

激光在锥形多模光纤中的耦合效率与传输模式

胡 欣, 张文攀, 殷瑞光, 李 慧, 赵琳锋, 刘艳芳

(中国人民解放军 63892 部队, 河南 洛阳 471003)

摘要: 基于光线追迹的方法建立了典型锥形多模光纤的传输模型, 结合激光干扰设备激光的特点, 模拟计算了激光在锥形多模光纤中的耦合效率和传输模式, 并设计进行了光学实验。仿真和实验结果表明: 高斯激光光斑经锥形多模光纤传输后为圆环形光斑; 耦合效率随激光入射角的增大而减小, 减小的速率随入射角的增大而减小。为解决圆环形光斑分布, 提出了将输出端连接的圆柱形光纤弯曲一定角度的方法, 该方法可以将光斑改善为二维正态分布的光斑, 理论耦合效率近 80%。该研究为激光干扰设备的干扰激光直接介入激光制导武器对抗半实物仿真系统提供了理论和实验支持。

关键词: 锥形多模光纤; 耦合效率; Tracepro; 光线追迹; 光斑模式

中图分类号: TN253; TN977 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)02-0372-04

Coupling efficiency and transmission mode of laser beam in tapered multimode fiber

Hu Xin, Zhang Wenpan, Yin Ruiguang, Li Hui, Zhao Linfeng, Liu Yanfang

(Unit 63880 of PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: Based on ray tracing method, the laser transmission model of typical tapered multimode fiber was established. Integrating the peculiarity of jamming laser beam from the laser jammers, the coupling efficiency and transmission modes of laser spot throughout the tapered multimode fiber were calculated. Experiments were designed and conducted to verify the simulation. The results indicate that the output laser spot behaves circular when a laser spot with Gauss distribution incidences the tapered multimode fiber; the coupling efficiency decreases when the incident angle increases, and the decrement rate decreases as the incident angle increases. In order to solve the circular laser spot distribution, a new method of a small angle bending of the connected cylindrical fiber was introduced, and the output laser spot was improved to two-dimensional normal distribution, the theoretical coupling efficiency was about 80%. This provides a theoretical and experimental support for jamming laser intervening into the laser guided weapon countermeasure hardware-in-loop system.

Key words: tapered multimode fiber; coupling efficiency; tracepro; ray tracing; laser mode

0 引言

激光干扰设备直接介入激光制导武器对抗半实物仿真系统是内场仿真实验中一种重要的实验模式^[1-2],其干扰激光如何高效、稳定地耦合进入内场仿真系统是内场仿真实验能否顺利进行的重要问题之一。锥形多模光纤方便快捷、耦合高效稳定,广泛应用于光学耦合^[3]、通信^[4]等领域,不会在内场引起杂散光,容易实现任意出射点和出射方向的模拟,是激光干扰设备介入半实物仿真系统的一种有效方法。目前锥形光纤的加工工艺已经很成熟^[5],对于锥形光纤的研究主要有锥形单模光纤光波导理论^[6-7]、小尺寸(大端直径为微米量级)锥形塑料光纤的实验研究^[8-9]等,而对于大尺寸锥形多模石英光纤(大端直径为毫米量级)的理论和实验研究国内还未见报道。文中研究了1~20 mrad发散角的激光在0°~10°斜入射角下入射大尺寸锥形多模光纤的耦合效率和传输模式,并仿真解决了圆环状输出光斑的问题,同时设计进行了光学实验,验证了仿真结果,有效解决了激光干扰设备介入半实物仿真系统的问题。

1 锥形多模光纤的 Tracepro 建模

锥形多模光纤的典型结构如图1(a)所示。对光纤中传输模式的研究一般分为光波导和光线追迹两种方法,其中光线追迹的方法简单直观,将光斑分解为多束光线,跟踪每一条光线的轨迹,常用来研究多模光纤的输出模式分布。由于光线在锥形光纤中传输时界面上的入射角会逐渐减小,甚至不满足全反射条件,激光在锥形光纤中的传输模式被扰乱。下面使用Tracepro软件对锥形多模光纤建模分析耦合效率和传输模式。

