

空间光通信中高斯光束传输 闪烁指数测量系统

王佳斌¹, 陈子阳², 蒲继雄²

(1. 华侨大学 工学院, 福建 泉州 362021;
2. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 基于 ARM9 嵌入式 MCU 设计并制作了闪烁参数测量系统,利用该系统对激光在实际湍流中的闪烁指数进行实验测量. 在实际测量中,证明该系统能实时地测量激光在湍流大气中传输的闪烁指数. 实验结果表明:当高斯光束在湍流大气中的传输距离越大,其闪烁指数越大;在相同位置处,高斯光束的闪烁指数随着湍流强度的增加而增大.

关键词: 高斯光束; 闪烁指数; 激光; 湍流大气; 嵌入式

中图分类号: O 439 **文献标志码:** A

由于激光光束在光通信和遥感探测等众多领域中的应用,其在大气湍流中的传输特性一直是一个重要的研究内容^[1]. 与理想的自由空间不同,大气湍流中存在不同类型的散射介质,这些介质使在其中传输的激光光束的光强出现了涨落,即闪烁现象. 光束的光强出现涨落会影响基于光强进行信息编码的光通信的应用. 因此,研究光束在大气湍流中的闪烁指数,具有非常重要的意义^[2-13]. 学者对高斯光束^[14]、平顶高斯光束^[15]、高阶高斯贝塞尔光束^[16]、随机电磁光束^[17]等各种类型光束经过不同强度湍流的闪烁特性,进行深入地研究. 通过合理地调制光束的特性,减小光束的闪烁指数. 对光束的偏振状态的调控,可以有效地减小光束的闪烁指数^[18]. 研究表明,部分相干光束具有比完全相干光束更小的闪烁,例如,降低准部分相干高斯-谢尔模型光束的相干度可以降低光束的闪烁大小^[19-20]. 此外,利用多光束进行组束,获得阵列光斑,并合理地调节各光束之间的相对位置,也可以有效地降低光束的闪烁^[21]. 然而,目前关于光束在大气湍流中的闪烁的研究,大多局限于理论方面的研究或仿真计算,使用真实测量系统采集数据进行研究的很少. 本文基于 ARM9 嵌入式系统及数据的网络传输技术,设计并构建了闪烁参数测量系统,利用该系统对高斯光束在 400 m 实际湍流大气中的光强和闪烁指数进行实验测量^[22].

1 闪烁参数测量系统的设计与实现

由于没有湍流大气影响光强及闪烁指数的测量仪器,文中基于 ARM9 嵌入式系统设计并制作了闪烁测量系统. 测量系统结构^[23-24],如图 1 所示.

测量系统主要包括光电传感器模块、数据采集模块、数据分析处理及传输模块和客户端软件^[25]. 数据传输采用 TCP/IP 协议,因此,该系统可以方便地

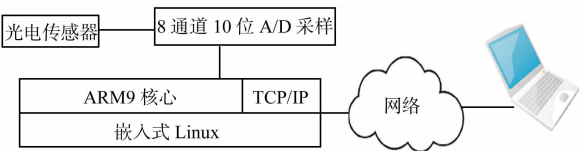


图 1 闪烁参数测量仪系统结构

Fig. 1 Block of scintillation index measuring system

扩展为远程测量系统. 其中, 采用了一套基于 ARM9 核心的嵌入式系统, 用以协调各模块之间的工作.

1.1 光电传感器

系统光电传感器采用了连续型激光器发射接收模块,其结构框图,如图 2 所示。

光电探测器负责激光信号的接收、检波、放大,并对该信号进行解调解码的输出.接收探测器采用了优质器件及优化过的电路结构以确保灵敏度高,响应速度快,线性度好.该探测器的输出信号有两种工作模式:一种是开关量信号,用以表明是否收到相应波段的激光信号;另外一种可以将接收到的激光信号强度转换为电压信号,供后续处理使用.本测量系统采用了后一种工作模式.

