

文章编号 1004-924X(2016)增-0330-08

大气光传输信道的闪烁与脉冲畸变测量研究

陈纯毅*, 倪小龙, 刘智, 杨华民, 任斌, 徐春风

(长春理工大学光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了分析大气对光信号传输的影响, 研究了有限孔径接收光功率闪烁和脉冲时域波形畸变测量方法, 建立了测量数据的数学分析模型。在相距 6.2 km 的两栋高楼之间开展激光传输测量实验, 用 CCD 传感器探测离焦的接收光斑图像, 用高带宽数字示波器记录接收脉冲时域波形。基于记录的光斑图像和脉冲波形数据, 分别分析不同尺寸的虚拟圆形孔径接收光功率闪烁概率密度分布和接收光脉冲时域波形畸变。结果表明: 用 Nakagami 分布描述较弱的接收光功率起伏比用对数正态分布更精确; 负指数分布可用于描述很强的接收光功率起伏; 当发射重复频率为 100 MHz 的矩形脉冲序列时, 发射脉冲时域波形频谱中大于或等于 0.48 GHz 的旁瓣峰传到接收端后基本上完全消失, 脉冲强度峰值出现在发射矩形脉冲的下降沿传输到接收端的时刻, 脉冲强度时间分布发生明显扩展。

关键词: 激光传输; 脉冲; 大气; 闪烁; 畸变

中图分类号: TN929.13 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0330

Research on scintillation and pulse distortion measurement of atmospheric optical transmission channel

CHEN Chun-yi*, NI Xiao-long, LIU Zhi, YANG Hua-min, REN Bin, XU Chun-feng

(Key Laboratory of Photoelectric Measurement & Control and Optical Information Transfer Technology, Changchun Univ. of Sci. and Tech., Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: chenchunyi@hotmail.com

Abstract: To analyze the influence of atmosphere on optical signal transmission, the methods of measuring scintillation in the optical power received by a finite aperture and temporal pulse-waveform distortion have been researched, and the mathematical model for analyzing the measurement data has been established. Between two tall buildings standing 6.2 km apart, the measurement experiment on laser transmission has been carried out; a CCD sensor is used to detect the received optical pattern images, which are defocused; a high bandwidth digital oscilloscope is used to record the temporal waveform of received pulses. Based on the recorded pattern images and pulse waveforms, the probability density distribution of the optical-power scintillation received by a virtual circular aperture and the temporal waveform distortion of received optical pulses have been analyzed, respectively. It is shown that: the Nakagami distribution is more accurate than the lognormal distribution for characterizing relatively weak fluctuations in the received optical power; the negative exponential distribution can be

收稿日期: 2016-05-10; 修订日期: 2016-06-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61007046, No. 61275080, No. 61475025); 教育部博士点专项基金资助项目(No. 20132216110002); 吉林省自然科学基金资助项目(No. 20150101016JC)

appropriately used to describe very strong fluctuations in the received optical power; for a rectangular pulse train transmitted at a repetition rate of 100 MHz, the side lobes in the frequency spectrum of the transmitted temporal pulse waveform with a frequency related to their peaks equal to or larger than 0.48 GHz almost completely disappear when the pulses arrive at the receiver end, and meanwhile obvious spreading of the temporal intensity distribution of a single pulse can be observed with the peak intensity occurring at the moment when the trailing edge of the transmitted pulse reaches the receiver end.

Key words: laser transmission; pulse; atmosphere; scintillation; distortion

1 引言

近地面大气绝大多数情况下都处于湍流运动状态。大气湍流介质的光学折射率扰动导致激光信号经其传播后出现闪烁现象(即光强随机起伏),会造成自由空间光通信系统性能的下降^[1-3]。另外,大气中包含各种不同尺度的散射粒子,对光信号传输产生多次散射作用。大气多次散射引起光信号的多径传输效应,对于脉冲光信号传输,多径传输导致脉冲强度时间波形发生畸变。这也是影响使用光脉冲作为载体传送信息的自由空间光通信系统性能的一个重要因素^[4]。开展大气光传输信道的闪烁和脉冲畸变特性测量研究,可为分析自由空间光通信系统所受的大气影响提供真实数据,具有重要意义。

