

应用波前编码技术提高空间相机的鲁棒性

安 宁 张秉隆 金建高 李 博

北京空间机电研究所, 北京 100094

摘要 通常情况下, 焦面在光学系统焦深范围内移动, 空间相机像质变化较小, 一旦移出焦深范围, 像质将出现不同程度的下降。波前编码(WFC)成像技术具有很好的扩展焦深功能, 能够使光学系统表现出离焦不敏感的特性。采用了扩展多项式在光瞳处引入三次相位分布, 以光学传递函数作为系统像质衡量准则构建了自定义评价函数, 进行了波前编码光学系统的设计, 并搭建了实验装置。实验结果表明, 复原后的波前编码图像不仅与原系统成像质量相当, 并且在较大的焦深范围内保持一致, 验证了波前编码技术提升空间相机稳定性的可行性。

关键词 成像系统; 波前编码; 三次相位板; 光学设计

中图分类号 V443+.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0911002

Applying Wavefront Coding Technology on Enhancing Robustness of Space Camera

An Ning Zhang Binglong Jin Jiagao Li Bo

Beijing Institute of Space Mechanics&Electricity, Beijing 100094, China

Abstract In normal conditions, image quality of space camera optical system changes very little in a permissible range of depth of focus, which will appear different degrees of falling when the image plane is out of depth of focus however. The wavefront coding technology (WFC) can extend the depth of focus very well, and enable the optical system to be insensitive to defocus. The user-defined merit function using modulation transfer function as image quality guideline is proposed based on extended polynomial to import cube phase distribution in the pupil, the optical system is designed of WFC system, and the test device is builded. The test results show that the image of WFC system is not only correspond to image of original system, but also keeps stably in a big range of depth of focus, which proves the big value of WFC on enhancing the stability of space camera.

Key words imaging systems; wavefront coding; cubic phase masking; optical design

OCIS codes 110.2960; 110.7348; 220.4830; 080.2740

1 引 言

在空间相机的工程研制中, 经地面装调测试, 其成像性能往往可以达到设计水平, 但在轨运行时会受发射过程中的超重和振动及入轨后卫星平台的振动、微重力变化、在轨环境温度变化等诸多因素的影响, 光学元件及其支撑结构会产生变形、位置倾斜或偏离。这些变化在引起光学系统离焦的同时, 还会产生额外的彗差、像散等像差, 导致系统成像质量下降^[1]。与普通地面成像产品相比, 这是研制空间相机必须考虑的特殊因素。目前国内外常用的解决方法主要有增加调焦机构和后期的调制传递函数补偿(MTFC), 这些方法虽能一定程度解决上述问题, 但仍有不足, 如调焦机构增加了活动机构, 增加重量的同时降低了系统的可靠度, 而且精度及实时性有限, 很难达到最佳状态; MTFC需要精确的调制传递函数(MTF)数据作为图像复原核才能保证像质有效提升, 要求对在轨相机进行高精度的MTF测试, 而高精度的在轨相机MTF测试费时费力, 且误差因素较多(易受大气、辐射校正、靶标质量等影响), 因此研究新的、更简单有效的方法提升空间相机的在轨稳健性仍很有必要。

收稿日期: 2015-03-23; 收到修改稿日期: 2015-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(11304012)

作者简介: 安 宁(1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事空间相机光学设计方面的研究。E-mail: anning405@126.com

波前编码技术是一种光学系统与数字图像处理相结合的混合成像技术^[2-3],与普通光学系统的区别在于,波前编码光学系统利用相位板对光瞳处的光束相位进行编码,使得系统在一个相当大的焦深范围内拥有比较一致的点扩展函数(PSF),对编码图像进行图像解码复原获得清晰图像。

本文主要开展了空间相机波前编码光学系统的设计、实验验证及波前编码图像的复原,验证利用波前编码技术提升空间相机在轨稳健性的可行性,为解决空间相机由于离焦引起的像质下降问题提供新的技术方案。

