doi:10.3788/gzxb20174606.0601002

兰州地区光强分布及其起伏特性研究

王惠琴,李源,曹明华,彭清斌
(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,研究了高斯激光在不同天气条件下的光强分布及其起伏特性.采用三维伪彩色变换方法,分析了光斑光强的空间分布规律,得到了光斑主瓣光强服从类高斯分布,并按照晴天、多云天、阴天的顺序,光斑几何中心位置附近光强分布的陡峭度依次减小,而其衰减则依次增大的结论.同时,利用实测光强值分析了大气闪烁指数,结果表明:晴天、雨后晴天和阴天下的闪烁指数分别为0.225 4、0.189 2、0.188 8,这说明晴天下的光强起伏大于雨后晴天和阴天的,且均为弱起伏.通过对归一化光强的频数分布进行非线性拟合得到了光强的概率密度分布,它们均服从对数正态分布,其中晴天下的概率密度曲线的拟合优度更是达到了0.997 50.

关键词:大气光学;大气湍流;激光传输;光强分布;光强起伏;闪烁指数;概率密度分布
中图分类号:TN929.12　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1004-4213(2017)06-0601002-8

Experimental Investigation of Light Intensity Distribution and Fluctuation Characteristics in Lanzhou Area

WANG Hui-qin, LI Yuan, CAO Ming-hua, PENG Qing-bin
(*School of Computer& Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou* 730050, *China*)

Abstract: A wireless optical link in length of 610 m is established in Lanzhou area to investigate the light intensity distribution and fluctuation characteristics of Gaussian laser under different weather conditions. The three-dimensional pseudo-color transform method is utilized to analyze the spatial distribution of light intensity. The results show that the intensity distribution of the main lobe within the light spot follows the Gaussian distribution. The steepness of light intensity distribution decreases and the attenuation of light intensity increases according to the order of sunny day, cloudy day and overcast day in turn. Moreover, the atmospheric scintillation index is analyzed by using the measured light intensity data. The results show scintillation index of sunny day, sunny day after rain and overcast day are 0.225 4, 0.189 2 and 0.188 8, respectively. This indicates that the light intensity fluctuation in sunny day is higher than sunny day after rain and overcast day. The probability density distribution of light intensity is obtained by using nonlinear fitting of histograms of the normalized optical intensity data. They all conform to log-normal distribution. Especially, the probability density in sunny day is more consistent with log-normal distribution, the goodness of its fitted curve is up to 0.997 50.

Key words: Atmospheric optics; Atmospheric turbulence; Laser transmission; Light intensity distribution; Light intensity fluctuation; Scintillation index; Probability density distribution
OCIS Codes: 010.3310; 010.1330; 010.1290; 010.1280

0 引言

激光信号在大气信道中传输时会受到空间损耗、大气衰减、大气湍流和背景辐射等因素的影响,尤其是

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61465007,61265003,61461026)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
收稿日期:2016-12-16;录用日期:2017-01-28

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

大气湍流的影响最为明显. 大气湍流会造成大气折射率的随机变化,导致激光波阵面畸变,引起光强起伏、光束飘移、光束扩展和光束抖动等现象[1]. 其中,光强起伏会导致接收信号的强度下降,误码率增加[2-3],而且随着闪烁指数的增加系统的误码率急剧增大. 当闪烁指数从 0.01 增加到 1 时,误码率由 10^{-12} 增加到 10^{-1}[4]. 文献[5]表明,在弱起伏下,如果系统误码率要达到 10^{-9} 的要求,则光强起伏应小于 0.67. 因此,研究光强起伏规律对设计和改善无线光通信系统的性能具有重要的作用. 然而,早期有关光强特性的研究主要集中在理论分析和数值模拟上[6-7],缺乏实测数据验证. 为此,美国陆军研究实验室采用外场实验(ARL)在 2.33 km 链路上研究了光强起伏规律,得到弱湍流下光强起伏服从对数正态分布,以及温度是影响大气折射率结构常数 C_n^2 的主要因素之一[8-9]. Kerry A. MUDGE 等人在 1.5 km 传输距离上测得闪烁指数的日变化规律,指出其与相位屏法所得结果一致[10].

近年来,我国有关光强起伏特性的实验研究已经陆续展开. 哈尔滨工业大学在 11.8 km 的水平链路上研究了光强起伏规律,分析了闪烁指数与大气折射率结构常数间的变化关系[11]. 中科院安徽光机所在合肥进行了 1 km 水平激光传输实验,研究了光束横截面上的光强起伏特性,验证了不同接收面积内相对光强起伏方差服从对数正态分布的规律[12]. 长春理工大学在 0.9 km 的传输实验中,分析了不同接收孔径下的孔径平滑效应,并指出 9 月份的大气折射率结构常数值比 12 月份高出两个数量级的结论[13]. 吴晓军等人在烟台开展了 1.4 km 和 0.9 km 的激光传输实验,得出公路环境下的湍流强度和光强起伏程度均大于近海面环境的结论[14]. 综上所述,我国对光强起伏特性的研究主要集中在东部地区,而有关黄土高原半干旱地区光强起伏特性的实验研究却较少.

