

❖ 特约专栏 ❖

## 空间光耦合自动对准方法与实现

柯熙政, 罗 静, 雷思琛

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘 要:** 空间光-单模光纤耦合的关键技术是精确定位耦合光斑在光纤端面上的位置。基于光纤偏移与空间光-单模光纤耦合效率之间的关系, 研制了由二维压电陶瓷、驱动器、控制器、光电探测器及耦合透镜组成闭环控制系统, 结合模拟退火算法实现空间光-光纤的自动对准耦合。理论分析了空间激光与光纤的耦合效率并阐述了模拟退火算法原理。实验结果表明: 通过模拟退火算法可以在较短时间内实现耦合到最佳位置的自动对准定位, 耦合效率达到了 51.4%, 相对于没有自动对准之前提高了 6.5%。该方案切实可行, 对空间光-单模光纤的自动耦合方案的研究具有重要的意义。

**关键词:** 光纤耦合; 空间光; 模拟退火算法; 耦合效率

**中图分类号:** TN929.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0103009

## Automatic alignment method and realization of space optical coupling

Ke Xizheng, Luo Jing, Lei Sichen

(Institute of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The sticking point of spatial light-single-mode fiber is to find the best position in the transverse plane of fiber precisely. Based on optical fiber migration's influence on the spatial light-single-mode fiber coupling efficiency, an auto-coupling system was proposed, which mainly consisted of two-dimensional piezoceramics, driver, controller, photoelectric detector which was a closed loop control system and coupling lens. The automatic alignment coupling of the spatial light-fiber was realized by combining with simulated annealing algorithm. The coupling efficiency for free-space laser coupling into the fibers and simulated annealing algorithm were analyzed theoretically. Analysis results of experiment show that the method can make the system search the best position automatically based on the power of the light which is coupled into the single-mode fiber. The optimal coupling efficiency is about 51.4%, which can be obtained in short times by the system and it is improved by 6.5% compared with no automatic alignment before. The scheme is practical and it is of great significance for the study of the automatic coupling of spatial light-single-mode fiber.

**Key words:** optical coupling; spatial light; simulated annealing algorithm; coupling efficiency

收稿日期: 2017-06-10; 修订日期: 2017-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(61377080, 60977054); 陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)

作者简介: 罗静(1992-), 女, 硕士生, 主要从事无线激光通信方面的研究。Email: 603704553@qq.com

导师简介: 柯熙政(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事无线激光通信方面的研究。Email: xzke@263.net

## 0 引言

自由空间光通信(FSO)以其发射光束窄、传输速度快、信息容量大、覆盖空间广、保密性能好等特点受到人们的广泛关注<sup>[1-3]</sup>,空间光耦合技术是 FSO 通信光学系统的关键研究技术<sup>[4-6]</sup>。耦合效率通常受静态角偏差、随机角抖动误差、大气湍流像差及光纤与空间光的视轴对准程度等因素的影响,人工实现空间光耦合对准较困难<sup>[7-9]</sup>。要获得高耦合效率的难点是如何将经耦合透镜会聚的光斑与光纤端面很好地重合。空间光-光纤耦合自动对准技术也是耦合技术研究的关键问题,它是一个寻找最佳耦合位置的过程。

2007 年,高皓等采用压电陶瓷物镜后扫描、五点跟踪法方案搭建了空间光-单模光纤耦合自动对准系统,实现了短时间内自动搜寻到最佳耦合位置的效果<sup>[10]</sup>。2012 年,日本 Takenaka 等在实验中利用四象限探测器(QD)和快速反射镜(FSM)进行对准和跟踪,该方案结构复杂<sup>[11]</sup>。2013 年,Zhang 等利用位置传感器(PSD)及快速反射镜(FSM)搭建了空间光耦合对准平台,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<sup>[12]</sup>。2014 年,罗文等搭建了基于 SPGD 算法的闭环控制系统,利用自适应光纤耦合器(AFC)校正模拟湍流倾斜像差后,有效提高了耦合效率<sup>[13]</sup>。2014 年,雷思琛等采用自聚焦透镜、多模光纤耦合阵列结构及步进电机结合模拟退火算法对光纤阵列实行二维控制,自动搜寻空间光-光纤耦合最佳视轴对准姿态<sup>[14]</sup>。2016 年,高建秋等人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,当脱靶量计算精度为 3.5,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<sup>[15]</sup>。

