

拼接式合成孔径光学系统的子镜失调误差分析

韩丽辉¹, 邓 键²

(1. 哈尔滨市光学仪器厂, 黑龙江 哈尔滨 150010; 2. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 拼接镜面合成孔径光学系统子镜的失调将对系统成像质量造成较大影响。不同方向的子镜失调误差有不同的误差-评价函数关系, 因此有各自严格的公差分配。研究重点是通过对于镜的干涉图和波前判研以及对系统的物理光学分析获得失调特征和数据, 从而指导装调。对比了三种结构相似但 F 数和口径不同的拼接主镜形式合成孔径光学系统, 对三个实际系统拼接产生的位置误差进行分析, 总结出各误差对系统像质影响的规律, 由此提出了类似系统的设计要点。

关键词: 拼接镜面; 子镜; 误差分析; 失调误差

中图分类号: TH741

文献标识码: A

The Sub-mirror Maladjustment Error Analysis of Segmented Mirror Synthetic Aperture Optical System

HAN Li-hui, DENG Jian

(1. Harbin Optical Instrument Factory, Harbin 150010; 2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The segmented mirror's misadjustment of synthetic aperture optical system will cause serious influence, and the different directions' misadjustment of the segment mirror have the different functional relationship to the whole system, and have the different tolerance. The key point is study the interference pattern of sub-mirrors and the wavefront and draw conclusion in the field of physical optics to get the trait and date of the misadjustment. Here we contrast three segmented aperture optical systems which have the different F number an aperture but the same structure, and analysis the position errors of sub-mirrors of these three systems, and get the conclusion of how the position errors effect the systems' imagining, and get the key points of design.

Key words: segmented mirror; sub-mirrors; error analysis; maladjustment errors

1 引 言

拼接式合成孔径光学系统可有效解决光学成像系统大口径尺寸与有限发射体积和质量之间的矛盾, 是提高天文望远镜和空间相机性能的途径之一, 其关键技术是子镜的拼接。在研究中发现, 子镜的失调误差将改变系统瞳函数, 从而对像面复振幅分布造成较大的影响。本文通过对衍射效应分析, 得出了子镜失调与系统像质的函数曲线关系, 从而指导并确定各种失调的误差限。

2 拼接镜面合成孔径光学系统

作为大口径拼接形式合成孔径光学系统的先期

实验系统, 设计了三个结构类似的折反式光学系统, 主镜为三子镜拼接而成, 如图1所示。

作为对比分析, 这三个系统有不同的焦距和口径。其中, 第一个系统的口径为 84.4mm, 焦距为 1350mm; 第二个系统的口径为 300mm, 焦距为 1350mm; 第三个系统的口径为 300mm, 焦距为 4800mm。

作者简介: 韩丽辉(1966-), 女, 一直从事产品设计, 产品改造, 产品工艺的编制, 工装设计等工作。E-mail: hlh6610@163.com

收稿日期: 2007-12-12; **修订日期:** 2008-01-18

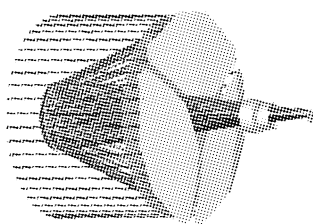


图1 三个结构类似的折反式光学系统

Fig. 1 the segmented mirror synthetic aperture optical system

本文对比分析了这三个系统在有相同单项误差时,一块镜片失调情况的系统参数,包括点扩散函数、波像差和点列图,并将三者进行对比研究,两块子镜失调的情况与之类似。

3 单向失调误差的模拟结果

子镜失调,系统结构不对称,PSF 函数和 MTF 函数也呈不对称性,因此,按照常规轴对称系统只取子午和弧矢方向来代表整个系统的 MTF 值信息量不够,应该用立体 MTF 来表述光学系统性能。立体 MTF 涉及取样密度和评价像质时各个方向的权重,计算量太大,这里不做讨论,只以 PSF 的斯特涅尔比来描绘系统的光学性能。当失调误差太大,超出干涉衍射效应范围,系统的成像特征将与仅有两块子镜时的系统类似。作为对比,用典型失调量对三系统相同位置的一子镜进行了位置误差的模拟,数据如表 1 所示。