目前,大多数理论研究文献都用闪烁指数(即归一化的光强起伏方差)来描述激光信号经大气湍流传输后的光强起伏强弱^[5-6]。实验研究也主要是测量闪烁指数^[7-8]。在光闪烁服从对数正态分布或者双伽马分布的假设条件下,可根据闪烁指数来计算光闪烁概率密度分布的控制参数值。然而,由概率统计理论可知,只要获得了光闪烁概率密度函数,就可以直接计算出光强起伏方差。光闪烁概率密度函数是比闪烁指数更加基础的物理量。因此,不同于已有的文献报道,本文开展的光闪烁测量工作主要研究和分析光闪烁概率密度分布。实际自由空间光通信系统使用有限孔径接收机来收集光信号,接收机通常不能当作理想的点接收器。对于非点接收情形,在分析大气湍流导致的接收光闪烁时可能需要考虑孔径平滑影响。所以本文将重点分析不同孔径平滑条件下的光闪烁概率密度分布。

已有的研究光脉冲经大气信道传输后的时域波形变化的文献基本上都是用理论方法来计算到

达探测器的脉冲强度时间波形^[4,9],关于野外大气导致的光脉冲强度时间波形变化的实验测量报道较少。本文在发射端通过对半导体激光器的输出光强进行调制来获得矩形光脉冲,在接收端用高带宽数字示波器对探测器输出的脉冲信号波形进行采样,从而获得接收光脉冲的波形数据,并据此分析大气传输引起的脉冲形状畸变。实际上,强度调制/直接检测自由空间光通信系统也采用上述方法产生通信光脉冲信号,本文的测量结果可以用于定量分析大气对自由空间光通信脉冲传输的影响。

2 光闪烁概率密度分布测量与分析

2.1 系统组成与测量原理

光闪烁测量系统如图 1 所示,半导体激光器输出波长为 808 nm 的连续光波,经多模光纤耦合进卡塞格伦望远镜并发射到大气信道中,传输到接收端的光波先被卡塞格伦望远镜接收和缩束,再经会聚透镜入射到 CCD 图像传感器上;CCD 图像传感器输出的图像通过高速采集卡被计算机采集并记录到磁盘文件中。从发射端卡塞格伦望远镜输出的光信号功率在 50 mW 量级。实验测量中使用的收发卡塞格伦望远镜具有相同的内外径尺寸,外孔直径为 20 cm,中心遮挡直径(内径)为 6.5 cm。接收端的会聚透镜焦长为 100 mm,借鉴文献[10]的方法进行可变孔径接收光功率闪烁分析,CCD 传感器未安装在透镜焦点位置(距离透镜为 76.5 mm),以便获得离焦光斑图像。CCD 传感器输出图像包含 512 pixel × 640 pixel,每个像素的物理尺寸为 28 μm × 28 μm,CCD 传感器的曝光时间设置为 10 μs,计算机的图像采集帧速率为 1 736 frame/s。测量系统发射端位于长春理工大学科技大厦 13 层,接收端位于长春市中山花园小区内的一栋高楼的 17 层,大

气信道传输距离约为 6.2 km。为了提高发射功率,图 1 所示系统用多模光纤把激光器输出信号耦合到卡塞格伦望远镜中,发射光为多空间模光束。

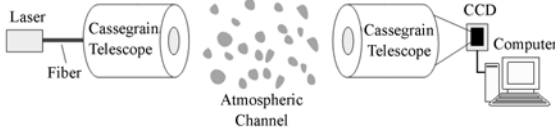


图 1 光闪烁测量系统组成

Fig. 1 Setup of optical scintillation measurement system

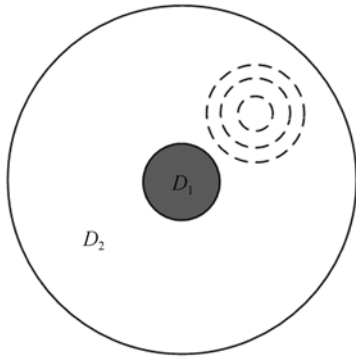


图 2 可变孔径尺寸接收光功率闪烁分析原理

Fig. 2 Principle of analyzing scintillations in the received optical power by apertures with varying sizes