文中设计的空间光耦合系统,使用二维压电陶瓷进行控制,压电陶瓷产生的微位移使光纤在微米量级内运动,结合模拟退火算法实现空间光-光纤耦合自动对准,精确定位实现自动寻找最佳耦合点;模拟退火算法以一定的概率来接受一个比当前解要差的解,因此有可能会跳出这个局部的最优解,达到全局的最优解。该耦合系统控制算法精度高、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。

## 1 空间光-自聚焦透镜-单模光纤耦合

如图 1 所示,空间光经接收端光学系统会聚后,在后焦面上形成爱里斑衍射图样,将单模光纤置于爱里斑处,芯径与光斑进行重合<sup>[3]</sup>。

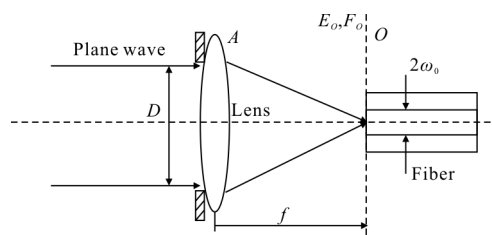


图 1 光纤耦合原理图

Fig.1 Schematic diagram of optical fiber coupling

口径 A 处的入射光束平面波可表示为:

$$E_A(x,y)=P(x,y)\exp[j\varphi(x,y)] \quad (1)$$

式中: $\varphi(x,y)$ 为大气湍流等引入的畸变相差; $P(x,y)$ 为光纤孔径函数,理想情况下可表示为:

$$P(x,y)=\begin{cases} 1 & \sqrt{x^2+y^2} \leq D/2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $D$ 为透镜的直径。经透镜聚焦后,聚焦光斑为入射光束的傅里叶变换,变换后得到的耦合平面 O 处对应的聚焦光斑可表示为:

$$E_o(x,y)=\exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda f}(x\zeta+y\eta)\right]d\zeta d\eta \cdot \iint p(\zeta,\eta)\exp[j\varphi(\zeta,\eta)] \times \frac{1}{\lambda f} \quad (3)$$

式中: $f$ 为透镜的焦距; $\lambda$ 为平面光束波长;当单模光纤归一化频率  $1.9 \leq V \leq 2.4$  时,光纤中传输光速分布近似为高斯光束,可表示为:

$$F_o(x,y)=\sqrt{\frac{2}{\pi\omega_0^2}} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{\omega_0^2}\right) \quad (4)$$

式中: $\omega_0$ 为单模光纤模场半径。光纤耦合效率为耦合进光纤的功率与接收平面光束功率的比值,根据模式匹配原理,光纤耦合效率可表示为<sup>[3]</sup>:

$$\eta = \frac{\left| \iint E_o(x,y)F_o(x,y)ds \right|^2}{\iint |E_o(x,y)|^2 ds \cdot \iint |F_o(x,y)|^2 ds} \quad (5)$$

当  $\varphi(x,y)=0$ , 即无波前像差时, 光纤耦合效率可简化为<sup>[2]</sup>:

$$\eta=2 \frac{[1-\exp(-\beta^2)]^2}{\beta^2} \quad (6)$$

式中:  $\beta=\pi D \omega_0 / 2 \lambda f$  为耦合参数, 当  $\beta=1.12$  时, 理论耦合效率达到最大为  $\eta=81.45\%$ 。