表1 三个系统相同位置的子镜位置误差比较

Tab. 1 the three system contrast having the same maladjustment error

失调类型	A=85, F=1350 数据			A=300, F=1350 数据			A=300, F=4800 数据		
	W. F/ λ	S. D.	spot/ μm	W. F/ λ	S. D.	spot/ μm	W. F/ λ	S. D.	spot/ μm
理想	0.008	1	0.242	0.0845	0.981	0.854	0.012	1	0.392
$x \lambda$	0.2	0.975	1.411	0.665	0.762	1.5	0.347	0.935	2.543
$y \lambda$	0.116	0.986	1.298	0.468	0.794	1.7	0.219	0.952	2.582
$z 0.1\mu$	0.324	0.739	0.254	0.367	0.74	0.849	0.325	0.749	0.394
$z 0.2\mu$	0.639	0.663	0.249	0.671	0.642	0.85	0.638	0.669	0.409
$z 0.316\mu$	1.006	1	0.292	1.025	0.981	0.859	1.003	0.999	0.439
$z 0.4\mu$	1.271	0.814	0.305	1.281	0.833	0.87	1.267	0.824	0.468
$z 0.5\mu$	1.587	0.581	0.321	1.584	0.553	0.888	1.581	0.585	0.51
$z 0.633\mu$	2.007	1	0.343	1.992	0.971	0.92	1.999	0.999	0.574
$z 1.266\mu$	4.007	0.999	0.458	3.981	0.97	1.171	3.996	0.995	0.946
$x\backslash 0.15''$	0.091	0.992	0.998	0.384	0.86	1.474	0.513	0.759	6.107
$y\backslash 0.15''$	0.157	0.985	1.113	0.525	0.832	1.277	0.837	0.696	6.071

表中, W. F 为波像差 $p-v$ 值, 单位为 λ ; S. D. 为斯特涅尔比; spot 为弥散斑平均半径, 单位为 μm 。“|”表示平移失调, “\”表示倾斜失调。误差为负的情况与之类似。

x, y 方向的平移误差, 数据表明, 系统对此二方向的误差相对不敏感, 对成像质量影响较小, 在工程设计时可在这两个方向上分配相对较大的公差。对比三个系统, F 数较小的有更大的波像差, 更低的斯特涅尔比; 即使系统有相同的 F 数, 口径较大的系统比口径较小的系统波像差更大, 斯特涅尔比更低; F 数越大, 子镜的位置误差对系统的影响越小。

在对比的三个系统中, y 方向的平移失调对系统的影响均小于 x 方向, 但并不能因此得出结论到所有的类似系统, 而应该具体分析主镜镜面的圆锥系数和曲率半径, 并通过模拟试验得出结论。

x, y 方向上相同角度的倾斜误差, 焦距越长, 口径越大, 波像差越大。在对比的三个系统中, 子镜绕 x 轴旋转失调对系统的影响要小于绕 y 轴的影响, 这是因为子镜在 x 方向的尺寸大于在 y 方向的尺寸, 当子镜尺寸有变化时, 对系统的影响程度也会相应改变。

z 方向上的平移误差在检测波长的 $1/2$ 整数倍范围内呈波浪式起伏, 在 $1/2$ 检测波长范围内呈单调下降, 因为发生了干涉现象。

4 对子镜失调的物理光学分析

设点物 S 位于距反射镜为 l 的光轴上, 从物点 S 发出的发散球面波经过, 受到孔径和光学系统调制^[4]。在 $x_1 y_1$ 平面前的场分布为:

$$\tilde{E}(x_1, y_1) = A \exp\left(ik \frac{x_1^2 + y_1^2}{2l}\right) \quad (1)$$

经过光学系统, 镜片将调制光波的复振幅分布, 出瞳面的场分布变为:

$$\begin{aligned} \tilde{E}(x_1, y_1) &= A \exp\left(ik \frac{x_1^2 + y_1^2}{2l}\right) \hat{t}(x_1, y_1) \\ &= A \exp\left(ik \frac{x_1^2 + y_1^2}{2l}\right) P(x_1, y_1) \exp\left(-ik \frac{x_1^2 + y_1^2}{2f}\right) \\ &= AP(x_1, y_1) \exp\left(-ik \frac{x_1^2 + y_1^2}{2l'}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\hat{t}(x_1, y_1)$ 为镜片的透过(反射)函数; $P(x_1, y_1)$ 为光瞳函数; 由 $\Sigma = \Sigma 1 + \Sigma 2 + \Sigma 3$ 决定; k 为波数; f 为镜片的焦距; $l' = \frac{1}{f} - \frac{1}{l}$ 为像距; x_1, y_1 为衍射屏的直角坐标; x, y 为理想像面的直角坐标, 如图 2 所示。

