

doi:10.3788/gzxb20184712.1206001

空间光到少模光纤的耦合效率及影响因素

王超^{1,2}, 范雪冰^{1,2}, 佟首峰², 李英超², 江伦^{1,2}, 刘壮², 史浩东², 姜会林^{1,2}

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 长春理工大学 空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 长春 130022)

摘 要:建立了不同影响因素下空间光-少模光纤耦合效率的理论模型.以两模光纤为例分析了相对孔径对耦合效率的影响,当相对孔径为 0.17 时,耦合效率最高为 82.96%.研究了倾斜、离焦、随机角抖动等因素对少模光纤耦合效率的影响.实验测得当横向偏移量为 4 μm 时,两模光纤的耦合效率比单模光纤高 10.23%;当轴向偏移量为 125 μm 时,两模光纤的耦合效率比单模光纤高 11.24%;当随机抖动幅度标准差为 5 μm 时,两模光纤的耦合效率比单模光纤高 12.1%.结果表明少模光纤对信号光接收过程中的干扰因素如倾斜、离焦和随机角抖动都有很好的抑制作用.

关键词:空间光通信;耦合效率;光纤耦合;少模光纤;前置光放大;相对孔径;随机角抖动

中图分类号:O436

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)12-1206001-8

Coupling Efficiency and Influence Factors of Spatial Light into Few-mode Fiber

WANG Chao^{1,2}, FAN Xue-bing^{1,2}, TONG Shou-feng², LI Ying-chao²,
JIANG Lun^{1,2}, LIU Zhuang², SHI Hao-dong², JIANG Hui-lin^{1,2}

(1 School of Photo-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 National and Local joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The coupling efficiency theory model of the spatial light into few-mode fiber in the different influence factor is established. Takes two-mode fiber for example to study the relative aperture effect on coupling efficiency. When the relative aperture is 0.17, the highest coupling efficiency is 82.96%. The coupling efficiency in the presence of tilt, defocus and random angular jitter is studied, the experiment show that when the lateral offset is 4 μm , the coupling efficiency of two-mode fiber is higher than single-mode fiber about 10.23%, when the axial offset is 125 μm , the coupling efficiency of two-mode fiber is higher than single-mode fiber about 11.24%, when the random jitter amplitude is 5 μm , the coupling efficiency of two-mode fiber is higher than single-mode fiber about 12.1%. Accordingly, the few-mode fiber can inhibit interference factor such as tilt, defocus and random angular jitter when the signal reception.

Key words: Space optical communication; Coupling efficiency; Fiber coupling; Few-mode fiber; Optical preamplifier; Relative aperture; Random angular jitter

OCIS Codes: 060.2605; 060.4510; 060.1660

0 引言

相对于传统的微波通信,卫星激光通信具有信息容量大、传输速率高、抗干扰能力强、系统体积小、功耗低等特点,成为未来最具潜力的星间高速通信技术发展方向之一^[1-5].由于前置掺铒光纤放大器(Erbium

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61805028,61805027,61701045),长春理工大学青年科学基金(No.WQNJJ-2016-15),吉林省科技发展规划资助项目(No.20160204066GX)和国家重点研究发展计划(No.2017YFC0803806)资助

第一作者:王超(1986-),女,讲师,博士,主要研究方向为空间光通信和光学设计.Email:nicklo19992009@163.com

收稿日期:2018-07-24; **录用日期:**2018-08-22

Doped Fiber Amplifier, EDFA)这一以光纤为输入端的器件在高速激光通信链路中的广泛应用^[6],空间光到光纤的高效耦合成为宽带星间激光通信的关键问题.传统情况下,EDFA 主要基于单模光纤制造,而单模光纤模场半径极小,一般为 $7\sim 10.6\ \mu\text{m}$,在星间激光通信动态工作条件如平台振动、热效应等的影响下,空间光耦合入单模光纤十分困难,降低了通信接收灵敏度和链路可靠性^[7].

相比单模光纤,少模光纤(Few Mode Fiber, FMF)是一种纤芯面积足够大、能够利用几个独立的空间模式传输并行数据的光纤.其模场半径通常为 $18\sim 50\ \mu\text{m}$,模场面积为单模光纤的 $4\sim 25$ 倍,比起单模光纤对工作环境容差更高,有望在激光通信系统中降低空间光到光纤的对准难度.因此,近年来以少模光纤为基础的光通信技术得到了快速发展,少模光纤放大器已实现应用并逐步推向商用市场,使得基于少模光纤接收的空间光通信系统硬件条件已基本具备^[9-11].因此建立空间光到少模光纤的耦合效率模型,为基于少模光纤的空间光通信系统设计和优化提供理论支撑变得十分迫切.

