

# 基于激光章动的空间光到单模光纤的耦合方法

高建秋<sup>1,2,3</sup> 孙建锋<sup>1</sup> 李佳蔚<sup>1,2</sup> 朱 韧<sup>1</sup> 侯培培<sup>1</sup> 陈卫标<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

<sup>3</sup>上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 200120

**摘要** 基于模场匹配原理,分析了耦合效率与抖动幅度、艾里斑半径和单模光纤模场半径比值的关系。为了减小随机角抖动对耦合效率的影响,提出了基于激光章动的空间光到单模光纤的自动耦合方案,利用数据采集卡算出脱靶量并输出补偿电压。分析了算法精度的影响因素、激光章动信号频率与抖动频率的关系,用 Matlab 仿真及实验验证了算法的可行性。实验得到脱靶量角度精度约为  $3 \mu\text{rad}$ ,结合空间激光通信系统验证了系统的可行性。没有扰动时系统的耦合效率为 67%;引入扰动并用控制系统进行扰动补偿后,系统的耦合效率提高了 6.5%,响应速度为 40 Hz。耦合系统结构简单,控制算法精度高,控制器信号处理速度快,对空间光到单模光纤的耦合具有重要意义。

**关键词** 光通信; 光纤耦合; 指向误差; 激光章动; 数据采集卡

**中图分类号** TN929.12

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0801001

## Coupling Method for Making Space Light into Single-Mode Fiber Based on Laser Nutation

Gao Jianqiu<sup>1,2,3</sup> Sun Jianfeng<sup>1</sup> Li Jiawei<sup>1,2</sup> Zhu Ren<sup>1</sup> Hou Peipei<sup>1</sup> Chen Weibiao<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Space Laser Information Transmission and Detection Technology,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

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

<sup>3</sup>School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 200120, China

**Abstract** Based on the theory of mode-field matching, the relationship between coupling efficiency and jitter amplitude, radius ratio of Airy disk and single-mode fiber mode field is analyzed. In order to reduce the effect of random angle jitter on coupling efficiency, an automatic coupling scheme for making space light into single-mode fiber based on laser nutation is designed. The miss distance is calculated by data acquisition card and the offset voltage is output. The influence factors of algorithm precision and the relationship between laser nutation signal frequency and jitter frequency are analyzed. The feasibility of the algorithm is verified by Matlab simulation and experiments. Accuracy of miss distance angle is about  $3 \mu\text{rad}$  obtained by experiment. The system feasibility is verified by space laser communication system. The coupling efficiency of the system is 67% when there is no disturbance, and it is improved by 6.5% when the disturbance is introduced and the control system is used to compensate the disturbance. The system response speed reaches 40 Hz. The coupling system is simple in structure and accurate in control algorithm. The controller signal processing speed is fast, and it has a great significance on the coupling of space light to single mode optical fiber.

**Key words** optical communications; fiber coupling; pointing error; laser nutation; data acquisition card

**OCIS codes** 060.4510; 060.1810; 070.6020

**收稿日期:** 2016-02-25; **收到修改稿日期:** 2016-03-23

**作者简介:** 高建秋(1989—),女,硕士研究生,主要从事激光通信方面的研究。E-mail: gaojianqiu@siom.ac.cn

**导师简介:** 陈卫标(1969—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事激光、光电子、激光雷达及其在海洋、大气、空间等方面应用的研究。E-mail: wbchen@mail.shcnc.ac.cn(通信联系人)

# 1 引 言

空间激光通信以其发射光束窄、信息容量大、传输速度快、覆盖空间广、保密性能好等特点成为通信领域的研究热点<sup>[1-3]</sup>。单模光纤(SMF)耦合是基于光纤的激光通信系统的关键技术之一,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 耦合变得十分困难,成为多年来国内外的研究热点<sup>[4-7]</sup>。

