

空间光通信光纤耦合效率及补偿分析

熊准¹,艾勇¹,单欣¹,陈晶¹,陈二虎²,赵恒¹,武云云³

(1. 武汉大学电子信息学院,湖北武汉 430079; 2. 北京跟踪与通信技术研究所,北京 100094;
3. 中国科学院自适应光学重点实验室,四川成都 610209)

摘要:受大气湍流影响,空间光通信系统中接收光至单模光纤耦合效率降低,根据弱湍流理论,推导了 Kolmogorov 湍流信道情况下准直高斯光束至单模光纤平均耦合效率表达式,仿真了 1 km 传输距离下不同接收孔径下平均耦合效率与湍流强度的关系,结果表明:当大气折射率结构常数达到 10^{-12} 时,耦合效率降到 0.1 以下,且耦合效率随接收孔径增大而降低。采用 37 单元自适应光学系统(AO)进行补偿实验,对畸变波前进行重构再利用反射变形镜进行修正的方法,对比不同 AO 状态下波面图质量及远场长曝光成像及质心位置漂移,发现 AO 进行低阶像差校正后,波面峰-谷值及标准差减小、斯特列尔比(SR)及耦合效率增加,进行高阶校正后情况进一步改善。

关键词: 光纤耦合效率; 空间光通信; 大气湍流; 自适应光学

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2510-05

Fiber coupling efficiency and compensation analysis for free space optical communication

Xiong Zhun¹, Ai Yong¹, Shan Xin¹, Chen Jing¹, Chen Erhu², Zhao Heng¹, Wu Yunyun³

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Institute of Beijing Tracking and Communication Technology, Beijing 100094, China;

3. The Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: The coupling efficiency of received optical power into a single-mode fiber is degraded by atmospheric turbulence in a free space optical communication system. The expression of average coupling efficiency of a collimated Gaussian beam into a single-mode fiber was derived under Kolmogorov turbulence channel, according to the theory of weak turbulence statistics. The relations between average coupling efficiency and turbulence intensity under different received aperture in 1 km propagation path were also simulated. The results show that coupling efficiency decreases below 0.1 when refractive-index structure constant rises to 10^{-12} , and coupling efficiency degrades when the received aperture increases. A 37-element adaptive optics system with H-S wavefront sensor was adopted to compensate the efficiency. Compared with long exposure imaging and centroid position offset in different status of AO system, it

收稿日期:2013-01-11; 修订日期:2013-02-14

基金项目:湖北省自然科学基金(2010CDB08502)

作者简介:熊准(1988-),男,博士生,主要从事自由空间光通信技术方面的研究。Email:xz0131@163.com

导师简介:艾勇(1957-),男,教授,博士生导师,主要从事自由空间光通信及空间探测方面的研究。Email:aiyong09@163.com

was found that the P-V value and standard deviation decreased, Strehl ratio and coupling efficiency increased in low-order aberration correction. And things became better when high-order aberration was corrected.

Key words: fiber coupling efficiency; FSO; atmosphere turbulence; adaptive optic

0 引 言

自由空间光通信是一种新型的宽带接入技术,是光通信与无线通信相结合的产物,兼具无线通信与光通信的优点,如不需要频率许可证、频带宽、保密性好、低误码率、抗电磁干扰等。近年来,随着地面光纤通信技术的成熟,特别是光纤放大器的出现,1550 nm 波段空间光通信具有极大发展前景。采用高灵敏度的前置光放大接收技术时需要将空间光耦合进单模光纤,由于大气湍流的存在,导致接收光波前相位随机起伏,引起光束抖动、光斑漂移、闪烁、光束扩展等,使地面激光通信及星地激光通信中空间光至单模光纤耦合效率严重下降。对此,大量理论及实验工作陆续开展^[1-3]。其中,自适应光学(AO)技术作为天文成像领域必不可少的关键技术,对于解决湍流大气中波前畸变、提高耦合效率已得到一定程度上的理论和实验验证。