目前空间光到单模光纤耦合效率的理论和实验研究已经较为充分,然而基于少模光纤的空间激光通信技术才刚刚起步,相关报道比较少见.2016年北京邮电大学分别对两模和四模光纤在中湍流大气中的耦合效率进行了实验研究,其利用液晶空间光调制器模拟大气湍流相位屏,实验得出两模(2MF)和四模(4MF)光纤的耦合效率相比单模光纤分别提高了 $4\ \text{dB}$ 和 $7\ \text{dB}$ ^[12].2017年北京邮电大学又对使用自适应光学(Adaptive Optics, AO)系统补偿大气湍流像差的空间光-少模光纤耦合系统进行了研究,实验得出在中湍流条件下,当没有 AO 系统时 2MF 和 4MF 分别比 SMF 接收的功率提高了 4.5dB 、 7dB ^[13].除湍流影响外,当基于少模光纤耦合接收的激光通信系统处于动态工作过程中,系统光学孔径、安装平台振动、光束跟瞄误差、热效应等也会对耦合效率造成不同幅度的影响,有待进行理论与实验研究.

本文建立前置光放大激光通信系统中空间光-少模光纤耦合效率的数学模型,并研究信号光接收过程中的干扰因素对少模光纤耦合效率的影响.以两模光纤为例,提出空间光到少模光纤的耦合理论,分析了光学相对孔径、光束倾斜、离焦、随机角抖动等对少模光纤耦合效率的影响,通过数值计算方法将相同干扰因素下的单模光纤和少模光纤耦合效率进行对比,并通过实验对理论分析进行了验证.

1 空间光通信中空间光-少模光纤耦合效率模型及影响因素

图 1 为基于少模光纤耦合的前置光放大空间光通信系统示意图(直接探测),接收光学系统可以等效为焦距为 f 、直径为 D 的薄透镜.理想情况下,被调制的空间光经过无像差的理想接收光学天线汇聚到后焦面形成艾里斑,光能量耦合入放置在后焦面位置的少模光纤纤芯中,经光纤送入少模前置光放大器,最后通过多模光纤进入雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)探测器.各模式传输信息相同,模间串扰可忽略.

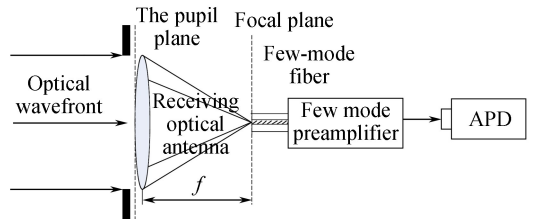


图 1 基于少模光纤的前置光放大激光通信接收端
Fig.1 Laser communication receiver with optical preamplifier based on FMF

空间光到少模光纤各个模式下的耦合效率在焦平面处可表示为^[14]

$$\eta_i = \frac{\left| \iint E^*(r) F_i(r) ds \right|^2}{\iint |E(r)|^2 ds \iint |F_i(r)|^2 ds} \quad (1)$$

式中, $E(r)$ 为入射光在焦平面上的光场分布, $F_i(r)$ 为少模光纤不同模式下的模场, ds 为焦平面处面元.

当通信系统采用直接探测时,少模光纤的耦合效率可认为是各个模式下效率的叠加,即^[12]

$$\eta = \sum_{i=1}^m \eta_i \quad (2)$$

式中, m 表示少模光纤的模场数, η_i 为少模光纤第 i 个模场的耦合效率, $E(r)$ 为入射光在焦平面上的光场分布.计算时相位项可以忽略,仅由振幅项来表示,即^[15]

$$A(r) = \frac{\pi D^2}{4\lambda f} \left[2 \frac{J_1(kDr/2f)}{kDr/2f} \right] \quad (3)$$