黄土高原半干旱区是全球十分重要和独特的地理区域,分布范围广泛,处于半湿润和干旱气候的过渡带上. 由于该地区稳定边界层会受到大通量源区、低空急流、中尺度运动和沙尘暴等因素的影响,使得该地区的湍流较全国大部分地区更为复杂[15-16]. 文献[17]的研究结果表明,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,研究黄土高原半干旱地区大气环境对激光信号的影响具有十分重要的意义. 为此,本文采用实际实验的方法,研究了兰州地区不同天气条件下光斑的光强分布以及光强起伏特性.

1 实验系统及其方法

测量光强分布及其起伏特性的实验系统如图 1 所示,发射端使用波长为 650 nm 的半导体可调激光器,其最大功率为 200 mW. 激光器发出的激光通过聚焦透镜(焦距为 10 mm)扩束后,从孔径为 105 mm 的马卡式望远镜射出,经大气信道传输后的激光信号由漫反射屏接收. 为了得到光强的空间分布规律,接收端使用 MV-VD120SC 型工业 CCD 采集光斑图像,其分辨率为 1 280×960、帧速率为 15 fps. 同时,为了方便分析闪烁指数和光强的概率分布,得到光强起伏的时间统计特征,实验利用频谱响应范围为 430~1 000 nm、孔径大小为 10×10 mm、响应时间为 0.2 s 的 PD300 光功率计测量瞬时光强. 实验期间,利用北京鼎泰通达科技有限公司的综合环境检测仪记录实验期间的温度、相对湿度、气压、风速等常规气象参量.

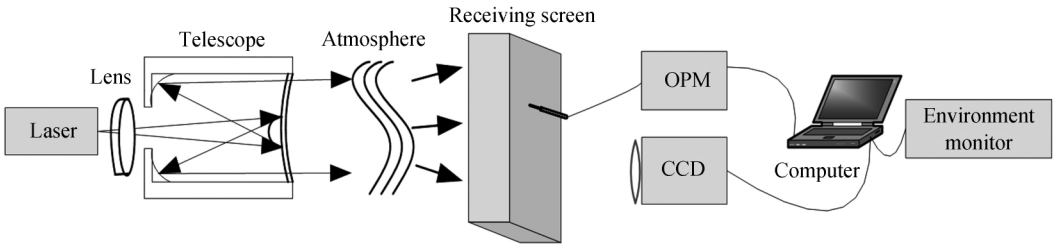


图 1 实验系统

Fig. 1 Experimental system

研究组于 2016 年 3 月~10 月期间晚上 21:00~22:30 时段,在甘肃省兰州市兰工坪区域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°46′21″、北纬 36°3′16″,接收端位于东经 103°46′27″、北纬 36°3′17″,链路长度为 610 m,链路距地面高度为 24 m.

实验包括两阶段,第一阶段主要研究不同天气条件下光斑光强空间分布特征. 为了得到光斑光强的空间

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

分布，该阶段实验未加装聚焦透镜和马卡式望远镜. 第二阶段主要研究不同天气条件下光强起伏的时间统计特征. 为了对比分析不同光斑直径对光强起伏的影响，该阶段前六次实验未加装聚焦透镜和马卡式望远镜，而后三次实验加装了聚焦透镜和马卡式望远镜. 加装聚焦透镜和马卡式望远镜前后接收端光斑直径分别为 100 cm 和 5 cm，采样频率分别为 1 Hz 和 15 Hz，每次实验样本值分别为 600 和 15 000 个. 实验时，首先进行发射端与接收端对准，使激光器出射功率保持定值 1 mW. 接收端使用工业 CCD 和光功率计分别接收光信号，并通过计算机对原始光斑图像和光功率值进行分析处理，得到光斑光强的空间分布以及光强起伏的时间统计特性.

2 不同天气条件下的光强分布

激光通过大气信道时，大气湍流会导致信号振幅和相位的严重起伏，使得光斑的光强空间结构发生变化，表现为光斑图像的忽明忽暗、畸变和弥散等. 由于本文采用的是半导体激光器，激光光束为高斯光束. 当激光在大气信道中传输时，根据文献[18]，在任意位置处光强分布为

$$I(r_1,d_1)=I_0\tau\frac{B}{G}\exp\left[-\frac{2B^2}{G^2}\frac{r_1^2}{w_d^2}\right] \tag{1}$$

式中，I_0 为高斯光束基模光强值，τ 为大气透射率，w_d 是 d 位置处束腰半径，r_1 为距光斑中心的水平距离. B 和 G 分别为

$$B=\frac{\pi}{\lambda(d_1-d)} \tag{2}$$

$$G=\sqrt{\frac{1}{w_d^4}+\frac{2}{w_d^2\rho_0^2}+\frac{\pi}{\lambda(d_1-d)^2}} \tag{3}$$

式中

$$\rho_0=(0.545C_n^2k^2d_1)^{-3/5} \tag{4}$$

式中，C_n^2 为大气折射率结构常数，$k=2\pi/\lambda$ 为空间波数，λ 为波长.

