

大幅面空间光自适应耦合技术的研究

李晓龙¹, 闫宝罗¹, 胡金耀¹, 李昌瑾¹, 刘海锋^{1,2}, 林 炜¹, 刘 波^{1*}

(1. 南开大学 现代光学研究所, 天津 300350; 2. 中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 在自由空间光通信(FSOC)系统中, 空间光-单模光纤耦合效率及稳定度直接影响接收机的性能。为提升耦合效率, 基于模场匹配原理, 分析了耦合效率与耦合参数之间的关系, 设计了空间光-单模光纤大幅面的自适应耦合系统, 利用二维压电纳米定位平台、控制模块、驱动模块、光电探测器和耦合透镜构成闭环控制系统, 结合光栅扫描算法来实现最佳耦合点的精确定位和稳定跟踪。对于 $110 \times 110 \mu\text{m}^2$ 范围内, 扫描点设置为 8×8 时, 最佳耦合点的耦合效率为 43.4%, 较未自动对准时提升了 10.6%。在稳定跟踪过程中, 耦合效率稳定在 43.6%, 方差为 0.00988。实验结果表明了该方案切实可行, 且实用性高。

关键词: 自由空间光通信; 单模光纤; 耦合

中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)10-0047-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.10.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on large-area spatial light adaptive coupling technology

LI Xiaolong¹, YAN Baoluo¹, HU Jinyao¹, LI Changjin¹, LIU Haifeng^{1,2}, LIN Wei¹, LIU Bo^{1*}

(1. Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China;

2. State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, CAS, Beijing 100083, China)

Abstract: In free-space optical communication (FSOC) systems, coupling efficiency and stability directly affect the performance of the receiver. In order to improve the coupling efficiency, based on the principle of mode field matching, the relationship between coupling efficiency and coupling parameters is analyzed. A large-scale adaptive coupling system of spatial light-single mode fiber is designed. The closed-loop control system is composed of two-dimensional piezoelectric nano-positioning platform, control module, driving module, photodetector and coupling lens. The grating scanning algorithm is combined with the closed-loop control system. Accurate positioning and stable tracking of the optimal coupling point are realized. For the $110 \times 110 \mu\text{m}^2$ area, when the scan point is set to 8×8 , the coupling efficiency of the optimal coupling point is 43.4%, which is 10.6% higher than that without automatic alignment. In the stable tracking process, the coupling efficiency is stable at 43.6% and the variance is 0.00988. The experimental results show that the scheme is practical and feasible.

Key words: free-space optical communication; single mode fiber; coupling

0 引言

自由空间光通信(FSOC)利用在空间中传播的光

收稿日期: 2019-04-11。

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(61727815)资助; 南开大学中央高校基本科研业务费专项资金(075-63191745)资助; 集成光电子学国家重点实验室开放课题(No.IOSKL2018KF18)资助; 2018 南开大学自制实验仪器项目(NO.5)资助。

作者简介: 李晓龙(1995-), 男, 硕士研究生, 2017 年于大连理工大学获得理学学士学位, 现就读于南开大学电子信息与光学工程学院光学工程专业, 主要从事自由光通信系统设计与关键技术方面的研究。

* 通信作者: 刘波(E-mail: liubo@nankai.edu.cn)。



无线传输数据, 具有频带宽、速率高、协议透明和安全可靠等诸多特点^[1,2]。作为一种新兴技术, FSOC 已经成为星际通信、5G 移动通信等高速信息传输的重要技术手段, 在“空天地一体化”网络构建、微波光子融合通信等领域具有广泛的应用前景^[3,4]。在接收机中, 必须将激光束耦合到单模光纤中进行后续处理。因此, 空间光-单模光纤耦合成为了基于光纤的 FSO 系统的关键技术之一^[5-7]。其耦合效率通常受许多因素影响, 例如静态角度偏差、随机角度抖动误差、大气湍流像差、光纤的视轴对准和空间光等^[8-11]。

