

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

罗文^{1,2,3} 耿超^{1,2} 李新阳^{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 空间激光到单模光纤(SMF)耦合技术是自由空间激光通信中的关键技术之一。在 Matlab 环境下仿真分析了单项波前像差和大气湍流像差对空间光到 SMF 耦合效率的影响,研究了随机并行梯度下降(SPGD)算法校正大气湍流中整体倾斜像差的迭代过程及对耦合效率的影响。仿真结果表明,SMF 耦合效率随单项波前像差均方根(RMS)增加而降低,校正大气湍流中整体倾斜像差后,SMF 耦合效率都有提高;当 D/r_0 较小时,大气湍流像差中影响 SMF 耦合效率的主要像差为倾斜像差。搭建了基于 SPGD 算法的闭环控制系统,利用自适应光纤耦合器(AFC)校正模拟湍流倾斜像差后,SMF 平均耦合效率从 30.07% 提升到了 61.72%;耦合效率的均方误差(MSE)从 7.28% 降低到 2.16%。

关键词 光通信; 光纤耦合; 大气湍流像差; 自适应光纤耦合器; 随机并行梯度下降算法

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0606001

Simulation and Experimental Study of Single-Mode Fiber Coupling Efficiency Affected by Atmospheric Turbulence Aberration

Luo Wen^{1,2,3} Geng Chao^{1,2} Li Xinyang^{1,2}

(¹ Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
² Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Coupling laser beam with plane wavefront into single-mode fiber (SMF) is a key technology in free-space optical communication. The influences between single-order wavefront aberration and atmospheric turbulences aberration on SMF coupling efficiency are analyzed in the Matlab simulation environment, respectively. The iteration courses of tilts correction using stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm and their effects on coupling efficiency are studied. The simulation results show that SMF coupling efficiency drops with the increment of root-mean-square (RMS) value of single-order wavefront aberration, while the SMF coupling efficiency improves when the tilt aberrations of atmosphere are compensated. And the tilts are the main acting factor to SMF coupling efficiency when D/r_0 is small. A closed-loop control system based on SPGD algorithm is established, where the adaptive fiber coupler (AFC) is employed to correct tilt aberrations of simulated turbulence. After tilt aberrations of simulated turbulence are corrected, the SMF coupling efficiency increases from 30.07% to 61.72% and the mean-squared-error (MSE) drops from 7.28% to 2.16%.

Key words optical communications; fiber coupling; atmospheric turbulence aberration; adaptive fiber coupler; stochastic parallel gradient descent algorithm

OCIS codes 060.4510; 060.1810; 010.1330; 010.1080

1 引言

随着波分复用(WDM)、自适应光学(AO)、高

质量光纤放大器(FA)的发展与使用,基于光纤的激光通信成为世界通信领域的研究热点^[1-3]。单模光

收稿日期: 2013-11-22; 收到修改稿日期: 2014-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(61205069)

作者简介: 罗文(1988—),男,硕士研究生,主要从事自由空间激光通信方面的研究。E-mail: luowen8804@126.com

导师简介: 李新阳(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事自适应光学等方面的研究。E-mail: xyli@ioe.ac.cn

纤(SMF)芯径极小仅为几个微米,且耦合过程受平台振动、瞄准误差、热效应以及大气湍流引入的波前畸变等因素的影响,空间光到 SMF 耦合十分困难。因此,提高 SMF 耦合效率以及系统稳定性,从而实现最优的接收光信噪比(OSNR)是基于光纤的激光通信系统中急需解决的关键技术之一^[4-8]。

20 世纪 90 年代,美国朗讯公司进行了基于光纤耦合的数据传输速率为 2.5 Gb/s 的无线激光通信实验,光纤耦合效率非常低,最高耦合损耗达 25 dB^[9]。2000 年,Song 等^[3]采用掺铒光纤放大器(EDFA)作为前置放大器波分复用系统,进行了通信率为 10 Gb/s 的通信实验,实验测得光纤耦合损耗将近 10 dB。这些激光通信实验都没有考虑机械振动、大气湍流等因素对光纤耦合效率的影响。2002 年,Weyrauch 等^[10]利用变形镜校正光束波前畸变,实现 SMF 耦合效率约为 60%。2006 年,Takenaka 等^[4,11]分析了卫星抖动和大气湍流引入的随机角抖动对空间光到 SMF 耦合的影响,并用高速倾斜镜(FSM)对随机角抖动进行了自适应补偿。但没有分析单项波前像差对光纤耦合的影响。2010 年,马晶等^[2,7,12]仿真分析了随机角抖动和波前局部畸变对 SMF 耦合效率的影响。也没有分析单项波前像差对光纤耦合效率的影响。

