

# 基于能量反馈的单模光纤激光章动耦合算法

朱世伟<sup>1,2</sup>, 盛磊<sup>1</sup>, 刘永凯<sup>1,2\*</sup>, 张玉良<sup>1</sup>, 高世杰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光电探测技术研究部, 吉林 长春 130039;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 基于模场匹配原理,分析了倾斜像差对耦合效率的影响,并在理论分析的基础上,对激光章动跟踪方法进行了仿真分析,研究了章动算法参数对算法动态性能的影响。利用快速反射镜和 PIN(Positive-Intrinsic-Negative)光电二极管对仿真分析结果进行实验验证。结果表明,章动半径与收敛速度成反比,同时半径增大会引起稳态振荡幅度增大,而采样点数的增多会导致算法收敛速度下降。此外,所提算法对一定范围内的动态扰动有明显的抑制作用。

**关键词** 光通信;自由空间光通信;单模光纤耦合;激光章动;能量反馈;快速反射镜

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0206001

## Laser Nutation Coupling Algorithm for Single Mode Fiber Based on Energy Feedback

Zhu Shiwei<sup>1,2</sup>, Sheng Lei<sup>1</sup>, Liu Yongkai<sup>1,2\*</sup>, Zhang Yuliang<sup>1</sup>, Gao Shijie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Photoelectric Detection Research Department, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130039, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Based on the principle of mode field matching, we analyze the influence of tilt aberration on coupling efficiency, and then the laser nutation tracking method is simulated and analyzed according to theoretical analysis. The simulation results are verified by experiments based on fast steering mirror and PIN (Positive-Intrinsic-Negative) photodiode. The results show that the nutation radius is inversely proportional to the convergence rate, and the steady-state oscillation amplitude increases with the increasing radius, while the convergence rate decreases with the increase of the number of sampling points. In addition, the proposed algorithm can significantly suppress the dynamic disturbance in a certain range.

**Key words** optical communications; free space optical communication; single mode fiber coupling; laser nutation; power feedback; fast steering mirror

**OCIS codes** 060.4510; 060.1810; 070.6020

## 1 引 言

自由空间光通信作为一种新兴的通信技术,以其高带宽、高保密性、无频段许可等优点成为研究热点<sup>[1-5]</sup>。在光通信过程中,空间光-单模光纤耦合对于后续信号放大、解调等光信号处理具有重要的意义。在实际通信链路中,接收端平台抖动或大气湍流干扰<sup>[6]</sup>等因素会引起信号抖动,造成远场接收端耦合光场与光纤模场的失配,使得光纤耦合效率降低,进而严重影响通信质量。为提高空间光-单模光

纤的耦合效率及稳定性,一般会在精跟踪系统后部署光纤耦合子系统。

目前国内外对空间光-单模光纤耦合技术的研究已经有了一定成果。1990年 Swason 等<sup>[7]</sup>提出了一种光纤章动的有源耦合方案,该方案结构简单,其跟踪带宽为 1 kHz,耦合效率为 63%;1992年 Knibbe 等<sup>[8]</sup>又提出基于电光调制器的章动方案,该方案控制频率高,但电光调制器也导致光束功率衰减,并引入了像差;2002年 Weyrauch 等<sup>[9]</sup>采用微机械变形镜作为校正器件,采用随机并行梯度下降算

收稿日期: 2018-08-17; 修回日期: 2018-10-08; 录用日期: 2018-10-29

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(11603024)、中国科学院科研装备研制项目

\* E-mail: liuyongkai\_ciomp@163.com

法 (SPGD) 实现的空间激光到单模光纤的耦合效率为 60%，但该算法收敛速度慢。杨慧珍等<sup>[10-13]</sup>对 SPGD 算法进行了理论研究；2014 年罗文等<sup>[14]</sup>采用自适应光纤耦合器 (AFC)，搭建了基于 SPGD 算法的闭环控制系统，将耦合效率提高到了 61.72%；2016 年高建秋等<sup>[15]</sup>使用激光章动方法搭建耦合系统，该系统将存在扰动的光束耦合效率提高了 6.5%，响应速度为 40 Hz。2017 年黄冠等<sup>[16]</sup>提出基于 FPGA (Field-Programmable Gate Array) 平台的光纤耦合方案，利用 SPGD 算法实现了 150 Hz 的校正带宽。

