

基于光栅螺旋扫描和 SPGD 算法的单模光纤耦合方法

吴子开^{1,2,3}, 陈莫^{1,2,3}, 刘超^{1,2}, 鲜浩^{1,2}

¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 自由空间光通信系统需要将空间光高效耦合到单模光纤中,但聚焦光斑与单模光纤间的初始对准误差和随机横向偏移会导致极大的耦合损耗。对空间光到单模光纤耦合的理论模型进行了阐述,并分析了横向偏移及随机抖动对耦合效率的影响。在此基础上,为了提高光纤耦合效率,提出了一种基于光栅螺旋扫描算法和随机并行梯度下降(SPGD)算法的耦合方案,并仿真分析了误差校正过程及其对耦合效率的改善情况。仿真结果表明:通过设定最佳扫描步长,光栅螺旋扫描算法能够有效地校正初始对准误差,校正成功概率高于99%;校正后的残余初始对准误差集中在0.5~6.5 μm范围内,耦合效率得到初步改善;开启SPGD控制算法后,聚焦光斑与单模光纤间的随机横向偏移得到校正,耦合效率能够有效提升至0.81,接近无湍流情况下的理论极限。校正后,耦合效率得到显著提高。

关键词 光通信; 光纤耦合; 光栅螺旋扫描; 随机并行梯度下降算法; 对准误差

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.060602

Single-Mode Fiber Coupling Based on Raster Spiral Scanning and SPGD Algorithm

Wu Zikai^{1,2,3}, Chen Mo^{1,2,3}, Liu Chao^{1,2}, Xian Hao^{1,2}

¹Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract For free-space optical communication systems, spatial light must be efficiently coupled into the single-mode fiber first. However, the initial alignment error and the random lateral deviation existed between focused spot and single-mode fiber lead to a dramatic coupling loss. A theoretical model of coupling the spatial light into single-mode fiber is expounded, and the effects of the lateral deviation and the random jitter on coupling efficiency are analyzed. On this basis, in order to improve the fiber coupling efficiency, a coupling scheme based on raster spiral scanning algorithm and stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm is proposed. Simulations on the process of error correction and the improvement of coupling efficiency after error correction are carried out. The results show that, by setting the optimal scanning step, the initial alignment error can be efficiently corrected by raster spiral scanning algorithm, the success probability of initial alignment error correction can be higher than 99%. The residual initial alignment error focuses in 0.5-0.6 μm, and the coupling efficiency has been improved preliminarily. By adopting the SPGD algorithm, the random lateral deviation between focused spot and single-mode fiber can be corrected, and the coupling efficiency also rises to 0.81, which approaches the theoretical limit without turbulence. After the correction, the coupling efficiency is significantly improved.

Key words optical communications; fiber coupling; raster spiral scanning; stochastic parallel gradient descent

收稿日期: 2017-01-13; **收到修改稿日期:** 2017-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(61308082)、中国科学院科技创新基金(YJ16K004)

作者简介: 吴子开(1992—),男,硕士研究生,主要从事光通信方面的研究。E-mail: kaiser34@163.com

导师简介: 鲜浩(1969—),男,硕士,研究员,主要从事自适应光学与大型望远镜系统设计方面的研究。

E-mail: xianhao@ioe.ac.cn(通信联系人)

algorithm; alignment error

OCIS codes 060.4510; 060.2605; 060.1810

1 引言

自由空间光通信技术具有传输速率快、信息容量大、通信保密性能好、可用频谱宽等优点,已经成为世界通信领域的研究热点之一^[1-3]。同时,为了提高通信系统的探测灵敏度和通信速率,成熟的光纤通信技术也被广泛应用于空间光通信系统中。对于上述系统来说,首先需要解决的问题是将接收到的空间光高效地耦合进单模光纤中。然而空间光耦合过程中受单模光纤纤芯半径限制,以及受对准误差、平台振动、热效应等因素的影响,耦合进光纤的光功率损耗极大。因此,提高单模光纤耦合效率是基于光纤的空间光通信系统中需要解决的关键问题之一^[4-6]。

针对空间光到单模光纤耦合效率的问题,国内外研究人员进行了许多相关的理论和实验研究,并提出了一系列方案,力图实现稳定高效的耦合。2002年,Weyrauch等^[7]利用微机械变形镜自适应光纤耦合系统改善光纤耦合效率,单模光纤耦合效率约为60%;2007年,高皓等^[8]利用压电陶瓷和快速倾斜镜,通过五点搜寻法、根据耦合光功率大小并结合一维平动精确定位实现自动耦合,该耦合方案控制算法较为复杂;2012年,Hideki等^[9]采用四象限探测器和快速反射镜作为误差补偿方案,对星地链路实验中的到达角起伏误差进行了校正,但系统结构复杂且容易引入误差;2014年韩琦琦等^[10]提出了以CCD作为探测器、以快速反射镜作为补偿件的微振补偿系统,但是只针对多模光纤展开了分析和振动补偿实验研究;2014年罗文等^[11]采用自适应光纤耦合器有效地提高了单模光纤耦合效率,系统结构简单,但是该方案对较大随机横向偏移的校正能力有限。同时,这些实验方案均没有对抖动情况下聚焦光斑与单模光纤间的初始对准误差的校正展开分析与研究。

