

文章编号: 1001-3806(2014)02-0191-05

空间光-光纤阵列耦合自动对准实验研究

雷思琛, 柯熙政*, 邵军虎

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

摘要: 为了使空间光-光纤耦合结构具有一定的抗抖动能力, 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 2 维控制, 自动搜寻空间光-光纤耦合最佳视轴对准姿态。对光纤阵列和模拟退火算法进行了理论分析实验验证, 取得了耦合效率变化的相关数据。结果表明, 通过模拟退火算法可以实现空间光-光纤视轴对准, 且光斑中心在耦合端面中心抖动小于 2.5mm 时, 耦合功率波动小于 35%, 满足无线激光通信系统的要求。

关键词: 光通信; 空间光耦合; 模拟退火算法; 耦合效率

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.02.010

Experimental study about fiber array coupling and auto-alignment

LEI Sichen, KE Xizheng, SHAO Junhu

(The Faculty of Automation & Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to improve anti-jitter capability of a fiber coupling structure, a fiber array with self-focusing lens was designed, the optical fiber array was controlled by means of annealing algorithm and the optimal visual axis alignment position was found. The fiber array and simulated annealing algorithm were analyzed theoretically, and the data of coupling efficiency was achieved. Experimental results show that the simulated annealing algorithm can find the optimal visual axis alignment position. When spot center moving less than 2.5mm on the coupling surface, the power coupled in the fiber fluctuates less than 35%. It can meet the requirements of free space optical communication system.

Key words: optical communication; space optical coupling; simulated annealing algorithm; coupling efficiency

引 言

空间光-光纤耦合是无线光通信的一项关键技术, 耦合效率与光纤芯径、光纤端面处理工艺、空间光相位分布以及光纤与空间光的视轴对准程度等有关。

2005 年, DIKMELIK 和 DAVIDSON 使用单模光纤阵列(六角形分布)结构进行耦合以提高耦合效

率^[1]。2011 年, BELMONTE 和 KAHN 在自由空间相干光通信中使用微透镜-光纤阵列分级相干叠加的技术以提高接收增益^[2-3]。2011 年, HAHN 和 BROWN 使用微透镜阵列-光纤阵列来提高耦合效率^[4]。2007 年, 电子科技大学的 GAO 等人研制了基于压电陶瓷和快速倾斜镜的空间光-单模光纤耦合系统, 该系统采用五点搜寻法根据耦合入光纤的光功率大小自动搜寻到最佳位置^[5]。2009 年, 哈尔滨工业大学的 WANG 提出了基于快速倾斜镜和 CCD 的空间光-单模光纤耦合系统, 该系统可以补偿振动频率介于 1Hz ~ 50Hz、振动幅度介于 75 μ rad ~ 300 μ rad 之间耦合效率的损失^[6]。

本文中设计的空间光耦合系统, 使用 2 维步进电机进行控制, 结合模拟退火算法实现空间光-光纤视轴对准; 并利用自聚焦透镜-光纤阵列来保持稳定的耦合效率。阵列与单根光纤的耦合效率曲线^[7]存在较大的差异。阵列耦合效率曲线存在多个极值点, 模拟退火算法是突破极值寻找最值的有效算法,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60977054); 陕西省“13115”科技统筹计划资助项目(2011KTCQ01-31); 陕西省教育厅产业化培育基金资助项目(2010JC17); 西安市科技成果转化基金资助项目(CX12165); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2013JQ8011); 陕西省教育厅科研计划资助项目(2013JK1104)

作者简介: 雷思琛(1988-), 女, 博士研究生, 主要从事无线激光通信 APT 系统的研究。

* 通讯联系人。E-mail: xzke@263.net

收稿日期: 2013-05-21; 收到修改稿日期: 2013-07-04

利用该算法结合高精度的步进电机实现空间光-光纤视轴对准,保持稳定的耦合效率。

1 原理

1.1 空间光-光纤阵列耦合系统

如图1所示,系统由2个转动步进电机组合成俯仰和方位可调的2维结构。阵列的耦合端固定在俯仰转动步进电机上;另一端连接光电探测器。数据采集卡获取该电压信号的具体数值作为反馈量,结合模拟退火算法控制步进电机的运动,使光纤阵列与空间入射光视轴对准,获取较高的耦合效率。

