

doi:10.3788/gzxb20134210.1203

大口径衍射望远系统公差分析及测量

刘华^a, 卢振武^a, 闫勇^b

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 a. 光电技术研发中心; b. 星载一体化技术研究室, 长春 130033)

摘要: 由于薄膜衍射元件表面质量密度低、面形公差宽松, 可将其作为空间大口径衍射望远系统的主镜, 构成具有超大口径、轻质量、高集光率的光学载荷, 提高对地球不受干扰、实时观测能力。本文分析了衍射元件的加工公差、衍射望远系统两部分空间相对位置的系统公差, 提出了衍射望远系统两部分空间相对位置测量方法, 并分析了测量准确度。该方法利用两种不同结构的计算全息元件, 将激光光源在 CMOS 有源探测器上形成两个聚光光斑, 实时分析两光斑的相对位置, 可以精确测量偏心量和倾斜量, 测量准确度分别可达 $50\ \mu\text{m}$ 和 0.003° , 为未来大口径衍射望远系统在空间的实施奠定了基础。

关键词: 光子筛; 衍射; 测量; 望远镜; 对准; 薄膜; 空间光学

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)10-1203-5

Large Aperture Diffractive Telescope Tolerance Analysis and Measurement

LIU Hua^a, LU Zhen-wu^a, YAN Yong^b

(a. Optoelectronics Technology Center; b. National and Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Film diffractive optical elements have the characteristics of low surface mass density and loose surface shape tolerance. Large aperture diffractive telescope system with film diffractive optical element as the primary lens, as the optical payload with super large aperture, light quality and high etendue, has much more ability to observe earth real time and undisturbed. In this paper, the fabrication tolerance of the diffractive element and relative position tolerance of the two parts of the diffractive telescope system were analyzed. A measuring method of the relative position of the two parts of the diffractive telescope system was proposed and the measuring accuracy was analyzed. This method can form two spots on the CMOS active detectors with laser source using two computer-generated holograms (CGH) elements of different structures. The center deviation and tilt can be measured exactly by analyzing the relative position of the two spots real time. The measuring accuracy can achieve $50\ \mu\text{m}$ and 0.003° respectively. These critical technologies lay the foundation for the implementation of the large aperture diffractive telescope system in the future.

Key words: Photon sieves; Diffraction; Measurement theory; Telescope; Alignment; Films; Space optics

0 引言

为了提高对地球观测能力, 尤其是不受干扰、实时地观测地球, 对空间遥感载荷提出了前所未有的挑战, 要求其同时具有超大口径、轻质量、高集光率

等特点。而传统式的空间载荷(折射式或反射式的望远系统)已经无法全方位满足这些要求, 于是一些全新理念的载荷系统纷纷出台, 如薄膜反射镜技术^[1]以及衍射技术^[2-5]。薄膜反射镜虽然可以将望远系统的主镜做得很轻薄, 但是由于需要亚微米级表面位

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 61137001)资助

第一作者: 刘华(1976-), 女, 副研究员, 博士, 主要研究方向为光学检测、光学设计、衍射光学。Email: girlliuhua@sohu.com

收稿日期: 2013-03-20; 录用日期: 2013-06-06

置控制准确度,必须采用主动表面控制,传感器和控制系统额外增加了光学系统的重量和复杂性.衍射光学的工作原理为 FRESNEL 透镜,同时具备超轻的质量和宽松的公差.将薄膜平面衍射元件作为大口径望远镜的主镜,不仅能实现超大口径、超轻量化,还能够实现宽松的面形准确度控制公差,降低发射成本.目前美国和欧洲各国纷纷展开了衍射望远镜这种新型载荷的研究^[6-11].我国虽然在衍射光学方面做了很多工作^[12-15],但在衍射望远系统方面做的工作甚是匮乏,仅有国防科技大学的颜树华曾经进行过宽光谱超大孔径衍射望远系统的设计^[12].但是这些研究都是基于整体结构方案和光学系统设计的,关于结构的公差分析和测量方法均未做细致研究,严重影响了这种方案的可行性.