本文首先分析了随机抖动以及静态偏差对单模光纤耦合效率的影响,并以此为基础,提出了一种基于光栅螺旋扫描和随机并行梯度下降(SPGD)算法的耦合方案;针对不同随机抖动情况下的初始对准误差,利用光栅螺旋扫描算法进行初步校正,对其校正过程与结果进行了仿真分析;利用SPGD控制算法对随机横向偏移进行进一步校正,仿真分析了单模光纤耦合效率的优化迭代过程。

2 单模光纤耦合基本原理

空间光束经过光学接收系统聚焦后在后焦平面形成艾里斑,将单模光纤端面置于后焦平面处,使纤芯与光斑重合,从而实现空间光与单模光纤之间的耦合,图1所示为空间光与单模光纤的耦合原理示意图。

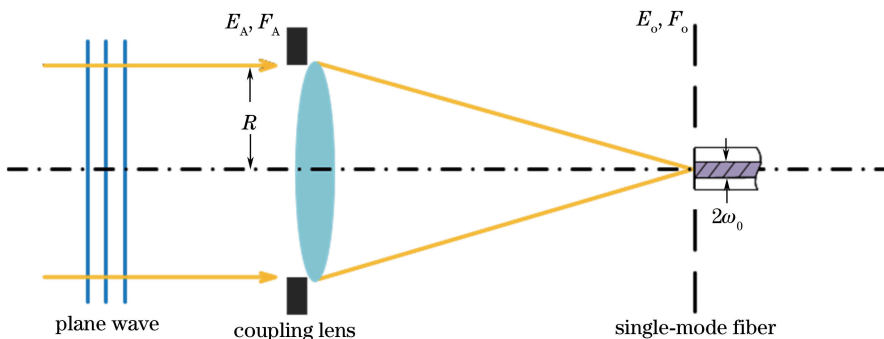


图1 空间光-单模光纤耦合原理示意图

Fig. 1 Schematic of spatial light coupling into single-mode fiber

单模光纤耦合效率表示为耦合进光纤内的光功率与光学接收系统口径内光功率的比值,即^[3]

$$\eta = \frac{\left| \iint E_A^*(r) F_A(r) ds \right|^2}{\iint |E_A^*(r)|^2 ds \cdot \iint |F_A(r)|^2 ds}, \quad (1)$$

式中 $E_A(r)$ 为接收系统入瞳面上平行光束的光场分布, $E_A^*(r)$ 为 $E_A(r)$ 的共轭, $F_A(r)$ 为单模光纤的后向传

输模场分布, s 为积分区域为接收端入瞳面, r 为径向坐标。

在理想无湍流情况下, $E_A(r)$ 为无畸变波前相位的平面波, 此时光纤耦合效率可简化为

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

式中 β 为耦合参数, $\beta = \pi D \omega_0 / (2\lambda f)$, λ 为空间光束波长, D 为接收口径, f 为耦合系统焦距, ω_0 为单模光纤模场半径。当 $\beta = 1.12$ 时, 耦合效率 η 为理论最大值 0.8145, 如图 2 所示。

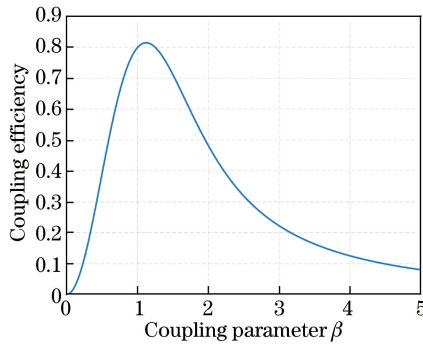


图 2 理想情况下耦合效率 η 与耦合参数 β 的关系曲线

Fig. 2 Relationship between coupling efficiency η and coupling parameter β under ideal condition

在自由空间光通信过程中, 由于平台振动、对准误差、热效应等众多因素的影响, 系统中接收光束与接收系统光轴之间存在静态角偏差和随机角抖动。相关研究表明, 入射光束的角偏差与光纤的横向偏移量是等效的^[12]。因此, 入射光束的静态角偏差与随机角抖动引起的光斑位置偏移可以等效为光纤端面的随机横向偏移。

