

doi:10.3788/gzxb20184704.0401001

兰州地区夜间光强起伏特性实验

王惠琴, 李源, 胡秋, 包仲贤, 曹明华

(兰州理工大学 计算机与通信学院, 兰州 730050)

摘 要:在兰州地区夜间进行了链路长为 610 m 的激光传输实验,研究了晴、阴、沙尘、雨夹雪天气下光强起伏的统计特性.采用闪烁法测量了不同天气下的大气折射率结构常数 C_n^2 ,分析其最大值、最小值、均值和标准差,得到实验期间 C_n^2 值的范围为 $1.06 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3} \sim 1.05 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$,均属于中等湍流;而且晴天和雨夹雪天气下 C_n^2 值以及起伏程度均大于阴天和沙尘天的值.同时,利用实测光强值分析了 Rytov 方差,结果表明:晴、雨夹雪、沙尘天气下光强起伏大部分时间属于弱起伏,有小部分时间跨入中等起伏区,而阴天下光强起伏均属于弱起伏,且晴天和雨夹雪天气下光强起伏大于阴天和沙尘天.通过对光强频数分布进行对数正态、Gamma-Gamma 和指数威布尔非线性拟合,不同天气下光强起伏概率分布最为接近指数威布尔分布,其拟合优度均大于 0.989 95,而在弱到中等起伏区,Gamma-Gamma 分布拟合效果优于对数正态分布.

关键词:激光传输;湍流强度;光强起伏;Rytov 方差;概率分布

中图分类号:TN929.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)04-0401001-8

Experimental Investigation on Light Intensity Fluctuation at Night in Lanzhou Area

WANG Hui-qin, LI Yuan, HU Qiu, BAO Zhong-xian, CAO Ming-hua

(School of Computer & Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: A wireless optical transmission experiment with a link length of 610m was carried out at night in Lanzhou area to investigate the statistical characteristics of light intensity fluctuation in sunny, overcast, sleet and dust days. The atmospheric structure constant of refractive index C_n^2 in different meteorological conditions were measured by using the scintillation method. The measured maximum, minimum and mean value and the standard deviation of C_n^2 indicate that the range of C_n^2 is $1.06 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3} \sim 1.05 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ of the experimental period, which belongs to moderate turbulence. Moreover, it also indicates that the fluctuation of C_n^2 in sunny day and sleet day are greater than overcast day and dust day. Furthermore, Rytov variance is analyzed by using the measured light intensity values. The results show that in sunny day, sleet day and dust day, the light intensity fluctuation belongs to weak fluctuation at most of the time and there is a small part of the time it belongs to moderate fluctuation. However, the light intensity fluctuation in overcast day belongs to weak fluctuation in all time. The light intensity fluctuation in sunny day and sleep day are greater than overcast day and dust day. We can conclude that the probability distribution of light intensity in different meteorological conditions is closest to the exponential weibull distribution by comparing the nonlinear fitting results of the logarithmic normal, Gamma-Gamma and exponential Weibull distribution. The goodness of exponential Weibull distribution is greater than 0.989 95. In the weak to medium fluctuation region, the Gamma-Gamma distribution fits better than the lognormal distribution.

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61465007, 61265003)和兰州理工大学博士基金(No.14-0232)资助

第一作者:王惠琴(1972-),女,教授,博士,主要研究方向为无线光通信理论与技术. Email:whq1222@lut.cn

通讯作者:曹明华(1979-),男,副教授,博士,主要研究方向为光无线通信理论与技术. Email:caominghua@lut.cn

收稿日期:2017-10-16; **录用日期:**2017-12-05

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

Key words: Laser transmission; Turbulence intensity; Light intensity fluctuation; Rytov variance; Probability distribution

OCIS Codes: 010.3310; 010.1330; 010.1290; 010.1280

0 引言

当光波在大气中传输时,会受到空间损耗、大气衰减、大气湍流以及背景辐射的影响.其中,大气湍流会造成大气折射率的随机起伏,导致光波在空间和时间上产生随机起伏,而这些随机起伏会引起接收光信号的强度起伏、光束扩展和漂移等效应^[1-2].其中,光强起伏会造成接收信号光强的下降,导致大气参数测量精度降低、自适应光学中哈特曼传感器的波前探测失准,以及大气光通信系统误码率的增加,甚至出现短时通讯中断等现象^[3-4].因此,为了提高大气探测准确度以及改善光通信系统性能,有必要对光强起伏展开研究.

早期,国内外学者以波传播理论为基础,应用几何光学法、Rytov 近似法和 Markov 近似法等方法从理论上研究了光强起伏规律^[5].随着研究的深入,人们发现光强起伏具有不同的统计特性,并与地域、下垫面以及天气条件等参数有关^[6-12].为了得到光强起伏的统计特征,针对不同地域、不同下垫面以及不同的天气条件,研究人员陆续展开了有关光强起伏的实验研究.美国陆军研究实验室研究了微气象要素与 C_n^2 间的关系^[6].同时,他们通过分析频谱和概率分布得到了光强起伏的变化特性^[7].Vetelino F S 等在干草地下垫面上开展激光传输实验,研究了孔径平均效应对光强概率分布的影响^[8].哈尔滨工业大学通过分析闪烁指数、概率分布以及高频谱研究了不同季节下的光强起伏规律,并利用到达角起伏方差得到了大气折射率结构常数的日变化规律^[9].中科院安徽光机所在水面和陆地各占一半的下垫面上研究了光束横截面上不同面积内的光强起伏规律^[10].长春理工大学研究了不同接收孔径下的光强起伏规律以及长春地区的湍流特点^[11].山东省信号与信息处理重点实验室利用大孔径闪烁仪的实验方法,研究了公路和近海面环境下大气的折射率结构常数与光强起伏特性,得出公路环境下的光强起伏程度和 C_n^2 均远大于近海面环境的结论^[12].由上述可知,目前我国对于大气湍流及其光强起伏的研究主要集中在东部地区,且实验大部分在晴天展开.