1990 年美国麻省理工学院(MIT)林肯实验室的 Swanson 等<sup>[8]</sup>提出了一种光纤章动的有源耦合方案,该方案结构简单,系统带宽较宽,实验中系统的跟踪带宽约为 1 kHz,耦合效率为 63%;2002 年美国的 Weyranch 等<sup>[9]</sup>提出了自适应光学及随机并行梯度下降算法(SPGD)校正大气湍流的光纤耦合方案,该方案能有效提高单模光纤的耦合效率,耦合效率为 60%;2012 年日本 Takenaka 等<sup>[10]</sup>在实验中利用四象限探测器(QD)及快速反射镜(FSM)作为误差探测及误差补偿的方案,该方案结构复杂,且两子光路的搭建易引入人为误差。国内在该领域的发展相对较晚,且主要为理论研究。2007 年电子科技大学的高皓等<sup>[11]</sup>利用了压电陶瓷物镜后扫描及 5 点跟踪法方案,该方案结构简单,但是算法较复杂,大大降低了系统的带宽;2013 年北京大学的 Zhang 等<sup>[12]</sup>利用位置传感器(PSD)结合 FSM 的方案,控制器采用数字信号处理器(DSP)芯片,用比例-积分-微分(PID)算法实现了光斑的跟踪,该方案控制电路简单,但是光路较复杂;2014 年罗文等<sup>[13]</sup>利用了自适应光纤耦合器(AFC)及 SPDG 算法方案,系统结构简单,有效提高了耦合效率,但是系统带宽很低。

为了减小随机角抖动对耦合效率的影响,本文提出了基于激光章动的空间光到单模光纤的自动耦合方案,并结合 Matlab 仿真及实验验证了方案的可行性。耦合系统结构简单、控制算法精度高、控制器信号处理速度快,对空间光到单模光纤的耦合研究具有重要意义。

## 2 单模光纤耦合原理及方案

### 2.1 模场匹配基本原理

星地激光通信系统中,星上发下来的激光经过大气传输及地面光学接收系统后,最终会在光学系统的焦点处形成一个艾里斑,图 1 为光学系统简化模型<sup>[14]</sup>,图中  $w_1$  为艾里斑半径、 $w_0$  为单模光纤模场半径。空间光到单模光纤的耦合效率定义为耦合进单模光纤中的光功率与聚焦平面上的光功率之比。根据模场匹配原理,单模光纤的高斯模场与艾里斑模场匹配最好时耦合效率最大。

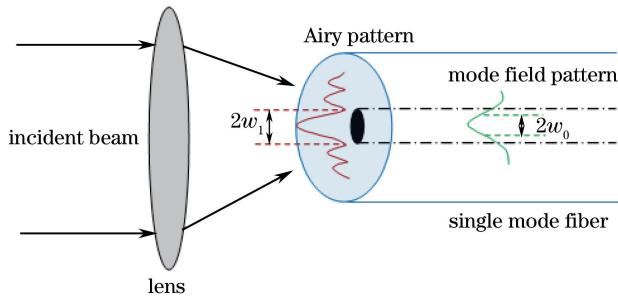


图 1 光学系统简化模型

Fig. 1 Simplified model of optical system

当星地激光链路系统存在随机角度抖动,并使光斑在单模光纤端面轴向偏移  $\rho$ ,耦合效率为<sup>[15]</sup>

$$\eta = \frac{\left| \iint ds d\rho A(s) M(s, \rho) p(\rho) \right|^2}{\int |A(s)|^2 ds}, \quad (1)$$

式中

$$A(s) = \frac{\pi D^2}{4\lambda f} \left[ 2 \times \frac{J_1(3.83s/w_1)}{(3.83s/w_1)} \right], \quad (2)$$

$$w_1 = 1.22\lambda f / D, \quad (3)$$

$$M(s, \rho) = \frac{2\sqrt{2\pi}s}{w_0} \exp\left(-\frac{s^2 + \rho^2}{w_0^2}\right) I_0\left(\frac{2s\rho}{w_0^2}\right), \quad (4)$$

$$p(\rho) = \frac{\rho}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\rho}{2\sigma^2}\right), \quad (5)$$

其中  $A(s)$  为艾里斑模场分布,  $M(s, \rho)$  为单模光纤存在径向偏移  $\rho$  时的模场 Nakagami-Rice 分布,  $p(\rho)$  为链路存在随机抖动时的 Rayleigh 分布。根据 Zhao 等<sup>[15]</sup> 的研究, 角偏差  $\theta$  与光纤端面径向偏移  $\rho$  是等效的, 且  $\rho = \theta f$ ,  $\sigma$  等效为  $\rho$  的标准差;  $w_1$  为艾里斑半径,  $J_1$  为一类零阶贝塞尔函数,  $I_0$  为零阶修正贝塞尔函数;  $D$  为透镜组的等效直径,  $f$  为透镜组等效焦距, 一般  $f = Mf_{\text{col}}$ <sup>[6]</sup>,  $M$  为望远镜的放大倍数,  $f_{\text{col}}$  为准直器的焦距;  $\lambda$  为链路激光的波长;  $s$  为焦平面的半径分布;  $w_0$  为单模光纤的模场半径, 一般取  $4 \sim 5 \mu\text{m}$ 。将(2)~(5)式代入(1)式, 得