由以上可知，激光在大气中传播，其光斑的光强分布与大气湍流强度、大气透射率、传输距离、激光波长等有关. 当传输距离和波长一定时，湍流强度和大气透射率将决定光斑的光强分布.

为了获得不同天气条件下光斑光强空间分布的规律，分别在晴天、多云天、阴天开展了多次激光传输实验. 选取 5 次实验结果，其天气条件如表 1 所示，实验测得典型光斑图像如图 2 所示.

表 1 $T_1\sim T_5$ 实验的天气条件

Table 1 Weather condition for $T_1\sim T_5$

Trial	Date	Wind/(m·s^{-1})	Temp/℃	RH/%	AP/mbar	Weather
T_1	16.3.18	2	9.43	15.24	833.8	Cloudy day
T_2	16.5.23	1	16.87	51.56	834.2	Sunny day
T_3	16.5.31	2	25.73	38.65	831.3	Cloudy day
T_4	16.6.03	1	22.75	35.54	831.9	Sunny day
T_5	16.6.20	1	18.74	64.87	835.2	Overcast day

(a) T_1 (b) T_2 (c) T_3 (d) T_4 (e) T_5

图 2 $T_1\sim T_5$ 典型光斑图像

Fig. 2 Typical laser spot image for $T_1\sim T_5$

由图 2 可见，T_1 和 T_3、T_2 和 T_4 光斑光强的空间分布较为相似，而 T_1、T_2 和 T_5 的光斑图像相差较大，这就说明光强的空间分布随着天气条件的不同而发生变化. 同时，对比 T_1、T_2、T_3 和 T_4 所得光斑图像，可以

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

发现晴天下光斑第一旁瓣畸变与弥散程度大于多云天. 为了得到不同天气条件下光强空间分布的规律，对图2中光斑图像分别进行灰度图像转换，中值滤波，三维伪彩色变换，其结果如图3所示. 由图3可见，光斑光强主要集中于主瓣，旁瓣光强明显低于主瓣光强，而且主瓣光强分布均服从类高斯分布.