本文基于模式匹配原理,利用 Matlab 仿真分析了单项波前像差和大气湍流像差对空间光到 SMF 耦合效率的影响;通过仿真和实验研究了随机并行梯度下降(SPGD)算法校正大气湍流整体倾斜像差的迭代过程及对耦合效率的影响;利用自适应光纤耦合器(AFC)实现了校正弱湍流整体倾斜像差的空间光到 SMF 耦合实验。

2 光纤耦合基本原理

光纤耦合基本原理如图 1 所示,平面波经接收光学系统聚焦后耦合到 SMF 中,光纤端面处于光学系统焦面上,芯径与光斑重合^[4,7,13]。

到达接收光学系统的平面波可表示为

$$E_A(x, y) = P(x, y) \exp[j\varphi(x, y)], \quad (1)$$

式中 $\varphi(x, y)$ 为大气湍流等引入的畸变波前相位, $P(x, y)$ 为孔径函数,表示为

$$P(x, y) = \begin{cases} 1, & \sqrt{x^2 + y^2} \leq D/2 \\ 0, & \text{else} \end{cases}. \quad (2)$$

对平面波作傅里叶变换后得到聚焦光斑振幅分布为

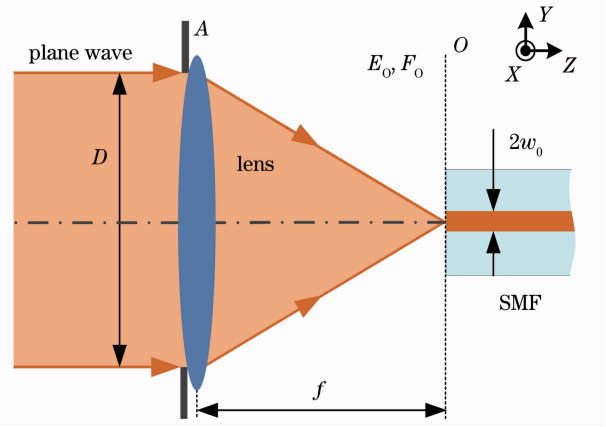


图 1 平面波耦合至 SMF 的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of plane wave coupling into single-mode fiber

$$E_O(x, y) = \frac{1}{\lambda f} \times \iint_{-\infty}^{\infty} P(\xi, \eta) \exp[j\varphi(\xi, \eta)] \cdot \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda f} (x\xi + y\eta)\right] d\xi d\eta, \quad (3)$$

式中 D 和 f 分别为透镜的直径和焦距, λ 为平面光束波长。当 SMF 归一化频率 $1.9 \leq V \leq 2.4$, SMF 中传输光束分布近似为高斯光束,可表示为

$$F_O(x, y) = \sqrt{\frac{2}{\pi w_0^2}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w_0^2}\right), \quad (4)$$

式中 w_0 为 SMF 模场半径。光纤耦合效率为耦合进光纤的功率与接收系统口径内平面光束功率的比值,根据模式匹配原理,光纤耦合效率可表示为^[13]

$$\eta = \frac{\left| \iint E_O(x, y) F_O(x, y) ds \right|^2}{\iint |E_O(x, y)|^2 ds \cdot \iint |F_O(x, y)|^2 ds}. \quad (5)$$

当 $\varphi(x, y) = 0$, 即无波前像差时,光纤耦合效率可简化为

$$\eta = 2 \frac{[1 - \exp(-\beta^2)]^2}{\beta^2}, \quad (6)$$

式中 $\beta = \pi D w_0 / (2\lambda f)$ 为耦合参数。当 $\beta = 1.12$ 时,理论耦合效率达到最大为 $\eta = 0.8145$ 。

当 $\varphi(x, y)$ 为常数,即波前具有整体平移像差时,(3) 式中整体平移相位信息 $\exp[j\varphi(\xi, \eta)]$ 可以提到积分外面并且在(5) 式中约除,此时耦合效率表达式与无波前像差时相同,故在光纤耦合系统中,整体平移像差可忽略不计。

3 仿真分析

3.1 单项波前像差的影响

大气湍流引入的各种波前像差使光纤耦合效率

和稳定性降低,光通信误码率上升。大气光学像差理论中^[14],波前像差常用泽尼克(Zernike)多项式描述为

$$\varphi(r, \theta) = a_0 + \sum_{k=1}^N a_k Z_k(r, \theta), \quad (7)$$

$$\begin{cases} Z_{\text{even},k}(r, \theta) = \sqrt{2(n+1)} R_n^m(r) \cos(m\theta), & m \neq 0 \\ Z_{\text{odd},k}(r, \theta) = \sqrt{2(n+1)} R_n^m(r) \sin(m\theta), & m \neq 0, \\ Z_k(r, \theta) = \sqrt{2(n+1)} R_n^0(r), & m = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [(n+m)/2 - s]! \cdot [(n-m)/2 - s]!} r^{(n-2s)}, \\ m \leq n, n - |m| = C_{\text{even}} \end{cases} \quad (9)$$

