

基于峰值功率反馈的单模光纤章动耦合研究

金志明^{1,2,3}, 佟首峰^{1,2**}, 于笑楠^{1,2*}, 宋延嵩^{1,2}, 张磊^{1,2}, 赵佰秋^{1,2}

¹长春理工大学空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022;

³长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 为了克服自由空间光通信系统中大气湍流、机械平台振动等因素的影响,提出了一种基于峰值功率反馈结合快速反射镜的章动耦合方案,并搭建了章动实验平台。通过快速反射镜引入一定频率和幅度的正弦扰动进行动态跟踪实验,结果表明,在跟踪状态且耦合效率不低于 55% 时,系统的最大耦合范围能达到 1.1 mrad。同时设计的跟踪算法可以很好地校正大幅度扰动,使探测器接收光功率的均方误差由开环时的 9.91% 降低到闭环时的 0.81%。测试了系统在不同信噪比下的章动耦合效率,结果表明,耦合效率随信噪比的降低而降低。

关键词 光通信; 单模光纤耦合; 峰值功率反馈; 激光章动; 耦合效率

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1106003

Research on Nutation Coupling of Single-Mode Fiber Based on Peak Power Feedback

Jin Zhiming^{1,2,3}, Tong Shoufeng^{1,2**}, Yu Xiaonan^{1,2*}, Song Yansong^{1,2},
Zhang Lei^{1,2}, Zhao Baiqiu^{1,2}

¹National and Local Joint Engineering Research Center of Space and Optoelectronics Technology,
Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²Fundamental Science on Space-Ground Laser Communication Technology Laboratory, Changchun University of
Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

³College of Photoelectric Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In order to overcome the influence of atmospheric turbulence and mechanical platform vibration in free space optical communication system, a nutation coupling scheme based on peak power feedback and fast mirror is proposed in this work, and the nutation experimental platform is built. A sine disturbance of a certain frequency and amplitude is introduced through a fast reflector to conduct a dynamic tracking experiment. The results show that the maximum coupling range of the system can reach 1.1 mrad when the coupling efficiency is not less than 55% in the tracking state. At the same time, the designed tracking algorithm can correct the large disturbance and reduce the mean square error of the received optical power of the detector from 9.91% in open-loop to 0.81% in closed-loop. The nutation coupling efficiency of the system under different signal-to-noise ratios is tested. The results show that the coupling efficiency decreases with the decrease of signal-to-noise ratio.

Key words optical communications; single-mode optical fiber coupling; peak power feedback; laser nutation; coupling efficiency

OCIS codes 060.4510; 060.1810; 070.6020

收稿日期: 2020-05-11; 修回日期: 2020-06-13; 录用日期: 2020-06-28

基金项目: 吉林省教育厅“十三五”项目(JJKH20190581KJ)

* E-mail: yuxiaonan1989@126.com; ** E-mail: tsf1998@sina.com

1 引 言

随着信息时代的高速发展,传统通信方式,如微波通信很难满足高速率、高数据容量的要求,而空间激光通信具有数据速率高、数据容量大、带宽较宽、安全性高等优势,广泛应用于通信领域^[1-5]。空间光到单模光纤的耦合是空间激光通信中的关键技术之一,但实际通信链路中,通信系统会受到机械平台振动、随机角抖动、大气湍流等因素的影响,使空间光到单模光纤的耦合实现困难^[6-8]。

1990年,Swanson等^[9]提出了一种光纤章动有源耦合方案,用光纤耦合器实现了超过1 KHz的闭环带宽,耦合效率高达63%;1992年,Knibbe等^[10]采用电光调制器(EOM)和单模光纤改进了章动装置,提高了控制频率;2002年,Weyrauch等^[11]设计了包含132个控制信道的自适应光纤耦合系统,使用随机并行梯度下降(SPGD)算法使耦合效率达到60%。2012年,Takenaka等^[12]利用四象限探测器(QD)和快速反射镜(FSM)作为闭环控制进行了星地激光通信实验,测得耦合效率的损耗大约为17 dB。2007年,高皓等^[13]使用光栅式扫描和五点跟踪法实现了空间光到单模光纤的自动耦合,最大耦合效率达到59.2%。2013年,Zhang等^[14]利用位置传感器(PSD)和FSM实现了光斑的跟踪,但实验光路复杂。2015年,Li等^[15]利用自适应光纤耦合器(AFC)补偿了大气湍流扰动和光纤端面静态的对准偏差。2016年,高建秋等^[16]利用激光章动原理进行了光纤耦合实验,在不加扰动的条件下耦合效率达到67%,引入扰动后耦合效率提高了6.5%,响应速率为40 Hz。2017年,黄冠等^[17]基于可编程逻辑门阵列(FPGA)和自适应耦合技术,实现了150 Hz的大气湍流带宽校正。2019年,朱世伟

