

单模光纤章动跟踪耦合系统设计

吴天琦, 王睿扬, 王超, 于笑楠, 佟首峰

引用本文:

吴天琦, 王睿扬, 王超, 等. 单模光纤章动跟踪耦合系统设计[J]. 液晶与显示, 2020, 35(1): 62–69.

WU Tian-qi, WANG Rui-yang, WANG Chao, et al. Design of single mode fiber optic nutation tracking coupling system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(1): 62–69.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203501.0062>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光通信成像光斑处理方法研究

Laser communication spots imaging process method

液晶与显示. 2017, 32(9): 736–740 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173209.0736>

提高外场重频激光光斑测量距离的研究

Improvement of the measuring distance of repetitive-frequency laser spot in field

液晶与显示. 2016, 31(12): 1137–1142 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163112.1137>

基于液晶空间光调制器的变倍率激光扩束技术研究

Laser beam expanding technology based on liquid crystal spatial light modulator

液晶与显示. 2018, 33(9): 764–771 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183309.0764>

高均匀性小孔径激光照明系统

High uniformity laser illumination system with small aperture

液晶与显示. 2018, 33(7): 548–554 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183307.0548>

用全漏光导波技术测量反射式混合型扭曲向列相液晶盒的指向矢分布

Measurement of director distribution in reflective mixed-mode twisted nematic liquid crystal cell using fully leaky waveguide technique

液晶与显示. 2016, 31(6): 540–546 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163106.0540>

文章编号:1007-2780(2020)01-0062-08

单模光纤章动跟踪耦合系统设计

吴天琦¹, 王睿扬¹, 王超², 于笑楠², 佟首峰^{2*}

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学 空间光电技术国家地方联合研究中心, 吉林 长春 130022)

摘要:在光纤激光通信系统中,为了克服准误差、随机角抖动误差、大气湍流像差对单模光纤耦合效率的影响,本文设计了单模光纤章动跟踪耦合系统。首先基于模场匹配原理,分析了径向偏差和光斑大小对耦合效率的影响。其次在理论分析的基础上,对激光章动跟踪系统进行了设计,主要包括激光器、准直镜、快速反射镜、耦合透镜以及光电探测器,并以光电探测器的能量反馈完成了激光章动跟踪算法设计。最后搭建了实验平台,对系统进行了实验测试。通过实验测试得到,在激光章动跟踪时单模光纤的耦合效率为 53.5%,并测试了径向偏差以及光斑大小对耦合效率的影响,得到了相应的曲线。耦合效率满足系统要求,并且实验测试曲线与理论分析的仿真曲线基本一致。

关键词:空间激光通信;单模光纤耦合;激光章动跟踪;耦合效率;径向偏差;光斑半径

中图分类号:TN248 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/JYXS20203501.0062

Design of single mode fiber optic nutation tracking coupling system

WU Tian-qi¹, WANG Rui-yang¹, WANG Chao², YU Xiao-nan², TONG Shou-feng^{2*}(1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, China;2. National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology,
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In the fiber laser communication system, in order to overcome the influence of quasi-error, random angular jitter error and atmospheric turbulence aberration on SMF(single-mode fiber) coupling efficiency, a single mode fiber optic nutation tracking coupling system is designed. Based on the principle of mode field matching, the influence of radial deviation and spot size on coupling efficiency is analyzed. Secondly, based on the theoretical analysis, the laser nutation tracking system is designed, including laser, collimating mirror, fast mirror, coupling lens and photodetector, and the laser nutrient is completed by the energy feedback of the photodetector. Tracking algorithm is designed. Finally, an experimental platform is built and the system is tested experimentally. Through experimental tests, the coupling efficiency of single mode fiber is 53.5% in laser nutation tracking, the influence of radial deviation and spot size on coupling efficiency is tested, and the corresponding curve is

收稿日期:2019-08-16;修订日期:2019-10-23.

基金项目:吉林省教育厅基金(No.JJKH20190562KG)

Supported by Jilin Provincial Department of Education Fund (No.JJKH20190562KG)

* 通信联系人, E-mail:tsf1998@sina.com

obtained. The coupling efficiency satisfies the system requirements, and the experimental test curve is basically consistent with the theoretical analysis.

