

逆向传输标定法校正自适应光学非共光路像差

杨尚君¹, 梁静远¹, 吴加丽¹, 柯熙政^{1,2*}¹西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;²陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 陕西 西安 710048

摘要 自适应光学系统可以抑制大气湍流所产生的波前畸变,波前探测支路和光纤耦合支路之间存在的非共光路像差会导致自适应光学系统闭环后其耦合功率未能有效提升。采用逆向传输标定法由耦合光纤端到波前传感器进行反向传输,将波前传感器采集相对应的波前信息折算到自适应光学系统并实现闭环控制。结果表明:采用逆向传输标定法,数值仿真的耦合效率由 27.31% 提升至 68.14%;静态环境实验的耦合效率由 9.04% 提升至 45.21%;湍流环境实验的耦合效率由 19.72% 提升至 36.93%;复杂环境实验的耦合效率由 3.87% 提升至 7.52%。该方案简单而切实可行,易于在工程上推广应用。

关键词 光纤光学与光通信;无线光相干通信;自适应光学;光纤耦合;非共光路像差

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221573

1 引言

无线光相干通信采用光混频器完成信号光与本振光的混频并采用平衡探测器完成光电转化^[1-3]。光纤式混频器相对于空间晶体式混频器,其集成度高、结构精简,已广泛应用于无线光相干通信系统^[4]。因此需高效地将空间光耦合进光纤^[5],其光束对准位置^[6]、光束模式、大气湍流环境^[7-8]、波前测量精度、闭环修正带宽等均会影响耦合效率^[9]。其中 1550 nm 波段空间光单模光纤的耦合效率受径向对准偏差的影响最为严重^[10]。采用光纤自动对准方式,如改变光纤的径向位移^[11]、轴向位移^[12],以及采用优化算法实现空间光与光纤端面的自动对准,均可提高光纤耦合效率。此外,采用自适应光学技术,使用液晶空间光调制器、变形镜作为波前校正器件用于无波前传感和有波前传感校正^[13-14],以此改善光束质量^[15]和增加空间光相干长度,也可提高耦合效率^[16]。

自适应光学系统中的波前传感支路与耦合支路之间的静态相位差值称为非共光路像差,非共光路像差仅与透镜材质均匀性、透镜安装位置有关,一旦光路确定其差值为一个定值^[17]。非共光路像差的存在使得位于通信支路的波前畸变未能得到有效修正^[18]。针对自适应光学系统中存在的非共光路像差,一种方法是采用以随机并行梯度下降法为代表的优化算法,通过反

迭代运算,获得最优评判指标(如耦合效率或斯特列尔比)下的波前信息^[19]。然而该方法易受外界环境影响,从而导致陷入局部最优使得计算存在误差^[20]。另一种方法是采用相位差法^[21],通过采集焦面和离焦面的图像光强信息来估算波前相位畸变^[22-23],将检测到的非共光路像差转化为初始化变形镜面型进行校正^[24]。然而相位差法仅适用于成像领域的自适应光学系统,而对于通信领域涉及光纤耦合的自适应光学系统并不适用。

本文针对无线光相干通信中的自适应光学系统,提出采用逆向传输标定法测量非共光路像差,用于自适应光学系统的初始化校准。通过数值仿真和实验验证,将非共光路像差折算到自适应光学的控制系统中,闭环后的耦合效率得到显著提升,且该方法有助于光路的辅助对准调整。

2 自适应光学光纤耦合控制系统

无线光相干通信中自适应光学波前畸变校正系统如图 1 所示。1550 nm 光纤激光器经准直器准直后的光束,由透镜 1 和透镜 2 组成的 4f 系统作为光学发射天线完成扩束。经大气湍流传输后,光束由变形镜全反射,其入射变形镜光线与出射变形镜光线的夹角 θ 为 20° 。分光镜将变形镜反射后的光束分为功率比为 1:1 的两束准直光,透射一路光束经透镜 3 和透镜 4 组

收稿日期: 2022-08-08; 修回日期: 2022-10-18; 录用日期: 2022-11-25; 网络首发日期: 2022-12-13

基金项目: 陕西省科研项目(18JK0341)、陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)、西安市科技计划项目(2020KJRC0083)

通信作者: *xzke@263.net

成的 $4f$ 系统, 作用于波前传感器用于监视当前的畸变波前。反射一路光束经耦合透镜(透镜 5)会聚后将光束直接耦合进单模光纤, 通过光功率计测量单模光纤实时耦合光功率值, 用于后端的光混频及相干探测通信。由变形镜、透镜 3、透镜 4、波前传感器和计算机组成自适应光学系统, 由分光镜、透镜 5、单模光纤和光功率计和计算机组成光纤耦合系统, 通过自适应光学系统的波前闭环控制实现光纤耦合功率控制。

2.1 非共光路像差与逆向传输标定法

假设光束传输的方向如图 1 所示, 大气湍流所引入的相位为 $\varphi_{\text{turbulence}}$, 极坐标下可采用 Zernike 多项式进行描述:

$$\varphi_{\text{turbulence}}(r, \theta) = \sum_{i=1}^{30} a_i \cdot z_i(r, \theta), \quad (1)$$

式中: a_i 为 Zernike 系数; z_i 为 Zernike 级数。Noll^[25] 给出了 Zernike 系数 a_i 和 a_i' 之间的协方差 $E(a_i, a_i')$ 和大气相

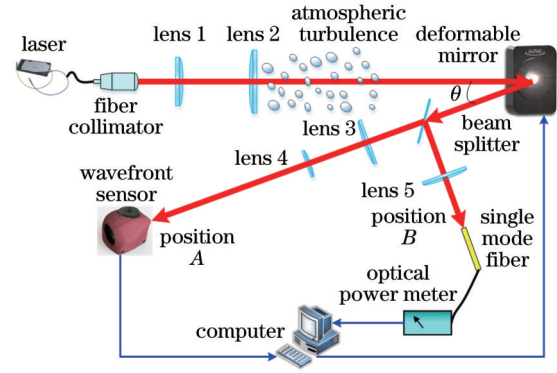


图 1 自适应光学光纤耦合系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of adaptive optical fiber coupling system

干长度 r_0 的关系:

$$E(a_i, a_i') = \frac{2.2698(-1)^{(n+n'-2m)/2} \sqrt{(n+1)(n'+1)} \cdot \delta_z \cdot \Gamma\left[n+n'-\frac{5}{3}\right] \cdot (D/r_0)^{5/3}}{\Gamma\left[n-n'+\frac{17}{3}\right] \cdot \Gamma\left[n'-n+\frac{17}{3}\right] \cdot \Gamma\left[n+n'+\frac{23}{3}\right]}, \quad (2)$$

式中: n, n' 分别为系数 a_i, a_i' 的径向级次; m 为系数 a_i 的角向级次; δ_z 为 Kronecker 函数; D 为接收天线的通光孔径, Γ 为 gamma 函数。设透镜 3、透镜 4、透镜 5 自身所存在的像差分别为 $\varphi_3, \varphi_4, \varphi_5$, 分光镜透射像差和反射所产生的像差分别为 φ_T 和 φ_R , 波前传感器支路采集的相位信息 φ_{mea} 可表示为

$$\varphi_{\text{mea}} = \varphi_{\text{IWF}} + \varphi_{\text{turbulence}} + v \cdot I_{\text{cmd2phase}} + \varphi_{\text{DM-error}} + \varphi_T + \varphi_3 + \varphi_4, \quad (3)$$