$$\eta = \frac{2\pi}{1 + 2(\sigma/w_0)^2} \exp\left[-2 \times \frac{3.83^2}{8} \times \frac{1 + 2(\sigma/w_0)^2}{(w_1/w_0)^2}\right] I_{1/2}^2\left[\frac{3.83^2}{8} \times \frac{1 + 2(\sigma/w_0)^2}{(w_1/w_0)^2}\right], \quad (6)$$

式中  $I_{1/2}$  表示  $1/2$  阶修正贝塞尔函数。图 2 为理想情况下, 即  $\sigma = 0$  时耦合效率  $\eta$  与  $w_1/w_0$  的关系曲线。

由图可知  $w_1/w_0 = 1.711$  时耦合效率达到最大值 81.45%。针对 1550 nm 激光通信, 另取单模光纤模场半径  $w_0 = 5 \mu\text{m}$ , 则根据(3)式, 可得  $f/D = 4.53$ 。图 3 为激光通信链路存在随机抖动时耦合效率  $\eta$  与随机抖动幅度  $\sigma$  的关系曲线, 仿真中  $w_1/w_0 = 1.711$ 。由图 3 可知, 空间激光到单模光纤的耦合效率随链路中随机抖动幅度的增大而减小, 为单调递减函数, 为激光章动方案的提出提供了可能性。

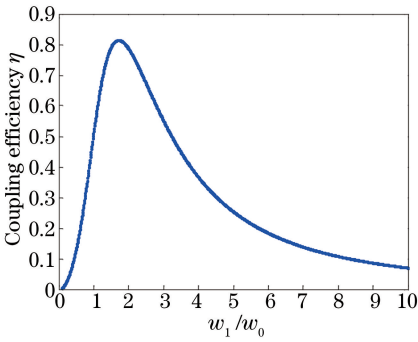


图 2 理想情况下耦合效率  $\eta$  与  $w_1/w_0$  的关系曲线  
Fig. 2 Relationship between coupling efficiency  $\eta$  and  $w_1/w_0$  under ideal condition

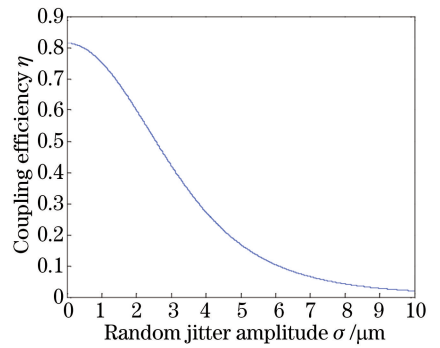


图 3 耦合效率  $\eta$  与随机抖动幅度  $\sigma$  的关系曲线  
Fig. 3 Relationship between coupling efficiency  $\eta$  and stochastic jitter amplitude  $\sigma$

## 2.2 单模光纤耦合方案及控制算法设计

激光章动耦合方案基于模场匹配的思想, 如图 4 所示。系统主要由章动快速反射镜(FSM1)、补偿快速反射镜(FSM2)、接收透镜组合(telescope, collimator1, collimator2)、光纤分束器、光电探测器及控制器(带 AD/DA 的数据采集卡)组成。

通过 FSM1 的控制器为章动镜的两轴输入控制函数, 使激光在单模光纤端面上做章动幅度为  $r$ 、周期为  $t_1$  (频率  $f_1 = 1/t_1$ ) 的圆形扫描, 如图 5 所示。单模光纤输出功率  $P_{\text{out}} = \eta(r)P_{\text{in}}$ 。

由圆形运动的对称性可知, 当系统不存在抖动时单模光纤的输出功率应为一个恒定值, 且小于耦合效率最大值对应的输出功率。假设链路中存在周期为  $t_2$  (即频率  $f_2 = 1/t_2$ ) 的随机抖动, 则  $t_1 < t_2$  时激光的圆形扫描会发生平移, 示意图如图 6 所示, 此时单模光纤的输出功率会发生周期性变化, 根据变化规律即可求出脱靶量, 图 7 为脱靶量的计算流程图。图 6 和图 7 中  $A$  为圆形扫描中心,  $A_{\text{max}}$  为章动周期内探测器输出电压最大值对应的径向距离,  $r_A$  和  $r_{A_{\text{max}}}$  分别为  $A$  和  $A_{\text{max}}$  对应的章动幅度,  $\alpha$  为章动中心偏转的角度,  $dx$ 、 $dy$  为  $x$ 、 $y$  方向的脱靶量, 章动频率  $f_1 = \omega/2\pi$ 。运算中考虑到脱靶量的矢量性, 发生抖动的时刻不同, 偏转角度不同, 计算中会稍作调整。

