

doi: 10.3788/gzxb20174601.0111001

位相差异波前传感技术在大型空间光学相机中的应用

赵惠¹, 易红伟¹, 樊学武¹, 李创¹, 邹刚毅¹, 庞志海¹, 任国瑞¹, 赵燕¹,
李爱玲¹, 魏静萱², 解晓蓬¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 西安电子科技大学 计算机学院, 西安 710071)

摘 要:在位相差异技术原理的基础上, 利用现有平台, 通过室内实验以及室外推扫成像试验, 检验了位相差异技术波前反演的效果. 试验表明: 以干涉仪实测波前与反演波前的残差均方根误差作为评价标准, 基于位相差异技术的波前反演精度可达 $1/40\lambda$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$); 同时, 利用反演波前进行的图像复原滤波能够大幅改善推扫退化图像的品质, 复原后图像信噪比的提升量优于 40%, 奈奎斯特频率处调制传递函数的提升量超过 80%. 间接地证明了位相差异波前反演技术的实际效能, 为位相差异波前反演技术的空间应用奠定了基础.

关键词:空间光学相机; 波前反演; 位相差异; 图像复原滤波

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)01-0111001-12

Application of Phase Diversity Wave-front Sensing Technique to Large Space-borne Camera

ZHAO Hui¹, YI Hong-wei¹, FAN Xue-wu¹, LI Chuang¹, ZOU Gang-yi¹, PANG Zhi-hai¹,
REN Guo-rui¹, ZHAO yan¹, LI Ai-ling¹, WEI Jing-xuan², XIE Xiao-peng¹

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China)

(2 School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Based on the fundamental principle of phase diversity technique, a prototype space-borne camera was used to experimentally demonstrate the effects of wavefront reversal of phase diversity technique through laboratory and outfield push-broom imaging experiments. Experimental results demonstrate that, the accuracy of wavefront reversal based on phase diversity technique is near $1/40\lambda$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$) by using the root-mean-squares of residual wave-front errors between the really obtained wave-front through Zygo and the calculated wave-front through phase diversity as a criterion. At the same time, by carrying out deconvolution to the degraded push-broom images using the estimated wave-front, the image quality could be prominently improved. The signal-to-noise ratio could be improved at least 40% and the modulation transfer function at Nyquist frequency could be improved 80% above, which indirectly proves the effectiveness of phase diversity technique as well. The work reported in this manuscript will pave the way for in-orbit application of phase diversity based wave-front sensing technique in future.

Key words: Space-borne camera; Wave-front sensing; Phase diversity; Image restoration

OCIS Codes: 110.0110; 220.1080; 220.4830; 350.4600; 350.6090

0 引言

在卫星平台上利用光学遥感相机实施高分辨率对地观测是国家开展资源态势普查、生态环境监测等一

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61107008, 61203372, 61105017)资助

第一作者: 赵惠(1981-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为新型光学成像技术. Email: zhaohui@opt. ac. cn

收稿日期: 2016-07-21; 录用日期: 2016-09-12

<http://www.photon.ac.cn>

系列重大活动的现代战略高技术手段之一,已成为当今世界各国大力发展和激烈竞争的技术领域。

光学相机作为高分辨对地观测的核心载荷之一,空间分辨率与成像品质是决定其性能的两个重要因素。增大光学成像系统的孔径是提升空间分辨率最为直接的手段之一,然而光机结构的巨大化将使相机更容易受到内外部因素的影响,比如发射入轨时所受到的冲击、过载与振动将使光学元件的几何形状以及元件之间的间隔发生改变;而热环境及重力环境的变化将导致光学元件的面形出现退化等。这些影响将以相互耦合作用的形式综合反应到整个光学系统的光瞳上,导致实际波前与理想值之间出现偏差,从而引起空间分辨率和成像品质的降低。因此,对成像系统在轨运行时的波前进行监测并据此实施补偿是未来更大口径光学相机获取高品质数据的一种有效保障手段。

常用的波前传感技术包括剪切干涉仪^[1,2]、曲率传感器^[3-5]、四棱锥镜传感器^[6-7]以及夏克-哈特曼波前传感器^[8-11]。尽管这几种波前传感技术在地面得到了广泛的应用,但是无一例外都存在需要特殊的硬件装置或者只能应用于点光源等共性特点,从而制约了其在对质量、体积以及功耗等方面有严格要求的卫星平台上应用的可能。

位相差异波前传感技术(Phase Diversity,PD)是位相恢复波前传感技术(Phase Retrieval,PR)的扩展,其概念于1979年由GONSALVES提出^[12]。该技术能够从同一目标场景的至少两幅图像中提取出关于目标和波前位相的信息,而两幅图像之间只需存在一个已知的位相差异即可。由于PD技术用于波前传感的光学系统简单,所需附加硬件少,每个光子都被用于正常成像和波前误差估计,波前计算与图像内容无关且适用于点源及扩展目标,因此使在轨监测空间光学相机的波前状态成为可能,得到了国内外机构的广泛研究。

国外自1988年Paxman和Fienup应用PD技术尝试解决光学合成孔径中多孔径定相问题开始^[13],美国麻省理工大学^[14]、波音公司^[15]以及洛克希德马汀公司^[16]等在接下来的数年时间里均对PD技术在波前畸变传感领域的应用前景进行了大量的理论研究和试验验证,并在多种原型系统中对位相差异波前传感技术的应用效能进行了评估。国内在该领域的研究起步相对较晚,2006年以后,中科院成都光电所^[17],云南天文台^[18],西安光机所^[19]、长春光机所^[20]、哈尔滨工业大学^[21]以及北京理工大学^[22]等主要围绕PD理论与反演算法开展了大量的理论研究工作,而利用大型空间相机平台开展的试验研究相对较少。