为了解决上述问题, 研究者们通常使用快速转向镜(FSM)和相应的位置传感器来实现激光束与单模光

李晓龙,闫宝罗,胡金耀,等:大幅面空间光自适应耦合技术的研究

纤的耦合。2012年,日本Takenaka使用四象限探测器(QD)和FSM进行对准和跟踪实验,其结构比较复杂,操作时容易引入误差^[12]。2014年,雷思琛采用自聚焦透镜和多模光纤耦合阵列结构,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,光斑中心在耦合端面中心抖动小于2.5 mm时,耦合功率波动小于35%^[13]。2016年,高剑秋提出了一种基于激光章动的自动耦合系统。当脱靶量角度精度约为3 μrad 时,控制系统进行干扰补偿后系统的耦合效率提高6.5%,系统响应频率为40 Hz^[14]。本文对空间光-单模光纤的耦合过程进行了理论建模,基于仿真结果设计了空间光-单模光纤大幅面自适应耦合系统,实现自动精确对准和稳定跟踪。

1 理论分析

理想情况下,空间光-单模光纤耦合模型如图1所示。入射光束经过耦合透镜聚焦汇聚后,在其焦平面上会形成爱里斑衍射图样,将单模光纤固定在焦平面爱里斑位置处进行耦合,入射光束可看作平面波,表示为:

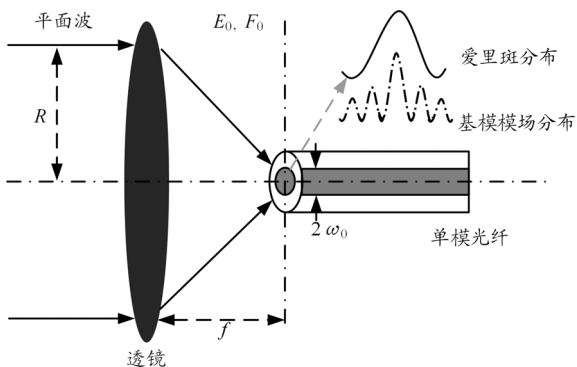


图1 空间光-单模光纤的耦合模型

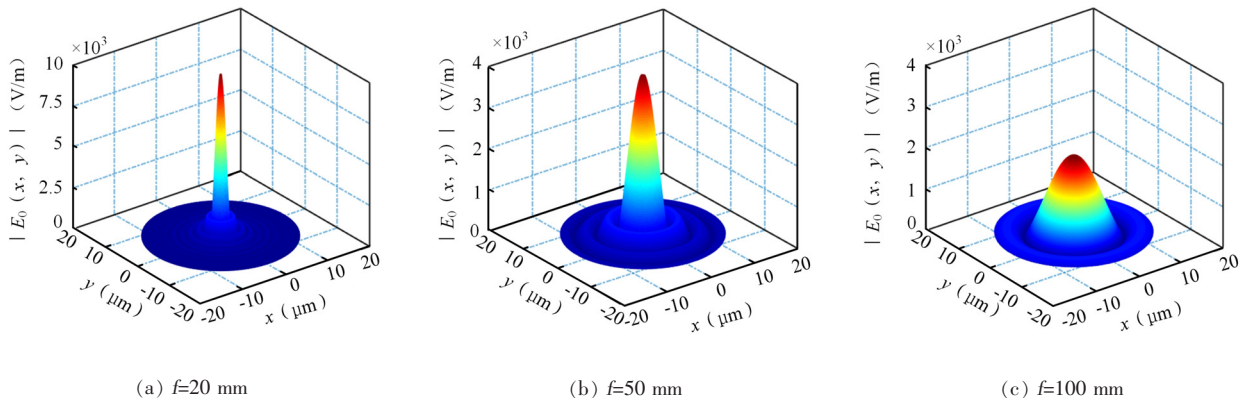


图2 经过不同耦合透镜后的光场分布

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

其中, $\varphi(x, y)$ 是传播过程中由于湍流等产生的相差; $P(x, y)$ 是孔径函数。经过透镜后,光斑为入射平面波的傅里叶变换,由此可得到在后焦平面上的电场分布为:

$$E_0(r_0) = \pi R^2 \frac{e^{ikf}}{i\lambda f} e^{jk \frac{r_0^2}{2f}} \left[2J_1\left(\frac{2\pi R r_0}{\lambda f}\right) \cdot \frac{2\pi R r_0}{\lambda f} \right], \quad (2)$$