本文在研究了大口径衍射望远系统总体空间结构的基础上,详细分析了大口径衍射元件的加工公差、大口径衍射望远系统的系统公差,并基于计算全息元件(Computer Generated Hologram, CGH)的特性提出了衍射望远系统两部分空间相对位置测量方法,该方法可以高准确度实现空间两部分相对倾斜和偏心的测量.这些关键技术研究对大口径衍射望远系统在空间的真正实施奠定了良好的基础.

1 大口径衍射望远系统总体结构

大口径衍射望远系统就是利用大口径衍射元件作为物镜,利用带有反衍射元件的离轴三反系统作为校正镜,并分别搭载在空间两颗卫星上,形成合作式望远系统,如图 1.

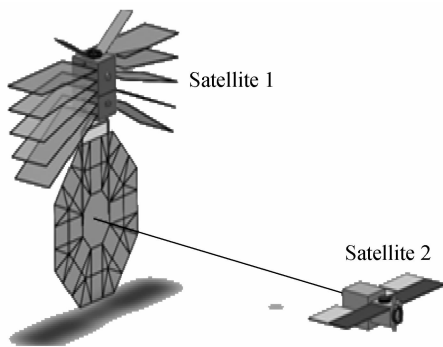


图 1 合作式空间衍射成像相机

Fig. 1 Cooperative space diffraction imaging camera

利用衍射光学元件轻薄、可折叠、面形公差宽松的特点,将大口径衍射元件作为主镜,实现轻量化的空间望远系统.但是由于衍射元件自身色散大、有杂光的缺陷,还需要校正镜对其色差进行校正,以扩宽其工作谱段,并通过一定措施来遮挡部分杂散光.基于衍射光学元件的大口径空间望远系统由衍射主镜和校正镜构成.衍射主镜负责收集光学信息,校正镜

进行像差校正.主镜和校正镜分别搭载在位于地球同步轨道上相距一定距离的两颗卫星上,形成合作式空间衍射成像相机.

卫星 2 上装有太阳敏感器、遮阳板、衍射物镜和测量两颗星相对位置的测量系统结构 2(见图 2).卫星 1 上搭载校正镜,还有测量两颗星相对位置的测量系统结构 1(见图 3).

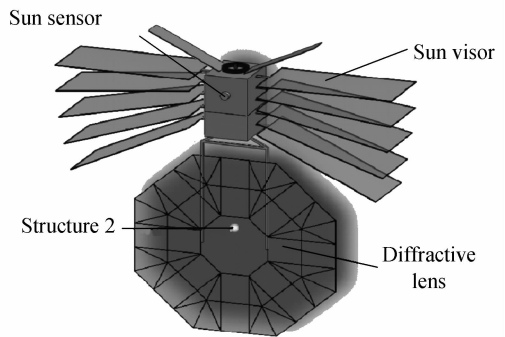


图 2 搭载衍射主镜的卫星 2

Fig. 2 Satellite 2 carrying the diffraction primary lens

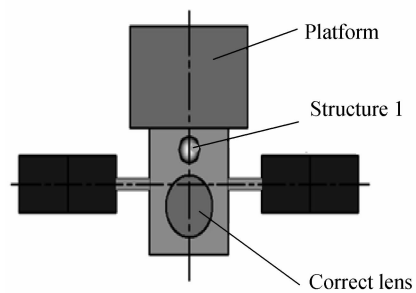


图 3 搭载校正镜的卫星 1

Fig. 3 Satellite 1 carrying the correction lens

2 大口径衍射元件的加工公差要求

大口径衍射元件是在薄膜等厚基底上制作微结构,属于透射平板型薄膜元件,它的制作公差有三类:沿光轴方向上的波纹公差 Δz 、沿径向方向上的微结构位置公差 Δy 、基底等厚公差 Δt .

如图 4,一束平行光垂直入射衍射元件,聚焦在焦点处,焦距为 f ,入射高度为 y .假设衍射元件沿光轴方向移动 Δz ,则移动前后光路的光程差为 Δl ,即: $\Delta l = L_2 + \Delta z - L_1 = \Delta z [1 - \cos \theta(r)]$.