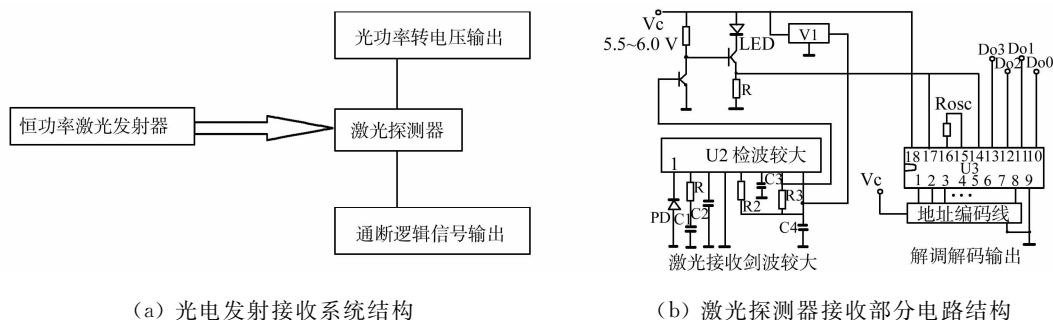


图 2 光电传感器结构框图

Fig. 2 Block of photosensor structure

1.2 数据采集和传输系统

为了使系统可以有效地处理经大气湍流影响后的相应波段激光信号,系统采用以 ARM9 为核心的 S3C2440 芯片组成数据集及处理系统.该芯片是基于 32 位高性能 RISC 指令集的嵌入式 CPU,工作频率为 400 MHz,4 路高速 DMA 通道,8 通道 10 位高精度 A/D 转换器,精度可满足本系统要求.为确保数据采集后的运算处理及实时传输,配置了 64 M 内存及 256 M 的 Nandflash.

系统移植了嵌入式 Linux 操作系统,作为协调整个系统的数据采集工作及数据传输操作的控制模块^[26].通过进程间通信的方法向 A/D 转换器发送命令,在 A/D 转换器转换结束后,向系统发信息以通知系统进行数据的采集及存储;随后,在系统端对采集的数据进行初步处理及计算;再向网络模块发送数据传输的命令,使数据可以通过 TCP/IP 协议在普通网络中传输;最终,传送到客户端软件.

为了减轻客户端软件的数据处理和数据传输压力,系统采用分布式计算方式设计,采集到的数据在嵌入式端做初步的处理后再进行传输.

1.3 网络传输

系统在嵌入式设备端进行了数据采集及初步处理后,就可以将数据发送到客户端软件做进一步的运算和处理.测量系统通常采用 RS-232 或 485 等常用现场总线作为传输介质.系统采用遵循 TCP/IP 协议网络接口进行数据传输.通信硬件是 10 M/100 M 的 DM9000 网络芯片,其通信带宽完全可以满足系统对数据传输的实时性要求.为保障通信的实时性,采用 TCP/IP 协议簇中的 UDP 协议完成数据传输任务.UDP 协议是一种面向无连接的网络通信协议,它的特点是通信无需事先建立连接、传输速度快、可满足实时通信要求.

网络传输模块的加入,使本系统摆脱了传统的并口或串口等接口束缚,使数据传输可在 100 M 的网络带宽中进行,大大提高了数据传输的速度,提高了系统的实时性;同时,使得系统可以方便地接入互联网,实现远程测量.

1.4 用户操作界面

作为用户界面 PC 端的客户端软件,采用基于可视化编程的 Delphi 语言编写.该程序既是数据的汇聚中心,也是数据处理最终的展示窗口.以图表的方式展示经过算法处理的接收到的数据,并可进行相关的数据运算,数据统计等工作.为了适应不同强度激光信号的测量,图表坐标的设计采用动态可调节的方式,输出波形可以展示出令人满意的幅度.客户端软件通过网络接收嵌入式系统组成的数据采集处理端传来的数据.也可以通过互联网对测量仪器进行远程的数据读取及操作.如果系统位于无线局域网,还可实现无线的测量,该模式奠定了测量方式的物联网化基础.

2 实验测量

测量高斯光束在实际湍流大气中闪烁指数的实验装置,如图 3 所示.以波长为 632.8 nm 的氦氖光束为入射光,经过一个由焦距分别为 5,30 cm 的两个透镜组成的扩束系统扩束后,将其入射到实际湍流大气中.由于大气中各种散射介质的存在,使光束在其中传输时,光强出现了涨落,利用闪烁仪对光束的闪烁指数进行实验测量.闪烁仪包括一个光电探测器,所获得的信号经过计算得到光强的闪烁指数.闪烁仪的接收孔径大约为 5 cm,因此,实验上所测量的是一个面范围内的闪烁指数.