由菲涅尔公式, 在 xy 坐标系内的场分布为:

$$\tilde{E}(x, y) = \iint_{\Sigma} \tilde{E}(x_1, y_1) \exp\left\{\frac{ik}{2l'}[(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2]\right\} dx_1 dy_1 \quad (3)$$

子镜没有失调的时候, 经镜面反射后衍射屏透光孔径上 $\Sigma 1, \Sigma 2, \Sigma 3$ 光波的复振幅分布是一致的, 如图 3(a) 所示; 当子镜 1 有失调时, $\Sigma 1$ 的反射函数 $\tilde{t}(x_1, y_1)$ 发生变化, 如图 3(b) 所示。

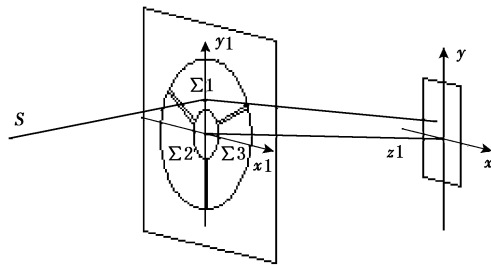
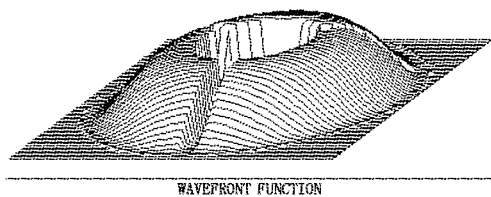


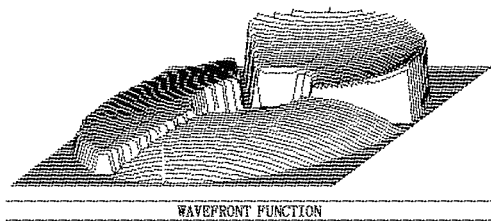
图2 反射镜的衍射

Fig.2 the diffraction of reflector



(a) 子镜没有失调

(a) the wavefront without misalignment



(b) 子镜有失调

(b) the wavefront with misalignment

图3 子镜的复振幅分布

Fig.3 the wavefront of exit pupil

将子镜失调后的反射函数 $\tilde{t}(x_1, y_1)$ 代入公式(3), 像面的场分布变为:

$$\begin{aligned} \tilde{E}(x, y) = & \iint_{\Sigma 1} \tilde{E}'(x'_1, y'_1) \exp\left\{\frac{ik}{2l'_1}[(x-x'_1)^2 + (y-y'_1)^2]\right\} dx'_1 dy'_1 + \\ & \iint_{\Sigma 2} \tilde{E}(x_1, y_1) \exp\left\{\frac{ik}{2l'}[(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2]\right\} dx_1 dy_1 + \\ & \iint_{\Sigma 3} \tilde{E}(x_1, y_1) \exp\left\{\frac{ik}{2l'}[(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2]\right\} dx_1 dy_1 \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $x'_1 = x_1 + \Delta x, y'_1 = y_1 + \Delta y, l'_1 = l_1 + \Delta l, \Delta x, \Delta y, \Delta l$ 为子镜 1 在 x, y, z 轴方向的平移失调, $\tilde{E}'(x'_1, y'_1)$ 对应入射光波在子镜 x, y 方向的倾斜失调后形成的波面方程:

$$\tilde{E}'(x'_1, y'_1) = AP'(x'_1, y'_1) \exp\left(-ik \frac{x'^2_1 + y'^2_1}{2l'_1}\right) \quad (5)$$

相对于单色检测光, 只有 z 轴方向平移误差时, 将 $l'_1 = l_1 + \Delta l$ 代入公式(4), 其他不变, 斯特涅尔比将有如图 4 所示的起伏变化。

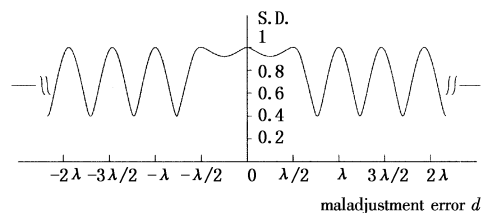


图4 位置误差失调时斯特涅尔比曲线

Fig.4 the S. D. -d curve of piston maladjustment error

类似的, 将其他失调代入公式 4 可得函数曲线关系如图 5 所示。

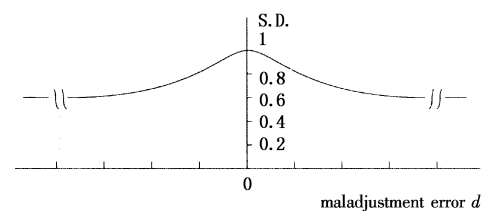


图5 其他失调条件下斯特涅尔比曲线

Fig.5 the S. D. -d curve of decenter/tilt maladjustment error

以上曲线表明, 在失调量较小的时候有一个近似线性区, PSF 函数随失调量的减小而呈近似线性

变化;随着失调量的增大,当失调量为单色检测波长的1/2左右开始进入非线性震荡区,PSF函数随失调的增加而像波浪一样起伏;当失调量进一步增加,系统的性能跟只有两块子镜时候一样。