式中 m, n 分别是角向频率和径向频率数, $Z_{\text{even},k}(r, \theta)$ 为 Zernike 多项式的偶数项, $Z_{\text{odd},k}(r, \theta)$ 表示 Zernike 多项式的奇数项, $Z_k(r, \theta)$ 表示 $m = 0$ 的项, $n - |m| = C_{\text{even}}$ 表示 $n - |m|$ 的取值为偶数。

Zernike 多项式的每一项称为波前模式, 第一项 ($n = 0$) 为常数项, 表示光束波前的平均相位值, 它不影响光学系统的像质, 在光纤耦合系统中不予考虑, 如上文分析。 $k = 1$ 和 $2(n = 1)$ 对应于倾斜项, 分别反映了光束波前在 x 和 y 方向的整体倾斜像差, 使像斑在像平面上漂移。 $k = 3, 4, 5(n = 2)$ 分别对应于离焦和像散, $k = 6 \sim 9(n = 3)$ 对应于慧差项, $k = 10, 11, 12(n = 4)$ 分别对应于球差和五阶像散, 这些高阶项反映了光束波前的变形, 使所成的像斑扩展、模糊。

用 Matlab 仿真分析 Zernike 多项式前 12 阶像差对耦合效率的影响。设光学系统接收口径与焦距的比值为 $D/f = 1/5$, 光纤模场半径 $\omega_0 = 5 \mu\text{m}$, 波长 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$, 耦合效率与单项像差波前均方根 (RMS) 的关系如图 2 所示, 随着单项像差波前 RMS 的增大, SMF 耦合效率逐渐降低, 且降低趋势基本相同。当单项像差波前 RMS 为零时, SMF 耦合效率为 80.2%, 当 RMS 为 2 rad 时, SMF 耦合效率都降低到 20% 以下。

3.2 大气湍流的影响

3.2.1 湍流中 Zernike 系数方差

根据 Kolmogorov 湍流理论, 大气相干长度 r_0 与折射率结构常数的空间分布之间的关系为^[14]

$$r_0 = \left[0.423 k_0^2 \int_0^L C_n^2(z) dz \right]^{-3/5}, \quad (10)$$

式中 $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长, $C_n^2(z)$ 为大气折射

式中 r 为极轴, θ 为极角, a_0 为常数值, a_k 为 Zernike 多项式系数, $Z_k(r, \theta)$ 为第 k 项 Zernike 多项式。每阶 Zernike 多项式的二维极坐标形式 $Z_k(r, \theta)$ 定义为

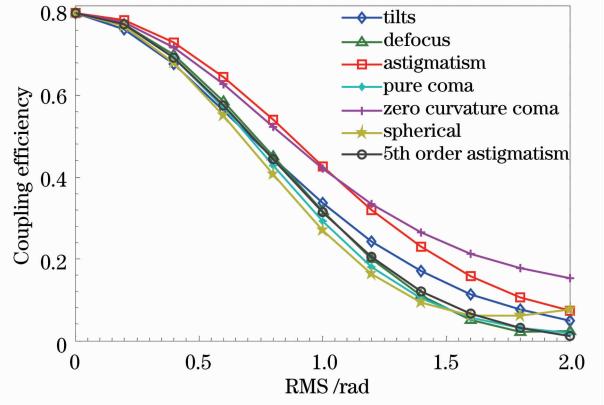


图 2 SMF 耦合效率随前 12 阶单项波前像差 RMS 的变化曲线

Fig. 2 Coupling efficiency as the function of the 12-order wavefront RMS

率结构常数。

用 Zernike 模式描述大气湍流相位扰动时, 其模式间的统计相关性与大气湍流特性有关。研究结果显示 Zernike 模式系数方差为^[14]

$$\langle a_j^2 \rangle = \frac{2.246(n+1)\Gamma(n-5/6)}{[\Gamma(17/6)]^2 \Gamma(n+23/6)} \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3}. \quad (11)$$

(11) 式表明 Zernike 系数方差与 $(D/r_0)^{5/3}$ 成正比, 即 D/r_0 越大, Zernike 系数方差越大, 大气湍流引入的光束波前像差越大, 湍流像差对耦合效率的影响越大。而且各模式系数方差之间的比例一定, 不考虑波前整体平移, 整体倾斜误差占全部波前畸变误差的 87% 左右, 而离焦和像散占 7.9% 左右。

设接收光学系统口径 $D = 100 \text{ mm}$, 焦距 $f = 500 \text{ mm}$, 波长 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$, 折射率结构常数 $C_n^2(z) = 3 \times 10^{-16}$, 传输距离 $L = 10 \text{ km}$, 大气相干长度 $r_0 = 101 \text{ mm}$, 前 35 阶 Zernike 系数方差和残余方差的统计分布如图 3 所示, 其中残余方差为后项 Zernike 系数方

