

基于宽光谱相位差异技术的波前检测

程 强 薛 栋 林

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 阐述了基于相位差异(PD)的波前传感技术的基本原理,并将该技术的应用领域由单色光或准单色光拓展为宽光谱照明。在大量计算机模拟仿真的基础上,设计了宽光谱PD技术的验证实验。用积分球照明作为光源,在实验室搭建了某相机调制传递函数测试实验平台,利用宽光谱PD技术进行波前解算和最佳焦面位置的确定,并对所采集的图像进行复原处理。此外,针对某相机的外场成像实验所采集的图像,利用宽光谱PD技术进行解算,得到了相机成像时的波前像差。实验结果表明:利用宽光谱PD技术解算得到的波前与干涉检验结果的均方根(RMS)偏差小于 0.03λ ,解算得到的焦面位置与测试得到的理想焦面位置偏差小于 0.03 mm ,检测精度满足工程实际需求。

关键词 图像处理;宽光谱相位差异;波前传感;图像复原;成像实验;调制传递函数测试

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0508001

Wavefront Testing Based on Broadband Phase Diversity Technology

Cheng Qiang Xue Donglin

Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract The basic principles of wavefront sensing based on phase diversity (PD) are introduced. And the phase diversity is extended from monochromatic or quasi-monochromatic light illumination to broadband spectrum light illumination. Based on lots of computer simulation and analysis, the validation experiment of broadband PD technology is designed. The integrating sphere is used as the light source, and the modulation transfer function (MTF) testing experiment of some optical system is established in the lab. The wavefront of optical system and the best position of focal plane are calculated by broadband PD technology, and the images collected are restored. Furthermore, the outfield imaging experiment is designed. The broadband PD is applied to solve the wavefront aberration according to the images collected. The result shows that the difference between wavefront aberration solved by broadband PD and the root mean square (RMS) of interferometric testing result is less than 0.03λ , and the difference of focal plane position solved by PD and MTF testing is less than 0.03 mm . The testing precision of broadband PD satisfies the requirement of engineering.

Key words image processing; broadband phase diversity; wavefront sensing; image restoration; imaging experiment; modulation transfer function (MTF) testing

OCIS codes 100.5070; 010.7350; 100.3020; 110.6770

1 引 言

空间对地观测技术已经成为衡量一个国家高科技发展水平的重要标志。随着空间对地观测需求的不断提高,对空间相机制造水平及在轨成像质量的要求也越来越高。然而,由于卫星在发射过程中的各种力学因素以及在轨成像时复杂热环境的影响,空间相机在轨成像时的波前质量相比地面装调结果有一定的程度的下降,最终导致光学系统成像质量达不到理想的效果。由于空间相机在轨环境的特殊性,无法使用地

收稿日期: 2014-11-04; 收到修改稿日期: 2014-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(61036015)、国家973计划(2011CB0132005)、国家863计划(08663NJ090)

作者简介: 程 强(1986—),男,博士,助理研究员,主要从事光学系统波前传感技术、光学系统集成分析与像质提升技术等方面的研究。E-mail: chengq@ciomp.ac.cn

面常规的波前检测手段。相位差异(PD)技术正是针对光学系统波前像差兴起的波前检测技术,它利用光学系统焦面和离焦面上所成的一对图像,通过大规模多变量寻优的过程,解算光学系统的波前位相信息。与干涉检验、哈特曼波前传感器等地面传统的波前检测手段相比,该技术具有光路简单,所需硬件条件少,无需附加检测设备等优点,且摆脱了多数波前传感技术对点目标的依赖,同时适用于点目标和随机扩展目标,在空间在轨应用领域具有明显的优势。此外,PD技术还广泛应用于大口径地基望远镜的装调、空间可展开子镜共相检测等领域^[1-11]。因此,PD技术是目前光学系统波前传感技术发展的一个重要方向。