2 波前编码光学系统设计

2.1 设计思路

普通光学系统对于焦面离焦较为敏感,焦面在允许的焦深范围内移动时像质变化较小,焦面一旦位于焦深外,像质则出现不同程度的下降。

波前编码技术是将一个非球面相位板作为波前编码元件放置于光学系统光瞳位置,利用相位板改变光瞳处的相位分布,实现整个系统相位调制的成像技术^[4]。光瞳包括入瞳和出瞳,光瞳和光阑是各视场光束交汇的位置,而入瞳、出瞳分别为光阑经过光阑前镜组、光阑后镜组在物空间及像空间所成的像。从某种意义上三者可视为一体,因而在三个位置放置相位板可以达到相同的效果,关键在于光瞳是否为实入瞳、实出瞳。通过相位板调整整个系统的波前差,控制离焦误差以及与离焦相关的球差、色差、像散、场曲等像差,最终使得系统对离焦不敏感。

相位板形式多种多样,主要分为旋转对称型及非旋转对称型两大类。旋转对称型相位板加工简单,但扩展焦深能力较弱;非旋转对称型相位板虽然加工比较困难,却能有效降低光学系统离焦敏感性,并且目前非旋转对称型三次(立方)相位板在加工检测方面已有一定成熟度,因而选用了非对称型三次相位板作为研究对象。三次相位板相位调制公式^[5-7]为

$$P(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2}} \exp[j\alpha(x^3 + y^3)], |x| \leq 1, |y| \leq 1, \quad (1)$$

式中 x, y 为归一化坐标。

已有研究表明,当光瞳处引入形如 $\alpha(x^3 + y^3)$ 的相位分布时,光学系统的调制传递函数不再受离焦量的影响,系统对离焦误差变得不敏感,可用于扩大焦深^[8-9]。

相位板 α 参数直接影响相位板对光瞳处相位的调制能力,因而需要对相位板参数进行适当取值,而使其最佳化的过程即为参数的优化过程。优化后的相位板参数应当实现光学传递函数对离焦不敏感,同时具有一定点扩展函数以用于后续图像处理。

比较常用的优化方法主要有两种:1) 基于 Strehl 比的优化方法,主要用来反映有像差光学系统与理想光学系统的点扩展函数中心点强度之间的相对变化情况;2) 基于 MTF 的优化方法,以 MTF 的变化作为光学系统衡量准则^[10]。

优化的过程是一个数值计算过程,目的是使实际数值不断逼近目标值,两者误差越小越好。同 Strehl 比相比,MTF 能够直观反映频率域的信息,更直接地衡量光学系统的成像质量,且构建评价函数时直观有效,便于光学系统的设计,因而本文选择基于 MTF 的优化方法作为优化准则。

对于三次方相位板而言,需要找到合适的 α 参数来满足光学传递函数离焦不敏感的特性。在此之前,首先应根据谱段、视场、相对孔径、焦距、视场等参数构建一个像质较好的初始结构,同时在光阑或其等效位置处预留出用于放置相位板的空位。然后构建相位板面形表达式,并以 α 作为变量,以不同视场、不同离焦量对应的 MTF 目标值构建评价函数,通过优化使得实际值与目标值误差最小,获得最佳的 α 参数。

2.2 设计结果

选用同轴三反系统进行波前编码系统的设计,系统主要参数为:波长为 $0.6328 \mu\text{m}$, 焦距为 3000 mm , F 数为 10, 视场为 $0.12^\circ \times 0.06^\circ$ 。光学系统光路图如图 1 所示,其中主镜、三镜为椭球面,次镜为双曲面,出瞳位于折转镜位置。原系统的 MTF 如图 2 所示,接近衍射极限,像质优良。