## 2.3 脱靶量计算精度的影响因素分析及抖动频率与章动频率的关系

由以上分析可知, 脱靶量的计算需要采用探测器的输出电压值、章动信号两轴输入电压同步采集值, 脱

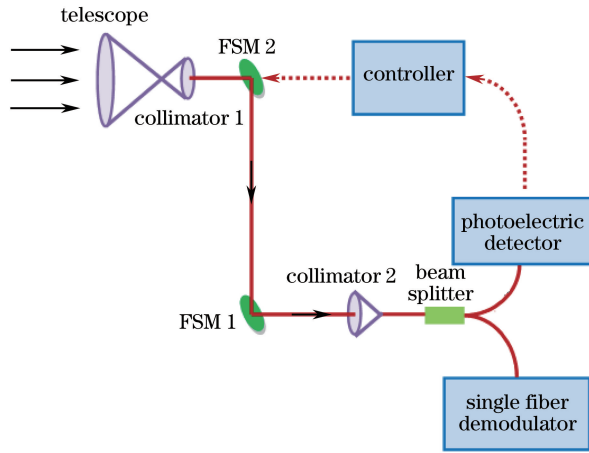


图 4 基于激光章动的耦合方案

Fig. 4 Coupling scheme based on laser jitter

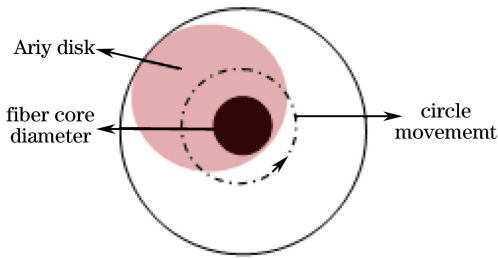


图 5 激光章动扫描示意图

Fig. 5 Schematic diagram of laser jitter scanning

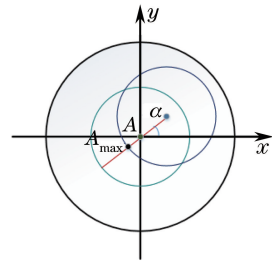


图 6 光纤端面上出现抖动后的运动状态

Fig. 6 Motion state after jitter on the fiber end face

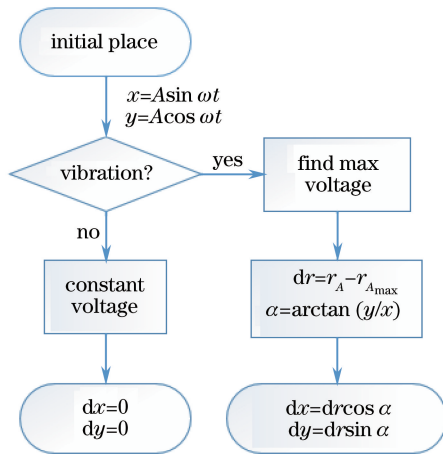


图 7 脱靶量计算流程图

Fig. 7 Flow chart of miss distance

靶量计算的精度与章动周期内三轴电压信号所取的点数有关,所取点数越多,脱靶量计算越精确。实验中,可以通过提高 AD 芯片的分辨率及采样频率达到目的。此外,脱靶量计算的精确度还与章动幅度  $r$  有关, $r$  的大小决定了耦合效率最大值及最小值的差值,取相同点数时,差值越大计算结果越精确。另一方面,令章动周期内所取的点数为  $n$ ,则章动频率  $f_1$ 、抖动频率  $f_2$  与点数  $n$  存在关系式:

$$f_1 \geq n f_2, \quad (7)$$

当控制器的处理速度足够快时取等号。由(9)式可以看到抖动频率一定时, $n$  越大所需  $f_1$  越大。

#### 2.4 空间激光通信系统对耦合系统的章动频率与反馈速度的要求

在星地空间激光通信系统中,星上发下来的激光先经过精跟踪系统,再经过波前校正系统,残余的抖动频率在  $600 \text{ Hz}^{[16]}$  左右,取  $n=10$ ,则章动频率在  $6 \text{ KHz}$  左右,此时控制器的反馈速度大于  $600 \text{ Hz}$  即可。