本文基于现有平台进行了PD位相差异波前反演技术的试验研究。研究由两个部分组成。首先,在试验室内利用20 m平行光管针对分辨率靶标进行推扫成像并利用PD技术估计相机系统的畸变波前,通过与ZYGO干涉仪实测波前的比较得到波前反演精度。其次,开展室外推扫成像试验,并利用由PD技术估计的畸变波前对推扫图像进行复原滤波。研究表明:以干涉仪实测波前与反演波前的残差均方根误差RMS(Root Mean Square)作为评价标准,基于PD技术的波前反演精度可达约 $1/40\lambda$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$);同时,复原后推扫图像信噪比的提升量优于40%,奈奎斯特频率处MTF的提升量超过80%,图像分辨率与品质的显著改善也进一步证明了PD的效能。

1 位相差异波前反演技术机理

利用位相差异进行波前畸变反演,首先需要获得同一目标场景具有特定位相差异的两幅图像。位相差异可以通过多种方式获得,如轻微离焦,变化视场位置或使用不同波长等^[23-25]。其中,离焦由于易于实现,因而成为引入特定位相差异的首选方式。对于非相干成像系统来说,其成像过程在空间域表示为

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes \text{PSF}(x, y) \quad (1)$$

式中, $g(x, y)$ 是实际接收到的图像, $f(x, y)$ 是目标的理想图像,PSF(x, y)是系统的点扩散函数, \otimes 表示卷积操作。相应地,与式(1)所对应的成像过程在频率域表示为

$$G(u, v) = F(u, v) \cdot \text{OTF}(u, v) \quad (2)$$

式中,OTF(u, v)是系统的光学传递函数, $G(u, v)$ 与 $F(u, v)$ 分别代表实际获得图像与理想图像的傅里叶频谱, \cdot 表示乘积操作。当引入轻微离焦之后,离焦图像的获取在频率域就表示为

$$G_d(u, v) = F(u, v) \cdot \text{OTF}_d(u, v) \quad (3)$$

式中,下标'd'代表离焦, G_d 是离焦影像的频谱,而 OTF_d 则代表光学系统离焦传递函数。

通过联立式(2)与式(3)可以建立一个用来评价重建图像频谱与实际采集到的图像频谱之间逼近程度的目标函数,即

$$E = \sum_u \sum_v \{ |G - F \cdot \text{OTF}|^2 + |G_d - F \cdot \text{OTF}_d|^2 \} \quad (4)$$

令式(4)对未知目标的频谱 F 求偏导并且令其等于 0 就可以通过求解偏微分方程得到对目标频谱的估计,即

$$\hat{F} = \frac{|G \cdot \hat{\text{OTF}}_d^* - G_d \cdot \hat{\text{OTF}}^*|^2}{|\hat{\text{OTF}}|^2 + |\hat{\text{OTF}}_d|^2} \quad (5)$$

式中,‘ $\hat{\cdot}$ ’代表估计,*表示共轭。

将式(5)带入式(4)并通过合并处理,就可以得到只与光学传递函数有关而与成像目标内容无关的目标函数,即

$$E = \sum_u \sum_v \frac{|G \cdot \hat{\text{OTF}}_d - G_d \cdot \hat{\text{OTF}}|^2}{|\hat{\text{OTF}}|^2 + |\hat{\text{OTF}}_d|^2} \quad (6)$$

根据傅里叶光学理论,光学系统传递函数 OTF 可以通过广义光瞳函数的自相关运算获得,而广义光瞳函数表示为

$$P(x, y) = p(x, y) \exp \{ i[\varphi(x, y) + \Delta\varphi(x, y)] \} \quad (7)$$

式中, p 为系统光瞳分布区域的二值函数,光瞳内部为 1,外部为 0。 $\Delta\varphi$ 是由大小已知的离焦所引入的位相变化,正焦成像时的 $\Delta\varphi$ 为 0,而 φ 是成像波前通过系统光瞳所产生的未知波像差,可表示为

$$\varphi(x, y) = \sum_{i=1}^m \alpha_i Z_i(x, y) \quad (8)$$

所以,式(6)给出的目标函数实际上是以系统未知波前畸变对应的泽尼克系数向量作为隐式变量的。因此,利用位相差异对系统所存在波前畸变进行估计就等同于在高维空间中寻求与式(6)极小化所对应的最优解。

目前,比较流行的非线性全局优化算法主要有蚁群算法、遗传算法以及模拟退火算法^[26]。其中,模拟退火算法由于不十分依赖初始解的选取,可以以一定的概率跳出局部最优,在理论上已经被证明以概率 1 收敛于全局最优。此外,模拟退火算法易于实现,在求解中等规模优化问题时相对较慢的收敛速率也能够被接受,所以本文采用模拟退火算法作为极小化式(6)的手段。

模拟退火算法的全局搜索性能由降温策略及以当前解为基础产生试探解的扰动机制决定。首先,温度下降过快,可能错过极值点;温度下降过慢,则会大大降低算法的收敛速度。指数降温规律性强,能够在降温速度与降温精度之间达到平衡,是首选的降温策略。其次,随机地将微量扰动叠加到当前解上产生新的试探解是最直接的扰动机制。但是,扰动强度过大,有可能使算法的进程出现反复;扰动强度过小,算法可能需要花费很长的时间才能跳出局部极值。因此,本文提出了一种变步长搜索策略,即在退火的初期,对每一轮迭代产生的当前解施加较大的扰动,以提升算法的执行效率;而在退火的中后期,逐渐地减小扰动的强度,使算法能够在接近最优解的邻域中对可能的最优解进行深度挖掘^[27]。

2 PD 技术地面验证试验系统的设计

为了对 PD 位相差异波前反演的效果进行贴近实际应用的检验,以现有平台搭建了地面验证试验系统。

2.1 光学系统光路的重新设计

图 1 为改造后的相机光学系统光路布局示意图。改造后的相机系统保持原有的主次镜组件以及 TDICCD 电子学系统不变,额外增加了准直组透镜、成像组透镜、分光棱镜、高精度扫描摆镜以及 PD 检测焦面等组件。