黄土高原半干旱地区气候背景特殊,处于半湿润和干旱气候的过渡带上,且其下垫面具有沟、壑、梁、赤形成的显著不均匀性,导致其湍流较全国其它地区更为复杂^[13-14].文献[15]表明,该地区荒草下垫面湍流强度比戈壁下垫面更大,比海洋边界层湍流强度高出一个数量级.因此,研究该地区的光强起伏规律对于在该地区开展光通信具有重要意义.为此,本文通过在兰州地区晴、阴、沙尘、雨夹雪天气下开展激光传输实验,分析了大气折射率结构常数的变化规律、Rytov 方差以及光强起伏的概率分布,初步得到了该地区夜间光强起伏规律.

1 实验系统

实验系统如图 1.发射端使用波长为 650 nm 的半导体可调激光器(其发散角为 2 mrad、最大功率为 200 mW、功率稳定性 $< 3\%$ 、光斑模式 near TE00).激光器发出的激光通过聚焦透镜(焦距为 10 mm)扩束后,从口径为 105 mm 的马卡式望远镜(焦距为 1 365 mm)射出,经 610 m 的大气信道传输后由漫反射屏接收,再利用 PD300 光功率计完成瞬时光强的测量.PD300 的频谱响应范围为 430~1 000 nm,孔径大小为 10×10 mm,噪声值为 ± 300 fW/s,精确度为 $\pm 3\%$.同时,利用北京鼎泰通达科技有限公司的环境检测仪器记录实验期间的温度、相对湿度、气压和风速.

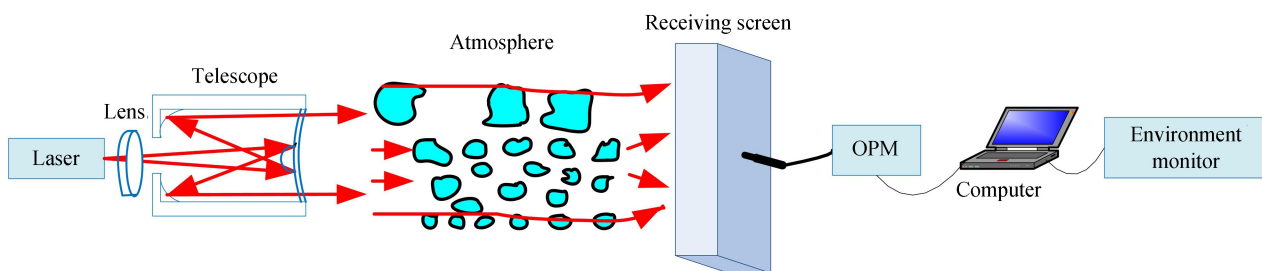


图 1 实验系统

Fig.1 Experimental system

实验时,首先进行发射端与接收端对准,使得激光光斑落到接收漫反射屏的固定位置,并设置激光器输出功率保持定值 1 mW.待激光器工作稳定后,接收端使用光功率计采集光信号的功率,并设置其采样频率为 15 Hz,每次实验采集光强样本值为 15 000 个.与此同时,实验期间每分钟采集一组由风速、温度、相对湿度以及大气压组成的微气象要素参数值,并对获得的微气象要素分别求平均,得到实验期间的气象参数.最后,对光强值进行分析处理,得到光强起伏特性.

2 数据分析

研究组于 2016 年 9 月~2017 年 5 月期间晚上 20:00~22:00 时段,在甘肃省兰州市兰工坪地区进行了多次近地面水平激光传输实验.链路发射端位于东经 $103^{\circ}46'21''$ 、北纬 $36^{\circ}3'16''$,接收端位于东经 $103^{\circ}46'27''$ 、北纬 $36^{\circ}3'17''$,链路长度为 610 m,链路距地面高度为 24 m,其下垫面由楼宇、水泥地及山坡所组成.实验期间典型气象条件下的天气参数测量均值如表 1.