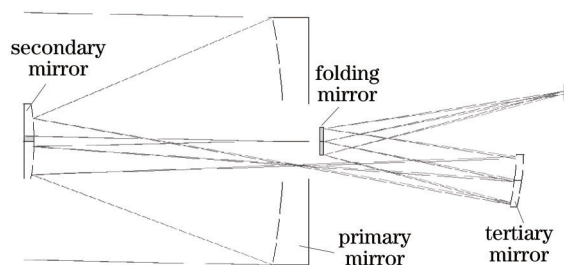


图 1 光学系统光路图

Fig.1 Layout of optical system

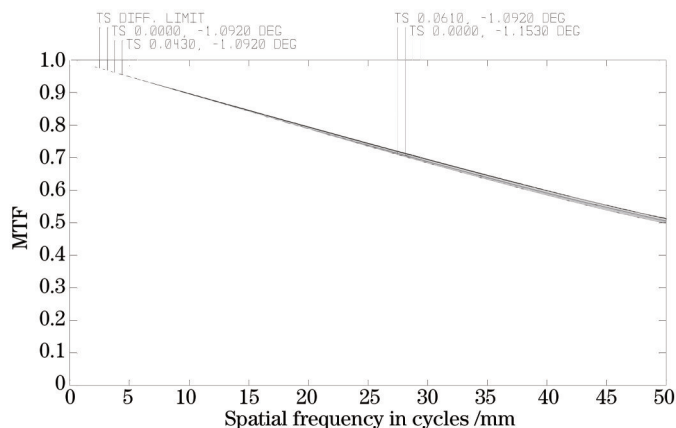


图 2 原系统 MTF

Fig.2 MTF of the original system

系统具有实出瞳,且位于折转镜位置,因此折转镜可以作为相位板用于系统相位调制。选用三次方形式相位板,设计时采用扩展多项式表达此面形,其方程为

$$z(x,y) = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2(x^2 + y^2)}} + \beta(x^3 + y^3), \quad (2)$$

式中 c 为顶点曲率半径, x, y 为归一化坐标, k 为非球面系数, β 为三次项系数,用于表征相位板的 α 参数。

设像距为 L , 焦深自由度(DOF)为 $\pm 2\lambda F^2 = 0.127 \text{ mm}$ 。设计时以 $L, L \pm 5\text{DOF}, L \pm 10\text{DOF}$ 共 5 个位置的 MTF 值构建评价函数, 仅以出瞳位置相位板所需参数 β 作为优化变量, 并不更改三个反射镜的参数及相对位置。优化后的相位板口径 44 mm, 非球面系数 $k=0$, 基准面为平面, 曲率半径 $c=0$, 三次项系数 $\beta=0.003075$, 故相位板面形为 $z=0.003075(x^3 + y^3)$ 。

分别选取波前编码系统和原系统在 $L, L \pm 5\text{DOF}, L \pm 10\text{DOF}$ 共 5 个焦面位置的 PSF 进行比较, 如图 3、图 4 所示。原系统的 PSF 随着离焦量的增大而剧烈变化, 波前编码系统的 PSF 经相位板调制后尺寸、形状不同于原系统, 在 $L \pm 10\text{DOF}$ 范围内均保持了很好的一致性, 基本不受焦面位置变化的影响。不同焦面位置处 PSF 尺寸的变化如表 1 所示, 原系统在对焦位置 L 处与离焦位置 $L-10\text{DOF}$ 处的 PSF 尺寸差距最大, 相差 $44.595 \mu\text{m}$, 波前编码系统在对焦位置 L 处与离焦位置 $L-10\text{DOF}$ 处的 PSF 尺寸差距最大, 相差 $10.8345 \mu\text{m}$, 差值约为原系统的 1/4。相比原系统, 波前编码系统 PSF 在 ± 10 倍焦深范围内一致性较好, 表明波前编码(WFC)系统成像稳定性优于原系统。