在高精度扫描摆镜的帮助下,像方摆扫不但能够实现与常规推扫成像等价的效果,而且可以避免大型运动部件所带来的系统复杂度及试验难度增加等问题。分光棱镜将到达 TDICCD 焦面的光束分为两个部分。其中,透射光束到达 TDICCD 焦面,用于正常成像;反射光束则使用系统的中心视场,通过产生位相差异的装置后到达波前畸变检测焦面。检测焦面在获得同一场景具有不同位相差异的图像之后利用 PD 技术反演出畸变波前,之后既可以与干涉仪实测的波前畸变对比得到 PD 技术反演精度的量化评价,也可以用于对 TDICCD 推扫图像进行复原滤波。

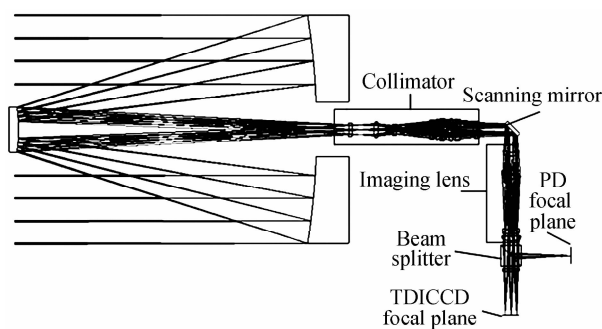


图1 改造后的空间相机光学系统光路布局
Fig.1 Schematic of modified optical system

为减小扫描摆镜部件的尺寸,将摆镜放在前置无焦压缩望远镜(由原始系统主次镜部件与准直镜组构成)即准直镜组出瞳位置的平行光路中.由于压缩比越大,出瞳位置处的有效光束口径就越小,所以减小摆镜尺寸意味着应该采用较大的压缩比.然而,较大的压缩比将使出瞳位置的光束出射角即像方视场也同比例增大.这里选定压缩比为 20,即出瞳位置的光束出射角将达到 6° ,此时成像镜组采用全反射系统在实现上较为困难,所以成像镜组采用折射系统形式.此外,为了保证摆扫前后光学系统成像品质的一致,设计时应尽量使各个视场的出瞳位置保持一致来减小光瞳像差,因此成像组单独的成像质量需要首先得到保证,不能与前组光学系统之间有像差补偿关系,只有这样才能保证摆扫时的成像性能.

在改造后的光路中,由于未对由原始主次镜构成的物镜组的一次像面进行像差校正,所以需要与准直组一起优化来保证出射平行光路的成像质量.为了与准直组的光瞳相匹配,在原始光学系统一次像面附近加入一个场镜.经过优化,最终 20 倍无焦压缩光学系统的光路如图 2,由 9 片透镜组成.在全视场内选取 9 个视场点,图 3 为无焦光学系统的调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)曲线.

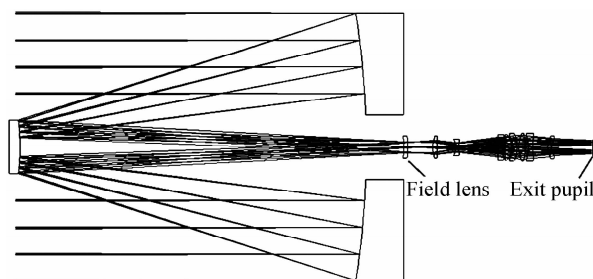
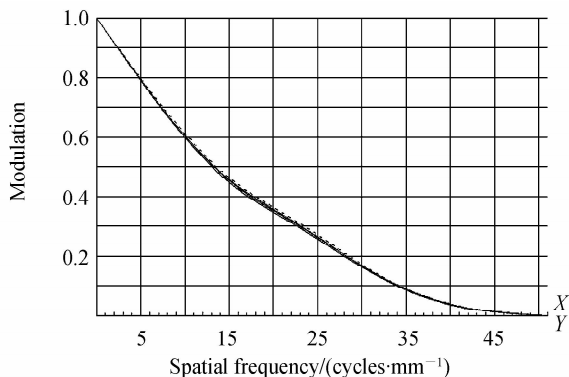
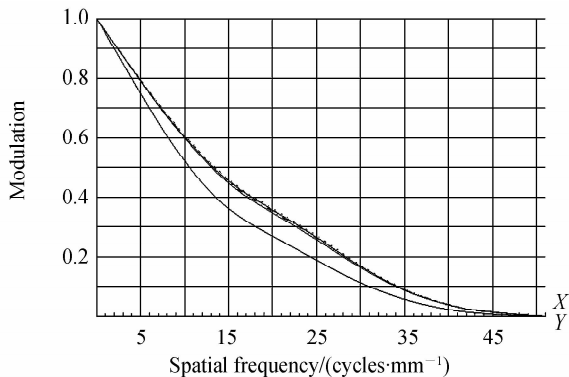


图2 主次镜+准直组 20 倍无焦压缩光路图
Fig.2 $1/20\times$ beam expander generated by combining the primary/secondary mirror component with the subsequent collimated lens



(a) MTF corresponding to different field of view points



(b) MTF corresponding to different field of view points

图3 20 倍无焦压缩光学系统的 MTF 曲线
Fig.3 MTF curves of $1/20\times$ beam expander given in Fig.2

由于压缩比为 20,所以成像组光学系统的设计参数为:焦距为 250 mm,视场角为 6° ,入瞳直径为 25 mm.系统共采用 5 片透镜,孔径光阑位于系统第一面上.如前所述,位于焦面前的分光棱镜将成像光束分

为 TDICCD 主焦面正常成像光束和 PD 焦面检测光束两个部分. 为保证两个光路成像性能的一致,在保持各透镜曲率半径和厚度不变的前提下,仅对各透镜间隔进行调整并得到最终如图 4 所示的成像组光学系统构型.