### 3 算法仿真及实验验证

#### 3.1 算法的精确度

仿真中,令  $w_0 = 5 \mu\text{m}$ ,  $w_1 = 8.57 \mu\text{m}$ ,图 8(a)为章动幅度  $r$  为  $1 \mu\text{m}$  时不同偏移量对应的耦合效率变化规律,令抖动为 4 个象限中各一个点,可以看到,振动到不同的象限时耦合效率的变化趋势是不一样的,可以根据变化趋势辨别振动的大体终点位置,为进一步求出偏转角提供判断依据。图 8(b)为不同章动幅度下,偏移量为(2,1)时耦合效率的变化规律,令  $\Delta\eta = \eta_{\max} - \eta_{\min}$ ,从图中可以看到,随着章动幅度的增大, $\Delta\eta$  呈先增大后减小的趋势,且章动幅度为  $3 \mu\text{m}$  时  $\Delta\eta$  最大;而  $\Delta\eta$  越大,1 个周期内取相同点数的情况下,脱靶量运算结果的精确度越高。

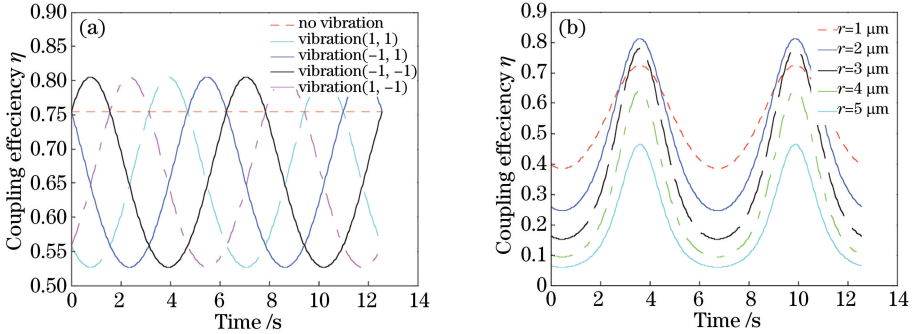


图 8 (a)不同偏移量和(b)不同章动幅度时耦合效率变化规律

Fig. 8 Change rules of coupling efficiency for (a) different offsets and (b) different nutation amplitudes

对控制算法进行 Matlab 仿真,表 1 为不同章动幅度、不同偏移量下脱靶量的计算结果,由表 1 的计算结果可知,脱靶量的误差在  $0.02 \mu\text{m}$  左右,以上计算中采样点数  $n = 160$ 。

表 1 不同章动幅度、不同偏移量下脱靶量计算结果

Table 1 Calculation results of miss distance for different nutation amplitudes and different offsets

| Vibration   | $r = 1 \mu\text{m}$ | $r = 2 \mu\text{m}$ | $r = 3 \mu\text{m}$ |
|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| (1, 1)      | (0.9942, 0.9942)    | (0.9940, 0.9940)    | (0.9928, 0.9928)    |
| (1.5, 1)    | (1.4922, 0.9971)    | (1.4915, 0.9966)    | (1.4898, 0.9954)    |
| (1, 2)      | (1.0114, 1.9849)    | (1.0107, 1.9836)    | (1.0094, 1.9812)    |
| (2.5, -1.5) | (2.4781, -1.5186)   | (2.4760, -1.5173)   | (2.4727, -1.5153)   |
| (-3, 2)     | (-2.9892, 1.9973)   | (-2.9864, 1.9955)   | (-2.9824, 1.9928)   |
| (-2, -3)    | (-1.9973, -2.9892)  | (-1.9955, -2.9864)  | (-1.9928, -2.9824)  |
| (4, 4)      | (3.9868, 3.9868)    | (3.9819, 3.9819)    | (3.9735, 3.9735)    |