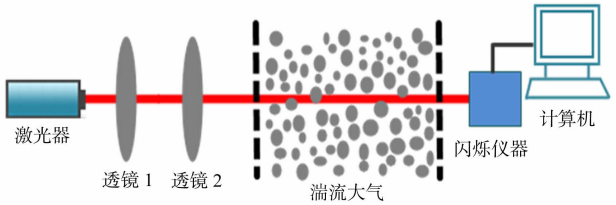


图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental installation

根据 Rytov 理论,高斯光束在 Kolmogorov 大气湍流中的闪烁指数可以表示为^[1]

$$\sigma_I^2(r,z) = 4.42\sigma_R^2\Lambda^{5/6}\frac{r^2}{w^2} + 3.86\sigma_R^2\{0.40[(1+2\Theta)^2+4\Lambda^2]^{5/12}\times \cos[\frac{5}{6}\tan^{-1}(\frac{1+2\Theta}{2\Lambda})] - \frac{11}{16}\Lambda^{5/6}\}.$$

(1)

式(1)中: r 为径向距离; z 为传输距离; $\sigma_R^2 = 1.23C_n^2k^{7/6}z^{11/6}$ 为平面波的 Rytov 方差; $\Theta = \frac{\Theta_0}{\Theta_0^2 + \Lambda_0^2}$, $\Lambda = \frac{\Lambda_0}{\Theta_0^2 + \Lambda_0^2}$, $\Theta_0 = 1 - \frac{z}{R_0}$, $\Lambda_0 = \frac{2z}{kw_0^2}$, 其中, R_0 和 w_0 为入射高斯光束的曲率半径以及光斑大小, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为入射光波长, k 为波数.

根据式(1)可以对高斯光束在大气湍流中的闪烁进行数值模拟.相关的数值模拟结果表明^[1]:高斯光束轴上点光强在湍流大气中的闪烁指数随着传输距离的增加而增大,并且随着径向距离的增加而增大;在相同距离处,高斯光束的闪烁指数随着湍流强度的增加而变大.

利用闪烁仪器对高斯光束在实际湍流大气中的闪烁指数进行测量.由于实验条件的限制,只测量了在大气中传输距离为 400 m 的闪烁指数.将探测器放置在光轴上,探测轴上一个小区域的闪烁指数.3 个不同时间所测量的闪烁指数,如图 4 所示.图 4 中:实线、虚线和点线所对应的曲线的湍流强度依次增加.由图 4 可知:当传输距离为 100 m 时,3 种不同湍流条件下的闪烁指数都很小;随着传输距离的增加,闪烁指数逐渐变大;在较强湍流的情况下,闪烁指数增加得更快;在相同距离处,不同强度的湍流造成光强涨落有较大的区别;高斯光束在较强湍流中的闪烁指数比较弱湍流中的更大.

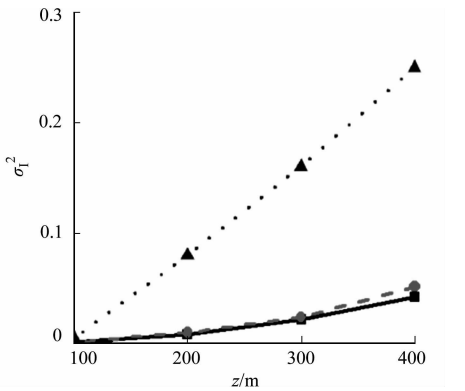


图 4 高斯光束在湍流大气中传输轴上的闪烁指数

Fig. 4 Scintillation index of Gaussian beam on the axis of the propagation in atmosphere

除了轴上的闪烁指数,还研究了固定距离处,闪烁指数随着径向距离(即探测器的中心与光轴之间的距离)的变化情况,如图 5,6 所示.图 5,6 中: σ_I^2 为闪烁指数; r 为径向距离.图 5 的实验结果与图 4 的

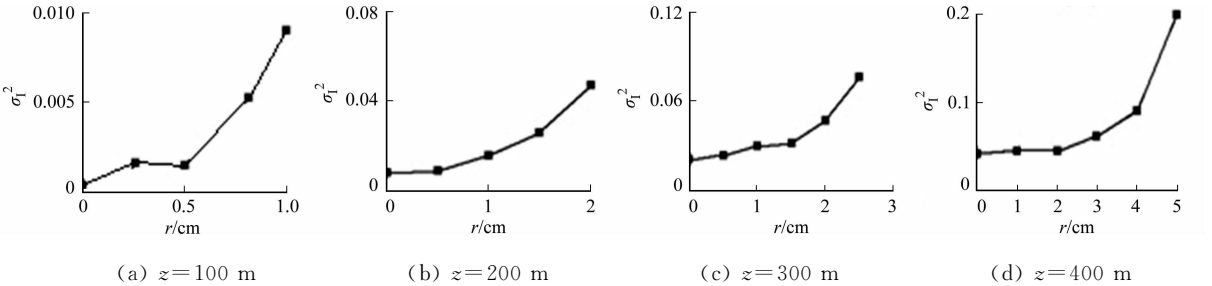


图 5 高斯光束在大气湍流中的闪烁指数随径向距离的变化(对应图 4 的实线)

