

文章编号: 0253-2239(2008)04-0687-05

# 子孔径合成光学成像系统像质评价研究

张 伟 邓 键\* 龙夫年 赵 明 左宝君

(哈尔滨工业大学, 空间光学研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 由于子孔径合成光学成像系统出瞳波前离散, 成像特征有异于常规光学系统。对比了两种子孔径合成光学成像系统的像质评价方法, 其一是直接利用干涉仪实测获得的整体出瞳波面参量, 拟合成泽尼克多项式, 通过快速傅里叶变换获得光学系统的调制传递函数; 其二是对子出瞳波面在像面复振幅分布的衍射直接积分叠加计算系统调制传递函数。对于离散出瞳波前, 拟合的泽尼克多项式不可避免有较大误差, 由此计算获得的调制传递函数与实际测量值有较大区别。设计并制造了一个三子镜合成的成像光学系统, 在此基础上用 ZYGO GPI 干涉仪验证并对比了使用两种方法对像质计算的特点。结果表明, 子出瞳波面直接衍射积分叠加法的精度更高, 但计算量大, 且要获得更高的像质评价精度, 应使用更适于表达离散不规则形状子出瞳波前的波函数。

**关键词** 合成孔径光学系统; 拼接镜面; 象差; 误差分析; 波前

中图分类号 TH744 文献标识码 A

## Image Quality Evaluation for Segmented Mirror Synthetic Aperture Optics

Zhang Wei Deng Jian Long Funian Zhao Ming Zuo Baojun

(Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** Exit pupil wavefront of the segmented mirror synthetic aperture optics (SAO) is discrete, which is much different from traditional systems. Two methods are used to evaluate SAO systems imaging. One is to get the exit pupil wavefront by interferometer and fit it into Zernike polynomial directly, then use the way of fast Fourier translation (FFT) to get system's modulation transfer function (MTF); the other is to integral the sub-exit-pupil's wavefront respectively, and calculate the complex amplitude distribution of each sub-mirror's, and overlap them in image plane, then get the MTF. As the fitted Zernike polynomial of exit pupil wavefront cannot express the discrete wavefront accurately, the former way is much different from the reality system. A segmented mirror system with three sub-mirrors primary is built, and the wavefront is obtained by ZYGO GPI interferometer, include overall exit pupil wavefront and each sub-exit-pupil wavefront. The two methods are compared, and the result shows the latter way is more precise but complex, and need much more computation; especially, the other more precise polynomial should be used to express the exit-pupil wavefront of abnormality figuration sub-mirror, can we get the more reasonable result.

**Key words** synthetic aperture optical system; segmented mirror; aberration; error analysis; wavefront

## 1 引 言

随着对地光学成像观测要求的逐步提高, 需要更高分辨力大视场太空望远系统。由多子镜拼接的合成孔径光学系统在空间观测中占据越来越重要的地位。该太空望远镜与普通光学系统在结构和成像性质上类似, 但使用多块小口径子镜拼接成主镜, 实现单一大口径光学系统的功能, 可在发射时折叠, 在轨展开, 具有发射体积小、重量轻、口径大、分辨力

高、部署灵活多变等优点。其关键技术是子镜制造、拼接和展开<sup>[1]</sup>。

与传统光学系统相比, 合成孔径成像系统的出瞳波前离散。由于出瞳波前包含了光学系统的所有光学信息, 两次傅里叶变换即获得调制传递函数 (Modulation transfer function, MTF), 可精确表示系统某一空间频率的性能。JWST 空间望远镜项目即主要使用波象差均方根 (Root mean square,

收稿日期: 2007-07-05; 收到修改稿日期: 2007-10-24

作者简介: 张 伟(1962—), 男, 黑龙江牡丹江人, 教授, 博士生导师, 主要从事天基光学探测识别、光学遥感、光电检测与仿真技术等方面的研究。E-mail: wzhang@hit.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: warhorse99@sina.com; bushmasterdeng@gmail.com