表 1 T1~T11 实验天气条件
Table 1 Weather condition for T1~T11

Trial	Date	Wind/(m·s ⁻¹)	Temperature/°C	RH/%	AP/mbar	Weather
T1	2016.10.18	1	13.65	51.47	838.7	sunny
T2	2016.11.03	1	9.36	58.95	840.1	sunny
T3	2016.11.01	2	7.43	35.43	839.1	sunny
T4	2016.10.11	1	13.24	68.84	841.5	overcast
T5	2016.10.25	1	12.82	61.63	840.6	overcast
T6	2016.09.27	1	17.07	65.78	846.2	overcast
T7	2016.10.20	1	14.56	39.87	838.5	dust
T8	2016.11.10	1	6.63	58.01	842.3	dust
T9	2017.04.18	2	21.25	29.83	839.6	dust
T10	2016.10.27	2	4.32	69.02	845.8	sleet
T11	2017.02.20	2	5.44	45.58	837.2	sleet

2.1 大气折射率结构常数

光学湍流主要由温度起伏引起折射率场随机变化而产生.大气折射率结构常数 C_n^2 是反映大气光学湍流特性的重要参数,它定量地描述了光学湍流强度.依据 Davis 理论湍流可被划分为三类,即当 $C_n^2 \geq 2.5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 时,为强湍流;当 $6.4 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3} \leq C_n^2 < 2.5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 时,为中等强度湍流;当 $C_n^2 < 6.4 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ 时,为弱湍流.随着天气条件、地理位置以及下垫面等的不同,其取值会发生变化.本文利用式(1)的闪烁法来测量 C_n^2 ^[16],其表达式为

$$C_n^2 = 4.48 C D_t^{7/3} L^{-3} \sigma_x^2 \quad (1)$$

式中, L 为链路长度, $C = D_r/D_t$,其中 D_r 和 D_t 分别为发送孔径尺寸和接收孔径尺寸; σ_x^2 为对数振幅方差,表示为^[12]

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{4} \ln \left[1 + \left(\frac{s}{\langle I \rangle} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中, $\langle I \rangle$ 为光强均值, s 为光强标准差.

为了得到兰州地区不同天气条件下 C_n^2 的变化规律,本文对消除背景光后的光强值进行了归一化处理,并将其分为 150 组.通过对每组 100 个光强值求取均值 $\langle I \rangle$ 与标准差 s ,利用式(2)得到 σ_x^2 ,进而利用式(1)得到 C_n^2 的变化曲线,如图 2 所示.

从图 2 可以看出,晴天和雨夹雪天气下的 C_n^2 明显大于阴天和沙尘天.图 2(a)显示,晴天下 C_n^2 跨越了三个数量级,即在 $1.06 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3} \sim 1.05 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 之间随机起伏;图 2(b)显示,阴天下 C_n^2 仅在一个数量级,即 C_n^2 值为 $1.06 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3} \sim 9.33 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$;对比图 2(c)和图 2(d)可以看出,雨夹雪和沙尘天下 C_n^2 跨越了两个数量级,其取值范围分别为 $1.06 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3} \sim 9.82 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 和 $1.06 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3} \sim 1.46 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,且大部分集中分布于 $1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3} \sim 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 之间.依据 Davis 划分湍流强度的标准,在此实验条件下,不同天气下湍流均为中等湍流.为了从量化角度描述不同天气下 C_n^2 取值的规律,计

算了 C_n^2 均值及其标准差, 以及 C_n^2 的最大值和最小值, 如表 2 所示.