式中: φ_{IWF} 为激光器经准直后的出射波前相位; v 为变形镜施加的电压信号; $I_{\text{cmd2phase}}$ 为变形镜的面型影响函数; $\varphi_{\text{DM-error}}$ 为变形镜平面拟合误差, 可采用高斯函数进行拟合:

$$\varphi_{\text{DM-error}}(x, y) = \exp\left\{\ln(\omega) \left[\frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}}{d}\right]^\alpha\right\}, \quad (4)$$

$i = 1, 2, \dots, n,$

式中: α 为高斯指数; d 为各个驱动器之间的距离; (x_i, y_i) 为第 i 个驱动器的坐标值; n 为驱动器总数; ω 代表交连值。此时通信支路耦合透镜焦平面(即耦合光纤端面)所产生的波前像差 φ_{focal} 可表示为

$$\varphi_{\text{focal}} = \varphi_{\text{IWF}} + \varphi_{\text{turbulence}} + v \cdot I_{\text{cmd2phase}} + \varphi_{\text{DM-error}} + \varphi_R + \varphi_5. \quad (5)$$

式(3)与式(5)的差值即 $(\varphi_T + \varphi_3 + \varphi_4) - (\varphi_R + \varphi_5)$ 称为非共光路像差。

针对非共光路像差的测量和校正, 传统的方法是采用以随机并行梯度下降算法为代表的优化算法。将图 1 中变形镜、光功率计和计算机组成的回路作为无波前传感系统, 进行迭代计算^[26]:

$$v(k+1) = v(k) + \gamma \cdot \Delta v(k) \cdot \Delta P(k), \quad (6)$$

式中: $v(k)$ 为第 k 次迭代施加在变形镜的电压; ΔP 为第 k 次系统目标函数值(耦合光功率)的变化量; γ 为扰动幅度; $\Delta v(k)$ 表示第 k 次施加在变形镜各驱动器上相互独立且同为伯努利分布的随机扰动控制量。当耦合光功率达到收敛稳定时, 设该时刻波前传感器采集的波前相位为 $\varphi_{\text{mea-s}}$ 。

逆向传输是指采用一束相同的光束由接收端发送至发送端。假设将一束与发射光源相同的激光接入耦合光纤, 如图 2 所示, 并将变形镜的位置逆时针旋转 10° , 同时清除该状态下变形镜指令, 使变形镜处于完全平面反射状态。经耦合光纤输出的光经分光镜反射后, 由变形镜反射直接进入波前传感器, 从而测量当前时刻的波前信息。

逆向传输状态下, 由光纤耦合端口输出的波前相位记为 $\varphi_{\text{fiber-1}}$, 依据光路可逆原理, 光场携带相位信息 $\varphi_{\text{fiber-1}}$ 能够产生最高的耦合效率, 光束先经透镜 5, 后经分光镜反射, 再经变形镜反射, 以及分光镜、透镜 3 和透镜 4 的透射, 此时波前传感器所采集到的波前相位可表示为

$$\varphi_{\text{mea-1}} = \varphi_{\text{fiber-1}} - \varphi_5 - \varphi_R + \varphi_{\text{DM-error}} + \varphi_T + \varphi_3 + \varphi_4. \quad (7)$$

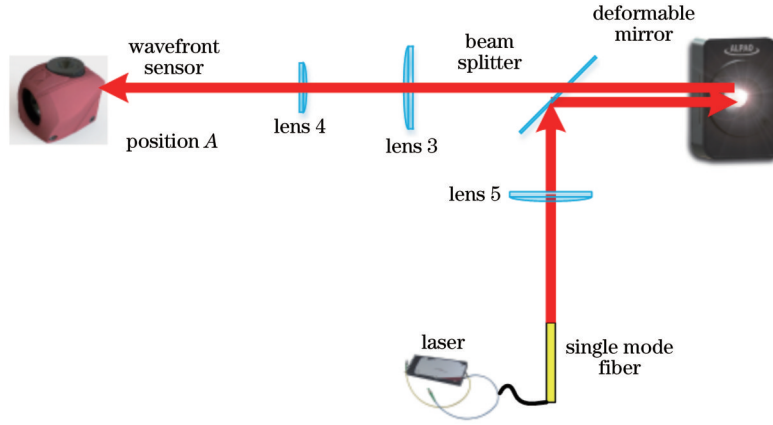


图 2 采用逆向传输标定法测量非共光路像差

Fig. 2 Measurement of non-common optical path aberration by reverse transmission calibration algorithm

此时 $\varphi_{\text{mea}-1}$ 既包含可使得耦合效率最大化的波前相位 $\varphi_{\text{fiber-1}}$, 同时也包含了非共光路像差相位 $(\varphi_{\text{T}} + \varphi_{\text{3}} + \varphi_{\text{4}}) - (\varphi_{\text{R}} + \varphi_{\text{5}})$ 。

2.2 自适应光学系统

针对图 1 中有波前传感的自适应光学闭环控制框图如图 3 所示。第 k 次闭环迭代可表示为

$$v(k+1) = v(k) + k_i \cdot [\varphi_{\text{tar}} - \varphi_{\text{mea}}(k)] \cdot C_{\text{phase2cmd}} \quad (8)$$

式中: φ_{tar} 为控制目标的波前相位; φ_{mea} 为波前传感器采集的相位; $C_{\text{phase2cmd}}$ 为由波前相位到变形镜电压转化的命令矩阵; k_i 表示积分增益, 考虑到实时控制系统的算法复杂度和计算速度, 由单独的积分运算即可实现波前控制。

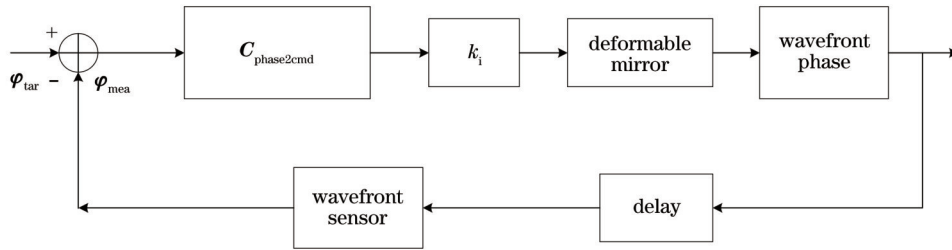


图 3 自适应光学闭环控制框图

Fig. 3 Block diagram of adaptive optical closed-loop control

依据模场匹配原理, 以及菲涅耳衍射公式, 光纤耦合效率离散化表达式^[27]为

$$\eta = \frac{\left| \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} \frac{W_m}{M} \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot U_i(u, v) \cdot U_i^*(u, v) \cdot \frac{u}{M} W_m \right|^2}{\left[\sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} \frac{W_m}{M} \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot U_i(u, v) \cdot U_i^*(u, v) \cdot \frac{u}{M} W_m \right] \cdot \left[\sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} \frac{W_m}{M} \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot U_i(u, v) \cdot U_i^*(u, v) \cdot \frac{u}{M} W_m \right]}, \quad (9)$$