Key words: space laser communication; single mode fiber coupling; laser nutation tracking; coupling efficiency; radial offset; spot radius

1 引言

空间激光通信也称为无线光通信,是指利用激光束作为载波在空间直接进行语音、数据、图像等信息传输的一种技术,具有体积小、功耗低、机密性高、安全性高、数据速率高等优势^[1-5]。单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)耦合技术是光纤激光通信系统的关键技术,由于光纤静态角偏差、随机角抖动误差、大气湍流像差等因素的影响,SMF耦合损耗的光功率较大,因此提高SMF的耦合效率成为多年来国内外的研究热点^[6-8]。

1990年,美国麻省理工学院提出了一种光纤章动的有源耦合方案,该方案结构简单,其实验系统中跟踪带宽约为1 kHz,耦合效率为63%^[9]。2002年,美国的Weyrauch采用了盲优化的自适应光纤耦合系统来校正大气湍流引起的波前畸变,实验测得该系统单模光纤耦合效率约为60%^[10]。2007年,电子科技大学提出优化耦合透镜的直径与焦距的比值的方法,耦合效率为61%^[11]。2012年,日本Takenaka等制造了一种可在大气湍流下以高频率工作的快速转向镜,以提高光纤耦合效率,但这两个子光路结构复杂且容易引入人为误差^[12]。2016年,上海光机所提出了基于激光章动的自动耦合方案,该方案中将耦合效率为73.5%,提高了6.5%^[13]。2017年,成都光电所黄冠等提出基于FPGA平台的光纤耦合方案,应用SPGD算法实现了150 Hz的校正带宽^[14]。2019年,长春光机所研究了能量反馈的单模光纤章动耦合算法并进行实验,实验结果表明在一定范围内该算法对动态扰动有明显抑制作用^[15-16]。

在实际应用中,受大气湍流、机械平台振动、人为装调误差等因素的影响,空间光到单模光纤的耦合难度极高,严重制约空间激光通信系统的工作效果,故需要采用高效光纤耦合技术。本文基于空间光到单模光纤耦合理论,提出基于激光章动的高效耦合方法,通过单个光电探测器对耦

合进单模光纤的能量进行检测,即可计算出光斑与光纤间的径向偏差,然后通过执行器实时补偿此偏差,实现耦合效率的提高。本文首次对激光通信载荷的平台振动对少模光纤耦合效率的影响进行了理论研究;基于激光章动方法,在光斑与光纤径向偏差很大时(光斑与光纤在初始未重合),实现光斑对光纤的快速扫描、捕获、跟踪,完成空间光到单模光纤的高效耦合。而且本文实验中所用的振镜较其他实验中的波前传感器具有光路简单、成本低等优势。

2 单模光纤模场匹配原理

本文研究采用基于单模光纤的激光章动跟踪技术提升空间光到单模光纤的耦合效率,在讨论激光章动跟踪技术前,首先介绍单模光纤的模场匹配原理,并分析了基于单模光纤的激光章动跟踪技术可实现的最高耦合效率。

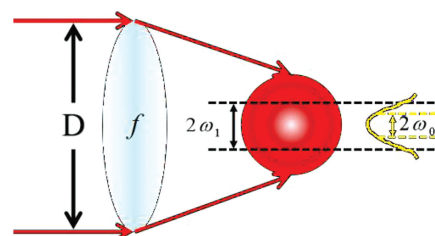


图1 单模光纤模场简化模型

Fig.1 Simplified model of single mode fiber mode field

在大气中传输的激光信号经过口径为 D 、焦距为 f 的透镜汇聚后,在焦平面形成一个艾里斑,如图1所示。图1中 ω_1 为艾里斑半径($\omega_1 = 1.22\lambda f/D$),半径 ω_0 为单模光纤模场半径。则空间光到单模光纤的耦合效率可以表示为^[17]:

$$\eta = \frac{\left| \int A(r)M(r)dr \right|}{\int |A(r)|^2 dr}, \quad (1)$$

式中; $A(r)$ 为艾里斑模场分布, $M(r)$ 为近似高斯分布的单模光纤基模模场。 $A(r)$ 与 $M(r)$ 的表

达式分别为:

$$A(r) = \frac{\pi D^2}{4\lambda f} \left[2 \frac{J_1(3.83/\omega_1)}{3.83r/\omega_1} \right], \quad (2)$$

$$M(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi\omega_0^2}} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right), \quad (3)$$

