

文章编号 1004-924X(2024)07-0945-11

基于投影光瞳分布的星地激光通信波前探测

杨慧哲^{1,2*}, 张贞钰^{1,3}, 刘进^{1,2}, 梁永辉^{1,2}

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学 南湖之光实验室, 湖南 长沙 410073;

3. 河北汉光重工有限责任公司, 河北 邯郸 056017)

摘要:为了解决星地自由空间光学通信系统中的提前角问题,采用了一种基于光强传输的新型波前探测技术——投影光瞳面分布(Projected Pupil Plane Pattern, PPPP),并通过实验室实验验证了该技术的可行性。PPPP基于TIE光强传输公式,根据不同传输距离下光强分布的变化反解出大气湍流引起的波前畸变。由于PPPP采用的是上行通信激光本身的后向瑞利散射,其测量的大气湍流方向与通信卫星方向一致,因此可以有效解决星地激光通信中的提前角问题。实验模拟了1 m口径的地基望远镜作为上行激光发射装置和后向散射光斑成像设备,通过等效高度分别为10 km和17 km的上行激光后向散射光斑图像来实现对10 km以下大气湍流的波前探测。实验采用的波前畸变模拟装置包括空间光调制器和透明塑料片,实验结果表明,对不同的波前畸变PPPP和通用的夏克-哈特曼波前探测器可以实现相似的波前重构,两者重构相位的残差约为初始相位的30%。

关键词:自适应光学;星地激光通信;波前探测器;投影光瞳面分布;提前角

中图分类号: TN929.12; O436 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243207.0945

Wavefront sensing for FSO systems based on projected pupil plane pattern

YANG Huizhe^{1,2*}, ZHANG Zhenyu^{1,3}, LIU Jin^{1,2}, LIANG Yonghui^{1,2}

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. Hebei Hanguang Industry Co., LTD, Handan 056017, China)

* Corresponding author, E-mail: yanghuizhe1207@sina.com

Abstract: Addressing the challenge of point ahead angle (PAA) in satellite-based free-space optical communication systems, this paper introduces a novel wavefront sensing method, the Projected Pupil Plane Pattern (PPPP), utilizing the transport-of-intensity equation (TIE). Laboratory experiments confirm its viability. The PPPP method, rooted in TIE, can deduce wavefront distortions due to atmospheric turbulence by analyzing variations in light intensity distribution over different transmission distances. Utilizing the

收稿日期: 2023-08-29; 修订日期: 2023-10-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 62005314)

back Rayleigh scattering from the communication laser, PPPP's atmospheric turbulence measurements align with the satellite's direction, offering an effective solution to PAA-related issues in satellite-ground laser communications. In our experiments, a 1-m ground telescope simulates an upward laser transmitter and captures the backscattered light for imaging. We measure wavefront distortions caused by atmospheric turbulence up to 10 km using backscattered light from altitudes of 10 km and 17 km. These distortions are simulated using a spatial light modulator or a transparent plastic sheet. The results demonstrate that PPPP and the commonly used Shack-Hartman wavefront sensor provide comparable wavefront reconstructions for various distortions, with the reconstructed phase's residual difference around 30% of the initial phase.

Key words: adaptive optics; satellite-ground laser communications; wavefront sensing; Projected Pupil Plane Pattern (PPPP); point ahead angle (PAA)

1 引言

在星地激光通信系统中,光束经过大气湍流产生波前畸变,激光束发生弥散,导致到靶功率大幅下降。通常需要采用自适应光学(Adaptive Optics, AO)系统对波前畸变进行实时补偿,以恢复信号光,降低误码率。星地激光通信包括星对地下行激光链路和地对星上行激光链路,对两路光信号的校正一般由地面端 AO 系统完成,具体是通过测量星对地的下行激光的波前畸变,然后将该畸变施加给变形镜(Deformable Mirror, DM),从而实现对下行激光的 AO 校正和对上行光路的预校正。例如,美国航空航天局(NASA)建造的用于激光通信的 1 m 望远镜地面站^[1-2],其自适应光学闭环校正后的斯特列尔比从低于 0.02 提高到 0.6。德国航空航天中心 DLR 和欧洲航天局领导的 Alphasat 项目^[3-4]使用 1 m 口径的地面站,在强湍流 $r_0 \leq 5$ cm (@1 064 nm) 的条件下,实现了与近地轨道和同步轨道卫星的相干激光通信。2019 年,荷兰应用科学研究机构 TNO 和 DLR 针对高通量星地激光通信链路设计了一个光反馈链路的自适应光学预校正平台 FEDELIO。实验结果显示,通过预校正可将上行光束的平均功率提高 2.5 倍,并使闪烁指数下降为原来的 1/4,说明 AO 系统具有良好的上行链路补偿能力^[5]。刘超等^[6-8]利用云南丽江的 1.8 m 望远镜,在 1 550 nm 通信波段对 41 颗不同高度角的恒星进行了实验,证明 AO 系统可以有效地消除中弱大气湍流的影响。

然而,由于通信卫星的快速运动,下行激光

和上行激光所经历的大气路径是不同的,其夹角称为提前角(Point Ahead Angle, PAA)^[9]。提前角过大(即卫星运动过快或湍流太强)时,下行激光测量到的波前畸变与上行激光所经过的大气湍流引起的波前畸变会完全不同,此时自适应光学系统对上行激光的预校正完全无效。Martine 等^[10-11]通过仿真证实以安装在泰德天文台的光学地面站 OGS 大气条件为例,对于提前角只有 4" 的地球静止轨道(Geostationary orbit, GEO)卫星,提前角小于 AO 等晕范围,因此通过下行链路对上行激光的预校正是有效的;而对于 400 km 的近地轨道(Low Earth Orbit, LEO),提前角远远大于 AO 等晕角,通过下行链路对上行激光的预校正存在较大误差。Fraunhofer 应用光学与精密工程研究所^[12-14]在 2016~2019 年间进行了最大水平传播距离为 1 km 的 3 次自由空间激光传播实验。实验结果表明,当提前角大于水平大气等晕角(约为 30")时,自适应光学预校正对卫星站点接收的激光功率没有明显改善。