由于测量系统的 CCD 传感器被安装在离焦位置处,所以其输出圆环状光斑图像,圆环中心部分是入射光被卡塞格伦望远镜的次镜遮挡而出现的暗区(没有光入射的区域)。该圆环状光斑图像可看作是卡塞格伦望远镜入瞳口径处的光斑的缩小版图像。受文献[10]的启发,本文在圆环状光斑图像中提取不同接收孔径尺寸条件下的闪烁数据,其基本原理如图 2 所示。图 2 中的圆形区域 D_1 表示被卡塞格伦望远镜的次镜遮挡而出现的暗区,圆环形区域 D_2 表示能接收到光信号的探测区域。在圆环形区域 D_2 中画出一系列大小不同的同心圆(图 2 中的虚线圆);每个同心圆 D_c 内的人射光可看作是源自于卡塞格伦望远镜入瞳口径的一个圆形区域 D_a 内的人射光;圆形区域 D_a 的直径为:

$$d_a \approx \frac{d_{\text{obs}} N_{\text{cir}}}{N_{\text{obs}}}, \quad (1)$$

式中: d_{obs} 为卡塞格伦望远镜的中心遮挡直径, N_{cir} 为被同心圆 D_c 的水平直径覆盖的像素数目, N_{obs} 为被圆形区域 D_1 的水平直径覆盖的像素数目。不同的同心圆 D_c 对应于不同的圆形区域 D_a 。如果把圆形区域 D_a 看作是一个虚拟圆形接收孔径,则其接收光功率为:

$$P_a = \frac{G_a}{R}, \quad (2)$$

式中: G_a 表示与圆形区域 D_a 对应的同心圆 D_c 所覆盖的全部像素的灰度值之和, R 为比例系数,用于描述 CCD 传感器的光电转换和量化操作,假设 R 为某一常数(在分析数据时,通过归一化处理可以消除对 R 的依赖)。根据上述方法,对每个同心圆 D_c ,都可以计算出其对应的虚拟圆形接收孔径的接收光功率。根据测量得到的一系列光斑图像数据,能获得不同虚拟圆形接收孔径的接收光功率采样值序列,利用统计方法可以分析接收光功率样本的统计分布。

2.2 测量结果分析

在理论研究中,对于理想的点接收情形,通常认为在弱湍流条件下,光强闪烁服从对数正态分布,在强湍流条件下,光强闪烁服从双伽马分布或负指数分布。随着接收孔径尺寸的增加,孔径平滑作用会使闪烁指数明显减小,接收光功率闪烁起伏的概率密度分布接近于对数正态分布。在自由空间光通信中可使用孔径平滑来抑制大气湍流导致的光闪烁。有效地利用孔径平滑后,能使接收光功率随机起伏趋向于服从对数正态分布,其可以表示为^[11]:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \frac{1}{x} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln(x) + \frac{1}{2}\sigma^2\right]^2\right\}, x > 0 \quad (3)$$

式中: σ 为对数正态分布的控制参数。在无线通信研究中,Nakagami 分布也经常被用来建模衰落信道^[12]:

$$p(x) = 2 \left(\frac{\mu}{\omega}\right)^\mu \frac{1}{\Gamma(\mu)} x^{2\mu-1} \exp\left[-\frac{\mu}{\omega} x^2\right], x > 0, \quad (4)$$

式中: μ 和 ω 为控制参数。

图 3~图 6 给出了不同接收孔径尺寸条件下的接收光功率起伏的频数分布直方图(使用平均接收光功率对接收光功率作了归一化处理),给定

接收光功率值的频数越大表明接收光功率取该值的概率越大,因此频数分布直方图直接反映了接收光功率概率密度分布情况。数据均是在天气晴朗的条件下测量的,对应的湍流比较弱。在图 3~图 6 中,分别给出了使用对数正态分布和 Nakagami 分布对频数分布直方图进行拟合的结果。

图 3 所示为接收孔径直径 d_a 为 1.8 cm 时的接收光功率起伏频数分布直方图;由图 3 可知,出现概率最高的接收光功率明显低于平均接收光功率,接收光功率闪烁指数 σ_r^2 为 0.246。图 4、图 5、图 6 所示为接收孔径直径 d_a 分别为 3.3 cm、4.9 cm、6.5 cm 时的接收光功率起伏频数分布直方图(接收光功率闪烁指数 σ_r^2 分别为 0.13、0.066、0.035);

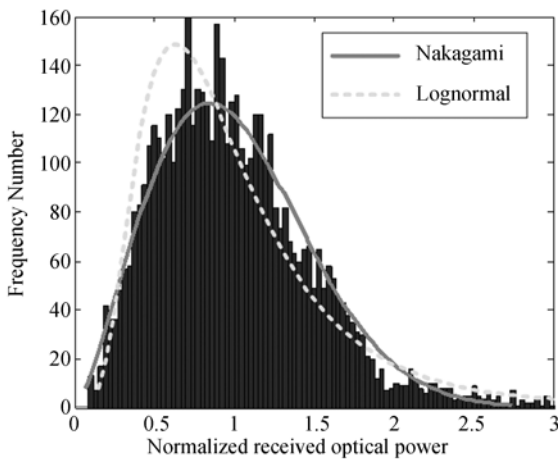


图 3 $d_a = 1.8$ cm 时的接收光功率频数分布直方图
Fig. 3 Histogram of received optical powers by an aperture with a diameter $d_a = 1.8$ cm