式中, λ 为波长, k 为波数, $k=2\pi/\lambda$; $J_1(x)$ 为一阶贝塞尔函数; $F_i(r)$ 为少模光纤的第 i 个模在焦平面上的模场分布. 以两模光纤为例, 两模光纤支持 LP_{01} 模和 LP_{11} 模的两种简并形式 (LP_{11a} 模和 LP_{11b} 模). 在计算少模光纤的模场分布时忽略偏振模耦合分量, 并对弱导光纤进行计算. 根据拉盖-高斯分布对阶跃型少模光纤模场进行近似计算, 得到两模光纤的线偏振 LP 模场归一化表达式为^[16]

$$F_{01}(r, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-r^2}{2\xi^2}\right) \quad (4)$$

$$F_{11}(r, \varphi) = \sqrt{2/\pi} \cdot |r| \exp\left(\frac{-r^2}{2\xi^2}\right) \begin{cases} \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\sin \varphi$ 和 $\cos \varphi$ 分别对应 LP_{11a} 模和 LP_{11b} 模; r, φ 分别为模场轴向和角向坐标, ξ 可表示为

$$\xi = \sqrt{r_0 / (kn_1 \sqrt{2\Delta})} \quad (6)$$

式中, r_0 为少模光纤的纤芯半径, n_1 为纤芯折射率, n_2 为包层折射率, 相对折射率差 $\Delta = (n_1 - n_2) / n_1$.

由于两模光纤的各模式已进行归一化, 即 $\iint |F_i(r)|^2 ds = 0$, 则式(1)可简化为

$$\eta_i = \frac{\left| \iint E^*(r) F_i(r) ds \right|^2}{\iint |E(r)|^2 ds} \quad (7)$$

本文采用低模式损耗、阶跃型两模光纤模型, 传输时不采用模分复用技术, 而是直接将耦合入少模光纤的光送入少模前置 EDFA 中放大, 可忽视模间串扰. 其纤芯直径为 $18 \mu\text{m}$, 波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, 归一化频率为 3.79, 大于 2.405, 小于 3.832, 因此该少模光纤在 1550 nm 波段可支持两种 LP 模式, 即为式(4)、(5)代表的 LP_{01} 模, 以及 LP_{11} 模的两种简并形式 (LP_{11a} 模和 LP_{11b} 模)^[17]. 将式(3)~(6)代入式(2)、(7), 可得到空间光到两模光纤的耦合效率与相对孔径 D/f 的变化曲线.

在实际应用中, 由于光学装调误差、环境温度、发射和接收平台振动等会引入光纤对准误差和光束随机抖动误差, 致使模场匹配程度下降, 耦合效率降低, 从而导致接收端信噪比下降, 误码率提高, 通信质量变差. 接下来将推导并建立不同影响因素下空间光-少模光纤耦合效率的数理模型.

1.1 焦平面光斑横向偏移对空间光-少模光纤耦合效率的影响

图 2 为少模光纤端面发生横向偏移的耦合示意图. 当光学系统存在装调误差时, 光斑在两模光纤端面发生横向偏移 r_b , 由于光斑偏移 r_b 实际等效于光纤端面偏移了 $-r_b$, 则根据式(4)、(5)可推导出在焦平面 (r, φ) 处其模场分布分别为

$$\begin{cases} F_{01}(r_b) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2\xi^2} |\mathbf{r} + \mathbf{r}_b|^2\right] \\ F_{11}(r_b) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} |\mathbf{r} + \mathbf{r}_b| \exp\left[-\frac{1}{2\xi^2} |\mathbf{r} + \mathbf{r}_b|^2\right] \begin{cases} \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

式中, \mathbf{r} 和 \mathbf{r}_b 为矢量. 设 Ω 为 r_b 与 X 轴方向的夹角, 且已知 φ 为 r 与 X 轴方向的夹角. 则式(8)可展开为

$$\begin{cases} F_{01}(r_b) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2\xi^2} (r^2 + r_b^2 + 2r \cdot r_b \cos \varphi \cos \Omega + 2r \cdot r_b \sin \varphi \sin \Omega)\right] \\ F_{11}(r_b) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} (r^2 + r_b^2 + 2r \cdot r_b \cos \varphi \cos \Omega + 2r \cdot r_b \sin \varphi \sin \Omega) \times \\ \exp\left[-\frac{1}{2\xi^2} (r^2 + r_b^2 + 2r \cdot r_b \cos \varphi \cos \Omega + 2r \cdot r_b \sin \varphi \sin \Omega)\right] \begin{cases} \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

当少模光纤存在横向偏移时, 空间光到少模光纤的耦合效率可表示为

$$\eta_{i,r_b} = \frac{\left| \iint A^*(r) F_i(r_b) ds \right|^2}{\iint |A(r)|^2 ds} \quad (10)$$

$$\eta_{r_b} = \sum_{i=1}^m \eta_{i,r_b} \quad (11)$$

将式(3)、(9)代入式(10)、(11)可得空间光到少模光纤耦合效率随横向偏移 r_b 的变化曲线.由于两模光纤的模场面积较单模光纤大,且支持三个模式的模场传输,当聚焦光斑发生横向偏移时,两模光纤的 LP_{11a} 模和 LP_{11b} 模也会接收到信号光,少模光纤接收到的光能量要高于单模光纤,能够获得更高的耦合效率,因此少模光纤对光斑横向偏移的容忍度更高.