Fig. 5 Scintillation index of Gaussian beam on propagation in atmosphere vary with the radial distance (refer to the full line in figure 4)

实线是同一天测量的结果;图 6 的实验结果与图 4 的虚线是同一天测量的结果.

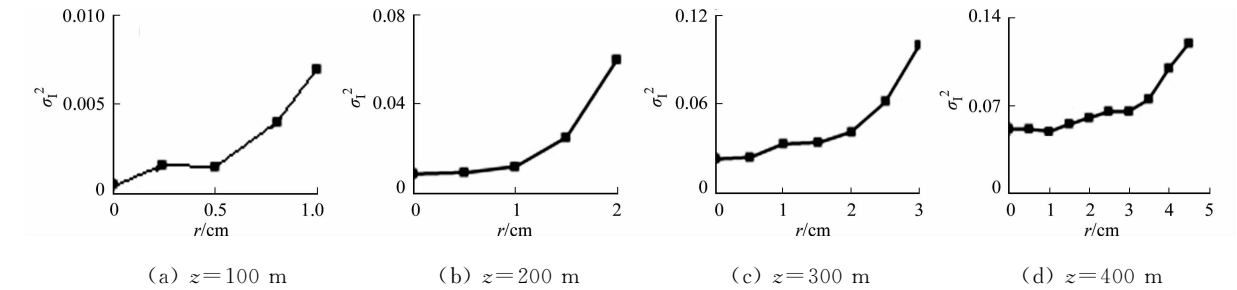


图 6 高斯光束在大气湍流中的闪烁指数随径向距离的变化(对应图 4 的虚线)

Fig. 6 Scintillation index of Gaussian beam on propagation in atmosphere vary with the radial distance (refer to the dashes line in figure 4)

由图 5,6 可知:随着传输距离的增加,光斑的大小也在逐渐增大;当传输距离为 100 m 时,光斑的半径约为 1 cm;当传输距离增加到 400 m 时,光斑的半径增加到约为 5 cm;激光光束的闪烁指数随着径向距离的增加而逐渐增加.这与理论模拟的结果一致.

3 结论

基于 ARM9 嵌入式系统设计并制作了闪烁参数测量系统.利用该仪器对高斯光束在 400 m 的实际湍流中的闪烁指数进行了实验测量,主要测量高斯光束轴上位置在不同强度湍流中的闪烁指数随传输距离增加的变化,以及在相同湍流中闪烁指数随着离轴距离增加的变化规律.

闪烁仪器的测量数据表明:在同一湍流中,高斯光束轴上位置的闪烁指数随着传输距离的增加而逐渐增大;在不同湍流中,同一位置处高斯光束的闪烁指数在较强的湍流中更大;此外,高斯光束闪烁指数随着闪烁仪器离轴距离的增加也逐渐增大.

通过自制嵌入式测量系统对激光在湍流大气传输中的光强进行实际测量,为后续计算研究高斯光束闪烁指数与传输距离之间的关系提供参考.实际测量计算的结果有效地验证了理论曲线的正确性.

参考文献:

[1] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Laser beam propagation through random media[M]. Bellingham; SPIE Press, 1998;1789-1890.

[2] BAYKAL Y, EYYUBOĞLU H T. Scintillations of incoherent flat-topped Gaussian source field in turbulence[J]. Appl Opt, 2007, 46(22):5044-5050.

[3] BAYKAL Y, EYYUBOĞLU H T, CAI Yang-jian. Scintillations of partially coherent multiple Gaussian beams in turbulence[J]. Appl Opt, 2009, 48(10):1943-1954.

[4] EYYUBOĞLU H T, BAYCKAL Y, CAI Yang-jian. Scintillations of laser array beams[J]. Appl Phys B, 2008, 91(2):265-271.