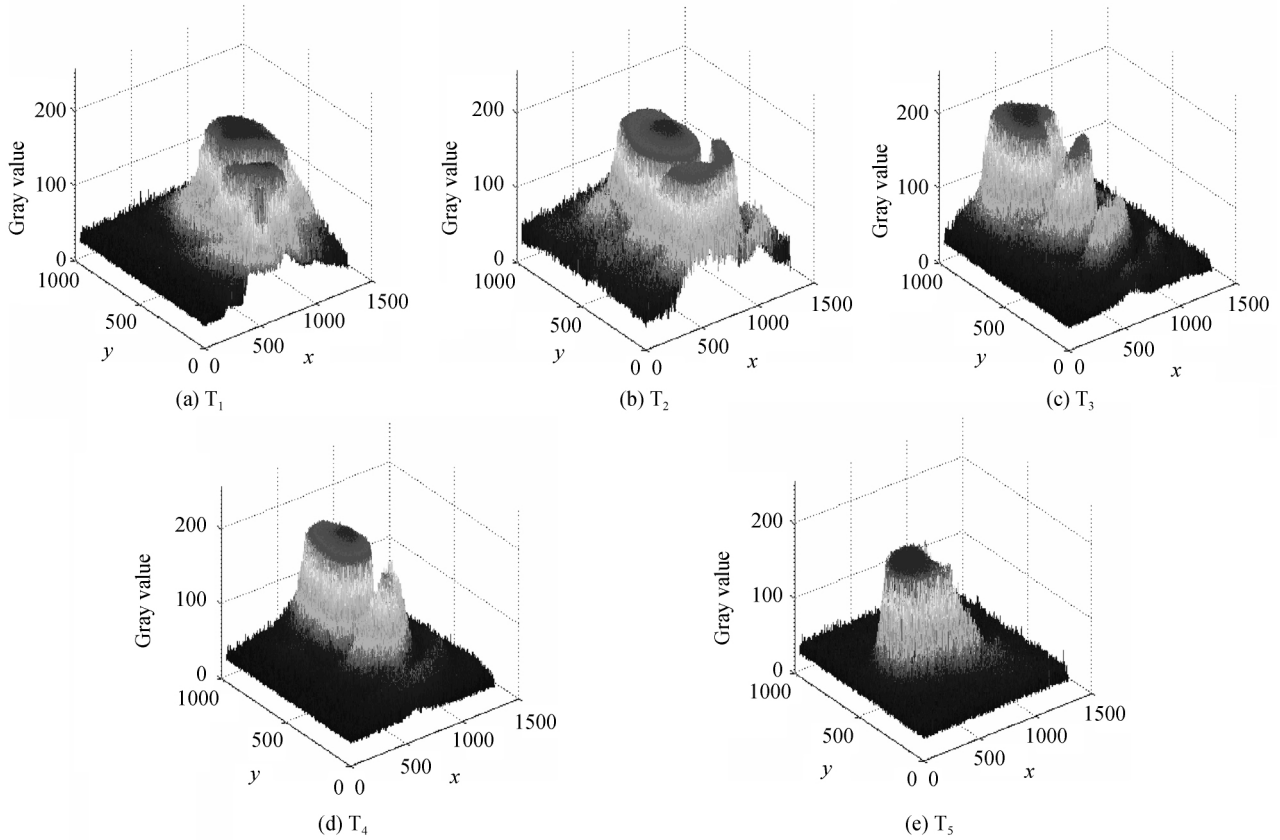


图3 $T_1 \sim T_5$ 典型光斑三维伪彩色图像

Fig. 3 Three-dimensional pseudo image of typical laser spot for $T_1 \sim T_5$

为了进一步分析晴天、多云天和阴天下光斑光强分布具体的差异，对三维伪彩色图像几何中心分别沿 x/y 轴投影可得到其光强二维分布，其结果如图4所示.

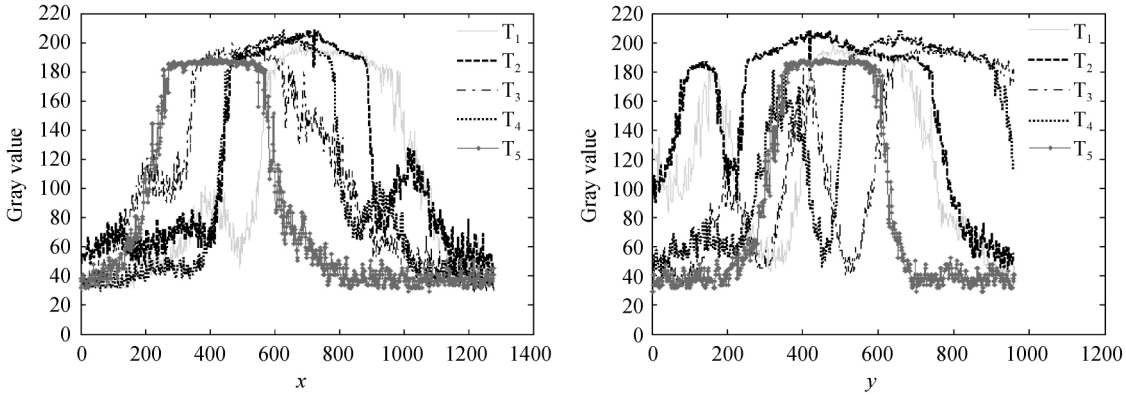


图4 $T_1 \sim T_5$ 典型光斑光强二维分布图像

Fig. 4 Two-dimensional distribution image of typical laser spot for $T_1 \sim T_5$

由图4可以看出，光强的空间分布具有随机起伏性. 在光斑主瓣几何中心位置附近，晴天所得光斑光强分布陡峭度最大，多云天次之，阴天最为平滑. T_2 和 T_4 主瓣光强值最大，T_1 和 T_3 的次之，T_5 的值最小，且它们对应的灰度最大值分别为210、201和192. 可见晴天下光强衰减最小，多云天次之，阴天下光强衰减最大. 这是因为光强衰减主要由大气吸收和散射所造成，阴天由于湿度较大，导致大气吸收和散射也增大，大气透射率减小，这使得阴天下的主瓣光强值最小.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3 不同天气条件下的光强起伏特性

光斑的光强分布虽然能较好地反应光强的空间变化规律，但它仅仅反映了光强在某一时刻的空间变化状态，没有反映光强随时间的变化规律. 为此，研究组采用光功率计测量了不同时间上的光强变化. 下面分别从闪烁指数及光强起伏的概率分布来分析兰州地区的光强统计特性.

3.1 闪烁指数

在实际中，光强的变化受到外界环境的影响，是一个随机变量. 为了得到光强随时间的起伏特性，需要研究光强在时间上的统计特征. 工程上，通常用闪烁指数来表征光强起伏，其表达式为[11]

$$\sigma_I^2=\frac{\langle I^2\rangle}{\langle I\rangle^2}-1 \tag{5}$$

式中，I 代表光强，$\langle\cdot\rangle$表示统计平均值. 在 Rytov 近似下，有 $\sigma_I^2\approx\sigma_l^2$，其中 σ_l^2 为 Rytov 方差，当 $\sigma_l^2<0.3$ 时，认为光强起伏属于弱起伏.