1.2 焦平面光斑轴向偏移对少模光纤耦合效率的影响

图3为少模光纤端面发生轴向偏移的耦合示意图.当温度变化时,光纤位置与天线焦点处会产生一定偏移,造成离焦.光纤发生轴向偏移时,空间光在光纤端面上产生一个离焦的圆形光斑,光斑面积随偏移量的增大而增大.当光斑面积大于纤芯模场有效面积后,有一部分光能量丢失,使耦合效率降低.而少模光纤模场面积相比单模光纤更大,离焦后接收到的光能量高于单模光纤,因此少模光纤对光斑轴向偏移的容忍度更高.光纤端面存在轴向偏移 Δz 时,可知入射光在光纤端面的光场分布为^[18]

$$E_{\Delta z}(r) = -\frac{2\pi i R^2}{\lambda f} \exp\left[i\left(\frac{f}{R}\right)^2 u\right] \int_0^1 J_0(v\rho) \exp\left[-\frac{1}{2} i u \rho^2\right] \rho d\rho \quad (12)$$

式中, R 为接收口径半径, u 和 v 为引入的两个无量纲变量,其表达式为

$$\begin{cases} u = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{R}{f}\right)^2 \cdot \Delta z \\ v = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{R}{f}\right) \cdot r \end{cases} \quad (13)$$

则当少模光纤存在轴向偏移 Δz 时,可推出空间光到少模光纤的耦合效率为

$$\eta_{i,\Delta z} = \frac{\left| \iint E_{\Delta z}^*(r) F_i(r) ds \right|^2}{\iint |E(r)|^2 ds} \quad (14)$$

$$\eta_{\Delta z} = \sum_{i=1}^m \eta_{i,\Delta z} \quad (15)$$

将式(4)、(5)、(12)代入式(14)、(15)可得空间光到少模光纤耦合效率随轴向偏移 Δz 的变化规律.

1.3 随机角抖动对少模光纤耦合效率的影响

在实际应用中,由于发射和接收平台振动、探测器噪声以及转台机械噪声等因素的影响,光通信终端接收光轴与入射光束夹角存在随机抖动.一般认为随机偏差角 θ 满足瑞利分布,其概率密度分布函数表达式为^[19-20]

$$p(\theta) = \frac{\theta}{\sigma_\theta^2} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_\theta^2}\right) \quad (16)$$

式中, σ_θ 为随机偏差角 θ 的标准差.在空间光-光纤耦合系统中耦合系统存在角偏差与聚焦光斑,相对于光纤端面存在横向偏移是等效的.因此可以通过光纤端面的横向偏移来表示系统存在随机角抖动^[21].与随机偏差角 θ 相对应的光纤端面横向偏移量 Δr 的概率密度分布函数表达式为

$$p(\Delta r) = \frac{\Delta r}{\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{\Delta r^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (17)$$

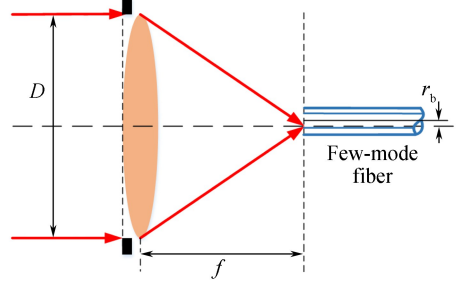


图2 少模光纤端面发生横向偏移的耦合示意图
Fig.2 Coupling geometry of lateral offset of few-mode fiber

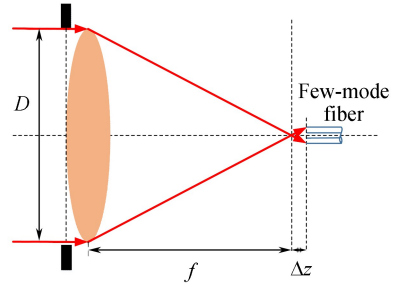


图3 少模光纤端面发生轴向偏移的耦合示意图
Fig.3 Coupling geometry of axial offset of few-mode fiber

式中, σ_r 为随机横向偏移量 Δr 的标准差.当通信系统存在随机角抖动时,偏差角 θ 为随机变量,因此与随机偏差角 θ 相对应的光纤端面横向偏移量 Δr 也是一个随机变量.当两模光纤发生横向偏移 Δr 时,其模场分布如式(8)所示.当通信系统存在随机角抖动时,耦合效率应为横向偏移量 Δr 所有状态的系综平均,即平均耦合效率.由 1.1 节分析可知,比起单模光纤,少模光纤对横向偏移有更高的容忍度,因此相比单模光纤,少模光纤在随机横向偏移下的平均耦合效率也应更高.于是易得少模光纤对随机角抖动的容忍度更高.那么在焦平面处,空间光到两模光纤的平均耦合效率可表示为^[21]