文中首先根据准直高斯光束传输特性,推导了弱湍流条件下单模光纤耦合效率表达式,仿真分析了单模光纤耦合效率与大气折射率常数的关系。然后针对空间耦合效率低的特点,采用37单元AO对接收光斑进行补偿校正实验,得到不同AO工作状态下波面质量及远场长曝光成像的斯特列尔比(SR),定性指出SR与耦合效率的关系。

1 平均耦合效率

单模光纤平均耦合效率是指耦合进单模光纤中的光功率 $\langle P_c \rangle$ 与接收孔径平面上的入射光功率 $\langle P_a \rangle$ 之比,即:

$$\eta_c = \frac{\langle P_c \rangle}{\langle P_a \rangle} = \frac{\left\langle \left| \int_A U_i(r) U_m^*(r) dr \right|^2 \right\rangle}{\left\langle \int_A |U_i(r)|^2 dr \right\rangle} \quad (1)$$

式中: $U_i(r)$ 为接收孔径上的入射光场; $U_m(r)$ 为单模光纤模场。将公式(1)中分子项展开,耦合效率表达式可写为:

$$\eta_c = \frac{1}{\langle P_a \rangle} \iint_A \Gamma_i(r_1, r_2) U_m^*(r_1) U_m(r_2) dr_1 dr_2 \quad (2)$$

式中: $\Gamma_i(r_1, r_2)$ 为入射光场的互相干函数。在弱湍流条件下表达式为^[4]:

$$\Gamma_i(r_1, r_2) = \langle U_i(r_1) U_i^*(r_2) \rangle = I_0 \exp \left[-\frac{\Lambda}{4} \left(\frac{k(r_1 - r_2)^2}{L} \right) - \frac{3a}{8} \left(\frac{qk(r_1 - r_2)^2}{L} \right)^{5/6} \right] \quad (3)$$

式中: Λ 与 a 为光束相关参数,具体定义为 $\Lambda = \frac{2L}{kW^2}$; k, L, W 分别为波数、传播距离及接收光斑半径。 $a = \frac{1 - \Theta^{6/3}}{1 - \Theta}$,对于准直后的高斯光束 $\Theta = \frac{1}{\Lambda_0 + 1}$;

$\Lambda_0 = \frac{2L}{kW_0^2}$; W_0 为发射端高斯光束束腰半径。将公式(3)中指数项利用高斯近似可简化为^[5]:

$$\Gamma_i(r_1, r_2) = I_0 \exp \left[-\frac{|r_1 - r_2|^2}{\rho_c} \right] \quad (4)$$

式中: ρ_c 为修正的光场空间相干长度,定义式 $\rho_c = \left(\frac{1}{2W^2} + 0.55aC_n^2 k^2 L \right)^{-3/5}$ 。其中, C_n^2 为大气折射率结构常数。

在Kolmogorov湍流下,高斯光束经大气传输后至单模光纤平均耦合效率表达式为:

$$\eta = 8b^2 \int_0^1 \int_0^1 \exp \left[-\left(b^2 + \frac{A_R}{A_C} \right) (x_1^2 + x_2^2) \right] \cdot J_0 \left(2 \frac{A_R}{A_C} x_1 x_2 \right) x_1 x_2 dx_1 dx_2 \quad (5)$$

