

激光经 D 形多模光纤输出的光场特性实验研究

吴丽双

(泉州师范学院物理与信息工程学院, 福建 泉州 362000)

摘要 强度调制大气激光通信要求远场强度分布均匀平坦,而光强均匀度将会由于其空间相干性的退化而有所提高。实验研究了一种 D 形多模光纤的输出光场强度分布特性,比较了激光经圆柱形多模光纤和不经光纤的输出光场强度分布,证明了采用 D 形多模光纤作为模式混合器,输出的光束具有相干度低和均匀性好的特性。

关键词 光通信;D 形光纤;远场分布;部分相干光;空间相干度

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.090603

Experimental Study of the Characteristics of the Light Field of the Laser Output Through the D-Shaped Multimode Fiber

Wu Lishuang

(School of Physics and Information Engineering, Quanzhou Normal University,
Quanzhou, Fujian 362000, China)

Abstract Intensity modulated atmospheric laser communication requires the uniform and flat far-field intensity distribution and intensity uniformity will be improved due to the degradation of its spatial coherence. An experimental study of a D-shaped multi-mode fiber output optical field intensity distribution characteristics is presented, compared with the output optical field intensity distribution from the laser through the cylindrical multi-mode optical fiber and not via an optical fiber. Experimental results show that using a D-shaped multi-mode fiber as the mode mixer, the output beam has a low degree of coherence and good uniformity.

Key words optical communications; D-shaped optical fiber; far-field distribution; partially coherent light; spatial coherence

OCIS codes 060.3510; 060.2340; 060.4510; 030.6140

1 引言

部分相干激光在空间的聚焦和传输过程中光束各参数如光斑大小、发散角、瑞利长度以及焦深的变化已经得到广泛研究^[1-2]。在某些实际应用中,部分相干光比完全相干光更具优越性。目前,自由空间光通信(FSO)系统一般采用强度调制/直接检测(IM/DD)工作方式。激光经过大气信道传播时,会产生大气衰减效应和大气湍流效应^[3]。部分相干光在大气中传输时所受大气骚动的影响要比完全相干光小得多,并且部分相干光束具有光强比较均匀,对模斑低灵敏等优点而被应用于强度调制大气光通信。

随着大气激光通信的不断深入研究,对光源也提出了新的要求。在大气湍流信道中,部分相干光通信的性能优于完全相干光通信^[4],部分相干光可减小光束抖动、扩展和强度起伏的程度^[5]。光源相干性越差,系统误码率越低^[6]。比如采用强度调制的 LED 正交频分复用(OFDM)系统性能主要受 LED 非线性的影响^[7]。由于激光光源具有很好的相干性,直接用作大气通信光源则系统的性能将受到影响,需要采取一定的措施以降低光源的相干度^[8]。为此参考文献^[9]从理论上分析了普通圆柱形多模光纤产生部分相干光的原理,本文实验研究了多模光纤产生部分相干光的模斑对比度,证明了相同光纤长度下 D 形多模光纤比普通圆柱形多模光纤的输出光斑具有更好的均匀性。

收稿日期: 2013-03-22; **收到修改稿日期**: 2013-05-14; **网络出版日期**: 2013-08-20

作者简介: 吴丽双(1970—),女,副教授,主要从事激光技术与应用等方面的研究。E-mail: lishuangw@126.com

2 激光经 D 形多模光纤输出特性分析

对于直径远大于传输光波长的阶跃型多模光纤,光在其中的传播可以按照全反射定律处理。实验原理如图 1 所示,光纤平直放置,其输入端面与输出端面平整且垂直于光纤轴心。当激光器输出为基横模圆形高斯光束时,并且会聚透镜 L1 在输出光束的束腰处,由于波前曲率半径无穷大,这时的激光束是一个平面波,光线 1、2、3 有相同的空间相位,激光束是完全相干的。激光束经会聚透镜 L1 送入光纤,光纤输出端处于发射透镜 L2 的前焦面上。

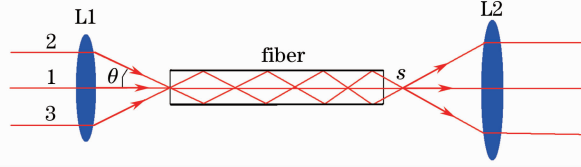


图 1 实验原理图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental principle

D 形多模光纤纤芯的横截面形状为切去顶端的碟形(图 2),并且沿着整根光纤不变,纤芯和包层的折射率分别为 n_{co} 和 n_{cl} 。

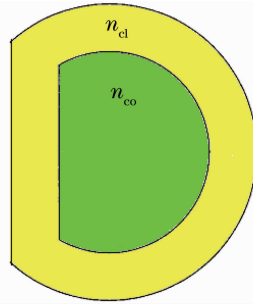


图 2 D 形多模光纤横截面示意图

Fig. 2 Cross section diagram of a D-shaped multi-mode fiber

当入射光线在子午面上时,忽略全反射引入的相位因子,具有入射角度 θ (图 1)的光线 2 从会聚点到光纤输出端面的光程^[9]