等^[18]基于能量反馈设计了激光章动跟踪算法,并进行了仿真和光纤耦合实验,发现算法对动态扰动具有明显的校正作用。赵伯秋等^[19]设计了章动跟踪算法,研究了算法参数对系统耦合性能的影响。宋巍等^[20]使用倾斜锥型微透镜错位激发,使光的耦合效率提高了13%左右。2020年,张波等^[21]提出了一种基于阵列透镜和渐变多模光纤集束的方法,使光束近场能量到光纤集束可以稳定耦合。

为了提高空间光到单模光纤的耦合效率,减少随机角抖动对空间激光通信系统的影响,本文设计了一种基于峰值功率反馈的章动跟踪算法,搭建了章动实验平台,并对平台引入一定幅度和频率的正弦扰动,进行了章动跟踪的动态实验。首先测试了系统在跟踪状态下的耦合范围,然后测量了系统在开环和闭环状态下,光电探测器接收功率及耦合效率的变化,最后研究了系统在不同信噪比下的耦合效率。

2 激光章动原理及跟踪算法

激光章动是一种不需要位置探测器就能实现空间光到单模光纤耦合的方法,章动收敛过程可分为四个阶段,如图1所示。可以发现,光斑在章动圆上做圆周扫描。第一阶段,光斑与光纤中心完全分离,光纤模场与光斑模场完全不匹配,此时耦合效率为0。第二阶段,章动扫描一周会使部分光斑进入光纤中心,且扫描过程中会出现耦合效率最大的位置,但耦合效率的最小值为0,这表明此时只有部分光斑进入光纤中心参与模场匹配。第三阶段,章动扫描一周后仍存在耦合效率最大的位置,但与第二阶段不同的是最低耦合效率不再为零。第四阶段,最终章动收敛的过程,此时章动扫描中心在光纤模场中心附近微小波动,光斑与光纤中心几乎重合,此时章动扫描一周耦合效率较大且相对波动较小。

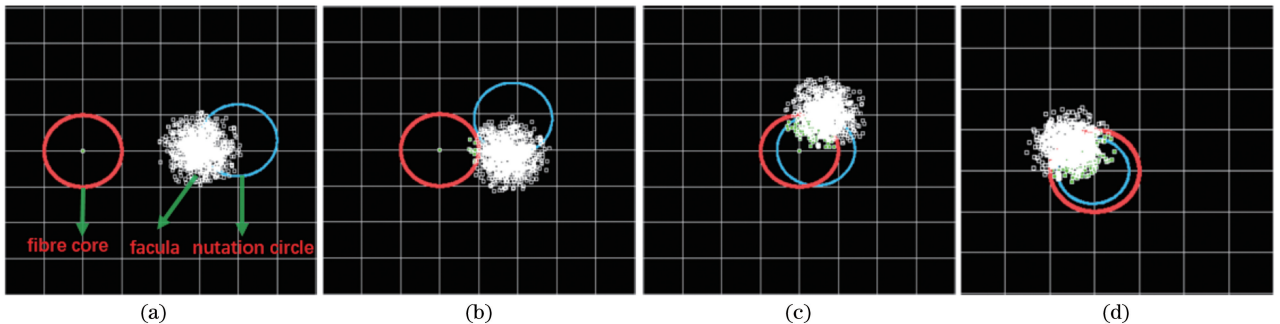


图1 章动收敛过程示意图。(a)第一阶段;(b)第二阶段;(c)第三阶段;(d)第四阶段

Fig. 1 Schematic diagram of nutation convergence process. (a) First stage; (b) second stage; (c) third stage; (d) fourth stage

章动耦合的空间位置示意图如图 2 所示,可以发现,章动扫描可将偏离光纤中心的空间光校正到纤芯位置附近,从而提高耦合效率。章动耦合的原理如图 3 所示,假设光纤中心位于坐标系原点,其中,叉号为探测器的采样点位置,箭头为探测器采集峰值功率后系统确定的收敛方向,通过若干次迭代可将光斑移动到光纤的中心位置附近,实现章动收敛。