#### 3.2 实验验证

##### 3.2.1 空间光到单模光纤自动耦合系统中控制算法的可能性验证

实验室搭建的光路如图 9 所示。图中 FSM1 和 FSM2 为 Newport 公司的 FSM300,分辨率为  $1 \mu\text{rad}$ ,实验中测得的电压比例系数为  $V_x = 3 \mu\text{rad}/\text{mV}$ ,  $V_y = 1.788 \mu\text{rad}/\text{mV}$ ; collimeter1 和 collimeter2 为 Lightpath 公司的非球面光纤光学准直器 352260,波长为  $1550 \text{ nm}$ ,光束直径为  $2.8 \text{ mm}$ ,焦距为  $14.2 \text{ mm}$ ,故光纤视场角为  $704.2 \mu\text{rad}$ 。FSM2 为章动镜,两轴的输入电压由信号发生器产生;FSM1 为补偿镜,其两轴的输入电压由 DA 控制器直接产生,输出电压范围为  $\pm 1 \text{ V}$ ,16 位分辨率,实验中测得的单位最低有效位(LSB)对应的电压为  $V_{x,\text{LSB}} = 30 \mu\text{rad}$ ,  $V_{y,\text{LSB}} = 27.5 \mu\text{rad}$ 。

实验中控制章动镜两轴的电压,对光纤端面进行扫描,将初始位置调整到光纤端面的中心位置,记录此时 DA 控制器的输出电压值作为初始值  $V_0$ 。用信号发生器产生两轴的输入电压,使章动频率为  $100 \text{ Hz}$ ,章动幅度为  $2.82 \mu\text{m}$ 。激光器发出的激光经过耦合系统接收后由光纤耦合探测器转换成电信号,图 10 为不同偏移量时光电探测器输出电压的变化规律。计算时  $n = 250$ ,表 2 为对应的脱靶量计算结果。由表 2 可知,脱靶量的计算精度为  $0.05 \mu\text{m}$ ,对应的角度精确度为  $3.5 \mu\text{rad}$ ,与提供的参数相近,也满足使用精度要求。

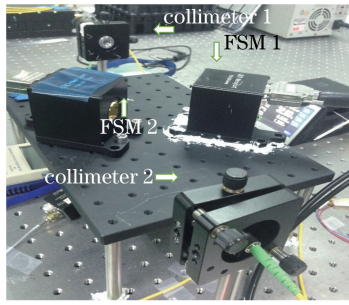


图 9 空间光到单模光纤耦合系统的光路搭建

Fig. 9 Optical path setup of coupling system making spatial light into single-mode fiber

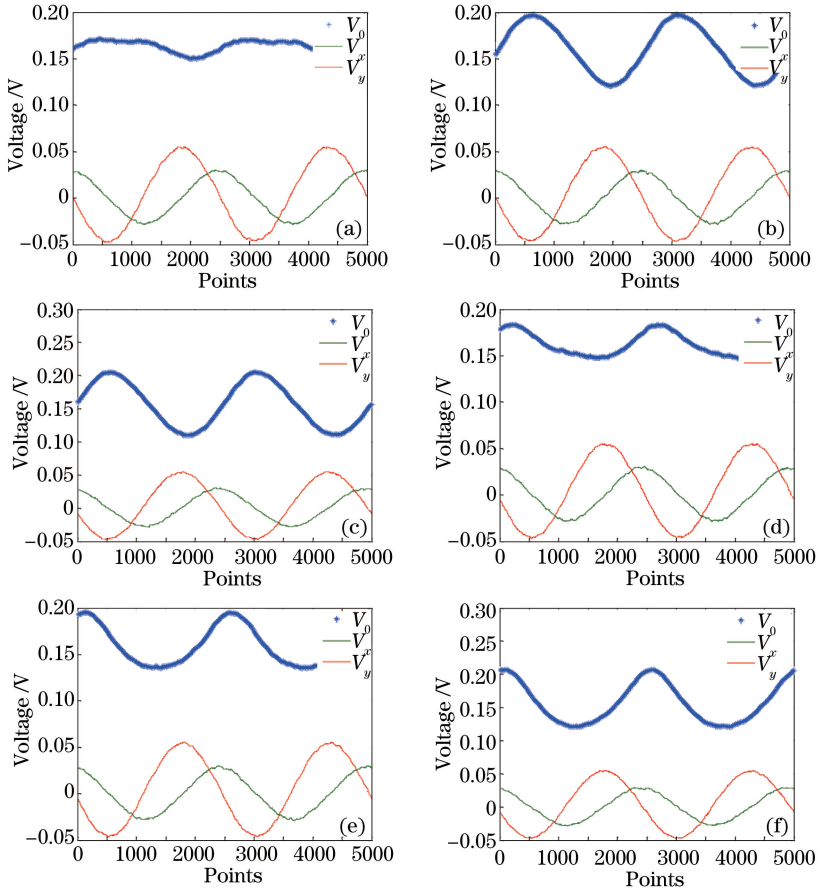


图 10 不同偏移量时光电探测器输出电压的变化规律。(a)  $(-0.0969, -0.2224)$ ; (b)  $(-0.0969, -0.691)$ ; (c)  $(-0.0969, -0.8614)$ ; (d)  $(-0.4130, -0.2224)$ ; (e)  $(-0.6217, -0.2224)$ ; (f)  $(-0.8608, -0.2224)$