式中: J_0 为零阶第一类修正的贝塞尔函数。

$$b = \frac{D_R}{2} \frac{\pi W_m}{\lambda f} \quad (6)$$

$$A_R = \frac{\pi D_R^2}{4} \quad (7)$$

$$A_c = \pi \rho_c^2 \quad (8)$$

式中： D_R 为接收透镜孔径； W_m 为光纤端面模场半径； f 为接收透镜焦距； A_R 为接收孔径面积； A_c 为入射光波的空间相干面积。

为便于仿真计算，假设发射端的准直高斯光束束腰半径 $W_0=1\text{ cm}$ ，传输距离 $L=1\text{ km}$ ，接收端光斑半径 $W=0.05\text{ m}$ ，模场直径 $W_m=9\text{ }\mu\text{m}$ ，经计算 $a=1.52$ 。图 1 为波长 $\lambda=1\text{ 550 nm}$ 高斯光束经大气传输后，接收端耦合效率 η 与大气折射率结构常数 C_n^2 的关系。可以看出，当传输距离一定时，随着大气湍流变强即 C_n^2 增加，单模光纤平均耦合效率降低，且强湍流情况下的耦合效率低于 10%。图 1 还给出了不同接收孔径下的耦合效率，当 D_R 为 5 cm 左右时，且湍流较弱即 $C_n^2 < 10^{-15}$ 时，公式(5)中 A_R/A_c 可取较小值，此时耦合效率 η 较大，理论上可达到 100%。随着 D_R 增加， A_R/A_c 增大，耦合效率 η 迅速减小。参考文献[6]仿真了星地波长 1 550 nm 的激光通信在 60° 天顶角时，下行链路单模光纤平均耦合效率随接收天线口径的关系，该文献表明天线口径越大，平均耦合效率越低。在星地激光通信中，大口径接收天线具有孔径平均效应，可克服大气湍流造成的接收功率起伏效应，但盲目增大 D_R 可使光纤耦合效率降低，实际应用中需折中考虑[7-8]。图 2 仿真了接收口径取 10 cm 时，不同大气折射率结构常数条件下，耦合效率随通信波长的变化关系，可以看出两者近似成正比。因所使用的自适应光学中波前探测器阵列 CCD 仅对 650 nm 附近的可见光较为敏感，若通过实验能证明此波长下耦合效率有所提高，则 1 550 nm 波长下耦合效率也应有近似变化。下文实验中将用此波长替代实际通信所用的 1 550 nm 波长。

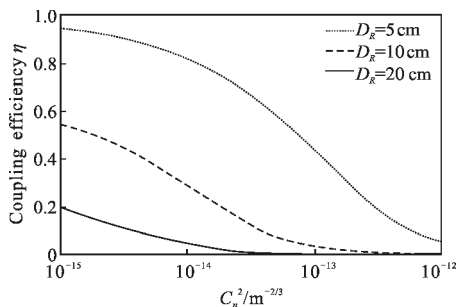


图 1 耦合效率随大气折射率结构常数变化关系

Fig.1 Coupling efficiency vs refractive-index structure parameter

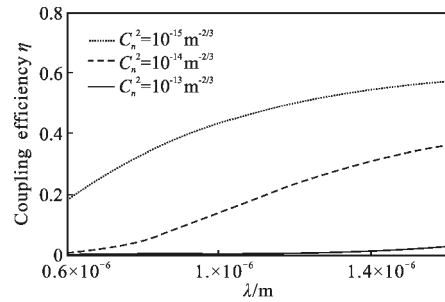


图 2 耦合效率随通信波长变化关系

Fig.2 Coupling efficiency vs wavelength of communication

2 补偿实验系统

由以上分析知，高斯光束经大气传输后至单模光纤平均耦合效率严重降低，即使在弱湍流下耦合效率也难以达到满意结果。为提高耦合效率，文中采取基于自适应光学的波前校正技术。

图 3 为基于自适应光学的耦合效率补偿实验框图， $\lambda=650\text{ nm}$ 的光信号依次经过湍流模拟器、倾斜镜、变形镜，到达两片分束片分成三部分，一部分光通过 Hartmann-Shack 波前传感器探测出波前，经波前处理器处理后再经过高压放大器(HVA)，实时控制高速倾斜镜(TM)的运动和变形镜反射镜(DM)的形变，TM 用来校正波前相位扰动中的整体倾斜，DM 用来校正波前相位扰动中的高阶成分；第二部分光进入远场成像 CCD，用来计算、评估远场长曝光成像质量及质心位置；第三部分光经接收天线耦合进入单模光纤(SMF)，通过光电转换、数据采集卡及 LabView 软件实时显示并记录光功率大小。