$$r_0 = \sqrt{x^2 + y^2}$$

其中, R 为聚焦透镜的半径; f 是透镜的焦距; λ 是传输波长; $k=2\pi/\lambda$,是波的空间角频率; r_0 是位置 (x, y) 的径向长度。当 $\lambda=1550 \text{ nm}$ 、 $R=10 \text{ mm}$ 时,光束通过 f 不同的透镜聚焦后光场分布如图2所示。可以看出,在透镜半径 R 不变的情况下, f 越大,衍射效果越明显;爱里斑越大,光束越弥散。

由于单模光纤仅能传输基模 LP_{01} 。基模 LP_{01} 在光纤端面电磁场分布为零阶的贝塞尔函数,即 $F_0(x, y)$ 满足高斯分布:

$$F_0(x, y) = \left(\frac{2}{\pi \omega_0^2} \right)^{1/2} e^{-\frac{x^2 + y^2}{\omega_0^2}} \quad (3)$$

其中, ω_0 为单模光纤的模场半径,其值与 λ 有关。本文模拟了不同波长的激光在单模光纤中的分布如图3所示。可以看出,激光波长越大,模场面积越大。

从模式匹配的角度来说,光纤耦合其实就是完成光纤端面的光场分布和模场分布匹配的过程,耦合效率的定义即耦合进光纤的光功率与焦平面处光束的光功率的比值。耦合效率可表示为:

$$\eta = \frac{\left| \iint E_0^*(x, y) F_0(x, y) ds \right|^2}{\iint |E_0(x, y)|^2 ds \cdot \iint |F_0(x, y)|^2 ds} \quad (4)$$

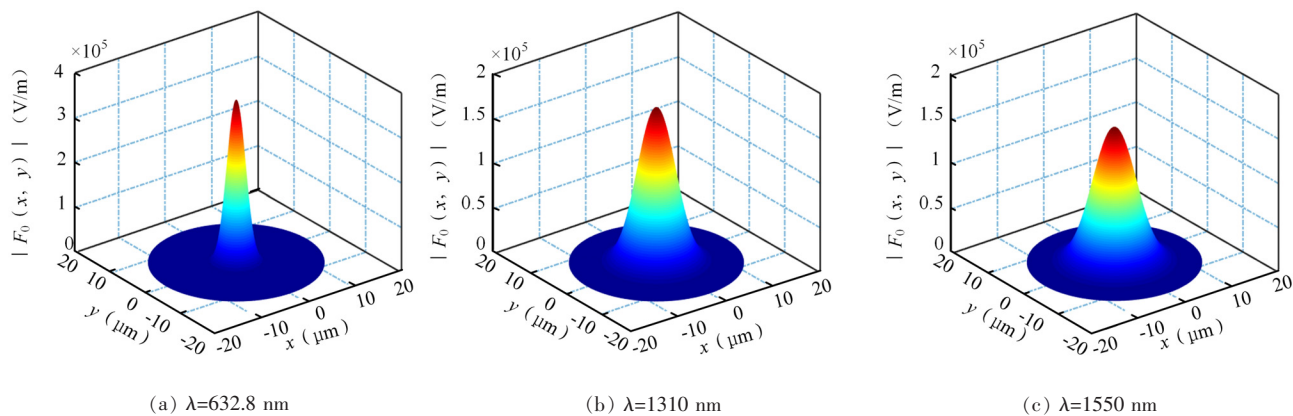


图3 不同波长的激光在单模光纤中的分布

将式(2)、式(3)代入式(4), 当理想情况 $\varphi(x, y)=0$ 时, 耦合效率可以化简为:

$$\eta = 2 \left[\frac{1 - e^{-\beta^2}}{\beta} \right]^2, \quad \beta = \frac{\pi R \omega_0}{\lambda f} \quad (5)$$