激光章动是一种简单有效的光纤耦合算法，但目前缺少对该算法的实验研究。本文基于模场匹配原理分析了倾斜像差对耦合效率的影响，在此基础上仿真分析了激光章动的参数选择对算法稳定性和收敛速度的影响，并通过实验对分析结果加以验证。

## 2 基本理论

空间光-单模光纤耦合原理如图 1 所示。发射端发出的光束经接收端光学系统会聚后，落在焦平面上形成一个艾里斑，而单模光纤的模场可以近似为高斯分布，当艾里斑中心与光纤的模场中心重合时，耦合进单模光纤的光信号功率达到最大。图 1 中  $D$  为光束直径， $f$  为透镜的焦距， $\omega_0$  为单模光纤模场半径，入瞳平面记为 A 平面，焦平面记为 B 平面。耦合效率的计算公式<sup>[17]</sup>为

$$\eta_A = \frac{\left| \iint_A E_A^*(\rho, \theta) F_A(\rho, \theta) d\rho d\theta \right|^2}{\iint_A |E_A(\rho, \theta)|^2 d\rho d\theta \iint_A |F_A(\rho, \theta)|^2 d\rho d\theta}, \quad (1)$$

式中： $E_A(\rho, \theta)$  为 A 平面上的光场分布，可以表示为

$$E_A = E_S \exp[j\phi(\rho, \theta)], \quad (2)$$

式中： $E_S$  代表光的幅值分布； $\phi(\rho, \theta)$  表示相位分布，其中  $\rho$  和  $\theta$  分别为极坐标的极径和极角。由于相位畸变对耦合效率的影响远大于幅值，这里把  $E_S$  当作常值。 $F_A(\rho, \theta)$  表示在 A 平面反向计算得到的光纤等效模场，可以表示为

$$F_A(\rho, \theta) = \sqrt{\frac{2}{\pi\omega_a^2}} \exp\left(-\frac{\rho^2}{\omega_a^2}\right), \quad (3)$$

式中： $\omega_a$  表示 A 平面上等效的光纤模场半径，可表示为  $\omega_a = \lambda f / (\pi\omega_0)$ ，其中  $\lambda$  为入射光束波长， $f$  为耦合透镜焦距， $\omega_0$  表示光纤模场半径。将 (2)、(3) 式代入 (1) 式中，可得

$$\eta_A = \left| \iint_A \sqrt{\frac{2}{\pi\omega_a^2}} \exp\left[-\frac{\rho^2}{\omega_a^2} - j\phi(\rho, \theta)\right] d\rho d\theta \right|^2 = \frac{2}{\pi\omega_a^2} (a_{\text{real}}^2 + a_{\text{imag}}^2), \quad (4)$$

$$\text{式中：} a_{\text{real}} = \iint_A \exp(-\rho^2/\omega_a^2) \cos[\phi(\rho, \theta)] d\rho d\theta; a_{\text{imag}} = \iint_A \exp(-\rho^2/\omega_a^2) \sin[\phi(\rho, \theta)] d\rho d\theta.$$

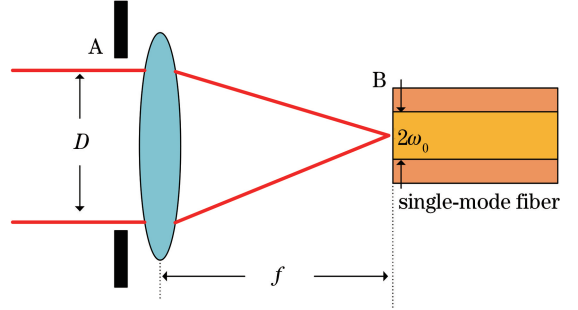


图 1 光纤耦合原理示意图

Fig. 1 Diagram of fiber coupling principle

在自适应光学系统中，一般采用泽尼克多项式来分解具有畸变的波前， $\phi(\rho, \theta)$  可以展开为

$$\phi(\rho, \theta) = a_0 + a_1 Z_1(\rho, \theta) + a_2 Z_2(\rho, \theta) + \sum_{i=3}^{\infty} a_i Z_i(\rho, \theta), \quad (5)$$

