

doi:10.3788/gzxb20174604.0422004

10 m 大口径薄膜衍射主镜的色差校正技术研究

任智斌, 胡佳盛, 唐洪浪, 金鑫

(哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001)

摘 要:分析了薄膜衍射主镜的成像性能及色散特性,利用含有衍射面的反射式消色差光路校正了衍射主镜的强色散,使成像系统的工作波段达到 40 nm、视场达到 0.02° ,设计了 10 m 口径、115.73 m 总长的短结构合成孔径薄膜衍射成像系统.结果表明,消色差光路将两边缘波长 $0.58\ \mu\text{m}$ 与 $0.62\ \mu\text{m}$ 之间的焦距差由 5.34 m 减小到 $17.27\ \mu\text{m}$.该研究提供了一种薄膜衍射主镜成像系统的设计方案,可为超大口径薄膜衍射成像系统的工程化研究提供参考.

关键词:衍射光学;遥感;薄膜;像质分析;光学设计

中图分类号:TN216; TN219

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)04-0422004-6

Study on Chromatic Aberration Correction of 10 Meter Large Aperture Membrane Diffractive Primary Lens

REN Zhi-bin, HU Jia-sheng, TANG Hong-lang, JIN Xin

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The imaging and dispersion characteristics of membrane diffraction primary lens were studied, and the strong dispersion of diffraction primary lens was corrected by using the reflective achromatic optical light path with diffractive optical surface. Thus, the membrane diffractive optical system with an aperture of 10 m and a total length of 115.73 m was designed with the waveband of 40 nm, the field of view of 0.02° . The results show that, the focal length difference between the two edge wavelength of $0.58\ \mu\text{m}$ and $0.62\ \mu\text{m}$ decreases from 5.34 m to $17.27\ \mu\text{m}$ by using the achromatic optical path. This study presents a design method for the imaging system with membrane diffraction primary lens, which can provide references for the engineering research of the large aperture membrane diffraction imaging system.

Key words: Diffractive optics; Remote sensing; Membrane; Image analysis; Optical design

OCIS Codes: 220.2740; 220.4610; 050.1380; 090.1970; 110.6770

0 引言

为了提高遥感卫星的分辨率,光学系统的口径需要不断地增大以满足高分辨率成像的需求.地球静止轨道与地面相距 36 000 km,为了在该轨道上获得高分辨率的遥感图像,光学系统的口径需要达到 10~20 m 才能收集到足够用于成像的光能量^[1].早在 21 世纪初提出的下一代空间望远镜的构想中,空间望远镜采用拼接反射镜形式的主镜可实现 10~20 m 口径^[2],最终确定了詹姆斯韦伯望远镜作为拼接反射镜主镜成像系统的工程化方案^[3-4],但拼接反射镜对公差的苛刻要求及支撑控制机构的复杂性制约了其工程化的进程.而薄膜成像技术为解决高分辨率成像问题提供了一种新思路,它具有可实现大口径、所用材料面密度极轻、面形控制要求低和生产工艺相对较简化等优点.最初的薄膜成像系统采用的是反射式薄膜主镜,该方案在实验