差之和。此时,大气湍流引入的波前畸变 Zernike 系数方差约为 1.00 rad^2 ,波前 RMS 约为 1.00 rad ;倾斜像差被校正后,残余方差约为 0.23 rad^2 ,波前 RMS 约为 0.36 rad 。

3.2.2 大气湍流仿真

假设光束沿水平大气传输,传输距离为 10 km ,大气折射率结构常数依次为 $0, 10^{-16}, 5 \times 10^{-16}, 10^{-15}, 5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$,分别对应大气相干长度 r_0 为 $\infty, 196, 75, 49, 28 \text{ mm}$,利用前 35 阶 Zernike 多项式模拟大气湍流像差,研究 SMF 耦合效率与接收光学系统口径 D 和大气相干长度 r_0 的关系,其中激光束波长 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$,光纤模场直径为 $10 \mu\text{m}$,接收光学系统相对孔径为 $D/f = 1.5$,仿真结果如图 4 所示。当不校正像差时,SMF 耦合效率随接收口径 D 增大而降低,大气相干长度 r_0 越大(大气湍流越弱),耦合效率降低速度越慢;校正整体倾斜像差后(在湍流中直接去除倾斜项),耦合效率都有明显提

高。当 D 较小或者 r_0 较大(D/r_0 较小)时,影响 SMF 耦合效率的主要像差为整体倾斜像差,只校正整体倾斜像差即可获得较高较稳定的 SMF 耦合效率。

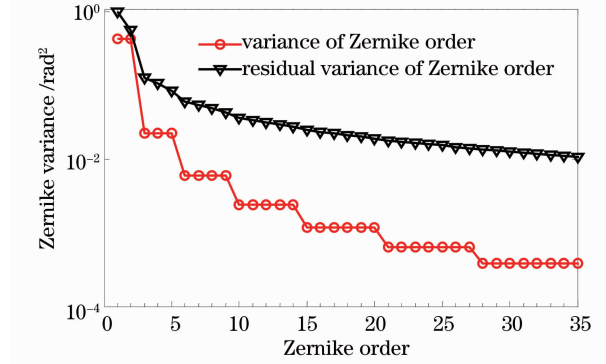
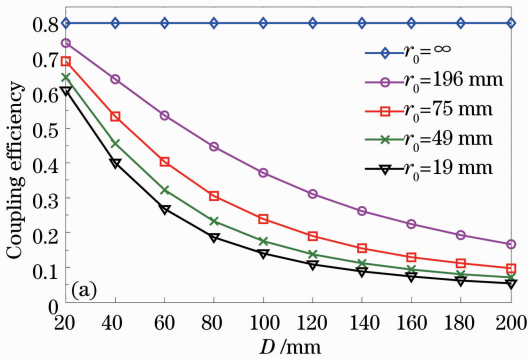


图 3 Kolmogorov 湍流中各阶及剩余 Zernike 系数方差统计分布

Fig. 3 Statistics distributions of Zernike coefficients and residual Zernike coefficient variances of Kolmogorov turbulence

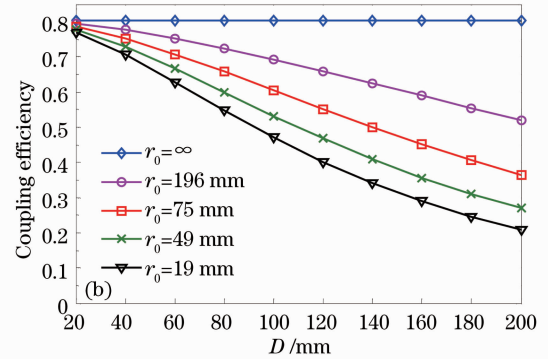


图 4 不同 r_0 时耦合效率与透镜口径 D 的关系。(a) 不校正像差; (b) 校正倾斜像差

Fig. 4 Coupling efficiency as the function of D with different r_0 . (a) With turbulence; (b) tip/tilt correction

设接收光学系统口径 $D = 100 \text{ mm}$,经 20 次仿真取平均获得 SMF 平均耦合效率与 D/r_0 的关系如图 5 所示。无湍流影响时 SMF 平均耦合效率为 80.2% ,存在大气湍流扰动时 SMF 平均耦合效率随 D/r_0 增大而降低,校正整体倾斜像差后平均耦合效率得到改善,但随着 D/r_0 增大,改善效果明显变差。图 6 和图 7 分别是 $D/r_0 = 1$ 和 $D/r_0 = 4$ 时,进入接收光学系统的光波波前分布和 SMF 端面的光强分布,图 6(a)、(d)和图 7(a)、(d)是无湍流影响时波前相位分布和光纤端面光强分布,光纤端面光强分布为艾里斑;图 6(b)、(e)和图 7(b)、(e)是存在大气湍流扰动时波前相位分布和光纤端面光强分布,波前相位以倾斜像差为主,光纤端面光强分布表现为漂移和扩展,峰值能量降低;图 6(c)、(f)和图 7(c)、(f)是存在大气湍流扰动且校正整体倾斜像

