

空间光到单模光纤章动耦合技术研究

赵佰秋^{1,2,3}, 孟立新^{1,2}, 于笑楠^{1,2*}, 张立中^{1,2}, 佟首峰^{1,2}

¹长春理工大学空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022;

³长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 阐述了空间光到单模光纤耦合原理, 设计了基于快速反射镜结合光纤光电探测器的章动耦合算法, 在 LabVIEW 环境下仿真了光纤端面章动的动态跟踪过程, 并进行了激光章动系统耦合实验, 实现了静态条件下 59.63% 的耦合效率, 进行了 1.65 GHz 码速率的视频传输演示与扰动实验, 验证了章动耦合算法的有效性与可行性。通过实验与仿真数据结果, 分析了章动算法参数中章动半径、收敛步长与章动单周采样点数对耦合性能的影响。结果表明, 在光纤端面当章动半径从 0.1 μm 增加到 2.5 μm 时, 耦合效率与耦合稳定性下降, 耦合速率无明显变化, 但章动半径过小会导致收敛角度识别误差增大, 降低耦合速率; 当收敛步长从 0.1 μm 增加到 2.5 μm 时, 耦合效率与耦合稳定性下降, 耦合速率上升; 当章动单周采样点数从 100 减少到 5 时, 耦合效率与耦合稳定性无明显变化趋势, 但由于采样点数过少, 收敛角度分辨率降低, 耦合速率明显下降。

关键词 光纤光学; 空间激光通信; 单模光纤耦合; 激光章动; 耦合效率

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1105001

Spatial Light to Single-Mode Fiber Nutation Coupling Technology

Zhao Baiqiu^{1,2,3}, Meng Lixin^{1,2}, Yu Xiaonan^{1,2*}, Zhang Lizhong^{1,2}, Tong Shoufeng^{1,2}

¹NUERC of Space and Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²Fundamental Science on Space-Ground Laser Communication Technology Laboratory, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

³School of Mechatronics Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract This study describes the spatial light to single-mode fiber coupling principle, designs a nutation coupling algorithm based on a combination of fast mirror and fiber photodetector, and simulates the dynamic tracking process of the fiber end surface using LabVIEW. According to the simulation, the coupling experiments of laser nutation system are conducted, resulting in a coupling efficiency of 59.63% under static conditions and a video transmission demonstration with 1.65-GHz code rate. Further, the validity and feasibility of the nutation coupling algorithm are verified. Based on the experimental and simulation results, the study analyzes the influences of the nutation parameters, including the nutation radius, convergence step length, and number of nutation sampling points, on the coupling performance. The results denote that when the nutation radius increases from 0.1 μm to 2.5 μm , the coupling efficiency and stability decrease, whereas the coupling rate does not exhibit a significant change. However, when the nutation radius is considerably small, the convergence angle recognition error will increase, whereas the coupling speed will decrease. When the convergence step increases from 0.1 μm to 2.5 μm , the coupling efficiency and coupling stability decrease, and the coupling rate increases. When the number of nutation sampling points is reduced from 100 to 5, the coupling efficiency and stability have no obvious change. However, due to too few sampling points, the convergence angle resolution decreases and the coupling rate decreases significantly.

Key words fiber optics; space laser communications; single-mode fiber coupling; laser nutation; coupling efficiency

OCIS codes 060.4510; 060.1810; 070.6020

收稿日期: 2019-06-19; 修回日期: 2019-07-17; 录用日期: 2019-07-22

* E-mail: yuxiaonan1989@126.com

1 引 言

相较于微波通信,空间激光通信在传输速率、通信容量、信息安全性等方面的优势尤为突出,因而在星地、星间等通信链路中已得到广泛应用^[1-5]。为进一步提高接收系统的探测灵敏度与通信容量,可以将成熟的光纤通信技术及产品应用到空间激光通信中,如使用掺铒光纤放大器、波分复用器等核心器件,而空间光到单模光纤(SMF)的耦合是应用光纤技术的前提。因大气衰减、大气湍流、接收与发射端随机抖动等影响因素的存在,空间光到单模光纤的耦合较为困难。如何实现快速、高效、稳定的空间光到单模光纤耦合技术是空间激光通信的关键难题之一。