## 2 系统结构设计及控制算法设计

### 2.1 系统结构设计

如图 2 所示, 设计的空间光-光纤耦合自动对准系统主要包含光源、光学系统、光纤、用于对准的控制系统-二维压电陶瓷、反馈系统和控制算法。总体是一个从光电探测器获取实时的电压来控制二维压电陶瓷运动的闭环控制系统。压电陶瓷具有电致伸缩效应, 根据输入控制电压的变化, 压电陶瓷产生伸缩变化。具体工作原理是: 在光纤的耦合端固定二维压电陶瓷和光纤, 压电陶瓷带动光纤产生微位移; 另一端连接光电探测器, 光电探测器把耦合入光纤的光转化为电信号, 控制器根据电信号的强弱发出控制指令, 使驱动器带动二维压电陶瓷产生微位移, 从而调节耦合光斑与光纤端面的位置, 找到最佳值。控制过程是: 数据采集获取从光电探测器出来的电压信号的具体数值作为反馈量, 结合模拟退火算法控制二维压电陶瓷的运动, 实时调整光纤位置, 使耦合光斑焦平面与光纤端面很好地重合, 即达到最大耦合效率。

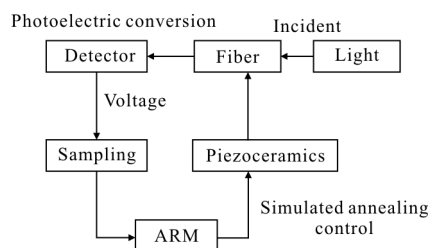


图 2 空间光-光纤耦合自动对准系统

Fig.2 Automatic alignment system for spatial light-single-mode fiber

### 2.2 系统硬件模块设计

如图 3 所示, 文中设计的系统硬件模块主要由压电陶瓷、STM32F103 单片机、光电探测器、压电陶瓷驱动电源、保护电路及电压放大电路组成。从系统整体功能上考虑, 将系统分为三个模块, 即采集模

块、主处理器模块及驱动电源模块。三个模块的功能分别为: 采集模块负责实时将光电探测器出来的电压采集进单片机, 将数字量转化为对应的模拟电压, 实现数模转化, 再利用放大电路得到压电陶瓷(PZT)的控制电压, 其中电压放大电路提供比例放大环节; 主处理器模块负责接收采集进来的数据并进行算法处理然后输出 DA 来反馈给驱动电源, STM32F103 单片机主要提供两方面功能: 作为通信设备提供通用的输入/输出接口、作为控制器运行相关控制算法以及产生控制信号或波形实现 PZT 的静态定位操作; 驱动电源模块分为恒压供电模块和可调驱动模块: 其中直流恒压模块为压电陶瓷提供 +30 V 及 -30 V 的供电电压、可调驱动电压施加在压电陶瓷两端使其发生微位移, 控制系统为能够捕捉此微位移信号采用了光电探测器, 光电探测器将光信号转化为电信号再次送给单片机形成一套闭环系统。

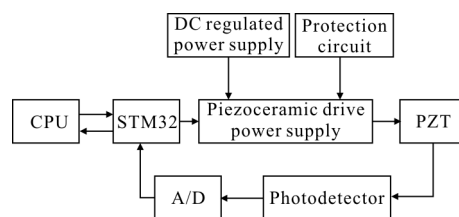


图 3 系统硬件模块设计图

Fig.3 System hardware module design diagram

### 2.3 压电陶瓷

该设计中购买的二维压电陶瓷是哈尔滨芯明天科技有限公司的 NAC2710。其固定方案如图 4 所示, 由于环氧树脂板绝缘性好、介电性能稳定, 所以设计合适尺寸的环氧树脂板来固定压电陶瓷, 用两个环氧树脂板来对压电陶瓷后端进行上下夹持固定, 并在前端粘贴光纤和压电陶瓷, 实现了压电陶瓷带动光纤产生微位移的效果。

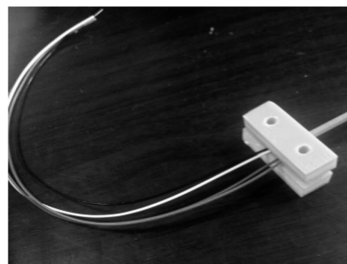


图 4 压电陶瓷固定图

Fig.4 Figure of fixing piezoelectric ceramics

压电陶瓷的运动模式是：两个轴分别是 X 和 Y 轴来控制其运动。供电电压是恒+30 V 和恒-30 V，给 X 和 Y 轴分别加 0~30 V 和-30 V~0 之间不同的电压，会产生不同的位移，进而来控制压电陶瓷的运动走势。这里正电压是指沿着所在轴的正向运动，而负电压是指沿着所在轴的反向运动，而不同的电压会让压电陶瓷带动光纤产生不同的微位移。压电陶瓷的接线图如图 5 所示。