式中： $Z_i(\rho, \theta)$  表示第  $i$  个泽尼克项； $a_i$  表示对应的系数。泽尼克多项式中，第 0 项代表波前的平移，其对耦合效率没有影响；第 1 项和第 2 项分别代表水平和竖直方向的倾斜像差，快速反射镜能够对倾斜像差进行校正。在湍流引起的光波畸变中，整体倾斜误差占全部畸变的 87% 左右，前 10 阶泽尼克像差占 96.11%<sup>[18]</sup>。将 (5) 式中的相位项代入 (4) 式中，可以得到  $a_1$  与  $a_2$  对耦合效率的影响，如图 2 所示。

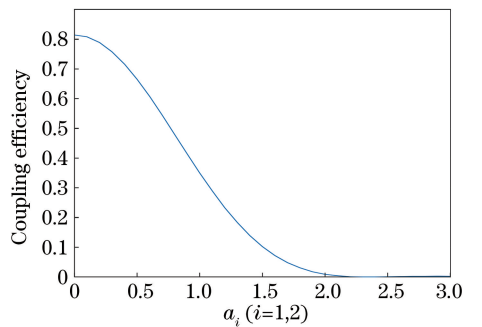


图 2 耦合效率与系数  $a_i$  ( $i=1, 2$ ) 之间的关系

Fig. 2 Coupling efficiency versus  $a_i$  ( $i=1, 2$ )

## 3 算法仿真

激光章动是一种简单易行的光纤耦合算法，其

原理是通过圆形遍历扫描确定一个功率更大的位置,以固定步长移动扫描中心并进行下一次扫描,进行若干次扫描之后,可最终收敛到一个全局的最优位置,使得耦合效率达到最大。具体流程如下:

1) 初始化扫描中心位置  $X_{center}$  和  $Y_{center}$ 、章动半径  $r$  以及一周采样点数  $n$ 。

2) 输出控制量  $X' = X_{center} + r \cos(2\pi m/n)/K$ ,  $Y' = Y_{center} + r \sin(2\pi m/n)/K$  ( $m = 0, 1, \dots, n-1$ ), 其中  $K$  为章动半径与快反镜控制量的变换系数,单位为  $\mu\text{m}/\text{V}$ 。对每个位置分别进行采样,记录达到最大耦合效率的位置  $(X_{best}, Y_{best})$ 。

3) 移动扫描中心,  $X_{center} = X_{best}, Y_{center} = Y_{best}$ 。

4) 重复步骤 2) 和步骤 3)。

由于全部光波畸变误差中绝大部分为前 10 阶

泽尼克像差,故仿真采用前 10 阶泽尼克项模拟畸变波前,采用某次外场实测得到的泽尼克项系数,系数向量为  $(1.5, 1.5, 0.34, 0.2, 0.15, 0.12, 0.13, 0.16, 0.08, 0.09)$ ,其他的参数分别为:波长  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ,焦距  $f = 0.71 \text{ m}$ ,模场半径  $\omega_0 = 5.2 \mu\text{m}$ ,光束直径  $D = 0.15 \text{ m}$ 。校正前的波前相位分布如图 3(a) 所示,校正后的波前相位分布如图 3(b) 所示,横纵轴为归一化坐标,峰谷值  $d_{pv}$  由 3.9867 减小为 1.3346,均方根值  $x_{rms}$  由 2.7115 减小为 0.5432,可以看出波前具有明显的校正。为方便观察,将仿真中出现的最大耦合效率作为 1。在仿真过程中,以泽尼克系数的变化来模拟倾斜像差的改变,章动半径  $r$  采用泽尼克系数的数值等效,记为  $r_e$ 。

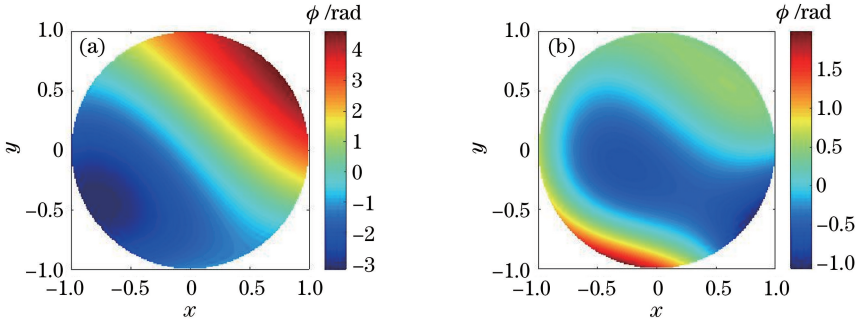


图 3 波前。(a)校正前;(b)校正后

Fig. 3 Wavefront. (a) Before compensation; (b) after compensation

图 4(a) 中  $n$  取 8 不变,  $r_e$  分别取 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 可以看出,收敛时的迭代次数分别约为 330, 160, 110, 86,  $r_e$  和收敛速度呈正相关,  $r_e$  越大,迭代中的功率波动越严重,即算法的收敛速度和平