对于单色光或准单色光照明的PD技术,国内的北京理工大学^[12]、中国科学院西安光学精密机械研究所^[5]、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所^[13]等科研机构以及美国的洛克希德—马丁公司和亚利桑那大学都做了大量的计算机模拟仿真和实验验证工作,充分证明了PD技术对于光学系统波前检测的可行性^[14-16]。然而,光学系统的实际成像条件往往不是单色光或准单色光照明,而是宽光谱照明。所以,为了将PD技术应用于工程实际中光学系统的波前检测,需要将该技术的应用领域进一步拓展。

本文将PD技术的应用领域拓展至宽光谱照明条件,并在理论推导和大量计算机模拟仿真的基础上,设计了宽光谱PD技术的验证实验。基于某相机调制传递函数(MTF)测试所采集的图像,利用宽光谱PD技术进行波前解算和最佳焦面位置的确定;此外,还针对某相机外场成像所采集的图像,利用宽光谱PD技术进行波前解算及图像复原。结果表明,宽光谱PD技术解算系统波前和最佳焦面位置的精度满足工程实际需求。

2 PD技术的算法模型

2.1 单色光或准单色光PD技术

PD技术通常需要至少两个通道分别对未知的目标物体成像,这两个通道之间存在某种已知的相位差,通常选用离焦位相差,分别定义为焦面通道和离焦通道。两个通道的成像可表示为

$$i_k(x, y) = o(x, y) * P_{\text{sfk}}(x, y) + n_k(x, y), \quad (1)$$

式中 k 表示通道数($k=1,2$), i_k 表示第 k 通道所成图像, $o(x, y)$ 表示未知的目标物体, P_{sfk} 表示第 k 通道的点扩展函数, n_k 表示第 k 通道的加性高斯噪声, $*$ 是卷积运算符。

由傅里叶光学理论可知,衍射受限光学系统的点扩展函数可表达为光瞳函数的自相关,即

$$O_{\text{TF}}(u, v) = P(x, y) \otimes P(x, y), \quad (2)$$

式中 $P(x, y)$ 表示光瞳函数, O_{TF} 为光学传递函数,即 P_{sf} 的傅里叶变换, \otimes 表示自相关运算符。光瞳函数 $P(x, y)$ 可表示为

$$P(x, y) = A(x, y) \exp\{i[\phi(x, y) + \phi_d(x, y)]\}, \quad (3)$$

式中 $A(x, y)$ 为振幅函数, $\phi(x, y)$ 为未知位相, $\phi_d(x, y)$ 为已知离焦位相, $\phi(x, y)$ 可以分解为Zernike多项式的和,即

$$\phi(x, y) = \sum_{i=1}^K a_i Z_i(x, y), \quad (4)$$

式中 a_i 表示第 i 项Zernike系数, $Z_i(x, y)$ 为第 i 项Zernike基底。

由此可见,只要求得Zernike多项式各项的系数,就可以得到光学系统成像时的未知像差,重建得到系统的退化函数并进一步复原得到未知目标的清晰图像,克服光学系统成像时未知像差的影响。

在加性高斯噪声条件下,建立评价函数 E , 表示为

$$E(O, a) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 \sum_{u \in X} [O(u)O_{\text{TFk}}(u) - I_k(u)]^2 + \frac{\gamma}{2} |O(u)|^2, \quad (5)$$

式中 $O(u)$ 、 $I_k(u)$ 分别为 $o(x)$ 、 $i_k(x)$ 的傅里叶变换,等式右边第二项为Tikhonov正则项,可以有效地提高算法的稳定性和收敛效率, γ 表示非负的正则项系数。

经过一系列数学推导,得到与未知目标无关的评价函数,可表达为

$$E(a, u) = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{u \in \lambda} \left[|I_1(u)|^2 + |I_2(u)|^2 \right] - \left| \frac{I_1^*(u)O_{TF2}(u) - I_2^*(u)O_{TF1}(u)}{\gamma + |O_{TF1}(u)|^2 + |O_{TF2}(u)|^2} \right|^2 \right\}. \quad (6)$$