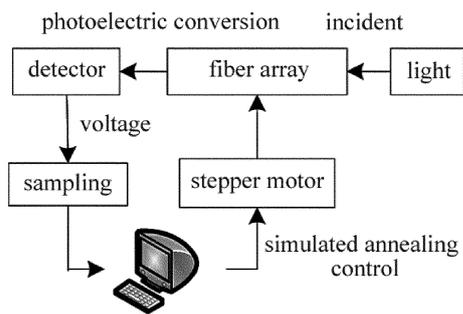


Fig. 1 The coupling system

1.2 空间光-自聚焦透镜-多模光纤耦合

光纤耦合结构如图2所示,采用1/4节距自聚焦透镜和多模光纤组合的结构完成。当平行光线垂直入射在自聚焦透镜入射面($z=0$ 处)的点 x_0 时,光线的轨迹方程为^[8]:

$$\begin{cases} x = x_0 \cos(\sqrt{A}z) \\ P = -x_0 \sqrt{A} \sin(\sqrt{A}z) \end{cases} \quad (1)$$

式中, P 为光线的斜率, A 为聚焦常数。

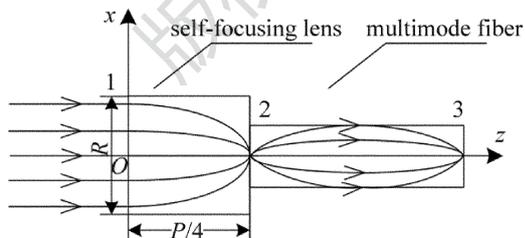


Fig. 2 The coupling structure

取 $z = P/4 = \pi/(2\sqrt{A})$ 时,平行光垂直入射到自聚焦表面光线会汇聚在1/4节距处轴心位置。设多模光纤的数值孔径为 d_{NA} ,满足 $\sin(90^\circ - \arctan P) \leq d_{NA}$ 的光线,即当 $x_{max} < |\cot(\arcsin d_{NA})/\sqrt{A}|$ 时,可以耦合进光纤内部,称 x_{max} 为有效耦合半径。考虑到光线共经过3个折射率突变的位置,如图2中1,2

和3位置所示,存在菲涅耳反射。将该反射率、透镜像差和透镜的吸收等因素造成的耦合效率下降设为 η_s 。则将该系统的垂轴耦合效率 $\alpha_s(x)$ 近似看成门函数:

$$\alpha_s(x) = \begin{cases} \eta_s, & (-x_{max} < x < x_{max}) \\ 0, & (x < -x_{max}, x > x_{max}) \end{cases} \quad (2)$$

1.3 光纤阵列

半导体激光器在垂直于光轴的平面内所发出的光强呈高斯分布^[8]。只考虑 x 轴方向上的光强分布,则将 x 轴方向归一化光强可以近似为:

$$I(x) = \exp[-2(x/w_0)^2] \quad (3)$$

式中, w_0 为耦合面高斯光场半径; x 为高斯光束在耦合面上任意一点到 x 轴上中心的距离。

若只考虑 x 轴向位移,阵列的衰减函数 $\alpha(x)$ 可以近似表示为^[9]:

$$\alpha(x) = \begin{cases} \alpha_s(x + x_f), & (-1.5x_f \leq x < -0.5x_f) \\ \alpha_s(x), & (-0.5x_f \leq x \leq 0.5x_f) \\ \alpha_s(x - x_f), & (0.5x_f < x \leq 1.5x_f) \\ 0, & (x < -1.5x_f, x > 1.5x_f) \end{cases} \quad (4)$$