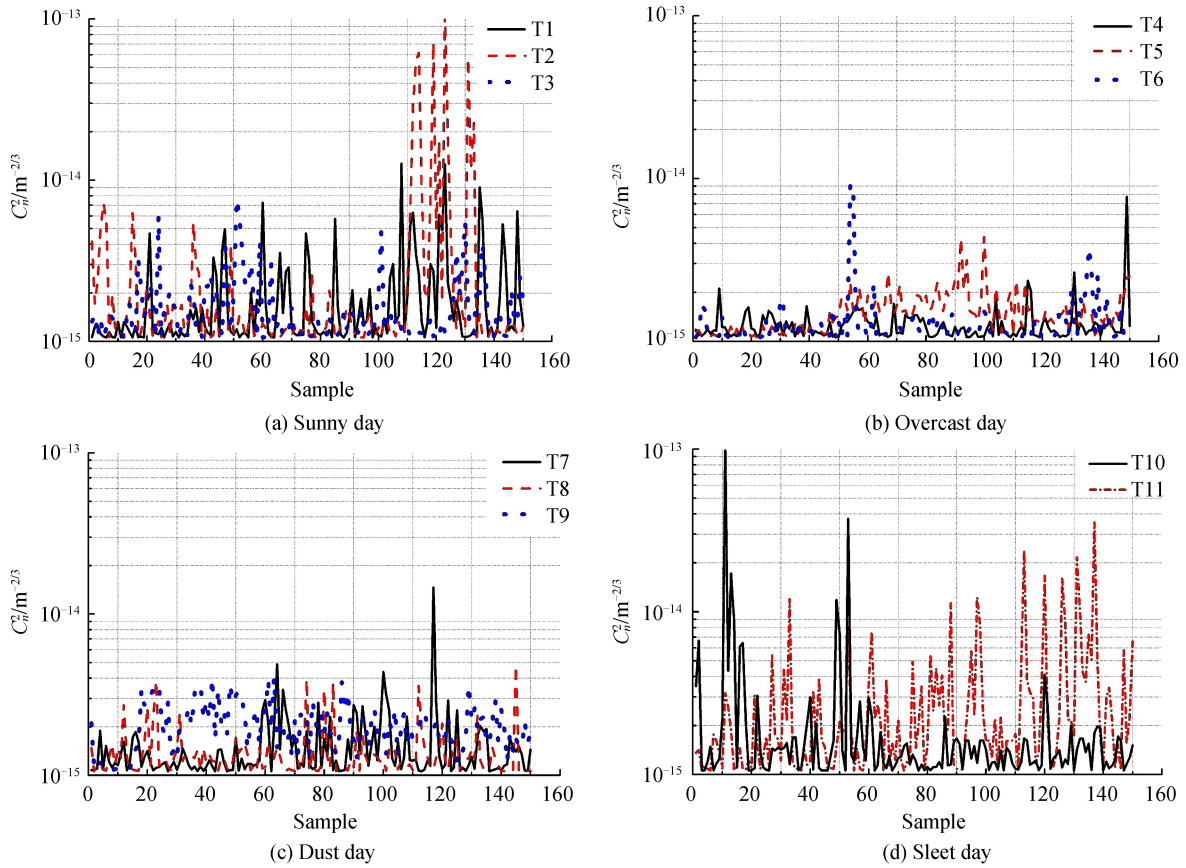


图 2 T1~T11 C_n^2 变化趋势
Fig.2 The changing curve of C_n^2 for T1~T11

表 2 T1~T11 C_n^2 统计分布

Table 2 C_n^2 statistic distribution for T1~T11

Trial	Mean(C_n^2)	Standard deviation(C_n^2)	Max(C_n^2)	Min(C_n^2)
T1	1.99×10^{-15}	1.88×10^{-15}	1.26×10^{-14}	1.06×10^{-15}
T2	4.64×10^{-15}	1.32×10^{-14}	1.05×10^{-13}	1.06×10^{-15}
T3	2.67×10^{-15}	5.03×10^{-15}	7.63×10^{-15}	1.06×10^{-15}
T4	1.29×10^{-15}	5.78×10^{-16}	7.71×10^{-15}	1.06×10^{-15}
T5	1.52×10^{-15}	5.10×10^{-16}	4.37×10^{-15}	1.06×10^{-15}
T6	1.35×10^{-15}	9.34×10^{-16}	9.33×10^{-15}	1.06×10^{-15}
T7	1.57×10^{-15}	1.23×10^{-15}	1.46×10^{-14}	1.06×10^{-15}
T8	1.39×10^{-15}	5.93×10^{-16}	4.79×10^{-15}	1.06×10^{-15}
T9	1.78×10^{-15}	1.20×10^{-15}	4.03×10^{-15}	1.06×10^{-15}
T10	2.70×10^{-15}	8.56×10^{-15}	9.82×10^{-14}	1.06×10^{-15}
T11	3.20×10^{-15}	4.42×10^{-15}	3.55×10^{-14}	1.06×10^{-15}

从表 2 可以看出:

1)晴天和雨夹雪天气下 C_n^2 均值最小值为 $1.99 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, 大于阴天和沙尘天 C_n^2 均值最大值 $1.78 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, 这就从量化角度说明晴天和雨夹雪天气下的 C_n^2 大于阴天和沙尘天. 为了分析晴天和雨夹雪天气下的 C_n^2 大于阴天和沙尘天的原因, 分别选取晴、阴、沙尘和雨夹雪天气下的四次实验来对比分析, 即 T2、T4、T8、T11. 实验期间, 温度变化范围分别为: $9.11 \sim 9.62$ 、 $13.19 \sim 13.32$ 、 $6.54 \sim 6.74$ 、 $4.27 \sim 5.53$, 湿度变化范围分别为: $57.24 \sim 59.58$ 、 $68.64 \sim 68.87$ 、 $57.68 \sim 58.76$ 、 $68.45 \sim 69.93$. 通过比较温湿度起伏和 $\text{mean}(C_n^2)$ 可以发现, 温度起伏程度越大, C_n^2 均值取值越大, 而未发现湿度起伏与 C_n^2 取值的对应关系.

2)阴天下 C_n^2 标准差均在 10^{-16} 数量级, 表明阴天下 C_n^2 起伏最为平缓. 而 C_n^2 标准差最大值在晴天得到,

其最大值为 1.32×10^{-14} ,且晴天和雨夹雪天气下 C_n^2 标准差最小值 1.88×10^{-15} 大于阴天和沙尘天 C_n^2 标准差最大值 1.23×10^{-15} ,这说明晴天和雨夹雪天气下 C_n^2 起伏程度大于阴天和沙尘天的值.

2.2 光强起伏特性

大气折射率结构常数 C_n^2 反映了光学湍流的强弱.在不同的湍流强度下,其光强起伏程度也不同.为了得到兰州地区晴、阴、雨夹雪和沙尘天气下光强起伏特性,本文研究了光强起伏的两个基本参数 Rytov 方差和光强起伏概率分布.

2.2.1 Rytov 方差

当激光在大气中传输时,会受到大气湍流的影响,造成接收端光强的随机起伏.通常情况下,常采用闪烁指数和 Rytov 方差来描述光强起伏的程度.在弱起伏下,闪烁指数与 Rytov 方差近似相等,本文通过 Rytov 方差来表征光强起伏,其表达式为^[5]

$$\sigma_I^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (3)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$ 为空间波数,其中 λ 为波长.当 $\sigma_I^2 < 0.3$ 时,为弱起伏;当 $0.3 \leq \sigma_I^2 < 5$ 时,为中等起伏;当 $\sigma_I^2 \geq 5$ 时,为强起伏.将 T1~T11 实验期间所得 C_n^2 代入式(3)可得其 Rytov 方差,通过求取均值、最大值、最小值以及 $\sigma_I^2 > 0.3$ 的样本个数可得表 3 所示的结果.