应用大规模多变量寻优算法迭代搜索使式最小的 Zernike 系数,也可以进一步重构退化函数,恢复降质图像。

2.2 宽光谱 PD 技术

这里宽光谱的定义是广义的,即只要它的光谱成分多于一种波长,无论是连续光谱或线状光谱,甚至只有几条谱线,都可以称之为宽光谱。假设光学系统是严格消色差的,即反射系统或采用双胶合透镜的简单折射系统。当不同波长的光之间非相干时,按照强度叠加原理,宽光谱的点扩展函数应为单色光的点扩展函数加权重的叠加,且光学系统所成图像可以表达为未知目标与宽光谱点扩展函数卷积的形式^[17],表达为

$$i(x, y) = o(x, y) * \overline{P_{SF}}(x, y, \lambda), \quad (7)$$

式中 $\overline{P_{SF}}$ 表示宽光谱点扩展函数,

$$\overline{P_{SF}}(x, y) = \int_{\lambda} \omega(\lambda) P_{SF}(x, y, \lambda) d\lambda, \quad (8)$$

式中 $P_{SF}(a, x, \lambda)$ 为波长为 λ 的单色光成像时的点扩展函数, $\omega(\lambda)$ 是所加的权重因子,它应为三项乘积,即

$$\omega(\lambda) = P(\lambda)\tau(\lambda)V(\lambda), \quad (9)$$

式中 $P(\lambda)$ 是照明光源的光谱能量分布, $\tau(\lambda)$ 是系统的光谱透射率, $V(\lambda)$ 是探测器的光谱响应函数。

由此,基于上述假设的宽光谱点扩展函数简化为只与照明光源的光谱能量分布、系统的光谱透射率和探测器的光谱响应有关的函数。

由上述分析可知,只要能够准确求得权重因子 $\omega(\lambda)$ 并将谱段无限细分,就可以将单色光或准单色光 PD 技术拓展为宽光谱 PD 技术。在实际工程中,考虑到计算效率等因素的影响,宽光谱采样间隔无法无限细分,所以需要在解算精度和效率二者之间寻求平衡,分析得到最佳的波长采样策略。

当最佳波长采样策略确定后,就得到了在光谱范围内的光谱采样次数 M ,则在宽光谱 $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ 的范围内,采样间隔为 $|\lambda_{\max} - \lambda_{\min}|/(M - 1)$,则(10)式的积分形式就可以转化为加和的形式:

$$\overline{P_{SF}}(x, y) = \sum_{i=1}^M \omega(\lambda_i) P_{SF}(x, y, \lambda_i), \quad (10)$$

式中 $\omega(\lambda_i) = P(\lambda_i)\tau(\lambda_i)V(\lambda_i)$ 。

当宽光谱点扩展函数 $\overline{P_{SF}}$ 构建完成后,便可以通过二维离散傅里叶变换得到宽光谱的光学传递函数 $\overline{O_{TF}}$,代入到评价函数的表达式 E 中,即将宽光谱 PD 技术归纳为理论模型已相对成熟的单色光 PD 技术。同理,在评价函数的表达式 E 中,未知量只有 Zernike 系数,同样应用高斯-牛顿法^[18]使 E 取得最小值,则得到一组最优的 Zernike 系数,利用该组系数及权重因子 $\omega(\lambda)$,即可进一步构建得到宽光谱的点扩展函数。

2.3 波长采样策略

在波长采样策略的选择时,重点考虑一个小的波长区间 $\left[\lambda - \frac{\Delta\lambda}{2}, \lambda + \frac{\Delta\lambda}{2} \right]$ 对点扩展函数的影响^[19]。这里分析点扩展函数在两个波长 $\lambda + \frac{\Delta\lambda}{2}$ 与 $\lambda - \frac{\Delta\lambda}{2}$ 处存在一个放大倍率,定义为 M ,即有

$$M_{\left[\lambda - \frac{\Delta\lambda}{2}, \lambda + \frac{\Delta\lambda}{2} \right]} = \frac{2\lambda + \Delta\lambda}{2\lambda - \Delta\lambda}. \quad (11)$$