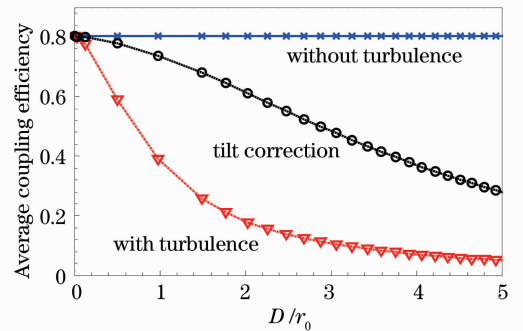


图 5 平均耦合效率与 D/r_0 的关系曲线

Fig. 5 Coupling efficiency as a function of D/r_0

差时波前相位分布和光纤端面光强分布,波前相位没有整体倾斜,光纤端面光强分布仅表现为光束扩展,峰值能量降低;而且 $D/r_0 = 4$ 比 $D/r_0 = 1$ 时光束波前峰谷(PV)值和 RMS 都更大,远场光斑光束

质量更差。对应图 5 可知,当 $D/r_0=1$ 时,校正整体倾斜像差使 SMF 耦合效率从 39% 提升到了 74%; 当 $D/r_0=4$ 时,校正整体倾斜像差仅仅使 SMF 耦合效率从 7% 提升到了 37%; 所以当 D/r_0 较小时,影响 SMF 耦合效率的主要因素为整体倾斜像差,

只校正光束整体倾斜像差即可获得高效高稳定 SMF 耦合效率。当 D/r_0 较大时,校正整体倾斜像差并不能获得理想的 SMF 耦合效率,要得到高效率高稳定 SMF 耦合效率,还需要校正其他像差。

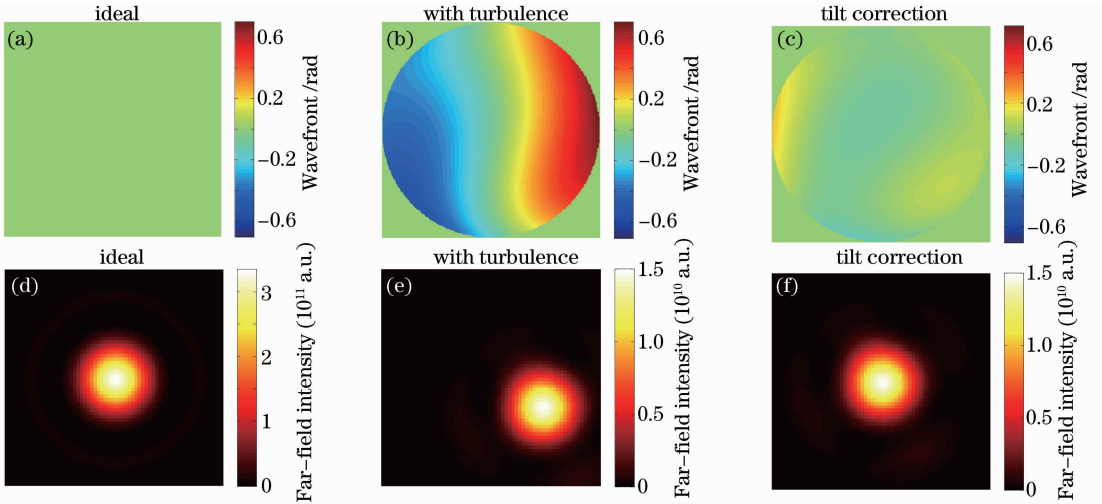


图 6 $D/r_0=1$ 时,进入接收光学系统的光波波前分布和 SMF 端面的光强分布。

(a)~(c)波前相位分布图; (d)~(f)远场光斑分布图

Fig. 6 Wavefront distributions and intensity distributions on SMF's tip of incoming beam when $D/r_0=1$.