$$\langle \eta_i \rangle = \frac{\langle \left| \int A^*(r) F_i(\Delta r) ds \right|^2 \rangle}{\langle \iint |A(r)|^2 ds \rangle} = \frac{\left| \int_0^R \int_0^{2\pi} \int_0^\infty A^*(r) F_i(\Delta r) p(\Delta r) r dr d\varphi d\Delta r \right|^2}{\iint |A(r)|^2 ds} \quad (18)$$

$$\langle \eta \rangle = \sum_{i=1}^m \langle \eta_i \rangle \quad (19)$$

将式(3)、(9)、(17)代入式(18)、(19)后,可得到耦合效率与随机角抖动的变化规律.

2 空间光-少模光纤耦合系统实验装置

空间光-少模光纤耦合系统主要由激光器、准直器、快速倾斜镜(Fast Steering Mirrors, FSM)、耦合透镜、少模光纤、光功率计组成.图 4 为实验装置.激光器发射出波长为 1 550 nm 的激光,经准直器准直扩束,采用焦距为 18.4 mm 的耦合透镜进行接收,利用光阑将透镜的相对孔径 D/f 调整至 0.17,光纤放置在六维调整架上,通过调节六维调整架可以改变光纤位置,观察光功率计示数,当示数最大时,视为聚焦光斑与光纤端面对准.通过改变 FSM 电压引入角偏差和随机抖动误差,通过调节六维调整架 z 轴旋钮,改变离焦量.其中,由于随机抖动偏角的两个正交分量均服从正态分布,利用 MATLAB 生成两组符合标准正态分布的随机数,分别作为倾斜镜两轴的控制信号.利用高精度 DA 卡将计算机输出的数字控制信号转换为模拟控制电压,控制转镜随机偏转,并通过乘以系数模拟不同抖动条件下的情况.实验中,在抖动幅度标准差控制在微米级前提下,控制精度可达纳米级.通过光纤光功率计示数曲线观察耦合进光纤的能量变化.

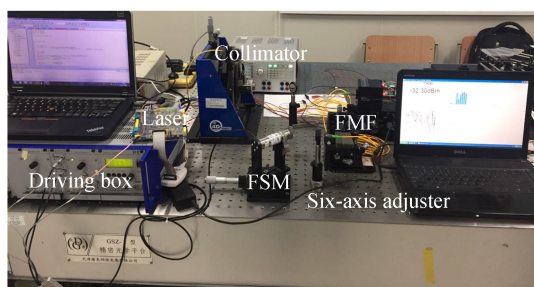


图 4 空间光-少模光纤耦合系统实验装置
Fig.4 Experimental installation of spatial light into few-mode fiber

3 仿真与实验结果

针对耦合透镜的相对孔径、焦平面光斑横向偏移、轴向偏移和随机角抖动参量,数值计算和实验分析少模光纤耦合效率所受到的影响.接收光学系统为地面大口径接收天线,将入射光束聚焦至少模光纤后焦面上.系统中通信光波长 $\lambda = 1\ 550\ \text{nm}$.

首先讨论耦合效率随接收光学天线相对孔径的变化情况.由式(1)~(7)可获得两模光纤耦合效率随相对孔径 D/f 的变化曲线,如图 5.由图可知随着相对孔径的增加,空间光到两模光纤的耦合效率先增加后减小,当 $D/f = 0.17$ 时,两模光纤的耦合效率有最大值约为 82.96%,其最优耦合效率比单模光纤的最大耦合效率 81.45%略高,这是因为两模光纤的模场面积大于单模光纤,传输模式也多于单模光

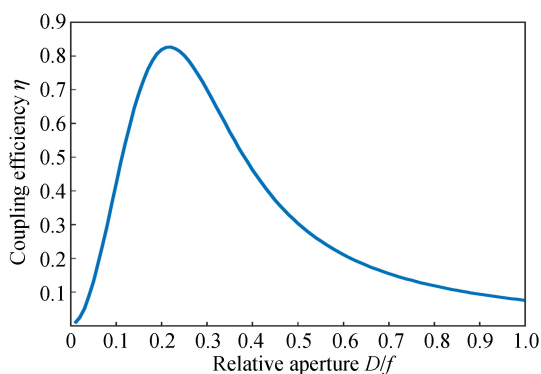


图 5 两模光纤耦合效率与接收系统相对孔径的关系
Fig.5 Relationship between coupling efficiency of two-mode fiber and relative aperture of receiving system