表 3 T1~T11 σ_I^2 统计分布
Table 3 σ_I^2 statistic distribution for T1~T11

Trial	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
Mean(σ_I^2)	0.044 1	0.103 1	0.570 1	0.028 6	0.033 7	0.03	0.034 7	0.030 8	0.032 6	0.059 8	0.071 2
Max(σ_I^2)	0.280 3	2.330 4	0.169 2	0.170 9	0.096 9	0.207 5	0.322 9	0.106 3	0.089 5	2.178 1	0.787 3
Min(σ_I^2)	0.023 5	0.023 5	0.023 5	0.023 5	0.023 5	0.023 5	0.023 5	0.023 5	0.023 5	0.023 5	0.023 5
Count($\sigma_I^2 > 0.3$)	0	9	0	0	0	0	1	0	0	3	5

从表 3 可以看出:

1)在阴天和沙尘天下 $\text{mean}(\sigma_I^2)$ 取值在 0.03 左右,其最大值为 0.034 7,小于雨夹雪和晴天下 $\text{mean}(\sigma_I^2)$ 的最小值0.044 1.同时, $\text{mean}(\sigma_I^2)$ 的最大值和最小值分别在晴天和阴天获得,其取值分别为0.103 1和 0.028 6.由此可以得出,晴天和雨夹雪天气下光强起伏程度大于阴天和沙尘天的值.

2)在实验 T2、T7、T10 和 T11 中, $\text{max}(\sigma_I^2)$ 均大于 0.3,且 $\text{min}(\sigma_I^2)$ 均大于 0.023 5,表明有部分样本点进入了中等起伏区.为了得到光强起伏进入中等起伏区的样本数,统计了 $\sigma_I^2 > 0.3$ 的个数.在 T2、T7、T10 和 T11 中 $\text{count}(\sigma_I^2 > 0.3)$ 取值分别为 9、1、3 和 5,而在其它实验中 $\text{count}(\sigma_I^2 > 0.3)$ 取值均为 0.由此可以看出,晴、雨夹雪和沙尘天气下光强起伏在大部分时间处于弱起伏区,有小部分时间属于中等起伏区,而阴天下光强起伏均属于弱起伏区.

2.2.2 概率分布

大气湍流中光强具有随机起伏的特征,对于实际大气湍流,概率分布是描述其统计特征的最基本方法.目前,关于光强起伏的概率分布已有大量研究.通常认为,对于点接收器,在弱起伏区,光强起伏的概率分布服从对数正态分布,其概率密度函数为^[9]

$$p_{\text{LN}}(I; \sigma_I^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_I^2}} \frac{1}{I} \exp\left[-\frac{(\ln I + \sigma_I^2/2)^2}{2\sigma_I^2}\right] \quad (5)$$

式中, σ_I^2 为闪烁指数,其表达式为 $\sigma_I^2 = \langle I^2 \rangle / \langle I \rangle^2 - 1$,其中 I 代表光强, $\langle \cdot \rangle$ 表示统计平均值.

从弱起伏到强起伏条件下,根据 L. C. Andrews 的理论,接收端的光强可看做是由大尺度光强起伏对小尺度光强起伏的乘性调制过程.当大尺度光强起伏和小尺度光强起伏均服从 Gamma 分布并且统计独立时,光强起伏服从 Gamma-Gamma 分布,此时,其概率密度函数为^[17]

$$p_{\text{GG}}(I; \xi, \psi) = \frac{2(\xi\psi I)^{\frac{\xi+\psi}{2}}}{\Gamma(\xi)\Gamma(\psi)I} K_{\xi-\psi}(2\sqrt{\xi\psi I}) \quad (6)$$

式中, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数,即为 $\Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt$; $K_\nu(x)$ 为修正的第二类贝塞尔函数; ξ 、 ψ 分别表示大尺度散射体和小尺度散射体的有效数,可以通过大尺度闪烁和小尺度闪烁来确定,即^[8]

$$\begin{cases} \xi = \frac{1}{\sigma_x^2} = \frac{1}{\exp(\sigma_{\ln x}^2) - 1} \\ \psi = \frac{1}{\sigma_y^2} = \frac{1}{\exp(\sigma_{\ln y}^2) - 1} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\sigma_{\ln x}^2$ 、 $\sigma_{\ln y}^2$ 分别为大尺度和小尺度对数光强起伏方差. 在弱起伏条件下, $\xi \gg 1$ 、 $\psi \gg 1$; 当光强起伏增加时, ξ 、 ψ 均减小; 当到达饱和区后, $\psi \rightarrow 1$, 而 ξ 随着湍流强度的增大而增大; 在深度饱和区时, Gamma-Gamma 分布则变为负指数分布. 然而实际中, 探测器都具有一定的接收面积. 当接收孔径大于产生光强起伏的湍流尺度时, 将产生孔径平均效应, 在考虑孔径平均效应下, 研究者提出用指数威布尔分布来描述从弱起伏到中等起伏条件下光强起伏分布, 其概率密度函数为^[18]

$$p_{EW}(I; \alpha, \beta, \eta) = \frac{\alpha\beta}{\eta} \left(\frac{I}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{I}{\eta}\right)^\beta\right] \times \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{I}{\eta}\right)^\beta\right]\right\}^{\alpha-1} \quad (8)$$

