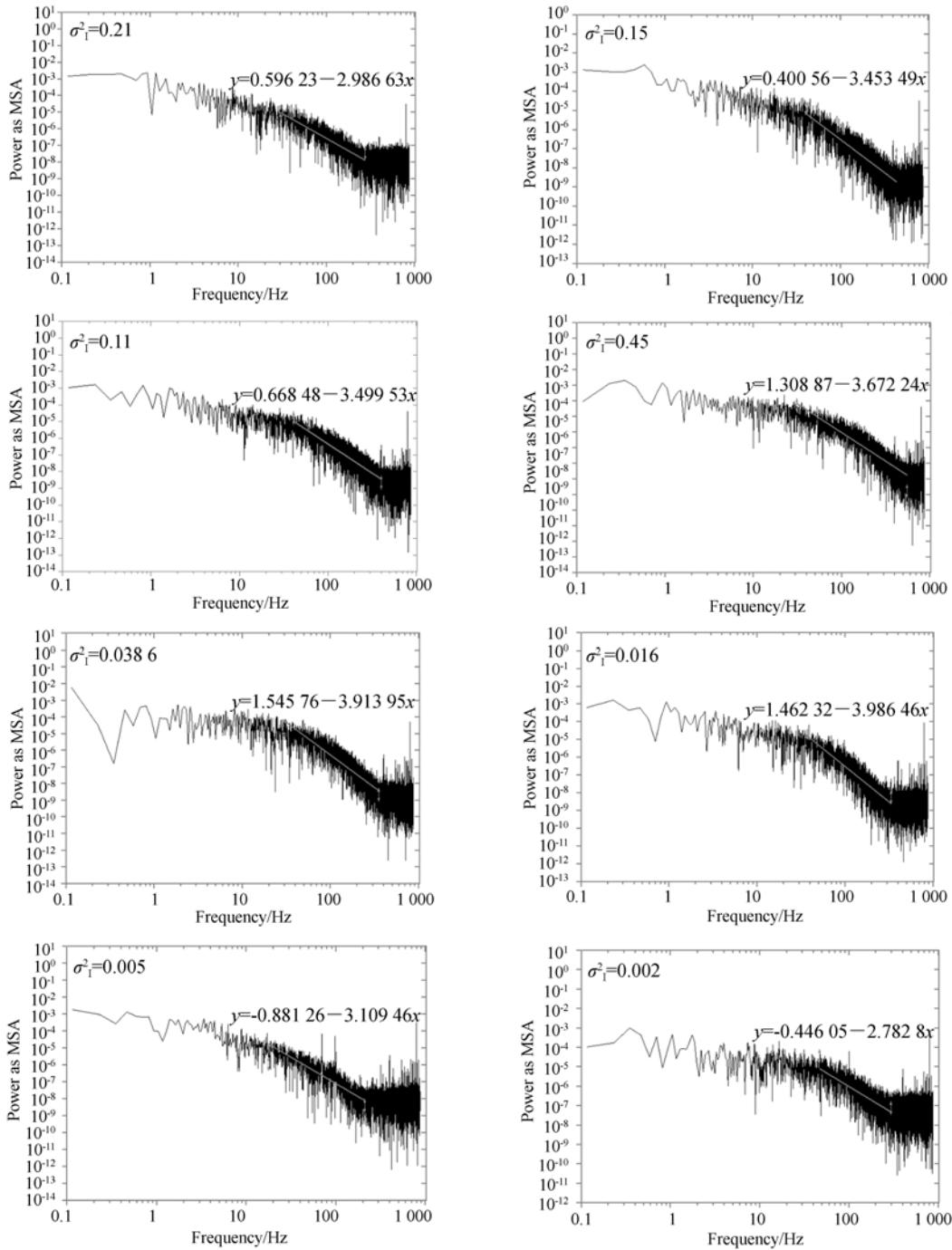


图 5 光强闪烁功率谱密度
Fig. 5 Scintillation power spectral density

在不同的天气条件下,高频段与缓冲区的分界点也不尽相同,通常将高频段与缓冲区的幂率区间分界点定义为特征频率 f_0 。

$$f_0 = \frac{\sqrt{V^2 + 2\sigma_v^2}}{\sqrt{\lambda L}}, \quad (2)$$

其中 σ_v^2 为风速的起伏方差。特征频率 f_0 由链路的长度波长等决定,风速的起伏并不能显著改变频谱,只是略微提高了特征频率。

6 结 论

本文进行了激光大气传输实验,通过对实验数据的计算和分析得出了影响光强闪烁多种因素。实验结果表明:闪烁因子随着波长的增加而减小,并且波长越长,稳定性越好;实测闪烁因子