稳是矛盾的。图 4(b) 所示的是  $r_e$  取 0.1 不变,  $n$  分别取 4, 8, 12, 16 的仿真结果,收敛时迭代次数分别约为 118, 166, 259, 330。可以看出  $n$  和收敛速度呈负相关,同时  $n$  的取值对迭代中的功率波动影响不大。

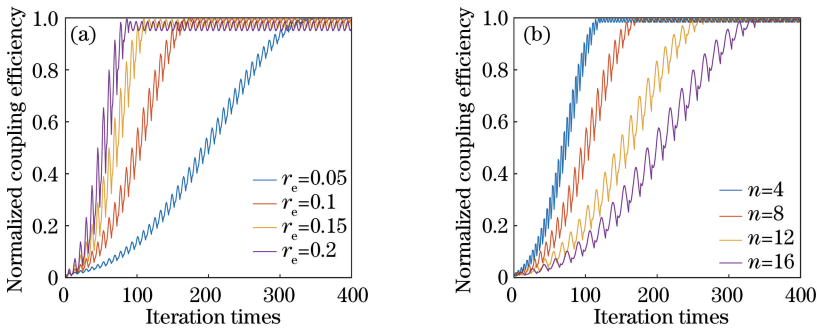


图 4 迭代次数与归一化耦合效率间的关系。(a)  $n=8$ ;(b)  $r_e=0.1$

Fig. 4 Relationship between iteration times and normalized coupling efficiency. (a)  $n=8$ ; (b)  $r_e=0.1$

## 4 实验验证

### 4.1 系统搭建

实验搭建的光路原理图如图 5(a) 所示,实物图如图 5(b) 所示。激光器采用加拿大 TeraXion 公司

的 PS-NLL-E-1549.32;耦合 FSM 采用美国 PI 公司的 S-330,扰动 FSM 采用美国 Newport 公司 FSM-300;能量传感器采用 PIN 光功率计,实验测得输出电压与输入光功率呈线性关系,其线性系数为 39.475 V/mW;光纤纤芯直径为  $9 \mu\text{m}$ ;控制器为美

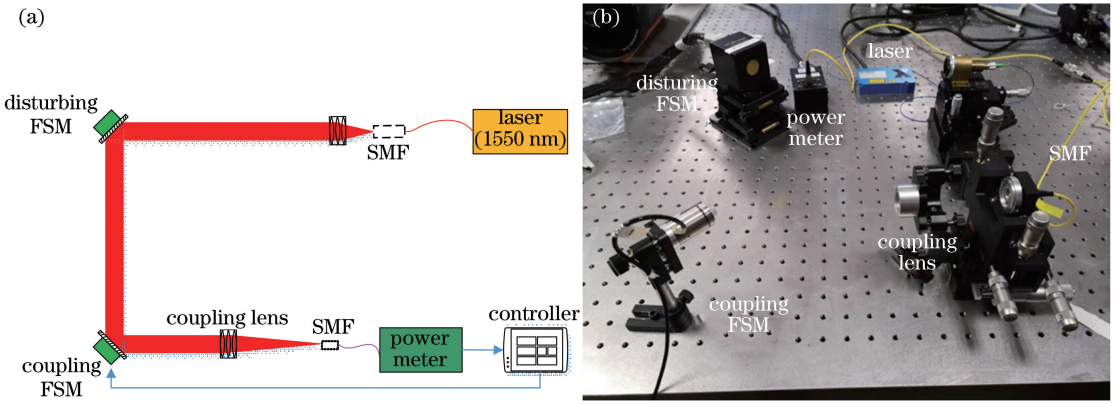


图 5 实验装置。(a)实验原理图;(b)实验系统实物图

Fig. 5 Experimental setup. (a) Scheme of experiment; (b) picture of experimental system