式中: M 和 N 分别为径向坐标和角向坐标离散化点数; W_m 为单模光纤的模场半径; U_i 为单模光纤的模场分布^[27],

$$U_i(u, v) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{W_m} \cdot \exp\left[-\left(\frac{u}{M}\right)^2\right]; \quad (10)$$

U_i 为位于透镜 5 焦平面 (即耦合光纤端面) 的光场分布^[27], 可表示为

$$U_i(u, v) = \frac{\exp(i\kappa f)}{i\kappa f} \cdot \exp\left[\frac{i\kappa \left(\frac{u}{M} W_m\right)^2}{2f}\right] \cdot \left(\frac{D_a}{2}\right)^2 \cdot \psi(u, v), \quad (11)$$

式中: f 为透镜 5 的焦距; D_a 为透镜 5 的直径; $\kappa = 2\pi/\lambda$ 为波数; $\psi(u, v)$ 为 φ_{focal} 的离散二维傅里叶变换^[27],

$$\begin{cases} \psi(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \varphi_{\text{focal}}(x, y) \cdot \frac{2}{MN} \cdot \frac{x}{M} \cdot \exp\left[-2\pi i \left(\frac{x}{M} W_m\right) \cdot \left(\frac{u}{M} \frac{D_a}{2\lambda f}\right) \cdot \cos\left(\frac{y}{N} 2\pi - \frac{v}{N} 2\pi\right)\right] \\ u = 0, 1, \dots, M-1 \\ v = 0, 1, \dots, N-1 \end{cases} \quad (12)$$

2.3 仿真分析

依据式(1)~(12)进行数值仿真,积分系数 $k_i=0.3$, $\varphi_{\text{IWF}}=0$, M 和 N 均为50, $W_m=5.25\ \mu\text{m}$, $D_n=25.4\ \text{mm}$, $\lambda=1550\ \text{nm}$, $C_{\text{phase2cmd}}$ 和 $I_{\text{cmd2phase}}$ 采用Alpao公司所提供的面型矩阵,变形镜的高斯指数 $\alpha=2$,交联值 $\omega=0.08$ 且服从方差为 10^{-4} 的正态分布,驱动器间距 $d=1.5\ \text{mm}$,透镜3、透镜4、透镜5均为平凸透镜,焦距分别为175、75、125 mm,根据几何像差和波像差之间

的积分换算关系,计算出光束通过光学器件后的波相差分别为 φ_3 、 φ_4 、 φ_5 ,分光镜的透射和反射波像差分别记为 φ_T 和 φ_R , $\varphi_{\text{turbulence}}$ 采用Karhunen-Loeve函数 $D/r_0=1$ 计算Zernike系数化为的相位。当 $\varphi_{\text{tar}}=0$,即将波前传感器采集到的波前相位控制为平面波时,依据式(8),可得到未校正和闭环状态下的波前峰谷值和均方根值以及耦合效率。

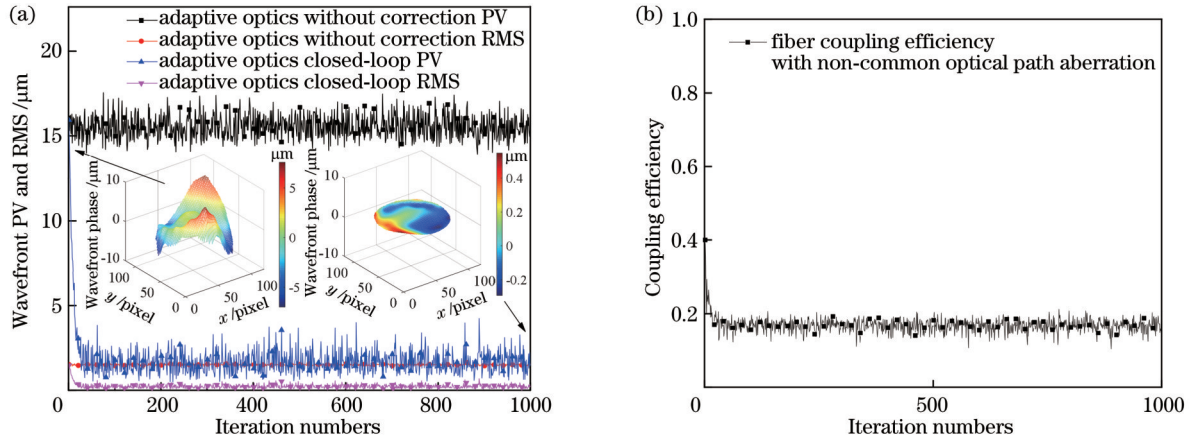


图4 含有非共光路像差的自适应光学系统。(a)未校正和闭环的波前峰谷值和均方根值;(b)闭环耦合效率

Fig. 4 Adaptive optical system with non-common optical path aberrations. (a) Peak-to-valley (PV) value and root mean square (RMS) value of uncorrected and closed-loop wavefronts; (b) closed-loop coupling efficiency

在含有非共光路像差时,经过1000帧闭环控制的迭代,波前峰谷值由未校正的 $15.59\ \mu\text{m}$ 降至闭环的 $1.78\ \mu\text{m}$,波前均方根值由未校正的 $1.51\ \mu\text{m}$ 降至闭环的 $0.24\ \mu\text{m}$,图4(a)中的附图依据箭头的指向分别代表了初始状态下波前传感器采集的波前相位以及经1000帧闭环控制后的波前相位,闭环后的波前平整度要明显优于未校正状态。而图4(b)中的耦合效率由初始的36.52%降至17.79%。这是因为式(3)中 $\varphi_T + \varphi_3 + \varphi_4$ 与式(5)中 $\varphi_R + \varphi_5$ 并不相等,图1中A处的波前通过自适应光学系统修正为平面波,B处的波前修正仅为一静态波前,并不能使耦合光功率得到提升。

分别令 $\varphi_{\text{tar}} = \varphi_{\text{mea-S}}$ 、 $\varphi_{\text{tar}} = \varphi_{\text{mea-I}}$,即分别采用随机并行梯度下降算法和逆向传输标定法测量并校正非共光路像差,取扰动幅度 $\gamma=0.6$, Δv 的伯努利分布随机扰动控制量为0.01,波前重构环节均以 φ_{tar} 进行折算,得到未校正和闭环状态下的波前峰谷值和均方根值以及耦合效率如图5所示。

采用随机并行梯度下降算法进行非共光路像差的测量和校正,闭环后波前峰谷值由 $15.55\ \mu\text{m}$ 降至 $1.75\ \mu\text{m}$,波前均方根值由 $1.51\ \mu\text{m}$ 降至 $0.24\ \mu\text{m}$,耦合效率由36.79%提升至47.41%,这是因为随机并行梯度下降算法计算过程中受图1所示的湍流影响,易陷入局部极值,导致停止迭代时未能够完整计算出非共光路像差的波前相位信息,目标函数最大值决定了闭环状态下的耦合效率。采用逆向传输标定法闭环后

波前峰谷值由 $15.64\ \mu\text{m}$ 降至 $3.28\ \mu\text{m}$,波前均方根值由 $2.76\ \mu\text{m}$ 降至 $0.68\ \mu\text{m}$ 。图5(a)和5(c)附图中所示的未校正和校正后的波前相位并无明显差别,收敛程度相同,闭环控制后的重构过程中均进行了相对应的折算。采用逆向传输标定法耦合效率由27.31%提升至68.14%,这是因为采用图2中的光束传输方向进行测量不受湍流环境影响,非共光路像差能够完整且稳定地测量,闭环状态下耦合效率的提升效果优于随机并行梯度下降算法。