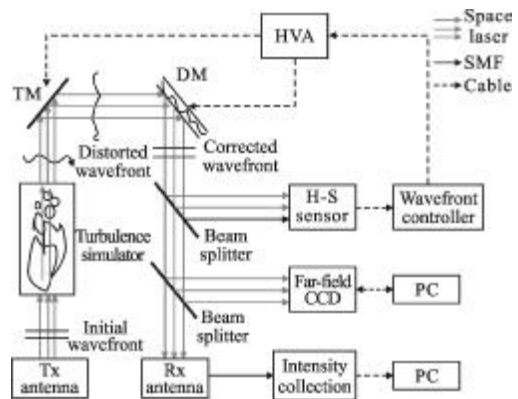


图 3 基于自适应光学的耦合效率补偿实验框图

Fig.3 Schematic of coupling efficiency compensation based on adaptive optics system

图 4 为室内模拟实验平台，其中实线为 $\lambda=650\text{ nm}$

的光路径, Tx 为发射端便携式光学天线, 发射光束为准直高斯光束; Rx 为接收端便携式光学天线, 具体参数如表 1 所示。因外场实验条件受限, 采用中科院成都光电所研制的热风式湍流模拟器产生湍流, 以模拟外场实际大气情况。湍流模拟器的风速和温度可控, 通过改变湍流池数量使大气结构常数 C_n^2 的值取不同量级。注意到实际光路径为 4.5 m, 接收端光斑大小约 0.04 m, 接收光波不能近似为平面波。

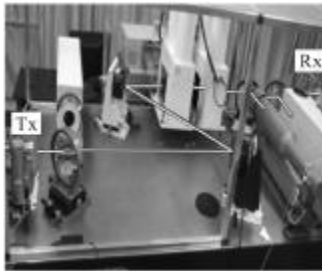


图 4 实际光路图

Fig.4 Schematic of real optical path

表 1 实验系统参数

Tab.1 Experiment system parameters

Parameter	Value	Note
Transmit aperture/mm	40	Collimated Gaussian beam
Transmit power/mW	50	
Received aperture/mm	40	Correspond to the diameter of received beam
Received antenna focal length/mm	200	Airy disk diameter is $7.93 \mu\text{m}$
Single-mode fiber core diameter/ μm	9	Correspond to airy disk diameter
Number of distortion mirror elements	37	
Number of H-S sensors subaperture	36	Subaperture diameter is 10 mm
Effective aperture of H-S sensors/mm	60	
Aperture of far-field imaging/mm	60	Focal length is 6.5 m

3 实验结果及分析

哈特曼波前传感器由 37 单元子透镜与 CCD 相机组成, CCD 传感器根据每个子透镜光斑的质心位置来推算的光束波面 x 和 y 两个方向的斜率, 得到 74 元素斜率矩阵; 按照波前重构算法, 根据斜率矩阵重构出波面, 如图 5 所示。其中, 图(a)是 AO 开环状态下的波面图, 峰谷值(P-V)为 4.79λ , 标准差

(RMS)为 0.72λ , 畸变很严重; 图(b)是仅 TM 闭环时的波面图, P-V 值为 2.96λ , RMS 值为 0.47λ , 波面质量改善效果不明显; 图(c)是 AO 闭环(TM 和 DM 同时闭环) 时的波面图, P-V 值为 1.67λ , RMS 值为 0.18λ , 波面质量得到较大改善。