目前已有多家科研机构对空间光到单模光纤耦合技术进行了研究。2014年中国科学院光电技术研究所的罗文等^[6]证明了当接收光学系统口径与大气相干长度比值较小时,大气湍流像差中单模光纤耦合效率的主要影响因素为倾斜像差。2016年中国科学院上海光学精密机械研究所的高建秋等^[7]根据光电探测器输出电压的变化规律求出光斑脱靶量,脱靶量计算精度为 $3.5 \mu\text{rad}$,无扰动时系统的耦合效率为 67%,引入扰动时耦合效率提高了 6.5%,系统响应速度达 40 Hz。2017年中国科学院成都光电技术研究所的黄冠等^[8]基于现场可编程门阵列(FPGA)硬件控制平台,采用自适应光纤耦合器作为像差校正器件,实现了约 150 Hz 的校正带宽。2019年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的朱世伟等^[9]通过仿真与实验,分析了快速反射镜作为耦合器件时激光章动参数变化对耦合效率的影响。

自动耦合器件主要有微机械变形镜^[10]、自适应光纤耦合器^[8]与快速反射镜^[11],其中:微机械变形镜主要纠正光束波前;自适应光纤耦合器最大可纠正约 $600 \mu\text{rad}$ 静态角偏差;而快速反射镜执行速度快,工作范围一般大于 4 mrad。耦合传感器主要有 PSD^[12] (Position Sensitive Devices)、QD^[13] (Quadrant Detector) 和 CCD^[14] (Charge-Coupled Devices) 等位置反馈型传感器和用于光纤光电探测的能量反馈型传感器。位置反馈型传感器需和光纤进行同轴标校才可避免引入误差,且光纤光电探测器与光纤同轴。为进一步提高空间光到单模光纤的耦合性能,本文提出了基于快速反射镜结合光纤光电探测器的章动耦合算法,在 LabVIEW 环境下仿

真了激光章动的动态跟踪过程,并进行了章动耦合实验。最后通过分析实验与仿真结果,分别评估了章动半径、收敛步长与章动单周采样点数三个参数对耦合性能的影响。

2 章动耦合跟踪算法设计

耦合效率 η 定义为耦合入单模光纤的光功率与接收端光瞳面接收到的光功率之比,空间光到单模光纤的耦合效率计算公式为^[15]

$$\eta = \frac{\left| \int E_{i,b}^* E_{f,b} ds \right|^2}{\int |E_{i,b}|^2 ds \cdot \int |E_{f,b}|^2 ds}, \quad (1)$$

式中: ds 为二重积分的微元; $E_{i,b}$ 为空间光会聚在单模光纤端面的光斑模场; $*$ 表示复共轭; $E_{f,b}$ 为单模光纤模场; i 表示入射光的电场; f 表示单模光纤的基模电场; b 表示单模光纤端面 B 。耦合原理如图 1 所示,其中 D 为接收孔径。

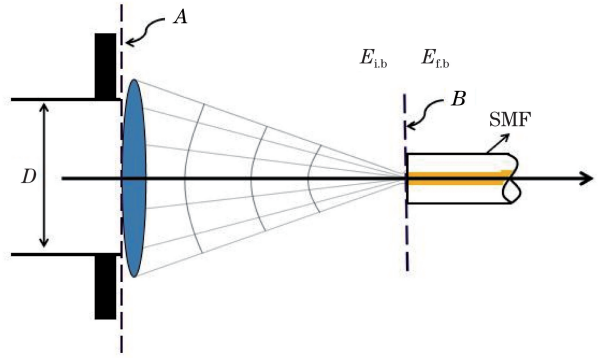


图 1 空间光到单模光纤耦合原理示意图

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

根据模场匹配理论,设计基于快速反射镜结合光纤光电探测器的空间光到单模光纤章动耦合方案,如图 2 所示。空间光经快速反射镜反射进入耦合透镜,经透镜会聚耦合到单模光纤,通过光纤分束器后,一部分能量用于激光通信,另一部分能量进入探测器,通过将探测能量传递给控制系统实现能量负反馈,最后通过控制系统驱动快速反射镜完成能量的闭环控制。

激光章动闭环跟踪过程如图 3 所示,利用快速反射镜的二维摆动,使光斑在耦合透镜接收端面进行圆周扫描,其中光纤端面利用二维 xy 坐标系表示,点 C 为扫描中心,点 C 、 F 的距离为章动扫描半径,扫描单圆周共取 N 个采样点。单次扫描完毕后,比较整个圆周所有采样点的光功率数值,提取最大光功率点方向,将其认定为光纤中心方向,即章动