式中, x_f 为相邻两根光纤间的间距,如图3a所示。

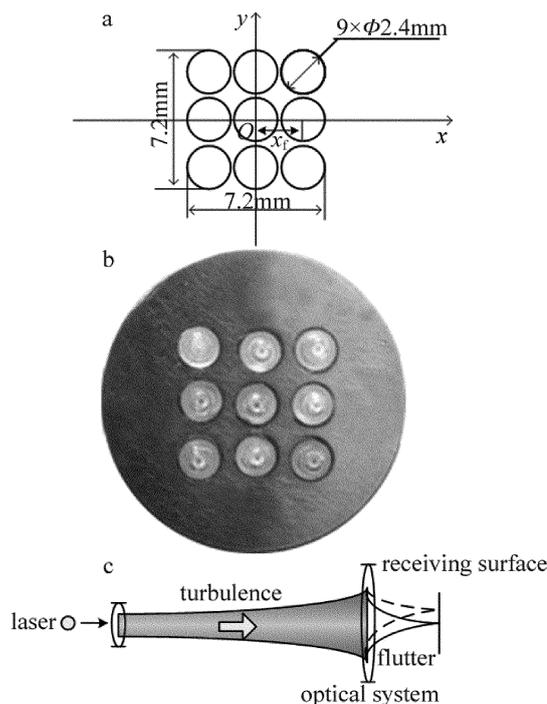


Fig. 3 Fiber array

当光纤阵列耦合面在入射光斑内部从左向右移动时,如图4所示。耦合进光纤内部的光强 $I_{in}(x)$ 为激光器光强分布 $I(x)$ 与阵列衰减函数 $\alpha(x)$ 卷积:

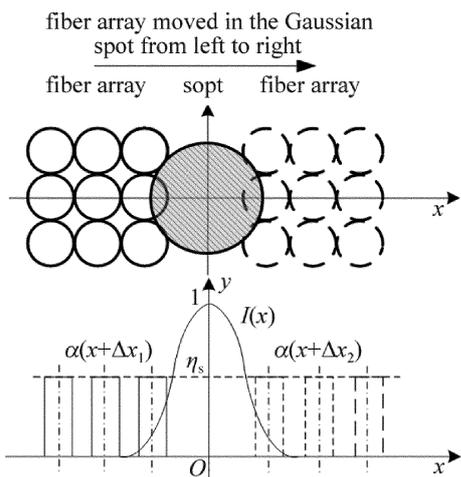


Fig. 4 The optical fiber array move in the Gaussian spot

$$I_{in}(x) = I(x) * \alpha(x) \quad (5)$$

阵列的耦合效率 $\eta(x)$ 为:

$$\eta(x) = \frac{I_{in}(x)}{I_{sum}(x)} = \frac{I_{in}(x)}{\int I(x) dx} \quad (6)$$

式中, I_{sum} 表示总光强。

图 5 为不同光场半径入射光照在图 3b 所示光纤阵列时耦合效率 $\eta(x)$ 的变化曲线。其中 x 为光纤耦合阵列中心到光斑中心的距离。相邻两根光纤间的间距为 $x_f = 2.4\text{mm}$, 取 $x_{max} = 0.5\text{mm}$, $\eta_s = 53.4\%$ (实测单根光纤耦合效率的最大值)。

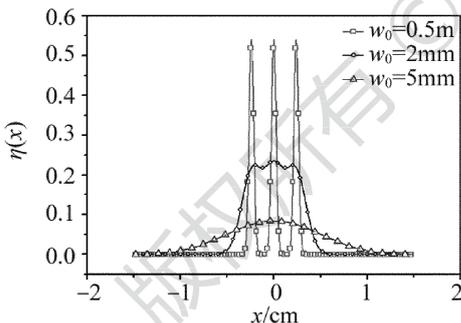


Fig. 5 The curve of coupling efficiency with different radius of light

从图 5 中可以明显地看出,当光场半径 w_0 由小变大时,最大耦合效率不断下降。但 w_0 较小或者较大时,在 x 轴上 $\eta(x)$ 不存在大于一个固定值(假设为 10%)的连续邻域,并不适合应用在远距离空间光通信中。

当 $w_0 = 2x_{max} = 1\text{mm}$, $\eta(x)$ 在距 x 轴中心 $\pm 3.4\text{mm}$ 范围内,耦合效率波动小于 76.5%,最大耦合效率为 36.2%。当 $w_0 = 3x_{max} = 1.5\text{mm}$, $\eta(x)$ 在距 x 轴中心 $\pm 3.3\text{mm}$ 范围内,耦合效率波动小于 35.4%,最大耦合效率为 26.8%。当 $w_0 = 4x_{max} = 2\text{mm}$, $\eta(x)$ 在距 x 轴中心 $\pm 2.6\text{mm}$ 范围内,耦合效率波动小于