定义 β 为耦合参数。当 $\beta=1.12$ 时, 最大理论耦合效率可达 81.45%。

本文利用式(5)对不同的激光波长、不同的透镜参数的耦合效率的影响进行仿真, 如图4所示。由仿真结果可知, 耦合效率随着透镜的 R/f 比先增加后减小。对于特定波长, 要达到最佳耦合效率, 则需要相应的耦合结构进行匹配。1550 nm、1310 nm 和 632.8 nm 对应需要耦合透镜的 (R/f) 值分别为: 0.1053、0.1016 和 0.1026。

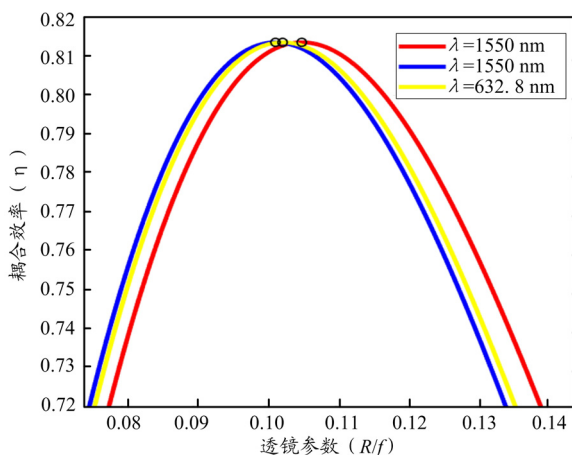


图4 透镜参数与耦合效率曲线

2 系统设计

2.1 系统结构

本文设计的空间光-单模光纤大幅面自适应耦合系统如图5所示, 其实物如图6所示。系统主要包括激光光源、光学耦合透镜、单模光纤、光电探测器、数

据处理模块、电压驱动模块、压电陶瓷(PZT)定位台及其控制算法。其主要工作原理为利用光电探测器实时采集当前位置的电压来控制二维纳米 PZT 定位台运动, 形成完整的闭环系统。PZT 具有电致伸缩效应, 当控制电压发生变化时, PZT 会发生伸长或者收缩。自适应耦合控制过程如下: 单模光纤水平固定在二维纳米 PZT 定位台上, 使光纤端面始终位于聚焦透镜的后焦平面上。PZT 定位台带动单模光纤以产生微位移。光电探测器实时采集的电压信号作为反馈量, 数据处理模块以优化的光栅扫描算法进行处理并且控制 PZT 定位台的运动, 实时调整光纤的位置。通过上述过程, 使耦合光斑的焦平面与光纤端面很好地重合, 达到自动耦合并且稳定跟踪的目的。

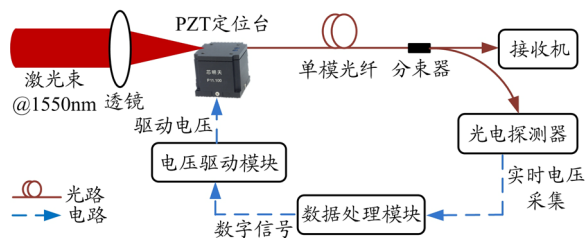


图5 空间光-单模光纤大幅面自适应耦合系统

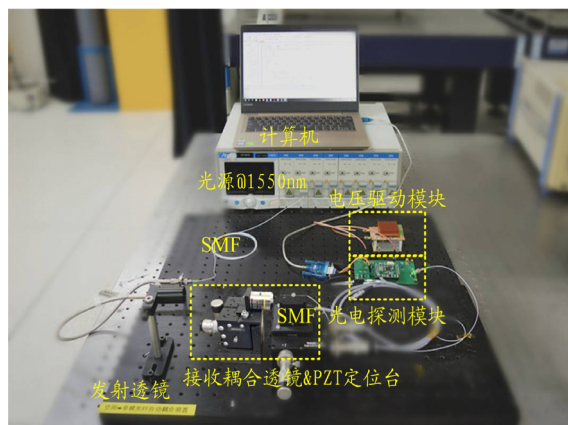


图6 实验系统实物图

2.2 硬件设计及算法控制

本文设计的系统硬件模块主要由二维纳米 PZT 定位台、STM32F103 单片机(MCU)、光电探测器、PZT 驱动电源、保护电路和笔记本组成,如图 7 所示。考虑到系统的整体功能,系统分为 3 个模块,即电压采集模块、数据处理模块和驱动电源模块。各模块的主要功能如下:电压采集模块负责将光电探测器的电压实时采集到单片机中,将模拟电压转换为相应的数字量,实现模/数(A/D)转换;数据处理模块负责接收所获取的数据并进行算法处理,经过 D/A 转换后输出控制信号反馈到驱动电源;驱动电源模块为平台供电并产生可调节的驱动电压以引起微位移,光电探测器可以检测到由于微位移引起的光强变化并且传递给 STM32F103 MCU,控制系统以此作为反馈信号形成了完整的闭环系统。