式(2)中: r 为光斑任意位置到光斑中心的径向距离, λ 为信号光的波长, J_1 为一类零阶贝塞尔函数。当艾里斑与光纤间存在径向偏差 ρ 时, $M(r)$ 可表示为^[14]:

$$M(r, \rho) = \frac{2\sqrt{2\pi}r}{\omega_0} \exp\left(-\frac{r^2 + \rho^2}{\omega_0^2}\right) I_0\left(\frac{2r\rho}{\omega_0^2}\right), \quad (4)$$

式中: I_0 为零阶修正贝塞尔函数。将式(4)代入式(1), 可推导出与径向偏差有关的耦合效率表达式为:

$$\eta\left(\frac{\rho}{\omega_0}\right) = \left| \int dr \frac{2\sqrt{2}}{\omega_0} J_1\left(\frac{3.83}{\omega_1}\right) \times \exp\left(-\frac{r^2 + \rho^2}{\omega_0^2}\right) I_0\left(\frac{2r\rho}{\omega_0^2}\right) \right|^2, \quad (5)$$

根据公式(5)可计算出, 当光斑半径与光纤模场半径满足 $\omega_1/\omega_0 = 1.711$ 且两者中心完全重合时, 耦合效率可以达到的最大值 $\eta = 81.45\%$ 。由以上公式中的变量间的关系得到图 2 中耦合效率与光斑大小、径向偏移之间的关系。图 2 中纵坐标为耦合效率, 横坐标为光斑半径与光纤模场半径的比值, 不同颜色曲线表示不同径向偏移时的耦合效率。从图中可以看出, 随着径向偏差的增大, 耦合效率急剧下降, 因此要对径向偏差进行补偿。

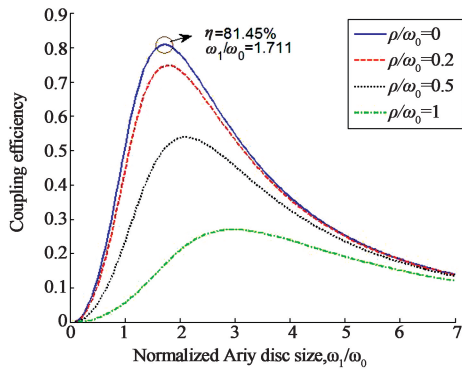


图 2 耦合效率与光斑大小和径向偏移的关系仿真曲线

Fig. 2 Simulation curves of coupling efficiency versus spot size and radial offset

3 系统组成及算法设计

3.1 章动跟踪系统组成

激光章动系统组成如图 3 所示, 包括激光器、准直镜、快速反射镜 (Fast Steering Mirror, FSM)、耦合透镜、雪崩光电二极管 (Avalanche Photo Diode, APD) 及控制系统。激光器发射的光束首先经过准直镜进行扩束, 然后入射快速反射镜进行径向偏差补偿与激光章动, 接着通过耦合透镜聚焦并耦合到单模光纤内, 再由 APD 检测光功率, 最后将 APD 输出的信号传输至控制系统。控制系统对光纤位置进行计算, 并将信号反馈到快速反射镜中, 以实现径向偏差补偿和章动幅度的优化。

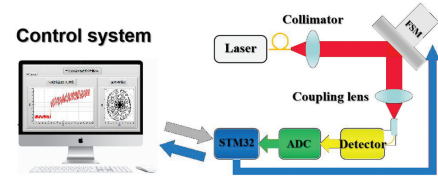


图 3 激光章动系统

Fig.3 Laser nutation system

3.2 章动跟踪系统算法设计

当光纤与光斑间存在径向偏差时, 耦合效率的表达式为:

$$\eta\left(\frac{r}{\omega_0}\right) = \frac{2\pi}{1 + 2(r/\omega_0)^2} \times \exp\left[-2 \times \frac{3.83^2}{8} \times \frac{1 + 2(r/\omega_0)^2}{(\omega_1/\omega_0)^2}\right] I_{1/2}^2\left[\frac{3.83^2}{8} \times \frac{1 + 2(r/\omega_0)^2}{(\omega_1/\omega_0)^2}\right], \quad (6)$$