9%,最大耦合效率为 23.1%。

综合考虑最大耦合效率、以及耦合效率的波动和允许移动的范围, w_0 的取值应该在 $1\text{mm} \sim 2\text{mm}$ 之间,故光斑直径调整至 4mm 左右。图 6 中步进电机以单位转动 0.0025° 逆时针转动光纤阵列,使光纤阵列表面从直径约为 4mm 的光斑下边缘到上边缘,步进电机每运行一步待稳定后,获取探测器电压 $V(x)$ 。通过该实测数据可以看出:在距 x 轴中心 $\pm 2.5\text{mm}$ 耦合效率波动小于 35%。图 6 中虚线为当 $w_0 = 2\text{mm}$ 时,实测的归一化的 $I_{in}(x)$ 的曲线。可以看出:在耦合光纤阵列从光斑的一个边缘沿一个方向移动到另一个边缘时,耦合进光纤内部的光强变化存在极值和最大值。如何从极值跳脱出来找到耦合光强的最大值,是模拟退火算法主要解决的问题。

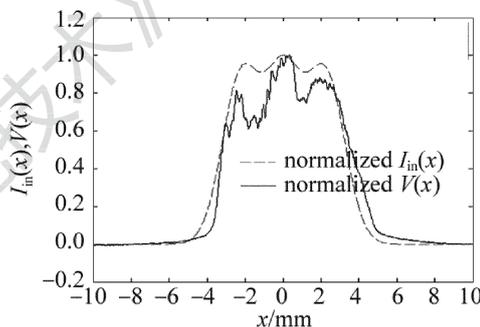


Fig. 6 The $I_{in}(x)$ curve and $V(x)$ normalized curve

2 控制算法的数值仿真

用图 6 中的实测电压曲线 $V(x)$ 作为待优化函数。采用模拟退火算法进行优化^[10],影响算法的优化结果和收敛速度的参量主要有:初始温度 T_0 ,退火常数(温度更新函数) a ,搜索步长 d_s 。实际中步进电机存在小于 0.01° 的重复定位误差。由于步进电机单步运行一步为 0.0025° ,换算下来存在 4 个步长以内的误差。在仿真时需要将该误差考虑在内。

表 1 中列出了采取不同的 T_0 , a 和 d_s 组合下对 $V(x)$ 的优化结果、成功概率以及迭代次数的具体数值。为实际测试系统参量提供依据。

从表 1 中可以看出:(1)取 $a = 0.5$, $T_0 = 0.5$ 的每个步长下的平均迭代次数小于 $T_0 = 0.1$ 和 $T_0 = 1$ 时的平均迭代次数;(2)取 $T_0 = 0.5$, $a = 0.1$ 或 $a = 0.5$ 每个步长下的平均迭代次数变化不明显;但 $a = 0.9$ 时,每个步长下的平均迭代次数明显升高;(3)取 $T_0 = 0.5$, $a = 0.5$ 时,观察步长 d_s 为 50, 100 和

Table 1 The results of simulation related with T_0, a and d_s

T_0	a	d_s	number of times	average results of optimization for $V(x)$	probability of success	average number of iterations
0.1	0.5	50	1000	0.776	0.3%	837.8
0.1	0.5	100	1000	0.785	73.4%	534.9
0.1	0.5	200	1000	0.981	100%	208.7
0.5	0.1	50	1000	0.721	0.2%	990.0
0.5	0.1	100	1000	0.783	72.5%	525.5
0.5	0.1	200	1000	0.981	100%	206.7
0.5	0.5	50	1000	0.788	0.5%	700.4
0.5	0.5	100	1000	0.786	73.0%	516.5
0.5	0.5	200	1000	0.988	100.0%	223.7
0.5	0.9	50	1000	0.784	1.6%	805.6
0.5	0.9	100	1000	0.783	71.6%	576.8
0.5	0.9	200	1000	0.981	99.9%	337.6
1	0.5	50	1000	0.809	0.2%	869.5
1	0.5	100	1000	0.783	70.9%	513.8
1	0.5	200	1000	0.979	99.4%	217.9

200 的相关数据,成功概率依次增大、最大值不断提高、迭代次数减小。

选择模拟退火算法的 3 个主要参量的具体数值为: $T_0 = 0.5, a = 0.5$ 和 $d_s = 200$ 。其中运行该算法保留 $V(x)$ 数值曲线如图 7 所示。

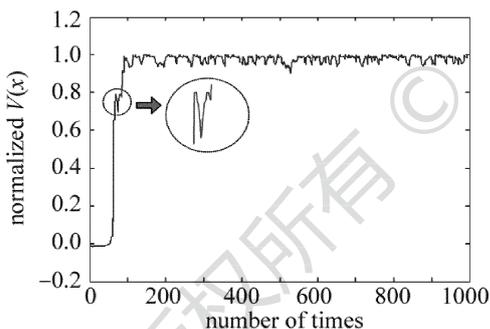


Fig. 7 The simulation results of the normalized $V(x)$ carry out by simulated annealing algorithm