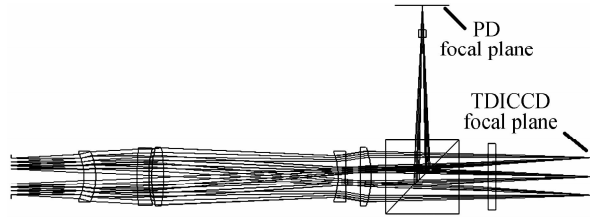


图 4 成像组光学系统光路

Fig. 4 Schematic of optical system used for imaging

利用扫描摆镜将成像组与无焦压缩光学系统合成在一起就完成了试验验证系统光路的重新设计. 图 5 给出了经过重新设计的光学系统的 MTF 曲线. 其中,由图 5(a)可知,成像光路的 MTF 在 50 lp/mm 处的传递函数均在 0.37 以上;而由图 5(b)可知,检测光路的 MTF 在 50 lp/mm 处接近 0.5. 这就意味着,无论是成像光路还是检测光路,均有良好的成像品质,满足试验验证的要求.

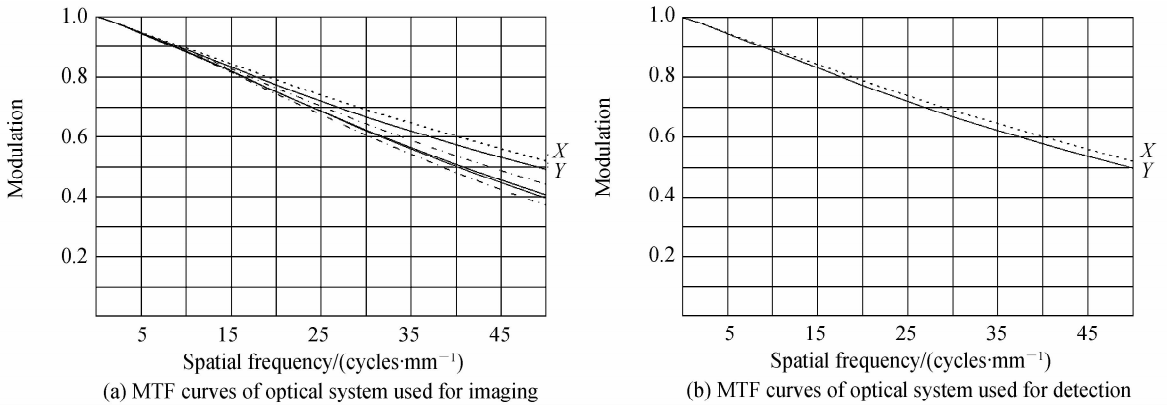


图 5 光路合成后的光学系统 MTF 曲线

Fig. 5 MTF curves of re-combined optical system

2.2 新增部件及总体结构设计

图 6 为准直组件、摆镜组件、成像组件以及检测支路组件与原相机系统大箱体之间的连接关系.

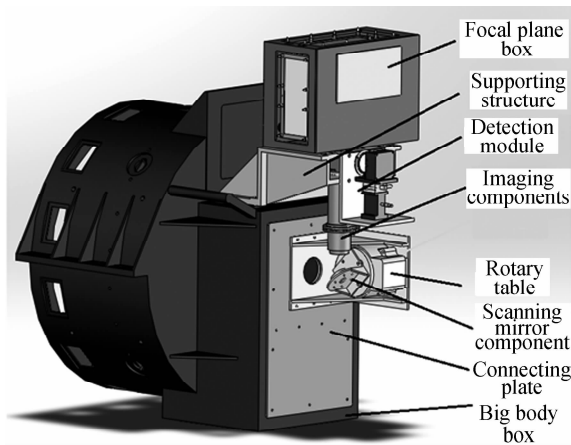


图 6 总体结构形式

Fig. 6 Structure design of modified camera

2.2.1 准直组件结构设计

由图 2 可知,准直组光学元件由 9 片透镜组成,前 3 片透镜构成前组,后 6 片透镜构成后组. 在进行准直组结构设计时,每片镜片先固定在一个镜框中,装配时通过切削镜框的外圆面使镜框外圆面轴心与镜片轴心

重合,前组的3个镜框装在一个镜筒中,后组的6个镜框装在另一个镜筒中.前组和后组都固定到一个连接盘上,再把连接盘安装到相机主次镜组件的主镜座背部.所有结构件都用铝合金材料,通过修磨隔圈、修切垫的厚度调整各光学元件的轴向间隔.

2.2.2 成像组件结构设计

如图6所示,成像组件及焦面箱通过一个铝合金材质大支架(如图7所示)与大箱体连接.

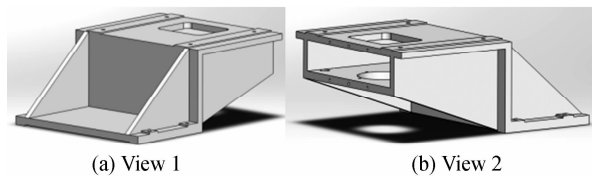


图7 大支架

Fig.7 Supporting structure

成像组由5片透镜组成,直径约40 mm,而总长约为250 mm,属于细长结构,系统同轴度要求小于0.01 mm.如果把所有的镜片都放置在同一个镜筒中,细长的镜筒结构在加工时精度无法保证,同时也给装调带来很大难度.因此,把5片透镜装在两个镜筒中,两个镜筒之间通过孔轴配合和螺钉连接在一起.透镜的安装及装配采用传统的对心加工工艺,可以很好地保证透镜之间的间隔和同轴度,其中镜筒、镜座、压圈与隔圈均采用铝合金材料.图8为成像组结构设计.

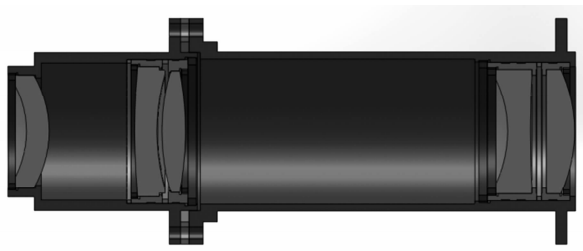


图8 成像组结构示意图

Fig.8 Design of structure used for imaging

同时,为保证分光棱镜与成像组之间的位置关系,通过一个连接法兰把成像组及分光棱镜装配在一起,整体再通过连接法兰与图7所示的大支架连接在一起,如图9.