此时, 入射光瞳面处的单模光纤平均耦合效率表达式为^[12]

$$\langle \eta \rangle = \frac{\left\langle \left| \iiint E_A^*(r) F_A(r, r_j) p(r_j, \Delta r) ds dr_j \right|^2 \right\rangle}{\left\langle \left| E_A^*(r) \right|^2 ds \right\rangle \left\langle \left| F_A(r, r_j) \right|^2 ds \right\rangle}, \quad (3)$$

$$p(r_j, \Delta r) = \frac{r_j}{\sigma_j^2} \exp\left(-\frac{\Delta r^2 + r_j^2}{2\sigma_j^2}\right) I_0\left(\frac{\Delta r \cdot r_j}{\sigma_j^2}\right), \quad (4)$$

$$F_A(r, r_j) = \sqrt{\frac{2}{\pi\omega_a^2}} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_a^2}\right) \exp\left[\frac{i2\pi}{\lambda f} \cos(\varphi - \phi) r \cdot r_j\right], \quad (5)$$

式中 σ_j 为光纤端面横向随机偏移 r_j 的标准差; Δr 为聚焦光斑与随机抖动中心的静态偏差; I_0 为零阶修正贝塞尔函数; $p(r_j, \Delta r)$ 为光纤端面横向随机偏移 r_j 的概率密度函数, 服从 Rician 分布; $F_A(r, r_j)$ 为光纤端面横向随机偏移 r_j 条件下单模光纤的后向传输模场分布; ω_a 为后向传输模场的模场半径。

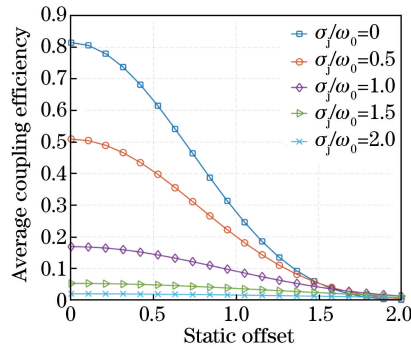
将(4)、(5)式代入(3)式中, 化简后得到

$$\langle \eta \rangle = 8\beta^2 \left| \int_0^1 \exp\left[-\beta^2 \left(\frac{2\sigma_j^2}{\omega_0^2} + 1\right) \rho^2\right] J_0\left(\frac{2\Delta r \beta \rho}{\omega_0}\right) \rho d\rho \right|^2, \quad (6)$$

式中 J_0 为第一类零阶贝塞尔函数, ρ 为归一化入瞳孔径半径, ω_0 为光纤模场半径。图 3 所示为耦合参数 $\beta = 1.12$ 时, 在不同的随机抖动标准差 σ_j/ω_0 下, 平均耦合效率 $\langle \eta \rangle$ 随着静态偏差 Δr 的变化。从图中可知, 当随机抖动标准差一定时, 平均耦合效率随着静态偏差的增加而单调递减, 当 Δr 大于 $1.5\omega_0$ 时, 平均耦合效率下降至不足 5%; 同时, 随机抖动标准差的增加也会使平均耦合效率急剧恶化, 当 σ_j/ω_0 为 1 时, 平均耦合效率小于 20%。

3 单模光纤耦合方案

单模光纤耦合方案以光栅螺旋扫描和 SPGD 控制算法为核心, 以耦合进单模光纤的光功率大小作为控制信号, 利用快速反射倾斜镜作为执行机构组成闭环控制系统, 通过驱动聚焦光斑在耦合透镜后焦平面搜寻

图3 不同 σ_j/ω_0 情况下平均耦合效率与静态偏差的关系Fig. 3 Relationship between average coupling efficiency and static offset under different σ_j/ω_0

耦合效率最大位置,从而达到校正光斑位置和改善单模光纤耦合效率的目的。

3.1 光栅螺旋扫描

由于每次初始状态聚焦光斑的位置都可能存在差异,并不能够有效地进行耦合,因此当其偏离光纤的位置较大时,为了将光斑定位至单模光纤附近,首先需要采用光栅螺旋扫描算法驱动聚焦光斑在较大范围内进行搜索,以确定初始耦合位置。

光栅螺旋扫描结合了螺旋扫描和光栅扫描的优点,其扫描方式如图4所示。扫描从概率密度最大处开始,围绕中心逐步扩大扫描范围,对指定扫描区域进行多层扫描,从而能够有效地覆盖整个区域,不易出现漏扫情况。