目前,还没有简单有效的方法来解决星地激光通信中自适应光学系统的提前角问题。本文采用一种新型波前探测技术——投影光瞳面分布(Projected Pupil Plane Pattern, PPPP)^[15],利用上行激光在两个不同高度的瑞利后向散射光斑来测量大气湍流。而传统的夏克-哈特曼波前探测器一般是利用星对地的下行通信激光作为导星信号。因此,PPPP 通过采用上行激光进行波前探测,避免了由于卫星飞行过快而引起的上行激光与下行激光通过大气路径不一致(即提前角)的非等晕问题。当然,由于提前角的存在,上

行激光与下行激光所需的 DM 校正命令是不同的,因此需要采用两套 AO 系统分别对两路光进行校正。最后,通过实验手段验证了 PPPP 方法用于地对星上行激光波前探测的可行性。

2 工作原理

PPPP 根据强度传输方程 (Transport-of-Intensity Equation, TIE)^[16],通过不同传输距离下光强分布的演变来反解波前畸变信息。TIE 公式如下:

$$k\partial_h I = -\nabla \cdot (I\nabla\phi), \quad (1)$$

其中: I 和 ϕ 分别表示光强分布和大气湍流相位,波数 $k=2\pi/\lambda$, $\nabla=\partial_x+\partial_y$, h 为传输距离。对于缓慢变化的光强分布 I ,式(1)可近似为^[17]:

$$k\frac{I_2-I_1}{h_2-h_1} = -\nabla \cdot (I_0\nabla\phi) = -\nabla I_0 \cdot \nabla\phi - I_0\nabla^2\phi, \quad (2)$$

其中: I_0, I_1 和 I_2 分别对应传输距离 $h=0, h_1$ 和 h_2 处的光强分布, $\nabla^2=\partial_x^2+\partial_y^2$ 。根据式(2),通过测量不同传输距离下对应的光强分布 I_0, I_1 和 I_2 ,就可以反解出湍流相位 ϕ 。

图 1 为基于 PPPP 的星地激光通信中的自适应光学系统示意图。其中,望远镜既是上行激光

(地面端到卫星)发射望远镜,也是下行激光(卫星到地面端)的接收望远镜。由于提前角的存在,上行激光和下行激光采用的 AO 系统不同,图 1 仅给出本文主要研究的地对星上行激光的 AO 预校正系统,而使用常规方式对下行激光进行校正的 AO 系统则未给出。上行激光通过地基望远镜进行扩束并发射到卫星。当上行激光到达高度 h_1 时,使用与 h_1 共轭的相机对上行激光在 h_1 处的瑞利后向散射光斑进行成像,记为 I_1 。这里 h_1 指的是中心高度为 h_1 的一个空气层,用 Δh_1 来表示该空气层的厚度。在实际应用中,需要通过控制相机快门来对这个范围内的后向散射光斑进行成像。以高度 10 km 的后向散射光成像为例,假设 $\Delta h_1=1$ km,一束脉冲激光从望远镜发射到达高度 $h_1-\Delta h_1/2$,其后向散射光回到望远镜时经过的时间为 $t_1=2\times(h_1-\Delta h_1/2)/c=6.33\times 10^{-5}$ s,此时相机开始曝光。当脉冲激光束继续经过厚度 Δh_1 的大气并返回时,对应的时间为 $t_2=2\times(h_1+\Delta h_1/2)/c=7\times 10^{-5}$ s,此时结束曝光。在曝光范围内得到的图像,即对应 I_1 。同理,对高度 h_2 处的后向散射光斑进行成像可以得到 I_2 。通常采用一个快反镜对相机位置进行快速切换,从而实现单相机对 h_1 和 h_2 处光斑分别成像的目的。得到 I_1 和 I_2 后,继而利用测量到的强度差 I_2-I_1 反解出湍流相位 ϕ 。

本文采用一种 Zernike 模式重建方法来反解大气相位^[18]。首先,构建一个交互矩阵 M_{ij} :

$$M_{ij} = \int_0^{2\pi} \int_0^R I_0 \nabla Z_i \cdot \nabla Z_j r dr d\theta, \quad (3)$$

其中: Z_i 为第 i 阶 Zernike 模式, R 为激光束的半径。然后,将这个方阵求逆得到控制矩阵 M^{-1} ,则重构相位可表示为:

$$a = R^2 M^{-1} F, \quad (4)$$

式中: a 为重构相位 ϕ 的 Zernike 系数, F 为实测光强与 Zernike 多项式的标量积,即:

$$F_j = R^{-2} \int_0^{2\pi} \int_0^R k \frac{I_2 - I_1}{h_2 - h_1} Z_j r dr d\theta. \quad (5)$$

需要注意的是,PPPP 方法测量的是 h_1 高度以下整个大气传输路径上的湍流,对于高于 h_1 的大气湍流,PPPP 方法无法进行有效测量。不过在实际中强湍流主要分布在低层,且加入 AO 闭环校正后 h_2 处信号可提供 $h_1\sim h_2$ 一部分中间层

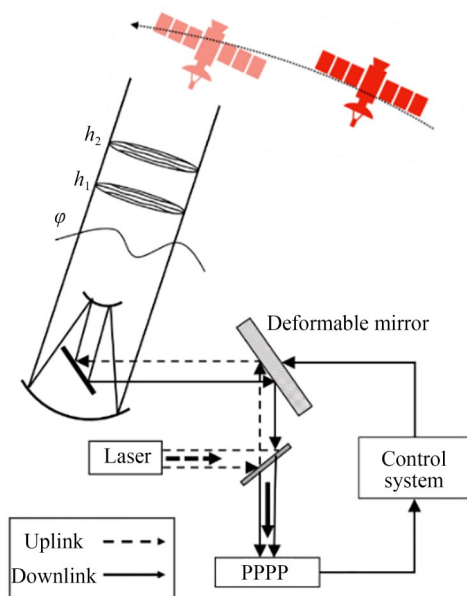


图 1 基于 PPPP 的星地激光通信自适应光学系统

Fig. 1 Schematic diagram of satellite-ground laser communication AO system based on PPPP

的湍流信息,一定程度上可以降低中间层湍流导致的测量误差。

考虑到瑞利散射对大气分子浓度的要求,散射高度一般要在 25 km 以下,又由于 PPPP 主要测量 h_1 以下高度的湍流信息,因此在实验中令 $h_1 = 10 \text{ km}$, $h_2 = 17 \text{ km}$ 。采用以上参数,对于 400 km 的 LEO 卫星,上行激光从发射到由卫星接收需要 $400 \text{ km}/c = 1.33 \text{ ms}$,而由传输距离较远的 $h_2 = 17 \text{ km}$ 的大气返回的后向散射光所需时间为 $2 \times 17 \text{ km}/c = 0.11 \text{ ms}$ 。在这个时间差内可以通过光强差 $I_2 - I_1$ 来反解大气湍流信号,有望降低自适应光学系统的时间误差。