3 实验结果及分析

3.1 静态环境下的非共光路像差测量及其校正

依据图1搭建了相对应的自适应光学光纤耦合系统实验如图6所示。平凸透镜1、2、3、4的焦距分别为150、200、175、75 mm,耦合透镜焦距为125 mm,由透镜1和透镜2将准直光直径由7.5 mm扩束为10 mm,透镜3和透镜4将光斑直径由10 mm缩束为4.3 mm。准直器型号为ThorLab-F810APC,波前传感器型号为Shack-hartmann wavefront sensor Haso4 NIR,变形镜型号为Alpao DM69,光纤式光功率计型号为深圳瑞研RY3200B,空间式光功率计型号为VLP-2000,单模光纤型号为SMF-28e。

采用逆向传输标定法,将无线光相干通信系统中的本振光接入单模光纤,图7为波前传感器测量到的非共光路像差的波前斜率以及相对应的波前相位,非

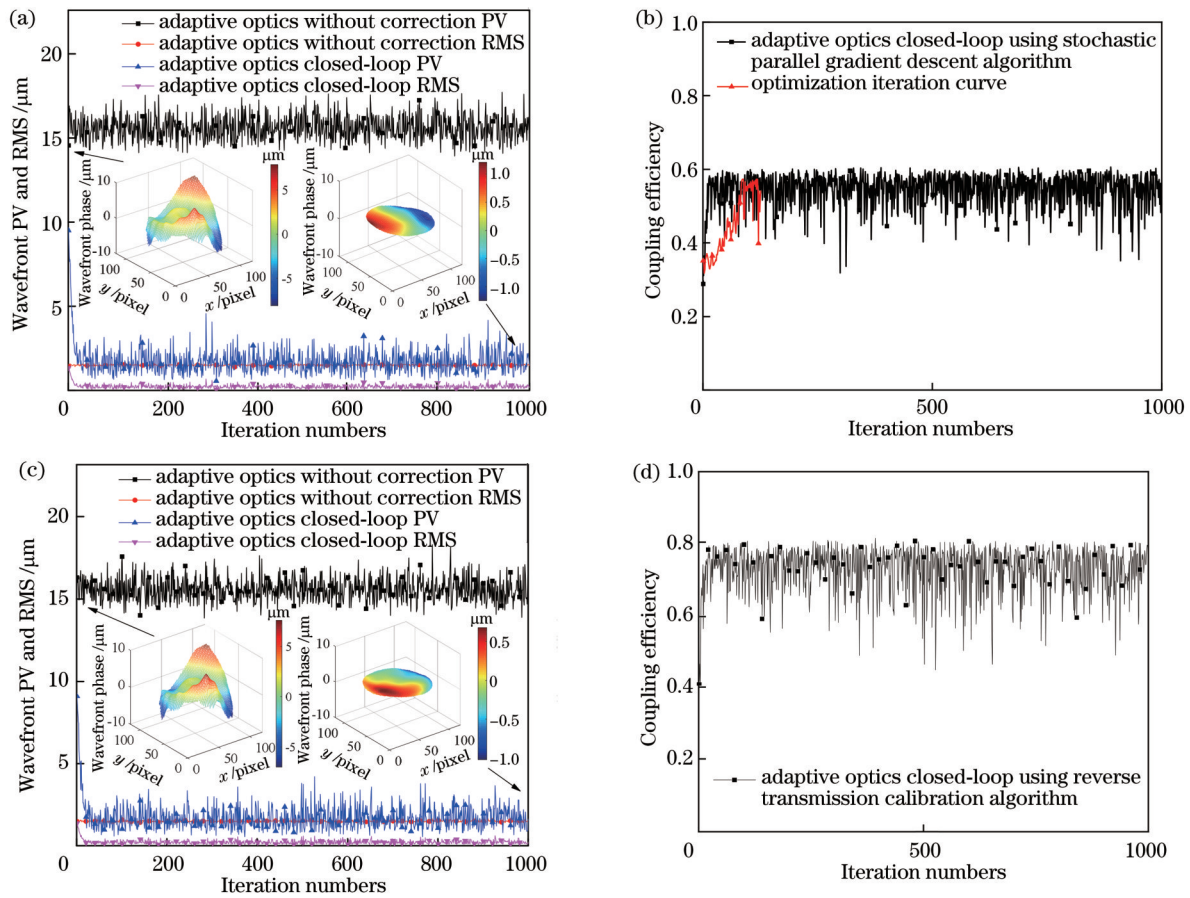


图5 校正非共光路像差的自适应光学系统。采用随机并行梯度下降法时的(a)未校正和闭环状态下的波前峰谷值和均方根值和(b)耦合效率;采用逆向传输标定法时的(c)未校正和闭环状态下的波前峰谷值和均方根值和(d)耦合效率

Fig. 5 Adaptive optical system after correction of non-common optical path aberration. (a) PV value and RMS value of uncorrected and closed-loop wavefronts and (b) coupling efficiency using stochastic parallel gradient descent algorithm; (c) PV value and RMS value of uncorrected and closed-loop wavefronts and (d) coupling efficiency using reverse transmission calibration algorithm

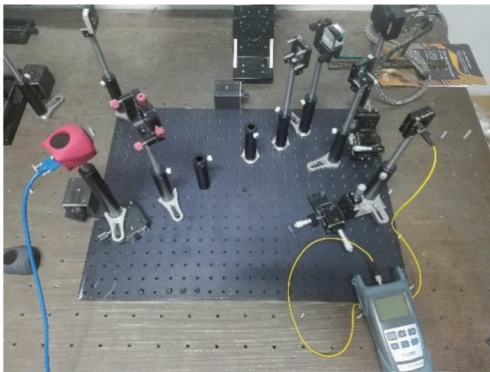


图6 自适应光学光纤耦合系统结构实物图

Fig. 6 Physical structure diagram of adaptive optical fiber coupling system

共光路像差的波前峰谷值为 $3.71 \mu\text{m}$, 波前均方根值为 $1.34 \mu\text{m}$, 该误差足以对耦合效率产生显著影响。

图8为自适应光学系统未校正非共光路像差、采用随机并行梯度下降法、采用逆向传输标定法的耦合效率,以及未折算和折算后波前峰谷值和均方根值,其中波前传感器在加入波前重构环节后采样率(约

50 Hz)约为光纤功率计串口采样率(约5 Hz)的10倍。未校正的情形下闭环后,耦合效率由初始的11.83%降至6.79%;采用随机并行梯度下降法耦合效率由初始的11.88%升至25.28%;采用逆向传输标定法耦合效率由初始的9.04%升至45.21%。未进行折算重构的波前峰谷值存在着先减小后增大的趋势,这是因为光纤支路的波前相位由初始状态经校正后达到耦合效率最佳状态,与之相同时间段对应的波前传感支路由于非共光路像差的折算以及波前相位值自身同时存在正负特性,使得两者的变化在数值上并非呈现出一致的趋势。同时波前传感器内部的自身噪声导致波前斜率测量和波前相位计算存在一部分突触数据,但并不会显著影响耦合效率的起伏。