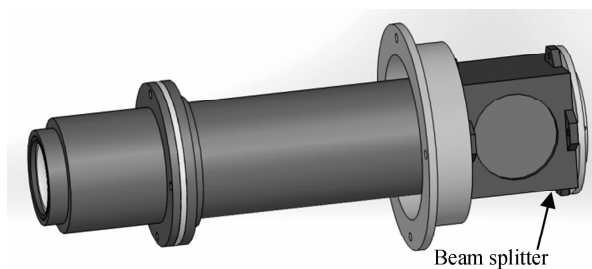


图9 分光棱镜与成像组件装配关系

Fig.9 The assembly relationship between the splitter and the structure used for imaging

2.2.3 高精度扫描摆镜组件

高精度扫描摆镜组件由反射镜、反射镜背板、镜座以及与之相连的转台支架构成.如图10,反射镜首先通过结构胶粘接在反射镜背板上,之后反射镜背板与镜座之间再通过“三顶三拉”的结构设计来调整反射镜的位姿,整个组件通过铝合金材质转台支架与大箱体连接.

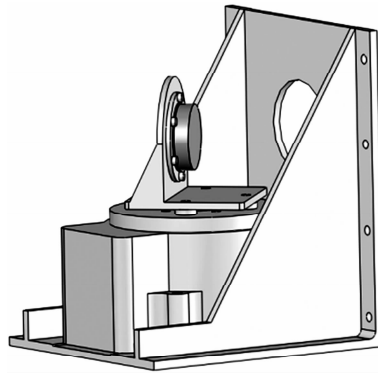


图 10 摆镜组件结构示意图

Fig. 10 Structure design of scanning mirror component

2.2.4 检测支路组件结构设计

在检测支路中,用于波前反演的图像的获取通过高速面阵相机 MVC1281SAM/C-CL500 实现. 相机通过一个 L 形连接板连接在一个三自由度位移台上,可以对焦面进行多自由度调整. 如图 11,通过微分头调节相机焦面沿光轴方向的微量运动来产生引入位相差异所需的离焦. 需要注意的是,焦面必须与光轴高精度的垂直,以消除焦面倾斜所带来的额外离焦对位相差异控制精度的影响. 因此,在相机与连接板之间的合适部位加入垫片,并据此调整探测器两个方向的倾斜,从而调整光轴与探测器的垂直度.

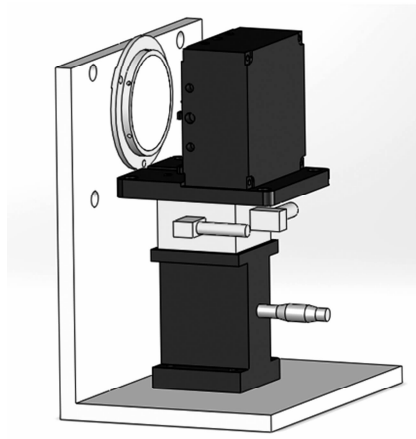


图 11 检测支路整体结构图

Fig. 11 Design of structure used for detection

2.3 完成装配的试验验证相机系统

改造后的相机焦面部分如图 12,将用于 PD 波前反演效果的试验验证.

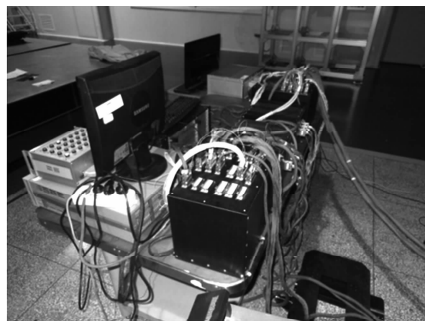


图 12 相机电控箱和视频处理盒及地检设备

Fig. 12 Information processing components

3 PD 波前反演效果试验验证

试验验证由室内和室外两个部分组成. 首先,在实验室内利用 20 m 平行光管在没有大气气流扰动的情

况下对 PD 波前畸变的反演精度进行精确的量化评定. 其次, 开展室外推扫成像试验, 验证利用 PD 技术反演所获得的波前畸变数据在提升退化图像品质方面的能力.

3.1 室内试验及数据分析

室内试验由两个步骤组成:

首先, 由于采用高精度摆镜来模拟等效的推扫成像, 所以通过测定摆镜摆速与焦面光学影像运动速度的对应关系来确定最佳摆扫速度以及与之相匹配的 TDICCD 积分级数, 以此确保获得没有运动模糊的图像.

其次, 通过调节高速面阵相机相对主成像系统焦面的位置人为地产生所需的离焦量, 用以构建波前反演所需的正离焦影像. 之后, 利用反演得到的波前畸变与干涉仪给出的波前畸变进行对比来对波前畸变反演的精度进行量化评价.

高速相机焦平面的调节量由公式 $\epsilon_z = -8(F^\#)^2 \cdot \Delta\tau$ 决定, 其中 $F^\#$ 代表系统的相对孔径(试验中为 10), $\Delta\tau$ 是以泽尼克系数为衡量标准的离焦位相差异, 单位为波长(这里采用 632.8 nm 作为工作波长以便于和干涉仪检测结果进行对比). 研究表明: 最佳的用于产生位相差异的离焦量为 1 个波长, 因此通过上式计算可知, 试验中的离焦量约为 0.51 mm. 图 13 和图 14 为高速相机采集的正焦和离焦分辨率靶标图像对.