为了比较不同天气条件下光强起伏的变化特征，分别在晴天、雨后晴天、阴天开展了激光传输实验，其测试链路基本情况如表 2 所示. 为了消除背景光对实验结果的影响，首先从每组光强值减去背景光强值，再对光强值进行归一化处理，得到的归一化光强变化如图 5 所示.

表 2 $T_6\sim T_{14}$ 测试基本情况

Table 2 Characteristics and link conditions for the experiment $T_6\sim T_{14}$

Trial	Date	Wind/(m·s^{-1})	Temp/℃	RH/%	AP/mbar	Standard deviation	Scintillation index	Weather
T_6	16.6.12	1	21.28	43.94	830.9	1.512 1	0.003 8	Sunny day after rain
T_7	16.6.23	1	20.21	40.65	831.2	1.576 8	0.004 1	Sunny day after rain
T_8	16.6.20	2	18.73	64.52	835.0	1.652 5	0.004 6	Overcast day
T_9	16.6.24	1	22.62	52.45	842.7	1.427 6	0.003 4	Overcast day
T_{10}	16.6.14	2	20.81	31.08	835.2	1.673 4	0.004 7	Sunny day
T_{11}	16.7.1	1	25.07	36.54	830.9	2.431 9	0.009 9	Sunny day
T_{12}	16.9.27	1	17.07	65.78	846.2	53.267 1	0.189 2	Sunny day after rain
T_{13}	16.10.11	1	13.24	68.84	841.5	53.219 3	0.188 8	Overcast day
T_{14}	16.10.18	1	13.65	51.47	838.7	58.150 2	0.225 4	Sunny day