式中: r 为径向偏差, ω_0 为单模光纤模场半径, ω_1 为汇聚光斑半径, $I_{1/2}^2$ 为修正贝塞尔函数。

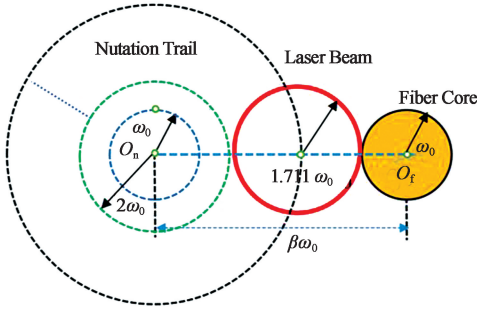
基于上式进行激光章动算法设计。在光束经过耦合透镜汇聚后, 假设光斑能量 P_{in} 保持不变, 设艾里斑尺寸为 $1.711\omega_0$, 章动扫描半径为 ω_0 。首先, 考虑初始状态下光斑与单模光纤未重合的情况。如图 4(a) 所示, 初始时刻光斑中心 O_n 与光纤中心 O_f 间距为 $\beta\omega_0$ (β 为一未知实数), 光斑以 O_n 为圆心做半径为 ω_0 的圆形章动扫描, 其扫描轨迹为图中蓝色虚线。显然, 此过程中光斑与光纤 (黄色圆形) 不会发生重叠。改变章动扫描半径为 $2\omega_0$, 光斑扫描轨迹为图中绿色虚线, 此时光

斑与光纤仍未发生重叠。接下来,进一步增大扫描半径,直到扫描半径大于黑色虚线轨迹半径,光斑与光纤发生面积重叠,探测器检测到能量。当探测器开始有信号输出时,系统开始改变扫描策略,以某一小幅度的 Δr_{c-n} 增大光斑章动扫描半径,如图 4(b) 所示。设章动扫描中心为坐标原点, r_{c-n1} 为光斑(圆形红色实线)与光纤首次重叠时的扫描半径,当光斑与光纤重叠面积最大时,光斑与光纤间距为 r_{c-1} ,光斑在整个扫描周期内仅会出现一次与光纤面积重叠最大的情况,相应地,探测器仅在一个时刻内输出最大值 P_{c-max1} 。改变章动扫描半径为 r_{c-n2} ,当光斑位于红色虚线圆圈位置时,与光纤重叠面积最大,此时两者间距为 r_{c-2} ,探测器输出最大值为 P_{c-max2} 。上述过程为激光章动粗扫描阶段,满足如下数学关系^[18]:

$$\frac{P_{c-max1}}{P_{in}} = \eta \left(\frac{r_{c-1}}{\omega_0} \right), \quad (7)$$

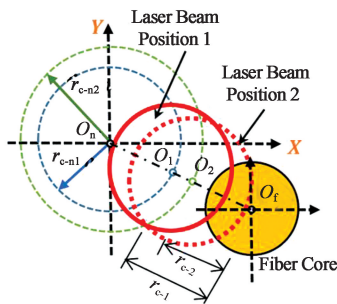
$$\frac{P_{c-max2}}{P_{in}} = \eta \left(\frac{r_{c-2}}{\omega_0} \right), \quad (8)$$

$$r_{c-2} - r_{c-1} = r_{c-n2} - r_{c-n1} = \Delta r_{c-n}, \quad (9)$$



(a) 光斑与光纤无重合

(a) Spot without coincidence with fiber



(b) 光斑与光纤有重合

(b) Spot overlap with the fiber

图4 激光章动粗扫描阶段原理

Fig.4 Principle of laser nutation coarse scanning stage

光纤中心到光斑中心的横向偏移量 x_{fiber} 与纵向偏移量 y_{fiber} 的表达式分别为:

$$x_{fiber} = \frac{x_1 + \dots + x_n}{n} = \frac{(r_{c-n1} + r_{c-1}) \cos \omega t_1 + \dots + (r_{c-nn} + r_n) \cos \omega t_n}{n}$$

$$y_{fiber} = \frac{y_1 + \dots + y_n}{n} = \frac{(r_{c-n1} + r_{c-1}) \sin \omega t_1 + \dots + (r_{c-nn} + r_n) \sin \omega t_n}{n}, \quad (10)$$