3.2 湍流环境下外场实验

搭建了无线光相干通信相干探测的外场实验,通信两端分别位于西安市南二环和西安理工大学教六楼,通信距离为1.3 km,测量时间为2021年4月16日,天气晴,西南风2级。图9为1.3 km的实验链路地图以及自适应光学系统图。

采用自适应光学的无线光相干通信系统结构如图

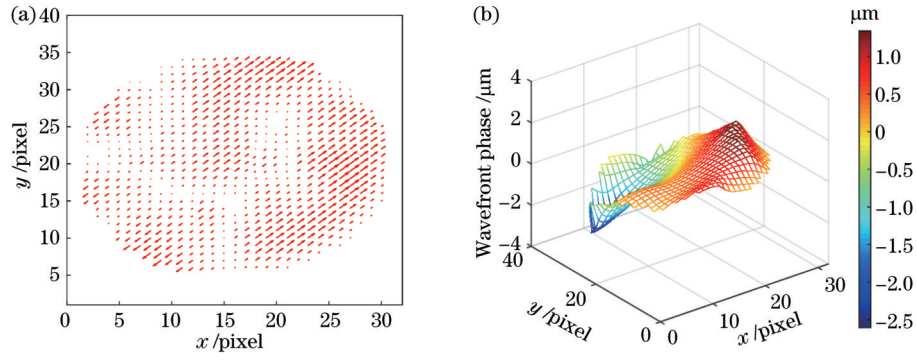


图 7 实际系统中非共光路像差。(a)波前斜率;(b)波前相位

Fig. 7 Non-common optical path aberration in actual system. (a) Wavefront slope; (b) wavefront phase

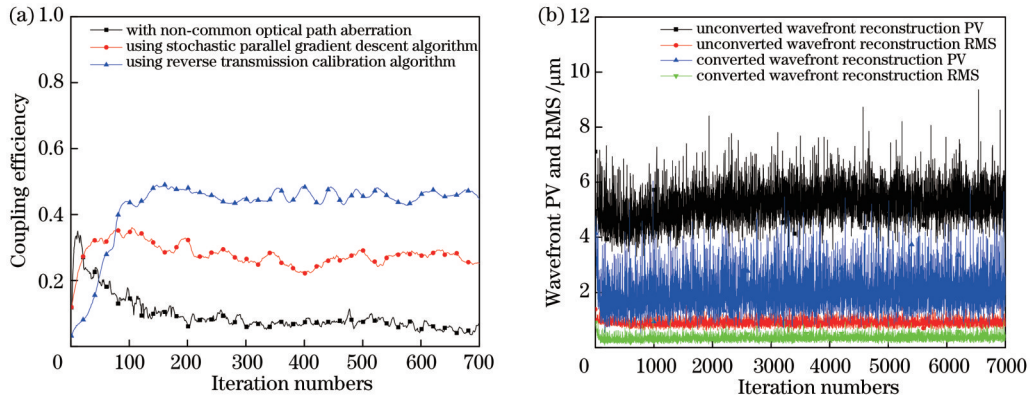


图 8 1550 nm 波段自适应光学系统闭环测量。(a)未校正非共光路像差、采用随机并行梯度下降法、采用逆向传输标定法的耦合效率;(b)未折算和折算后波前峰谷值和均方根值

Fig. 8 Closed-loop measurement of 1550 nm band adaptive optical system. (a) Coupling efficiencies with uncorrected non-common optical path aberration, stochastic parallel gradient descent algorithm, and reverse transmission calibration algorithm; (b) PV values and RMS values of unconverted and converted wavefronts



图 9 1.3 km 的外场实验。(a) 实验链路图;(b) 接收端实物图

Fig. 9 1.3 km field experiment. (a) Experimental link diagram; (b) physical picture of receiver

10 所示。发射端采用外调制的方式将信源加载至调制器,经光纤放大器放大后,由光学天线进行准直输出,光纤放大器输出功率为 14.77 dBm;接收端经接收天线会聚后,采用自适应光学技术进行波前校正,将空间光直接耦合进单模光纤,经混频以及平衡探测处理后,输出中频信号并进行解调处理。其中混频器型号为 Kyla COH24,平衡探测器型号为 General

Photonics BPD-002,信号激光器与本振激光器的型号均为 Koheras Basik E15 窄线宽光纤激光器。

以耦合光功率作为评价指标,采用随机并行梯度下降算法,得到不同次数下的耦合功率,以及停止迭代时依据变形镜施加的电压来拟合出的变形镜面型,如图 11 所示。

从图 11 中可以看出,不同迭代次数得到的最大功

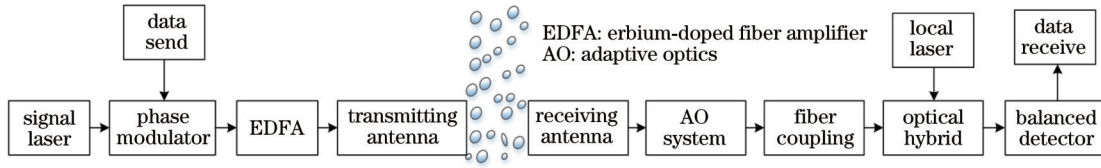


图 10 采用自适应光学提高耦合效率的无线光相干通信系统

Fig. 10 Optical wireless coherent communication system using adaptive optics to improve coupling efficiency

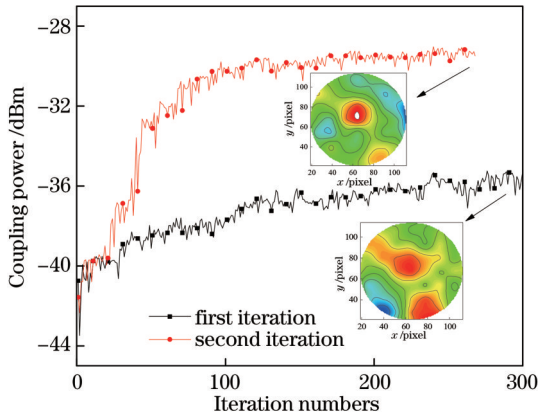


图 11 采用随机并行梯度下降法在不同迭代次数下的耦合功率变化曲线以及对应的变形镜面型

Fig. 11 Coupling power change curves and corresponding deformable mirror surfaces under different iteration times using stochastic parallel gradient descent algorithm

率值不同,图 11 的插图中变形镜在停止迭代时所拟合

出的面型均存在着较为明显的离焦项,但仍有所区别。非共光路像差测量精度必然会受到随机并行梯度下降算法所陷入的局部最优导致变形镜保持不同面型误差的影响。

图 12 为不同迭代次数下采用随机并行梯度下降算法测量的非共光路像差。波前相位呈现出环形结构是因为接收天线的次镜对于接收光斑产生了遮拦,非共光路像差测量值与图 8(b)存在差异,不同迭代次数下的测量结果也会受到大气湍流的影响而有所不同。

图 13 为采用逆向传输标定法测量并校正非共光路像差后,自适应光学未校正和闭环状态下的耦合效率曲线以及中频信号波形。自适应光学在未校正状态和闭环状态下的耦合效率由 19.72% 提升至 36.93%;中频信号峰峰值由 400 mV 提升至 1.4 V,而 BPD-002 的最大输出峰峰值为 3.1 V,系统的混频效率由未校正状态的 1.66% 提升至闭环状态的 20.40%。