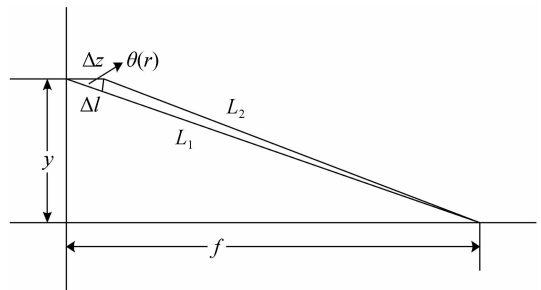


图 4 沿光轴方向上的波纹公差 Δz

Fig. 4 The ripple tolerance Δz along the light axis

根据泰勒展开式 $f(x) = f(0) + f'(0)x + \frac{f''(0)}{2!}x^2 + \dots + \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}x^{n+1}$ 有

$$1 - \cos \theta(r) \approx 1 - \left[1 - \frac{1}{2}\theta^2(r) \right] = \frac{1}{2}\theta^2(r) \approx \frac{y^2}{2f^2} \quad (1)$$

则, $\Delta l = (1 - \cos \theta(r)) \Delta z \approx \frac{y^2}{2f^2} \Delta z$. 又因为入射高度 y 在衍射元件的边缘范围内有 $y \leq r_{\max}$, 所以

$$\Delta l \leq \frac{r_{\max}^2}{2f^2} \Delta z \quad (2)$$

推导出衍射元件在光轴方向上的面形公差 Δz 为

$$\Delta z \geq \frac{f^2}{r_{\max}^2} \Delta l = 8(f^\#)^2 \Delta l, \Delta l = \frac{\lambda}{10} \quad (3)$$

同理,沿径向方向上的微结构位置公差 Δr 为

$$\Delta r \geq \frac{f}{r_{\max}} \Delta l = 2f^\# \Delta l, \Delta l = \frac{\lambda}{10} \quad (4)$$

衍射元件基底厚度公差 Δt 为

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{n-1}, \Delta l = \frac{\lambda}{10} \quad (5)$$

以口径为 100 m, 焦距为 10 000 m 的石英玻璃衍射物镜为例, 其面形公差见表 1, 相对于反射镜, 公差相当宽松, 所以适合应用于大口径空间望远系统.

表 1 衍射物镜面形公差

Table 1 The shape tolerance of the diffraction objective lens	
The diffraction objective lens parameters	
$D=100 \text{ m}, f=10\,000 \text{ m}, \lambda=0.65 \mu\text{m}$	
$n=1.5(\text{silica glass}), t=300 \mu\text{m}$	
Ripple tolerance $\Delta z/\text{mm}$	5
Annule position tolerance $\Delta r/\mu\text{m}$	12
Basement thickness tolerance $\Delta t/\mu\text{m}$	0.12

3 大口径衍射望远系统的系统公差

大口径衍射望远系统中的衍射主镜、校正镜都有各自的光轴, 理想状态下两光轴完全重合, 但是实际使用中是无法实现, 两光轴肯定会有偏移和倾斜(见图5). 以校正镜光轴为基准光轴, 衍射物镜的光

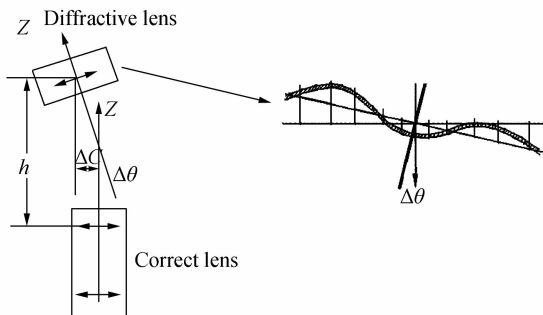


图 5 衍射望远系统空间相对位置

Fig. 5 The relative position of the diffractive telescope system

轴相对于校正镜光轴发生倾斜, 角度为 $\Delta\theta$. 衍射物镜的镜心相对于校正镜光轴发生偏离, 偏离量为 Δc . 衍射物镜与校正镜沿着校正镜光轴方向的间距也会发生改变, 变化量为 Δh . 假设衍射物镜的口径为 D , 将倾斜后的物镜投影到 x 平面, 则物镜边缘的衍射微结构位置会发生改变, 改变的值为