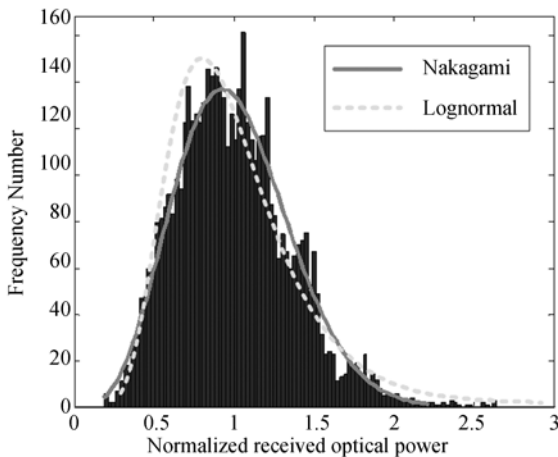


图 4 $d_a = 3.3$ cm 时的接收光功率频数分布直方图
Fig. 4 Histogram of received optical powers by an aperture with a diameter $d_a = 3.3$ cm

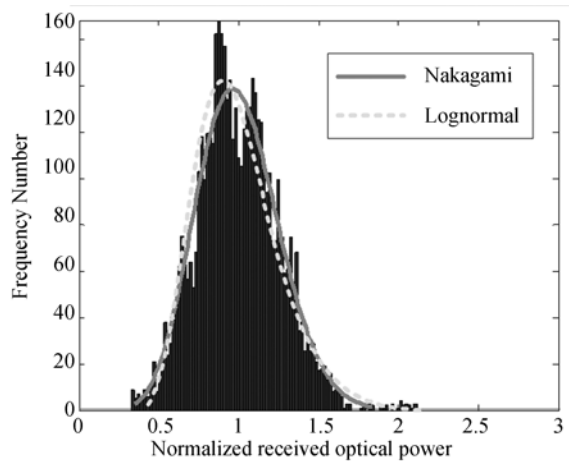


图 5 $d_a = 4.9$ cm 时的接收光功率频数分布直方图
Fig. 5 Histogram of received optical powers by an aperture with a diameter $d_a = 4.9$ cm

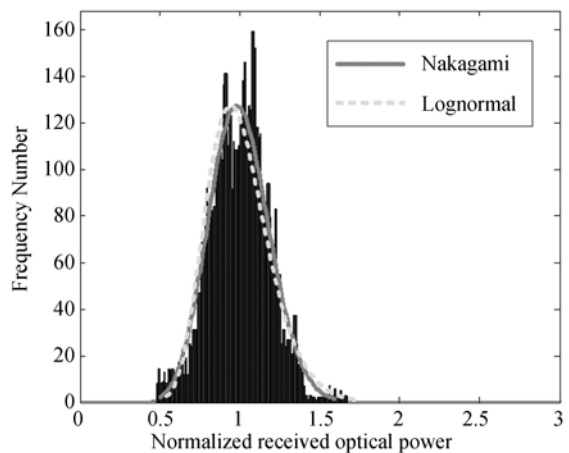


图 6 $d_a = 6.5$ cm 时的接收光功率频数分布直方图
Fig. 6 Histogram of received optical powers by an aperture with a diameter $d_a = 6.5$ cm

与图 3 进行对比可知,随着接收孔径尺寸的增加,出现概率最高的接收光功率逐渐接近平均接收光功率。

对比图 3~图 6 中的对数正态分布和 Nakagami 分布拟合结果可知,Nakagami 分布和测量数据概率统计结果的吻合度高于对数正态分布。接收光功率起伏越强,Nakagami 分布的这一优势越明显。当接收光功率起伏较弱时,Nakagami 分布和对数正态分布的拟合结果越来越接近。在对自由空间光通信系统的误码率和中断概率进行理论计算时,需要用到接收光功率起伏概率密度函