纤;但是 LP_{11} 模场在纤芯对准和艾里光模场的匹配度较低,所以耦合效率的峰值增大得并不明显。

图 6 为理论仿真及实验测量的单模光纤及两模光纤耦合效率随横向偏移量 r_b 的变化曲线.由图可见,两模光纤和单模光纤的耦合效率均随 r_b 的增加而单调递减,当 r_b 相同时,由于两模光纤的模场面积大于单模光纤,实验测得两模光纤的耦合效率始终高于单模光纤.当 r_b 为 $4 \mu\text{m}$ 时,实验测得两模光纤的耦合效率为 37.62%,此时单模光纤耦合效率下降到 27.39%,两模光纤的耦合效率比单模光纤高 10.23%.实验结果验证了理论推导结果,即少模光纤相比于单模光纤对横向偏移的容忍度明显提高.实验所得少模光纤耦合效率与理论仿真所得耦合效率随偏移量的变化趋势基本一致。

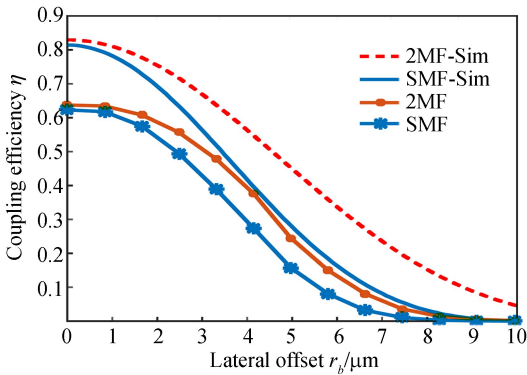


图 6 耦合效率随横向偏移 r_b 的变化

Fig.6 Relationship between coupling efficiency and lateral offset r_b

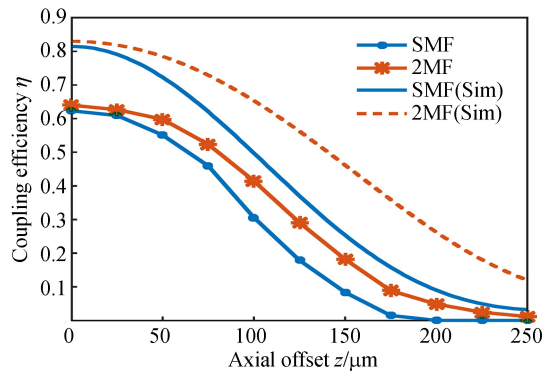


图 7 耦合效率随轴向偏移 Δz 的变化

Fig.7 Relationship between coupling efficiency and axial offset Δz

图 7 为理论仿真及实验测量的单模光纤及两模光纤耦合效率随轴向偏移量 Δz 的变化曲线.由图可看出,两模光纤和单模光纤的耦合效率均随 Δz 的增加而单调递减,当 Δz 相同时,实验测得两模光纤的耦合效率始终高于单模光纤.当 Δz 达到 $125 \mu\text{m}$ 时,实验测得两模光纤的耦合效率为 29.13%,此时单模光纤耦合效率为 17.89%,两模光纤的耦合效率比单模光纤高 11.24%.可见少模光纤相比于单模光纤对轴向偏移的容忍度更高。

图 8 为理论仿真及实验测量的有光束抖动情况下,单模光纤及两模光纤的平均耦合效率与随机抖动幅度标准差 σ_r 的关系曲线.由图可看出,两模光纤和单模光纤的平均耦合效率均随 σ_r 的增加而单调递减,当 σ_r 相同时,实验测得两模光纤的耦合效率始终高于单模光纤.当 σ_r 为 $5 \mu\text{m}$ 时,实验测得两模光纤的耦合效率为 19.97%,此时单模光纤耦合效率下降到 7.87%,两模光纤的耦合效率比单模光纤高 12.1%.可见少模光纤相比于单模光纤对随机抖动的容忍度更高。