(a)~(c) Wavefront distributions; (d)~(f) intensity distributions

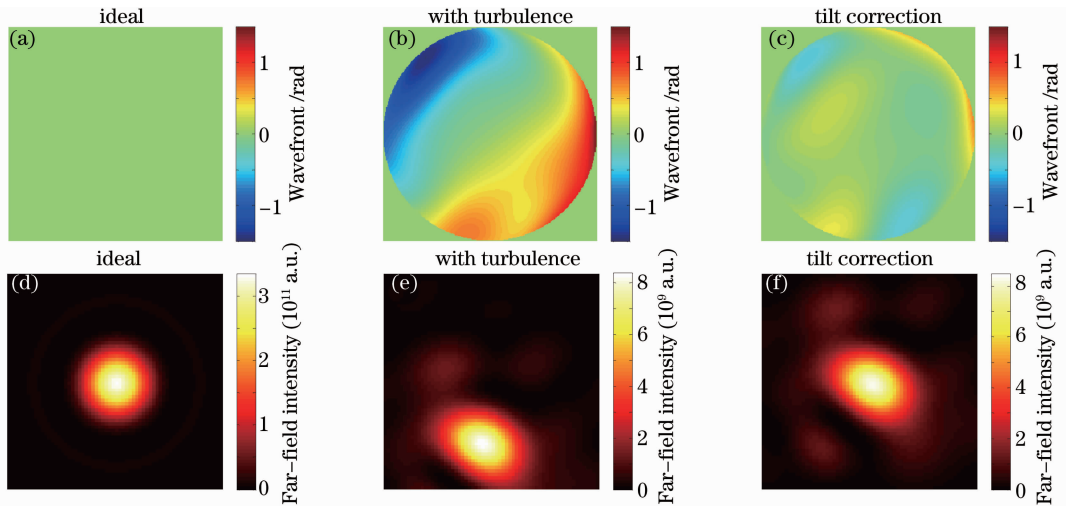


图 7 $D/r_0=4$ 时,进入接收光学系统的光波波前分布和 SMF 端面的光强分布。

(a)~(c)波前相位分布图; (d)~(f)远场光斑分布图

Fig. 7 Wavefront distributions and intensity distributions on SMF's tip of incoming beam when $D/r_0=4$.

(a)~(c) Wavefront distributions; (d)~(f) intensity distributions

仿真研究了 SPGD 算法^[15-18]校正大气湍流中整体倾斜像差的迭代过程,如图 8 所示,图中曲线为 20 次仿真实验的平均。对应于图 6($D/r_0=1$),约 30 次 SPGD 迭代实现收敛,闭环且收敛后 SMF 平均耦合效率提升至 72%,约等于直接去掉倾斜时的耦合效

率 74%。对应于图 7($D/r_0=4$),约 80 次迭代实现收敛,闭环且收敛后平均耦合效率提升至 38%,约等于直接去掉倾斜时的耦合效率 37%。仿真结果表明利用 SPGD 算法校正大气湍流引入的倾斜像差与直接去掉倾斜项对耦合效率的改善效果相当。

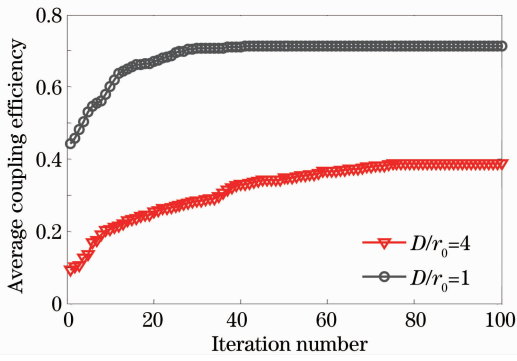


图 8 SPGD 算法校正倾斜像差迭代曲线

Fig. 8 Iteration curves using SPGD algorithm to correct tilt aberration

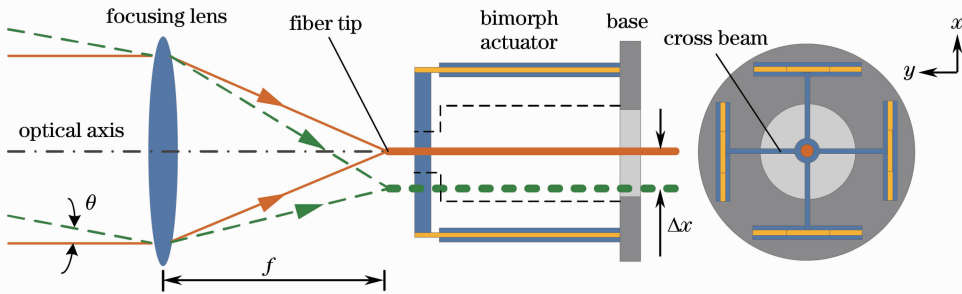


图 9 自适应光纤耦合器的结构原理图

Fig. 9 Schematic of the adaptive fiber coupler's configuration

图 10 是基于 AFC 的单模光纤耦合实验方案, 波长为 1064 nm 的平面光束经 AFC 过模拟湍流后波前发生畸变, 畸变光束经 AFC 耦合透镜聚焦到 SMF 纤芯, 实现 SMF 耦合。SMF 模场半径 $w_0 = 5 \mu\text{m}$, AFC 的接收口径 $D = 18 \text{ mm}$, 焦距 $f = 120 \text{ mm}$, 计算得到耦合参数 $\beta = 1.11$, 理论耦合效率为 81.44%。光电探测器 (PD) 位于 SMF 末端, 用于探测耦合进 SMF 的光能量, 并将探测到的能量输送到控制器, 控制器产生控制信号, 控制信号经过 100 倍高压放大器 (HVA) 放大后被施加到 AFC 上, 实现倾斜校正闭环控制。控制算法为 SPGD 算法^[6,16-17], 性能指标为光电探测器探测到的光能量 J , 闭环迭代速率为