若限定放大率 M 不大于 μ ,那么可以得到

$$\frac{2\lambda + \Delta\lambda}{2\lambda - \Delta\lambda} \leq \mu. \quad (12)$$

进一步推导,可得

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \leq \frac{2(\mu - 1)}{\mu + 1}. \quad (13)$$

根据经验,需要在小的波长区间范围内点扩展函数的增加量小于 5%,即在(13)式中, $\mu = 1.05$,可得 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \leq 0.049$ 。

3 宽光谱 PD 技术的计算机模拟仿真

根据上述波长采样策略,对宽光谱 PD 技术的解算精度做了仿真分析。这里将某相机探测器实测的光谱响应曲线作为模拟仿真的输入,如图 1 所示。仿真分析是基于实测的照明光源光谱能量分布的,并认为所模拟的系统是严格消色差的,其中心波长为 632.8 nm,焦距为 2000 mm,光瞳直径为 222 mm,探测器像元尺寸为 $9\ \mu\text{m}\times 9\ \mu\text{m}$,所采集焦面图像和离焦图像的尺寸为 128 pixel \times 128 pixel。

由图 1 可知,探测器的响应光谱范围为 400~1100 nm,由上述波长采样策略的分析结论可知, $\Delta\lambda \leq 34.3\ \text{nm}$ 。据此,模拟分析了不同波长采样间隔下 PD 技术的解算精度。根据 PD 技术解算得到的 Zernike 系数,构建点扩展函数,运用 Lucy-Richardson(LR)算法进行图像复原,最后评价复原图像与原始图像的相似程度。

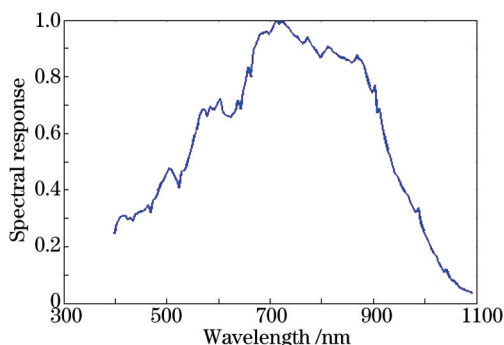


图 1 实测的 CCD 光谱响应

Fig.1 Spectral response of CCD

光学系统的波前波像差常用均方根(RMS)来表示。评价复原图像与原始图像的相似程度,这里引入基于图像结构与人眼视觉特性的全参考图像质量评价方法:结构相似度(SSIM)^[20]。SSIM 方法从图像组成的角度理解结构信息,将结构信息定义为图像中独立于亮度、对比度,反映场景中物体结构的属性,其相似度值用 MSSIM 表示。在不同的波长采样间隔下,宽光谱 PD 技术的解算精度及复原图像与原始图像的相似程度如表 1 所示。

表 1 不同采样间隔时宽光谱 PD 技术的解算精度及图像相似度

Table 1 Calculation precisions and similarities by broadband PD technology with different sampling intervals of wavelength

Sampling intervals of wavelength /nm	RMS values of calculation precision / λ	MSSIM values
5	0.0008741	0.9989
10	0.0009473	0.9937
15	0.001218	0.9875
20	0.001890	0.9803
25	0.002349	0.9725
30	0.003174	0.9604
35	0.004336	0.9487
40	0.005548	0.9363
45	0.007931	0.9240
50	0.01193	0.8904

图 2 和图 3 分别分解算精度 RMS 和结构相似度 MSSIM 随波长采样间隔的变化。由表 1 和图 2、3 可以看出,随着波长采样间隔的逐渐增大,PD 技术解算精度的 RMS 值也在不断增大,而复原图像与原始图像的结构相似度 MSSIM 值在逐渐减小。当波长采样间隔不超过 30 nm 时,结构相似度 MSSIM 值均大于 0.95,表明复原图像的质量较好,与原始图像的相似程度较高。