在实际光通信系统中,若能确定平均耦合效率的最低要求,在已知接收光学系统参数的前提下,可给出伺服系统的跟踪精度要求.如,已知地面站接收天线焦距为 5 m , $D/f=0.17$,要求使用两模光纤接收时平均耦合效率不低于 20%,则由实验结果可知随机抖动幅度标准差 $\sigma_r \leq 5 \mu\text{m}$,此时角抖动标准差 $\sigma_\theta = \sigma_r/f \leq 1 \mu\text{rad}$,即地面站跟踪精度不低于 $1 \mu\text{rad}$ (1 倍标准差),以目前的技术水平刚好能够达到.而使用单模光纤进行接收,在不降低平均耦合接收功率前提下势必要进一步提高跟踪精度,这就给精跟踪系统提出较大的挑战,同时增加了系统的成本。

数值计算和实验结果与第 2 节中的理论分析相符合,由于少模光纤的模场面积大于单模光纤,且传输的正交模式多于单模光纤,在干扰因素恒定的情况下使用少模光纤接收可以显著提高光耦合效率,因此采用少模光纤进行信号光接收可以提高接收端的信噪比,增强链路的稳定性,改善接收端性能.容易推测,提高模式

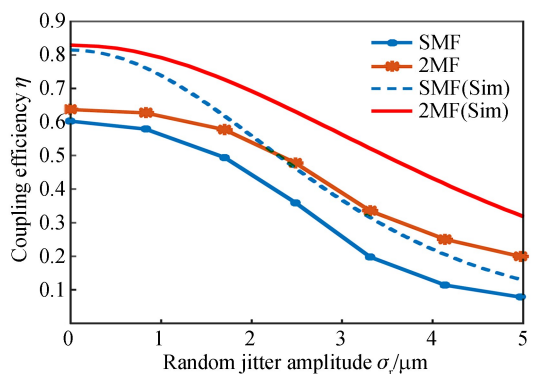


图 8 耦合效率随随机抖动幅度标准差的变化

Fig.8 Relationship between coupling efficiency and stochastic jitter amplitude

数量,如采用四模光纤,能够进一步增加系统的鲁棒性,但相应的在空间光通信系统中也必须换用基于四模光纤的 EDFA 和波分多路复用(Wavelength Division Multiplex, WDM)等。

实验中,耦合效率测量时具有一定的不稳定性.首先,激光器输出能量具有少许波动性,在接收端利用光功率计监测,其能量在 -20.6 ± 0.02 dBm 范围内波动,相当于 $8.67 \sim 8.75$ μ W,以中间值为基准,其变化率约为 0.46%.此外,实验中采用的六维高精调整架的旋转调整精度 τ 约为 $6''$,由于耦合透镜焦距 f 为 18.4 mm,则调整精度引起的光斑横向偏移为 $t = \tau \cdot f = 0.54$ μ m,将该偏移代入式(10),可得调整误差引起的耦合效率波动约为 0.53%.此外,光功率计的测量分辨率为 100 pW,而功率实测值约为 -20.6 dBm,相当于 8.7 μ W,则耦合效率的测量分辨率约为 0.001 1%.三者相加,可知仪器引起的耦合效率不稳定性不大于 1%。

4 结论

本文建立了空间光-少模光纤耦合效率的数学模型,以两模光纤为例研究了相对孔径对耦合效率的影响,当工作波长为 1 550 nm、相对孔径 $D/f = 0.17$ 时可获得最高耦合效率,为 82.96%。研究了焦平面光斑横向偏移、轴向偏移、光束随机角抖动对少模光纤耦合效率的影响规律,并与相同影响因素下的单模光纤耦合情况进行对比.结果表明,当横向偏移量为 4 μ m 时,实验测得两模光纤的耦合效率比单模光纤高 10.23%;当轴向偏移量为 125 μ m 时,两模光纤的耦合效率比单模光纤高 11.24%;当随机抖动幅度标准差 σ_r 为 5 μ m 时,两模光纤的耦合效率比单模光纤高 12.1%。理论分析与实验结果吻合较好.可见采用少模光纤进行信号接收对光学装调误差、环境温度、发射和接收平台振动等引起的天线焦平面光斑横向偏移、轴向偏移和随机角抖动等影响耦合效率的因素均有很好的抑制作用,因此对干扰因素敏感度更低,有利于提高系统的环境适应性和工作可靠性.研究结果可为基于少模光纤接收的前置光放大激光通信系统设计和性能评估提供理论依据。

