

波前编码技术在同轴三反系统的应用及其分析

郭小虎, 赵跃进, 吴益剑

(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要: 在轨运行的空间相机受到温差或运动振动等影响导致像面离焦, 成像质量下降。波前编码技术可以在保持光学系统整体参数不变的情况下扩展系统的焦深, 使调制传递函数对离焦不敏感。将波前编码技术应用于空间同轴三反系统, 提出在系统的出瞳面上加置掩模板, 并对掩模板的面型进行优化, 对原系统和应用波前编码技术的新系统的成像特性进行了分析和对比。讨论了波前编码掩模板的相位因子对系统的焦深延拓以及对像质的影响。理论及仿真结果表明: 将波前编码技术应用于同轴三反系统, 使系统对离焦不敏感, 可以很好地扩大系统的焦深, 对解决空间光学系统像面离焦问题具有很高的实用价值。

关键词: 波前编码; 同轴三反系统; 焦深; 光瞳函数; 调制传递函数

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)07-2075-05

Application and analysis of wave front coding technology on TMC system

Guo Xiaohu, Zhao Yuejin, Wu Yijian

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Temperature difference and satellite vibration lead to in-orbit space camera defocused and deteriorated image quality. The wave front coding technology can extend the depth of focus without changing the optical system structure, which makes MTF insensitive for defocus. The wave front coding technology was applied to TMC system. Optimized to the best surface type, the phase mask plate was placed in the exit pupil. The imaging characteristics of the original system and wave front coding system were analyzed and evaluated. And the phase parameter which was related to the extended ratio of depth of focus and image quality was also analyzed. Theory and simulation results show that the application of wave front coding technology on TMC system can be easy to extend the depth of focus. It is concluded that the wave front coding technology has high practical value to solve the imaging defocused.

Key words: wave front coding; TMC system; depth of focus; pupil function; modulation transfer function

收稿日期: 2014-11-20; 修订日期: 2014-12-24

基金项目: 总装探索项目(7131254)

作者简介: 郭小虎(1986-), 男, 博士生, 主要从事光学系统设计方面的研究。Email: pz20040473@163.com

导师简介: 赵跃进(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事电子稳像、THz 成像技术、基于 MEMS 的红外成像技术等方面的研究。Email: yjzhao@bit.edu.cn

0 引言

反射式光学系统由于其口径大、无色差的特点被广泛应用于空间光学系统中,并且在军事、气象、测绘等领域发挥重要作用。但是,空间光学系统在运行过程中会受到温度变化、运动振动的影响,从而导致像面发生离焦^[1-3],影响成像质量。因此,解决像面离焦问题对于获取高分辨率的图像具有十分重要意义。

目前解决离焦的办法主要有两种:一种是热控设备^[4],使相机整体处于温度平衡状态;另一种为调焦机构^[5],由地面人员根据成像判断是否离焦并计算离焦量,再将调焦量反馈至卫星控制系统,实现调焦。然而,这两种方法的系统复杂,数据量大,处理困难,离焦补偿过程繁复,这大大增加了空间光学系统的复杂度。

20 世纪 90 年代,Edward R. Dowski 提出波前编码技术,在光学系统中引入三次相位板,扩展了系统的焦深范围,在更大的焦深范围内使光学系统对离焦变得不敏感。引入的相位板对空间光线调制后,在像面形成模糊的图像,经过简单的图像处理可得到清晰的图像。另外,波前编码技术在一定程度上抑制球差、彗差、像散等像差^[6-7]。因此,将波前编码技术应用于空间光学系统具有很高的实用价值^[8]。目前,波前编码技术已经在微光机电系统、显微镜系统、三维 X 线断层扫描得到应用^[9-11]。文中重点讨论波前编码技术在同轴三反系统(TMC)上的应用。