通过上述模拟分析,验证了针对宽光谱照明条件下的 PD 技术应用波长采样策略的可行性和解算结果的准确性。

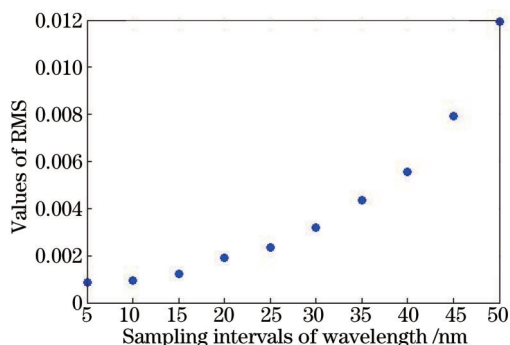


图2 解算精度RMS值随波长采样间隔的变化

Fig.2 RMS values of calculation precision versus sampling intervals of wavelength

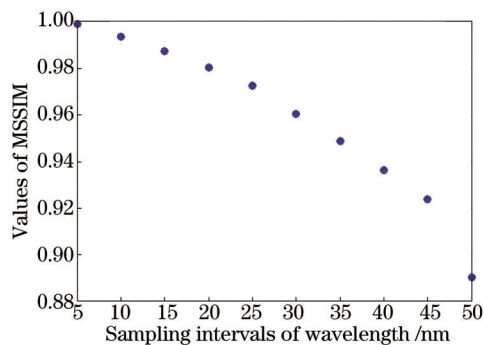


图3 结构相似度MSSIM值随波长采样间隔的变化

Fig.3 MSSIM values versus the sampling intervals of wavelength

4 宽光谱PD技术的实验验证

4.1 基于MTF测试平台的成像实验

在某相机调制传递函数(MTF)的测试过程中,基于所采集的图像,利用宽光谱PD技术进行波前解算和最佳焦面位置的确定,其实验结构如图4所示。整个成像实验装置位于一个大的隔振平台上,积分球照亮位于平行光管焦点处的分辨率靶标来模拟无穷远处的目标物体,被测光学系统与六维调整机构相连接并放置在热真空罐内,通过对定制的黑白靶条成像来进行MTF测试。光学系统的 F 数为11,宽光谱的中心波长为650 nm,即系统焦深为0.1573 mm。由之前的模拟分析可知^[13],为使PD技术解算精度较高,两幅图像之间的相对离焦距离应为4倍焦深,即0.6292 mm。在本相机中,调焦镜的调整距离应为上述距离的一半,即0.3146 mm。

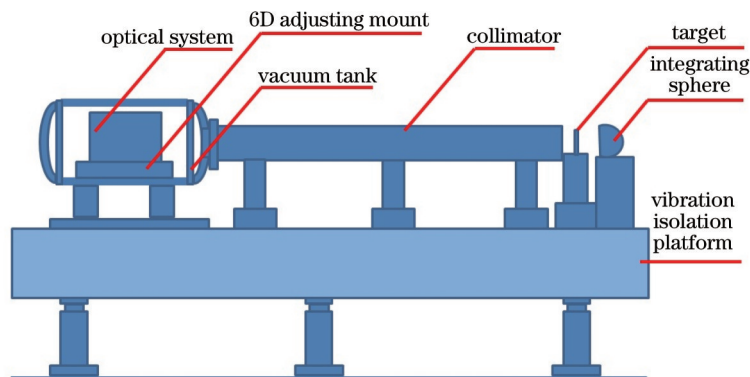


图4 基于MTF测试平台的PD技术成像实验结构图

Fig.4 Structure of imaging experiment by PD technology based on MTF testing platform