式中, α 为形状参数, 主要决定分布曲线的形状, 其表达式为

$$\alpha \propto 3.931 (D_r/\rho_0)^{-0.519} \quad (9)$$

式中, ρ_0 为大气相干长度, 其表达式为

$$\rho_0 = [1.46 C_n^2 (2\pi/\lambda)^2 L]^{-3/5} \quad (10)$$

β 为与闪烁指数相关的形状参数, 其表达式为

$$\beta \propto (\alpha \sigma_1^2)^{-6/11} \quad (11)$$

η 为尺度参数, 主要决定曲线的陡峭度, 其表达式为

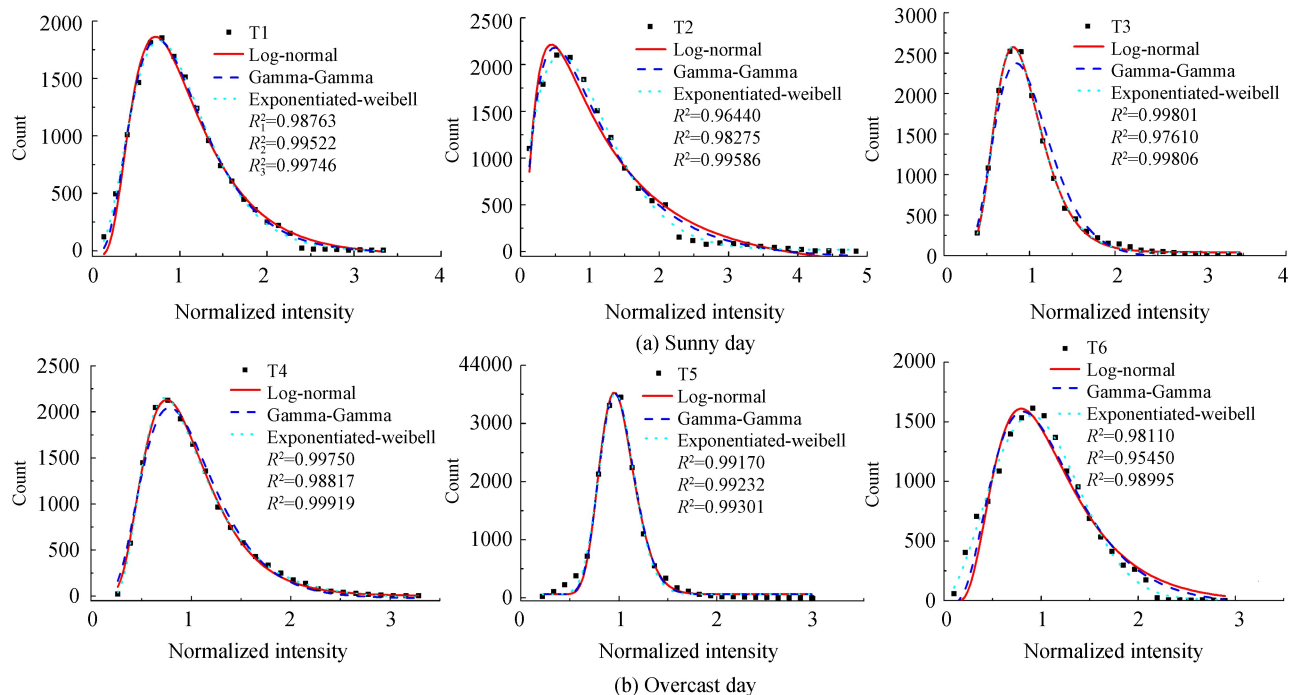
$$\eta \propto \left[\alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) g(\alpha, \beta) \right]^{-1} \quad (12)$$

式中, 有

$$g(\alpha, \beta) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i (i+1)^{-\frac{1+\beta}{\beta}} \Gamma(\alpha)}{i! \Gamma(\alpha - i)} \quad (13)$$

由于式(13)收敛较快, 通常积分到 $i=10$ 即可.

为了得到兰州地区晴、阴、沙尘、雨夹雪天气下的光强起伏分布, 将实验测得光强值经归一化处理, 先求其最大值和最小值, 并将其区间等分为 25 份. 统计落在每个小区间的光强值频数, 绘制频数随样本数分布的散点图. 最后, 通过计算各概率密度函数的参数初始值, 并对散点图进行非线性拟合, 得到光强起伏的概率分布. 11 次实验所得光强概率分布如图 3.