3 实 验

根据 PPPP 波前探测原理,实验主要包含上行激光在大气中的传输,对不同高度的瑞利后向散射光斑成像,以及基于 Zernike 模式法的波前重建 3 部分。根据目前主流的星地激光通信实验系统,本实验模拟望远镜口径为 1 m,上行激光传输距离分别为 10 km 和 17 km。

PPPP 实验光路原理如图 2 所示, f_1, f_2 和 f_3, f_4 为两组中继透镜组,用以改变光束尺寸。激光束经过透镜 f_1, f_2 后入射到反射镜 M_0 上,再经过 f_3, f_4 扩束为直径 $D_2 = 10.5 \text{ mm}$ 的准直光束。实验采用两种波前畸变模拟器件(图 2 中 turbulence),一种为空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM),另一种是简易的塑料透明片。波前畸变模拟器件放置在与 M_0 共轭的位置。光束经过波前畸变模拟器件后,通过两个平面镜(M_3 和 M_4) 到达散射屏。散射屏采用高反射度的胶带,将它

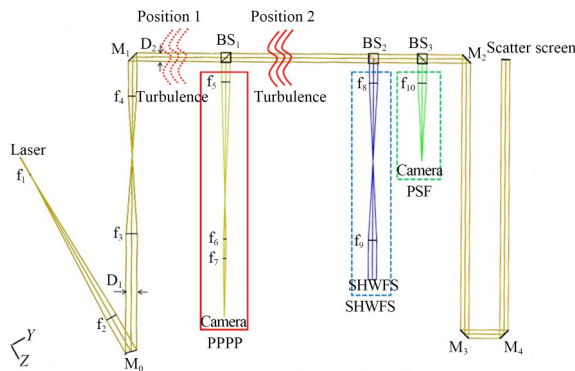


图 2 PPPP 实验的光路原理
Fig. 2 Optical layout of PPPP experiment

放置在一个可以快速旋转的小风扇上,来模拟大气分子的高速运动。这样保证了散射光是无序的非相干光,且散射光还不是非常弱,从而可以在暗室里通过 PPPP 相机(图 2 红框)对散射光斑本身进行成像。

为了实现对两个不同高度的后向散射光斑成像,将两个平面镜(M_3 和 M_4) 固定在一个滑轨上,通过移动 M_3 和 M_4 来改变光束的传输距离。对不同高度的散射光斑成像是通过图 2 中的 PPPP 模块实现的。具体来说,散射光通过 M_3 和 M_4 返回,经由分束镜 BS_1 反射到 PPPP 模块,其中 f_5, f_6 作为中继透镜组用以减小光束尺寸, f_7 用于对散射光的成像。

图 3 给出了对后向散射光斑成像的 Zemax 光路设计(虚线框为 f_5, f_6, f_7 的放大图)。随着 M_3 和 M_4 的移动,散射光斑成像的物距也相应发生变化。实验通过调整 f_6, f_7 之间的距离(保持 f_7 和后面相机的间距不变),保证对不同物距的光斑始终成大小一致的像。 f_7 与相机放置在滑轨上,通过在滑轨上移动 f_7 与相机(其间距不变),保证相机始终对散射屏上的散射光成清晰的像,并且图像尺寸保持不变。实验中两个传输距离分别为 1 100 mm 和 1 875 mm(相当于实际系统 10 km 和 17 km 的传输距离),对应的 f_6, f_7 之间的距离 d 分别等于 100 mm 和 15 mm。图 4 给出了两个传输距离下系统成像的点列图。从图中可以看出,图像尺寸基本不变,约为 5.25 mm,对应的波像差如图 5 所示。两种结构在视场边缘的最大波前误差的均方根(Root Mean Square, RMS)分别为

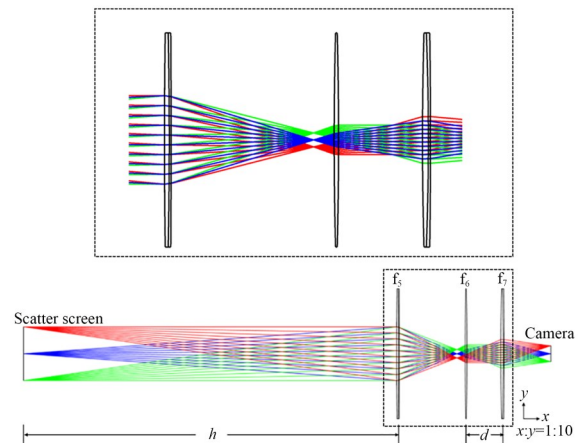


图 3 Zemax 设计的后向散射成像
Fig. 3 Zemax designed backscattered reimaging

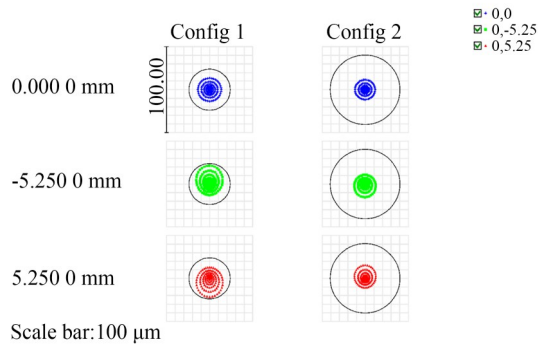


图 4 两个传输距离对应的后向散射成像的点列图
Fig.4 Spot diagram of backscattering reimaging with two configurations