收敛方向。将章动扫描中心 C 沿章动收敛方向调整固定步长 $|CE|$ 后到达点 E ，再次进行圆周扫描，重复以上步骤，直至收敛到最大光功率位置。

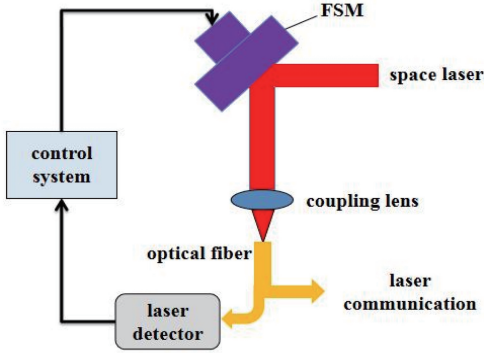


图 2 基于快速反射镜的激光章动方案

Fig. 2 Laser nutation scheme based on fast mirror

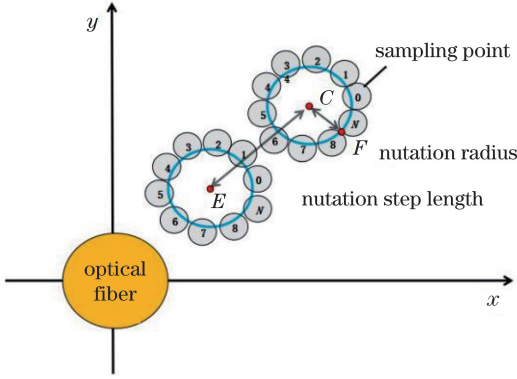


图 3 章动收敛过程示意图

Fig. 3 Schematic of nutation convergence process

在章动振镜跟踪过程中，振镜执行量的计算公式为

$$\begin{cases} M_x = A_r \cos\left(2\pi \frac{i}{N}\right) + X_{\text{center}} + \sum_{i=0}^N K \cos\left(2\pi \frac{i_{\text{max}}}{N}\right) \\ M_y = A_r \sin\left(2\pi \frac{i}{N}\right) + Y_{\text{center}} + \sum_{i=0}^N K \sin\left(2\pi \frac{i_{\text{max}}}{N}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中： M_x 为快速反射镜 x 轴执行量； M_y 为快速反射镜 y 轴执行量； A_r 为章动半径； i 为单周第 i 个采样点 ($i=0, 1, 2, \dots, N-1$)， N 为单周采样点总数； $A_r \cos\left(2\pi \frac{i}{N}\right)$ 与 $A_r \sin\left(2\pi \frac{i}{N}\right)$ 组成章动扫描圆周； X_{center} 与 Y_{center} 为章动扫描中心初始坐标； K 为收敛步长； i_{max} 为单周最大功率点计数索引； $\cos\left(\frac{i_{\text{max}}}{N} 2\pi\right)$ 为收敛方向单位向量的 x 轴分量， $\sin\left(\frac{i_{\text{max}}}{N} 2\pi\right)$ 为收敛方向单位向量的 y 轴分量。程序流程如图 4 所示，为确保采样点与采样点功率严格对应，在定时中

断过程中快速反射镜执行角度完成后再开启功率探测，图中 i 为单圆周第 i 个采样点， $i++$ 表示每当快速反射镜转动一个角度，采样点数自动加 1。

3 仿真与实验

在 LabVIEW 环境下进行焦平面的动态跟踪耦合仿真，在仿真基础上进行激光章动系统耦合实验，分析仿真与实验数据，对系统参数进行优化设计。

3.1 激光章动蒙特卡罗法仿真

远距离传输来的入射光在耦合透镜的入射光瞳面可近似认为是理想平面波，由于光的波动性，平面波会聚形成艾里斑，其在焦平面距离光轴中心 r_0 处的模场分布为^[16]

$$E_{i.b}(r_0) = \exp\left[jk\left(f + \frac{r_0^2}{2f}\right)\right] \frac{\pi D^2}{4\lambda f} \left[2 \frac{J_1(kDr_0/2f)}{kDr_0/2f}\right] \quad (3)$$

式中： λ 为波长； k 为波数； $J_1(\cdot)$ 为第一类零阶贝塞尔函数； f 为耦合透镜焦距； D 为接收孔径直径； r_0 为光斑任意位置到光斑中心的径向距离。在实际过程中，由于信道具有时变特性，发射端平台存在振动，导致会聚的光斑出现漂移，因此对 (3) 式进行修正可得

$$E_{i.b}(r_0, t) = \exp\left[jk\left(f + \frac{|\mathbf{r}_d - \mathbf{r}_1|^2}{2f}\right)\right] \cdot \frac{\pi D^2}{4\lambda f} \left[2 \frac{J_1(kD|\mathbf{r}_d - \mathbf{r}_1|/2f)}{kD|\mathbf{r}_d - \mathbf{r}_1|/2f}\right] \quad (4)$$