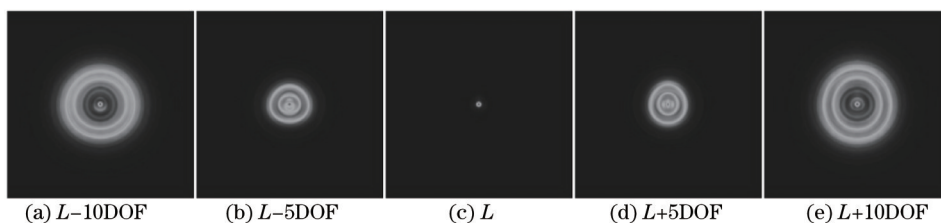


图 3 不同焦面位置处原系统 PSF 变化

Fig.3 PSF change of original system in different positions of focal plane

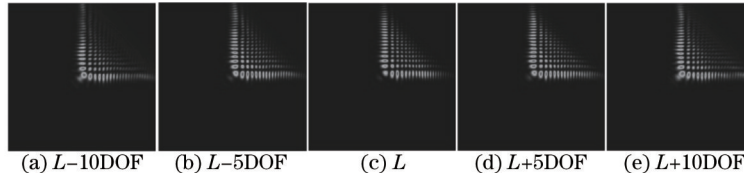


图4 不同焦面位置处波前编码系统 PSF 变化

Fig.4 PSF change of WFC system in different positions of focal plane

表 1 不同焦面位置处原系统、波前编码系统 PSF 尺寸一致性对比

Table 1 PSF size contrast between original system and WFC system in different focus

PSF size	L-10DOF	L-5DOF	L	L+5DOF	L+10DOF
Original system / μm	46.427	23.295	1.832	23.186	46.318
WFC system / μm	126.601	119.074	115.767	117.041	122.751

3 实验验证

通过波前编码光学系统设计,PSF 一致性得到明显改善,系统的成像稳定性得到提升,但由于相位板的调制作用,PSF 呈现出特殊的三角形光斑,需通过图像复原技术对调制后的图像进行解码获得清晰像。维纳滤波是一种图像复原的经典算法,除考虑噪声影响外,对成像目标的最优估计在精度和算法效率方面平衡较好^[11],通用性强,因此在实验中设计了基于维纳滤波的波前编码图像复原方法。波前编码系统的成像数学模型为

$$G(\mu, \nu)_{\text{WFC}} = H(\mu, \nu)_{\text{WFCDF}} F(\mu, \nu)_{\text{T}} + N(\mu, \nu), \quad (3)$$

式中 $N(\mu, \nu)$ 为成像过程引入的噪声。波前编码图像复原获取清晰像的过程是在已知 $G(\mu, \nu)_{\text{WFC}}$ 、 $H(\mu, \nu)_{\text{WFCDF}}$ 、 $N(\mu, \nu)$ 的情况下求解 $F(\mu, \nu)_{\text{T}}$ 。维纳滤波算法在频域表示为

$$F(\mu, \nu) = \left[\frac{1}{H(\mu, \nu) |H(\mu, \nu)|^2 + S_n(\mu, \nu)/S_f(\mu, \nu)} |H(\mu, \nu)|^2 \right] G(\mu, \nu), \quad (4)$$

式中 $H(\mu, \nu)$ 为波前编码退化函数, $|H(\mu, \nu)|^2$ 为 $H(\mu, \nu)$ 的模的平方, $S_n(\mu, \nu)$ 为噪声的功率谱 $|N(\mu, \nu)|^2$, $S_f(\mu, \nu)$ 为未退化图像的功率谱 $|F(\mu, \nu)|^2$ 。空间相机属于非相关线性成像系统,噪声和未退化图像的功率谱难以准确预知^[12], (4)式噪信功率比 $S_n(\mu, \nu)/S_f(\mu, \nu)$ 难以准确得出,因此在成像实验中,将噪信功率比的计算近似为图像的平均噪声功率和平均图像功率比。

为验证波前编码系统设计方法的有效性,利用某型号空间相机搭建了实验装置,实验用相机镜头主结构及相位板安装位置如图 5 所示。实验步骤如下:

- 1) 调整未包含相位板的原系统,确定对焦位置;
- 2) 分别在对焦位置及 $\pm 5\text{DOF}$ 、 $\pm 10\text{DOF}$ 五个位置处对靶标成像并记录;
- 3) 将折转镜替换为相位板,调试波前编码系统,焦面调整至对焦位置,重复步骤 2),对靶标成像并记录。

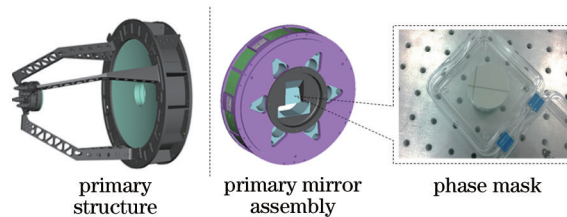


图5 镜头主结构及相位板安装位置

Fig.5 Lens primary structure and assembling position of phase mask

将前文提及的图像复原算法应用 Matlab 软件编写程序,输入波前编码系统采集的靶标图像数据,对靶标像进行复原。原系统、波前编码系统复原前、复原后不同焦面位置处系统靶标像对比如表 2 所示,可以看出,原系统在对焦位置 L 位置像质优良,但离焦后像质明显下降;而波前编码系统在 ± 10 倍焦深范围内成像

时,不同焦面位置的像质较为一致。

表2 原系统和波前编码系统不同焦面位置图像对比

Table 2 Image contrast in different positions of focal plane between original system and WFC system

Defocus	Image of original system	Image of WFC system	Image after processing
$L-10\text{DOF}$			
$L-5\text{DOF}$			
L			
$L+5\text{DOF}$			
$L+10\text{DOF}$			

应用单像素评估相似性函数对原系统、波前编码系统不同焦面位置图像的一致性进行定量评估,单像素评估相似性函数为

$$R(i,j) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M [S^{ij}(m,n) \times T(m,n)]}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M [S^{ij}(m,n)]^2} \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M [T(m,n)]^2}}, \quad (5)$$

式中 $T(m,n)$ 为基准图像, $S^{ij}(m,n)$ 为待评估图像。

将原系统在对焦位置 L 处获取的图像作为基准图像,通过(5)式计算的原系统、波前编码系统不同焦面处的图像与基准图像相似度对比如表 3 所示,原系统在对焦位置 L 处与离焦位置 $L-10\text{DOF}$ 处的图像相似度差距最大,相差 0.2921,波前编码系统在离焦位置 $L-10\text{DOF}$ 处的图像与基准图像相似度差距最大,相差 0.0743,差值约为原系统的 1/4,表明波前编码系统成像稳定性优于原系统。

表3 原系统与波前编码系统不同焦面处图像相似度对比

Table 3 Image similarity contrast in different positions of focus between original system and WFC system

Image similarity	$L-10\text{DOF}$	$L-5\text{DOF}$	L	$L+5\text{DOF}$	$L+10\text{DOF}$
Original system	0.7079	0.9225	1	0.9367	0.7194
WFC system	0.9257	0.9569	0.9821	0.9693	0.9354

以上实验结果表明,应用波前编码技术对系统进行改进后,系统成像质量在 ± 10 倍焦深范围内保持较好的一致性。基于该特性,应用波前编码技术有望解决空间相机在轨应用时的以下典型问题:

提升系统稳健性。即使探测器焦面因多种因素在 10 倍的焦深范围发生变动,系统成像质量并不受影响,提高了系统对发射环境(振动)、在轨环境(应力释放、微重力、微颤振、温度变化)的适应性。

降低后期图像复原难度。常规系统在轨图像复原难度大的主要原因在于在轨成像时的退化函数(MTF 或 PSF)很难精确测定,无法为图像复原输入精确的复原核,而波前编码系统在初始焦面位置、焦面离焦情况