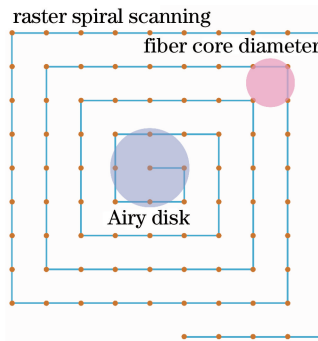


图4 光栅螺旋扫描示意图

Fig. 4 Schematic of raster spiral scanning

具体的光栅螺旋扫描过程为:设定光栅螺旋扫描的步长,通过控制快速反射倾斜镜的偏转使得光斑依次移动,同时对耦合进单模光纤内的功率进行探测;为了减小扫描步数,当耦合效率第一次满足阈值条件($\eta \geq \eta_{scan}$, η_{scan} 为扫描阈值耦合效率)时,以此位置为中心再次开始光栅螺旋扫描,并记录扫描过程中所有满足阈值条件的位置;经过一定步数的扫描后,根据这些标记点计算得到平均位置,驱动聚焦光斑移动至该位置,即初始耦合位置,从而解决光斑与单模光纤的初始对准问题。

3.2 SPGD 控制算法

由于光栅螺旋扫描算法只能将聚焦光斑定位至初始耦合位置,并不是最佳耦合位置,单模光纤与聚焦光斑间仍然存在随机横向偏移,耦合效率仍有待改善。

目前常用的几种优化控制算法包括 SPGD 算法、模拟退火算法(SA)和遗传算法(GA)等。其中,双边扰动 SPGD 算法是在并行扰动随机近似算法的基础上提出的随机并行优化控制技术,它的校正效果与 GA 相近,但是收敛速度更快,且校正效果优于 SA,但在优化过程中可能陷入局部极值。因此,综合考虑后采用双边扰动 SPGD 算法对随机横向偏移进行校正,以进一步提高单模光纤耦合效率。

方案中以耦合进单模光纤内的光功率作为 SPGD 控制算法的性能指标 J ,利用光功率探测器对光纤功率进行实时探测,计算机通过控制算法对施加于快速反射倾斜镜 x 、 y 轴方向上的驱动电压进行迭代运算,使快速反射倾斜镜产生偏转,驱动聚焦光斑移动,最终使耦合效率达到最优。

具体控制过程为:产生一组服从 Bernoulli 分布且均值为 0 的随机电压 $\delta u = [\delta u_x, \delta u_y]$; 对快速反射倾斜镜依次施加电压信号 $u^+ = u_n + \delta u$ 、 $u^- = u_n - \delta u$, 并分别得到性能指标 J^+ 、 J^- ; 计算得到性能指标的改变量 $\delta J = J^+ - J^-$, 将控制电压更新为 $u_{n+1} = u_n + \gamma \delta J \delta u$ (γ 为调整迭代步长的增益常数) 并施加于快速反射倾斜镜; 重复上述步骤, 直至性能指标趋于最优, 从而实现闭环控制。

在开始 SPGD 算法迭代过程前, 聚焦光斑与单模光纤间的随机横向偏移距离过大可能会导致 SPGD 算法不能成功收敛, 或达到收敛状态所需迭代步数太多。为了克服上述因素影响, 所提方案首先通过移动光斑进行扫描, 当某一位置处耦合效率满足阈值条件 ($\eta \geq \eta_{ref}$, η_{ref} 为开启 SPGD 控制的阈值耦合效率) 时, 开启 SPGD 控制算法对随机横向偏移进行迭代校正, 其控制流程如图 5 所示。