1 波前编码技术原理

根据波前编码理论^[12],在系统的出瞳或者孔径光阑位置加入三次相位掩模板,掩模板相位表达式如公式(1)所示:

$$\theta(x, y) = \alpha(x^3 + y^3) \quad (1)$$

式中: α 为相位因子,这种掩模板的一个特点就是变量 x 与 y 相互独立,可以分离变量。因此,在一维坐标下,归一化的光瞳函数可以写为:

$$p(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} \exp(j\alpha x^3) & |x| \leq 1 \\ 0 & |x| > 1 \end{cases} \quad (2)$$

当 $\alpha=20$ 的情况下,系统的一维光学传递函数为:

$$H(u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{\pi}{12|\alpha u|}} \exp\left(j\frac{\alpha u^3}{4}\right) & u \neq 1 \\ 1 & u = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: u 为归一化空间频率。从公式(3)可以看出,当

α 较大时,光学传递函数的表达式中无离焦量成分,即系统对离焦不敏感。将相位调制后的模糊图像通过数字图像解码,就可以得到焦深范围内清晰的图像。

2 波前编码系统的建立

文中的研究内容是基于一个完成像差校正的 TMC 系统,其基本参数为:焦距为 8000 mm, $F/\#$ 为 13.3,视场角为 $1^\circ \times 0.3^\circ$,工作波长范围 0.5~0.8 μm ,主波长为 0.6 μm 。

系统为同轴三反系统,主镜、三镜为椭球面,次镜为双曲面。系统各视场下的 MTF 如图 1 所示,可以看出,该系统成像良好,各视场 MTF 几乎达到衍射极限。

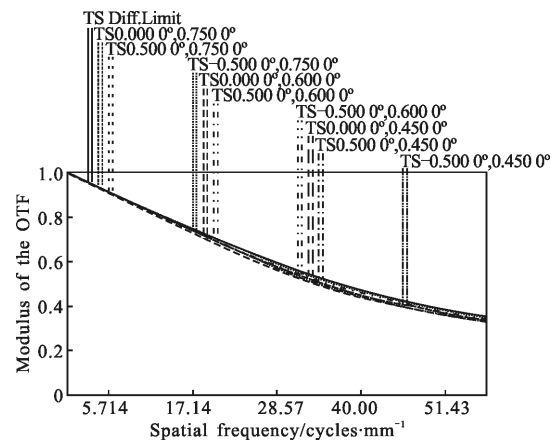


图 1 原 TMC 系统的 MTF 曲线

Fig.1 MTF of original TMC system

设系统焦深为 δ ,根据焦深公式^[12] $\delta=2\lambda(F/\#)^2=0.212 \text{ mm}$ 。由此可见,原系统焦深非常小,将像面位置控制在 0.212 mm 的范围内是十分困难的。

根据波前编码理论^[13],相位掩模板应该放置于孔径光阑或者出瞳面上。由于整个光学系统已经加工安装调试完毕,且主镜为孔径光阑,因此,无法通过改变主镜的面型来实现引入相位掩模的作用,只能在系统的出瞳面上加入相位掩模板,系统结构如图 2 所示。

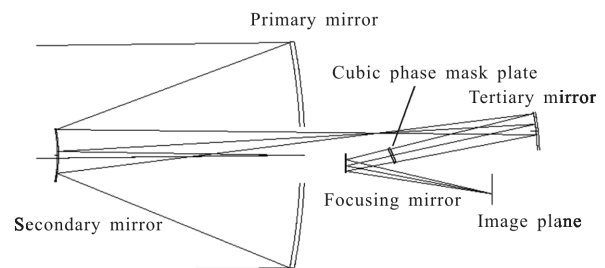


图 2 加入掩模板的系统结构图

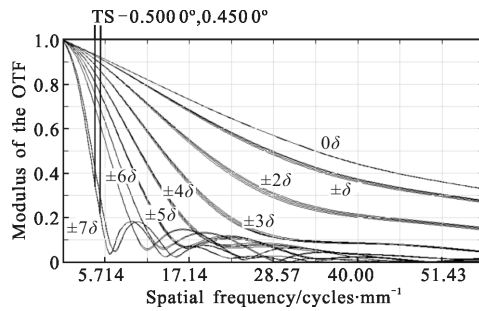
Fig.2 System structure with mask plate

为了表示掩模板的面型,在光学设计软件 ZEMAX 中采用扩展多项式面型(Extended polynomial),掩模板的实际面型方程为:

$$z(x,y)=\frac{cr^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2r^2}}+\alpha\cdot\frac{\lambda}{4\pi n}\cdot\frac{1}{R_p^3}(x^3+y^3) \quad (4)$$

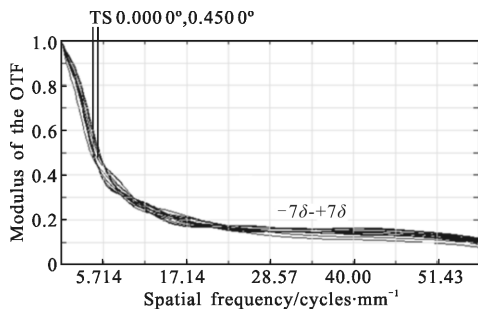
式中: $r^2=x^2+y^2$; n 为掩模板材料折射率; R_p 为归一化半径,为了方便优化计算,使其与掩模板的半口径相等。

经过算法优化,得到 $\alpha=88.43$ 。为了下文叙述方便,将加入三次位相掩模板的 TMC 系统称为波前编码(Wave Front Coding, WFC)系统。用调制传递函数(MTF) 作为评判标准来检验采用波前编码技术对焦深的扩展作用。以系统的对焦成像点为原点,以原系统焦深 δ 为单位步长,分别向焦前与焦后延拓 7 倍焦深。在 $[-7\delta, +7\delta]$ 范围内分别对原系统与波前编码系统的 MTF 进行对比,如图 3 所示。



(a) 原系统的调制传递函数

(a) MTF of the original system



(b) 波前编码系统的调制传递函数

(b) MTF of the WFC system

图 3 原系统与波前编码系统调制传递函数的对比

Fig.3 Comparison of MTF between original and WFC systems

如图 3(a)所示,原系统的 MTF 随着离焦量的增大而急剧下降,且 MTF 曲线也发生了明显的变化;对于波前编码系统,如图 3(b)所示,虽然系统的 MTF 与理想 MTF 相比明显下降,但是随着离焦量的增大,

MTF 保持着良好的一致性,几乎与离焦量的变化无关。这样,通过加入三次相位掩模板就达到了焦深延拓以及对离焦不敏感的目的。

此外,图 4 给出了波前编码系统的一个轴外视场在 14 倍原系统焦深范围内的 MTF,同样可以看出,在此焦深范围内的各个位置,MTF 几乎无差别。可以证明,加入三次相位掩模板后,系统对离焦不敏感,在各视场下的 MTF 都能保持良好的一致性,达到了焦深延拓的目的。

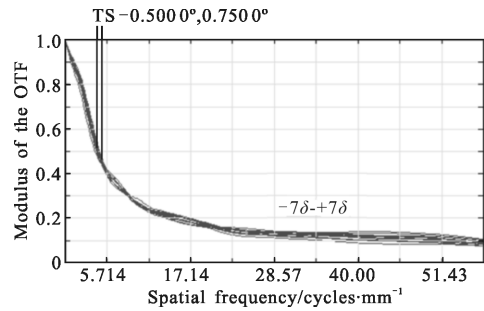


图 4 轴外视场在 14 倍原系统焦深范围内的传递函数

Fig.4 MTF of off axis field of view in 14δ

3 相位因子对焦深延拓的影响

根据波前编码理论,可以推导出带有离焦量的一维的光学传递函数:

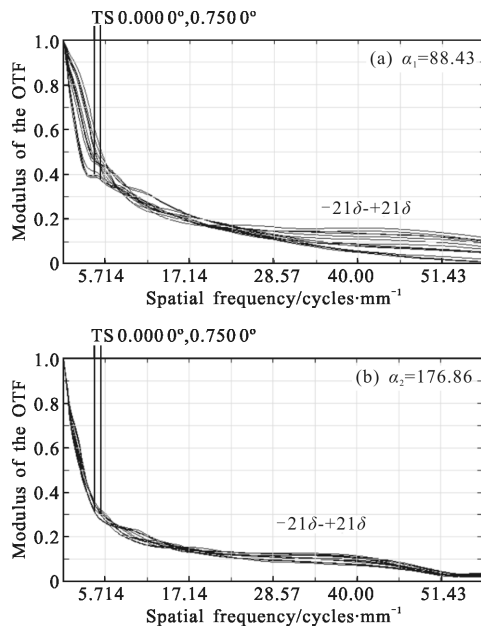
$$H(u, \psi) = \begin{cases} \sqrt{\frac{\pi}{12|\alpha u|}} \exp\left(j\frac{\alpha u^3}{4}\right) \exp\left(-j\frac{\psi^2 u}{3\alpha}\right) & u \neq 1 \\ 1 & u = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\psi = \frac{2\pi}{\lambda} W_{20}$ 为离焦参量; α 为相位因子。

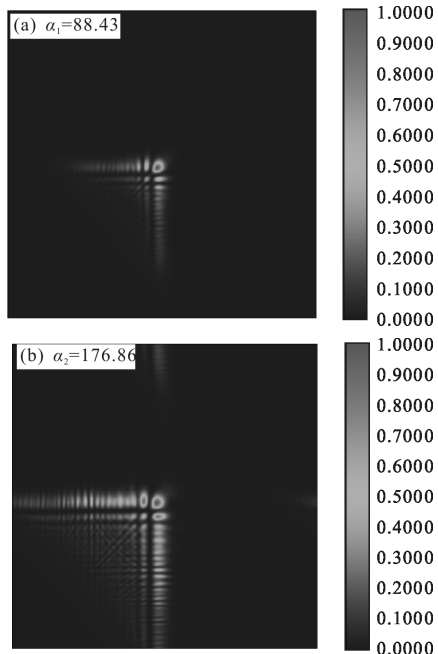
公式(5)中,当 $u \neq 0$ 时,仅 $\exp\left(-j\frac{\psi^2 u}{3\alpha}\right)$ 与离焦量有关, α 越大,则传递函数对离焦越不敏感,焦深延拓率越大。但是, α 值选的过大,会造成传递函数高频段幅值降低,其对应的系统点扩散函数(PSF)表现为能量分布的进一步弥散,像面信噪比降低,从而不利于图像的解码复原。

第 2 节已经优化出 $\alpha=88.43$, 分别取 $\alpha_1=\alpha=88.43$, $\alpha_2=2\alpha=176.86$, 考查焦深范围为 $[-21\delta, +21\delta]$, 同样根据 MTF 一致性作为评判标准,如图 5 所示。

如图 5(a)所示,随着离焦量的增大,MTF 一致性明显变差;当相位因子 $\alpha_2=2\alpha$ 时,MTF 表现出更好的一致性,焦深延拓更大。但是在系统的高频部分(40~57.14 lp/mm),传递函数幅值已经降至 0.1 以下,不利于后续的图像复原,如图 5(b)所示。

图 5 不同 α 值的 MTF 曲线对比Fig.5 Comparison of MTF with different α

从 PSF 的能量空间分布来看,若 α 值选取过大,如图 6(b)所示,则导致像面上点扩散函数中心主极大能量降低,次极大以及其他各级能量增加,直接导致点扩散函数的进一步弥散。在实际成像中,造成图像的进一步模糊,不利于后续的图像复原。而图 6(a)所示的 PSF 能量分布更为集中,在 $[-7\delta, +7\delta]$ 的焦深范围内,通过图像复原可以得到清晰的图像。