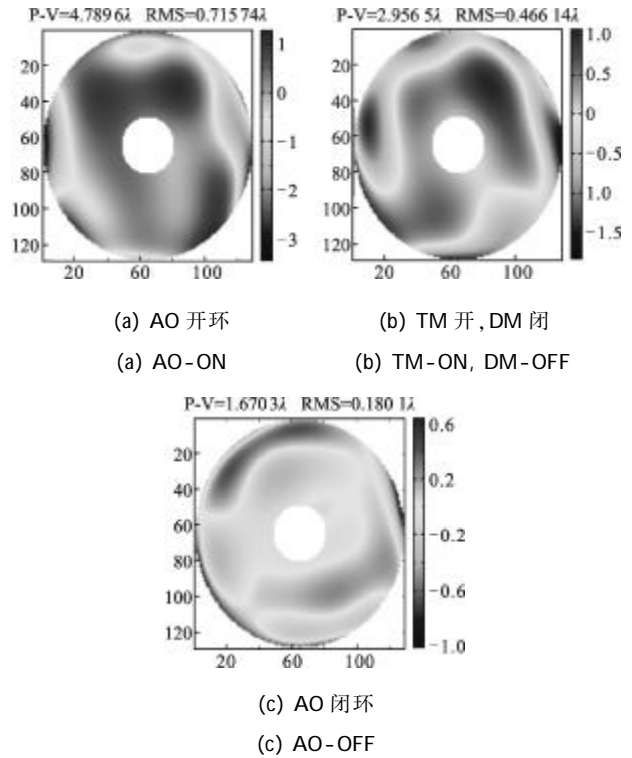


图 5 不同状态下波面对比图

Fig.5 Wave-front images in different status of AO

对采集的远场光斑进行长曝光处理, 由长曝光图像得到光斑中心位置, 在此基础上可求的每帧图像的质心漂移, 如图 6 中三组图所示。远场成像透镜的孔径为 60 mm, 焦距为 6.5 m, CCD 相机采集帧频为 25 Hz, 像素间隔 $6.4 \mu\text{m}$ 。由长曝光成像对比可得: 仅 TM 闭环比 AO 开环光斑质量略有提升, 斯特列尔比(SR)从 0.11 升到 0.16; AO 闭环状态的远场光斑明显缩小, 成像质量提升明显, SR 由仅 TM 闭环下的 0.16 提高到 0.35。可知 TM 对光束漂移的校正有效, 但无法校正高阶像差, 光斑质心仍有漂移; AO 闭环的光斑质心偏移量方差继续减小, 同时平均漂移量降低明显, 可知 DM 闭环能提高光束质量, 使能量更加集中, 从而提高单模光纤平均耦合效率。参考文献[9]通过仿真分析了弱湍流下激光波长随 SR 的变化关系, 表明当波长在 600 nm 到 1 550 nm 范围内时, SR 基本保持不变。这说明此实验若采用 1 550 nm 波长, 所得 SR 改善结果应基本相同, 故实验采用

650 nm 波长具备等效性。为定量获取空间光至单模光纤的耦合效率 η , 针对图 6 中 AO 系统三种状态, 同时记录接收端光功率并计算耦合效率, 得出 η 随 SR 变化关系, 如图 7 所示。