数;所用概率密度函数对接收光功率起伏统计分布特征描述的吻合度对计算结果准确性至关重要。分析图 3~图 6 的对数正态分布和 Nakagami 分布拟合结果可以发现,在接收光功率的深度衰落区(即归一化接收光功率远小于 1 的区域),利用对数正态分布模型估计出的接收光功率衰落概率会比用 Nakagami 分布模型估计出的结果低;这对利用对数正态分布模型计算得到的自由空间光通信系统的中断概率准确度会有明显影响。

图 7 和图 8 所示数据是在小雨且伴随 4 至 5 级西南风的条件下测得的,对应的湍流很强。图 7 所示为虚拟圆形孔径接收光功率起伏的统计分析结果(孔径直径为 4 cm),图 8 所示为卡塞格伦望远镜的总接收光功率的频数分布直方图。从图 7 可以看出,对于较小尺寸的接收孔径,接收光功率在统计上呈现明显的负指数分布特征,归一化接收光功率衰落到 0 附近的概率较大,此时的接收光功率闪烁指数 σ_r^2 为 1.025。从图 8 可以发现,卡塞格伦望远镜的总接收光功率的起伏受孔径平滑的影响明显减小,此时最大频数对应的归一化接收光功率更接近 1,图 8 所示数据的闪烁指数 σ_r^2 为 0.274。类似于对图 3~图 6 的分析,对比图 8 中的 Nakagami 分布拟合曲线和对数正态分布拟合曲线可以发现,Nakagami 分布与测量数据吻合良好。需要指出的是,在实际自由空间光通信系统中,为了提高发射功率,可用多模光纤

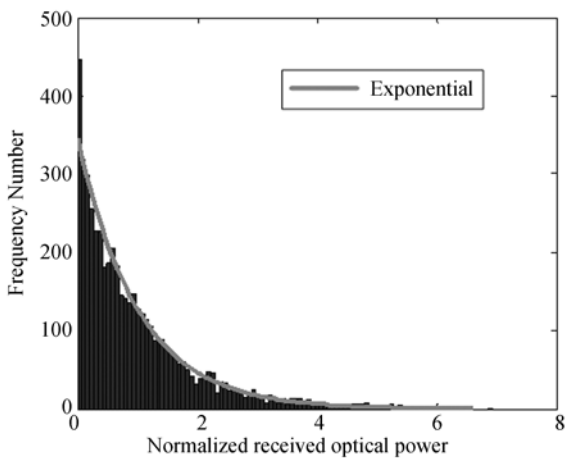


图 7 $d_a = 4$ cm 时的接收光功率频数分布直方图

Fig. 7 Histogram of received optical powers by an aperture with a diameter $d_a = 4$ cm

实现激光器与发射光学系统之间的耦合;本文测量结果对分析自由空间光通信系统所受的大气湍流影响具有参考价值。

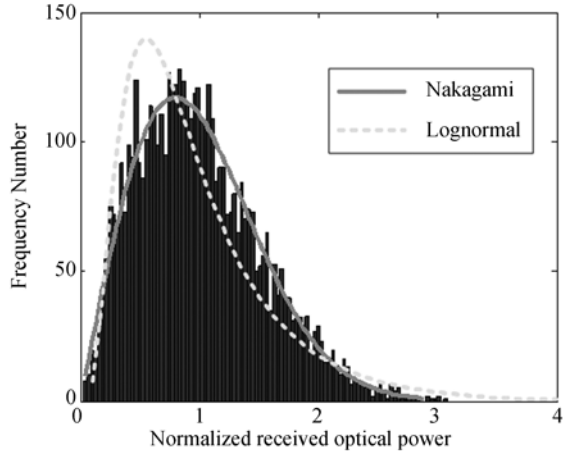


图 8 总接收光功率频数分布直方图

Fig. 8 Histogram of total received optical powers

3 激光脉冲形状畸变测量与分析

3.1 系统组成与测量原理

激光脉冲经大气传输后的脉冲畸变测量系统如图 9 所示,矩形脉冲发生器生成矩形脉冲电信号,用于对半导体激光器的光强进行调制,使得激光器最终输出矩形光脉冲信号(中心波长为 808 nm);光脉冲经多模光纤耦合进卡塞格伦望远镜并发射到大气信道中;到达接收端的脉冲光波被卡塞格伦望远镜接收和缩束,再经会聚透镜入射到 PIN 探测器上;PIN 探测器的输出信号连接到具有存储功能的 2.5 GHz 安捷伦高速采样示波器上。脉冲畸变测量系统的激光器输出峰值功率、卡塞格伦望远镜的内外径参数与光闪烁测量系统的激光器输出功率、卡塞格伦望远镜的内外径参数相同。发射脉冲序列的重复频率为 100 MHz,如图 10 所示;示波器的采样频率为 1 GHz。