基金项目:国家自然科学基金(No. 61605035)资助

第一作者:任智斌(1976-),男,副教授,博士,主要研究方向为空间光学、衍射光学. Email: rzb@hit.edu.cn

通讯作者:胡佳盛(1994-),女,硕士研究生,主要研究方向为光学设计、空间光学. Email: js.hoo@outlook.com

收稿日期:2016-09-20; **录用日期:**2017-02-10

<http://www.photon.ac.cn>

室研究中取得了成功^[5-6],但由于薄膜反射主镜的严格公差要求使得其口径无法达到 10m. 近期的研究表明,大口径的平面衍射薄膜透射主镜的公差(Root Mean Square,RMS)值要比反射式薄膜主镜的公差宽松 100 倍左右^[7]. 2010 年 10 月,美国国防预先研究计划局(Defense Advance Research Projects Agency,DARPA)公布了采用透射式薄膜衍射主镜的 MORIE 卫星研究计划,2011 年 9 月 2 日,DARPA 将 MOIRE 项目的研发合同授予了 BALL 航天科技公司^[1]. 2012 年,BALL 公司公布了 MORIE 卫星的初步研究方案^[1]. 2014 年,BALL 公司公布了 MORIE 卫星的部分指标参量,口径为 10 m 的薄膜衍射主镜由 36 个圆形薄膜衍射子镜拼接而成,系统的工作波段为 40 nm(580~620 nm,薄膜材料透射率最高的波段),视场仅为 0.016°,但并未公布其光学系统的结构参量^[7]. 此后,BALL 公司开展了薄膜衍射主镜的支撑结构研究^[8-11]. 由于衍射主镜具有强烈的色散特性,色差难以校正,视场难以扩大,目前尚未见到 10 m 口径、40 nm 波段、0.016°视场的薄膜衍射主镜成像系统的设计结果. 为了探索窄波段、小视场的薄膜衍射主镜成像系统的应用领域,BALL 公司开展了将薄膜衍射成像系统用于空间光通信系统的方案研究,该系统仅使用 1.06 μm 或 1.55 μm 的单一色波长,但并未给出其具体光学系统的设计结果^[12].

我国研究人员对于衍射主镜成像系统进行了理论与实验研究,张月^[13]初步研究了衍射主镜的色散及 4 台阶薄膜主镜的加工技术;郑耀辉^[14]研究了衍射成像系统的光学结构及衍射主镜的分瓣式机械结构方案;刘民哲^[15]研究了入瞳口径为 50 mm 的膜光子筛的成像性能. 但上述研究仅停留在探索阶段,并未给出薄膜衍射成像系统的具体光学设计结果,也未研究如何实现 40 nm 工作带宽及 0.016°视场.

本文设计出了 10 m 口径的合成孔径薄膜衍射成像系统,利用含有衍射面的反射式消色差光路校正了薄膜衍射主镜的强色散,使成像系统的工作波段达到 40nm、视场达到 0.02°,该设计结果可为薄膜衍射成像技术的工程化研究提供参考.

1 薄膜衍射主镜成像原理及性能

图 1 给出了口径 10 m、焦距 80 m、外圈子镜口径为 1.4 m、内圈子镜口径为 1 m、工作波长为 0.6 μm、视场为 0.02°的合成孔径衍射主镜成像光路图. 图 2 给出了其调制传递函数(Modulation Transfer Function,MTF)曲线,可以看出,衍射主镜对于单色光成像时,MTF 随视场的增大迅速下降.

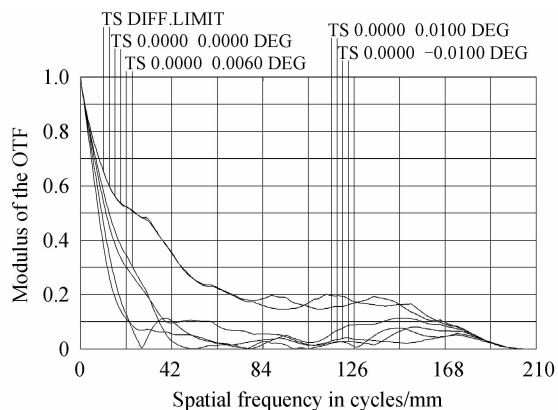


图 2 合成孔径衍射主镜的 MTF 曲线

Fig. 2 MTF curves of synthetic aperture diffraction primary lens

衍射透镜具有强烈的色散效应,其焦距与入射光波长呈反比关系,设计的中心波长 λ_0 的焦距 f_0 与波长 λ 的焦距 f_λ 的关系为

$$\frac{f_\lambda}{f_0} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (1)$$