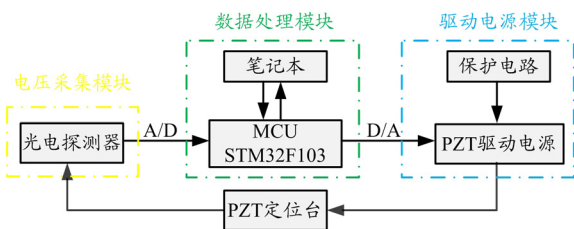
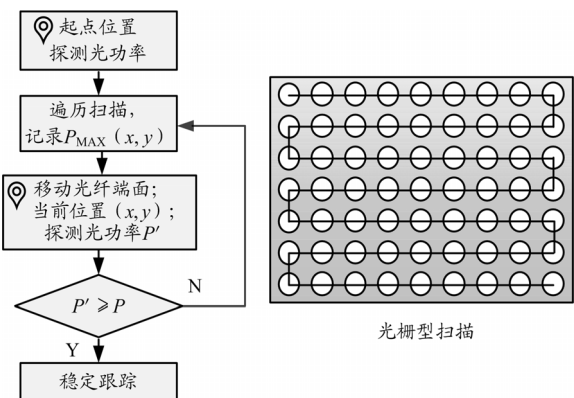


图 7 硬件模块设计

系统控制原理及扫描路径如图 8 所示。由于采用机械结构稳定的二维纳米 PZT 定位台,其对于载重和响应带宽有一定要求,本系统选用优化的光栅扫描方式。其利用反向 S 形轨道以特定的步长从左向右扫描矩形区域。它可以有效地覆盖整个区域,不易发生漏扫。算法通过初步遍历寻找当前区域内的光功率对大点 $P_{\text{MAX}}(x, y)$, 并对其位置信息进行记录。然后输出控制信号,使光纤端面定位至 (x, y) 并且检测光功率 P' 。



(a) 控制原理流程图

(b) 扫描路径

图 8 系统控制原理及扫描路径

通过判定条件判决当前结果是否有效且进入稳定跟踪过程。

2.3 二维 PZT 位移控制平台

本文选用的二维纳米 PZT 定位台由 COREMORROW 公司生产,如图 9 所示。平台内部采用无摩擦柔性铰链导向机构,放大式驱动原理,内置高性能 PZT,可实现 $110 \mu\text{m}$ 位移,闭环定位精度可达纳米级。定位台为无磁材质,使用过程中不受磁场的影响,体积小、结构紧凑易于集成。



图 9 二维纳米 PZT 定位台

3 空间光-单模光纤耦合实验

在实验中,本文选择 1550 nm 的分布式反馈激光器(DFB)可调功率激光器作为主光源。聚焦透镜为消色差显微物镜,焦距为 45 mm ,数值孔径为 0.1 。单模光纤的纤芯直径为 $9/125 \mu\text{m}$ 。三维精密调整架为 THORLABS 的 Nanomax300,精调步长为 $1 \mu\text{m}$,行程为 4 mm 。实验首先需要使用 680 nm 的信标光和三维精密调整架来粗调光纤位置,这样才能确保最佳耦合点在一定范围内。然后切换激光器, 1550 nm 激光束由 2 个透镜组成的牛顿望远镜系统进行扩束和准直,形成平行光束并垂直入射到耦合透镜上。在光纤耦合端面,借助毛细管将单模光纤和二维纳米 PZT 定位台进行固定,使得光纤可以由定位台带动产生微位移,并且可以通过精细调节光纤端面的位置以获得较高的耦合效率。系统使用的光电探测电路由作者自行设计,其性能测试曲线如图 10 所示。