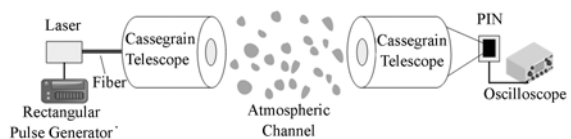


图 9 光脉冲畸变测量系统组成

Fig. 9 Setup of optical-pulse distortion measurement system

与光闪烁测量相同,脉冲畸变测量系统的发射端位于长春理工大学科技大厦 13 层,脉冲畸变测量系统的接收端位于长春市中山花园小区内的一栋高楼的 17 层。



图 10 周期性重复矩形脉冲序列

Fig. 10 Periodically repeated rectangular pulse train

由线性系统理论可知,发射光脉冲强度的时间波形函数、信道的单位脉冲时间冲激响应函数和接收光脉冲强度的时间波形函数可以表示为:

$$C_w \omega(t) \otimes h(t) = C_s s(t), \quad (5)$$

式中: \otimes 表示卷积, C_w 为发射光脉冲强度时间波形函数的峰值, $\omega(t)$ 为归一化的发射光脉冲强度时间波形函数(用 C_w 作归一化处理), $h(t)$ 为信道的单位脉冲时间冲激响应函数, C_s 为接收光脉冲强度时间波形函数的峰值, $s(t)$ 为归一化的接收光脉冲强度时间波形函数(用 C_s 作归一化处理)。根据式(5),可以求得 $h(t)$ 的傅里叶变换为:

$$F[h(t)] = \tilde{h}(f) = \frac{C_s \tilde{s}(f)}{C_w \tilde{\omega}(f)}, \quad (6)$$

式中, F 表示求傅里叶变换, $\tilde{s}(f) = F[s(t)]$, $\tilde{\omega}(f) = F[\omega(t)]$ 。大气信道的单位脉冲时间冲激响应函数可以写为:

$$h(t) = \frac{C_s}{C_w} F^{-1} \left[\frac{\tilde{s}(f)}{\tilde{\omega}(f)} \right], \quad (7)$$

式中: F^{-1} 表示求逆傅里叶变换。

3.2 测量结果分析

受探测器噪声和大气信道随机性的影响,测量得到的不同接收光脉冲的时域波形有所不同。本节主要分析大气信道对激光脉冲传输的平均影响。通过对大量接收光脉冲的波形样本求平均,得到接收光脉冲强度的平均波形,如图 11 所示。图 11 是对 4 099 932 个接收光脉冲强度波形样本求平均后的结果,测量时天气晴朗、气象稳定,其中 $t_p = L/c$ 为光波从发射端传播到接收端的时间, L 表示从发射端到接收端的距离, c 表示光速;图 11 中的空心圆圈表示测量的平均波形采样

数据,实线表示利用样条平滑拟合方法得到的拟合曲线。由图 11 可以发现,矩形激光脉冲经大气信道传输到接收端后,接收光脉冲的强度在 $[0, \tau]$ 的时间段内不断上升,然后再逐渐下降,其中 τ 等于矩形脉冲的脉宽(光脉冲脉宽 τ 为 5 ns,为脉冲重复周期的一半)。接收光脉冲强度的峰值大体上出现在 $t_p + 5$ ns 时刻,对应于矩形脉冲下降沿传到接收端的时刻。