$$L_c = nL(1 - \sin^2\theta/n^2)^{-1/2}, \quad (1)$$

式中 L 表示光纤长度; n 表示光纤纤芯折射率。则光线 2 和以 0° 入射的光线 1 之间的程差(模间色散)为^[9]

$$\Delta L_c = nL[(1 - \sin^2\theta/n^2)^{-1/2} - 1]. \quad (2)$$

由此可见,从光纤输出端面出射的不同入射角 θ 的光线之间不再具有同相位的相干增强性质,但相同入射角的光线具有相同的光程,如图 1 中的光线 2、3,因此光线 2、3 在光纤输出端面仍具有同相位的相干增强性质。

当入射光线不在子午面上时,光纤内一条光线多次反射的轨迹如图 3 所示,对于轴对称的普通多模光纤和锥形多模光纤,相同入射角 θ 和 ϕ (ϕ 为光线和子午面的夹角)的光线具有相同的路径,如图 3(a)所示,因此相同入射角的光线在光纤输出端面仍具有同相位的相干增强性质。而对于 D 形多模光纤,只要有些微的切

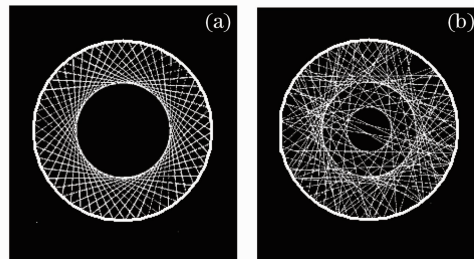


图 3 光纤内一条光线多次反射的轨迹。(a) 为标准圆柱形光纤; (b) 为光纤上切出一段长度为 1% 半径直边的多模光纤

Fig. 3 A single light in the optical path of multiple reflection. (a) A standard cylindrical fiber; (b) a cut edge length with 1% of radius in a multi-mode optical fiber

边,光纤内一条光线多次反射的轨迹就呈现混乱现象,因此从不同端面部位相同入射角 θ 和 ϕ 的入射光线其光程差别很大,即模间色散很大,任何斜入射光线在光纤输出端面不再具有同相位的相干增强性质,使光纤端面输出光束相干度大大降低。

3 近场和远场光斑实验结果与讨论

实验采用波长 650 nm 的半导体激光器作光源,圆柱形多模光纤采用塑料光纤,纤芯材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA), $n_{co}=1.491$,纤芯直径 $\Phi=250\ \mu\text{m}$,包层为氟树脂, $n_{cl}=1.380$,包层厚度 $5\ \mu\text{m}$,白光透射率大于等于 95%/m(570 nm),损耗小于等于 200 dB/km(570 nm),数值孔径 $NA=0.5$ 。D形多模塑料光纤是通过将圆柱形塑料光纤侧面加热压制而成,D形边长(弦长)约 $150\ \mu\text{m}$,光纤长度均为 500 mm。如图 1 所示测量原理,实验得到激光经圆柱形多模光纤的近场光斑图(距离发射透镜 0.1 m)如图 4(a)所示,远场光斑图(距离发射透镜 10 m)如图 4(b)所示。图 4(a)显示了圆柱形多模光纤输出近场存在明显的模斑,模斑对比度为 23.5%(模斑对比度定义为 $C = \frac{\sqrt{\langle I^2 \rangle} - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle}$,其中 I 为光强度),说明光束具有一定的相干度。随着传输距离的增加,光束相干度逐渐退化,在距离发射透镜 10 m 处,模斑对比度为 18.2%。

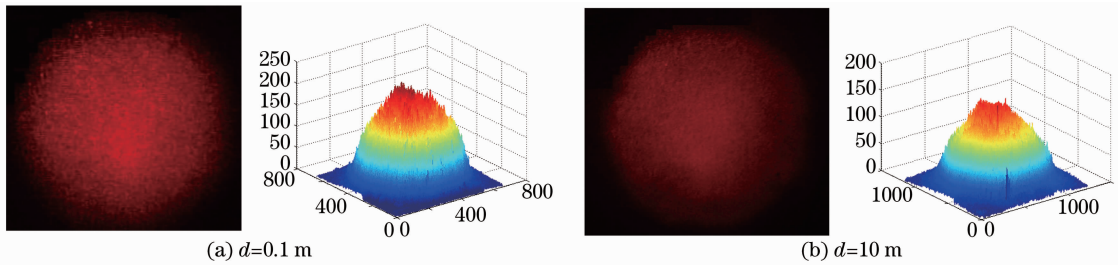


图 4 激光经圆柱形多模光纤的输出光斑和光强分布图。(a) $d=0.1\ \text{m}$; (b) $d=10\ \text{m}$

Fig. 4 Laser output spot and intensity distribution through the cylindrical multimode fiber. (a) $d=0.1\ \text{m}$; (b) $d=10\ \text{m}$