式中： $E_{i.b}(r_0, t)$ 是二维空间的变量，随着时间的移动，光斑质心出现抖动。为了分析方便，假设 $|\mathbf{r}_d - \mathbf{r}_1| = r_0$ ，其中， \mathbf{r}_d 为光纤中心距光斑中心距离， \mathbf{r}_1 为光纤中心距光斑外径距离，二者均为二维空间的变化矢量，满足 $\mathbf{r}_d = [(\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_0) \cos(\alpha t), (\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_0) \sin(\alpha t)]$ ， $\mathbf{r}_1 = [\mathbf{r}_1 \cos(\alpha t), \mathbf{r}_1 \sin(\alpha t)]$ ，由特征值 α 和时间 t 决定。计算耦合效率时，仅保留 (4) 式的标量振幅项，则

$$E_{i.b}(r_0, t) = \frac{\pi D^2}{4\lambda f} \left[2 \frac{J_1(3.83|\mathbf{r}_d - \mathbf{r}_1|/\omega_1)}{3.83|\mathbf{r}_d - \mathbf{r}_1|/\omega_1}\right] \quad (5)$$

式中： ω_1 为艾里斑半径，表达式为 $\omega_1 = 1.22\lambda f/D$ 。

单模光纤的归一化频率 V 符合 $1.9 \leq V \leq 2.4$ 时，单模光纤的基模场分布可以采用高斯分布近似表示，误差小于 1%^[17-18]。单模光纤模场可表示为^[19]

$$E_{i.b}(r_0) = \sqrt{\frac{2}{\pi\omega_0^2}} \exp\left(-\frac{|\mathbf{r}_d - \mathbf{r}_1|^2}{\omega_0^2}\right) \quad (6)$$

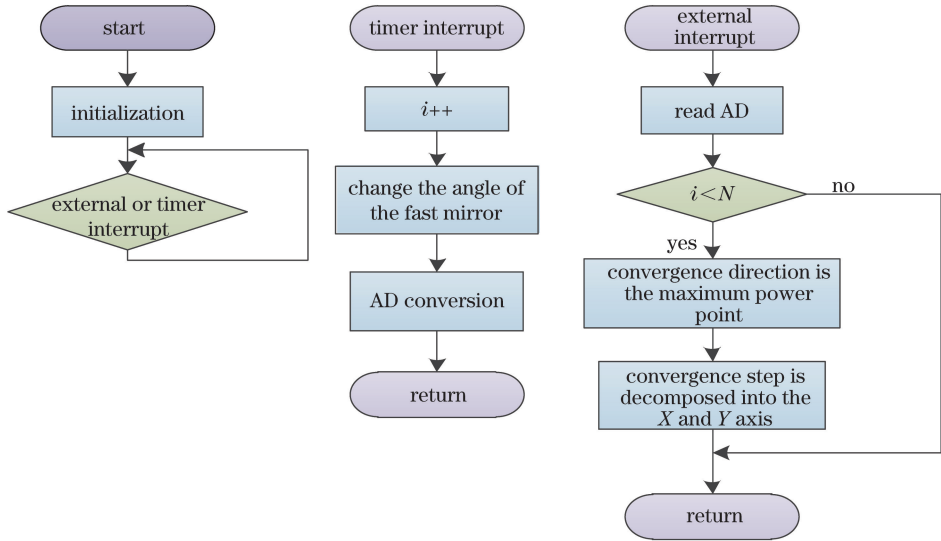


图 4 程序流程图

Fig. 4 Flow chart of program

式中： ω_0 为单模光纤模场半径。仿真过程中通过(1)式计算系统的耦合效率。

假设 α 与 r_1 服从高斯随机分布,用蒙特卡罗方法模拟光斑随机抖动,结果如图 5 所示。整个仿真

过程分为 4 个阶段,大圆周(红色)表示光纤模场,半径为 $5 \mu\text{m}$,黑色点云为会聚斑模场分布,小圆周(蓝色)为章动半径,图 5 第一行为光斑与光纤在不同收敛阶段相对位置的示意图。