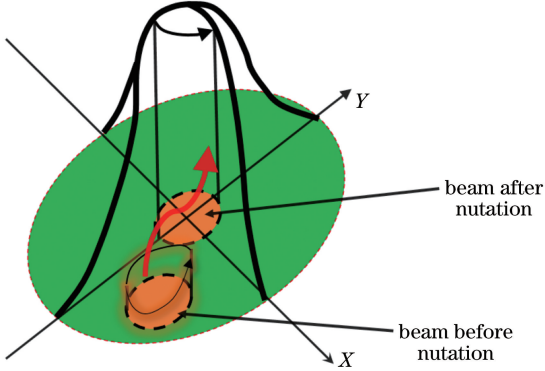


图 2 章动耦合的空间位置

Fig. 2 Spatial location of nutation coupling

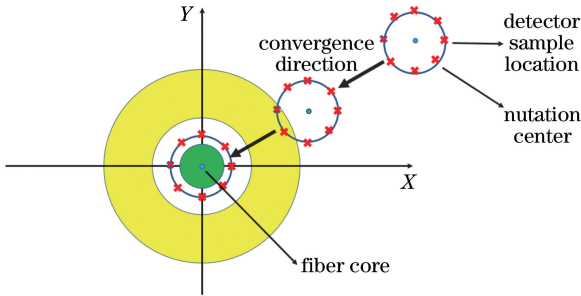


图 3 章动耦合的原理

Fig. 3 Principle of nutation coupling

章动跟踪算法的原理是控制 FSM 进行圆形扫描,将每次扫描得到的最大值及最大值索引作为反馈,并经过若干次算法迭代使耦合效率达到最大,具体流程如下。

1) 首先,初始化振镜的中心位置 (X_0, Y_0) ,设收敛步长为 A ,章动半径为 R ,章动一周的采样点数为 n ,捕获阈值门限为 P_i 。然后,利用 FSM 的二维摆动使光斑在耦合透镜接收端面进行给定的偏置扫描,扫描过程中得到光功率最大时的位置,并将最大光功率与 P_i 进行对比。如果最大光功率大于 P_i ,则开启跟踪算法,否则,捕获失败,重新开始扫描。

2) 捕获成功后,以光功率最大时的位置为中心做圆周扫描,扫描过程中找到光功率最大值 P_k 和最大值的索引 $i_{[\max]}$,其中,下标 k 为收敛次数。通过 P_k 和 $i_{[\max]}$ 共同确定下一次章动跟踪的收敛过程,具体流程如图 4 所示。

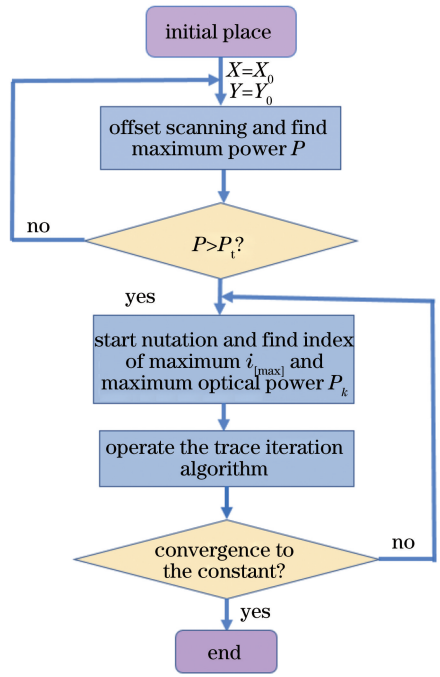


图 4 本算法的流程图

Fig. 4 Flow chart of our algorithm

通过光功率峰值和比例-积分-微分(PID)控制算法得到振镜下一次跟踪的执行量 u ,可表示为

$$u = A [K_p (P_0 - P_k) +$$

$$K_i \sum_{k=1}^i (P_0 - P_k) + K_d (P_k - P_{k-1})], \quad (1)$$

式中, P_0 为理想耦合效率对应的光功率, K_p 、 K_i 、 K_d 分别为 PID 算法的比例增益、积分增益、微分增益。不断重复(1)式的步骤,直到光功率收敛到较高的数值且波动较小,由 $i_{[\max]}$ 得到收敛方向的分量 Δx 、 Δy 可表示为

$$\begin{cases} \Delta x = \cos \frac{2\pi i_{[\max]}}{n} \\ \Delta y = \sin \frac{2\pi i_{[\max]}}{n} \end{cases} \quad (2)$$