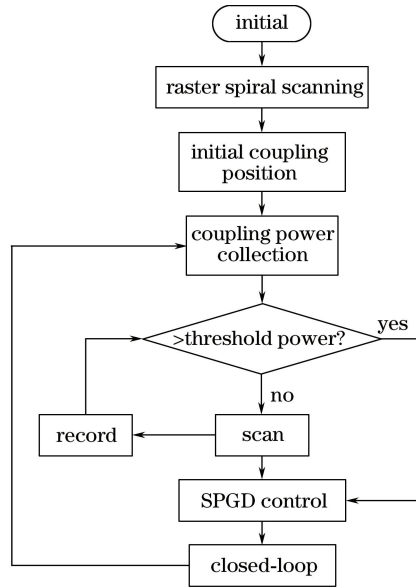


图 5 控制算法流程图

Fig. 5 Flow chart of control algorithm

4 仿真分析

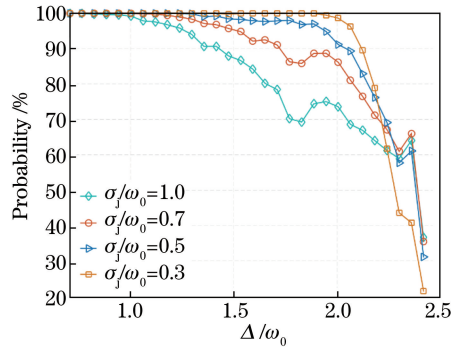
为了衡量单模光纤耦合方案对单模光纤耦合效率的改善作用, 对光栅螺旋扫描和 SPGD 算法优化光纤耦合效率的迭代过程进行数值仿真。仿真过程中, 设定 $\beta = 1.12$, $\omega_0 = 5 \mu\text{m}$, 此时理想平面波在后焦平面处的艾里斑半径 $r = 8.55 \mu\text{m}$; 同时, 以光纤端面作为参考面, 设定聚焦光斑初始位置坐标为 $(0, 0)$, 单模光纤以坐标 $(25, 25)$ 为中心产生服从 Rician 分布的随机偏移, 此时两者间初始对准误差为 $35.35 \mu\text{m}$ 。

4.1 扫描步长与初始校正成功概率的关系

在光栅螺旋扫描过程中, 随机抖动可能会导致不能成功得到初始耦合位置。为了提高初始校正的成功概率, 减小光栅螺旋扫描的步长, 从而增加相邻扫描区域的重叠区域。但是扫描步长的减小会使扫描一定区域时需要更多的扫描步数, 耗时增加, 因此在扫描过程中需要设定最优扫描步长。

在随机抖动标准差 σ_j/ω_0 分别为 0.3, 0.5, 0.7, 1.0 的情况下, 设定扫描标记阈值耦合效率为 0.1, 利用光栅螺旋扫描对初始对准误差进行校正。在扫描过程的模拟仿真中, 为减小数值模拟带来的不确定性, 分别经过 2000 次重复仿真后, 图 6 给出初始校正成功概率随扫描步长 Δ 的变化。

由图 6 可知, 随着 Δ 的增加, 初始横向偏移成功校正的概率整体呈下降趋势; 对于不同 σ_j/ω_0 , 都存在一个最优扫描步长 Δ_{opt} , 使得校正成功的概率大于 99%, 并且随着 σ_j/ω_0 的增加, Δ_{opt} 逐渐减小, 如表 1 所示。因此, 根据 σ_j/ω_0 的大小, 可以设定一个最优扫描步长, 利用光栅螺旋扫描算法快速、高概率地对初始对准问题进行校正。

图6 不同 σ_j/ω_0 情况下初始校正成功概率随 Δ/ω_0 的变化Fig. 6 Success probability of initial correction as a function of Δ/ω_0 under different σ_j/ω_0 表1 不同 σ_j/ω_0 情况下的最优扫描步长 Δ_{opt} Table 1 Δ_{opt} under different σ_j/ω_0

| σ_j/ω_0 | $\Delta_{opt}/\mu\text{m}$ | Probability / % |
|---------------------|----------------------------|-----------------|
| 0.3 | 9.85 | 99.2 |
| 0.5 | 7.10 | 99.2 |
| 0.7 | 5.85 | 99.1 |
| 1.0 | 5.00 | 99.2 |

4.2 光栅螺旋扫描初始耦合位置

当随机抖动标准差 $\sigma_j/\omega_0 = 0.7$ 时,根据上文分析,设定 $\Delta = 5.85 \mu\text{m}$,利用光栅螺旋扫描算法对初始对准误差进行校正,以确定初始耦合位置。

图7所示为以光纤端面作为参考面,光栅螺旋扫描过程中聚焦光斑的运动轨迹。从图中可以看到,聚焦光斑在驱动下以光栅螺旋扫描方式依次移动,在扫描过程中存在7个标记位置,其耦合效率大于阈值条件0.1。经过129步扫描后,根据记录的7个标记点信息可以得到初始耦合位置坐标(25.26, 23.58),驱动聚焦光斑移至该位置,此时聚焦光斑与单模光纤抖动中心的初始偏移从 $35.35 \mu\text{m}$ 减小为 $1.4 \mu\text{m}$ 。

光栅螺旋扫描过程前后单模光纤耦合效率变化曲线如图8所示。从图中可知,扫描前由于对准误差的影响,耦合效率近似为0,经过初始校正后,平均耦合效率提升至0.3261,这说明采用光栅螺旋扫描算法可以有效校正初始偏移,单模光纤耦合效率得到初步改善。