在成像实验过程中,固定光学系统中调焦镜的位置,首先采集一幅图像,然后将调焦镜向远离焦平面的方向移动0.3146 mm,再采集一幅相对离焦图像。基于实测的照明光谱特性,将采集得到的两幅图像代入到已编制完成的算法程序中,解算得到光学系统成像时的系统波像差和理想焦面位置。分别进行三组成像实验,其解算结果如表2所示,其中 Z_4 为Power项,在系统波像差检测时为调整量,一般需要去掉,所以这里计算波像差RMS值时只考虑 $Z_5 \sim Z_9$ 。

由表2可以看出,三组成像实验解算得到的波像差RMS值基本一致,且与光学系统装调完成后的检测结果 $\lambda/14$ RMS非常接近,偏差均小于0.02 λ RMS;根据文献[13]中的表达式: $\varepsilon_z = -8F^2 \Delta\omega$,将三组结果中 Z_4 的值分别代入公式的 $\Delta\omega$ 中($\lambda = 650$ nm),得到 ε_z 的值分别为-0.3259、-0.3400、-0.3474 mm,折算到折叠镜位移为-0.1629、-0.1700、-0.1737 mm,这与MTF测试时确定的折叠镜应远离焦平面移动0.175 mm基本一致,解算焦面位置偏差均小于0.03 mm,与被检光学系统的焦深0.1573 mm相比,焦面位置的解算精度满足工程应用需求。根据宽光谱PD技术的解算结果构建系统的点扩展函数并利用LR算法进行图像复原,结果如图5所示,其中图5(a1)~(a3)为原始焦面图像,图5(b1)~(b3)为复原图像。可以看出,与原始图像相比,复原后

表2 三组实验结果的 Zernike 系数及 RMS 值对比

Table 2 Comparison of Zernike coefficients and RMS values in three groups of experiment

Zernike item	Coefficients / λ		
	No.1	No.2	No.3
Z_4	0.5179	0.5403	0.5521
Z_5	-0.1282	-0.1196	-0.1314
Z_6	-0.0807	-0.0946	-0.0959
Z_7	0.0610	0.0415	0.0397
Z_8	-0.0195	-0.0338	-0.0323
Z_9	-0.0307	-0.0418	-0.0295
RMS ₅₋₉ / λ	0.0673	0.0677	0.0701

的图像条纹清晰,层次分明,图像质量有了一定程度的提高。

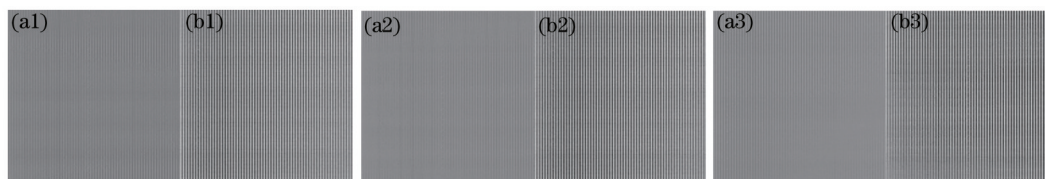


图5 三组实验结果中原始焦面图像与复原图像的对比

Fig.5 Comparison of original focal images and restored images in three groups of experiment

4.2 基于外场成像的验证实验

针对某相机外场成像实验所采集的不同调焦镜位置的图像,利用宽光谱 PD 技术进行解算,得到相机外场成像时的波像差及最佳焦面位置。在外场成像实验中,首先选定拍摄目标,利用转台旋转来进行推扫成像,实现图像采集。同理,可以计算得到调焦镜的调整距离为 0.2106 mm。

对于所采集的图像,处理步骤为:1) 在多幅图像中,选取包含特征景物,不同调焦镜位置(即不同离焦距离)的两幅图像;2) 在步骤 1) 的两幅图像中,截取包含特征物体的尺寸较大的图像并代入图像配准程序中,解算二者之间的二维相对位移;3) 根据步骤 2) 中的解算结果截取不含相对位移的 128 pixel \times 128 pixel 两幅小图;4) 将步骤 3) 中的两幅小图代入宽光谱 PD 技术的算法程序中,解算得到该相机外场成像时的系统波像差和最佳焦面位置;5) 根据解算结果构建退化函数并利用 LR 算法进行图像复原。分别进行了两组实验,其解算结果如表 3 所示,同理计算波像差 RMS 值时只考虑 $Z_5\sim Z_9$ 。