$$\Delta x = \frac{1}{2}D[1 - \cos(\Delta\theta)] \quad (6)$$

Δx 值需要小于等于衍射元件在径向方向最边缘处的环带位置公差 Δr , 即

$$\frac{1}{2}D[1 - \cos(\Delta\theta)] \leq 2f^\# \Delta l \quad (7)$$

得出倾角 $\Delta\theta$ 需要满足

$$\Delta\theta \leq \arccos\left(1 - \frac{4f^\#}{D}\Delta l\right) \quad (8)$$

ΔC 值需满足

$$\Delta C \leq 2f^\# \Delta l \quad (9)$$

计算得到的 ΔC 值非常小, 主要是因为计算时要求最边缘处由偏心引起的波前差小于 $1/10\lambda$, 实际上最边缘处由偏心引起的波前差是最大的, 其他位置由偏心引起的波前差会向中心靠近而不断减小. 所以实际的偏心公差 ΔC 按一定比例放大, 具体放大倍数与衍射物镜口径和校正系统结构有关, 可以根据实际设计结果分析得到. Δh 值如果不考虑调焦, 则需要在焦深范围内, 即

$$\Delta h \leq 4\lambda(f^\#)^2 \quad (10)$$

如果考虑通过调焦来补偿间距变化带来的影响, 则间距的公差会放大很多. 分析可得: 1) 衍射物镜光轴相对于校正镜光轴的倾角公差 $\Delta\theta$, 与衍射物镜的口径 D 、物镜的 $f^\#$ 、中心工作波长 λ 有关, 一般可以达到 $\pm 0.1^\circ$ 以上; 2) 衍射物镜的镜心需要在校正镜光轴上, 其偏离量公差 ΔC 比较严格; 衍射物镜镜心与校正镜镜心沿着校正镜光轴方向的间距公差 Δh , 通过调焦补偿, 可以在焦深范围内实现较大的宽展.

口径为 100 m 的衍射望远系统, 其两部分的相对空间位置要求见表 2. 对于相距 10 000 m 的两颗卫星, 显得非常严格. 首先需要利用比较好的测量系统测试出相应值, 然后反馈给卫星姿态控制系统, 调

表 2 衍射望远系统两部分的相对空间位置公差分析表
Table 2 The relative position tolerance of the two parts of diffractive telescope system

The diffractive objective lens parameters	
$D=100 \text{ m}, f=10\,000 \text{ m}, \lambda=0.65 \mu\text{m}$	
$n=1.5(\text{silica glass}), t=300 \mu\text{m}$	
The angle $\Delta\theta/(\text{°})$	± 0.04
The center deviation $\Delta c/\text{mm}$	± 3
The distance variation $\Delta h/\text{mm}$	± 200

整卫星姿态和指向以满足光学性能的要求。

4 衍射望远系统两部分相对空间位置的测量方法

测量系统需要结构简单,准确度高,本文采用图6所示的系统测量了 $\Delta\theta$ 和 ΔC .该系统由两部分构成(见图6).结构1为一整体,装调好后安装在校正镜所在的卫星上,结构2为一整体,装调好后安装在衍射物镜所在的卫星上.安装时要求结构1与校正镜两者的光轴严格平行,结构2与衍射物镜两者光轴严格平行,同时结构1与结构2的中心相对应时,校正镜与衍射物镜的镜心也相对应.因为衍射物镜口径很大,而结构2的口径相对很小,所以将结构2安装在衍射物镜的内部.

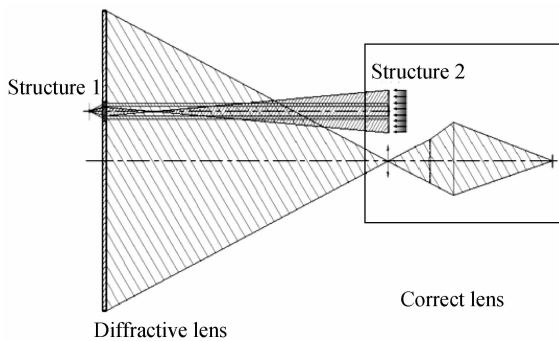


图6 测量系统与衍射望远系统相对位置结构

Fig. 6 The relative position of the measuring system and the diffractive telescope system