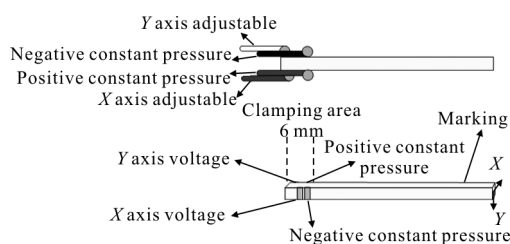


图 5 压电陶瓷接线图

Fig.5 Wiring diagram of piezoelectric ceramics

### 2.4 控制算法设计

文中利用模拟退火算法实现空间光和光纤视轴对准。模拟退火算法是一种求解多元函数全局最优值的方法，该算法理论上能够以概率 1 收敛于目标函数的最优值。它是基于 Monte-Carlo 迭代求解策略的一种随机寻优算法，其出发点是基于物理中固体物质的退火过程与一般组合优化问题之间的相似性。模拟退火算法从某一较高的温度出发，伴随温度参数的不断下降，结合概率突跳特性在解空间中随机寻找目标函数的全局最优解，即在局部最优解能概率性地跳出并最终趋于全局最优。

设第  $i$  次函数的值为  $f(x_i)$ ，通过随机扰动后第  $i+1$  次函数的值为  $f(x_{i+1})$ ，则根据 Metropolis 准则：

$$p = \exp\left[-\frac{|f(x_{i+1}) - f(x_i)|}{kT_j}\right] \quad (7)$$

式中： $k$  为常数，常取值为 1； $T_j$  为第  $j$  次的状态温度 ( $i$  为内循环次数， $j$  为外循环次数)， $x_i$  和  $x_{i+1}$  都是目标函数可行域内的点，也叫可行域。设两次目标函数的差值为  $f(x_{i+1}) - f(x_i) = \Delta f$ 。

寻找电压最大值的流程为  $\Delta f$ ：如果  $\Delta f > 0$ ，则接收第  $i+1$  次状态为当前状态；如果  $\Delta f < 0$ ，则按照概率判断是否接收第  $i+1$  次状态为当前状态。按照概率判断接收与否，首先在 0~1 之间产生服从均匀分布

的随机数  $q$ ，然后比较“当前温度” $T_j$  时 Metropolis 准则计算出的  $p$  和随机数  $q$  的大小：当  $p > q$  时，接收第  $i+1$  次状态为当前状态；否则继续保留第  $i$  次状态为当前状态；经过多次比较和状态迁移，就可以达到温度  $T_j$  的平衡状态。然后继续降低温度  $T_{j+1}$ ，寻找此温度下的平衡状态；往复循环就可以使温度趋近于零，此时可获得电压的最大值。

### 3 实验

实验中使用功率为 30 mW、波长为 650 nm 的半导体激光器。所用单模光纤的纤芯直径为 9/125  $\mu\text{m}$ ，模场半径为 3.6~5.3  $\mu\text{m}$ ，数值孔径为 0.10~0.14，单模工作波长为 633~780 nm。半导体激光器发出的激光光束通过由两片透镜组成的牛顿望远系统扩束、准直后，形成大的光斑，入射到耦合单透镜上，经过透镜后入射到光纤端面，在光纤耦合端面处，首先用环氧树脂板固定夹持压电陶瓷，再将光纤和压电陶瓷固定粘贴在一起，从而实现通过压电陶瓷的运动带动光纤产生微位移，微调整光纤的位置，获得最大的耦合效率。所用控制器为 ARM 板子，控制程序为 Windows 环境下运行的 VC 程序。定义耦合效率  $\eta$  为耦合进单模光纤中的光功率  $P_c$  与穿过耦合透镜后光纤端面的光功率  $P_r$  之比  $\eta = P_c/P_r$ 。初步人为对准后首先用光功率计测耦合端面得到的  $P_r = 12.76$  mW，耦合进光纤的功率为 5.73 mW，即初步的耦合效率为 44.9%。用压电陶瓷以及控制器实行了自动对准系统后，通过测量耦合进光纤的功率为 6.56 mW，即自动耦合后系统的耦合效率为 51.4%。通过自动对准后完成了精确定位，光斑越靠近光纤端面中心，耦合效率越高，耦合效率可以提高 6.5%。