表3 两组实验结果的 Zernike 系数及 RMS 值对比

Table 3 Comparison of Zernike coefficients and RMS values in two groups of experiment

Zernike item	Coefficients / λ	
	No.1	No.2
Z_4	1.49	1.47
Z_5	-0.0648	-0.0603
Z_6	0.0956	0.1022
Z_7	-0.0650	-0.1076
Z_8	-0.1122	-0.0829
Z_9	0.0796	0.0841
RMS ₅₋₉ / λ	0.0748	0.0779

由表 3 可知,两组外场成像实验的解算结果与实验室的检测结果基本一致,偏差均小于 0.03 λ RMS;同理将两组结果中的 Z_4 代入公式 $\varepsilon_z = -8F^2 \Delta\omega$ 的 $\Delta\omega$ 中,得到 ε_z 的值分别为 -0.9375、-0.9249 mm,折算到折叠镜位移为 -0.4688、-0.4625 mm,这与外场成像时确定的折叠镜应远离焦平面移动 0.46 mm 基本一致,解算焦面位置偏差均小于 0.02 mm,其解算精度满足需求。根据解算结果复原图像,如图 6 所示,其中图 6(a1)~(a2) 为原始焦面图像,图 6(b1)~(b2) 为相应的复原图像,复原图像的清晰度得到了明显的提高。

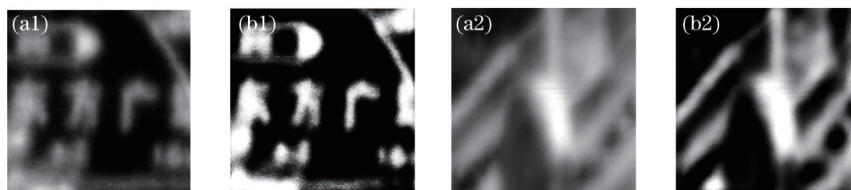


图6 两组实验结果中原始焦面图像与复原图像的对比

Fig.6 Comparison of original focal images and restored images in two groups of experiment

5 结 论

本文将PD技术的应用领域由单色光或准单色光照明拓展为宽光谱照明,在大量计算机模拟仿真的基础上,基于MTF测试平台和某相机的外场成像实验,初步验证了宽光谱PD技术的工程可行性。结果表明:利用宽光谱PD技术解算得到的波前与实验室干涉检验结果的偏差小于 0.03λ (RMS),解算得到的焦面位置与测试得到的理想焦面位置偏差小于 0.03 mm ,解算精度基本满足工程应用需求;根据解算结果复原图像的质量有了一定程度的提高,证明了宽光谱PD技术可以较准确地反演出宽光谱照明条件下光学系统的波前位相信息和理想焦面位置,在实际工程中具有一定的参考意义,可以将该技术作为空间相机整机测试时的辅助检测手段。

利用宽光谱PD技术实现了宽光谱照明条件下光学系统的波像差解算和最佳焦面位置的确定。下一步工作将分析该技术实际工程应用中的各种误差来源对解算精度的影响,并将进一步改进算法,改善软硬件条件,提高宽光谱PD技术的解算效率。