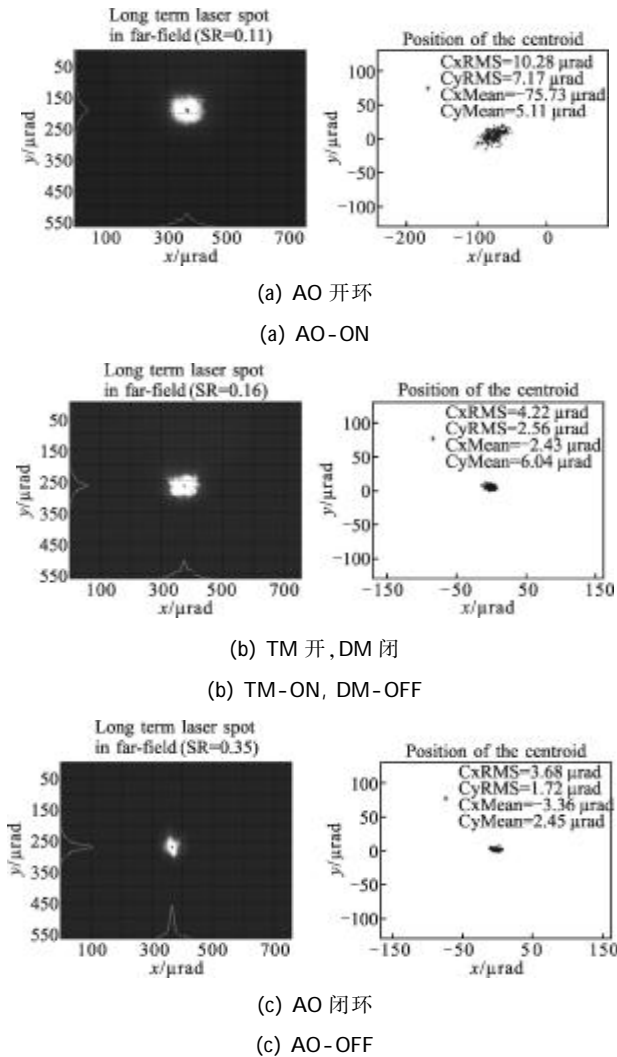


图 6 不同状态下远场长曝光成像及质心位置漂移

Fig.6 Far-field long exposure imaging and centroid position offset in different status of AO

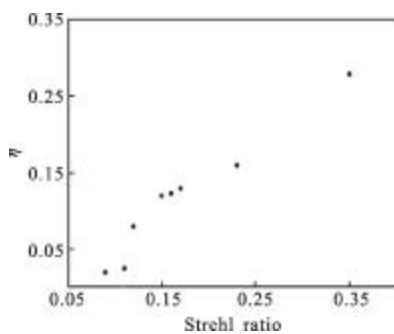


图 7 耦合效率 η 随 SR 变化图

Fig.7 Coupling efficiency η vs SR

4 结 论

空间光通信中, 高斯光束至单模光纤耦合效率仿真结果表明, 1 km 传输距离下平均耦合效率随湍流强度的增加而降低, 严重时降至 0.1 以下。当接收孔径取不同值 5 cm、10 cm、20 cm 时, 耦合效率随接收孔径增大而降低。采用 37 单元 H-S 波前传感器的自适应光学系统(AO)进行补偿实验, 分析不同 AO 状态下波面图质量及远场长曝光成像及质心位置漂移, 结果表明仅进行低阶校正, 波面质量及耦合效率增加, 高阶校正后, 情况进一步改善。因条件有限, 仅进行了带湍流发生器的室内实验, 不能代替外场整条路径上的湍流情况, 实验结果可能有差异。外场远距离空间光至光纤耦合效率的补偿实验, 这将是今后工作重点。

参 考 文 献:

- [1] Hang Liqiang, Wang Qi. Fiber coupling efficiency for free space optical communication through atmospheric turbulence and compensation [J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(5): 109-113. (in Chinese)
- [2] Yamac D, Frederic M D. Fiber-coupling efficiency for free-space optical communication through atmospheric turbulence [J]. Applied Optics(S2155-3165), 2005, 44(23): 4946-4952.
- [3] Jobling S, McCuske K T, Kwiat P G. Adaptive optics for improved mode-coupling efficiencies [C]//Laser Science XXIV, OSA Technical Digest, 2008: JWA32.
- [4] Andrews L C, Phillips R L. Laser Beam Propagation Through Random Media[M]. Bellingham: SPIE Press, 2005.
- [5] Yamac D, Frederic M D. Fiber-coupling efficiency for free-space optical communication through atmospheric turbulence [J]. Applied Optics(S2155-3165), 2005, 44(23): 4946-4952.
- [6] Xiang Jingsong, Chen Yan, Hu Yu. Influence of atmospheric turbulence on coupling space light into single mode fiber[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(3): 377-380. (in Chinese)
- [7] Han Yan, Qiang Wenxi, Xu Xianjun, et al. Irradiance scintillation analysis for laser beam propagation in turbulence atmosphere near-round [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(21): 415-421. (in Chinese)
- [8] Xiong Jie, Yuan Xiuhua. Array optical antenna for the mitigation of atmospheric fading [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(10): 1969-1973. (in Chinese)
- [9] Fan Chengyu, Wang Yingjian, Gong Zhiben. Compensation analysis for different beacon wavelengths in strong turbulence with adaptive optics[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(12): 82-85. (in Chinese)