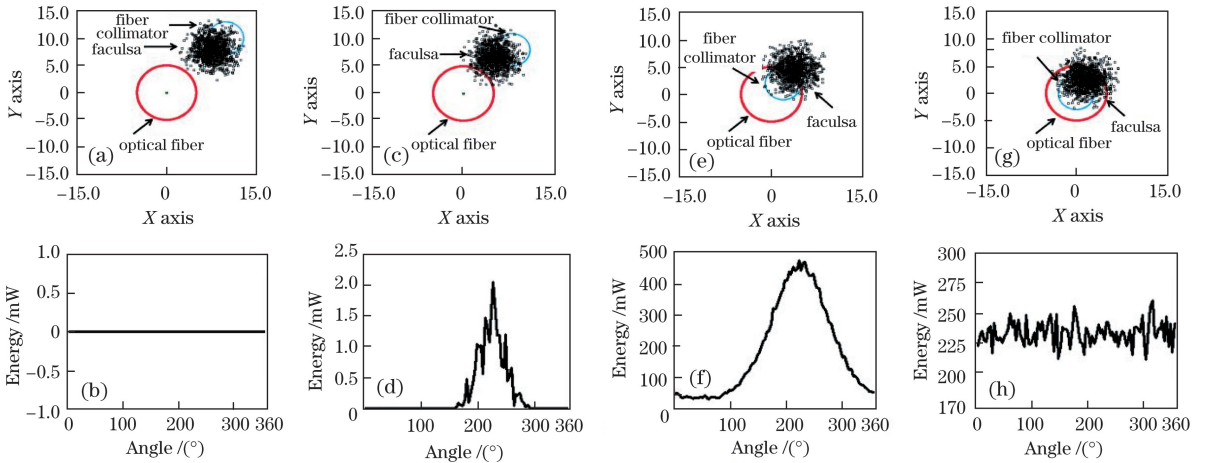


图 5 章动收敛过程 4 个阶段的光斑和光纤相对位置以及能量曲线。(a)第 1 阶段相对位置;(b)第 1 阶段能量曲线;(c)第 2 阶段相对位置;(d)第 2 阶段能量曲线;(e)第 3 阶段相对位置;(f)第 3 阶段能量曲线;(g)第 4 阶段相对位置;(h)第 4 阶段能量曲线

Fig. 5 Spot and fiber relative positions and energy curves in four stages of nutation convergence process. (a) Relative position of the first stage; (b) energy curve of the first stage; (c) relative position of the second stage; (d) energy curve of the second stage; (e) relative position of the third stage; (f) energy curve of the third stage; (g) relative position of the fourth stage; (h) energy curve of the fourth stage

章动收敛过程分为 4 个阶段。在第 1 阶段,章动扫描一周,光斑完全会聚在光纤模场外,此时探测器无功率输出。在第 2 阶段,章动扫描一周,部分时刻光斑会聚在光纤模场内,此时探测器功率曲线出现波峰,峰值对应角度即为光纤圆心所在方向,即章动扫描收敛方向,此时探测器功率曲线最小值为零,表示该角度下光斑未进入光纤内。

在第 3 阶段,章动扫描一周,光斑任何时刻都会聚在光纤模场内,探测器功率曲线峰值对应角度仍为收敛方向。所不同的是此刻功率曲线最小值不再为零,表示整周扫描过程中光斑时刻会聚在光纤内。在第 4 阶段,章动扫描中心在光纤模场中心附近波动,探测器功率曲线无明显波峰出现,功率较高且稳定。

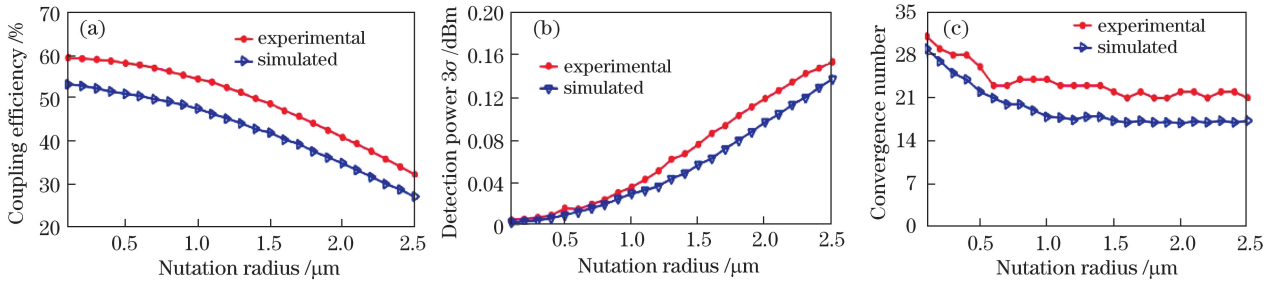


图 7 耦合性能随章动半径变化的仿真与实验曲线。(a)耦合效率;(b)探测功率 3σ ;(c)收敛次数

Fig. 7 Simulated and experimental curves of coupling performance varying with nutation radius.