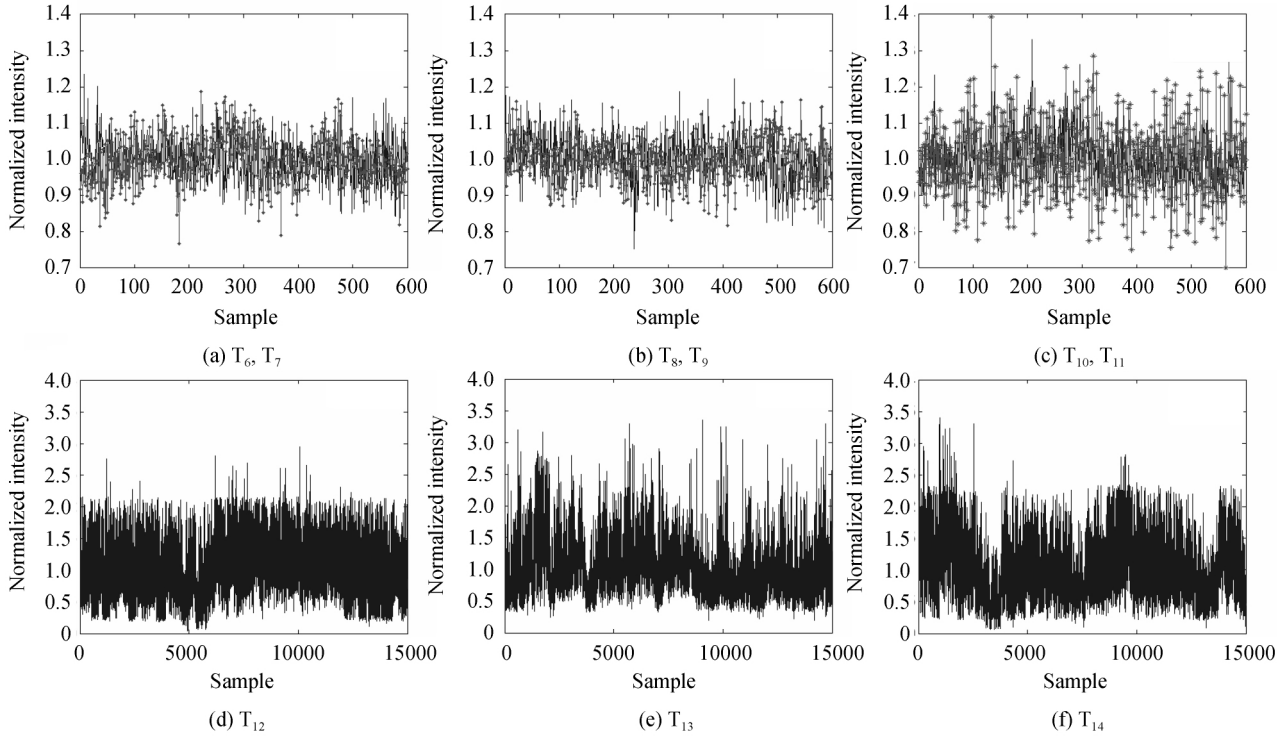


图 5 $T_6\sim T_{14}$ 归一化光强变化趋势图

Fig. 5 The changing curves of normalized optical intensity for $T_6\sim T_{14}$

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由图 5 可见，T_6～T_{11}和 T_{12}～T_{14}图中的归一化光强值分别在 0.7～1.4 和 0～3.5 范围内随机起伏，这就表明晴天下光强起伏程度大于阴天和雨后晴天的光强起伏程度. 为了更准确获得光强起伏偏离均值的程度，计算了每组样本的标准差和闪烁指数，其结果如表 2 所示. 由表 2 可见，在相同的光斑尺寸下，归一化光强的标准差和闪烁指数在阴天和雨后晴天下的数值基本相同，而在晴朗天气下的数值明显大于雨后晴天和阴天的值. 这就从量化角度进一步说明晴天下光强起伏程度较为剧烈，而雨后晴天和阴天下光强起伏较为平缓. 另外，由于 T6～T11 闪烁指数在 10^{-3}数量级，T_{12}～T_{14}闪烁指数在 10^{-1}数量级，故夜晚的光强分布均属于弱起伏.

3.2 光强起伏的概率分布

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，在弱起伏区，光强起伏的概率分布服从对数正态分布，其概率密度函数可表示为[2]

$$p_w(I)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_I^2}}\frac{1}{I}\exp\left[-\frac{(\ln I+\sigma_I^2/2)^2}{2\sigma_I^2}\right] \tag{6}$$

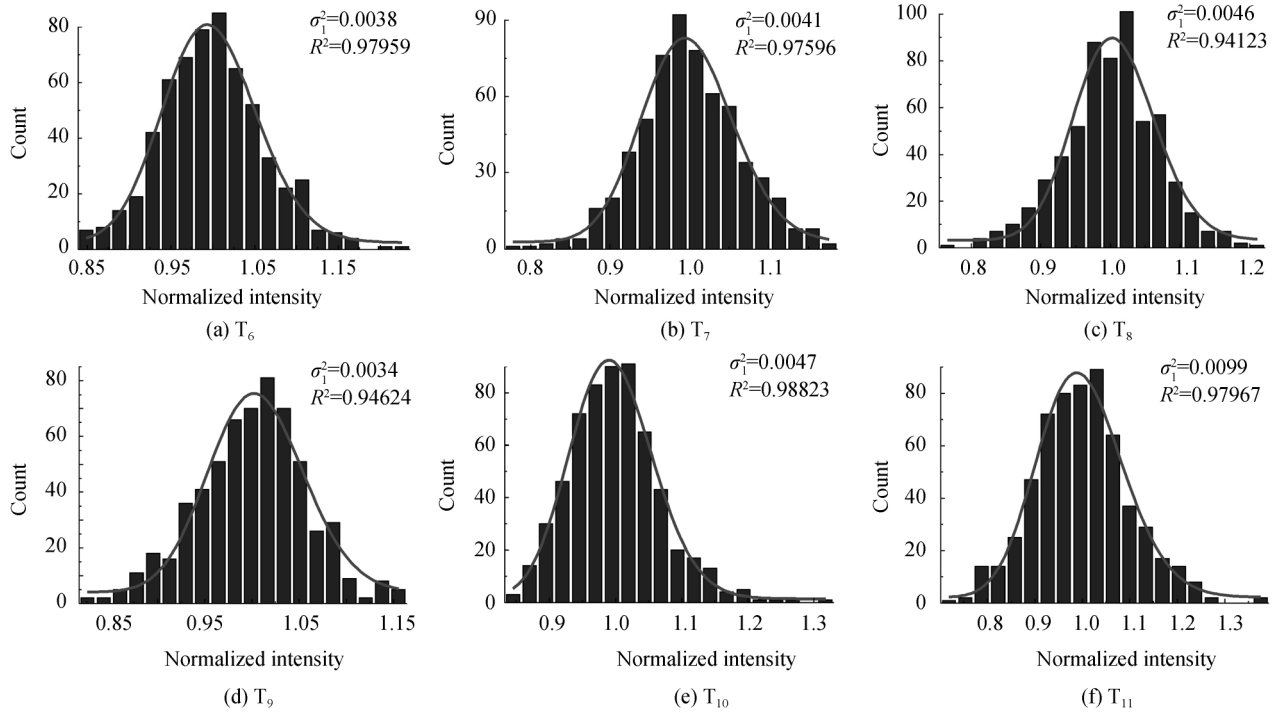
从弱起伏到强起伏条件下，光强起伏的概率分布服从 Gamma－Gamma 分布；在强起伏条件下，光强起伏的概率分布服从 K 分布；当通信链路长度达到几千米，在湍流的饱和区，光强起伏的概率分布服从负指数分布.