参考文献

- [1] TOYOSHIMA M. Trends in satellite communications and the role of optical free-space communications Invited [J]. *Journal of Optical Networking*, 2005, **4**(6): 300-311.
- [2] WANG Jia, YU Xin. Free-space optical communication's current situation and development trend [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(2): 259-262.
王佳,俞信.自由空间光通信技术的研究现状和发展方向综述[J].光学技术,2005,**31**(2):259-262.
- [3] TOYOSHIMA M, LEEB W R, KUNIMORI H, et al. Comparison of microwave and light wave communication systems in space application[C]. SPIE, 2005, **5296**: 1-12.
- [4] LIU Xian-zhu, WANG Chao, LI Ying-chao, et al. Analysis of performance of high light-energy-utilization-ratio laser communication antenna based on axicon pair[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(7): 0706002
刘显著,王超,李英超,等.基于轴锥镜对的高光能利用率激光通信天线性能分析[J].光子学报,2017,**46**(7):0706002
- [5] ZHANG Lei, LI Bo, ZHAO Xin, et al. Influence of atmosphere turbulence on tracking system in space laser communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(9): 0901001.
张雷,李勃,赵馨,等.大气湍流对空间激光通信跟踪系统的影响[J].光子学报,2017,**46**(9):0901001.
- [6] PARCA G, SHAHPARI A, CARROZZO V, et al. Optical wireless transmission at 1.6-Tbit/s (16 100 Gbit/s) for next-generation convergent urban infrastructures [J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(11): 116102.
- [7] TOYOSHIMA M, JONO T, NAKAGAWA K, et al. Optimum divergence angle of a Gaussian beam wave in the presence of random jitter in free-space laser communication systems[J]. *Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision*, 2002, **19**(3): 567-571.
- [8] GLOGE D. Optical power flow in multimode fibers[J]. *Bell Labs Technical Journal*, 1972, **51**(8): 1767-1783.
- [9] YAMAN F, BAI N, ZHU B, et al. Long distance transmission in few-mode fibers[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(12): 13250.
- [10] XIA C, LI G, BAI N, et al. Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication[J]. *Advances in Optics & Photonics*, 2014, **6**(4): 5041-5046.
- [11] RICHARDSON D J, FINI J M, NELSON L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. *Nature Photonics*, 2013, **7**(5): 354-362.
- [12] ZHENG D, LI Y, CHEN E, et al. Free-space to few-mode-fiber coupling under atmospheric turbulence.[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(16): 18739.
- [13] ZHENG D, LI Y, LI B, et al. Free space to few-mode fiber coupling efficiency improvement with adaptive optics under atmospheric turbulence[C]. Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2017: Th3C.2.
- [14] HORTON A J, BLAND J. Coupling light into few-mode optical fibres I: the diffraction limit[J]. *Optics Express*,

2007, **15**(4): 1443.

- [15] TOYOSHIMA M. 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: Optics Image Science & Vision*, 2006, **23**(9): 2246-2250.
- [16] QI Hong-qun, DUAN Kai-liang, PU Ji-xiong. Accurate analysis of coherent beam combining of fiber laser[J]. *Laser Technology*, 2009, **33**(6): 600-603.
亓红群,段开棕,蒲继雄.光纤激光及其相干合成光场的准确分析[J].*激光技术*,2009,**33**(6):600-603.
- [17] ROWE, HARRISON E. Guides with general coupling spectra[M]. *Electromagnetic Propagation in Multi-Mode Random Media*. John Wiley & Sons, Inc. 2001: 99-122.
- [18] BORN, WOLF. Principles of optics(Seventh Edition)[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2009, 404.
玻恩,沃尔夫.光学原理(第7版)[M].北京:电子工业出版社,2009,404.
- [19] ARNON S, ROTMAN S R, KOPEIKA N S. Performance limitations of a free-space optical communication satellite network owing to vibrations: heterodyne detection[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(27): 6366-6374.
- [20] KAZOVSKY L G, KALOGERAKIS G, SHAW W. Homodyne phase-shift-keying systems: past challenges and future opportunities[J]. *Lightwave Technology*, 2006, **24**(12): 4876-4884.
- [21] ZHAO Fang. Research on receiving performance of intersatellite laser communication systems based on single-mode fiber coupled self-homodyne detection[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 27.
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,2011:27.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 61805028, 61805027, 61701045), the Youth Natural Science Foundation in Changchun University of Science and Technology (No. WQNJJ-2016-15), Jilin Science and Technology Development Supporting Project (No.20160204066GX) and the National Basic Research Program of China (No.2017YFC0803806)

引用格式:WANG Chao, FAN Xue-bing, TONG Shou-feng, *et al.* Coupling Efficiency and Influence Factors of Spatial Light into Few-mode Fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(12): 1206001

王超,范雪冰,佟山峰,等.空间光到少模光纤的耦合效率及影响因素[J].*光子学报*,2018,**47**(11):1206001