(a) Coupling efficiency; (b) detection power 3σ ; (c) convergence times

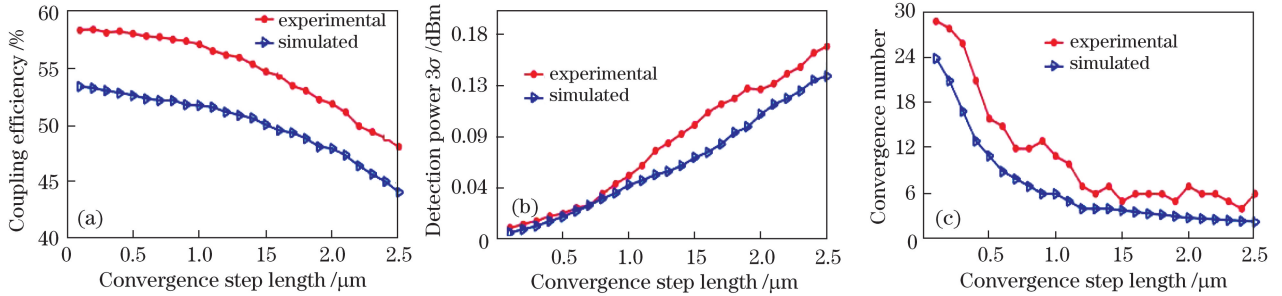


图 8 耦合性能随收敛步长变化的仿真与实验曲线。(a)耦合效率;(b)探测功率 3σ ;(c)收敛次数

Fig. 8 Simulated and experimental curves of coupling performance varying with convergence step length.

(a) Coupling efficiency; (b) detection power 3σ ; (c) convergence times

根据图 8 可得,随着收敛步长增大,耦合效率逐渐降低,探测功率 3σ 逐渐升高,收敛次数逐渐降低且趋势明显。在该仿真条件下,综合耦合效率、探测功率 3σ 与收敛次数 3 个方面原因,收敛步长选取 $0.4 \mu\text{m}$ 左右较为合适。

3.3.3 采样点个数对耦合性能的影响

结合章动半径与收敛步长对耦合性能影响实验,设置章动半径为 $0.5 \mu\text{m}$,收敛步长为 $0.4 \mu\text{m}$,采样点个数从 100 依次递减至 5,每次递减 5 点。仿真数据与实验数据如图 9 所示。

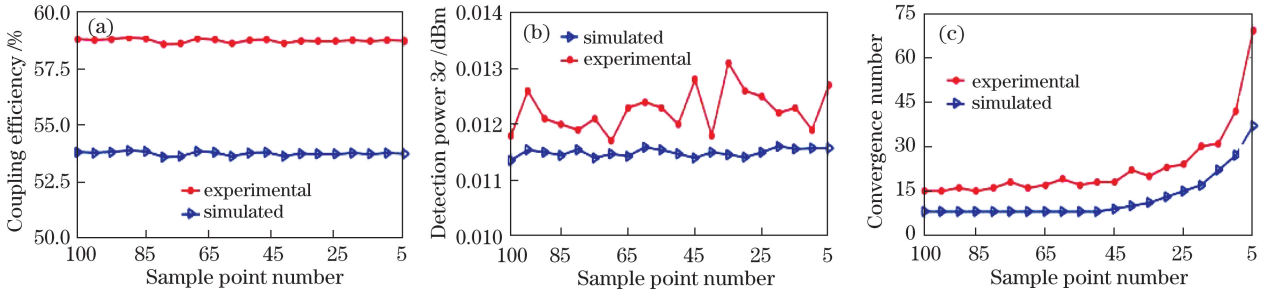


图 9 耦合性能随采样点数变化仿真与实验曲线。(a)耦合效率;(b)探测功率 3σ ;(c)收敛次数

Fig. 9 Simulated and experimental curves of coupling performance varying with number of sampling points.

(a) Coupling efficiency; (b) detection power 3σ ; (c) convergence times

根据图 9,随着采样点个数的减少,耦合效率和探测功率 3σ 无明显变化趋势,收敛次数逐渐上升。在一定范围内,采样点个数对耦合效率、耦合稳定性影响较小。收敛次数增加的主要原因为采样点数较少,收敛角度分辨率低,在距离光纤中心一个步长半径范围内需要多次调整才能获得最大耦合效率。在该仿真条件下,综合耦合效率、探测功率 3σ 与收敛

次数 3 个方面原因,单周采样点个数选取 30 左右较为合适。

3.3.4 仿真与实验结果分析

根据图 7~9 可得,在该仿真与实验条件下,选取章动半径 $0.5 \mu\text{m}$,收敛步长 $0.4 \mu\text{m}$,章动单周采样点数 30 为最优参数。实验中仿真耦合效率低于实验耦合效率的原因在于:仿真系统中远距离入射

光在耦合透镜端面为理想平面波,实际实验中为近距离空间光传输,且束散角较小,在耦合透镜端面为高斯光分布且能量集中,与单模光纤模场的匹配程度更高,所以实验耦合效率更高。耦合稳定性与耦合快速性方面,仿真过程中没有考虑像差和探测器噪声方面的影响,导致实验值比仿真值略高。在最优参数条件下,系统各环节光功率数值如图 10 所示。