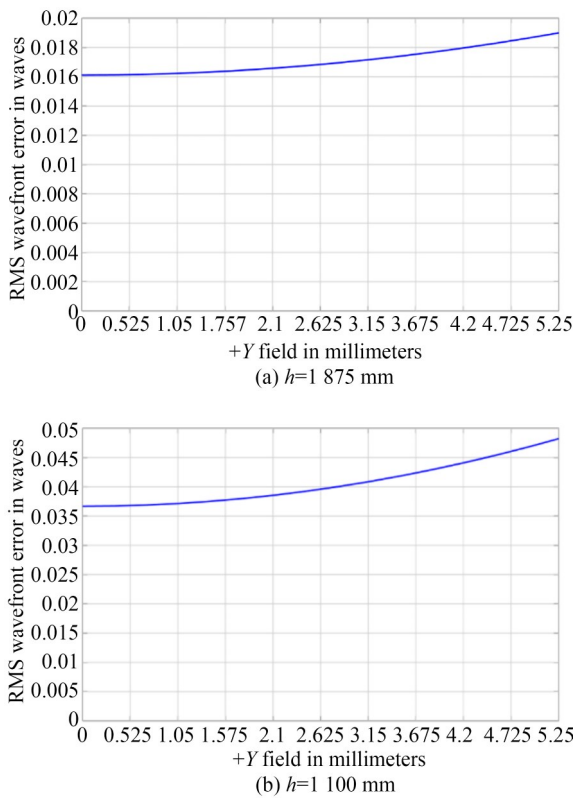


图 5 $h=1\ 100\ \text{mm}$ 和 $h=1\ 875\ \text{mm}$ 时不同视场的像差
Fig.5 Aberrations at different field of view with h of $1\ 100\ \text{mm}$ and $1\ 875\ \text{mm}$

0.047λ 和 0.019λ , 远小于 $1\ \text{rad}$, 因此对成像质量几乎没有影响。

为了与 PPPP 进行对比, 实验还采用通用的夏克-哈特曼波前探测器(Shack-Hartmann Wave-Front Sensor, SHWFS)来测量波前畸变(图 2 中 SHWFS 部分); 并使用相机记录系统的点扩散函

数(Point Spread Function, PSF)(图 2 中 PSF 部分)。实验参数见表 1。

表 1 PPPP 实验参数

Tab. 1 PPPP experiment parameters

结构	参数	取值
望远镜	λ	632.8 nm
	f_1	10 mm
	f_2	200 mm
	f_3	100 mm
	f_4	75 mm
	D_2	10.5 mm
	PPPP	BS_1
SHWFS	f_5	150 mm
	f_6	50 mm
	f_7	75 mm
	h_1	1 100 mm (10 km on sky)
	h_2	1 875 mm (17 km on sky)
PSF	BS_2	50:50 T:R
	f_8	100 mm
	f_9	100 mm
PSF	BS_3	50:50 T:R
	f_{10}	250 mm

实验中, 激光器为 Thorlabs 公司的 HeNe 激光器(NHL020LB), 中心波长为 632.8 nm, 功率为 2 mW, 光束直径为 0.63 mm(按 $1/e^2$ 的基模宽度衡量)。相机均是 IDS uEye CMOS 相机, 包含 $3\ 088 \times 2\ 076$ 个像素, 像素尺寸为 $2.4\ \mu\text{m}$ (总尺寸为 $7.411\ \text{mm} \times 4.982\ \text{mm}$)。最短曝光时间为 0.1 ms, 最长曝光时间为 221 ms。该相机仅支持对 PPPP 波前探测技术进行实验室验证, 在实际应用中, 需要采用曝光时间更短、读出噪声更小、波长范围更广的科学级探测器。

波前畸变模拟器件采用透射式空间光调制器(西安中科微星光电科技有限公司, TSLM017-A), 其分辨率为 $1\ 024 \times 768$, 像素尺寸为 $36\ \mu\text{m}$, 波长为 $380 \sim 1\ 200\ \text{nm}$ 。光利用率为 $36\% @ 633\ \text{nm}$, 最大相位调制为 $1.8\pi @ 532\ \text{nm}$ 。由于液晶填充率为 70%, 像素之间存在间隙, 相当于在液晶表面加了一个二维光栅, 使仪器出现高阶衍射

光斑,因此需要在焦平面进行滤波处理。在 f_5, f_6 之间以及 f_8, f_9 之间的焦点上放置光阑,只允许中心光斑通过来阻挡高阶斑点。由于 SLM 相位调制范围很小,只能施加单阶 Zernike 像差来验证 PPPP 波前探测方法的可行性。实验中对某一单阶 Zernike 像差,正负两次加载该像差,对相应的光强进行相减从而达到放大探测信号的目的。

夏克-哈特曼波前探测器由一个 35×35 子孔径的微透镜阵列和一个 CMOS 相机 (2048×2048 像素,像素尺寸为 $5.5 \mu\text{m}$) 组成。微透镜阵列的子孔径间距为 $300 \mu\text{m}$,有效焦距为 14.6 mm 。夏克-哈特曼波前探测器的有效面积为 $11.26 \text{ mm} \times 11.26 \text{ mm}$ 。

图 6 为实验平台。PPPP 路径相较主光路的垂直方向略有倾斜,以避免来自分束器表面的反射光对后向散射光斑成像的影响。这是因为散射屏(反射胶带)的散射光强度较弱,很容易被分束器表面的反射光淹没。

4 实验结果

实验中,空间光调制器位于两个位置,分别是 BS_1 的前方(图 2 中 position 1)和后方(图 2 中

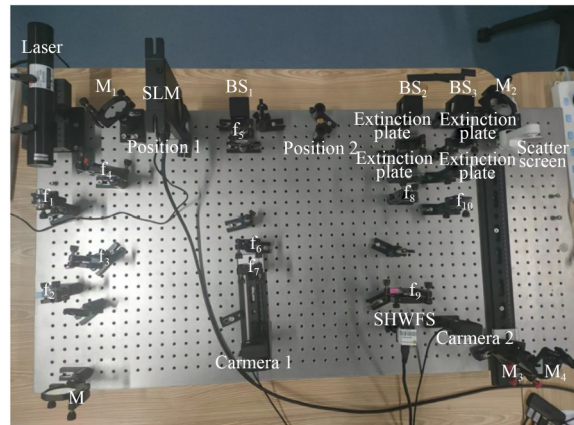


图 6 PPPP 实验台

Fig. 6 PPPP experiment bench

position 2),其中 BS_1 与 M_0 共轭。如果 SLM 位于位置 1,表示上行激光经过大气湍流,但后向散射光斑的成像过程中没有考虑大气湍流的影响。将 SLM 放置在位置 2 更符合实际,因为上行激光和后向散射光都通过了 SLM。