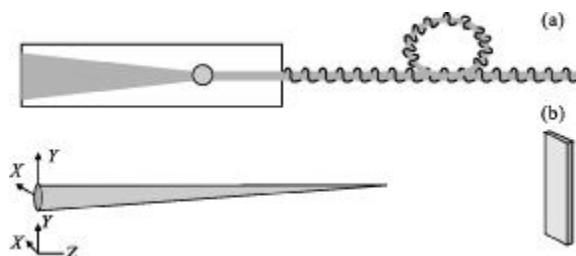


图1 锥形多模光纤锥端的原型结构和仿真模型

Fig.1 Structure and simulated model of tapered multimode fiber

Tracepro 仿真通常先建立几何模型,然后设置材料属性、表面属性和光源属性,再运行光线追迹,最后对结果进行分析。模型中的锥形多模光纤输入端端面直径为5 mm,输出端直径为600 μm,锥台长度为80 mm,输出端连接纤芯直径为600 μm的均匀折射率圆柱形多模光纤,外层采用螺纹不锈钢管保护。为提高锥形多模光纤的耦合效率,纤芯为纯石英,包层采用掺氟石英^[10],数值孔径NA=0.22。

经过对原型图1(a)的分析,建立几何模型如图1(b)所示。距离锥形光纤后端面20 mm处设置一个20 mm×20 mm的挡屏来分析光斑模式。建模过程中有三点假设:(1)不考虑激光在包层中的传输,所以将包层管壁厚度设为恒定值;(2)纤芯与包层接触面为完全透射面,包层外表面为完全吸收面,不考虑入射端和出射端的镜面反射,不考虑其他光吸收和光散射;(3)圆柱段光纤若不弯曲,视为理想光纤,因此整个锥形多模光纤的输出就等于锥端的输出。

设置光源为理想高斯光源,具有一定的高斯型发散角,束腰中心处于锥形光纤中轴线的反向延长线上,距离锥形光纤前端面2 mm,束腰半径为2 mm,光线沿Z轴正方向传输。由于模型具有轴对称性,在考虑光线斜入射锥形光纤时,光斑绕X轴逆时钟转动的角度即为入射角。光源功率为100 W,模拟计算的光线数目约为70 000条,激光波长为1.06 μm,不考虑光的偏振。

2 仿真分析

2.1 不同激光发散角在不同入射角下的耦合效率

不同激光干扰设备出射的激光发散角不同,而且很难保证光斑稳定地正入射锥形多模光纤,因此,笔者模拟计算了发散角为1、3、5、8、10、20 mrad等条件下0°、1°、2°、3°、5°、8°、10°等小入射角时挡屏上接收到的光功率,如图2所示。从结果中可以看出:(1)在入射角较大时,接收光功率为0,这是因为光线在锥形光纤中每发生一次全反射后入射角减小ω(ω为锥角),在多次全反射后入射角小于临界角,全反射条件破坏,光线无法在锥形光纤中传输。(2)耦合效率与入射激光发散角以及入射角有关,无论激光发散角多大,耦合效率均随着入射角的增大而减小,而发散角越大,耦合效率随入射角减小的速率

也越慢。例如,激光 1 mrad 发散 1°斜入射时,耦合效率为 100%,3°斜入射时即为 0,然而激光 20 mrad 发散时,直到 5°时耦合效率才下降为 0。(3)与圆柱形光纤不同的是,小发散角的激光束与锥形光纤耦合效率并不一定高于大发散角的激光束。

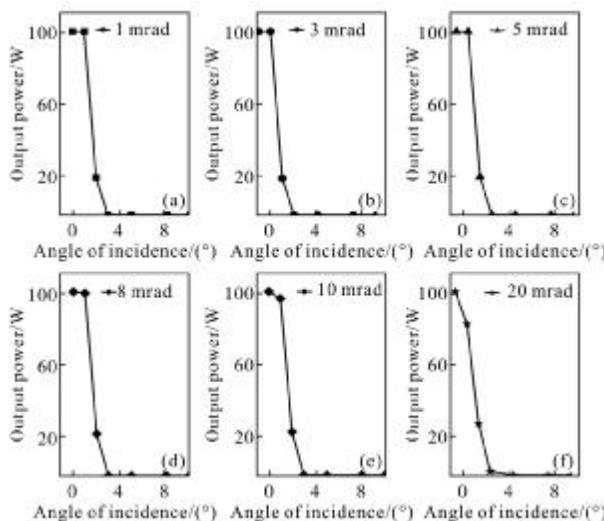


图 2 不同激光发散角在各入射角下的耦合效率

Fig.2 Coupling efficiency of different laser divergences under vary angle of incidence