参 考 文 献

- 1 M G Löfdahl, R L Kendrick, A Harwit, *et al.*. A phase diversity experiment to measure piston misalignment on the segmented primary mirror of the Keck II telescope[C]. SPIE, 1998, 3356: 1190–1201.
- 2 R G Paxman, B J Thelen, R J Murphy, *et al.*. Phase-diverse adaptive optics for future telescopes[C]. SPIE, 2007, 6711: 671103.
- 3 M G L ö fdahl, T E Berger, R S Shine, *et al.*. Preparation of a dual wavelength sequence of high-resolution solar photospheric images using phase diversity[J]. *Astrophys J*, 1998, 495(2): 965–972.
- 4 Wu Yuanhao, Wang Bin, Zhao Jinyu, *et al.*. Restoration of broadband white light image using phase diversity technique[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1849–1854.
吴元昊,王 斌,赵金宇,等.利用相位差异技术恢复宽带白光图像[J].*光学精密工程*, 2010, 18(8): 1849–1854.
- 5 Liang Shitong, Yang Jianfeng, 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相位差法波前误差传感技术研究[J].*光学学报*, 2010, 30(4): 1015–1019.
- 6 Wang Zongyang, Wang Bin, Wu Yuanhao, *et al.*. Calibration of non-common path static aberrations by using phase diversity technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0701007.
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.
- 7 Han Xingzi, Hu Xinqi, Yu Xin. Precisely integrated wavefront sensorless calibration of high-resolution space optical system with large position errors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(96): 0626003.
韩杏子,胡新奇,俞 信.高分辨率空间光学系统位置误差的无波前传感综合校正[J].*光学学报*, 2011, 31(6): 0626003.
- 8 Liu Minshi, Wang Xiaoman, Wang Bin, *et al.*. Acquisition of laser beam characteristics by extended Nijboer-Zernike method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1014001.
刘敏时,王晓曼,王 斌,等.采用扩展的Nijboer-Zernike方法的激光光束特征值检测[J].*光学学报*, 2014, 34(10): 1014001.
- 9 Ma Xinxue, Wang Jianli, Wang Bin, *et al.*. Quantitative analysis of measurement precision of phase retrieval wavefront sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1028001.
马鑫雪,王建立,王 斌,等.相位恢复波前传感器测量精度的定量分析[J].*光学学报*, 2013, 33(10): 1028001.
- 10 Yan Feng. Intelligent pupil technology applied on TMA system on space-borne camera[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(5): 051101.
闫 锋.应用于TMA系统的智能光瞳技术[J].*激光与光电子学进展*, 2014, 51(5): 051101.

- 11 Xu Jingwei, Yan Feng, Zhang Xuejun. Testing of optical system based on point light source[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(12): 122203.
许竞伟, 闫 锋, 张学军. 应用点光源检测光学系统[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(12): 122203.
- 12 Wang Xin, Zhao Dazun. 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[J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2142–2146.
- 13 Cheng Qiang, Yan Feng, Xue Donglin, *et al.*. Wavefront error testing of off-axis three-mirror anastigmatic system using phase diversity technology[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1008001.
程 强, 闫 锋, 薛栋林, 等. 利用相位差异技术检测离轴三反光学系统的波前误差[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1008001.
- 14 R L Kendrick, D S Acton, A L Duncan. Experimental results from the Lockheed phase diversity test facility[C]. SPIE, 1994, 2302: 312–322.
- 15 J A Georges III, P Dorrance, K Gleichman, *et al.*. High-speed closed-loop dual deformable-mirror phase-diversity testbed[C]. SPIE, 2007, 6711: 671105.
- 16 J Andrews, S Teare, S Restaino, *et al.*. Dynamic aberration control testbed for the characterization of multiple wavefront sensors[C]. SPIE, 2005, 6018: 60180R.
- 17 Kang Hui. Imaging Optics[M]. Tianjin: Nankai University Press, 1996.
康 辉. 映像光学[M]. 天津: 南开大学出版社, 1996.
- 18 C R Vogel, T Chan, R Plemmons. Fast algorithms for phase diversity based blind deconvolution[C]. SPIE, 1998, 3353: 994–1005.
- 19 J H Seldin, R G Paxman, V G Zarifis, *et al.*. Closed-loop wavefront sensing for a sparse-aperture, multiple-telescope array using broad-band phase diversity[C]. SPIE, 2000, 4091: 48–63.
- 20 Z Wang, A C Bovik, H R Sheikh, *et al.*. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Trans Image Processing, 2004, 13(4): 600–612.

栏目编辑: 何卓铭