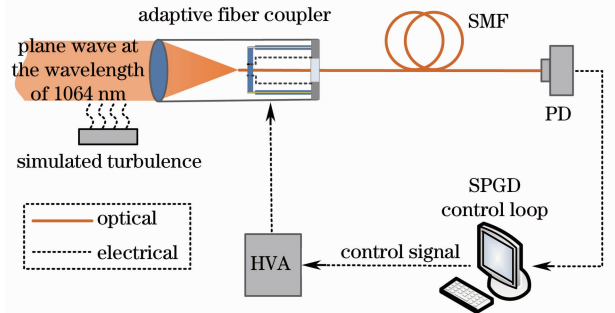


图 10 基于自适应光纤耦合器的 SMF 耦合示意图

Fig. 10 Experimental setup of SMF coupling using AFC

4 实验研究

实验研究了校正大气湍流整体倾斜像差对 SMF 耦合效率及稳定性的改善。所采用的倾斜校正器件是 AFC, 可同时实现光纤耦合和倾斜像差的自适应校正, 其结构原理如图 9 所示^[19-20]。AFC 由一个聚焦透镜和一个光纤端面位移器组成, 光纤端面位移器包括一个带小孔的柔性十字梁和四个双压电驱动器, 光纤端面置于柔性十字梁的小孔中且位于聚焦透镜的焦平面上, 四个双压电驱动器呈正方形排布, 两个相对的双压电驱动器驱动光纤端面在 x 方向移动, 另两个双压电片驱动光纤端面在 y 方向移动, 实现对波前整体倾斜像差的校正。

625 Hz。

实验测得瞬时最大 SMF 耦合效率可达到 67%, 稍低于理论值 81.44%, 这主要是由于光纤端面的反射和实际光束质量的影响。加入模拟湍流, 开环与闭环各进行 10000 次 SPGD 迭代得到单模光纤耦合效率迭代曲线, 如图 11 所示。平均耦合效率从开环时的 30.07% 提升至闭环时的 61.72%, 而耦合效率的均方差 (MSE) 从 7.28% 降低到 2.16%。实验结果表明, 校正湍流整体倾斜像差后, SMF 耦