2.2 输出光斑模式

图 3 为典型的输出光斑的模式图,分别是激光发散角 $\beta=10$ mrad 发散时 $\theta=0^\circ$ 、 1° 、 2° 、 3° 入射锥形多模光纤后在挡屏上接收到的光斑模式,图中颜色

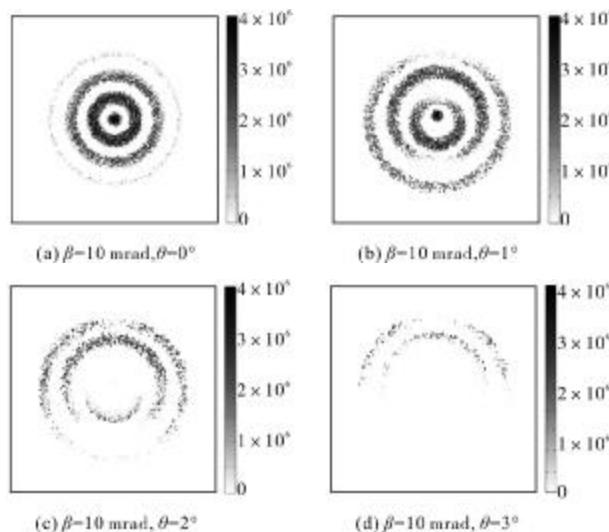


图 3 不同激光发散角不同入射角下输出光斑的模式

Fig.3 Transmission modes of different laser divergences under vary angle of incidence

的深浅代表光强的大小。从图 3(a)中可以看出,中心处的光线为直接出射锥形光纤而没有经过一次全反射,多重圆环形状中的空白部分即为不满足全反射条件而消逝在光纤中,从图 3(b)和(c)中可以看出圆环在扩散,并且变得上下不对称,图 3(d)中只能看到少许光线,而且重要的是图 3(c)和(d)中的圆心处并没有光线输出。图 3(d)中强度最大值较图 3(a)~(c)小两个数量级。然而,一般来说,实战条件下的激光制导武器观测到的干扰激光应该是较均匀连续分布的光斑,这种圆环状的输出模式以及圆心处的光斑“空缺”在内场仿真实验时是不能容忍的。

2.3 光纤部分弯曲后的光斑模式分布

为了消除圆环状的光斑输出,得到光强分布均匀且连续的模式分布,笔者尝试了一种新的方法,得到了很好的结果。模型如图 4(a)所示,将其中一部分圆柱形光纤弯曲一定角度,例如 90° ,这样在挡屏上接收到的光斑模式如图 4(b)~(e)所示。

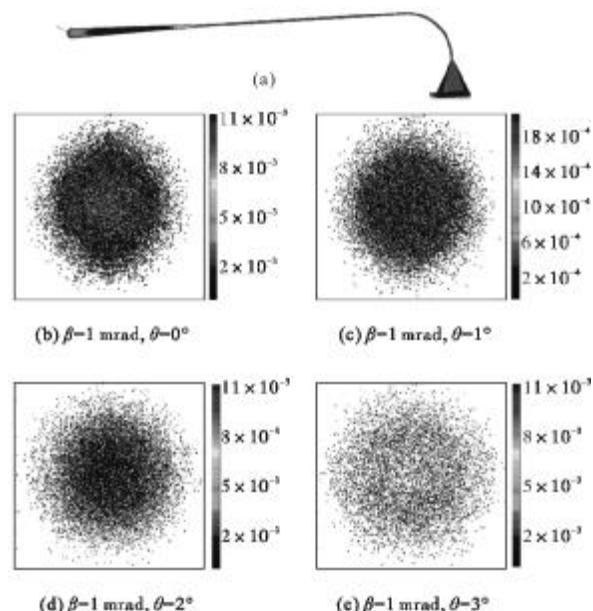


图 4 锥形多模光纤弯曲模型和弯曲后输出光斑模式

Fig.4 Model of bended multimode tapered fiber and output laser spot mode of bended multimode tapered fiber in simulation

从图中可以看出:(1)光斑变得相对均匀,中心光强略强于边缘地区,连续分布没有空洞;(2)与不弯曲时类似,输出光强随入射角度变大而变小;(3)与不弯曲时不同的是光斑上下分布较对称,没有出现上半部分光强大于下半部分的情况。