结构2包括激光光源、激光准直系统和特殊衍射元件 CGH_1 .结构1包括特殊衍射元件 CGH_2 和CMOS有源像素数传感器(图7).首先激光光源经过准直系统后形成平行光,照射到 CGH_1 上. CGH_1 属于一种平板式衍射元件,分为三个区域:A、B、C.区域A在最外围,面积最大,它将平行入射光会聚于焦点处.区域B在中间,不对入射光产生任何影响.区域C在中心,不透光. CGH_2 也属于一种平板式衍

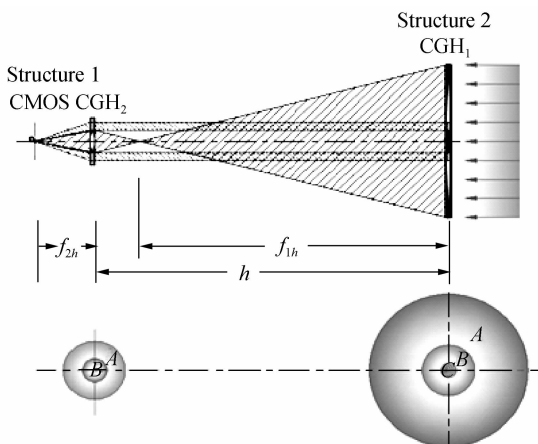


图7 测量系统结构示意图

Fig. 7 The structure of the measuring system

射元件,它分为两个区域:A、B.区域A与 CGH_1 的区域B相对应,两者尺寸相同,并将其透射过来的平行光会聚于焦点位置,形成会聚点1. CGH_1 的区域A会聚的光经过 CGH_2 的区域B后,再次会聚,形成会聚点2.当测量结构的两部分没有任何相对位置偏差时,两个会聚点位于同一位置.说明两结构既没有偏心也没有上下移动,也就是表明两颗星的相对位置正确.

当两结构出现偏心,会聚点1仍在原来中心位置,而汇聚点2则会根据偏心的情况偏离原来中心位置,CMOS探测面上将出现两个分离的会聚点.其中由平行光会聚形成的会聚点1仍然在原来中心位置,而会聚点2向上移动,表明结构2向上偏心.当两结构出现倾斜时,会聚点1和会聚点2均会偏离原来中心位置,CMOS探测面上将出现两个分离的会聚点.当两结构出现倾斜加偏心时,会聚点1会偏离原来中心位置,会聚点2则有可能在原来中心位置,也有可能偏离原来中心位置,CMOS探测面上将出现两个分离的会聚点.当然还有其它情况,均可根据两会点的相应位置判别出来.当两结构相对倾斜时,两颗星之间需要进行角度调整,首先使聚光点1回到原来中心位置,然后根据聚光点2的偏离状况确定偏心量,并进行调整.实例计算中假设 CGH_1 的区域A的口径 $DCGH_{1A}=0.6\text{ m}$,焦距 $f_{1A}=2\ 900\text{ m}$;区域B的口径 $DCGH_{1B}=0.1\text{ m}$,区域C的口径 $DCGH_{1C}=0.03\text{ m}$. CGH_2 的区域A的口径 $DCGH_{2A}=0.1\text{ m}$,焦距 $f_{2A}=2\text{ m}$;区域B的口径 $DCGH_{2B}=0.03\text{ m}$.使用激光波长 $0.632\ 5\ \mu\text{m}$,实现的具体测量准确度见表3.