在章动振镜跟踪过程中,振镜方位、俯仰两轴的总执行量 X 、 Y 可表示为

$$\begin{cases} X = X_0 + R \cos\left(\frac{2\pi i}{n}\right) + \sum u \Delta x \\ Y = Y_0 + R \sin\left(\frac{2\pi i}{n}\right) + \sum u \Delta y \end{cases} \quad (3)$$

3 实验验证

3.1 实验系统的搭建

搭建的实验系统及其原理如图 5 所示,其中,波长为 1550 nm 的入射光经过准直器之后发射,分别经过扰动 FSM1 和耦合 FSM2 的反射进入接收耦合透

镜中,耦合透镜将空间光耦合入单模光纤,并经过光纤分束器,一部分能量被光功率计接收,用来观察接收能量的变化,另一部分通过光衰减器后传递给光电

探测器。最后将 AD7606 芯片采集的探测器输出信号输入计算机控制算法中,实现基于 FSM 结合能量探测器的空间光到单模光纤章动耦合的闭环控制。

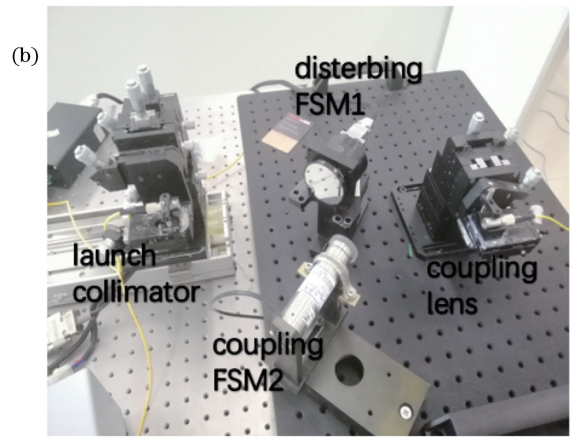
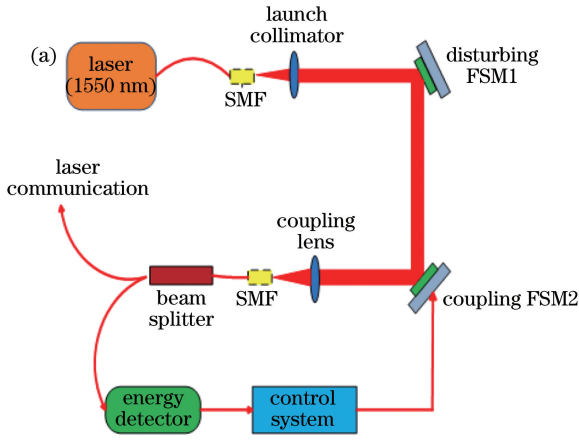


图 5 实验装置。(a)原理图;(b)实物图

Fig. 5 Experimental setup. (a) Schematic diagram; (b) physical diagram

实验中的发射端采用 OPTOCOM 公司生产的 WN03LM10-A 型激光器,发射 1550 nm 的红外光,发射功率为 -3.38 dBm,准直器为 THORLABS 公司生产的 RC08FC-P01,扰动 FSM1 为 Optics in motion LLC 公司生产的 OIM102 电磁振镜,振镜的分辨率为 2 μ rad,扰动由信号发生器产生,范围为 ± 10 V,对应的最大幅度为 26.2 mrad。耦合 FSM2 为 PI 公司生产的 PZT 振镜,型号为 S-330,两轴均可提供 5 mrad 的偏转角,分辨率为 20 nrad,探测器为 MACOM 公司生产的 LDPW-0012,探测带宽为 12 M。采集芯片为 ADI 公司生产的 AD7606 芯片,最大采样频率 200 kHz。