式中: ω 为章动扫描角速度, t 为时间。通过上式可计算出光纤中心的相对位置坐标 (x_{fiber}, y_{fiber}) 。得出光纤位置坐标后,通过快速反射镜进行径向偏差补偿。因采样点数量有限,故通过计算得到的光纤坐标并不精准,为了加快粗扫描阶段的捕获过程,实现光斑与光纤大部分重叠即可。为了获得精确的坐标,需要进一步的精扫描。

经粗扫描与补偿后,光斑中心与单模光纤中心已经比较接近,但影响耦合效率的径向偏差仍然存在。图 5 为激光章动精扫描阶段示意图。图中蓝色虚线为精扫描阶段的章动轨迹,由于径向偏差的存在,圆形扫描轨迹 r_{c-n} 与光纤并不同心。可见,扫描过程中光斑与光纤始终有重叠部分,探测器有持续输出,且在每个扫描周期内均有最大与最小值出现。探测器输出最小值 P_{f-min} 时,光斑与光纤径向偏差为 r_{f-max} ;探测器输出最大值 P_{f-max} 时,光斑与光纤径向偏差为 r_{f-min} ,则有如下关系:

$$\frac{P_{f-max}}{P_{in}} = \eta \left(\frac{r_{f-min}}{\omega_0} \right), \quad (11)$$

$$\frac{P_{f-min}}{P_{in}} = \eta \left(\frac{r_{f-max}}{\omega_0} \right), \quad (12)$$

$$r_{f-max} + r_{f-min} = 2r_{f-n}. \quad (13)$$

光纤的中心位置坐标的表达式为^[16]:

$$x_{fiber} = \frac{x_1 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^N (\rho_{f-max} - r_f) \cos \omega t_n}{N},$$

$$y_{fiber} = \frac{y_1 + \dots + y_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^N (r_f - \rho_{f-min}) \sin \omega t_n}{N}. \quad (14)$$

根据计算结果,通过快速反射镜进行径向偏差补偿,使光斑中心与光纤中心完全重合。接着,使光斑以某一幅度绕光纤中心进行章动扫描,如图 5 中绿色虚线所示。根据圆的对称性,在此扫

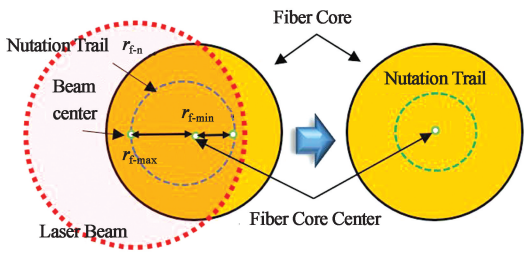


图 5 激光章动精扫描阶段原理

Fig.5 Principle of laser nutretization scanning phase

描周期内,光斑与光纤间存在一固定径向偏差,两者重叠面积不变,探测器输出信号的平均功率不变。此固定径向偏差的存在目的是抵消随即抖动引入的偏差。整套系统算法流程如图 6 所示。