所以,波长 λ 的光线焦点的离焦量为

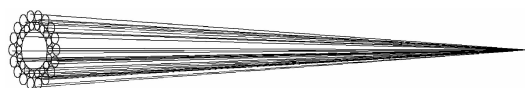


图 1 合成孔径衍射主镜成像光路

Fig. 1 Light path diagram of synthetic aperture diffraction primary lens imaging

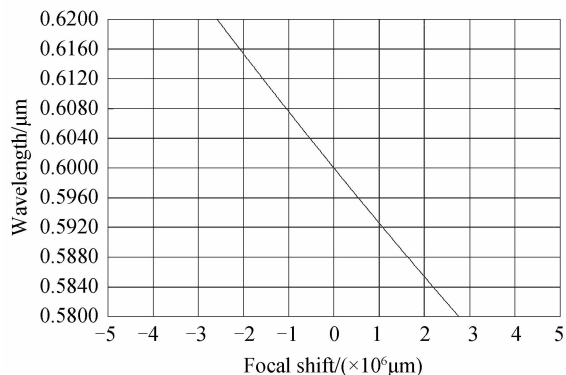


图 3 衍射主镜中不同波长光线的离焦量曲线

Fig. 3 Curve of focal shift of different wavelength for diffraction primary lens

$$\Delta f = f_\lambda - f_0 = f_0 \cdot \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda} \quad (2)$$

将衍射主镜的工作波长由 $0.6 \mu\text{m}$ 的单波长扩大为 $0.58 \sim 0.62 \mu\text{m}$ 波段时,不同波长光线的离焦量曲线如图 3,可以看出,两边缘波长 $0.58 \mu\text{m}$ 、 $0.62 \mu\text{m}$ 的离焦量分别为 2.76m 、 -2.58m ,两波长的之间的焦距相差 5.34m ,此结果完全符合式(2).所以,衍射主镜只能对单波长在小的视场范围内获得良好的像质,色差是限制其成像质量的最主要因素之一.

2 薄膜衍射成像系统设计

2.1 衍射主镜色差的校正方法原理

由于薄膜衍射主镜在两边缘波长 $0.58 \mu\text{m}$ 与 $0.62 \mu\text{m}$ 处的焦距相差 5.34m ,这么大的色差是无法利用不同色散的折射透镜校正的.利用与衍射主镜具有相同色散、相反光焦度的衍射透镜校正色差的 Schupmann 消色差方法可以有效地校正衍射主镜产生的色差^[16-17],其原理如图 4.在图 4 中,中心波长为 λ_0 的多色光经衍射主镜会聚后,长波($\lambda_0 + \Delta\lambda$)光线的焦距短,短波($\lambda_0 - \Delta\lambda$)的焦距长,将中继透镜置于中心波长 λ_0 的光线与光轴的交点处,中继透镜便将色散光束会聚于其后面的一点,在该点处放置与衍射主镜具有相同色散相反光焦度的消色差衍射透镜,该消色差衍射透镜便可校正色散光线的色差,然后经会聚透镜将消色差光线投射到像面成像.

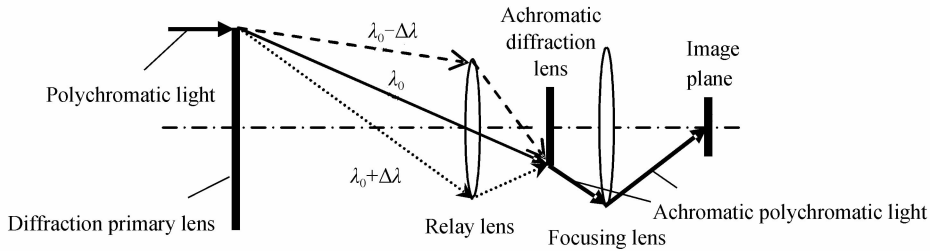


图 4 Schupmann 消色差系统光路

Fig. 4 Light path diagram of Schupmann achromatic system

在分析图 4 所示系统的消色差原理时,先去掉中继透镜,只考虑衍射主镜与消色差衍射透镜,然后在光焦度分解的过程中加入中继透镜.在近轴区域衍射主镜与消色差衍射透镜构成的光学系统可用光线追迹矩阵形式分析.光线的追迹坐标采用横截位置和光线方向两个参量, (x_1, θ_1) 、 (x, θ) 分别为衍射主镜、消色差衍射透镜处的坐标参量,则 Schupmann 消色差原理可以由矩阵表示为