国 TI 公司 TMS320F2812 和 ALTERA 公司的 EP4C30F23 组成的控制板。

#### 4.2 静态像差实验结果与分析

静态实验中,扰动 FSM 保持静止,向耦合 FSM 的两个轴分别输出控制量,由中心位置向外偏移约 45 rad,由该位置开始向中心位置迭代,进行静态归零实验。实验中多次改变算法的参数组合,研究章动半径  $r$  和采样点数  $n$  对算法收敛速度和稳定性的影响。

实验首先验证算法的有效性,实验结果如图 6

所示,可以看出,取不同参数时,该算法最终都能收敛到最大功率,激光器功率波动等外界干扰使得最大功率值存在一定差异。图 6(a)所示为  $n=8$  时, $r$  分别取不同值时的实验结果,图 6(b)所示为  $r=0.88 \mu\text{m}$  时, $n$  取不同值时的实验结果,分别对应图 4(a)、(b)的仿真结果。通过对比可得:随着  $r$  的增大,算法收敛加快,但同时稳态时功率振荡变大;随着  $n$  的增大,算法收敛变慢,振荡无明显变化。

进一步改变  $r$  和  $n$  与迭代次数、稳态振荡幅度等参数组合,所得实验结果如图 7 的曲线所示。从

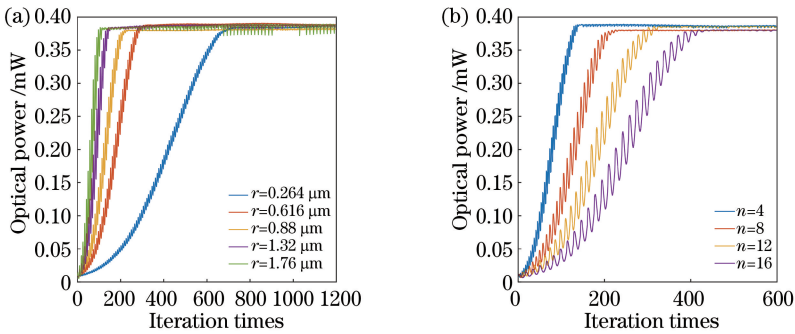


图 6 实验结果。(a)  $n=8$ ;(b)  $r=0.88 \mu\text{m}$

Fig. 6 Experimental results. (a)  $n=8$ ; (b)  $r=0.88 \mu\text{m}$

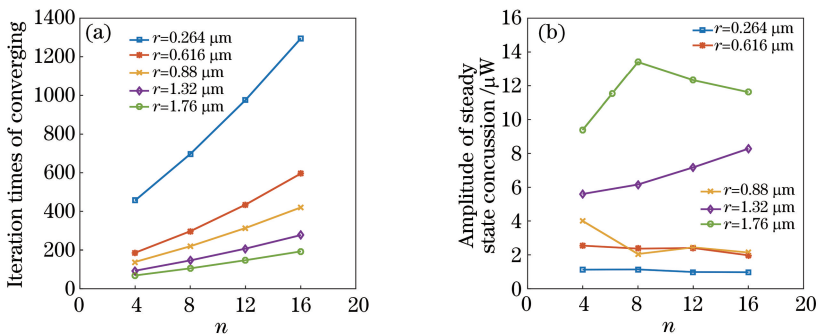


图 7 算法性能随  $r$  和  $n$  变化的曲线。(a)收敛迭代次数;(b)稳态振荡幅度

Fig. 7 Changing curves of algorithm performance with  $r$  and  $n$ . (a) Iteration times when converging; (b) tremor amplitude after converging



图 7(a)中可以看出,对于同样大小的章动半径  $r$ ,迭代次数均与  $n$  近似呈线性关系,且存在如下关系:在  $r=r_0$  条件下, $n=n_0$  时迭代次数  $k=k_0$ , $r=2r_0$  时迭代次数  $k<2k_0$ ;对于同样的采样点数  $n$ ,迭代次数与  $r$  近似呈反比关系,如  $n=16$  时的收敛次数分别为:1295,596,420,277,193。观察图 7(b),可以发现对于固定的  $r$ ,外部环境变化使得振荡幅度存在随机变化,稳态振荡幅度随采样点数  $n$  没有明显变化规律;对于确定的  $n$ ,稳态振荡幅度一般随章动半径  $r$  的增大而增大。这也再一次验证了仿真结论的正确性。