3.2 动态扰动实验与结果分析

用搭建好的章动实验平台进行章动跟踪动态实验,由 FSM1 引入一定频率、幅值的正弦信号作为扰动量,通过 FSM2 进行跟踪耦合。主要测量了章动收敛过程中的光功率变化,研究了系统在开环和闭环情况下,光电探测器接收光功率及耦合效率的变化情况,分析了系统的动态性能指标与偏差补偿效果。实验选取的章动耦合系统性能参数如表 1 所示,其中,章动半径、收敛步长以及采样点数等参数是

表 1 章动耦合系统的参数

Table 1 Parameters of nutation coupling system

Index	Typical value
Nutation radius / μ m	0.43
Convergence step / μ m	0.52
Sampling number / point	50
Responding speed / Hz	40
Capture range / mrad \times mrad	8 \times 8

多次实验测量得到系统耦合性能最好时的最优值。

3.2.1 章动收敛过程中光功率的变化

章动收敛过程中光电探测器接收光功率的变化情况如图 6 所示,可以发现,开始阶段光斑几乎完全偏离芯径,因此,进入光电探测器的光功率几乎为零;不断控制振镜做章动扫描,用获得的峰值功率作为反馈进行跟踪,使光斑迅速向光纤中心收敛。且从章动开始到收敛约 10 ms,这表明章动跟踪算法具有较好的跟踪能力与较短的动态响应时间。

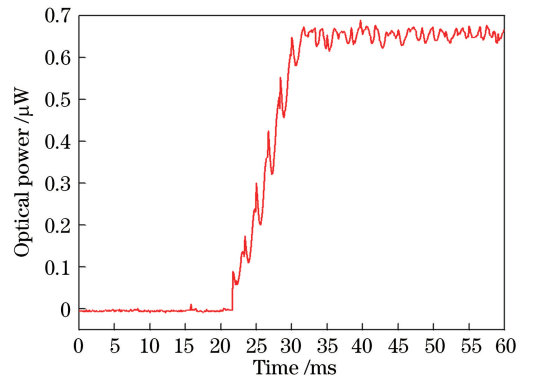


图 6 章动收敛过程中的光功率变化

Fig. 6 Optical power change during nutation convergence

3.2.2 系统闭环跟踪状态下的耦合范围

通过电磁振镜 FSM1 引入不同幅度的扰动,通过光功率计测量接收端的耦合效率,如图 7 所示。可以发现,当扰动幅度小于 1.1 mrad 时,章动跟踪系统的耦合效率较高,平均耦合效率达到 62.4%;当扰动幅度大于 1.1 mrad 时,系统无法闭环,此时光纤的芯径完全偏离聚焦光斑,耦合效率为 0。

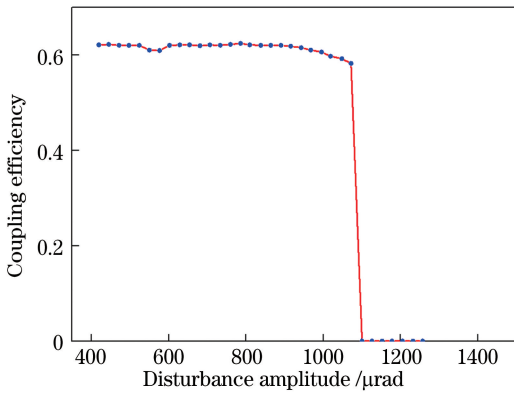


图 7 系统跟踪状态下的耦合范围

Fig. 7 Coupling range under system tracking state

3.2.3 开环和闭环状态下探测器的接收光功率
分别对系统引入幅度为0.786 mrad、频率为

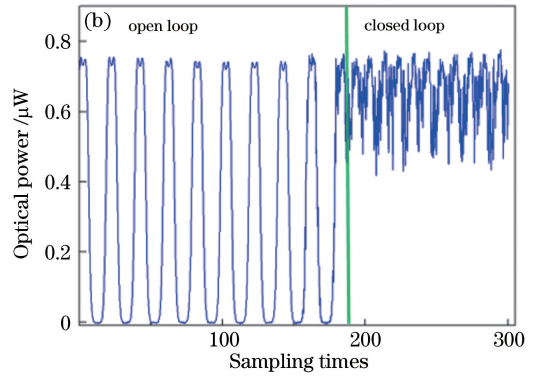
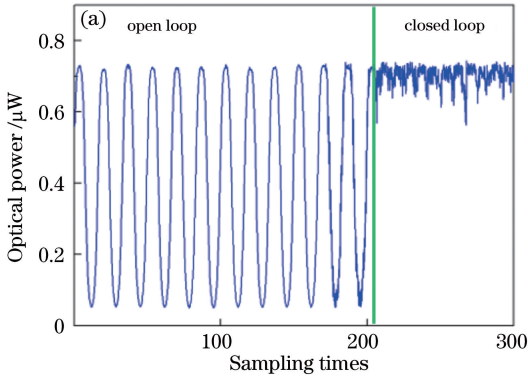


图 8 不同扰动时光电探测器的接收光功率。(a)扰动 1;(b)扰动 2

Fig. 8 Received optical power of the photodetector under different disturbances.