RMS)值作为系统像质的评价标准<sup>[2]</sup>。JWST 处于地球与太阳引力平衡的深空,有隔热和遮光的太阳帆,工作环境相对稳定,可定期对准恒星进行自动检测和主动调整<sup>[3]</sup>,且由于科学探测仪的需要,其波前误差在  $\lambda = 2 \mu\text{m}$  时将被控制在衍射极限附近<sup>[4]</sup>。而对地观测目的的子孔径合成光学成像系统由于近地环境的影响、在轨自动检测和主动调整的相对困难,可见光的使用波段,以及对地观测时大气的影响,不可避免造成系统有较大波前误差。但在一定误差范围内,对于较低截止频率的系统,仍可获得较好的调制传递函数曲线<sup>[5]</sup>。这是因为出瞳函数表示整个系统性能的信息,而调制传递函数曲线只表达系统截止分辨力内的性能。因此,需要对子孔径合成形式光学系统在有较大波前误差时系统的成像性能进行评估。但基于传统的多项式拟合算法难于精确表征离散的出瞳波前,干涉仪实测获得的光瞳函数经快速傅里叶变换(Fast Fourier translation, FFT)获得的调制传递函数与实际系统有较大差

异<sup>[6]</sup>。

本文在干涉仪实测基础上对比了广义光瞳拟合波阵面函数法和子出瞳波函数直接积分叠加法的精度水平,以及二者的使用条件。

## 2 出瞳波前与系统像质计算

光学系统可看作一线形不变系统,物点通过入射光瞳平面和光学系统,在出射光瞳平面形成出瞳波前,如图 1 所示,则光瞳函数可表示为<sup>[7]</sup>

$$\begin{aligned} \tilde{P} &= P \exp(jkW) \\ P &= \begin{cases} 1 & \text{光学系统孔径内} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $W$  为一个通过出射光瞳中心  $O'_1$  的波阵面,它与从  $P_0$  到达像空间的成像波面相关联。 $W$  即为出瞳波前,代表光学系统所有的像差信息。在没有像差时,  $W$  与一个中心在高斯像点  $P^*$  并通过  $O'_1$  的高斯参考球面  $S$  重合。

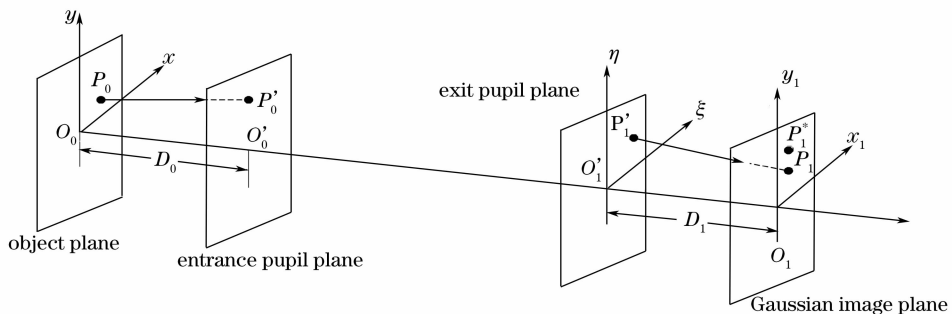


图 1 物平面、像平面与出瞳面

Fig. 1 Object, image and exit pupil planes

对于一定的光学系统,光波的传输方向由物面坐标  $x, y$  和瞳面坐标  $\eta, \xi$  惟一确定,直观表示各种误差对系统像质的影响。出瞳波前可通过波前分析仪、干涉仪,或在出瞳面后置一理想透镜,使其焦点在出瞳面中心对出瞳面成像的方法<sup>[8]</sup>获得。通过对波前函数的菲涅耳衍射积分可获得像面的复振幅分