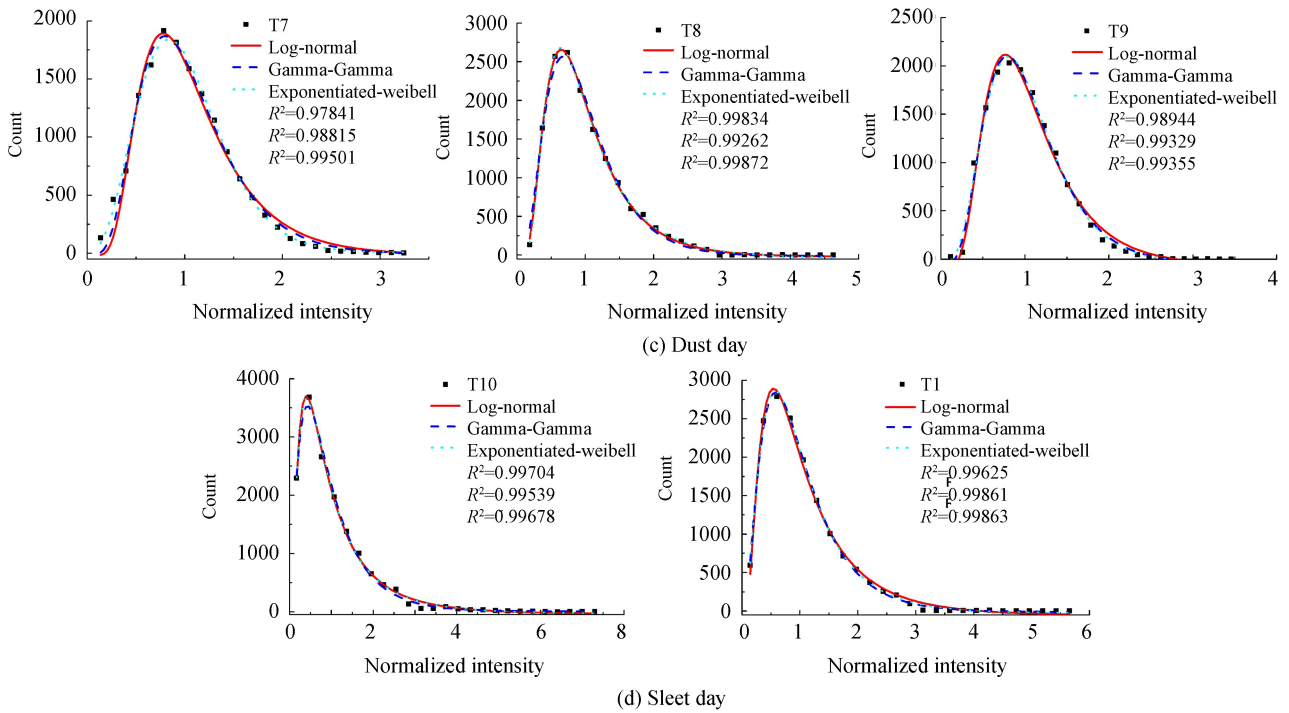


图3 T1~T11 归一化光强频数分布及其非线性拟合

Fig.3 Histograms of normalized light intensity and non-linear fitting curves for T1~T11

在图3中, R_1^2 、 R_2^2 、 R_3^2 分别为对数正态分布、Gamma-Gamma 分布和指数威布尔分布的拟合优度值, R^2 越接近 1, 表明拟合结果越理想. 由图3可知, 不同天气下归一化光强频数分布的对数正态分布、Gamma-Gamma 分布和指数威布尔分布拟合优度分别达到 0.931 1、0.954 5 和 0.989 95 以上. 为了比较这三种概率分布对光强频数分布拟合效果, 对 R^2 进行统计, 得到表 4.

表4 T1~T11 R^2 统计分布

Table 4 R^2 statistic distribution for T1~T11

Trial	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
R_1^2	0.987 63	0.964 4	0.998 01	0.997 5	0.991 7	0.931 1	0.978 41	0.998 34	0.989 44	0.997 04	0.996 25
R_2^2	0.995 22	0.982 75	0.976 1	0.988 17	0.992 32	0.954 5	0.988 15	0.992 62	0.993 29	0.995 39	0.998 61
R_3^2	0.997 46	0.995 86	0.998 06	0.999 19	0.993 01	0.989 95	0.995 01	0.998 72	0.993 55	0.996 78	0.99863

由表3可知, T1、T3、T4、T5、T6、T8 和 T9 光强起伏均为弱起伏, 而 T2、T7、T10 和 T11 光强起伏均为弱到中等起伏. 结合表4可以发现, T1~T11 中除了 T10 中 R_3^2 取值小于 R_1^2 外, 其它实验条件下均满足 R_3^2 取值大于 R_1^2 和 R_2^2 , 这表明无论在弱起伏区还是在弱到中等起伏区, 指数威布尔分布对光强概率分布的拟合效果最好; 在弱起伏到中等起伏区, 除了 T10 外, T2、T7 和 T11 均满足 $R_3^2 > R_2^2 > R_1^2$, 这表明在弱起伏到中等起伏区, 与对数正态分布相比, Gamma-Gamma 分布更能反映光强的概率分布; 而在弱起伏区, 未能得到对数正态分布与 Gamma-Gamma 分布拟合效果孰优孰劣的明确结论. 对比不同天气下的拟合优度, 可以发现, 在雨夹雪天气下, 三种分布的拟合优度值均达到 0.995 39 以上, 相较于其他天气, 其拟合优度最高.

3 结论

在兰州市兰工坪地区开展了 610 m 的激光传输实验, 研究了晴、阴、雨夹雪以及沙尘天气下的光强起伏特性. 通过实验及其实验数据的分析处理, 得到以下结论:

- 1) 晴天和雨夹雪天气下的 C_n^2 明显大于阴天和沙尘天的值, 且晴、阴、雨夹雪以及沙尘天气下的大气湍流均属于中等强度湍流, 其变化范围为 $1.06 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3} \sim 1.05 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$.
- 2) 晴天和雨夹雪天气下光强起伏程度大于阴天和沙尘天的值, 且晴、雨夹雪、沙尘天气下光强起伏在大部分时间处于弱起伏, 有小部分时间属于中等起伏区, 而阴天下光强起伏均属于弱起伏区.
- 3) 晴、阴、雨夹雪以及沙尘天气下的光强起伏概率分布在弱起伏区和从弱到强起伏区均服从指数威布尔

分布.从弱到中等起伏区, Gamma-Gamma 分布拟合优度高于对数正态分布的值.