首先,将 SLM 放置于位置 1 进行实验。在 SLM 未加载相位时,记录传播距离 $h_1 = 1100 \text{ mm}$ 和 $h_2 = 1875 \text{ mm}$ 的光强信号,记为 I_{10} 和 I_{20} ,分别如图 7(a)和 7(b)所示。光瞳处的光强分布 I_0 可近似为 I_{10} 和 I_{20} 的平均值(图 7(c))。然后,将前 15 项 Zernike 模式作为简单像差逐一加

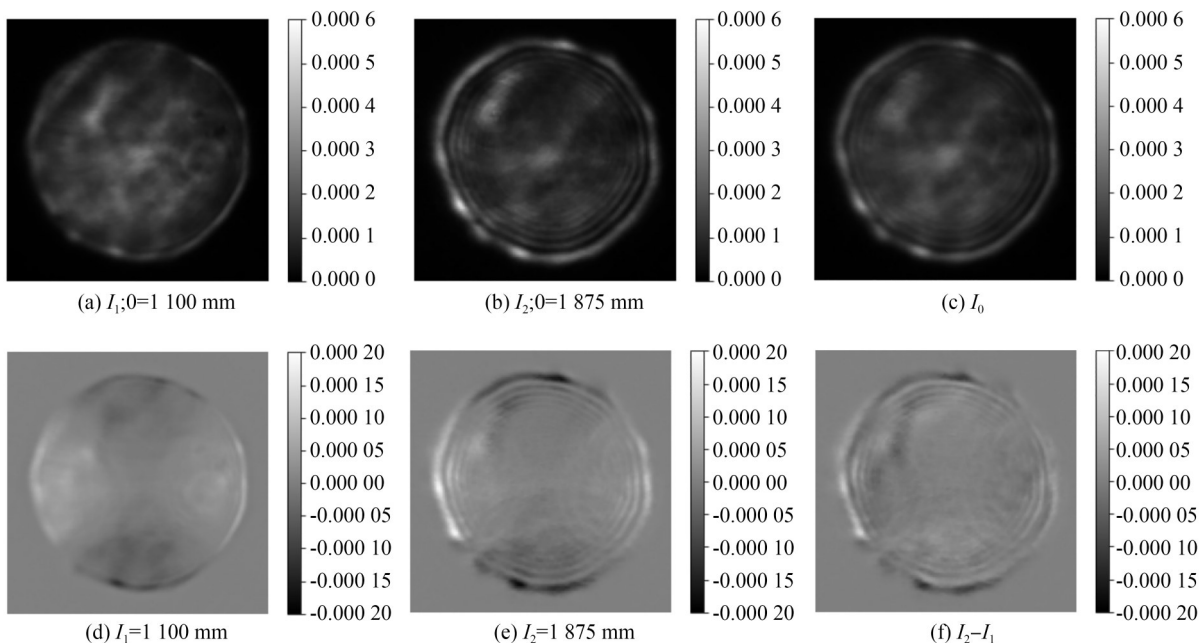


图 7 PPPP 实测光强分布

Fig. 7 Light intensity distribution measured by PPPP

载到 SLM 上。为了提高相位调制的幅度,对每一个 Zernike 模式正负各加载一次,其光强差即为该 Zernike 模式对应的光强分布。图 7(d)和 7(e)给出了第 6 项 Zernike 模式下 I_1 和 I_2 的实测结果,图 7(f)给出了 I_1 和 I_2 的差值,将其作为信号,根据式(4)进行相位重构。

根据实测数据 I_0 建立交互矩阵 M 和控制矩阵 M^{-1} ,如图 8 所示。已知 $I_0, I_2 - I_1$ 和 M^{-1} ,根据式(4)就可以重构出 SLM 加载的 Zernike 相位,图 9(a)为第 6 项 Zernike 像差的 PPPP 重构结果,对应的 SHWFS 重构结果如图 9(b)所示,两者之差见图 9(c)。其中,PPPP 重构相位的均方根为

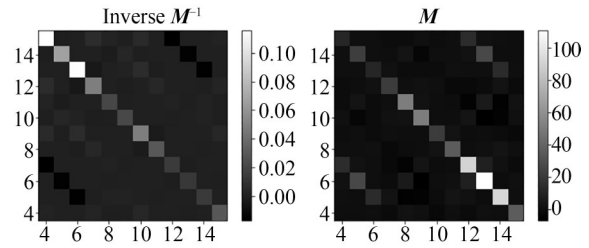


图 8 重构矩阵和重构逆矩阵

Fig. 8 Reconstruction matrix M and inverse reconstruction matrix M^{-1}

1 032.49 nm, SHWFS 为 1 025.28 nm。它们的差值称作波前误差 (Wavefront Error, WFE),其 RMS 为 305.33 nm。

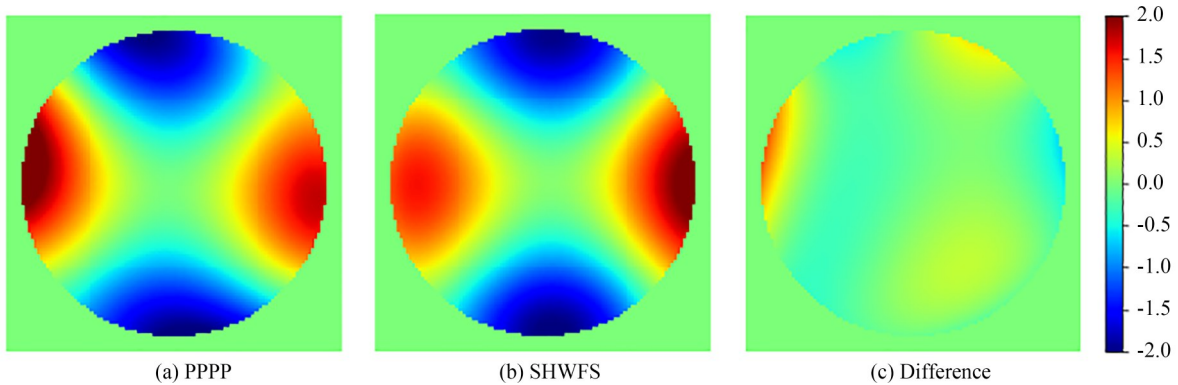


图 9 PPPP 和 SHWFS 的相位重构结果

Fig. 9 Reconstructed phases of PPPP and SHWFS

令 SLM 分别加载第 4~15 项 Zernike 模式后,重构结果如图 10 所示。从图 10 可以看出,PPPP 波前探测的精度在加入不同的 Zernike 像差时有所波动,如在第 4,6,7,12 等几项 Zernike