布和点扩展函数(系统的特征响应函数),再进行傅里叶变换即可获得调制传递函数。因此出瞳波阵面函数作为系统像质的评价标准,具有完备性和可实测性。

由于子孔径合成的光学系统面形不一致(曲率半径误差、非球面系数误差、边缘效应、温度和应力

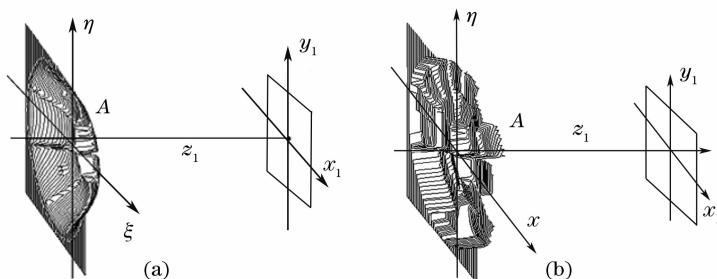


图 2 理想(a)和失调(b)情况下的出瞳波面

Fig. 2 Exit wavefronts under in ideal (a) and misadjustment (b) conditions

变形等)和装调产生的位置度误差,不可避免使子出瞳波前离散。离轴系统各镜面间的倾斜和平移相互补偿,亦可获得较好的像质,但在系统理想的出瞳面上将产生不同的参考球面坐标系,如图 2 所示。

可通过两种方法计算像面的复振幅分布:

1) 对各子出瞳波阵面的衍射直接积分的简单叠加;

2) 近似拟合出系统整体的出瞳波面,再通过衍射直接积分。

对于方案 1),合成孔径光学系统的广义光瞳函数可看作出瞳面上子波前的叠加:

$$\tilde{P} = \sum_{n=1}^N P_n \exp(jkW_n), \quad (2)$$

式中  $P_n$  为第  $n$  个子出瞳;  $W_n$  为第  $n$  个子光瞳的波象差。将每块子镜的波阵面方程带入衍射直接积分公式并叠加,可获得像面的复振幅分布<sup>[9]</sup>

$$E(x, y) = \iint_{\Sigma} \tilde{P} d\eta d\xi = \sum_{n=1}^N \iint_{\Sigma_n} P_n \exp(jkW_n) d\eta d\xi, \quad (3)$$

由于子出瞳波阵面具有不同的最佳拟合球面坐标系,难以确定最佳像面位置,需要在系统理想高斯参考球面半径上施加微扰并不断迭代以重新确定最佳像面。像面位置的改变将严重影响系统波面方差的计算结果和复振幅分布。

文献[10]给出在理想高斯像面时子镜各种失调误差对系统整体波前误差的影响,从大到小顺次排列为:piston 误差、倾斜误差、离焦误差、球差、彗差和象散。同时指出,适当离焦后各失调误差造成的波面方差也将随之改变,像质有较大程度的改善。

当合成镜面的误差较小时,即整体波前误差均方根值在  $\lambda/10$  左右<sup>[11]</sup>,也可以通过最小二乘法或泽尼克多项式拟合的方法,将由离散子波阵面组

成的出瞳波前看作近似连续的波面,直接确定最佳拟合球面及其象平面位置,并在此基础上计算点扩展函数和调制传递函数。此时的广义光瞳函数为多个分离的子出瞳波阵面合成的一个波面,其间断部分将作为误差拟合到波面方程中。显然该方法对像质的评估精度与整体波象差的大小、子镜数量和分布有关。

用泽尼克多项式来表征出瞳波前时,可将一个任意波阵面看作由无穷多个基面的线性组合,通过前  $n$  项多项式来近似代表实际波阵面,并按照 Gram-Schmidt 正交法,重构一个在采样数据点上正交的多项式,使其与高斯参考球面具有最小均方根误差。

泽尼克多项式拟合的曲面是以采样点为基准的正交方程,与采样点数量和拟合的正交基面以及拟合的项次有关,且基面为定义在单位圆上的正交多项式,因而实际光瞳都要经过归一化后方可进行泽尼克多项式拟合,因此,不规则的子光瞳形状对拟合精度也有较大影响。

使用光瞳直接拟合的方法,在拟合过程中即可获得最佳像面位置,计算量较小。但离散波面的间隔将被拟合的多项式填充,表现为高频基面的增加,适用于合成镜面的误差较小且需要快速响应的情况,或仅作定性分析。