本文利用激光传输实验,初步得到了一些结论,但是实验仅在 20:00~22:00 时段开展,所得结论具有一定的局限性.因此,即将开展全天候的激光传输实验,并针对下垫面以及典型天气,进一步研究该地区光强起伏规律,以便于为该地区无线光通信系统的应用提供参考依据.

参考文献

- [1] ZHU Y, ZHAO D, DU X. Propagation of stochastic Gaussian-Schell model array beams in turbulent atmosphere[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(22): 18437-18442.
- [2] CHENG Mu, KE Xi-zheng. Effect of atmospheric turbulence on the performance of laser communication system[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2016, **45**(8):108-114.
陈牧, 柯熙政. 大气湍流对激光通信系统性能的影响研究[J]. 红外与激光工程, 2016, **45**(8):108-114.
- [3] LIU Chao, CHEN Shan-qiu, LIAO Zhou, *et al.* Correction of atmospheric turbulence by adaptive optics in waveband of free-space coherent laser communication[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2014, **22**(10): 2605- 2610
刘超, 陈善球, 廖周, 等. 自适应光学技术在通信波段对大气湍流的校正[J]. 光学精密工程, 2014, **22**(10):2605-2610.
- [4] DJORJDJEVIC G T, PETKOVIC M I. Average BER performance of FSO SIM-QAM systems in the presence of atmospheric turbulence and pointing errors[J]. *Journal of Modern Optics*, 2016, **63** (8):1-9.
- [5] XU Guang-yong. Numerical simulation and influence analysis of laser transmission in atmospheric turbulence[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008.
徐光勇. 大气湍流中的激光传输数值模拟及其影响分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [6] ARNOLD T. Statistical analysis of optical turbulence intensity over a 2.33 km propagation path[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(7):3619-3628.
- [7] ARNOLD T. Statistical analysis of measured free-space laser signal intensity over a 2.33 km optical path[J]. *Optics Express*, 2007, **15** (21):14115-14122.
- [8] VETELINO F S, YOUNG C, ANDREWS L, *et al.* Aperture averaging effects on the probability density of irradiance fluctuations in moderate-to-strong turbulence[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(11):2099.
- [9] JIANG Y J, MA J, TAN L Y, *et al.* Measurement of optical intensity fluctuation over an 11.8 km turbulent path[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(10):6963-6973.
- [10] JING Xu, WU Yi, HOU Zai-hong, *et al.* Study of irradiance fluctuations for laser beam propagation in atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **3**(11): 3111- 3116.
靖旭, 吴毅, 侯再红, 等. 湍流大气中激光传输光强起伏特征研究[J]. 光学学报, 2010, **30** (11):3110-3116.
- [11] LOU Yan, JIANG Hui-lin, CHEN Chun-yi, *et al.* Analysis of experimental data of the scintillation fluctuation and spot area in atmosphere laser communication[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(3):515- 519.
娄岩, 姜会林, 陈纯毅, 等. 激光大气湍流传输光强起伏及光斑面积实验分析[J]. 红外与激光工程, 2011, **40**(3):515-519.
- [12] WU Xiao-jun, WANG Hong-xing, SONG Bo, *et al.* Measurement of optical intensity fluctuation and study of transmission characteristics under different environment conditions[J]. *Journal of Optoelectronics & Laser*, 2015, **26** (6):1138-1145.
吴晓军, 王红星, 宋博, 等. 不同环境下光强起伏测量与传输特性研究[J]. 光电子·激光, 2015, **26**(6):1138-1145.
- [13] ZHANG C, FAN G, ZHUGUO M A, *et al.* Characteristics of albedo over different underlying surface in the semi-arid area[J]. *Plateau Meteorology*, 2015, **34** (4): 1029-1040.
- [14] LIANG Jie-ning. Atmospheric boundary layer turbulence characteristics over complex terrain of semiarid region in the Loess Plateau[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.
梁捷宁. 黄土高原半干旱区复杂地形上大气边界层湍流特征[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [15] XIAO Xia. A study on characteristics of turbulence and turbulent energy transport with surface energy unclosure over native grassland in the Semi-arid Loess Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011.
肖霞. 黄土高原半干旱区荒草地湍流和湍流能量传输特性及能量平衡状况[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [16] ARNOLD T. Optical turbulence parameters characterized via optical measurements over a 2.33 km free-space laser path [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(19):14645-14654.
- [17] YANG Y, YU L, ZHANG Y. Average capacity of the ground to train communication link of a curved track in the turbulence of Gamma-Gamma distribution[J]. *Optics Communications*, 2017, 389:68-73.
- [18] YI X, YAO M. Free-space communications over exponentiated weibull turbulence channels with nonzero boresight pointing errors[J]. *Optics Express*, 2015, **23** (3): 2904 -17.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos.61465007, 61265003), the Doctoral Foundation of Lanzhou University of Technology(No.14-0232)