图 5(a)为激光经 D形多模光纤的近场光斑图(距离发射透镜 0.1 m),图 4(b)为远场光斑图(距离发射透镜 10 m)。可见 D形多模光纤输出光束无论是近场还是远场都看不到模斑,模斑对比度分别为 4.1%和 6.2%,说明光束相干度极低,同时光斑中心光强度变得均匀平坦。

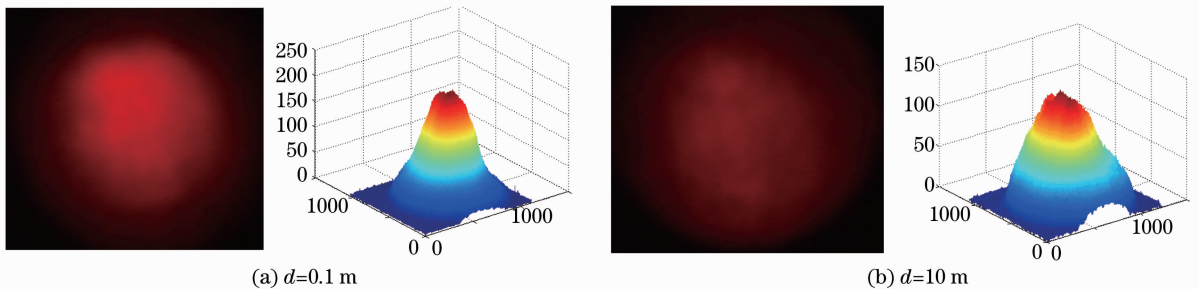


图 5 激光经 D形多模光纤的输出光斑和光强分布图。(a) $d=0.1\ \text{m}$; (b) $d=10\ \text{m}$

Fig. 5 Laser output spot and intensity distribution through D-shaped multimode fiber. (a) $d=0.1\ \text{m}$; (b) $d=10\ \text{m}$

为了说明 D形多模光纤产生部分相干光束的意义,在图 1 中将光纤移开,同时使透镜 L1 和 L2 共焦组成望远镜系统,得到激光输出近场光斑图(距离发射透镜 0.1 m)如图 6(a)所示和远场光斑图(距离发射透镜 10 m)如图 6(b)所示,模斑对比度分别为 76.7%和 85.3%。由于激光可看做完全相干光,传输过程中存在严重的衍射干涉现象,并且随着传输距离的增加,空间相干度跟着提高,远场呈现明显的圆环条纹,在本实验中半导体激光器输出端加有一个圆形光阑。

综上实验结果,作如下讨论:

1) 激光光源通过望远镜系统后由于光束相干度高而存在衍射圆环条纹和模斑,特别是远场光斑均匀性变差,不利于大气光通信,尤其在湍流大气通信中将增大误码率^[3]。采用多模光纤产生部分相干光束可以改

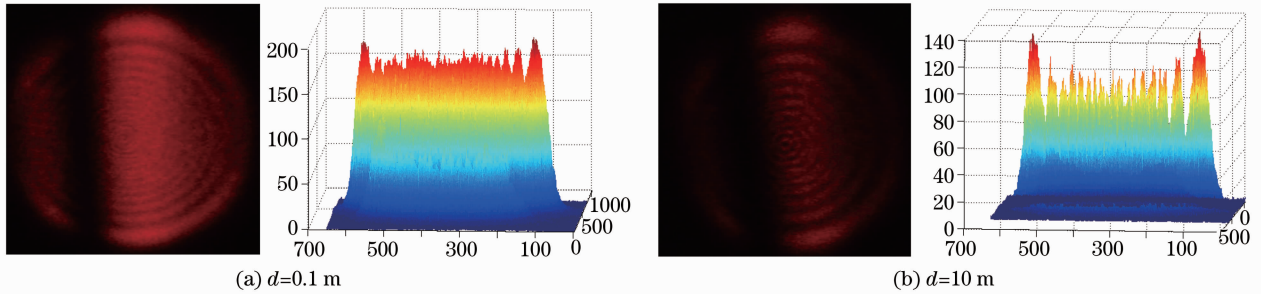


图6 激光经望远镜系统后的光斑和光强分布图。(a) $d=0.1\text{ m}$; (b) $d=10\text{ m}$

Fig. 6 Laser output spot and intensity distribution through the telescope system. (a) $d=0.1\text{ m}$; (b) $d=10\text{ m}$