Fig. 10 Change rules of photoelectric detector output voltage with different offsets. (a)  $(-0.0969, -0.2224)$ ; (b)  $(-0.0969, -0.691)$ ; (c)  $(-0.0969, -0.8614)$ ; (d)  $(-0.4130, -0.2224)$ ; (e)  $(-0.6217, -0.2224)$ ; (f)  $(-0.8608, -0.2224)$

表 2 脱靶量计算结果

Table 2 Calculation results of miss distance

| Vibration            | Computation          |
|----------------------|----------------------|
| $(-0.0969, -0.2224)$ | $(-0.0969, -0.2224)$ |
| $(-0.0969, -0.691)$  | $(-0.0480, -0.691)$  |
| $(-0.0969, -0.8614)$ | $(-0.1179, -0.8614)$ |
| $(-0.4130, -0.2224)$ | $(-0.4053, -0.2248)$ |
| $(-0.6217, -0.2224)$ | $(-0.6422, -0.2571)$ |
| $(-0.8608, -0.2224)$ | $(-0.8880, -0.2556)$ |

3.2.2 空间激光通信系统中空间光到单模光纤自动耦合系统的性能分析

为了验证该耦合系统对激光通信链路耦合效率的影响,在实验室搭建的验证系统如图 11 所示。图中 col1 为发射准直器,col2 为接收准直器,FSM1 为扰动引入快反镜,FSM2 为补偿快反镜,FSM3 为章动快反镜,PIN 为 Thorlabs 的线性探测器。实验中利用章动快反镜引入章动幅度为  $1.5 \mu\text{m}$  的圆形扫描,没有加入扰动时系统的耦合效率为 67%;控制 FSM1 为链路引入扰动,利用美国国家仪器(NI)的带 16 位 AD/DA 的数据采集卡(PXI-6356)及 LabView 编程实现光路的补偿。图 12(a)、(b)中绿色曲线分别为补偿前和补偿后 PIN 管输出信号的变化规律,经计算,控制系统补偿后激光通信系统的耦合效率提高了 6.5%,控制系统的响应速度为 40 Hz。

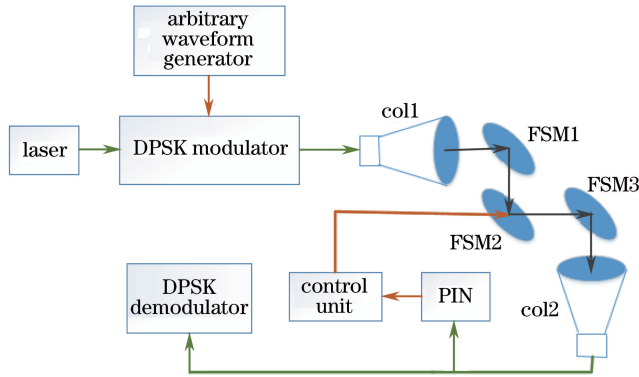


图 11 自动耦合系统的验证系统

Fig. 11 Verification system for automatic coupling system

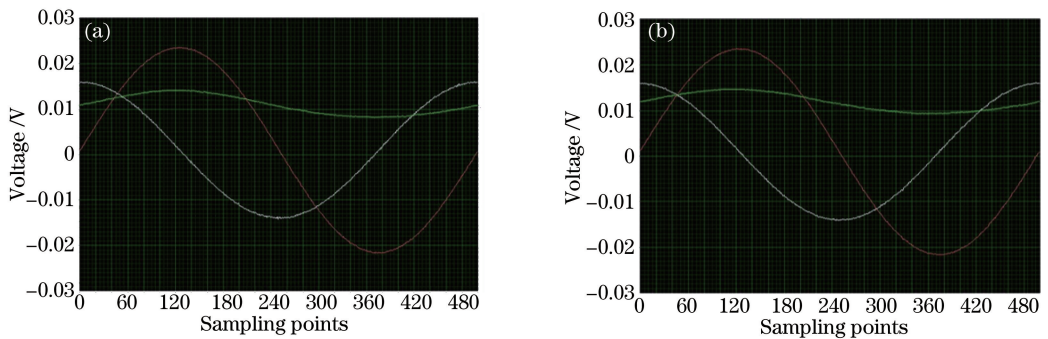


图 12 (a)补偿前及(b)补偿后 PIN 探测器的输出电压曲线

Fig. 12 Output voltage curves of PIN detector (a) before compensation and (b) after compensation