值与理论上的 Rytov 方差基本吻合,验证了 Rytov 方差在弱起伏条件下的适用性;光强闪烁指数在 0.1~0.2 附近为指数正态和正态分布的交接区间,光强闪烁概率密度函数能很好地拟合和描述光强闪烁的强度分布,从统计数据分布的规律中得出光强闪烁概率密度函数服从正态分布。光强起伏功率谱幂指数在 -7/3 到 -12/3 之间波动,低于其它文献中给出的实验结果,表明 K 湍流理论不足以描述所测量的实验数据,光强起伏频谱的低频段幂指数依然为常数,高频段在一定的幂率范围内波动。光束参数、链路中风速的不均匀性、湍流的内尺度和外尺度等因素都可能对接收光强功率谱产生影响,使得功率谱高频幂率问题十分复杂,因此还需要进行长期的理论和实验研究。

参考文献:

- [1] CHEN C Y, YANG H M, LOU Y, *et al.*. Effects of annular-aperture receiver on angle-of-arrival fluctuations of plane waves[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(11):1731-1733.
- [2] CHEN C Y, YANG H M, TONG S F, *et al.*. Spatiotemporal coherence properties of broadband Gaussian Schell-model beams propagating through atmospheric turbulence[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2013, 111(3):373-381.
- [3] CHEN C Y, YANG H M, MOHSEN KAVEHRAD, *et al.*. Time-dependent scintillations of pulsed Gaussian-beam waves propagating in generalized atmospheric turbulence[J]. *Optics and Laser Technology*, 2014, 61(5): 8-14.
- [4] 饶瑞中,王海燕. 光在湍流大气中的传播[M]. 上海: 上海交通大学出版社,2013.
- RAO R ZH, WANG H Y. *Light Propagation in the Turbulent Atmosphere* [M]. Shanghai: Profile of Shanghai Jiao Tong University Press, 2013. (in Chinese)
- [5] 柯熙政, 张宇. 部分相干光在大气湍流中的光强闪烁效应[J]. *光学学报*, 2015, 35(1):48-54.
- KE X ZH, ZHANG Y. Scintillation of partially coherent beam in atmospheric turbulence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1):48-54. (in Chinese)
- [6] BELEN'KII M S, KARIS S J, BROWN II J M, *et al.*. Experimental study of the effect of non-Kolmogorov stratospheric turbulence on star image motion[J]. *SPIE*, 1997, 3126: 113-123.
- [7] 杨雨川,关小伟,李岩. 上下行传输孔径接收光强起伏特性分析[J]. *应用光学*, 2014, 35(3):537-541.
- YANG Y CH, GUAN X W, LI Y. Analysis of irradiance scintillation for uplink and downlink propagation and aperture receiving[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(3):537-541. (in Chinese)
- [8] 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.
- MEI H P, WU X Q, RAO R ZH. 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. (in Chinese)
- [9] 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.
- WU X Q, HUANG H H, QIAN X M, *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. (in Chinese)
- [10] 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): 1-6.
- WU X Q, HUANG Y B, MEI H P, *et al.*. Meas-

urement of non-Kolmogorov turbulence characteristic parameter in atmospheric surface layer [J].

Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0601001. (in Chinese)

作者简介:



徐春风(1977—),女,吉林长春人,讲师,1999年于长春理工大学获得学士学位,2005年于北京理工大学获得硕士学位,主要从事激光通信中大气传输特性的研究及航空平台间激光通信的研究与仿真等方面的研究。E-mail: xcf@cust.edu.cn