经过实验，空间光耦合进光纤，光纤的另一端连接光电探测器，将耦合进光纤的光信号转换为电信号，从光电探测器出来的电压采集进 ARM 板子里进行处理，形成一个闭环控制系统。从光电探测器出来的电信号的大小能实时反应耦合状态以及整个实验寻找最佳耦合位置的状态。不加算法时从光电探测器出来的电信号存在极大值，如图 6 所示，一直有波动，波动的过程就是寻找极大值的过程，但是跳不出极值，即找不到最佳耦合位置。加上智能优化算法即

模拟退火算法后,如图 7 所示,从光电探测器出来的电信号在 0~3 V 之内,存在极大值,刚开始有波动,即一直在寻找最大值,大概在 1 500 ms 之后跳出极值,找到了最大值,一直趋于稳定的状态,即找到了最佳耦合位置,此时电压值在 1.67 V 上下漂移,幅度不超过 0.05 V,此时电压均值为 1.658 V,方差值为 0.000 17 V<sup>2</sup>。

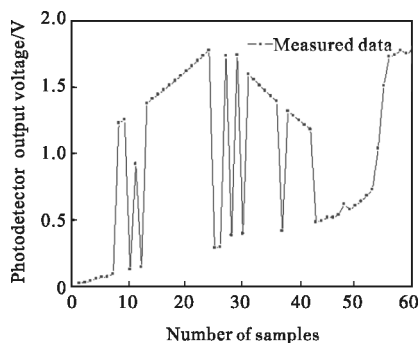


图 6 不加算法时光电探测器的输出电压

Fig.6 Output voltage of photodetector without algorithm

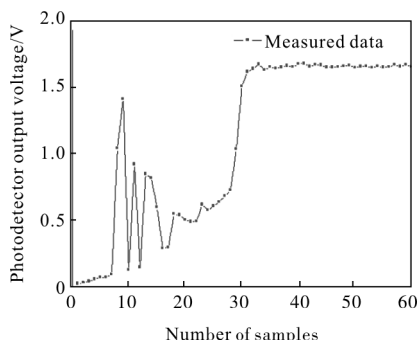


图 7 加算法时光电探测器的输出电压

Fig.7 Output voltage of photodetector with algorithm

如图 8 所示,加上模拟退火算法后同时测 ARM 板上 DA1IN 的值,当达到稳定趋势时,电压值在 2.05 V 上下漂移,幅度不超过 0.1 V,此时电压均值

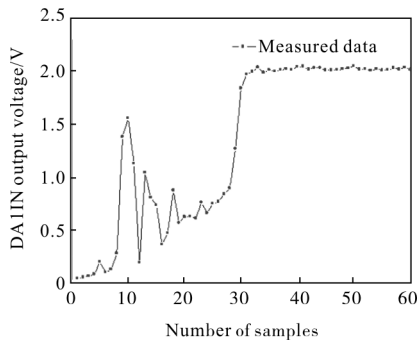


图 8 加算法时 DA1IN 电压

Fig.8 DA1IN voltage with algorithm

为 2.025 V, 方差值为 0.000 28 V<sup>2</sup>。如图 9 所示,测 ARM 板上 DA2IN 的值,电压范围都在 0~3 V 之内,刚开始有波动,一直在找最佳耦合位置,大概在 1 350 ms 之后趋于稳定,即找到了最佳耦合位置,此时电压值在 2.02 V 上下漂移,幅度不超过 0.1 V,此时电压均值为 1.99 V,方差值为 0.000 24 V<sup>2</sup>。