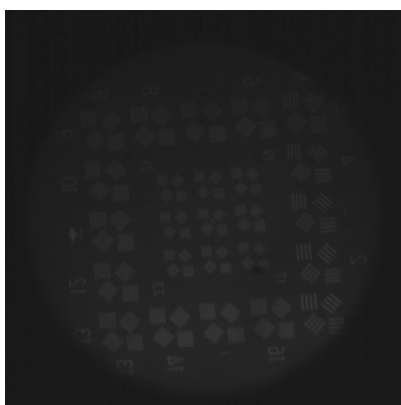


图 13 正焦靶标图像

Fig. 13 Dart image with no defocus

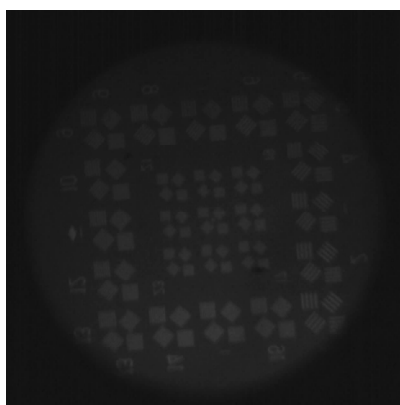


图 14 离焦 0.51 mm 靶标图像

Fig. 14 Dart image with 0.51 mm defocus

以图 13 和图 14 为数据源, 利用 PD 算法获得的反演后的波前畸变如图 15 所示. 与此同时, 图 16 给出了改造后的相机系统基于 Zygo 干涉仪获得的实测波前. 可以看到, 两者是非常相似的. 图 17 为反演重构的波前畸变与干涉仪实测波前畸变之间的残差, 并据此得到残差波前的 RMS 约为 0.0248λ (632.8 nm), 接近 1/40λ, 证明 PD 技术具有较高的精度.

需要指出的是, 位相差异波前反演技术的理论精度可以接近 1/100λ, 但是实际应用中能够达到的精度与多种因素有关. 通常来讲, PD 只适用于中小尺度波前畸变情况, 超过 1.6 个波长的波前畸变就会导致反演精度的迅速降低^[28]; 产生位相差异离焦量的最佳数值约在 1 个波长左右^[17, 28-29], 但是实际产生的离焦量与理想值之间肯定存在偏差, 这同样会导致反演精度的降低, 因此必须将偏差量作为待优化的变量纳入计算框架中, 以牺牲反演速度为代价保证反演精度^[23]; 探测器噪声水平以及目标对比度与成像环境密切相关, 室内外光照条件不同会引起图像信噪比及目标对比度的改变, 从而影响波前的反演精度^[28].

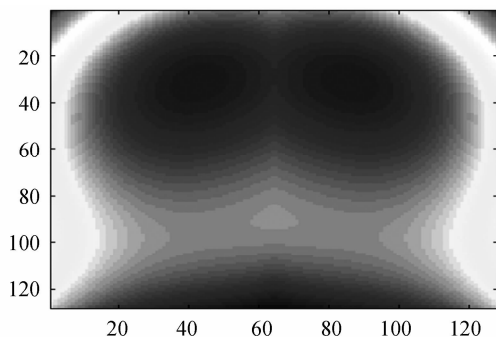


图 15 PD 反演重构波前

Fig. 15 Re-constructed wave-front through PD

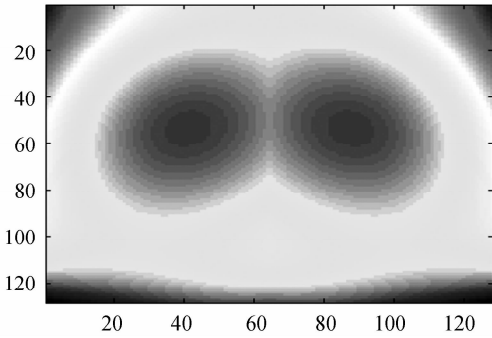


图 16 干涉仪实测波前

Fig. 16 Really obtained wave-front through Zygo

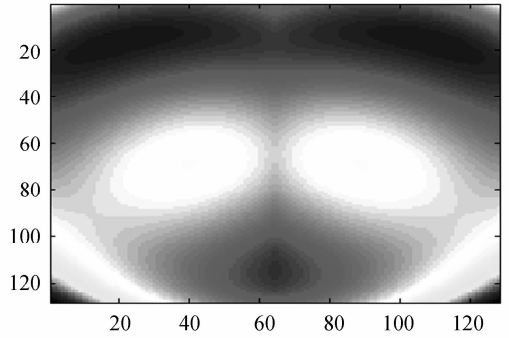


图 17 波前残差

Fig. 17 Residual wave-front

3.2 室外推扫成像试验

室外推扫实验主要完成 PD 波前畸变检测技术在自然工作环境下工作性能的验证,并利用采集的数据对图像复原与增强模型进行测试,图 18 为室外实验现场,图 19 为室外成像环境(三角指向为成像目标)。



图 18 室外实验现场

Fig. 18 Site where the experiments were carried out



图 19 室外成像环境

Fig. 19 Scenario that will be imaged

与实验室验证试验不同的是,在进行室外推扫成像试验的时候,直接利用 TDICCD 焦面产生正焦推扫和离焦推扫图像,并以此为基础进行波前反演并同步实施针对正焦推扫图像的复原。

首先,依据室内实验的标定和对摆镜摆速与焦面影像运动速度关系的分析结果将相机 TDICCD 单级积分时间设定为 $214.8 \mu\text{s}$,摆镜摆速设为 5.4,实现速度匹配的正常推扫成像,72 级积分条件下的一个通道的正焦成像效果以及离焦 0.51 mm 的成像效果如图 20 所示.显而易见,此时由于相机系统波前畸变以及室外大气湍流的影响,推扫图像无论是正焦还是离焦,均呈现出较为明显模糊退化。