善远场光斑均匀性,而相同长度下D形多模光纤比普通圆柱形多模光纤具有更好的光斑均匀度(模斑对比度更低);

2) 多模光纤产生部分相干光束对模斑均匀度改善体现在两个方面,一是入射到光纤的光线由于经过多次反射和模式耦合使不同角度的光线混杂在一起提高了出射光斑的均匀度;二是多模光纤各传导模在光纤出射端的相位互不相同,出射光束相干度降低,近场和远场光斑的干涉现象不明显;

3) D形多模光纤由于不规则结构使光线在光纤内处于“混沌”状态,模式耦合比圆柱形光纤更强烈,出射光束相干度更低,因而模斑对比度更低;

4) 在实验中发现,透镜和光纤耦合系统对准误差不仅对准直器的耦合效率比较敏感,而且对光束质量的影响也比较大。在光纤准直器的设计与制造过程中,可以先通过Zemax辅助设计作为参考^[10]。

4 结 论

圆柱形多模光纤和D形多模光纤的模间色散特性使光纤输出光束相干度降低,圆柱形多模光纤的输出近场可见到明显的模斑,近场和远场模斑对比度分别为23.5%和18.2%。D形多模光纤输出光束无论是近场还是远场都看不到明显的模斑,模斑对比度分别为4.1%和6.2%,光束相干度低且光斑中心光强度均匀平坦,可用作模式混合器而成为在远场产生均匀性较好的照明光源,后者比前者具有更好的照明均匀性。

参 考 文 献

- Chen Yuan, Pu Jixiong, Liu Xiaoyun. Focusing properties of the partially coherent beams[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(10): 1375-1378.
陈媛, 蒲继雄, 刘晓云. 部分相干光束的聚焦特性[J]. 中国激光, 2006, 33(10): 1375-1378.
- Cang Ji, Zhang Yixin. Propagation properties of focused partially coherent vortex beams in turbulent atmosphere[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(5): 12777-1282.
仓吉, 张逸新. 大气湍流中部分相干聚焦涡旋光束的传输特性[J]. 光子学报, 2009, 38(5): 12777-1282.
- Li Fei, Wu Yi, Hou Zaihong. Analysis and experimental research on bit error rate for free-space optical communication systems through turbulent atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0606002.
李菲, 吴毅, 侯再红. 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): 0606002.
- Chen Chunyi, Yang Huamin, Jiang Huilin. Performance analysis and optimization of partially coherent optical communication links through atmospheric channel[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(8): 1869-1872.
陈纯毅, 杨华民, 姜会林, 等. 大气信道部分相干光通信链路性能分析与优化[J]. 电子学报, 2009, 37(8): 1869-1872.
- J C Ricklin, F M Davidson. Bit error rate in a free-space laser communication system with a partially coherent signal beam [C]. SPIE, 2003, 4884: 95-103.
- Wang Jiang'an, Zhao Yingjun, Wu Ronghua, *et al.*. Influence of partially coherent beam passing through strong turbulence on bit error rate of laser communication systems[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(5): 859-863.
王安安, 赵英俊, 吴荣华, 等. 部分相干光通过强湍流对通信系统误码率的影响[J]. 应用光学, 2009, 30(5): 859-863.
- Yang Yu, Zhang Jiankun, Liu Bo, *et al.*. Study of the impact of LED nonlinearity on orthogonal frequency division multiplex based visible light communication systems[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0805007.
杨宇, 张建昆, 刘博, 等. LED非线性对基于正交频分复用可见光通信系统的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0805007.
- Lin Jianwen, Lei Bin, Lian Chongyan, *et al.*. Tapered fiber transmitting antenna for atmosphere laser communication[J].

High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(12): 1959–1964.

林建文, 雷 斌, 连重炎, 等. 大气激光通信用直锥形光纤发射天线[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(12): 1959–1964.

- 9 Peng Renjun, Wu Jian. Employing multi-mode fiber to form partially coherent light source for atmospheric optical communication[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(6): 813–816.

彭仁军, 吴 健. 多模光纤产生用于大气光通信的部分相干光源[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(6): 813–816.

- 10 Lei Pingshun, Xue Lifang, He Jun, *et al.*. Design of multi-mode fiber collimator with ZEMAX [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(1): 010605.

雷平顺, 薛力芳, 何 军, 等. ZEMAX 在多模光纤准直器设计中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(1): 010605.