发射端光纤光功率为 -4.34 dBm,发射端光纤准直器端面光功率为 -6.53 dBm,光经过光纤准直器的损耗为 2.19 dB。接收端光纤准直器端面光功率为 -7.26 dBm,光经空间传输与快速反镜反射,损耗为 0.73 dB。接收端光纤光功率为 -9.50 dBm,耦合效率为 59.63% 。光纤分束器将光均分为两束的同时,也损失了部分能量。

3.4 动态扰动实验

章动单个采样点周期为 1 ms,在最优参数条件下,章动单周采样周期为 30 ms,即章动 30 ms 完成一次能量分布扫描,向光纤中心方向进行一次跟踪

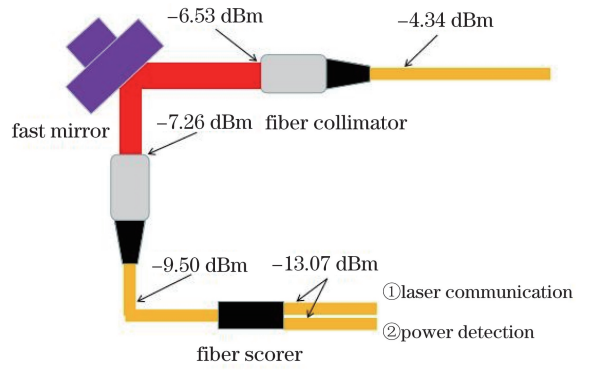


图 10 系统各环节功率分布示意图

Fig. 10 Schematic of power distribution in each link of system

收敛,收敛频率为 33 Hz。

在优化参数条件下,在光路中加入一面快速反射镜,通过在 x 轴方向上施加一定频率和幅值的正弦摆动模拟平台振动,即接收端与发射端的相对随机抖动。系统探测器在扰动条件下的能量输出曲线如图 11 所示。

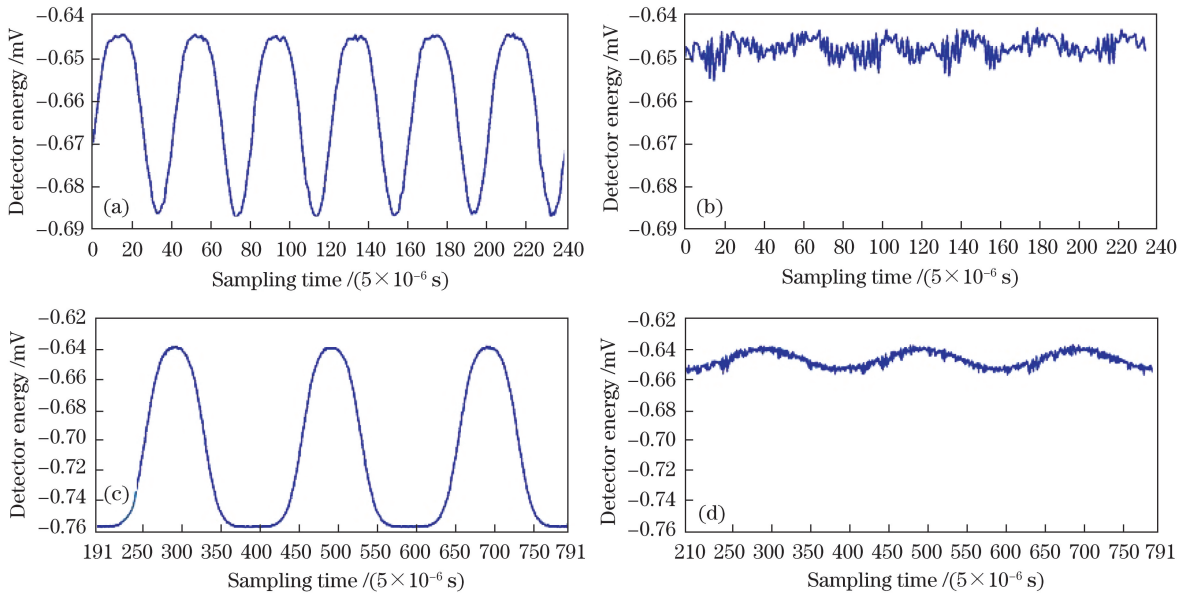


图 11 扰动状态下探测器能量输出曲线。(a) $250 \mu\text{rad}$, 5 Hz 扰动未跟踪;