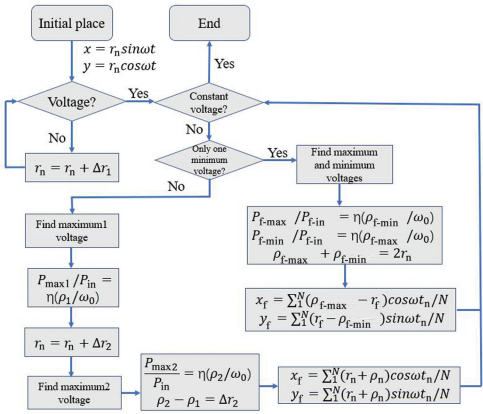


图 6 章动算法流程

Fig.6 Nutation algorithm flow

4 实验测试及结果分析

根据上文的章动原理、系统组成以及算法设计,本章针对激光章动跟踪系统的性能进行实验测试。实验平台的搭建如图 7 所示,激光束从光

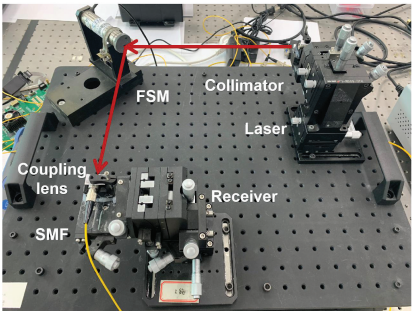


图 7 章动系统实验平台

Fig.7 Nutation system experiment platform

纤出射后,首先经过准直镜,然后通过快速反射镜进行偏转,再经过准直镜后进入光纤,从而进入 APD。同时,采用光功率计监测激光器的发射功率与通过耦合进入光纤的光功率。实验器件选型如表 1 所示。

表 1 实验器件选型

Tab.1 Experimental device selection

器件名称	生产公司	型号
激光器	华为	PT765F-81-2TD
准直镜	THORLABS	RC08FC-P01
快速反射镜	PI	S-330.8SL
APD	MACOM	LDPW0012
耦合透镜	THORLABS	C280TMD-C

4.1 耦合效率测试

耦合效率是章动跟踪系统最重要的性能参数,直接决定了空间光耦合到光纤中的光功率。在实验中,采用波长为 1 550 nm 的激光器作为光源,如图 8 所示,其发射光功率为 -6.98 dBm。



图 8 激光器发射光功率

Fig.8 Laser emitting optical power

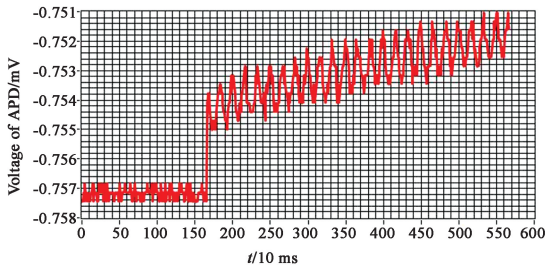


图 9 章动中心逐渐向光纤中心收敛时 APD 输出的电压

Fig.9 Voltage of the APD output when the nutation center gradually converges toward the center of the fiber

首先进入章动粗扫描阶段,此时章动半径逐渐扩大,直到 APD 检测到信号光,产生电信号后,开始进行章动精扫描。根据 APD 输出信号的强度变化,章动中心逐渐向光纤中心收敛,章动半径逐渐减小,章动扫描阶段 APD 输出电压如图 9 所示。从图中可以看出在粗扫描阶段完成对信号光的捕获后,随着章动中心逐渐向光纤中心收敛以及章动半径逐渐减小,APD 输出信号逐步提升。

直至 APD 输出信号的平均值保持恒定,实现章动中心与光纤中心重合,此时 APD 输出信号的曲线如图 10 所示。从图中可以看出 APD 输出信号的强度仍有抖动,但抖动范围保持不变,以此判定系统实现了章动跟踪。实现章动跟踪后,耦合进入单模光纤的光功率为 -9.70 dBm,如图 11 所示。通过计算得到系统的耦合效率为 53.5% 。

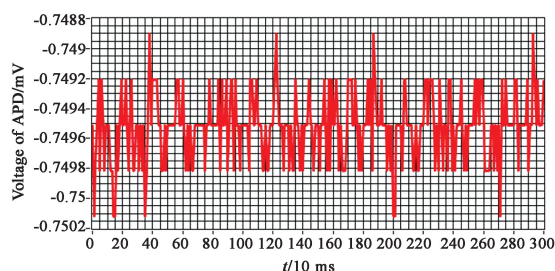


图 10 章动中心与光纤中心重合时 APD 输出的电压

Fig. 10 Voltage of the APD output when the nutation center coincides with the fiber center