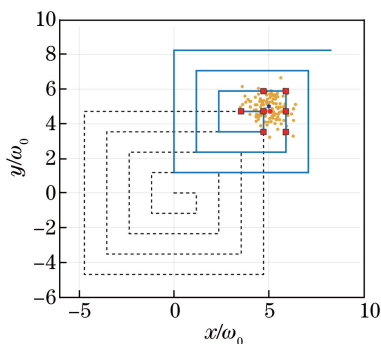


图7 光栅螺旋扫描过程中聚焦光斑运动轨迹图

Fig. 7 Moving track of focused spot in process of raster spiral scanning

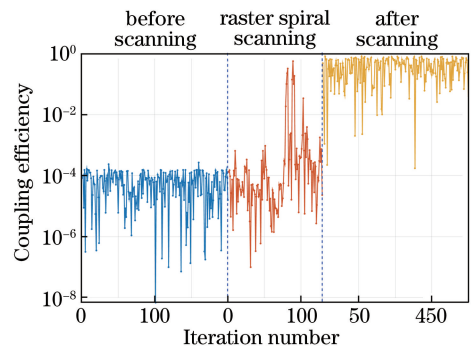


图8 光栅螺旋扫描过程中耦合效率变化曲线

Fig. 8 Evolution curve of coupling efficiency in process of raster spiral scanning

图9所示为不同随机抖动标准差情况下,分别对上述过程进行3000次重复模拟仿真后,聚焦光斑与单模光纤随机抖动中心间残余对准误差 r_{res} 的分布直方图,图9充分展现了光栅螺旋扫描算法对初始误差的校正效果。

由仿真结果可知,经过3000次扫描后,在不同随机抖动标准差情况下,经过初始校正后成功得到初始耦合位置的概率均大于99.2%;同时,初始耦合位置与随机抖动中心之间的残余对准误差 r_{res} 集中在 $0.5 \sim 6.5 \mu\text{m}$ 范围内,且 r_{res} 随着 σ_j/ω_0 的减小而逐渐减小,这使得通过SPGD算法进一步改善耦合效率成为可能。

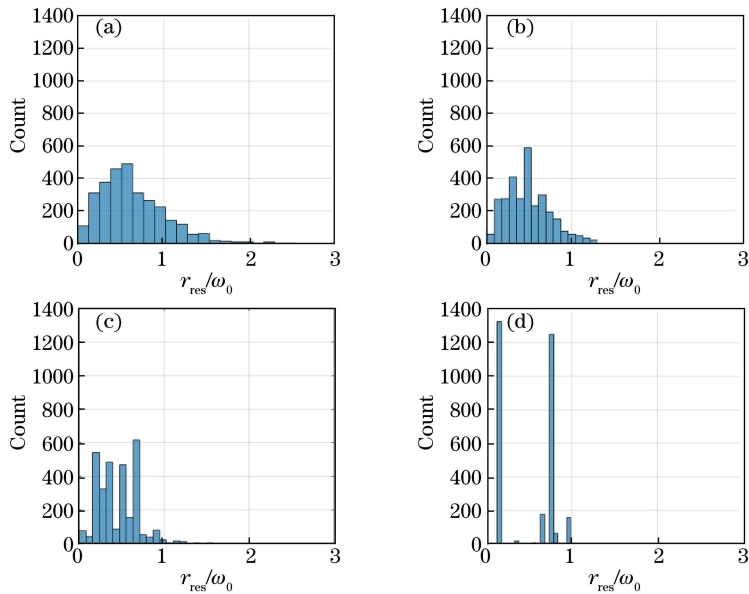


图 9 不同随机抖动情况下初始校正后聚焦光斑与随机抖动中心的残余对准误差分布。

(a) $\sigma_j/\omega_0=1$; (b) $\sigma_j/\omega_0=0.7$; (c) $\sigma_j/\omega_0=0.5$; (d) $\sigma_j/\omega_0=0.3$

Fig. 9 Distribution of residual alignment error between focused spot and center of random jitter after initial correction with different random jitter. (a) $\sigma_j/\omega_0=1$; (b) $\sigma_j/\omega_0=0.7$; (c) $\sigma_j/\omega_0=0.5$; (d) $\sigma_j/\omega_0=0.3$

4.3 SPGD 算法校正过程

经过光栅螺旋扫描算法将聚焦光斑定位至初始耦合位置后,利用 SPGD 算法进一步校正聚焦光斑与单模光纤间的随机横向偏移。根据图 5 所示的控制算法流程,在开启 SPGD 控制算法前,还需要判断光纤耦合效率是否满足阈值条件,下面分别对两种情况进行仿真研究。仿真过程中分别设定 SPGD 算法的扰动量幅值为 $0.4 \mu\text{m}$,增益系数为 50,阈值耦合效率为 0.1,扫描步长为 $8.5 \mu\text{m}$,仿真中以后焦平面作为参考面。