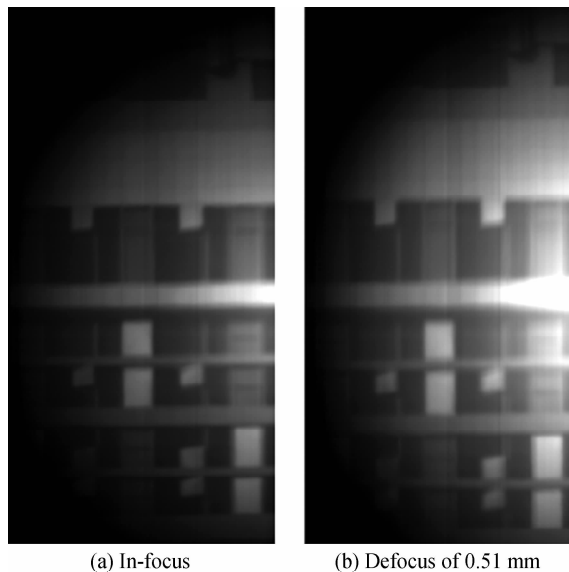


图 20 正常推扫时的正焦和离焦 0.51 mm 图像

Fig. 20 In-focus and 0.51 mm defocus image obtained through normal push-broom imaging

其次,利用图 20 的正离焦图像对波前畸变进行估计,并以此为基础采用 Richardson-Lucy 算法对两

个通道拼接之后正焦推扫退化图像进行复原滤波. 如图 21, 经过复原滤波后的正焦推扫图像的对比度和清晰度得到了较大的提升.

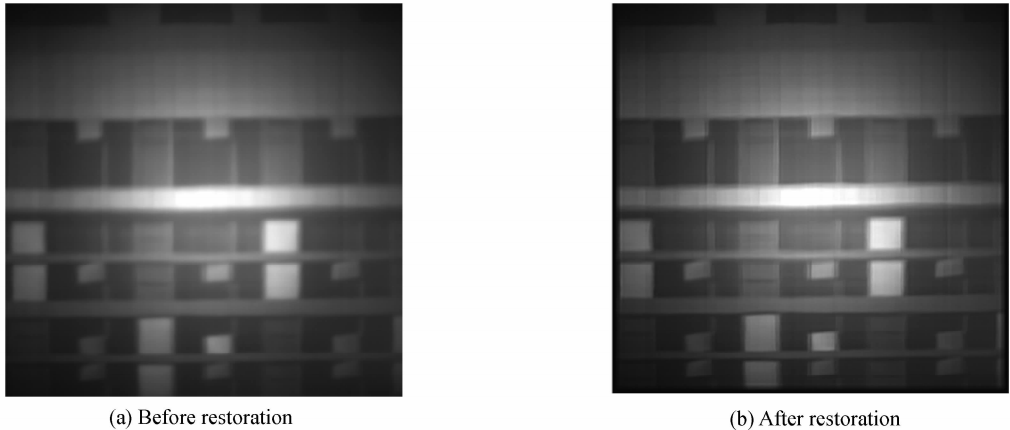


图 21 复原滤波之前和之后的正焦推扫图像

Fig. 21 In-focus push-broom image before and after restoration

图 22 给出了另外一组推扫图像复原前与复原后的效果对比, 同样证明了基于实测波前畸变提升图像质量的有效性.



图 22 另外一组经复原滤波前后的正焦推扫图像对比

Fig. 22 Another comparison between in-focus push-broom image before and after restoration

利用 Imatest 公司的基于倾斜刃边法的 MTF 测试软件对复原前后的系统 MTF 进行量化计算. 结果表明: 复原前 50 lp/mm 处的 MTF 为 0.0285, 而复原后的 MTF 显著提升到了 0.168. 与此同时, 复原前图像的信噪比约为 27.82 dB, 而复原后的信噪比也显著提升到了 48.59 dB. 因此, 室外推扫成像试验实际上从另外一个角度间接地证明了 PD 波前畸变反演算法的精度.

4 结论

本文基于现有平台, 开展了 PD 位相差异波前传感技术贴近实际应用的试验研究. 在保留原始空间相机系统主次镜部件以及 TDICCD 电子学系统的前提下, 对相机光学系统进行了重新设计和优化, 将原始成像光路分为到达 TDICCD 的主成像光路以及用到达高速面阵探测器的用于波前畸变反演的检测光路, 并且两个光路均能够实现高品质成像. 试验表明: 以干涉仪实测波前与反演波前的残差均方根误差 RMS 作为评价标准, 基于 PD 技术的波前反演精度可达约 $1/40\lambda$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$). 与此同时, 利用反演波前所进行的图像复原表明, 复原后图像信噪比的提升量优于 40%, 奈奎斯特频率处 MTF 的提升量超过 80%, 从而也间接地证明了 PD 波前反演技术的实际效能.

参考文献

- [1] FENG Sheng, WU Jian, ZHENG Chun-yan. Radial shearing interferometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(S):188-192.
冯胜, 吴健, 郑春燕. 径向剪切干涉仪[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(S):188-192.
- [2] HE Li-ping, WANG Ying-jian, FAN Cheng-yu. Measurement of the phase distortion for a laser beam propagating