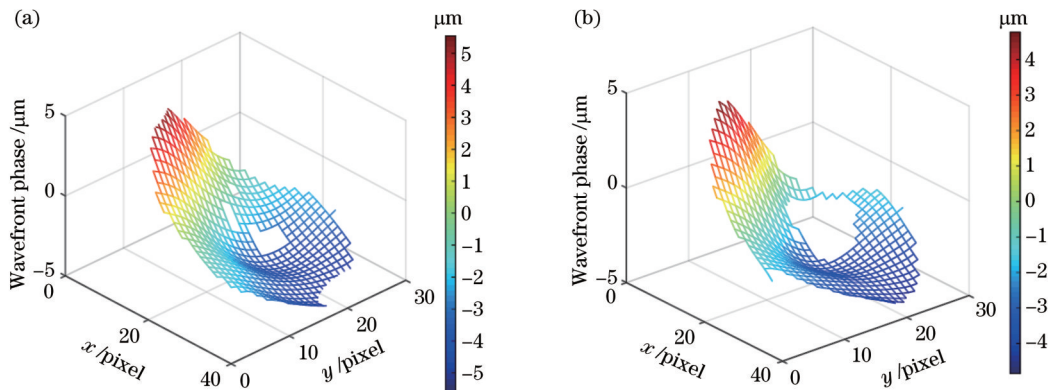


图 12 1.3 km 实验链路采用随机并行梯度下降算法测量非共光路像差。(a)第一次测量;(b)第二次测量

Fig. 12 Measurement of non-common optical path aberration using stochastic parallel gradient descent algorithm for 1.3 km experimental link. (a) First measurement; (b) second measurement

3.3 复杂环境下外场实验

在上述实验的基础上,将发射端设于西安市白鹿原肖寨村,接收端设于西安理工大学教六楼,接收端同时采用压电式变形镜来随机产生不同频率和不同幅度的波前畸变,再通过自适应光学系统进行波前校正和光纤耦合。实验时间为 2021 年 11 月 6 日,天气雾转阴伴有小雨,实验链路距离为 10.2 km。图 14 为实验链路图以及接收端原理图。

发射端光纤放大器的输出功率为 23.01 dBm,在

校正未进行波前的情形下,接收端耦合进单模光纤的功率约在 $-44 \sim -27$ dBm 范围内波动。并且随着发射功率的增大,耦合功率并无明显提升,须借助自适应光学技术来提高并稳定耦合效率。

图 15 为 10.2 km 链路采用随机并行梯度下降算法得到的耦合功率迭代曲线以及停止迭代时波前传感器采集的波前相位。耦合功率随着迭代次数的增大并无明显提升,甚至有些呈下降趋势。波前相位由于大气湍流所导致的光强闪烁存在坏点,非共光路像差信

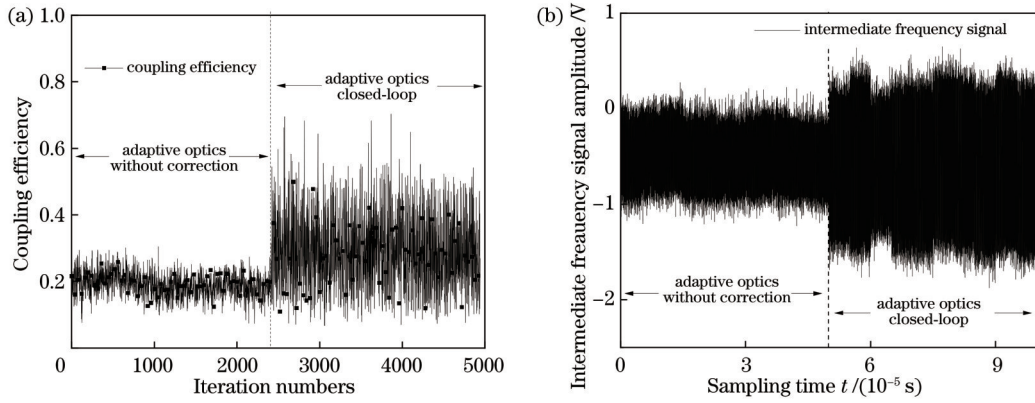


图 13 1.3 km 外场实验自适应光学未校正和闭环状态。(a) 耦合效率; (b) 中频信号波形

Fig. 13 Adaptive optics without correction and closed-loop states of 1.3 km field experiment. (a) Coupling efficiency; (b) intermediate frequency signal waveform

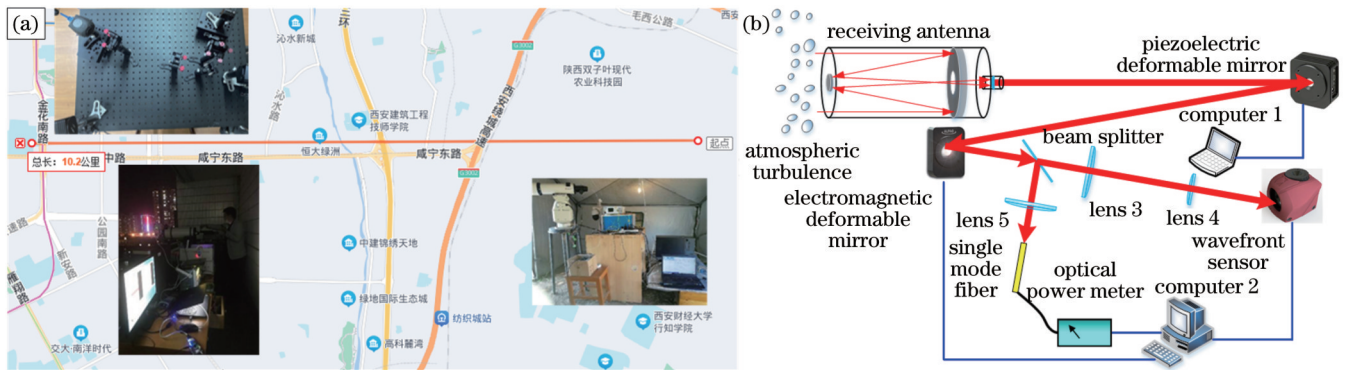


图 14 10.2 km 实验链路复杂环境下的接收端。(a) 实验链路图; (b) 接收端原理图

Fig. 14 Receiver under complex environment at 10.2 km experimental link. (a) Experimental link diagram; (b) schematic diagram of receiver

息采集不完整。这表明随机并行梯度下降算法用于远距离传输自适应光学初始化校准不具有普遍性。

图 16 为 10.2 km 链路下自适应光学未校正和采用逆向传输标定法完成自适应光学初始化后闭环状态下的耦合效率和中频信号波形。耦合效率平均值由未校正的 3.91% 提升至闭环状态下的 9.13%，中频信号的峰峰值的方差由未校正的 33 mV 降至闭环后的

123 mV, 系统平均混频效率由未校正状态下的 3.87% 提升至闭环状态下的 7.52%。这表明随着通信距离的增大, 大气湍流对于自适应光学校正效果的影响相比于非共光路像差更为显著。