图 10 为两种情况下 SPGD 算法迭代过程中聚焦光斑的运动轨迹及耦合效率变化曲线。从图 10(a)、

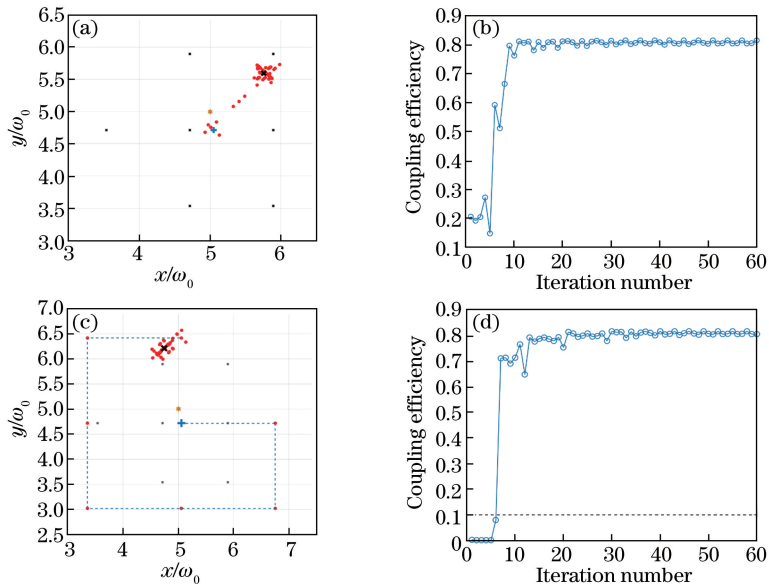


图 10 两种情况下 SPGD 算法迭代过程中聚焦光斑的运动轨迹及耦合效率变化曲线。(a)无扫描情况下聚焦光斑运动轨迹; (b)无扫描情况下耦合效率的变化;(c)扫描情况下聚焦光斑运动轨迹图;(d)扫描情况下耦合效率的变化

Fig. 10 Moving tracks of focused spot and evolution curves of coupling efficiency in process of SPGD algorithm iteration under two different conditions. (a) Movement of focused light spot without scanning; (b) variation in coupling efficiency without scanning; (c) movement of focused light spot with scanning; (d) variation in coupling efficiency with scanning

(b)可以看到,在开启 SPGD 控制算法前,当聚焦光斑与纤芯的偏移距离为 $5.652 \mu\text{m}$ 时,光纤耦合效率为 0.2038,大于阈值耦合效率 0.1,因此直接转入 SPGD 控制算法对横向偏移进行校正;SPGD 控制算法开启后,聚焦光斑不断朝着纤芯位置移动,迭代大约 11 步后,耦合效率从 0.2038 收敛至 0.81。在图 10(c)、(d)中,当聚焦光斑与纤芯的偏移距离为 $7.615 \mu\text{m}$ 时,耦合效率仅为 0.0024,需要通过扫描控制找到最佳耦合位置;经过 7 步扫描移动后,光纤耦合效率达到 0.7094,开启 SPGD 控制算法后,耦合效率有效提升至 0.81。

图 11 为不同随机抖动标准差情况下,当残余对准误差 r_{res} 分别为 0.5, 3.0, 6.5 μm 时,单模光纤耦合效率经过 SPGD 控制算法优化的迭代曲线,图中曲线为 300 次迭代过程的平均。

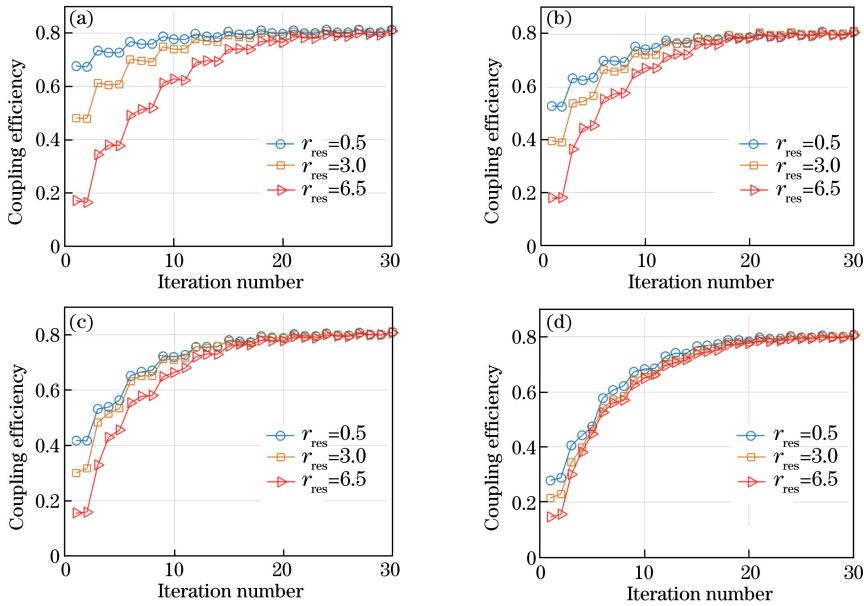


图 11 不同随机抖动情况下不同残余偏移误差时耦合效率经 SPGD 算法优化的迭代曲线。

(a) $\sigma_j/\omega_0=0.3$; (b) $\sigma_j/\omega_0=0.5$; (c) $\sigma_j/\omega_0=0.7$; (d) $\sigma_j/\omega_0=1$