模式,“difference”为 SHWFS 数值的四分之一,探测精度较好;但在第 5,8 等几项 Zernike 模式,“difference”为 SHWFS 数值的二分之一,探测精度较差。

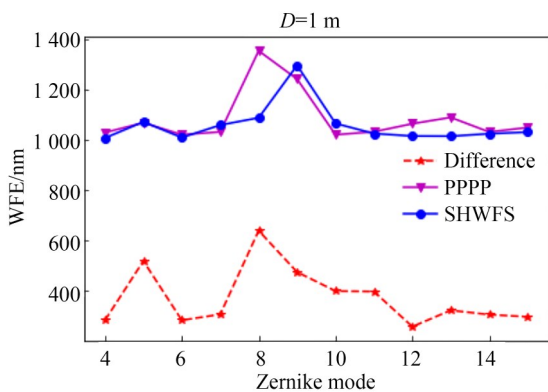


图 10 第 4~15 项 Zernike 模式测量结果

Fig. 10 Reconstruction results with 4th to 15th Zernike mode

PPPP 的探测结果存在波动,且重构精度有限,其原因可能是由于过强的衍射效应引入了较大的非线性误差。为了验证这一猜想,将实验模拟的 1 m 望远镜 ($D_2 = 10.5$ mm) 改为 2 m 望远镜 ($D_2 = 21$ mm) 重新进行测量,对应的各项 Zernike 相位重构结果如图 11 所示。对比图 10 和图 11 可以看出,与 1 m 望远镜相比,PPPP 和 SHWFS 的波动幅度都变小,二者差值的 RMS 约为 200 nm,远低于 1 m 口径望远镜对应的约 400 nm 左右。由此可知,如果实际中采用更大口径的望远镜作为激光发射装置,可以有效降低 PPPP 波前探测器的测量误差。

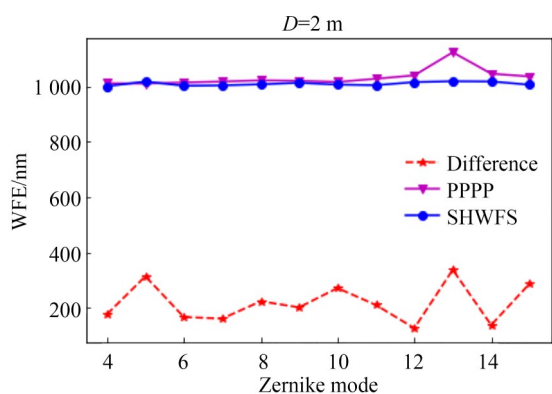


图 11 望远镜直径为 2 m 时第 4~15 项 Zernike 模式测量结果

Fig. 11 Reconstruction results with 4th to 15th Zernike mode for 2-m telescope

上述实验并没有考虑后向散射的能量问题,在实际中上行激光的后向散射光来源于一定厚度的大气薄层,在这个薄层范围内接收到的光子数决定了探测的信噪比。实验中可以通过改变相机的曝光时间来控制探测到的后向散射光子数,图 12 给出不同光子数下 PPPP 重构相位的准确度,SHWFS 给出的依然是长曝光(低噪声)下的重构结果。该实验采用第 4 项 Zernike 像差,图中横坐标为 PPPP 相机探测到的光子数,依次约为 [1 300, 2 550, 6 500, 12 900, 25 800, 45 000, 90 000]。实验结果表明,随着探测光子数的增加,PPPP 和 SHWFS 的重构相位之差的 RMS 逐渐减小,即 PPPP 和 SHWFS 的重构相似度增加,PPPP 探测精度提高,这与模拟结果是一致的^[19]。

现在将 SLM 从位置 1 移动到位置 2,用以模拟上行激光和后向散射成像均存在大气湍流的情况。

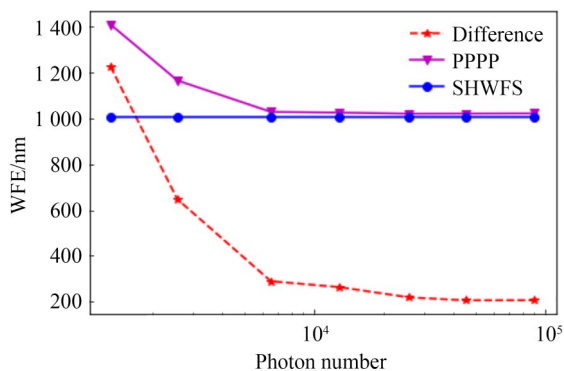


图 12 不同光子数下的测量结果

Fig. 12 Reconstruction results with different photon numbers

在这种情况下,光通过 SLM 两次,造成约 87% 的光损失,因此,BS₂和 BS₃被暂时移除以确保有足够的进入 PPPP 路径。当 SLM 位于位置 2 时,PPPP 重构结果如图 13 所示。由图 13 可以看出,当 SLM 加载第 4, 6, 12, 14 等几项 Zernike 模式时,“difference”约为“position 2”数值的五分之一,误差较小;但在第 5, 11 项 Zernike 模式时,“difference”约为“position 2”数值的二分之一,误差较大。将 SLM 从位置 1 移到位置 2,理论上唯一的区别是后向散射光斑成像时会受到 SLM(即大气湍流)的影响,其影响是使后向散射光斑变模糊,其模糊程度取决于大气湍流的强度。理论上,对后向散射光斑的采样数与传统的夏克-哈特曼波前探测器子孔径数相对应,因此,对后向散射光斑成像时不需要很高的分辨率,或者说可以采用像素尺寸较大、像素数较少的探测器来成像。这种情况下,大气和望远镜系统的 PSF 会限制在较少的几个(甚至 1 个)像素内,此时,大气湍流对后向散射光斑成像的影响就变得微乎其微。通过仿真发现^[19],如果采用 38×38 个像素来对 h_1 和 h_2 的后向散射光斑进行成像,大气湍流($r_0=0.1$ m)引起的 PSF 会限制在 1 个像素内,此时,大气湍流对后向散射光斑成像的影响就可以忽略不计。但是在实验中,SLM 置于位置 1 和位置 2 对波前测量结果有一定影响(图 13),这可能是由于实验中无法保证当 SLM 位于位置 1 和位置 2 时,光斑经过 SLM 的同一区域,而 SLM 衍射效应较强,微小的位置偏差就会导致一定的测量误差。