图 11 章动跟踪时耦合进入光纤的光功率

Fig. 11 Optical power coupled into the fiber during nutation tracking

4.2 径向偏移对耦合效率的影响

本文第二章根据理论分析了径向偏移和光斑半径对耦合效率的影响,本节将针对径向偏移的

影响对系统进行测试。测试中,以光纤中心为原点建立坐标系,保持光斑面积不变,分别测量不同章动中心至光纤模场中心距离时的耦合效率。实验数据如图 12 所示,从图 12 中可以看出随着径向偏移增大,耦合效率降低,其变化趋势与理论分析的一致。

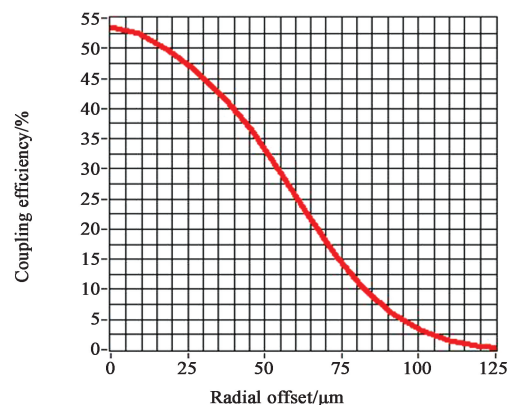


图 12 径向偏移与耦合效率的关系曲线

Fig. 12 Radial offset and coupling efficiency

4.3 光斑半径对耦合效率的影响

本节针对光斑大小对耦合效率的影响对系统进行测试。测试中,保持径向偏移不变且为最小值,通过改变耦合透镜的工作距离以实现不同光斑半径时的耦合效率的测量。实验结果如图 13 所示,从图 13 中可以看出当光斑半径与单模光纤模场半径的比值为 1.711 倍时,耦合效率最大,当光斑半径发生变化时,耦合效率的变化趋势与理论分析的一致。

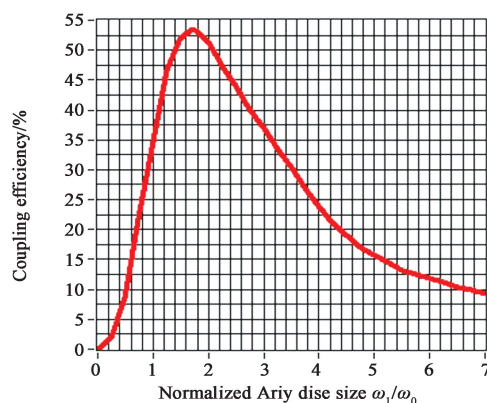


图 13 光斑半径和单模光纤模场半径的比值与耦合效率的关系曲线

Fig. 13 Relationship between the ratio of the spot radius and the mode field radius of a single-mode fiber to the coupling efficiency

5 结 论

本文根据单模光纤的模场匹配原理进行了激光章动跟踪系统以及算法设计,通过实验测得在激光章动跟踪时单模光纤的耦合效率最高为 53.5%。并对径向偏差以及光斑大小对耦合效率的影响进行了测试,得到了径向偏移与耦合效率的关系曲线以及光斑半径和单模光纤模场半径的比值与耦合效率的关系曲线。通过与理论分析的

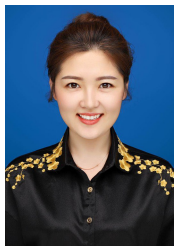
仿真曲线进行对比,其变化趋势一致。根据理论分析,径向偏差对耦合效率的影响最大。实验结果与理论分析仍具有一定差距,本文设计的章动算法及采用的硬件对实验结果均存在影响。硬件方面的影响主要包括 APD 及放大电路的噪声、A/D 及 D/A 的精度、振镜的精度以及光路误差;软件方面主要有章动半径、收敛步长及采样点个数对耦合性能的影响。这些因素都导致实际耦合效率降低。在下一步的研究中将针对以上因素对系统进行完善,从而获得更高的耦合效率。

参 考 文 献:

- [1] ZHENG G X, ZHOU F, LIU J F, *et al.* Influence of temperature on divergence angle of a focal telescope used in laser optical communication [J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13208-13214.
- [2] HASHMI A J, EFTEKHAR AA, ADIBI A, *et al.* Analysis of telescope array receivers for deep-space inter-planetary optical communication link between Earth and Mars [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(10): 2032-2042.
- [3] 曹明华,姚宇,宋梨花,等. 沙尘信道下激光通信系统的性能分析[J]. 发光学报, 2019, 40(5): 659-665.
- [4] CAO M H, YAO Y, SONG L H, *et al.* Performance analysis of laser communication system under sand-dust channel [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(5): 659-665. (in Chinese)
- [5] SUN X L, SKILLMAN D R, HOFFMAN E D, *et al.* Free space laser communication experiments from Earth to the Lunar Reconnaissance Orbiter in lunar orbit [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 1865-1871.
- [6] BELL M R, TSENG S M. Capacity of the low-photon-rate direct-detection optical pulse-position-modulation channel in the presence of noise photons [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(11): 1776-1782.
- [7] MA J, MA L, YANG Q B, *et al.* Statistical model of the efficiency for spatial light coupling into a single-mode fiber in the presence of atmospheric turbulence [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(31): 9287-9293.
- [8] TAN L Y, LI M N, YANG Q B, *et al.* Fiber-coupling efficiency of Gaussian Schell model for optical communication through atmospheric turbulence [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(9): 2318-2325.
- [9] ZHAI C, TAN L Y, YU S Y, *et al.* Fiber coupling efficiency for a Gaussian-beam wave propagating through non-Kolmogorov turbulence [J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 15242-15255.
- [10] SWANSON E A, BONDURANT R S. Using fiber optics to simplify free-space lasercom systems [C]// *Proceedings of Free-Space Laser Communication Technologies II*. Los Angeles, CA, United States: SPIE, 1990: 70-82.
- [11] WEYRAUCH T, VORONTSOV M A, GOWENSJ, *et al.* Fiber coupling with adaptive optics for free-space optical communication [C]// *Proceedings of Free-Space Laser Communication and Laser Imaging*. San Diego, CA, United States: SPIE, 2002: 177-184.
- [12] 高皓,杨华军,向劲松.一种实现空间光—单模光纤的自动耦合方法[J].光电工程,2007,34(8):126-129.
GAO H, YANG H J, XIANG J S. Auto-coupling method for making space light into single-mode fiber [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(8): 126-129. (in Chinese)
- [13] TAKENAKA H, TOYOSHIMA M, TAKAYAMA Y. Experimental verification of fiber-coupling efficiency for satellite-to-ground atmospheric laser downlinks [J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15301-15308.
- [14] 高建秋,孙建锋,李佳蔚,等.基于激光章动的空间光到单模光纤的耦合方法[J].中国激光,2016,43(8):0801001.
GAO J Q, SUN J F, LI J W, *et al.* Coupling method for making space light into single-mode fiber based on laser nutation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(8): 0801001. (in Chinese)
- [15] 王智勇,张晶,葛廷武,等.高功率高耦合效率光纤模场匹配器 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(2): 319-324.
WANG Z Y, ZHANG J, GE T W, *et al.* Highly coupling efficient mode-field adaptors for high power fiber lasers [J] *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 319-324. (in Chinese)

- [16] 黄冠,耿超,李枫,等.基于 FPGA 硬件控制平台的单模光纤自适应耦合技术[J].中国激光,2017,44(4):0406001.
HUANG G, GENG C, LI F, *et al.* Single-mode fiber adaptive coupling technology based on a FPGA hardware control platform [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0406001. (in Chinese)
- [17] 朱世伟,盛磊,刘永凯,等.基于能量反馈的单模光纤激光章动耦合算法[J].中国激光,2019,46(2):0206001.
ZHU S W, SHENG L, LIU Y K, *et al.* Laser nutation coupling algorithm for single mode fiber based on energy feedback [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0206001. (in Chinese)
- [18] TOYOSHIMA M. Maximum fiber coupling efficiency and optimum beam size in the presence of random angular jitter for free-space laser systems and their applications [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2006, 23(9): 2246-2250.

作者简介:



吴天琦(1993—),女,吉林白城人,硕士研究生,2016 年于长春理工大学获得学士学位,主要从事光纤耦合与激光章动方面的研究。E-mail: 591598444@qq.com



佟首峰(1972—),男,吉林白城人,教授,博士生导师,长江学者,2000 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间激光通信、电子与通信技术等方面的研究。E-mail: tsf1998@sina.com