没有出现圆环状光斑的原因在于弯曲光纤后,多次全反射使得光线分布变得杂乱无章,出射光线在挡屏上的位置属于随机的几率分布,基本符合二维正态分布。同时,笔者研究了 180° 、 270° 等弯曲角度,发现其的大小对锥形多模光纤耦合效率的影响不超过5%,对挡屏上接收的光斑模式没有影响,正好说明了笔者对均匀连续光斑模式的几率解释,但仍需要更详细、严谨的理论推导来证明。

3 实验结果

为了验证仿真结果,笔者进行了实验验证。 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 脉冲激光器出射准基模高斯光斑,经过空间滤波,由分光镜分光后,一路激光耦合进入锥形多模光纤(来自中国电子科技集团第二十三研究所),在出射端由光束质量分析仪(SP620U来自Ophir Spiricon公司)接收;另一路激光由功率计监测光功率,其中,光束质量分析仪可替换功率计来监测激光器输出光斑。实验中将光纤弯曲一定角度,在光斑正入射时得到的结果($1600\times1200\text{ pixel}$)如图5所示。

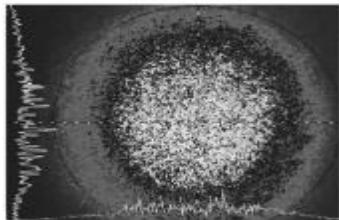


图5 锥形多模光纤耦合实验输出光斑的模式

Fig.5 Output laser modes of bended multimode tapered fiber in experiment

图中左侧和下底边的曲线代表穿过光斑中心的横截线和竖截线上的光强分布,图中取20条横截线和竖截线的激光能量进行高斯拟合,拟合的相关系数均值为0.66,最大值为0.82。总耦合效率约为68%,低于理论分析值79.2%,主要是因为仿真模型中不考虑界面的光吸收和光散射,而且实验中圆柱形光纤传输距离较远,也具有一定的传输损耗。重要的是光斑模式分布呈二维正态分布型,与Tracepro仿真结果一致。

4 结 论

利用Tracepro软件建立了锥形多模光纤的传输模型,仿真分析了激光在其中传输的模式和耦合效

率,并设计进行了实验,实验结果与仿真结果相符。研究结果表明:高斯激光入射锥形多模光纤后的出射光斑一般为圆环状,其耦合效率与激光发散角以及入射角有关,入射角越大,耦合效率越低;光纤的弯曲能够改变出射光斑模式,光斑较均匀,基本符合二维正态分布。该研究为激光干扰设备的干扰激光直接介入半实物仿真系统提供了理论和实验支持。

参 考 文 献:

- [1] Yang Xiwei, Tong Zhongcheng, Wang Yafu, et al. Modeling and simulation of laser jamming for electro-optical imaging guided seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1243–1248. (in Chinese)
- [2] Wang Jiang, Lin Wei, Wang Peng, et al. Analysis of laser energy chain in the hardware-in-the-loop simulation system of semi-active laser guidance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1230–1233. (in Chinese)
- [3] Li Hui, Hu Xin, Yin Ruiguang, et al. Experimental research on coupling efficiency and stability of fiber in laser jamming test [J]. *Applied Laser*, 2011, 31(4): 296–298. (in Chinese)
- [4] Li Baohong, Liu Xuefeng, Huang Dexiu. Coupling characteristics of tapered fiber microlenses [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1996, 17(2): 121–125. (in Chinese)
- [5] Wang Shaohui, Yan Yingzhan, Jiang Guoqing, et al. Fabrication and analyze of the taper-fiber [J]. *Nanoscience & Nanotechnology*, 2009, 6(1): 11–13. (in Chinese)
- [6] Sun Aijuan. Study on wave-guide theory of tapered optic fiber [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
- [7] Yu Zhiqiang, Chen Yongzhu, Zhou Jianying. Optical field evolution and transmission characteristics of ultra-short pulse in the tapered region of a single-mode tapered fiber [J]. *Aata Photonica Sinica*, 2009, 38(12): 3188–3192. (in Chinese)
- [8] Lian Chongyan, Du Xuri, Zhuang Qiren, et al. Study on the characterization of beam collimation in tapered plastic optical fiber [J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2008, 33(2): 36. (in Chinese)
- [9] Zhu Yongtao, Zhang Shuyun, Kong Dechao, et al. Coupling and radiaion properties of the tapered fiber [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(3): 275–278. (in Chinese)
- [10] Gao Yaming, Feng Guang, Liu Yongjian, et al. Numerical aperture of optical fiber with pure quartz core and fluorine-doped glass cladding [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(2): 169–172. (in Chinese)