(b) $260 \mu\text{rad}$, 5 Hz 扰动跟踪;(c) 1 mrad, 1 Hz 扰动未跟踪;(d) 1 mrad, 1 Hz 扰动跟踪

Fig. 11 Energy output curves of detector under disturbance. (a) $250\text{-}\mu\text{rad}$ and 5-Hz disturbance, untracked; (b) $260\text{-}\mu\text{rad}$ and 5-Hz disturbance, tracking; (c) 1-mrad and 1-Hz disturbance, untracked; (d) 1-mrad and 1-Hz disturbance, tracking

当探测器输出电压低于 -0.75 V 时,表示光斑已脱离耦合视场,探测器未探测到光能量。实验结果表明,在优化参数条件下章动耦合系统对 $250 \mu\text{rad}$ 、 5 Hz 与 1 mrad、 1 Hz 的正弦扰动具有明显抑制作用。

4 结 论

为进一步提高空间光到单模光纤耦合性能,设

计了基于快速反射镜结合光纤光电探测器的章动耦合算法,通过仿真与实验对章动算法参数:章动半径、收敛步长和章动单周采样点个数对耦合性能的影响分别进行研究讨论。结果表明,一定范围内章动半径、收敛步长增大,章动单周采样点数减小均会导致耦合效率与耦合稳定性下降。但章动半径过小会因小范围内功率变化不明显导致收敛识别角度误

差,进而造成收敛速度下降;收敛步长过小会因为收敛次数增加而导致收敛速度下降。采样点数较少情况下会因收敛角度分辨率较低而导致收敛调整次数增加,收敛速度减小。实际系统中需根据工程具体指标对耦合效率、耦合稳定性和耦合快速性三方面有所侧重,并互相兼顾,以全面满足系统的性能要求。

参 考 文 献

[1] Jiang H L, An Y, Zhang Y L, *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] Bai S, Wang J Y, Zhang L, *et al.* Development progress and trends of space optical communications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 070001.
白帅, 王建宇, 张亮, 等. 空间光通信发展历程及趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 070001.

[3] Jiang H L, Liu X Z, Hu Y, *et al.* Several key problems of space-ground integration information network[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(s1): 96-100.
姜会林, 刘显著, 胡源, 等. 天地一体化信息网络的几个关键问题思考[J]. 兵工学报, 2014, 35(s1): 96-100.

[4] Toyoshima M, Fuse T, Kolev D R, *et al.* Current status of research and development on space laser communications technologies and future plans in NICT[C] // 2015 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), October 26-28, 2015, New Orleans, LA, USA. New York: IEEE, 2015: 1-5.

[5] Wu W R, Chen M, Zhang Z, *et al.* Overview of deep space laser communication [J]. Science China Information Sciences, 2018, 61(4): 040301.

[6] Luo W, Geng C, Li X Y. 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.

[7] Gao J Q, Sun J F, Li J W, *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.
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.

[8] Huang G, Geng C, Li F, *et al.* Single-mode fiber adaptive coupling technology based on a FPGA hardware control platform [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0406001.
黄冠, 耿超, 李枫, 等. 基于FPGA硬件控制平台的单模光纤自适应耦合技术[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0406001.

[9] Zhu S W, Sheng L, Liu Y K, *et al.* Laser nutation coupling algorithm for single mode fiber based on energy feedback [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0206001.
朱世伟, 盛磊, 刘永凯, 等. 基于能量反馈的单模光纤激光章动耦合算法[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0206001.

[10] Weyrauch T, Vorontsov M A, Gowens J, *et al.* Fiber coupling with adaptive optics for free-space optical communication [J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4489: 177-184.

[11] Swanson E A, Bondurant R S. Using fiber optics to simplify free-space lasercom systems[J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1218: 70-82.

[12] Zhang R C, Wang J M, Zhao G, *et al.* Fiber-based free-space optical coherent receiver with vibration compensation mechanism[J]. Optics Express, 2013, 21(15): 18434-18441.

[13] Han C, Bai B X, Yang H M, *et al.* Study four-quadrant detector in the free space laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(8): 2030-2034.
韩成, 白宝兴, 杨华民, 等. 自由空间激光通信四象限探测器性能研究[J]. 中国激光, 2009, 36(8): 2030-2034.

[14] 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.

[15] 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.

[16] Xiang J S. 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: 19.
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:

- 19.
- [17] Marcuse D. Loss analysis of single-mode fiber splices [J]. Bell System Technical Journal, 1977, 56(5): 703-718.
- [18] Saruwatari M, Nawata K. Semiconductor laser to single-mode fiber coupler[J]. Applied Optics, 1979, 18(11): 1847-1856.
- [19] Buck J A, Jacobs I. Fundamentals of optical fibers [J]. Physics Today, 1996, 49(2): 58-62.
- [20] Yu D Y, Tan H Y. Basic course in engineering optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 16.
郁道银, 谈恒英. 工程光学基础教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 16.