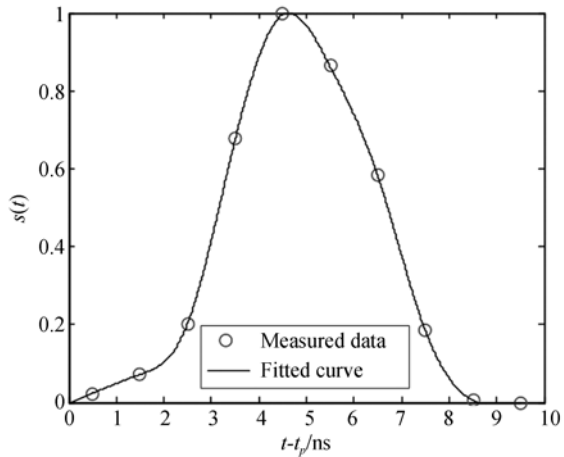


图 11 接收光脉冲强度的平均时间波形

Fig. 11 Average temporal waveform of received optical pulses

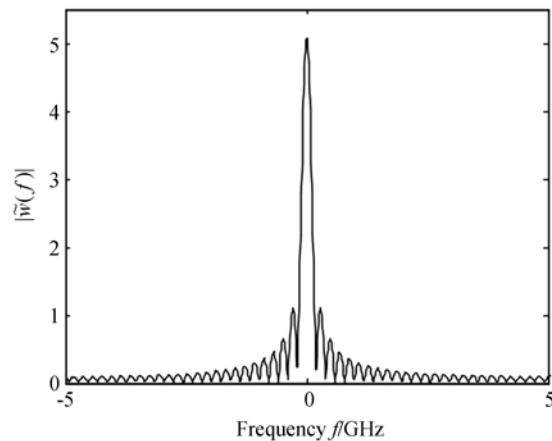


图 12 发射矩形光脉冲强度时间波形的频谱

Fig. 12 Frequency spectrum corresponding to the temporal waveform of a transmitted rectangular optical pulse

理论上,利用式(7)可以根据测量结果估计出大气信道的单位脉冲时间冲激响应函数。然而通过对测量数据的深入分析发现,测量误差会导致

冲激响应函数估计结果出现较大的偏差。因此,本节只分析与发射光脉冲强度时间波形的频谱变化。图 12 所示为测量实验中发射的矩形光脉冲强度时间波形对应的频谱,可以发现频谱中存在许多旁瓣。图 13 所示为测量得到的接收光脉冲强度的平均时间波形对应的频谱。图 13 中的频谱是根据图 11 中的拟合曲线用傅里叶变换算法计算得到的结果。

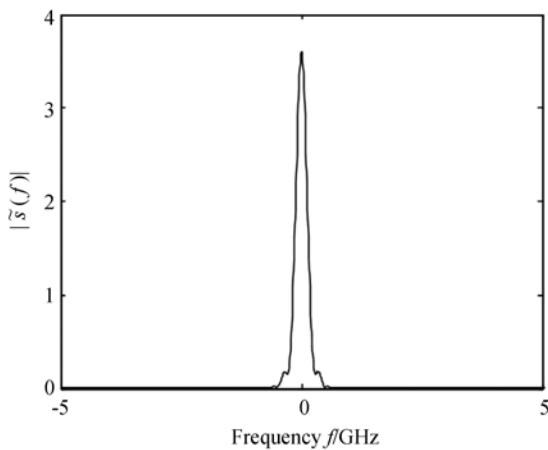


图 13 接收光脉冲强度平均时间波形的频谱

Fig. 13 Frequency spectrum for the average temporal waveform of received optical pulses

对比图 12 和 13 可以发现,大气信道对光脉冲时域波形产生低通滤波作用,经大气信道传输后,发射光脉冲时域波形中的高频分量受到明显的衰减;对于发送重复频率为 100 MHz 的矩形光脉冲序列的情形,发射脉冲时域波形频谱中大于或等于 0.48 GHz 的所有旁瓣峰在接收光脉冲时域波形频谱中基本消失。这就是图 11 中的接收光脉冲强度的平均时间波形看起来和矩形脉冲波形相差较大的主要原因。从图 11 可以看出,经大气信道传输后,光脉冲强度的时间分布发生了明显的扩展。对于自由空间光通信系统而言,经时

钟同步后,可以检测出接收光脉冲强度的峰值位置。如果以接收光脉冲强度的峰值位置作为脉冲时隙中心,可以发现脉冲能量明显扩展到与该脉冲时隙相邻的其他时隙中。脉冲时间扩展是造成码间串扰的主要原因,利用本文测量方法可以定量分析码间串扰的强弱。最后需要指出的是:在计算图 13 所示的结果时,先根据图 11 所示的拟合曲线来生成时间波形的采样点序列,然后用离散傅里叶变换计算对应的频谱形状,这可以部分消除示波器采样带宽受限带来的问题。