(a) Disturbance1; (b) disturbance2

3.2.4 不同扰动条件下系统的开闭环耦合效率

利用章动跟踪迭代算法,对系统在不同角度误差扰动下进行了跟踪,测得的耦合效率如图 9 所示。可以发现,当系统的扰动幅度分别为 262,524,655,786 μrad 时,系统开环时的平均耦合效率分别为 56.2%,49.4%,41.6%,35.2%,闭环后的平均耦合

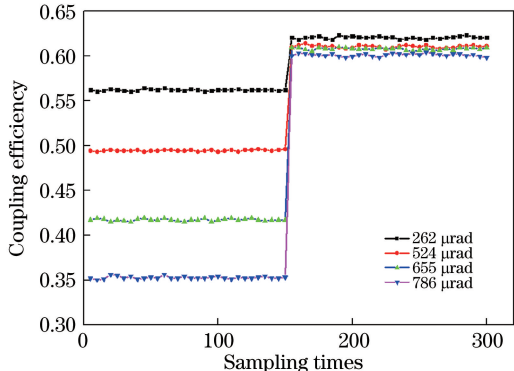


图 9 不同角度误差下的耦合效率

Fig. 9 Coupling efficiency under different angle errors

2 Hz(扰动 1)和幅度为 1.1 mrad、频率为 2 Hz(扰动 2)的正弦扰动,得到系统开环和闭环条件下光电探测器的接收光功率变化情况,如图 8 所示。可以发现,开环条件下光电探测器的接收光功率是一个连续变化的正弦曲线,均方误差较大,扰动 1 和扰动 2 情况下分别为 6.87%和 9.91%。这表明未加章动跟踪迭代算法时,光斑在光纤接收端面做正弦运动,耦合效果较差;在闭环的状态下,光电探测器输出的能量较高且均方误差较小,扰动 1 和扰动 2 情况下分别为 0.078%和 0.81%,对应的耦合效率分别为 61.1%和 55.8%。这表明随着扰动幅度的增加,会导致耦合效率略有下降。综上所述,所提出的章动跟踪算法可以很好地校正大幅度扰动。

效率均提高到 60%左右,这表明所提出的跟踪算法可以很好地校正大幅度扰动。

3.3 系统在不同信噪比下的实验

为了验证低信噪比对章动耦合性能的影响,将发射端发射的光功率进行衰减,降低耦合到接收端的光功率,同时在系统中引入随机噪声,得到不同信噪比下章动收敛过程中探测器接收的光功率、章动跟踪后系统的平均耦合效率,如图 10、图 11、图 12 所示。可以发现,当信噪比为 13.1 dB 时,章动收敛性能较好,此时平均耦合效率约为 52.3%;当信噪比为 7.9 dB 时,章动收敛过程正常进行,但收敛时间较长,此时的耦合效率降为 49.1%,这表明降低信噪比会降低系统的耦合效率。当信噪比降为 4.6 dB 时,信号光完全湮没在噪声中,探测器无法得到峰值功率,系统失去反馈量,使耦合算法失效,此时平均耦合效率在 10% 以下。