4 结 论

星地激光通信系统中(单模光纤的芯径只有  $10 \mu\text{m}$ ),由于平台振动、大气震荡等因素的影响,空间激光到单模光纤的耦合成为自由空间光通信的关键技术。根据模场匹配的基本原理,设计了基于激光章动的自动耦合方案,控制激光在单模光纤端面上作圆形扫描,根据光电探测器输出电压的变化规律求出光斑脱靶量,脱靶量的计算精度与周期内所取点数  $n$  及章动幅度  $r$  有关,分析得到章动频率  $f_1$ 、抖动频率  $f_2$  与点数  $n$  之间的关系  $f_1 \geq n f_2$ ,实验中得到的脱靶量计算精度为  $3.5 \mu\text{rad}$ 。结合空间激光通信系统验证了该耦合系统的可行性,没有扰动时系统的耦合效率为 67%,引入扰动并用控制系统进行扰动补偿后,系统的耦合效率提高了 6.5%,系统的响应速度为 40 Hz。实验结果表明该方案切实可行,对空间光到单模光纤的自动耦合方案的研究具有重要意义。

参 考 文 献

1 Song Tingting, Ma Ying, Tan Liying, *et al.* Experiment design and development of the lunar laser communication demonstration in USA[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 040004.  
宋婷婷, 马 英, 谭立英, 等. 美国月球激光通信演示验证——实验设计和后续发展[J]. 激光与光电子学进展, 2014,

- 51(4): 040004.
- 2 Ma Xiaoping, Sun Jianfeng, Hou Peipei, *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.
  - 3 Yu Xiaonan, Tong Shoufeng, Jiang Huilin, *et al.* Multi-point laser communication optical relay antenna servo system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0914001.  
于笑楠, 佟首峰, 姜会林, 等. 多点激光通信光学中继天线伺服系统[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0914001.
  - 4 Knibbe T E, Swanson E A, Roberge J K. Spatial tracking using an electro-optic nutator and a single-mode optical fiber [C]. *SPIE*, 1992, 1635: 309-317.
  - 5 Lei Sichen, Ke Xizheng. Coupling efficiency of lens array spatial light in turbulence[J]. *Chinese J 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.
  - 6 Xiang Jinsong. 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.
  - 7 Zhang Shiqiang, Zhang Zheng, Cai Lei, *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): 031006.  
张世强, 张 政, 蔡 磊, 等. 基于单透镜的空间光-单模光纤耦合方法[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(3): 031006.
  - 8 Swanson E A, Bondurant R S. Using fiber optics to simplify free-space lasercom systems[C]. *SPIE*, 1990, 1218: 70-82.
  - 9 Weyrauch T, Vorontsov M A, Gowens J W, *et al.* Fiber coupling with adaptive optics for free-space optical communication[C]. *SPIE*, 2002, 4489: 177-184.
  - 10 Takenaka H, Toyoshima M, Takayama Y. Experimental verification of fiber-coupling efficiency for satellite-to-ground atmospheric laser downlinks[J]. *Opt Express*, 2012, 20(14): 15301-15308.
  - 11 Gao Hao, Yang Huajun, Xiang Jinsong. 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.
  - 12 Zhang Ruochi, Wang Jianmin, Zhao Guang, *et al.* Fiber-based free-space optical coherent receiver with vibration compensation mechanism[J]. *Opt Express*, 2013, 21(15): 18434-18441.
  - 13 Luo Wen, Geng Chao, Li Xinyang. 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.
  - 14 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]. *J Opt Soc Am A*, 2006, 23(9): 2246-2250.
  - 15 Zhao Fang, Ma Jing, Yu Siyuan, *et al.* Impact of random angular jitter on fiber-coupled differential phase-shift keying receivers with Mach-Zehnder interferometer demodulation[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(31): 6024-6029.
  - 16 Takenaka H, Toyoshima M. Study on fiber coupling efficiency for ground-to-satellite laser communication links [C]. *SPIE*, 2010, 7587: 75870U.