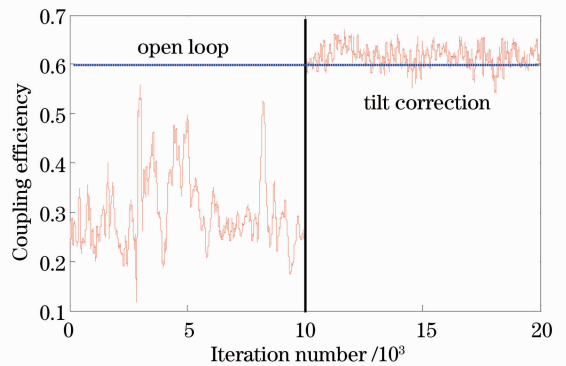


图 11 模拟湍流下, 开闭环时光纤耦合效率的变化曲线

Fig. 11 Control test results of SMF coupling under simulated turbulence

合效率及其稳定性都得到了提升。

5 结 论

空间激光到 SMF 耦合是自由空间光通信中的关键技术。大气湍流引入的波前畸变极大地降低了空间光到 SMF 的耦合效率及稳定性。仿真分析表明空间激光到 SMF 耦合效率随单阶 Zernike 像差波前 RMS 的增大而降低,且降低趋势相同;当大气相干长度 r_0 一定时,SMF 耦合效率随接收口径 D 增大而降低, r_0 越大(大气湍流越弱)SMF 耦合效率降低速度越缓慢,校正倾斜像差能使 SMF 耦合效率得到明显改善;当 D/r_0 较小时,大气湍流中影响 SMF 耦合效率的主要因素为整体倾斜像差,只需校正倾斜像差即可获得高效高稳定的 SMF 耦合效率,当 D/r_0 较大时,还需校正其他高阶像差才能获得高效高稳定的 SMF 耦合效率。在实验室内,完成了弱湍流 SMF 耦合实验,校正模拟湍流的倾斜像差使耦合效率从 30.07% 提升到了 61.72%,接近实验最大耦合效率 67%,耦合效率的 MSE 从 7.28% 降低到 2.16%,验证了仿真分析的正确性。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 J Ma, Y Jiang, L Tan, *et al.*. Influence of beam wander on bit-error rate in a ground-to-satellite laser uplink communication system [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(22): 2611–2613.
- 3 D Song, Y Hurb, J Cho, *et al.*. 4×10 Gb/s terrestrial optical free space transmission over 1.2 km using an EDFA preamplifier with 100 GHz channel spacing [J]. *Opt Express*, 2000, 7(8): 280–284.
- 4 H Takenaka, M Toyoshima, Y Takayama. Experimental verification of fiber-coupling efficiency for satellite-to-ground atmospheric laser downlinks [J]. *Opt Express*, 2012, 20(14): 15301–15308.
- 5 C Chen, H Yang, H Wang, *et al.*. Coupling plane wave received by an annular aperture into a single-mode fiber in the presence of atmospheric turbulence [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(3): 307–312.
- 6 Han Liqiang, Wang Qi, Shida Katsunori, *et al.*. Improve fiber coupling efficiency of free space optical communication using blind optimization wavefront correction [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(9): 1999–2002.
韩立强, 王 祈, Shida Katsunori, 等. 盲优化波前校正提高自有空间光通信光纤耦合效率[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(9): 1999–2002.
- 7 J Ma, F Zhao, L Tan, *et al.*. Plane wave coupling into single-mode fiber in the presence of random angular jitter [J]. *Appl*

- Opt*, 2009, 48(27): 5184–5189.
- 8 Xiang Jinsong, 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.
向劲松, 陈 彦, 胡 渝. 大气湍流对空间光耦合至 SMF 的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(3): 377–380.
- 9 P Szajowski, G Nykolak, J Auburn, *et al.*. 2.4 km free-space optical communication 1550 nm transmission link operating 2.5 Gb/s experimental results [C]. *SPIE*, 1998, 3532: 29–40.
- 10 T Weyrauch, M Vorontsov, J Gowens, *et al.*. Fiber coupling with adaptive optics for free-space optical communication [C]. *SPIE*, 2002, 4489: 177–184.
- 11 M Toyoshima. Maximum fiber coupling efficiency and optimum beam size in the presence of random angular jitter for free-space laser systems and their applications [J]. *J Opt Soc Am A*, 2006, 23(9): 2246–2250.
- 12 J Ma, F Zhao, L Tan, *et al.*. Degradation of single-mode fiber coupling efficiency due to localized wavefront aberrations in free-space laser communications [J]. *Opt Eng*, 2010, 49(4): 045004.
- 13 Luo Wen, Geng Chao, Wu Yanyun, *et al.*. Experimental demonstration of single-mode fiber coupling using adaptive fiber coupler [J]. *Chin Phys B*, 2014, 23(1): 014207.
- 14 Zhou Renzhong, Yan Jixiang, Zhao Dazun, *et al.*. *Adaptive Optics* [M]. Beijing: Publishing House of Defense Industry, 1996. 18–55.
周仁忠, 阎吉祥, 赵达尊, 等. *自适应光学* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1996. 18–55.
- 15 Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Simulation and analysis of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(8): 1355–1360.
杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法仿真与分析[J]. *光学学报*, 2007, 27(8): 1355–1360.
- 16 Yang Huizhen, Chen Bo, Li Xinyang, *et al.*. Experimental demonstration of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(2): 205–210.
杨慧珍, 陈 波, 李新阳, 等. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法实验研究[J]. *光学学报*, 2008, 28(2): 205–210.
- 17 Zheng Yi, Shen Feng. Research on phase-locking technique for 2-channels fiber laser coherent beam combination based on stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(3): 631–635.
郑 轶, 沈 锋. 基于随机并行梯度下降算法的两路光纤激光相干合成锁相控制技术的研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(3): 631–635.
- 18 Wang Xiaolin, Zhou Pu, Ma Yanxing, *et al.*. Phase control of coherent fiber laser array using stochastic parallel gradient descent algorithm and its application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 2874–2878.
王小林, 周 朴, 马闯星, 等. SPGD 算法在光纤激光相干阵列光束控制中的应用[J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 2874–2878.
- 19 Geng Chao, Tan Yi, Mu Jinbo, *et al.*. Experimental research of tip/tilt control of a multi-channel fiber-laser array [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(2): 024206.
耿 超, 谭 毅, 牟进博, 等. 多单元光纤激光阵列的倾斜控制实验研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(2): 024206.
- 20 C Geng, W Luo, Y Tan, *et al.*. Experimental demonstration of using divergence cost-function in SPGD algorithm for coherent beam combining with tip/tilt control [J]. *Opt Express*, 2013, 21(21): 25045–25055.