对于 1.3 km 链路的信号传输, 在波前未校正的情况下, 波动的耦合功率能够达到通信系统误码率的最低需求, 甚至可以考虑不采用自适应光学技术

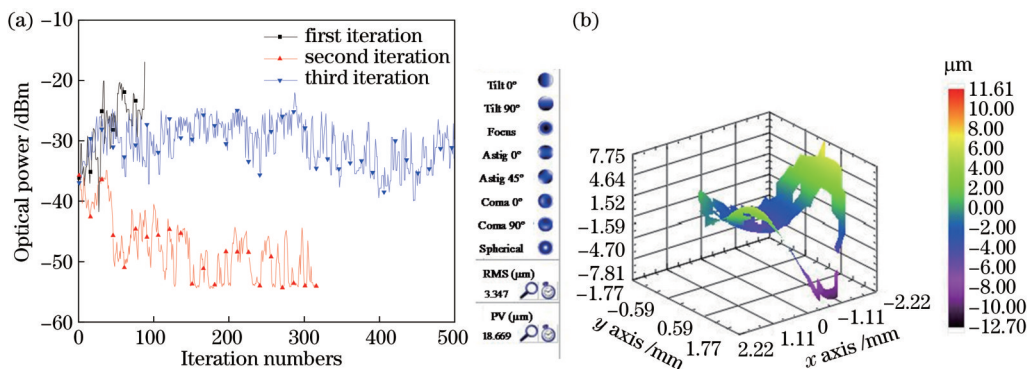


图 15 10.2 km 链路采用随机并行梯度下降算法的自适应光学初始化。(a) 耦合光功率迭代曲线; (b) 波前相位

Fig. 15 Adaptive optical initialization using stochastic parallel gradient descent algorithm at 10.2 km link. (a) Coupled optical power iteration curves; (b) wavefront phases

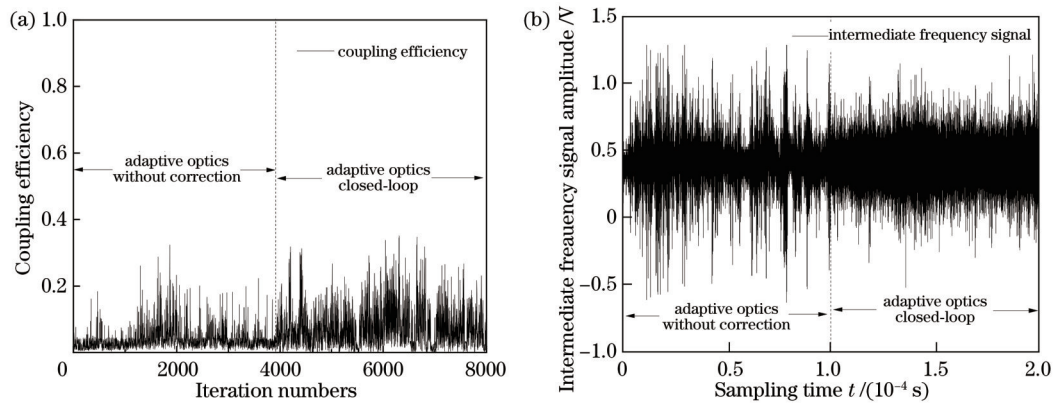


图 16 10.2 km 外场实验自适应光学未校正和闭环状态。(a)耦合效率;(b)中频信号波形

Fig. 16 Adaptive optics without correction and closed-loop states of 10.2 km field experiment. (a) Coupling efficiency; (b) intermediate frequency signal waveform

即可实现系统通信。而对于 10.2 km 链路的数据传输,应考虑采用逆向标定传输法完成自适应光学系统的初始化,实现实时闭环从而提高并稳定光纤耦合效率。

4 结 论

本文针对自适应光学光纤耦合系统,依据光路可逆原理,提出了一种采用逆向传输标定法来测量并校正非共光路像差的方案。将非共光路像差进行闭环控制折算在完成波前校正的同时提高了耦合效率。该方案相比于传统的采用随机并行梯度下降算法的方案不会陷入局部最优,且不受外界环境影响,能够辅助光路的位置对准调试,简便可行,在工程上易于实现,对于无线光相干通信系统的光纤耦合技术具有一定借鉴意义与实用价值。

参 考 文 献

- [1] 杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学技术在大气光通信系统中的应用进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(10): 61-68.
Yang H Z, Li X Y, Jiang W H. Applications of adaptive optics technology in atmospheric laser communications system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(10): 61-68.
- [2] 柯熙政, 杨尚君, 吴加丽, 等. 西安理工大学无线光通信系统自适应光学技术研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(8): 081003.
Ke X Z, Yang S J, Wu J L, et al. Research progress of adaptive optics in wireless optical communication system for Xi'an University of Technology[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(8): 081003.
- [3] Kaushal H, Kaddoum G. Optical communication in space: challenges and mitigation techniques[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 57-96.
- [4] 马婷婷, 佟首峰, 南航, 等. 信号光偏振特性对空间相干探测混频效率的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(2): 0206004.
Ma T T, Tong S F, Nan H, et al. Effect of polarization property of signal light on mixing efficiency of space coherent detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(2): 0206004.
- [5] 江杰, 郭宏翔, 边奕铭, 等. 基于 SPGD 算法的少模光纤耦合解复用系统动态湍流补偿仿真[J]. 光学学报, 2021, 41(19): 1901001.
Jiang J, Guo H X, Bian Y M, et al. Simulation on dynamic turbulence compensation of few-mode fiber coupling demultiplexing system based on SPGD algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 1901001.
- [6] 吴加丽, 柯熙政, 杨尚君, 等. 多维耦合器校正空间光-单模光纤耦合对准误差[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0706003.
Wu J L, Ke X Z, Yang S J, et al. Correction of alignment error in coupling space light into single-mode fiber by multi-dimensional coupler[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0706003.
- [7] Wright M W, Morris J F, Kovalik J M, et al. Adaptive optics correction into single mode fiber for a low Earth orbiting space to ground optical communication link using the OPALS downlink [J]. Optics Express, 2015, 23(26): 33705-33712.
- [8] 宋佳雪, 陈纯毅, 姚海峰, 等. 湍流扰动单模光纤耦合效率概率分布研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1906002.
Song J X, Chen C Y, Yao H F, et al. Study on probability distribution of single-mode fiber coupling efficiency distorted by turbulence[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1906002.
- [9] Rui D M, Liu C, Chen M, et al. Probability enhancement of fiber coupling efficiency under turbulence with adaptive optics compensation[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 60: 102343.
- [10] 邓科, 王秉中, 王旭, 等. 空间光-单模光纤耦合效率因素分析 [J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(5): 889-891.
Deng K, Wang B Z, Wang X, et al. Technology of coupling beam into single-mode fiber in free space optical communication system[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2007, 36(5): 889-891.
- [11] Luo W, Geng C, Wu Y Y, et al. Experimental demonstration of single-mode fiber coupling using adaptive fiber coupler[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(1): 264-269.
- [12] 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.
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.
- [13] 何爽, 张鹏, 魏佳, 等. 面向大气激光通信的空间光到少模光纤耦合特性研究[J]. 中国激光, 2021, 48(23): 2306001.
He S, Zhang P, Wei J, et al. Analyses of coupling characteristics of space light to few-mode fiber for atmospheric laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(23): 2306001.
- [14] 韩立强, 王志斌. 自适应光学校正下空间光通信的光纤耦合效率及斯特列尔比[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 125-129.