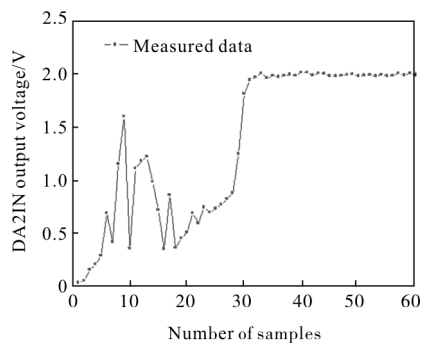


图 9 加算法时 DA2IN 电压

Fig.9 DA2IN voltage with algorithm

加上模拟退火算法后测 Power1 的输出电压,如图 10 所示,此电压值代表压电陶瓷可调一路 X 轴所加电压,范围是 0~30 V,Power1 的输出电压大约是 DA1IN 电压的 10 倍,这是因为压电陶瓷的可调部分有放大模块。由图 10 可以看出,刚开始曲线一直有波动,即整个系统正在寻找最佳耦合位置,波动的过程就是寻找最佳耦合位置的过程,之后处于稳定状态,即找到了最佳耦合位置,此时电压值在 20.68 V 上下漂移,幅度不超过 0.1 V,此时电压均值为 20.65 V,方差值为 0.044 3 V<sup>2</sup>。

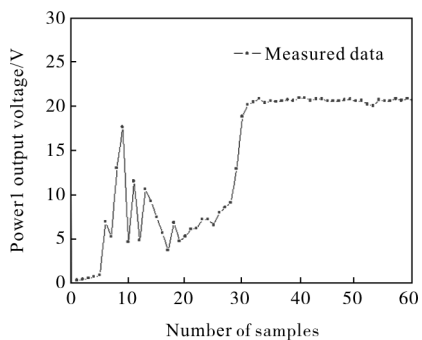


图 10 加算法时 Power1 的输出电压

Fig.10 Output voltage of Power1 with algorithm

如图 11 所示,加上模拟退火算法后测 Power2 的输出电压,此电压值代表压电陶瓷可调一路 Y 轴所加电压,范围是 -30~0 V,负电压只是代表压电陶瓷

的运动方向是沿着所在轴反方向的,数值的大小反映了压电陶瓷位移的大小;Power2 的输出电压大约是 DA2IN 电压的 10 倍,这是因为压电陶瓷的可调部分有放大模块。

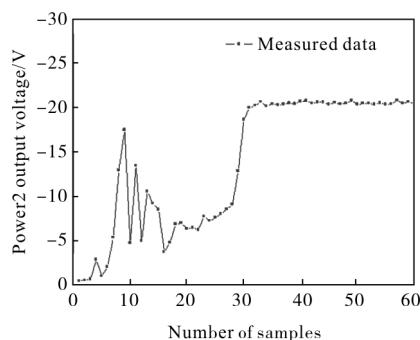


图 11 加算法时 Power2 的输出电压

Fig.11 Output voltage of Power2 with algorithm

由图 11 可以看出,刚开始曲线一直有波动,即整个系统正在寻找最佳耦合位置,波动的过程就是寻找最佳耦合位置的过程,之后处于稳定状态,即找到了最佳耦合位置,此时电压均值为 $-20.323\text{ V}$ ,方差值为 $0.0321\text{ V}^2$ ,负电压只是代表压电陶瓷的运动方向是沿着所在轴反方向。这些电压的曲线图都实时反映了整个系统寻找最佳耦合位置的过程。

如图 12 所示,加上模拟退火算法之后,测试 ARM 板子上 DA1 和 DA2 的值,这两个值分别控制压电陶瓷两路可调电压,其值可以实时反映出压电陶瓷的运动状态即运动轨迹,刚开始不稳定到最后运动轨迹趋于稳定状态处在图中中间的位置,反映了寻找最佳耦合位置的过程。