近似线性区和震荡区可称为干涉效应作用区。由于干涉效应,在震荡区的某些失调会使系统性能低于仅有两块子镜时的情况。

当系统用于某一波段范围的时候,复振幅为该波段的叠加:

$$\tilde{E}_{\lambda 1, \lambda 2} = \int_{\lambda 1}^{\lambda 2} \left(\iint_1 dx' dy' + \iint_1 dx dy + \iint_2 dx dy \right) d\lambda \quad (6)$$

此时斯特涅尔比与失调量的对应关系与图4类似,但由于震荡曲线的叠加关系,震荡区的振幅显著下降。由公式(6)可知,系统使用波段范围越窄,震荡区的振幅越大;平均波长越长,最小波长越大,近似线性区的范围也越大。

除去 z 轴方向的平移震荡外,系统性能随其他单项误差的增加而呈单调降低。综合失调的情况即为图4、图5曲线的叠加,如图6所示。

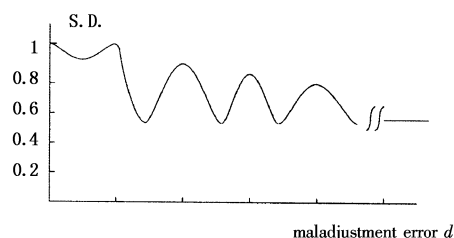


图6 各种失调条件下斯特涅尔比曲线

Fig.6 the S. D. -d curve of all kinds of maladjustment error

5 结论

拼接形式的合成孔径光学系统可以认为是多孔干涉系统。通过子镜的光波,复振幅的叠加决定了像面光强分布。当失调误差较小时,主要表现为衍射效应,斯特涅尔比较大,衍射斑的中央主极大占据了能量的大多数;随着失调误差增大,像面干涉效应逐渐增大,斯特涅尔比逐渐降低,将出现明暗相间的条纹。

子镜失调情况分别为:单项失调,包括 x 方向平移误差, y 方向平移误差, z 方向平移误差; x 方向的倾斜误差, y 方向的倾斜误差;综合误差包括各方向平移和倾斜误差的综合情况。

x, y 方向的平移误差对系统的性能参数较倾斜误差的小, z 轴方向平移误差的影响最大;在 z 轴方向的平移误差有个非线性区和近似线性区,非线性区在半波长整数倍到数个波长之间,近似线性区在1/2波长之下,即在此区间光学系统的性能参数(PSF, MTF)成近似线性的变化;系统 F 数越大,系统对子镜失调误差越不敏感;减小主镜的相对口径也有利于扩大公差范围,使整个系统有一个较小的 F 数,但要增加次镜的加工难度;主镜口径越大,系统公差要求越严;子镜倾斜失调的误差限为系统的角分辨率,但针对具体的系统,焦距越长,倾斜失调的角度公差范围越小。

在拼接形式的合成孔径光学系统结构设计中,系统总的波像差除了子镜的失调误差外还包括其他传统系统的误差,而子镜的失调误差对系统其他误差造成的性能下降几乎没有补偿的可能,因此需要更严格的公差限制。

参考文献:

- [1] W Scott Smith, H P Stahl. Overview of mirror technology development for large lightweight space-based optical systems [C]//Optomechanical Engineering 2000, SPIE, 2001, 4198: 1-8.
- [2] E P Kasl, D Crowe. A critical review of ultralightweight composite mirror technology [C]//Advanced Materials for Optics and Precision Structures, SPIE, 1997, CR67: 159-175.
- [3] Basinger David C, Redding Andrew E, Lowman Laura A, et al. Optical and IR space telescopes and instrument [C]//UV, SPIE, 2000, 4013: 749-756.
- [4] Douglas C Neam, Paul A Lightsey, Jams H Crocker. Perspectives on primary mirror figure control for a space based optical telescope [C]//UV, SPIE, 2000, 4013: 649-689.
- [5] J H Burge, J R P Angel, B Cuerden, et al. Lightweight mirror technology using a thin facesheet with active rigid support [C]//SPIE, 1998, 3356: 690-701.