为了消除由发送功率误差所带来的影响，采用归一化光强的概率分布来研究光强分布特性. 为了得到归一化光强的概率分布，首先寻找每组归一化光强的最大值 $\max[I]$和最小值 $\min[I]$，并将区间$\{\max[I],\min[I]$等分为 n 份相等的区间. 然后选取 n 份区间的中位数组成一个光强序列 $I=\{I_1,I_2,I_3,\cdots,I_n\}$，同时统计每个光强值的频数并组成另一序列 $y=(y_1,y_2,y_3,\cdots,y_n)$. 最后，根据两个序列的取值得到其归一化光强的频数分布直方图，并通过曲线拟合得到第三个序列 $Y=(Y_1,Y_2,Y_3,\cdots,Y_n)$. 拟合过程中每个 I 的频数值 y 与拟合曲线的值 Y 相对应. 此时，定义 R 为[11]

$$R=\frac{\langle Y\cdot y\rangle-\langle Y\rangle\cdot\langle y\rangle}{\sqrt{D(Y)\cdot D(y)}} \tag{7}$$

式中，$D(Y)$和 $D(y)$分别为 Y 和 y 的方差. R^2 表示拟合优度，R^2 越接近 1 表示拟合结果越理想.

为了较为准确地得到光强起伏的概率分布，对图 5 中的光强数据进行了归一化处理并统计了频数，得到了归一化光强的频数统计直方图. 同时，对其进行了对数正态非线性拟合，其结果如图 6 所示. 其中，频数统计时 n 值分别取 20 和 25. 为了表示光强频数分布与对数正态分布的近似程度，以及分析拟合优度与闪烁指数之间的关系，每幅图都标明了拟合优度 R^2 和闪烁指数 σ_I^2.



(a) T_6 (b) T_7 (c) T_8 (d) T_9 (e) T_{10} (f) T_{11}

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

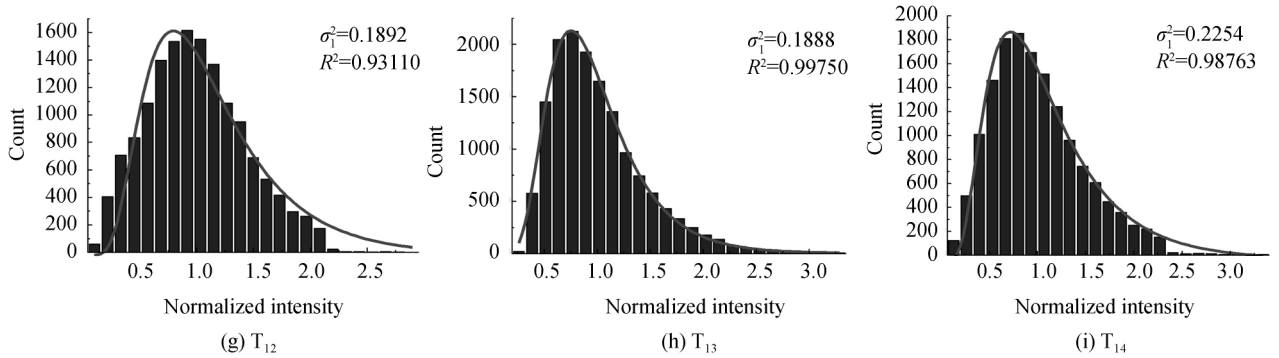


图 6　$T_6 \sim T_{14}$ 归一化光强频数分布直方图及其对数正态拟合

Fig. 6　Histograms of normalized light intensity and lognormal fitting curves for $T_6 \sim T_{14}$

从图 6 可以看出，不同天气条件下频数统计直方图的对数正态分布拟合优度都达到 0.931 1 以上，表明在弱起伏条件下，其光强值均服从典型的对数正态分布. 虽然每组实验所得光强值都服从典型的对数正态分布，但它们之间仍存在差异. 对比 $T_6 \sim T_{11}$ 可以发现：晴天下 R^2 最大，分别为 0.988 23 和 0.979 67；雨后晴天下 R^2 较小，分别为 0.979 59 和 0.975 96；阴天下 R^2 最小，分别为 0.941 23 和 0.946 24. 这就说明，在晴天下光强起伏的概率分布更加接近对数正态分布规律. 对比 $T_6 \sim T_{14}$，随着 σ_2^2 从 10^{-3} 增长到 10^{-1}，R^2 围绕均值 0.969 68 上下起伏. 这就表明，在弱起伏区，R^2 不依赖于 σ_2^2，光强概率分布均可用对数正态分布拟合.