- Han L Q, Wang Z B. Fiber coupling efficiency and Strehl ratio for space optical communication based on adaptive optics correction[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 125-129.
- [15] 赵佰秋, 孟立新, 于笑楠, 等. 空间光到单模光纤章动耦合技术研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 1105001.
Zhao B Q, Meng L X, Yu X N, et al. Spatial light to single-mode fiber nutation coupling technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1105001.
- [16] 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.
- [17] Lamb M, Andersen D R, Véran J P, et al. Non-common path aberration corrections for current and future AO systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9148: 914857.
- [18] Sauvage J F, Fusco T, Rousset G, et al. Calibration and precompensation of noncommon path aberrations for extreme adaptive optics[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2007, 24(8): 2334-2346.
- [19] Ren D Q, Dong B, Zhu Y T, et al. Correction of non-common-path error for extreme adaptive optics[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2012, 124(913): 247-253.
- [20] 张天宇, 王钢, 张熙, 等. 基于焦面复制方法的自适应光学系统静态像差校正技术[J]. *中国光学*, 2022, 15(3): 545-551.
Zhang T Y, Wang G, Zhang X, et al. Static aberration correction technique for adaptive optics system based on focal-plane copy approach[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 545-551.
- [21] 马鑫雪, 王斌, 李正炜. 相位差异法检测不理想环境下的非共光路像差[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12): 3175-3182.
- Ma X X, Wang B, Li Z W. Calibration of non-common path aberration using multi-channel phase-diversity wave-front sensing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3175-3182.
- [22] 汪宗洋, 王斌, 吴元昊, 等. 利用相位差异技术校准非共光路静态像差[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0701007.
Wang Z Y, Wang B, Wu Y H, et al. Calibration of non-common path static aberrations by using phase diversity technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0701007.
- [23] Sulai Y N, Dubra A. Non-common path aberration correction in an adaptive optics scanning ophthalmoscope[J]. *Biomedical Optics Express*, 2014, 5(9): 3059-3073.
- [24] 王亮, 陈涛, 刘欣悦, 等. 适用于波前处理器的自适应光学系统非共光路像差补偿方法[J]. *光子学报*, 2015, 44(5): 0511001.
Wang L, Chen T, Liu X Y, et al. Compensation of the non-common path aberrations in an adaptive optics system with a wavefront processor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(5): 0511001.
- [25] Noll R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1976, 66(3): 207-211.
- [26] Vorontsov M A. Decoupled stochastic parallel gradient descent optimization for adaptive optics: integrated approach for wavefront sensor information fusion[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2002, 19(2): 356-368.
- [27] Yang S J, Ke X Z, Wu J L, et al. Dual-mirror adaptive-optics fiber coupling for free-space coherent optical communication[J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(7): 076109.

Correction of Non-Common Optical Path Aberration in Adaptive Optics by Reverse Transmission Calibration Algorithm

Yang Shangjun¹, Liang Jingyuan¹, Wu Jiali¹, Ke Xizheng^{1,2*}

¹*School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;*

²*Shaanxi Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an 710048, Shaanxi, China*

Abstract

Objective Optical wireless coherent communication employs optical hybrid to complete the mixing of signal light and local oscillator light, and balance detectors to complete photoelectric conversion. Optical fiber hybrid has been widely applied in optical wireless coherent communication systems due to its advantages such as high integration and compact structure. It is necessary to efficiently couple spatial light into the optical fiber. Adaptive optical technology can improve the coupling efficiency from spatial light into optical fiber by correcting the distorted wavefront, and it is applied to optical wireless coherent communication systems. The existence of non-common optical path aberration between the wavefront sensing branch and the coupling branch leads to the distorted wavefront in the communication branch after the closed loop of the adaptive optical system. The stochastic parallel gradient descent algorithm to correct the non-common optical path aberration is easy to fall into the local optimum, and the phase difference algorithm employed to correct the non-common optical path aberration is only applicable to the field of imaging systems. We propose a reverse transmission calibration algorithm to measure the non-common optical path aberration for the initial calibration of adaptive optical systems in optical wireless coherent communication.

Methods The adaptive optical system in wireless optical coherent communication is shown in Fig. 1. After the laser beam is transmitted through the atmospheric turbulence, the beam is fully reflected by the deformable mirror. The reflected beam is divided into two collimated beams with a power ratio of 1:1 by the beam-splitter. One transmitted beam

is to act on the wavefront sensor to monitor the current distorted wavefront. The other reflected beam is directly coupled into a single-mode fiber after being converged by a coupling lens for optical hybrid, coherent detection, and communication. Reverse transmission is sending the same beam from the receiver to the transmitter. A laser beam identical to the transmission source is supposed to be connected to the coupling optical fiber, as shown in Fig. 2. At the same time, the deformable mirror command in this state is cleared so that the deformable mirror is in a completely flat reflection state. The beam output by the coupling fiber is reflected by the beam-splitter and then reflected by the deformable mirror directly into the wavefront sensor to measure the wavefront information. At this time, the measured wavefront information includes both the wavefront phase that can maximize the coupling efficiency and non-common optical path aberration. The coupling efficiency can be improved when the measured wavefront information is converted to the closed-loop control of adaptive optics.

Results and Discussions The local oscillator light in the optical wireless coherent communication system is connected to the coupled single-mode optical fiber by the reverse transmission calibration algorithm. The peak-to-valley value of the non-common optical path aberration (Fig. 7) measured by the wavefront sensor is $3.71\ \mu\text{m}$, with the root mean square value of $1.34\ \mu\text{m}$. This error is enough to exert a significant impact on coupling efficiency. When the wavefront information is converted into the adaptive optical closed-loop control, coupling efficiency increases from the initial 9.04% to the closed-loop 45.21% (Fig. 8). The self-noise inside the wavefront sensor causes some synaptic data in the wavefront slope measurement and wavefront reconstruction, but does not significantly affect the fluctuation of coupling efficiency (Fig. 8). In turbulent environments, the coupling efficiency increases from 19.72% under uncorrected state to 36.93% under closed-loop state (Fig. 13), and that in complex environments increases from 3.91% in an uncorrected state to 9.13% in the closed-loop state (Fig. 16). This shows that with the increase of communication distance, the influence of atmospheric turbulence on adaptive optical correction effect is more significant than non-common optical path aberration.

Conclusions Based on the reversibility principle of optical paths, we propose a reverse transmission calibration algorithm to measure and correct non-common optical path aberration for adaptive optical fiber coupling systems in optical wireless coherent communication. This algorithm converts the non-common optical path aberration into closed-loop control and improves coupling efficiency while correcting the distorted wavefront phase. Compared with conventional stochastic parallel gradient descent algorithms, this scheme will not fall into the local optimum, and will not be affected by the external turbulent environments. It can also assist in the position alignment of optical paths, which is simple, feasible, and easy to realize in engineering. Finally, reference significance and practical value are provided for the optical fiber coupling technology of the optical wireless coherent communication system.

Key words fiber optics and optical communication; optical wireless coherent communication; adaptive optics; fiber coupling; non-common optical path aberration