- through the atmosphere by a lateral shear interferometer[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, **18**(S):92-96.
- 何丽萍,王英俭,范承玉. 利用剪切干涉仪测量激光大气传输相位畸变[J]. 量子电子学报, 2011, **18**(S):92-96.
- [3] LIU Ruo-fan, SHEN Feng. Study on algorithm for wavefront reconstruction of curvature sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(10):6-9.
- 刘若凡,沈锋. 曲率波前传感器波前重构算法的研究[J]. 光电工程, 2005, **32**(10):6-9.
- [4] SHEN Hong-bin, SUN Yu-jie, ZHANG Chu, *et al.* Signal error of wavefront curvature sensor for detecting Gaussian beam[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, **30**(3):427-431.
- 沈洪斌,孙玉杰,张雏,等. 曲率波前传感器探测高斯光束时的信号误差[J]. 应用光学, 2009, **30**(3):427-431.
- [5] SHEN Hong-bin, ZHANG Chu, SHEN Xue-ju, *et al.* Technology of curvature wavefront sensor for adaptive optics[J]. *OME Research Forum*, 2008, **7**:36-42.
- 沈洪斌,张雏,沈学举,等. 自适应光学系统中的波前曲率传感技术[J]. 光机电信息, 2008, **7**:36-42.
- [6] CHEN Xin-yang, ZHU Neng-hong. The design of software simulation based on pyramid wavefront sensor[J]. *Progress in Astronomy*, 2006, **24**(4):363-372.
- 陈欣扬,朱能鸿. 基于四棱锥传感器的波前检测仿真设计[J]. 天文学进展, 2006, **24**(4):362-372.
- [7] ZHU Neng-hong, CHEN Xin-yang, ZHOU Dan, *et al.* Study on measuring piston error of segmented mirror using pyramid sensor[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, **22**(3):433-437.
- 朱能鸿,陈欣扬,周丹,等. 利用四棱锥传感器检测光学拼接镜的法向光程差[J]. 传感技术学报, 2009, **22**(3):433-437.
- [8] YUAN Ke-e, ZHU Wen-yue, RAO Rui-zhong, *et al.* Measurement of scintillation effect of light propagating through atmospheric turbulence by Shack-Hartmann sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 200, **36**(S2):436-439.
- 苑克娥,朱文越,饶瑞中,等. 基于 Shack-Hartmann 波前传感器的湍流大气光闪烁测量[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(S2):436-439.
- [9] HU Xin-qi, YU Xin, ZHAO Da-zun. Influence of scene structure and noise on precision of correlating Hartmann-Shack wavefront sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8):1414-1418.
- 胡新奇,俞信,赵达尊. 目标图像结构和噪声对相关哈特曼-夏克波前传感精度的影响[J]. 光学学报, 2007, **27**(8):1414-1418.
- [10] RAO Chang-hui, ZHANG Xue-jun, JIANG Wen-han. Simulation study on correlation Hartmann-Shack wavefront sensor for solar granulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3):285-289.
- 饶长辉,张学军,姜文汉. 太阳米粒结构相关哈特曼-夏克波前传感模拟研究[J]. 光学学报, 2002, **22**(3):285-289.
- [11] HU Xin-qi, YU Xin, ZHAO Da-zun. A new wavefront reconstruction method for correlating Hartmann-Shack wave front sensor[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(5):710-713.
- 胡新奇,俞信,赵达尊. 相关哈特曼-夏克波前传感器波前重构新方法[J]. 光学技术, 2007, **33**(5):710-713.
- [12] GONSALVES R A, CHIDLAW R. Wavefront sensing by phase retrieval[C]. SPIE, 1979, **207**:32-39.
- [13] PAXMAN R G, FIENUP J R. Optical misalignment sensing and image reconstruction using phase diversity[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1988, **A5**:914-923.
- [14] CHUNG S J, DAVID W M, WECK O L. ARGOS tested: study of multidisciplinary challenges of future space borne interferometric arrays[J]. *Optical Engineering*, 2004, **43**(9):2156-2167.
- [15] YOUNG D D, DILLOW J, CORCORAN S. Ground demonstration of an optical control system for a space-based sparse aperture telescope[C]. SPIE, **3356**:1156-1167.
- [16] ZARIFIS V, BELL JRM, BENSONL R, *et al.* The multi aperture imaging array[C]. Proceedings from ASP Conference, 1999, 194.
- [17] LI Qiang, SHEN Mang-zuo. Wavefront sensing using phase diversity method[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(11):114-119.
- 李强,沈忙作. 基于位相差法的波前检测技术[J]. 光电工程, 2006, **33**(11):114-119.
- [18] YANG Lei, LIU Zhong, JIN Zhen-yu, *et al.* The effect of uncertainty in defocus distance on the wave-front reconstruction with the phase diversity algorithm[J]. *Astronomical Researching and Technology*, 2009, **6**(1):44-50.
- 杨磊,刘忠,金振宇,等. 离焦量误差对位相差法波前重构的影响[J]. 天文学研究与技术, 2009, **6**(1):43-50.
- [19] LIANG Shi-tong, YANG Jian-Feng, XUE Bin. A new phase diversity wave-front error sensing method based on genetic algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4):1015-1019.
- 梁士通,杨建峰,薛彬. 基于遗传算法的改进位相差法波前误差传感技术研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(4):1015-1019.
- [20] WANG Zong-yang, WANG Jian-li, WANG Bin, *et al.* Image restoration based on phase diversity[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(12):25-29.
- 汪宗洋,王建立,王斌,等. 基于位相差异的图像复原方法[J]. 光电工程, 2010, **37**(12):25-29.
- [21] ZHANG A H, WANG T T. Algorithm study of phase diverse speckle corrective technique[C]. SPIE, 6595, 65951D.

- [22] WANG Xin, ZHAO Da-zun. Influence of noise to phase diversity wavefront sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8):2142-2146.
王欣, 赵达尊. 图像噪声对相位变更波前传感的影响研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(8): 2142-2146.
- [23] DOLNE J J, TANSEY R J, BLACK K A, *et al.* Practical issues in wave-front sensing by use of phase diversity[J]. *Applied Optics.*, 2003, **42**(36): 5284-5289.
- [24] FAULKNER M, RODENBURG J M. Movable aperture lensless transmission microscopy: a novel phase retrieval algorithm[J]. *Physical Review Letters*, 2004, **93**: 023903.
- [25] SMITH J S, ARONSTEIN D L, DEAN B H, *et al.* Phase retrieval on broadband and under-sampled images for the JWST tested telescope[C]. SPIE, 2009, 7436:7436D.
- [26] 梁旭, 黄明. 现代智能优化混合算法及其应用[M]. 电子工业出版社, 2012.
- [27] 赵惠. 应用于位相差异波前传感的分段变步长模拟退火方法[P]. 中国: 201610260098.3[P]. 2016-04-25.
- [28] 程强. 基于 PD 技术的空间相机位相信息反演技术研究[D]. 长春: 中科院长春光机所, 2013.
- [29] YI Hong-wei, LI Ying-cai, FAN Chao, *et al.* A new method of phase diversity wave-front sensing based on SOFM NN [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1373-1377.
易红伟, 李英才, 樊超, 王娇. 基于自组织映射神经网络的位相差异波前传感新方法[J]. 光子学报, 2008, **37**(7):1373-1377.