因此,在实际应用中,为保证算法的收敛速度,尽可能减少采样点数  $n$ ,以获得较少的迭代次数。而章动半径  $r$  的选择应权衡算法的收敛速度和稳态时的稳定性,根据需要选择合适的半径。

### 4.3 动态扰动实验及分析

为研究算法参数不同时对动态扰动的抑制能力,以 FSM2 作为扰动源,向  $x$  轴方向输入一定频率和幅值正弦信号以模拟扰动。在 4.2 节中可以看出采样点数  $n$  的增大减弱了系统响应速度,所以在

动态实验中默认  $n=4$ ,不再考虑  $n>4$  的情况。这里定义  $H$  为扰动控制电压幅值,单位为 V; $T$  为扰动信号周期,为方便与算法进行比较,取单位为采样次数;在不加校正的条件下,光功率变化的峰值记为  $d_{pv1}$ ,加入校正后的光功率变化峰值记为  $d_{pv2}$ ,最终的评价指标扰动抑制比  $\eta$  定义为

$$\eta = 20 \lg \frac{d_{pv1}}{d_{pv2}} \quad (6)$$

分别改变章动半径  $r$ ,扰动幅值  $H$ ,扰动周期  $T$ ,得到的实验结果如图 8 所示,计算得到抑制比分别为 20.5573 dB、15.0121 dB、12.394 dB 和 13.6358 dB。

在图 8(a)的条件下增大章动半径,得到图 8(b),分别增大扰动幅值、减小扰动周期得到图 8(c)、(d)。在图 8(a)的条件下,系统对动态扰动有较好的抑制效果,在图 8(b)条件下,系统有效抑制扰动,但抑制比下降,出现了功率振荡增大现象,而图 8(c)、(d)都出现了明显的功率波动,校正效果较差。可以看出章动算法可以对一定频率和幅值范围内的动态干扰进行抑制,但超出范围后抑制效果下降。

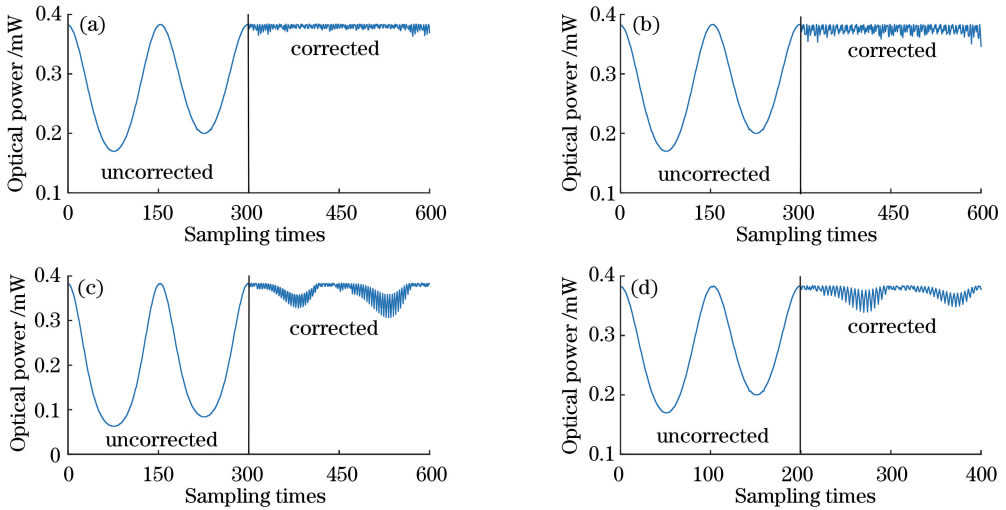


图 8 不同实验条件下的校正结果。(a)  $H=1.2$  V,  $T=300$ ,  $r=0.88 \mu\text{m}$ ; (b)  $H=1.2$  V,  $T=300$ ,  $r=1.32 \mu\text{m}$ ;  
(c)  $H=1.8$  V,  $T=300$ ,  $r=0.88 \mu\text{m}$ ; (d)  $H=1.2$  V,  $T=200$ ,  $r=0.88 \mu\text{m}$