表3 测量准确度

Table 3 The measuring accuracy

The parameters of CGH	
$DCGH_{1A}=0.6\text{ m}$, $f_{1A}=2\ 900\text{ m}$, $DCGH_{1B}=0.1\text{ m}$	
$DCGH_{1C}=0.03\text{ m}$, $\lambda=0.632\ \mu\text{m}$, $h=3\ 000\text{ m}$	
$DCGH_{2A}=0.1\text{ m}$, $f_{2A}=2\text{ m}$, $DCGH_{2B}=0.031\text{ m}$	
The resolution ratio of CMOS after subsection is $1\ \mu\text{m}$	
The spot semidiameter r_1 on the CMOS detector/ μm	74
The spot semidiameter r_2 on the CMOS detector/ μm	16
The measuring accuracy of eccentricity/ μm	≥ 50
The measuring accuracy of inclination angle/ $^\circ$	≥ 0.003

5 结论

本文分析了大口径衍射元件的加工公差、大口径衍射望远系统的系统公差,提出了衍射望远系统两部分空间相对位置实时测量方法.该方法利用两种不同结构的计算全息元件,将激光光源在CMOS有源探测器上形成两个聚光光斑,实时分析两光斑

的相对位置,便可以精确测量偏心量和倾斜量,测量准确度分别可以达到 $50\ \mu\text{m}$ 和 0.003° 。这些关键技术从原理上证实了大口径衍射望远系统的可行性,为未来大口径衍射望远系统在空间的实施奠定了良好的基础。

参考文献

- [1] RITTERA J, BAERA A, DITTOB T. Large ultra light weight photonic muscle membrane mirror telescope[C]. SPIE, 2008, **7010**: 70102K-1.
- [2] ANDERSEN G, TULLSON D. Broadband antihole photon sieve telescope[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(18): 3706-3708.
- [3] ANDERSEN G. Membrane photon sieve telescopes [C]. SPIE, 2010, **7731**: 505-511.
- [4] ANDERSEN G. Membrane photon sieve telescopes [J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(33): 6391-6394.
- [5] GEOFF A, OLHA A, MICHAEL E, *et al.* FalconSAT-7: A membrane photon sieve cubeSat solar telescope[C]. SPIE, 2013, **8442**: 84421C-2.
- [6] GEOFF A, MICHAEL E, MATTHEW G, *et al.* Membrane photon sieve telescope[C]. SPIE, 2013, **8385**: 83850B-1.
- [7] HYDE R, DIXIT S, WEISBERG A, *et al.* Eyeglass: A very large aperture diffractive telescopes[C]. SPIE, 2002, **4894**: 28-39.
- [8] MEINEL A, MEINEL M. Large membrane space optics: imagery and aberrations of diffractive order [J]. *Optical Engineer*, 2002, **41**(8): 1995-2007.
- [9] WOODDRIFF R. Design concepts for future large aperture wide field of view UVIS optical systems[C]. SPIE, 2003, **4854**: 50-60.
- [10] ANGLE F, WANG R, JAME J. Achromatic hybrid refractive-diffractive lens with extended depth of focus[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(30): 5618-5630.
- [11] JIM E, ROD Hyde, RICHARD B. Twenty meter space telescope based on diffractive Fresnel lens[C]. SPIE, 2004, **5166**: 148-156.
- [12] ZHU Rong, YAN Xiao-na, LIANG Ling-liang, *et al.* Diffractive light intensity distribution of multilayer volume gratings illuminated by femtosecond pulse [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(11): 1998-2003.
朱荣, 阎晓娜, 梁玲亮, 等. 飞秒脉冲通过多层体光栅后的衍射光强分布[J]. *光子学报*, 2010, **39**(11): 1998-2003.
- [13] PANG Hui, YING Chao-fu, FAN Chang-jiang, *et al.* Design diffractive optical elements for beam shaping with hybrid algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(6): 977-981.
庞辉, 应朝福, 范长江, 等. 用于光束整形的衍射光学元件设计的混合算法[J]. *光子学报*, 2010, **39**(6): 977-981.
- [14] WU Hai-qing, ZHAO Xin-liang, LI Tong-hai, *et al.* Design of refractive/diffractive IR fish-eye optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(8): 1533-1536.
吴海清, 赵新亮, 李同海, 等. 折射/衍射红外鱼镜头光学系统设计[J]. *光子学报*, 2010, **39**(8): 1533-1536.
- [15] ZHU Wei, XU Yan, YAN Shu-hua. Design of broad bandwidth reflective-diffractive hybrid telescope with super large aperture[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, **29**(1): 40-44.
朱威, 徐琰, 颜树华. 宽光谱超大孔径反衍望远系统设计[J]. *应用光学*, 2009, **29**(1): 40-44.