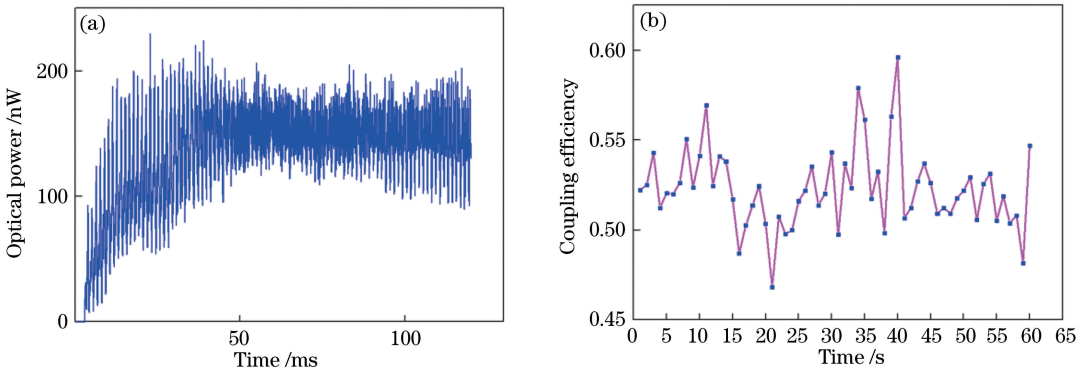


图 10 信噪比为 13.1 dB 时的测试结果。(a)探测器的接收功率;(b)系统的平均耦合效率

Fig. 10 Test results when the signal-to-noise ratio is 13.1 dB. (a) Power received by the detector;
(b) average coupling efficiency of the system

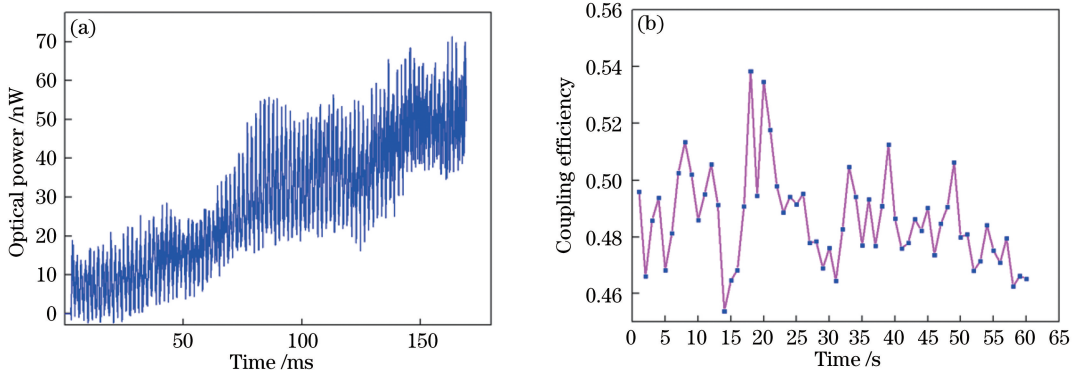


图 11 信噪比为 7.9 dB 时的测试结果。(a)探测器的接收功率;(b)平均耦合效率

Fig. 11 Test results when the signal-to-noise ratio is 7.9 dB. (a) Power received by the detector;
(b) average coupling efficiency of the system

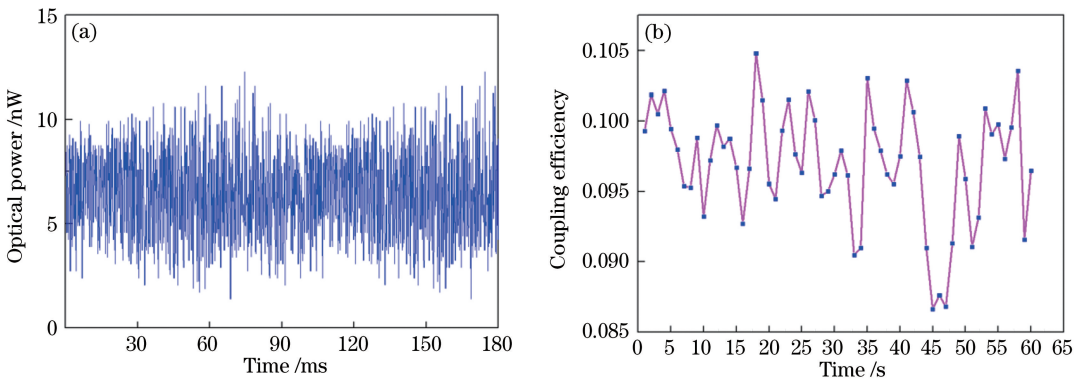


图 12 信噪比为 4.6 dB 时的测试结果。(a)探测器的接收功率;(b)平均耦合效率

Fig. 12 Test results when the signal-to-noise ratio is 4.6 dB. (a) Power received by the detector;
(b) average coupling efficiency of the system