图 6 不同 α 的点扩散函数的对比Fig.6 Comparison of PSF with different α

4 结论

文中从解决空间光学系统的离焦问题出发,通过将波前编码技术应用于 TMC 系统上,使系统 MTF 对离焦不敏感,从而获得更大的焦深范围,并分析了相位因子对焦深延拓的影响。理论和仿真结果表明,将相位掩模板加入该 TMC 系统后,焦深扩大了 14 倍,MTF 具有良好的一致性。因此,该技术可以在不增加卫星有效载荷的前提下代替目前的热控和机械调焦设备,降低卫星有效载荷以及发射成本,对于空间光学成像领域具有重要的应用价值。

参考文献:

- [1] Chen Hong, Wang Tongtong, Gao Jinsong, et al. Improvement of signal noise ratio of TMC optical system by SiC surface modification technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(12): 2952–2958. (in Chinese)
陈红, 王彤彤, 高劲松, 等. 应用 SiC 反射镜表面改性技术提高 TMC 光学系统信噪比 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(12): 2952–2958.
- [2] Jia Xuezhi, Wang Dong, Zhang Lei, et al. Optimizing design and precision experiment of focusing mechanism in lightweight space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(8): 1824–1831. (in Chinese)
贾学志, 王栋, 张雷, 等. 轻型空间相机调焦机构的优化设计与精度试验 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(8): 1824–1831.
- [3] Lu E, Yan Changxiang, Wu Qingwen, et al. Research on adaptability of optical remote sensors in mechanical and space thermal environments [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(5): 364–376. (in Chinese)
卢镗, 颜昌翔, 吴清文, 等. 空间光学传感器环境适应性设计与试验研究 [J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(5): 364–376.
- [4] Yu Tao, Xu Shuyan, Song Kefei. Auto-focusing system based on temperature for space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2085–2089. (in Chinese)
于涛, 徐抒岩, 宋克非. 一种空间相机焦距的自动温度补偿系统 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(8): 2085–2089.
- [5] Yu Tao, Song Kefei. Multi-function focus control system for TDI-CCD high resolution space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S2): 363–367. (in Chinese)
于涛, 宋克非. TDI-CCD 高分辨率空间相机多功能调焦控制系统 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S2): 363–367.
- [6] Mezouari S, Muyo G, Harvey A R. Circularly symmetric

- phase filters for control of primary third-order aberrations: coma and astigmatism[J]. *JOSA A*, 2006, 23(5): 1058–1062.
- [7] Ben-Eliezer E, Marom E. Aberration-free superresolution imaging via binary speckle pattern encoding and processing [J]. *JOSA A*, 2007, 24(4): 1003–1010.
- [8] Kubala K S, Dowski E, Kobus J, et al. Design and optimization of aberration and error invariant space telescope systems [C]//Optical Science and Technology, the SPIE 49th Annual Meeting, International Society for Optics and Photonics, 2004: 54–65.
- [9] Silveira P E X, Narayanswamy R. Signal-to-noise analysis of task-based imaging systems with defocus[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(13): 2924–2934.
- [10] Tucker S, Cathey W T, Dowski Jr E. Extended depth of field and aberration control for inexpensive digital microscope systems[J]. *Optics Express*, 1999, 4(11): 467–474.
- [11] Marks D L, Stack R A, Brady D J, et al. Three-dimensional tomography using a cubic-phase plate extended depth-of-field system[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(4): 253–255.
- [12] Yan Feng, Zhang Xuejun. Application of wavefront coding technology on TMA system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 37(6): 1048–1052. (in Chinese)
闫锋, 张学军. 应用波前编码技术的离轴三反系统的设计及其分析[J]. *红外与激光工程*, 2009, 37(6): 1048–1052.
- [13] Dowski Jr E R, Cathey W T. Extended depth of field through wave-front coding[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(11): 1859–1866.