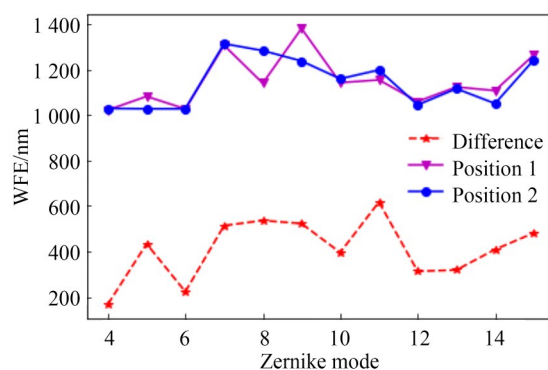


图 13 空间光调制器位于位置 1 和位置 2 时重构结果对比

Fig. 13 Comparison of PPPP reconstruction results with SLM at positions 1 and 2

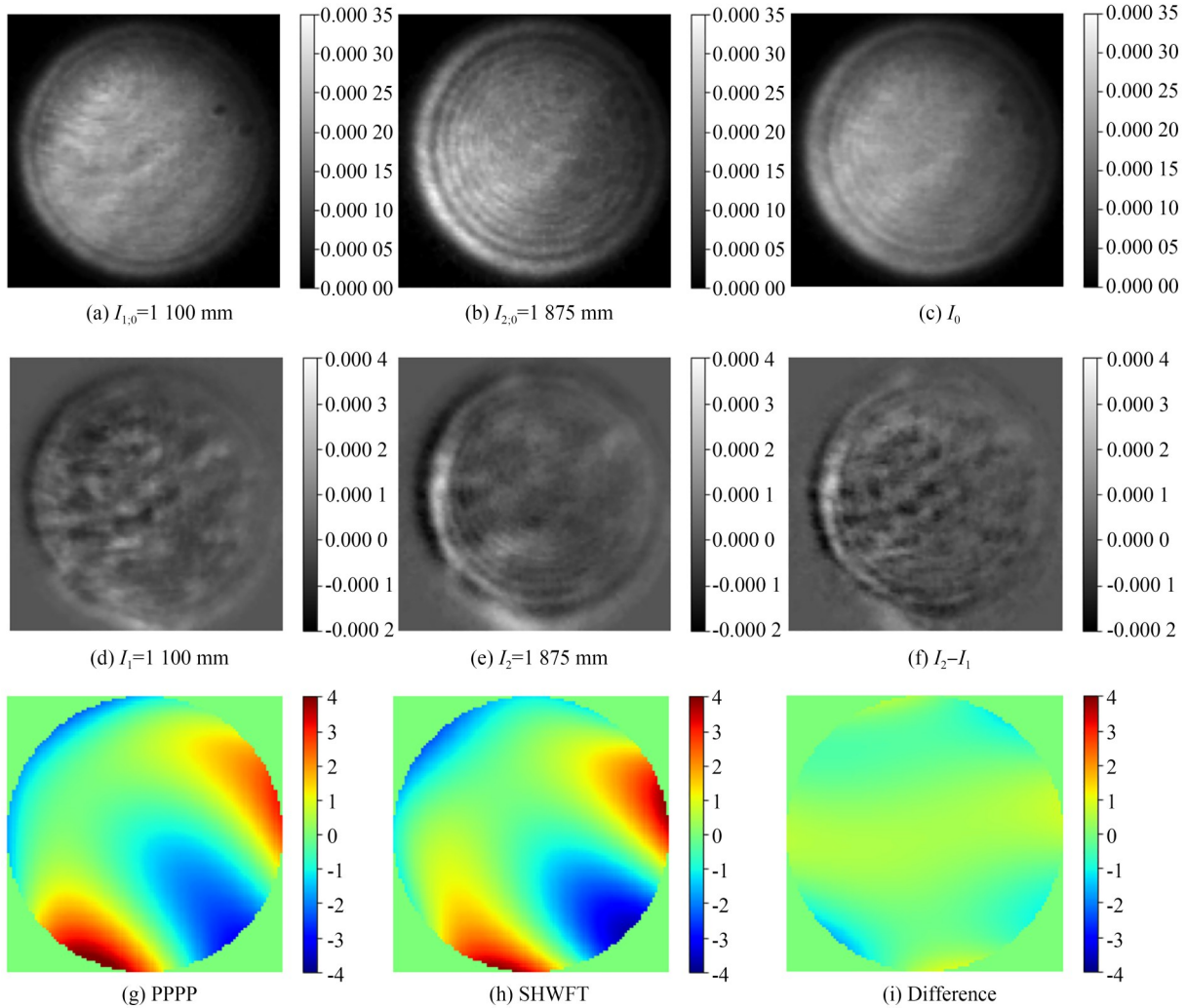


图 14 透明塑料片实验结果

Fig. 14 Measurements with transparent plastic sheet

除了 SLM, 实验还采用另一种波前畸变模拟器件, 即简易的透明塑料片, 放置于位置 2, 对应的光斑分布和重构相位如图 14 所示。图 14(a) 和 14(b) 为未加透明塑料片时 h_1 和 h_2 对应的光强分布 $I_{1,0}$ 和 $I_{2,0}$, I_0 为两者的平均值。为了去除光学系统本身的静态像差, 需要进行校准, 即将添加透明塑料片后测量得到的光强与未加透明塑料片的光强 $I_{1,0}$ 和 $I_{2,0}$ 相减 (图 14(d) 和 14(e)), 得到实际用来重构的光强差信号, 如图 14(f) 所示。图 14(g), 14(h) 为 PPPP 和 SHWFS 得到的重构相位, 其中 PPPP 重构相位的 RMS 为 1 370.72 nm, SHWFS 重构相位的 RMS 为 1 356.60 nm, 它们差值的 RMS 为 414.80 nm, 约为初始相位的 30%。

为了验证重复性, 利用不同的透明塑料片产

生 6 种不同的波前畸变, 其 PPPP 和 SHWFS 的重构结果如图 15 所示。可以看出, 对于透明塑料片产生的 6 种不同的畸变, PPPP 和 SHWFS 重构