### 3 系统试验验证与对比分析

设计并制造了一个  $F/4.5$  的折反系统,口径 300 mm,三子镜合成的主镜为抛物面。子镜采用了特殊工艺加工,面形精度在装卡前的测试值均方根值均小于  $\lambda/40$ ,具有较好的光学一致性,波象差主要由失调引起,装卡前子镜面形差异对系统的波象差影响基本可忽略,设计值达到衍射限,如图 3 所示。

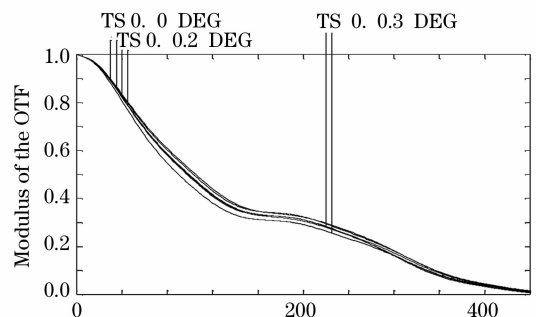
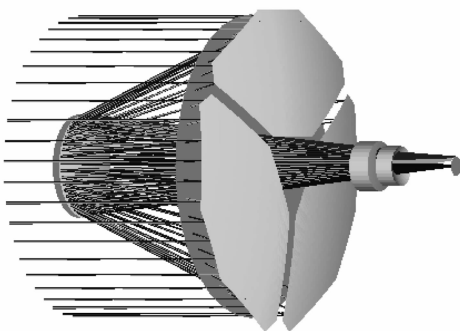


图 3 光学系统及调制传递函数曲线

Fig. 3 Segmented mirror system and its modulation transfer function

系统装调使用 ZYGO GPIXP 干涉仪, 去除 Piston、Tilt 和 Power 后在近轴视场内合成的出瞳波前均方根值约为  $0.115\lambda$ 。由于子出瞳波前离散, 干涉仪获得的调制传递函数曲线在中频段大幅下降, 在  $40\text{ lp/mm}$  处约为  $0.3$ , 而对比传统连续镜面光学系统, 由于  $F\#$  较小, 系统波象差均方根为  $0.115$  时调制传递函数基本稳定在  $0.6$  以上(见图 4)。分析误差来源, 主要是由子镜间隔和实际波面的拟合平滑化以及仅有 36 项拟合方程的项数。三维波前图上, 可清晰看到由于加工产生的高频波纹误差和因装卡受力不均产生的边缘效应, 使各子镜面形产生较大的差

异, 也影响了泽尼克多项式的拟合精度<sup>[12]</sup>。

单独显示每块子镜的出瞳波前。由于子镜非圆域, 从干涉仪获得的泽尼克多项式系数不能正确表达波面, 如图 5 所示, 不同项次对应的系数没有关联关系。

在子镜出瞳波前上选择圆域, 通过多次圆域内泽尼克系数的平均近似获得单块子镜的波面方程。圆域范围内各项次具有较高的一致性(如图 6)。由于边缘效应和镜面变形, 不同圆域内的泽尼克多项式系数亦有较大改变, 对拟合精度造成一定影响。更精确的方法是使用另外的级数展开式。

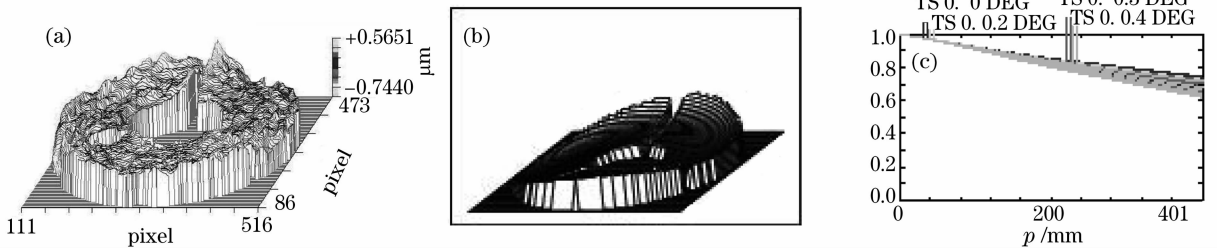


图 4 干涉仪实测参量(a)、拟合的整体出瞳波前(b)及 150 次蒙特卡罗模拟获得的调制传递函数分布(c)  
Fig. 4 Parameter of interferometric diagram (a), exit pupil wavefront diagram fitted by polynomial (b), and MTF distribution range of 150 Monte Carlo simulations (c)