Fig. 11 Iteration curves of coupling efficiency optimized by SPGD algorithm with different residual offset errors under different random jitter. (a) $\sigma_j/\omega_0=0.3$; (b) $\sigma_j/\omega_0=0.5$; (c) $\sigma_j/\omega_0=0.7$; (d) $\sigma_j/\omega_0=1$

仿真结果表明,在不同随机抖动情况下,针对不同的残余对准误差 r_{res} ,单模光纤耦合效率在 SPGD 控制算法闭环后都能够得到明显改善。以图 11(c)所示 $\sigma_j/\omega_0=0.7$ 为例,当 r_{res} 分别为 0.5, 3.0, 6.5 μm 时,耦合效率分别从 0.4102, 0.3003, 0.1543 提升至 0.8091。仿真结果同时表明,随着残余对准误差的增加,SPGD 控制算法的收敛速度变慢,但是随着 σ_j/ω_0 的增加, r_{res} 对收敛速度的影响逐渐减小。以上结果说明,采用 SPGD 控制算法能够对随机横向偏移进行有效校正,从而进一步提升接收耦合效率。

5 结 论

在空间光到单模光纤的耦合过程中,由于聚焦光斑与单模光纤间的初始对准误差和随机横向偏移的影响,会产生极大的耦合损耗。基于光栅螺旋扫描和 SPGD 控制算法的单模光纤耦合方案,对提高单模光纤耦合效率的可行性及校正效果进行了数值仿真。结果表明:1) 光栅螺旋扫描算法能够有效地校正初始对准误差,耦合效率得到初步改善,通过设定最佳扫描步长,初始校正成功概率高于 99%,经过初始校正后,聚焦光斑与随机抖动中心的残余对准误差集中在 0.5~6.5 μm 范围内;2) 施加 SPGD 控制算法后,聚焦光斑与单模光纤间随机横向偏移得到校正,光纤耦合效率能够有效提升至 0.81。

参 考 文 献

- [1] Jiang Huilin, An Yan, Zhang Yalin, *et al.* Analysis of the status quo, development trend and key technologies of space laser communication[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2015, 34(3): 207-217.

姜会林, 安 岩, 张雅琳, 等. 空间激光通信现状、发展趋势及关键技术分析[J]. 飞行器测控学报, 2015, 34(3):

207-217.

- [2] Wu Yunyun, Li Xinyang, Rao Changhui. Effect of atmospheric turbulence aberration on the bit-error performance of homodyne binary phase shift keying coherent optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0606002.
武云云, 李新阳, 饶长辉. 大气湍流像差对空间零差二进制相移键控相干光通信误码性能的影响[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0606002.
- [3] Chen M, Liu C, Xian H. Experimental demonstration of single-mode fiber coupling over relatively strong turbulence with adaptive optics[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(29): 8722-8726.
- [4] Winzer P J, Leeb W R. Fiber coupling efficiency for random light and its applications to lidar[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(13): 986-988.
- [5] Andrews L C, Phillips R L. *Laser beam propagation through random media*[M]. Bellingham: SPIE Press, 2005.
- [6] Morio T. Maximum fiber coupling efficiency and optimum beam size in the presence of random angular jitter for free-space laser systems and their applications[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2006, 23(9): 2246-2250.
- [7] Weyrauch T, Vorontsov M A, Gowens J, *et al.* Fiber coupling with adaptive optics for free-space optical communication[C]. SPIE, 2002, 4489: 177-184.
- [8] 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.
- [9] Hideki T, Morio T, Yoshihisa T. Experimental verification of fiber-coupling efficiency for satellite-to-ground atmospheric laser downlinks[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15301-15308.
- [10] Han Qiqi, Wang Qiang, Ma Jing, *et al.* Experimental research on vibration influence and compensation of space light to fiber coupling efficiency[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 933-939.
韩琦琦, 王 强, 马 晶, 等. 振动对空间光-光纤耦合效率影响及补偿实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(3): 933-939.
- [11] 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.
- [12] Zhao Fang. Research on receiving performance of intersatellite laser communication systems based on single-mode fiber coupled self-homodying detection[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
赵 芳. 基于单模光纤耦合自差探测星间光通信系统接收性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.