下退化函数一致,图像复原核相对稳定,使用同一 PSF 作为复原核即可复原 10 倍焦深范围内的成像图像,工程实现上更加简单、可行。

实验结果中需注意的,波前编码系统在对焦位置 L 处的图像与基准图像并非完全相同,相似度为 0.9821,与理论值 1 存在偏差,说明实验存在误差,主要误差源可能是图像复原算法的设计、参数选择不够精确,在图像复原中引入误差,同时相位板的加工、装调误差也是影响因素,在后续的研究工作中将进一步分析误差来源,研究精度更高、快速的适宜工程实际应用的算法,并提升相位板加工装调精度。

4 结 论

波前编码技术能够扩展光学系统的焦深,使得光学系统调制传递函数对像面离焦不敏感。采用了扩展多项式在系统光瞳处引入三次相位分布,并以光学传递函数作为系统像质衡量准则构建了自定义评价函数,通过优化使得系统的 PSF 在 ± 10 倍焦深范围内离焦不敏感,同时在空间相机上开展了实验验证。实验结果表明,所采用的设计方法有效,运用波前编码技术提升空间相机的稳定性可行,研究成果为提高空间相机在轨成像稳定性提供了新的技术手段。

目前经图像复原后的波前编码图像与基准图像相比仍存在偏差,表明图像处理算法、相位板加工装配过程中存在的误差有待进一步控制,后续将重点研究图像复原算法的精度及效率、相位板的高精度加工装配等问题,满足工程应用要求。

参考文献

- 1 Zhang Binglong, Li Bo, Su Yun, *et al.*. Temperature sensitivity reduction of MWIR space image sensor by wavefront coding[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(2): 48-54.
张秉隆,李 博,苏 云,等.采用波前编码降低 MWIR 成像系统的温度敏感度[J]. *航天返回与遥感*, 2011, 32(2): 48-54.
- 2 Dowski E R, Johnson G E. Wavefront coding: A modern method of achieving high performance and/or low cost imaging systems[J]. *SPIE*, 1999, 3779: 137-145.
- 3 Yang Qingguo, Liu Liren, Sun Jianfeng, *et al.*. Property of wave-front coding imaging systems for extending the depth of field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(12): 1807-1810.
阳庆国,刘立人,孙建锋,等.扩大景深的波前编码成像系统特性分析[J]. *光学学报*, 2006, 26(12): 1807-1810.
- 4 Liu Qinxiao, Yu Feihong. Design and research of wavefront coding microscope system based on traditional microscope system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0322004.
刘钦晓,余飞鸿.基于传统显微系统的波前编码显微系统设计研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0322004.
- 5 Cai Huaiyu, Jiao Mengjin, Huang Zhanhua, *et al.*. A phase encoding modulation method to increase the longitudinal correlation of speckle fields[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(10): 101203.
蔡怀宇,焦梦锦,黄战华,等.提高散斑场纵向相关性的相位编码调制方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(10): 101203.
- 6 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.
- 7 Pan Chao, Chen Jiabi, Zhang Rongfu, *et al.*. Extension ratio of the depth of field for wavefront coding imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5): 871-875.
潘 超,陈家璧,张荣福,等.波前编码成像系统景深延拓扩展率的研究[J]. *光学学报*, 2008, 28(5): 871-875.
- 8 Brenner K H, Lohmann A W, Jeda-Castaneda J O. The ambiguity function as a polar display of the OTF[J]. *Opt Commun*, 1983, 44(5): 323-326.
- 9 Fitzgerald A R, Dowski E R, Catherly W T. Defocus transfer function for circularly symmetric pupils[J]. *Appl Opt*, 1997, 36(23): 5796-5804.
- 10 Yan Feng. Optimization technique of wavefront coded system based on modulation transfer function invariance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0411004.
闫 锋.基于调制传递函数相似度的波前编码系统优化技术[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0411004.
- 11 R C Gonzalez, R E Woods, S L Eddins. *Digital Image Processing using MATLAB*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005, 9: 103-143.
- 12 M Sonka, V Hlavac, R Boyle. *Image Processing Analysis and Machine Vision*[M]. Beijing: Publishing House of Tsinghua, 2011, 1: 115-118.

栏目编辑: 苏 岑