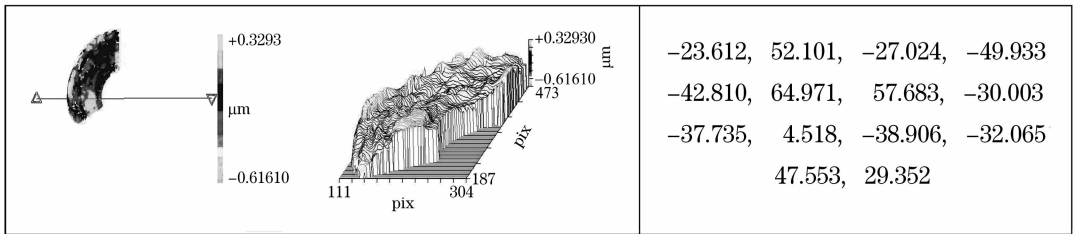


图 5 子镜的出瞳波前和 10 阶 36 项泽尼克多项式的前 14 项系数  
Fig. 5 Sub-mirror's exit wavefront and former 14 Zernike coefficients of 10th order 36 terms

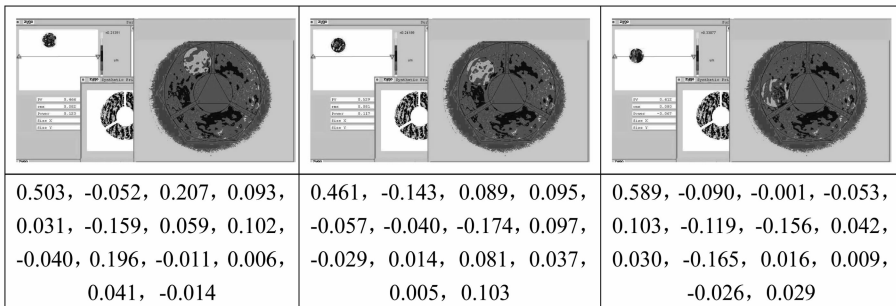


图 6 子镜不同圆域内 10 阶 36 项泽尼克多项式的前 14 项系数  
Fig. 6 Former 14 Zernike coefficients of 10th order 36 terms in different circle areas of one sub-mirror

将干涉仪实测获得的子出瞳波面重构获得的子出瞳波函数, 代入(3)式积分求出像面的复振幅分布函数, 并由此获得系统的调制传递函数。但每块子

出瞳波函数对应不同坐标系, 需要离焦并不断迭代获得整体出瞳波前的最佳拟合焦面或像面。计算获得的调制传递函数在  $40\text{ lp/mm}$  时约为  $0.58$ , 此时

从系统的理想高斯像面移动了约 $-0.014\text{ mm}$ 。

干涉仪通过采样获得波前,直接拟合成波面计算调制传递函数;而(3)式是通过出瞳子波面衍射直接积分叠加以获得像面复振幅分布,进而获得调制传递函数。比较而言,前者除了算法等因素外,还有子镜采样点不全,受工作条件(震动、空气气流)限制等因素;后者因为更接近实际情况,因而更为精确。

对系统进行了成像实验,采用了 36 线对的辐射状鉴别率板和对应像面分辨力为  $39.37\text{ lp/mm}$  的矩形光栅(对应  $12.7\text{ }\mu\text{m}\times 12.7\text{ }\mu\text{m}$  像素大小,近似于模拟计算的  $40\text{ lp/mm}$ ),成像器件采用了互补型金属氧化物半导体(CMOS)器件,如图 7 所示。辐射状分划板对应的目视最大可鉴别线对约为  $100\text{ lp/mm}$ ,矩形光栅换算后对应的  $39.37\text{ lp/mm}$  时调制传递函数约为 0.23。考虑到电子器件的传递函数(标称为 0.5)和矩形光栅的衬比度(95%)、平行光管传函及其他影响传函的不确定误差,则光学系统的传递函数应为 0.46 以上。可认为采用惠更斯衍射直接积分的方法获得的调制传递函数置信度更高。