[5] KIASALEH K. On the scintillation index of a multiwavelength Gaussian beam in a turbulent free-space optical communications channel[J]. J Opt Soc Am A, 2006, 23(3):557-566.

[6] EYYUBOĞLU H T. Concept of area scintillation[J]. Appl Phys B, 2009, 96(2):301-308.

[7] EYYUBOĞLU H T. Area scintillations of Bessel Gaussian and modified Bessel Gaussian beams of zeroth order[J]. Appl Phys B, 2010, 98(1):203-210.

[8] LI Cheng-liang, WANG Tao, PU Ji-xiong, et al. Ghost imaging with partially coherent light radiation through turbulent atmosphere[J]. Appl Phys B, 2010, 99(3):599-604.

[9] PU Ji-xiong, KOROTKOVA O. Propagation of the degree of cross-polarization of a stochastic electromagnetic beam through the turbulent atmosphere[J]. Opt Commun, 2009, 282(9):1691-1698.

[10] CUI Lin-yan, XUE Bin-dang, CAO Lei, et al. Irradiance scintillation for Gaussian-beam wave propagating through weak non-Kolmogorov turbulence[J]. Optics Express, 2011, 19(8):16872-16884.

[11] BAYKAL Y, EYYUBOĞLU H T. Scintillation index of flat-topped Gaussian beams[J]. Applied Optics, 2006, 45(16):3793-3797.

[12] EYYUBOĞLU H T, SERMUTLU E, BAYKAL Y, et al. Intensity fluctuations in J-Bessel-Gaussian beams of all orders propagating in turbulent atmosphere[J]. Applied Physics B, 2008, 93(2/3): 605-611.

[13] KOROTKOVA O. Scintillation index of a stochastic electromagnetic beam propagating in random media[J]. Optics Communications, 2008, 281(9): 2342-2348.

[14] GU Y, KOROTKOVA O, GBUR G. Scintillation of nonuniformly polarized beams in atmospheric turbulence[J]. Optics Letters, 2009, 34(15): 2261-2263.

[15] SCHULZ T J. Optimal beams for propagation through random media[J]. Optics Letters, 2005, 30(10): 1093-1095.

[16] QIAN Xian-mei, ZHU Wen-yue, RAO Rui-zhong. Numerical investigation on propagation effects of pseudo-partially coherent Gaussian Schell-model beams in atmospheric turbulence[J]. Optics Express, 2009, 17(5): 3782-3791.

[17] GU Y, KOROTKOVA O, GBUR G. Reduction of turbulence-induced scintillation by nonuniformly polarized beam arrays[J]. Optics Letters, 2012, 37(9): 1553-1555.

[18] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Laser beam propagation through random media[M]. Bellingham: SPIE Publications, 1998: 123-161.

[19] BAYKAL Y. Correlation and structure functions of Hermite-sinusoidal-Gaussian laser beams in a turbulent atmosphere[J]. J Opt Soc Am A, 2004, 21(7): 1290-1299.

[20] CAI Yang-jian, CHEN Yun-tian, EYYUBOĞLU H T, et al. Scintillation index of elliptical Gaussian beam in turbulent atmosphere[J]. Opt Lett, 2007, 32(16): 2405-2407.

[21] EYYUBOĞLU H T, BAYKAL Y, SERMUTLU E, et al. Scintillation index of modified Bessel-Gaussian beams propagating in turbulent media[J]. J Opt Soc Am A, 2009, 26(2): 387-394.

[22] 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.

[23] 黄超, 罗宏宇. Borland Delphi 网络应用开发技术与实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 235-356.

[24] 吴明晖. 基于 ARM 的嵌入式系统开发与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004: 288-321.

[25] 李俊. 嵌入式 Linux 设备驱动开发详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008: 86-107.

[26] YAGHMOUR K. 构建嵌入式 Linux 系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 232-313.

Scintillation Index Measuring System of Gaussian Beam
on Space Optical Communication

WANG Jia-bin¹, CHEN Zi-yang², PU Ji-xiong²

(1. College of Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;
2. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: A scintillation index measuring system based on embedded MCU of ARM9 is designed. The scintillation index of laser beams in a real turbulent atmosphere is experimentally measured, and the experimental result shown that the scintillation index of a Gaussian beam increases with the increasing of the propagation distance. Moreover, at the same location, the scintillation index is larger in a stronger turbulent atmosphere.

Keywords: Gaussian beam; scintillation index; laser; turbulent atmosphere; embedded system

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 吴逢铁)