4　结论

在兰州地区开展了无线激光传输实验，研究了不同天气条件下光斑光强分布以及光强起伏特性. 通过实验及其实验数据的分析处理，得到以下结论：

1）晴天下光斑的畸变与弥散程度较大，多云天和阴天下光斑畸变与弥散程度较小；在光斑几何中心位置附近，晴天下光斑光强分布陡峭度最大，多云天次之，阴天下最小；晴天下光强衰减最小，多云天次之，阴天下光强衰减最大；

2）晴天下光强起伏程度较大，雨后晴天和阴天光强起伏程度较小且起伏程度相近，由于实验在晚上展开且传输距离较近，所测得光强起伏均为弱起伏；不同天气条件下光强概率密度均服从对数正态分布，而且晴天下对数正态分布拟合优度值大于阴天和雨后晴天的拟合优度值.

本文利用实验测量结果给出了兰州地区不同天气条件下光斑光强的空间分布与光强起伏规律. 但是实验只在晴天、雨后晴天、多云天和阴天下的 21：00～22：30 时段开展，所得结论具有一定的局限性，还不足以完整地反映该地区激光信号的传输规律. 因此，即将开展全天候的激光传输实验，研究沙尘、雨、雪、云、雾、霾等典型天气下以及不同垫面下的光强分布及起伏特性，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]　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，2005：4－5.

[2]　WANG Hong－xing，SONG Bo，WU Xiao－jun，*et al*. Influence of pointing error on bit error rate of free space optics system at sea[J]. *Acta Optical Sinica*，2016，**36**(9)：0901001.
王红星，宋博，吴晓军，等. 指向误差对海上无线光通信误码率性能的影响分析[J]. 光学学报，2016，**36**(9)：0901001.

[3]　CHEN 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.

[4]　XING Jian－bing，XU Guo－liang，ZHANG Xu－ping，*et al*. Effect of the atmospheric turbulence on laser communication system[J]. *Acta Photonica Sinica*，2005，**34**(12)：1850－1852.
刑建斌，许国良，张旭苹，等. 大气湍流对激光通信系统的影响[J]. 光子学报，2005，**34**(12)：1850－1852.

[5]　LI Fei，WU Yi，HOU Zei－hong. Analysis and experimental research on bit error rate for free－space optical communication systems through turbulent atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*，2012，**32**(6)：20－25.
李菲，吴毅，候再红. 湍流大气光通信系统误码率分析与实验研究[J]. 光学学报，2012，**32**(6)：20－25.

[6]　ANDREWS L C，HABASH M A Al，HOPEN C Y，*et al*. Theory of optical scintillation：Gaussian－beam wave model [J]. *Waves in Random and Complex Media*，2001，**11**(3)：271－291.

[7]　XIE C W，MEI D C. Effects of correlated noises on the intensity fluctuation of asingle－mode laser system[J]. *Physics*

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Letters A, 2004, **323**(5): 421－426.

[8] ARNOLD T. Statistical analysis of optical turbulence intensity over a 2.33 *km* propagation path[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(7): 3619－3628.

[9] ARNOLD Tunick. Statistical analysis of measured free－space laser signal intensity over a 2.33 *km* optical path[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(21): 14115－14122.

[10] MUDGE K A, SILVA K K M B D, CLARE B A, *et al*. Scintillation index of the free space optical channel: Phase screen modelling and experimental results[C]. 2011 International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS). 2011: 403－409.

[11] JIANG Yi－jun, MA Jing, TAN Li－ying, *et al*. Measurement of optical intensity fluctuation over an 11.8 km turbulent path[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(10): 6963－6973.

[12] JING Xu, WU Yi, HOU Zei－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, **3**(11): 3111－3116.

[13] 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.

[14] WU Xiao－jun, WAND Hong－xing, SONG Bo, *et al*. Measurement of optical intensity fluctuation and study of transmission characteristics under different environment conditions[J]. *Journal o f 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.

[15] LIANG Jie－ning. Atmospheric boundary layer turbulence characteristics over complex terrain of semiarid region in the Loess Plateau[D]. 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]. **兰州大学**, 2014.

[16] CHENG Xiao－wei, LI Xue－bing, SUN Gang, *et al*. Observation and analysis of optical turbulence in Northwest plateau [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(s1): 157－162.
陈小威，李学彬，孙刚，等. 西北高原地区光学湍流的观测与分析[J]. **红外与激光工程**, 2016, **45**(s1): 157－162.

[17] 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 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]. **兰州大学**, 2011.

[18] DUAN J, WANG J, FU Q, *et al*. Estimation and display for far－field energy density distribution of laser spot[C]. International Conference on Optoelectronics and Microelectronics, 2012: 29－302.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 61465007, 61265003, 61461026), the Doctoral Foundation of LanZhou University of Technology(No. 14－0232)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net