4 结 论

为了提高空间光到单模光纤的耦合效率,提出了一种基于峰值功率反馈的章动跟踪算法,并对该算法进行了实验验证。结果表明,系统跟踪状态下的最大耦合范围为 1.1 mrad,耦合效率能达到

50%。分析了系统开环和闭环状态下探测器输出的光功率和接收端耦合效率的变化情况,结果表明,所提出的跟踪算法可以很好地校正扰动,且稳态误差较小。本研究可为基于激光章动的单模光纤耦合技术提供理论依据和实验支撑,但基于峰值功率反馈的算法容易受到信噪比的限制,因此,后续研究中还

需提高算法在低信噪比下的可行性。

参 考 文 献

- [1] Ma X P, Sun J F, Hou P P, et al. Research progress on overcoming the atmospheric turbulence effect in satellite-to-ground laser communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12): 120002.
马小平, 孙建锋, 侯培培, 等. 星地激光通信中克服大气湍流效应研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(12): 120002.
- [2] Fu Q, Jiang H L, Wang X M, et al. Research status and development trend of space laser communication [J]. *Chinese Optics and Applied Optics Abstracts*, 2012, 5(2): 116-125.
付强, 姜会林, 王晓曼, 等. 空间激光通信研究现状及发展趋势[J]. *中国光学*, 2012, 5(2): 116-125.
- [3] Li S H, Chen X M, Ni G Q. Highly precise ground certification system of satellite laser communication [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(5): 1149-1158.
李少辉, 陈小梅, 倪国强. 高精度卫星激光通信地面验证系统[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(5): 1149-1158.
- [4] Hashmi A J, Eftekhari A A, Adibi A, et al. Analysis of telescope array receivers for deep-space interplanetary optical communication link between Earth and Mars [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(10): 2032-2042.
- [5] Wu W R, Chen M, Zhang Z, et al. Overview of deep space laser communication [J]. *Science China Information Sciences*, 2017, 61(4): 040301.
- [6] Lei S C, Ke X Z. Coupling efficiency of lens array spatial light in turbulence [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 0605004.
雷思琛, 柯熙政. 大气湍流中透镜阵列的空间光耦合效率研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0605004.
- [7] Xiang J S. Fiber coupled and optically preamplified satellite-to-ground bidirectional laser communication systems and its key technologies [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007: 9-12.
向劲松. 采用光纤耦合及光放大接收的星地光通信系统及关键技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2007: 9-12.
- [8] Zhang S Q, Zhang Z, Cai L, et al. Laser injecting method from free space beam to single-mode fiber using single lens[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(3): 31006.
- [9] Swanson E A, Bondurant R S. Using fiber optics to simplify free-space lasercom systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, 1218: 70-82.
- [10] Knibbe T E, Swanson E A, Roberge J K. Spatial tracking using an electro-optic nutator and a single-mode optical fiber [J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1635: 309-317.
- [11] Weyrauch T, Vorontsov M A, Gowens J, et al. Fiber coupling with adaptive optics for free-space optical communication [J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4489: 177-184.
- [12] 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.
- [13] 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.
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.
- [14] Zhang R C, Wang J M, Zhao G, et al. Fiber-based free-space optical coherent receiver with vibration compensation mechanism[J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 18434-18441.
- [15] Li F, Geng C, Li X Y, et al. Co-aperture transeiving of two combined beams based on adaptive fiber coupling control [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(17): 1787-1790.
- [16] 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.
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.
- [17] 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.
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.
- [18] 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.
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.
- [19] Zhao B Q, Meng L X, Yu X N, et al. Spatial light to single-mode fiber nutation coupling technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1105001.
赵佰秋, 孟立新, 于笑楠, 等. 空间光到单模光纤章

- 动耦合技术研究[J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1105001.
- [20] Song W, Liu H H, Pang F F, et al. Excitation of high-order optical vortex modes by tilting tapered and lensed single mode fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0906001.
宋巍, 刘奂奂, 庞拂飞, 等. 倾斜锥形微透镜单模光纤激发高阶涡旋光模式[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0906001.
- [21] Zhang B, Peng Z T, Sun Z H, et al. Frequency-modulated pulse waveform measurement based on lens array and fiber bundle [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0301004.
张波, 彭志涛, 孙志红, 等. 基于阵列透镜和光纤集束的调频脉冲波形测试技术[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0301004.