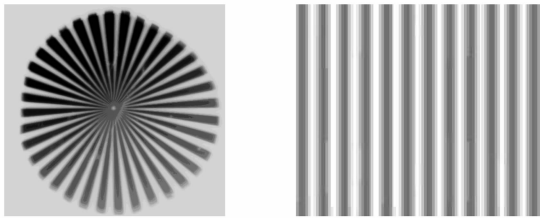


图 7 辐射状鉴别率板和矩形光栅通过系统所成像

Fig. 7 Images of discrimination plane and raster

## 4 结 论

在子孔径合成光学成像系统中,离散子镜的失调误差使出瞳波面离散。由于子镜的加工精度和边缘效应的影响,以及干涉仪的算法和拟合精度限制,测量参量与实测值有较大差异,仅能对系统进行定性的像质评估。使用惠更斯衍射直接积分的方法可

以较为精确的获得实际像面的复振幅分布和能量分布,具有较高的像质评估精度,但需要不断迭代以重新确定最佳焦面,需要较大计算量,且由于子出瞳波前呈非圆域,不能由泽尼克多项式直接表示,需要多次平均,或使用另外的多项式表达。

## 参 考 文 献

- 1 Jim Groker, Charlie Atkinson, Dennis Ebbets *et al.*. TRW/ball: next generation space telescope, NGST[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4013**: 27~34
- 2 Laura A. Burns, Scott A. Basinger, Scott D. Campion *et al.*. Wavefront control testbed experiment results[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5487**: 918~929
- 3 Phillip A. Sabelhaus, Doug Campbell, Mark Clampin *et al.*. An overview of the James Webb space telescope (JWST) project[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5899**: 1~14
- 4 Christopher Folley, Allen Bronowicki. Optical performance assessment under environmental and mechanical perturbations in large, deployable telescopes[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5867**: 1~9
- 5 Wang Zhile, Zhang Wei, Long Funian. Image quality evaluation for diffraction-limited optical synthetic aperture system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, (1): 35~39  
王治乐,张 伟,龙夫年. 衍射受限光学合成孔径成像系统像质评价[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 35~39
- 6 Jorge L. Flores, Gonzalo Páez, Marija Strojnik *et al.*. Effect of misalignment errors on the optical transfer function of the synthetic aperture telescopes[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5152**: 391~401
- 7 Born M, Wolf E. *Principles of Optics* [M]. Beijing: Science Press, 1978. 277~296
- 8 C. Bowers, D. Davila, B. Dean *et al.*. Initial test results from the next generation space telescope (NGST) wavefront sensing and control testbed (WCT) [C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4013**: 763~773
- 9 Scott A. Basinger, Laura A. Burns, David C. Redding *et al.*. Wavefront sensing and control software for a segmented space telescope[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **4850**: 362~370
- 10 Chen Qihai, Wang Zhile, Zhang Wei. Study on sub-aperture aberration of optical synthetic aperture imaging system[J]. *J. Applied Optics*, 2006, **27**(2): 112~115  
陈旗海,王治乐,张 伟. 光学合成孔径成像系统子镜像差研究[J]. *应用光学*, 2006, **27**(2): 112~115
- 11 Peter Wizinowich, Terry Mast, Jerry Nelson *et al.*. The optical quality of the W. M. Keck Telescope[C]. *Proc. SPIE*, 1994, **2199**: 94~104
- 12 Deng Jian, Zhang Wei, Liu Jianfeng. Tolerance study of the sub-mirror's surface shape and misadjustment for segmented mirror synthetic aperture optics (SAO)[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6148**: 61480p-1~6