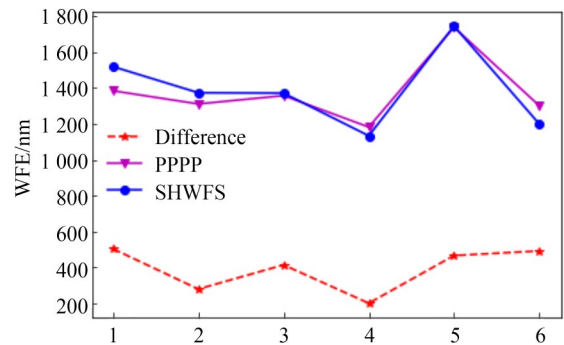


图 15 透明塑料片产生的 6 种不同畸变的测量结果

Fig. 15 Reconstruction results with 6 different phase aberrations generated by transparent plastic sheets

相位的差异大约为初始相位的 30%，与 SLM 结果类似。

5 结 论

本文通过实验验证了一种新型的波前探测技术 PPPP, 并根据光强传输公式, 采用两个不同传输距离的光强分布演变来实现波前畸变的探测。由于 PPPP 采用上行通信激光本身的后向瑞利散射, 所测量的大气湍流方向与通信卫星方向一致, 因此, 可以有效解决星地激光通信中的提前角问题。根据 PPPP 测量原理, 实验包含 3 个

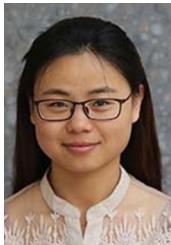
主要环节: 上行激光束在大气湍流中的传播, 对上行激光的两个不同高度的瑞利后向散射光斑的成像, 以及利用 Zernike 模式法进行相位重构。实验模拟 1 m 口径地基望远镜, 两个传输高度分别为 10 km 和 17 km, 采用空间光调制器和透明塑料片作为两组畸变模拟器件。实验结果表明, PPPP 和通用的夏克哈特曼波前探测器得到了相似的重构相位, 两者的差异约为初始相位的 30%。如果进一步扩大地面望远镜的口径, 可以有效降低 PPPP 的非线性效应, 从而提高其波前探测的准确性。

参考文献:

- [1] WRIGHT M W, KOVALIK J, MORRIS J, *et al.* LEO-to-ground optical communications link using adaptive optics correction on the OPALS downlink [C]. *Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVIII, SPIE Proceedings*. San Francisco, California, USA. SPIE, 2016, 9739: 973904.
- [2] 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.
- [3] HEINE F, SAUCKE K, TROENDLE D, *et al.* Laser based bi-directional Gbit ground links with the Tesat transportable adaptive optical ground station [C]. *Proc SPIE 10096, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXIX, San Francisco, California, USA*. 2017, 10096: 251-258.
- [4] SAUCKE K, SEITER C, HEINE F, *et al.* The Tesat transportable adaptive optical ground station [C]. *Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVIII, SPIE Proceedings*. San Francisco, California, USA. SPIE, 20169739: 973906.
- [5] 徐月, 刘超, 兰斌, 等. 自适应光学在星地激光通信中的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(5): 3788/LOP220582.
- XU Y, LIU CH, LAN B, *et al.* Research progress of adaptive optics in satellite-to-ground laser communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(5): 3788/LOP220582. (in Chinese)
- [6] 芮道满, 刘超, 陈莫, 等. 自适应光学技术在星地激光通信地面站上的应用[J]. *光电工程*, 2018, 45(3): 170647.
- RUI D M, LIU CH, CHEN M, *et al.* Application of adaptive optics on the satellite laser communication ground station [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170647. (in Chinese)
- [7] 刘超, 陈善球, 廖周, 等. 自适应光学技术在通信波段对大气湍流的校正[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(10): 2605-2610.
- LIU CH, CHEN SH Q, LIAO ZH, *et al.* Correction of atmospheric turbulence by adaptive optics in waveband of free-space coherent laser communication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(10): 2605-2610. (in Chinese)
- [8] 陈莫. 基于大口径望远镜的星地激光通信地面站关键技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2019.
- CHEN M. *Research on the Key Technologies of Large Aperture Telescope Ground Station for Satellite-to-ground Laser Communications* [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [9] OSBORN J, TOWNSON M J, FARLEY O J D, *et al.* Adaptive Optics pre-compensated laser uplink to LEO and GEO [J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 6113-6132.
- [10] MARTÍNEZ N, RODRÍGUEZ-RAMOS L F, SODNIK Z. Toward the uplink correction: application of adaptive optics techniques on free-space optical communications through the atmosphere [J].

- Optical Engineering*, 2018, 57(7): 076106.
- [11] MARTÍNEZ REY N, RODRÍGUEZ RAMOS L F, SODNIK Z. Uplink wavefront corrector system: from paper to reality [J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 5886-5897.
- [12] LEONHARD N, BERLICH R, MINARDI S, *et al.* Real-time adaptive optics testbed to investigate point-ahead angle in pre-compensation of Earth-to-GEO optical communication [J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13157.
- [13] BRADY A, BERLICH R, LEONHARD N, *et al.* Experimental validation of phase-only pre-compensation over 494 m free-space propagation [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(14): 2679-2682.
- [14] BRADY A, RÖSSLER C, LEONHARD N, *et al.* Validation of pre-compensation under point-ahead-angle in a 1 km free-space propagation experiment [J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 17840-17850.
- [15] YANG H Z, BHARMAL N A, MYERS R M. Projected Pupil Plane Pattern: an alternative LGS wavefront sensing technique [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, 477(4): 4443-4453.
- [16] TEAGUE M R. Deterministic phase retrieval: a Green's function solution [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1983, 73(11): 1434-1441.
- [17] RODDIER F. Curvature sensing and compensation: a new concept in adaptive optics [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(7): 1223-1225.
- [18] GUREYEV T E, NUGENT K A. Phase retrieval with the transport-of-intensity equation II Orthogonal series solution for nonuniform illumination [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(8): 1670-1682.
- [19] ZHANG Z Y, YANG H Z, LIANG Y H. A new wavefront sensing technique for satellite-ground laser communication [C]. *Adaptive Optics Systems VIII. July 17-23, 2022. Montréal, Canada.* SPIE, 2022.

作者简介:



杨慧哲(1988—),女,博士,讲师,2019于英国杜伦大学获得物理学博士学位,主要从事自适应光学、图像处理和干涉成像的相关研究。E-mail: yang-huizhe1207@sina.com