定义耦合效率 η 为耦合入单模光纤的光功率 P 与经过耦合透镜聚焦后光纤端面的光功率 P_0 之比,即 $\eta =$

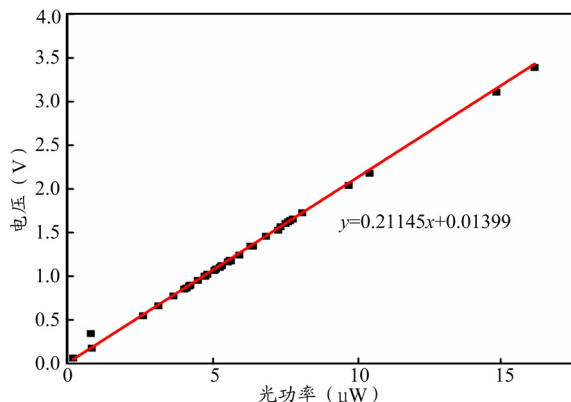


图 10 光功率和探测电压转换关系

P/P_0 。激光输出功率为 0.1 mW, 空间链路长度为 20 cm。由于光源扩束镜未镀增透膜等原因, 传输过程终会有光能量损失。透镜焦平面光纤端面测的光功率 $P_0=12.8 \mu\text{W}$ 。利用信标光人为粗对准, 测得耦合入光纤的功率为 $P=4.2 \mu\text{W}$, 耦合效率 $\eta_0=32.8\%$ 。

本文在不同扫描步长下进行了空间光-单模光纤自适应耦合实验, 自适应耦合系统的主要参数如表 1 所示。在 $110 \times 110 \mu\text{m}^2$ 的范围内进行扫描, 扫描点数越多、步长越小。单次扫描时间为遍历扫描区域 1 次所需的时间, 与定位台的响应速度有关。在实验过程中, 需要多次扫描进行精确定位。闭环时间指从扫描开始至进入稳定跟踪过程所需时间。最大电压表征最佳耦合点处光场强弱, 其换算关系如图 10 所示。由表 1 可知, 扫描的精细程度对最佳耦合点确定有一定影响。在扫描点为 4×4 时, 扫描较粗略, 闭环时间较短, 此时最佳耦合点的电压为 1.28 V, 经过换算 $\eta_A=40.6\%$ 。在扫描点为 15×15 和 20×20 时, 扫描比较精细, 但是闭环时间较长, 在闭环时间内光场会容易受到扰动, 耦合效果一般。在扫描点为 8×8 和 10×10 时, 由于扫描点数量设置适中, 在保证精度的前提下减少闭环时间, 实验效果较好。经过换算 $\eta_C=43.4\%$ 、 $\eta_D=44.1\%$, 比 η_0 分别提升了 10.6% 和 11.3%。

表 1 不同步长下耦合实验结果

实验组	扫描点	单次扫描时间(s)	闭环时间(s)	最大探测电压(V)
A	4×4	6	46	1.20
B	5×5	8	67	1.01
C	8×8	16	50	1.28
D	10×10	18	84	1.30
E	15×15	60	137	1.03
F	20×20	102	110	1.21

3.1 扫描点为 8×8 时的空间光-单模光纤自适应耦合过程研究

在实验时, 空间光耦合入单模光纤, 由光电探测器转化为电信号送入控制模块进行信号处理, 形成一个闭环系统。光电探测器输出电压可以反映整个耦合过程以及稳定跟踪的状态, 如图 11 所示。可以看出, 在第 64 个扫描点以前为遍历扫描过程; 第 64 个点以后为稳定跟踪过程。第 56 个点为最佳耦合点。在跟踪过程, 电压的平均值为 1.289 V, 方差为 0.00988。通过记录 PZT 定位跟踪过程, X、Y 方向输出电压驱动定位台, 即决定了光纤端面的位置。光场中不同点的位置信息结合该点的光场强度, 可以确定光场分布。本文