Fig. 8 Correction results under different experimental conditions. (a)  $H=1.2$  V,  $T=300$ ,  $r=0.88 \mu\text{m}$ ; (b)  $H=1.2$  V,  $T=300$ ,  $r=1.32 \mu\text{m}$ ;  
(c)  $H=1.8$  V,  $T=300$ ,  $r=0.88 \mu\text{m}$ ; (d)  $H=1.2$  V,  $T=200$ ,  $r=0.88 \mu\text{m}$

## 5 结 论

空间激光通信中,由于平台振动、大气湍流等干扰,需要部署光纤耦合系统以保证耦合效率。基于能量反馈,对激光章动进行仿真和实验研究,分析了章动参数变化对算法性能的影响。实验结果显示:随着章动半径的增大或扫描一周采样点的减少,算

法的迭代次数都会随之减少;而章动半径的增大同时会引起稳态振荡的加大,这为所提算法的稳定性带来负面影响,且该算法对一定范围内的动态扰动有明显抑制作用。为得到抑制的定量关系,需要大量实验研究,这也是今后的研究方向。

### 参 考 文 献

[1] Wu C J, Yan C X, Gao Z L. Overview of space laser

- communications[J]. Chinese Optics, 2013, 6(5): 670-680.
- 吴从均, 颜昌翔, 高志良. 空间激光通信发展概述[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 670-680.
- [2] Fu Q, Jiang H L, Wang X M, *et al.* Research status and development trend of space laser communication [J]. Chinese Optics, 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] Zeng F, Gao S J, San X G, *et al.* Development status and trend of airborne laser communication terminals[J]. Chinese Optics, 2016, 9(1): 65-73.
- 曾飞, 高世杰, 伞晓刚, 等. 机载激光通信系统发展现状与趋势[J]. 中国光学, 2016, 9(1): 65-73.
- [5] Xu C F, Ni X L, Liu Z. Scintillation in turbulent atmosphere laser communication [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(10s): 183-189.
- 徐春风, 倪小龙, 刘智. 激光大气湍流传输中的光强闪烁特性[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10s): 183-189.
- [6] Ding K, Huang Y M, Ma J G, *et al.* Composite control of fast-steering-mirror for beam jitter [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(9): 1991-1998.
- 丁科, 黄永梅, 马佳光, 等. 抑制光束抖动的快速反射镜复合控制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 1991-1998.
- [7] Swanson E A, Bondurant R S. Using fiber optics to simplify free-space lasercom systems[J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1218: 70-83.
- [8] 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: 309-318.
- [9] 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: 177-185.
- [10] Yang H Z, Li X Y, Jiang W H. Applications of adaptive optics technology in atmospheric laser communications system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(10): 61-68.
- 杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学技术在大气光通信系统中的应用进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(10): 61-68.
- [11] Yang H Z, Chen B, Li X Y, *et al.* Experimental demonstration of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(2): 205-210.
- 杨慧珍, 陈波, 李新阳, 等. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法实验研究[J]. 光学学报, 2008, 28(2): 205-210.
- [12] Yang H Z, Li X Y, Jiang W H. Comparison of several stochastic parallel optimization control algorithms for adaptive optics system [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(1): 11-16.
- 杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统几种随机并行优化控制算法比较[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(1): 11-16.
- [13] Yang H Z, Cai D M, Chen B, *et al.* Analysis of adaptive optics techniques without a wave-front sensor and its application in atmospheric laser communications [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(5): 680-684.
- 杨慧珍, 蔡冬梅, 陈波, 等. 无波前传感自适应光学技术及其在大气光通信中的应用[J]. 中国激光, 2008, 35(5): 680-684.
- [14] Luo W, Geng C, Li X Y. Simulation and experimental study of single-mode fiber coupling efficiency affected by atmospheric turbulence aberration[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0606001.
- 罗文, 耿超, 李新阳. 大气湍流像差对单模光纤耦合效率的影响分析及实验研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0606001.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Ma L. Research on probability distribution for efficiency of spatial light coupling into a single-mode fiber in the presence of atmospheric turbulence[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 17-19.
- 马烈. 大气湍流对空间光至单模光纤耦合效率概率分布影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 17-19.
- [18] Noll R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence [J]. Journal of the Optical Society of America, 1976, 66(3): 207-211.