图 7 圆圈中所示为跳出极值的过程,仿真结果表明,使用模拟退火算法可以跳出极值,找到实测 $V(x)$ 的最大值。由该算法找出的最大值与理论最大值 1 相差 0.2%。

3 实验及结论分析

实验中使用的仪器及其参量如表 2 所示。图 8 为系统的实物平台。当光斑直径为 4mm 时,理论上可以获得最大耦合效率 $\eta(x) = 23.1\%$ 。对于波长为 650nm、功率为 1mW 的激光器而言,理论上耦合进光纤内部的光功率为 0.231mW。根据光电探测器的 650nm 灵敏度和放大倍数可知,理论上可获得

最大 $V(x) = 947\text{mV}$ 。实验结果见表 3。

Table 2 The table of experimental instrument

instrument	model	parameters
stepper motor	KZ400B	step angle divided by 8: 0.0025°
detector	PAD10A-EC	amplifier: 10 ⁴ V/A; sensitive (650nm): 0.41 A/W
sampling	PCI8002	max sampling voltage: 5V
laser	—	output power: 1mW; wave number: 650nm

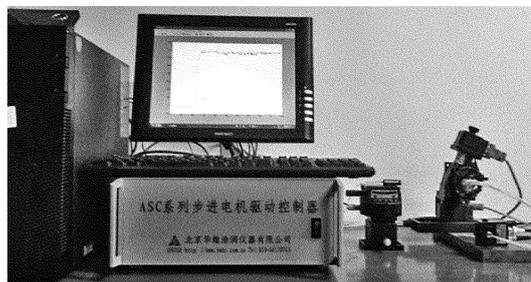


Fig. 8 The real coupling system

Table 3 The table of experimental results

T_0	a	d_s	number of times	average results of $V(x)$	probability of success	average number of iterations
0.5	0.5	200	20	579.95mV	90%	271.25

实验结果表明可以找到较好的耦合位置。探测器上获得的平均电压为 579.95mV。图 6 中的实测数据可以说明:对于数字通信系统而言,选择适当的判决电平,该结构可以保持正常通信,且可以有效克服光斑中心在光纤耦合面中心 $\pm 2.5\text{mm}$ 的抖动,满足通信系统的需求。

4 结 论

所设计的空间光耦合系统采用2维可控的步进电机来控制光纤阵列与空间光的对准姿态,实现空间光-光纤视轴对准;并利用光纤阵列实现稳定耦合效率的保持。只要选择合适的光学系统,将光纤阵列耦合面上抖动幅度的限制在距中心 $\pm 2.5\text{mm}$ 以内,该系统可以对任何频率的抖动造成的耦合效率下降问题进行有效补偿。

参 考 文 献

- [1] DIKMELIK Y, DAVIDSON F M. Fiber-coupling efficiency for free-space optical communication through atmospheric turbulence [J]. Applied Optics, 2005, 44(23):4946-4952.
- [2] BELMONTE A, KAHN J M. Field conjugation adaptive arrays in free-space coherent laser communications [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2011, 11(3):830-838.
- [3] WEEKS A R, XU J, PHILLIPS R R, *et al.* Experimental verification and theory for an eight-element multiple aperture equal-gain coherent laser receiver for laser communications [J]. Applied Optics, 1998, 37(21):4782-4788.
- [4] HAHN D V, BROWN D M. Fiber optic bundle array wide field-of-view optical receiver for free space optical communication [J]. Optics Letters, 2010, 35(21):3559-3561.
- [5] 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 (in Chinese).
- [6] WANG Q. 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, 2009:15-20 (in Chinese).
- [7] DENG K. Technology of coupling beam into single-mode fiber in free space optical communication system [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2007, 36(5):889-891 (in Chinese).
- [8] LIAO Y B. Optic fiber [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000:96-110 (in Chinese).
- [9] FENG T. Study of coupling system of a novel optical antenna [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2007:20-27 (in Chinese).
- [10] RUTENBAR R A. Simulated annealing algorithms: an overview [J]. IEEE Circuits and Devices Magazine, 1989, 5(1):19-26.