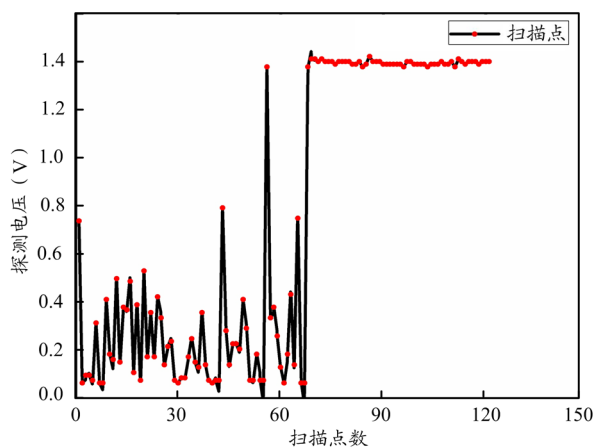


图 11 扫描点为 8×8 时光电探测器的输出电压

利用光纤端面扫描探测到的光场分布图如图 12 所示。可以看出, 最佳耦合点即图 11 中的第 56 点, 定位时输出信号为 (2.42 V, 1.61 V), 探测到电压为 1.28 V, 换算后光功率为 $5.99 \mu\text{W}$, 耦合效率为 43.4%。扫描点的移动轨迹如图 13 所示, 可以清晰地看出最佳耦合点的位置及对应探测电压。同时, 从 XZ 和 YZ 方向上的投影可以看出改变 X 或 Y 方向输出电压时探测点的位置变化及光场强弱的变化。

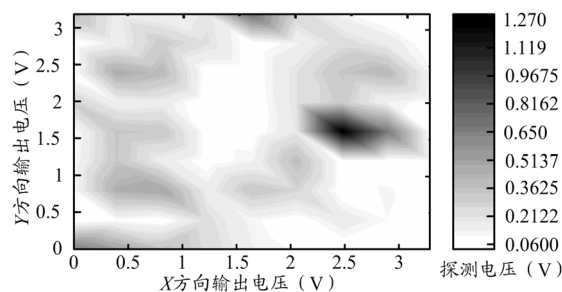


图 12 探测区域内光场分布

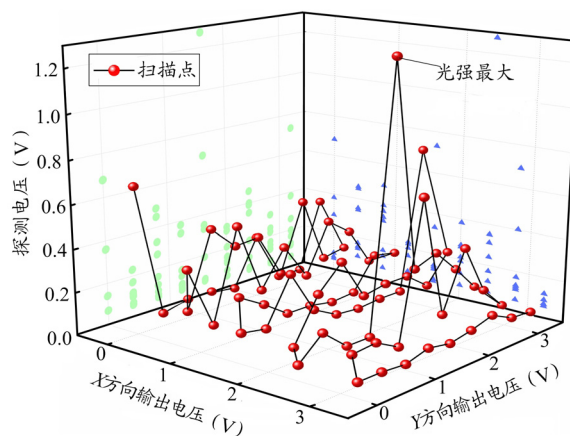


图 13 扫描轨迹

李晓龙, 闫宝罗, 胡金耀, 等: 大幅面空间光自适应耦合技术的研究

3.2 空间光-单模光纤自适应耦合系统的稳定跟踪阶段研究

我们在不同扫描步长下, 每隔 15 s 采集数据, 记录了稳定跟踪过程中的功率变化, 如图 14、图 15 所示。可以看出, C、D 和 E 组功率较稳定, 且持续保持在一个较高水平。图 15 是对图 14 的统计结果, 反映了探测电压的平均值及方差。可以看出, C 组 (即扫描点为 8×8) 平均的探测电压值为 1.289 V, 方差为 0.00988。这也从侧面反映对于所设计的空间光-单模光纤自适应耦合系统, 扫描点设置为 8×8 为合理, 可以实现快速耦合对准且稳定跟踪。