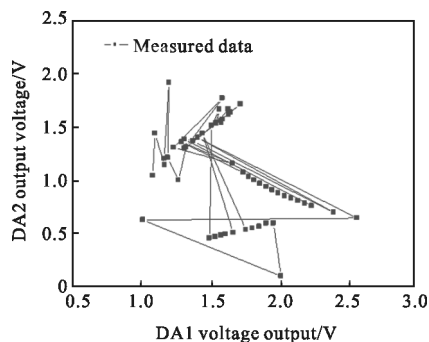


图 12 运动轨迹图

Fig.12 Trajectory diagram

## 4 结论

空间光-单模光纤的耦合效率与空间光相位分

布、大气湍流像差、随机角抖动误差、光学系统以及光纤与空间光的对准姿态等息息相关。耦合系统确定的情况下,自适应的调整空间光和光纤的对准姿态来获得较高的耦合效率成为决定耦合效率的决定因素。文中采用压电陶瓷来控制光纤与空间光的对准姿态,结合模拟退火算法搭建了一套实验系统,实现空间光-单模光纤自动对准。对工作于 $650\text{ nm}$ 波长的单模光纤进行了自动耦合实验。通过实验发现:模拟退火算法的实用性高,实现对准后将光功率稳定在一个较好的区域内,可用于维持耦合功率的稳定。该实验结果表明该方案切实可行,能很快使耦合光斑精确定位于最大耦合效率处,且耦合效率达到了 $51.4\%$ ,相对于没有自动对准之前耦合效率提高了 $6.5\%$ 。

## 参考文献:

- [1] Zhang S, Zhang Z, Cai L, et al. Laser injecting method from free space beam to single-mode fiber using single lens [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2014, 26(3): 031006.
- [2] Cui Ning, Chen Xinglin, Cao Kairui, et al. Fuzzy active disturbance rejection control of fine tracking system for free space optical communication [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1394-1400. (in Chinese)  
崔宁, 陈兴林, 曹开锐, 等. 空间光通信精跟踪系统的模糊自抗扰控制[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5): 1394-1400.
- [3] Wang Qiang. The research of the influence caused by vibration on the coupling efficiency of space light to fiber and compensation method [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)  
王强. 振动对空间光-光纤耦合效率影响及补偿方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [4] Li Feng, Geng Chao, Li Xinyang, et al. Technical research of adaptive fiber coupler array based on SPGD algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (7): 2156-2161. (in Chinese)  
李枫, 耿超, 李新阳, 等. 基于 SPGD 算法的自适应光纤耦合器阵列技术研究 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(7): 2156-2161.
- [5] Chen Xuekun, Zhang Lu, Wu Zhiyong. Coupling efficiency of free-space laser coupling into single mode fiber and photonic crystal fiber [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6 (2): 208-215. (in Chinese)

- 陈雪坤, 张璐, 吴志勇. 空间激光与单模光纤和光子晶体光纤的耦合效率[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 208-215.
- [6] Dikmelik Y, Davidson F M. Fiber-coupling efficiency for free-space optical communication through atmospheric turbulence[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(23):4946-4952.
- [7] Xiong Zhun, Ai Yong, Shan Xin, et al. Fiber coupling efficiency and compensation analysis for free space optical communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2510-2514. (in Chinese)  
熊准, 艾勇, 单欣, 等. 空间光通信光纤耦合效率及补偿分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2510-2514.
- [8] Shi Guanghui. Improved method for semiconductor laser coupling[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 343-352. (in Chinese)  
史光辉. 半导体激光耦合新方法[J]. 中国光学, 2013, 6(3): 343-352.
- [9] Song Hongfei, Che Ying, Zhao Xin. Improvement of fiber coupling efficiency in atmospheric turbulence [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3205-3211.(in Chinese)  
宋鸿飞, 车英, 赵馨. 湍流环境中光纤耦合效率的提高[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3205-3211.
- [10] 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. (in Chinese)  
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.
- [11] 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.
- [12] Zhang R, Wang J, Zhao G, et al. Fiber-based free-space optical coherent receiver with vibration compensation mechanism[J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 18434.
- [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): 38-44. (in Chinese)  
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): 38-44.
- [14] Lei Sichen, Ke Xizheng, Shao Junhu. Experimental study about fiber array coupling and auto-alignment [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(2): 191-195. (in Chinese)  
雷思琛, 柯熙政, 邵军虎. 空间光-光纤阵列耦合自动对准实验研究[J]. 激光技术, 2014, 38(2): 191-195.
- [15] Gao Jianqiu, Sun Jianfeng, Li Jiawei, 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)  
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.