4 结 论

本文针对受大气影响的自由空间光通信应用,设计出可变孔径接收光功率闪烁概率密度分布和光脉冲强度时间波形畸变测量方法,并论述了相应的测量原理。在相距 6.2 km 的两栋高楼之间开展了野外激光传输测量实验,利用 CCD 传感器记录接收光斑闪烁图像,使用高带宽数字示波器记录接收光脉冲强度时间波形采样数据。测量结果表明:在气象平稳的良好天气条件下,不同尺寸的虚拟圆形孔径的接收光功率起伏都不是非常强,用 Nakagami 分布描述其统计特性比用常见的对数正态分布更精确;在 4~5 级风伴随小雨的天气条件下,大气湍流导致的光闪烁非常强,直径为 4 cm 的虚拟圆形孔径的接收光功率起伏概率密度分布呈现出明显的负指数分布特征,然而内外径分别为 6.5 cm 和 20 cm 的卡塞格伦望远镜的总接收光功率起伏则可用 Nakagami 分布很好地描述;重复频率为 100 MHz 的矩形脉冲序列经大气信道传输后,发射脉冲时域波形频谱中大于或等于 0.48 GHz 的旁瓣峰传输到接收端后基本上完全消失,脉冲时域波形峰值出现在发射矩形脉冲的下降沿传输到接收端的时刻,脉冲强度时间分布发生明显扩展。

参考文献:

[1] 高世杰,盛磊,吴志勇,等. 大气激光通信光斑图像的快速复原与实时检测[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2393-2399.

GAO SH J, SHENG L, WU ZH Y, *et al.*. Rapid restoration and real-time detection on spot image of atmospheric laser communication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8): 2393-2399. (in Chinese)

[2] 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.
- LIU CH, CHEN SH Q, LIAO ZH, *et al.*. Correction of atmospheric turbulence by adaptive optics in waveband of free-space coherent laser communication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(10): 2605-2610. (in Chinese)
- [3] 王俊波, 盛明, 谢秀秀, 等. 强湍流下并行中继自由空间光通信的中断分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 745-751.
- WANG J B, SHENG M, XIE X X, *et al.*. Outage analysis for parallel relay free-space optical communication in strong turbulence [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 745-751. (in Chinese)
- [4] HAJJARIANZ, KAVEHRAD M, FADLULLAH J. Analysis of wireless optical communications feasibility in presence of clouds using Markov Chains [J]. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 2009, 27(9): 1526-1534.
- [5] BAYKAL Y, EYYUBOGLU H T, CIL C Z, *et al.*. Intensity fluctuations of partially coherent cos Gaussian and cosh Gaussian beams in atmospheric turbulence [J]. *Journal of Optics*, 2011, 13: 055709.
- [6] AKSENOV V P, KOLOSOV V V. Scintillations of optical vortex in randomly inhomogeneous medium [J]. *Photonics Research*, 2015, 3(2): 44-47.
- [7] 王佳斌, 刘永欣, 蒲继雄. 激光在湍流大气中传输的闪烁系数及其测量[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(4): 915-918.
- WANG J B, LIU Y X, PU J X. Measuring scintillation index of laser beams propagating in turbulent atmosphere [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(4): 915-918. (In Chinese)
- [8] CHEN Z, CUI S, ZHANG L, *et al.*. Measuring the intensity fluctuation of partially coherent radially polarized beams in atmospheric turbulence [J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 18278-18283.
- [9] 张玉发, 孙晓泉. 超短脉冲大气传输展宽及脉冲波形分析[J]. 半导体光电, 2015, 36(2): 267-270.
- ZHANG Y F, SUN X Q. Analysis of ultrashort pulse waveform and broadening caused by atmospheric turbulence and dispersion [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2015, 36(2): 267-270. (In Chinese)
- [10] YUKSEL H, DAVIS C C. Aperture averaging for studies of atmospheric turbulence and optimization of free space optical communication links [C]. *Proc. of SPIE*, 2005, 5892, 58920P.
- [11] 陈豫, 范承玉, 沈红, 等. 对数正态分布下的无线光通信系统误码率分析[J]. 量子电子学报, 2013, 30(2): 243-249.
- CHEN Y, FAN CH Y, SHEN H, *et al.*. Analysis on bit error rate of wireless optical communication system under lognormal distribution [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2013, 30(2): 243-249. (In Chinese)
- [12] PROAKIS J G, SALEHI M. *Digital Communications* [M]. McGraw-Hill, 2008.

作者简介:



陈纯毅(1981—),男,重庆人,教授,2009年于长春理工大学获得博士学位,主要从事大气信道激光通信、复杂系统建模及计算机仿真方面的研究。E-mail: chenchunyi@hotmail.com



倪小龙(1988—),男,吉林人,2016年于长春理工大学获得博士学位,主要从事大气光学、液晶光调制方面的研究。E-mail: nixiaolong@gmail.com