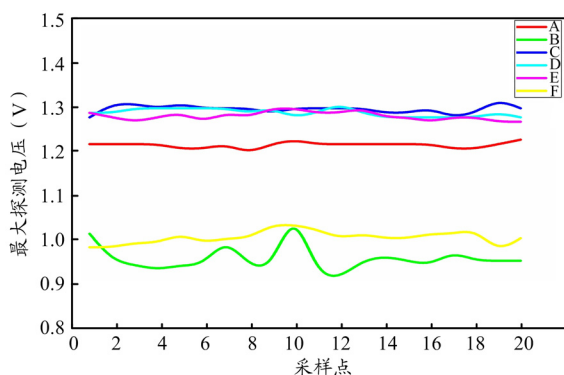


图 14 不同扫描步长下的探测电压变化

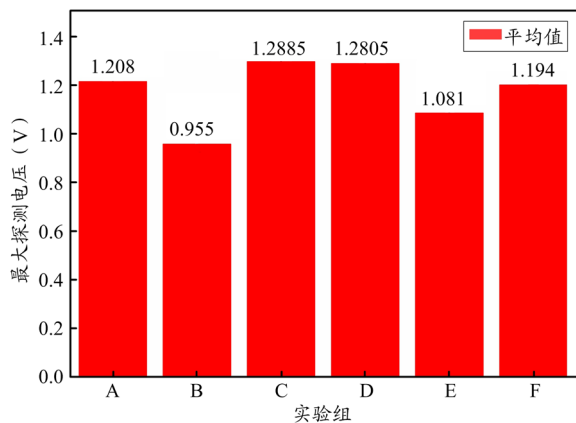


图 15 不同扫描步长下跟踪过程结果

4 结束语

在 FSOC 系统中, 空间光-单模光纤耦合效率及稳定度直接影响接收机的性能。其耦合效率受到静态角度偏差、随机角度抖动误差、大气湍流像差和光纤的视轴对准偏差等因素的影响。本文利用二维纳米 PZT 定位台来实时动态调整耦合光纤的位置, 结合光栅扫描算法搭建了大幅面的自适应耦合系统。对于

1550 nm 的信号光和单模光纤进行了自动耦合实验, 实验结果清晰地反映了整个耦合过程。通过实验结果发现: 本系统可自动完成精确对准过程并且将耦合后的光功率持续稳定在一个较高水平。在 $110 \times 110 \mu\text{m}^2$ 范围内, 扫描点设置为 8×8 时, 最佳耦合点的耦合效率为 43.4%, 较未自动对准时提升了 10.6%。在稳定跟踪过程中, 耦合效率稳定在 43.6%, 方差为 0.00988。实验结果表明了本方案切实可行、实用性高, 系统扫描范围大、结构稳定, 对于空间光-单模光纤的自动耦合方案的研究具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 马晶, 谭立英, 于思源. 卫星光通信[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [2] 姜会林, 佟首峰. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [3] KIM I I, KOREVAAR E J. Proceedings of International Symposium On the Convergence of It and Communication, August 20-24, 2001 [C]. Bellingham: Korevaar, 2001.
- [4] CHEN M, LIU C, RUI D M, et al. Performance verification of adaptive optics for satellite-to-ground coherent optical communications at large zenith angle[J]. Optics Express, 2018, 26(4): 4230-4242.
- [5] 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.
- [6] HUANG G, GENG C, LI F, et al. Adaptive SMF Coupling Based on Precise-Delayed SPGD Algorithm and Its Application in Free Space Optical Communication[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(3): 1-12.
- [7] 闫宝罗, 李晓龙, 张红伟, 等. 锥形光纤在空间光通信耦合系统中的应用[J]. 光学精密工程, 2019, 27(2): 287-294.
- [8] LI X L, LIU B, YAN B L, et al. Design and implementation of adaptive coupling system for making space light into single-mode fiber [C]// 17th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON2018), November 16-19, Bellingham: SPIE, 2019.
- [9] 吴子开, 陈莫, 刘超, 等. 基于光栅螺旋扫描和 SPGD 算法的单模光纤耦合方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 82-90.
- [10] YAMAÇD, FREDERIC M D. Fiber coupling efficiency for free-space optical communication through atmosphere turbulence [J]. SPIE, 2004, 5338: 76-80.
- [11] VORONTOV M A, WEYRAUCH T, BERESNEV L A, et al. Adaptive Array of Phase-Locked Fiber Collimators: Analysis and Experimental Demonstration [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(2): 269-280.
- [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] 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.
- [14] 高建秋, 孙建峰, 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): 25-32.