$$(x, \theta)^T = \begin{bmatrix} 1 & L_M \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Pi_{11} & \Pi_{12} \\ \Pi_{21} & \Pi_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\Phi(\mu) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\Phi_1(\mu) & 1 \end{bmatrix} \cdot (x_1, \theta_1)^T = \begin{bmatrix} 1 & L_M \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Pi_{11} & \Pi_{12} \\ \Pi_{21} & \Pi_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \cdot (x_1, \theta_1)^T \quad (3)$$

式中, L_M 为消色差衍射透镜到像面的距离, $\mu = \lambda/\lambda_0$ 、 $\Phi_1(\mu)$ 为衍射主镜的光焦度, $\Phi(\mu)$ 为消色差衍射透镜的光焦度,矩阵 Π 为传输矩阵,矩阵 K 为色差矩阵.可以看出,式(3)中只有色差矩阵 K 与波长有关,其余矩阵均与波长无关.为了消除系统的色差,必须使矩阵 K 也与波长无关.矩阵 K 可展开为

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\Phi(\mu) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\Phi_1(\mu) & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_{11} - \Gamma_{12}\Phi_1(\mu) & \Gamma_{12} \\ \Gamma_{21} - \Gamma_{22}\Phi_1(\mu) - \Gamma_{11}\Phi(\mu) + \Gamma_{12}\Phi(\mu) & \Gamma_{22} - \Gamma_{12}\Phi(\mu) \end{bmatrix} \quad (4)$$

为了实现消色差,需要使矩阵 K 中的每一个元素均与波长无关.首先,要使矩阵 K 中的 K_{11} 元素与波长无关,需满足 $\Gamma_{12} = 0$.又因为光学系统的消色差矩阵的行列式必须等于 1,即单位行列式,所以

$$\Gamma_{11} = 1/\Gamma_{22} \quad (5)$$

式中, Γ_{11} 为衍射主镜与消色差衍射透镜构成的成像系统的放大倍率.要使 K_{21} 元素也波长无关,整理 K_{21} 可得

$$\Phi(\mu) = -\Phi_1(\mu)/\Gamma_{11}^2 + (\Gamma_{21} - K_{21})/\Gamma_{11} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,消色差衍射透镜的光焦距的第一项与波长有关,第二项与波长无关.所以,需要在消色差衍射透镜的前面加上光焦距与波长无关的中继透镜,使中继透镜的光焦距 Φ_{relay} 等于式(6)的第二项,即

$$\Phi_{\text{relay}} = (\Gamma_{21} - K_{21})/\Gamma_{11} \quad (7)$$

则消色差衍射透镜的光焦距只剩下与波长有关的第一项,即 $\Phi(\mu)$ 变为

$$\Phi(\mu) = -\Phi_1(\mu)/\Gamma_{11}^2 \quad (8)$$

又因为衍射主镜、消色差衍射透镜都满足式(1)的色散条件,所以,二者的焦距满足

$$f(\lambda) = -\Gamma_{11}^2 f_1(\lambda) \quad (9)$$

因此,为了校正衍射主镜的色差,图4所示的 Schupmann 消色差系统中的衍射主镜、消色差衍射镜及中继镜的光焦距、焦距应满足式(7)~(9)所示的关系.

2.2 衍射主镜成像系统消色差结构设计

消色差衍射镜前的光束需要接近于平行入射才能保证 Schupmann 消色散光路正常工作.文献[16]公布了口径 25 m、总长 2 500 m 的衍射主镜成像系统的设计方案,文献[18]公布了口径 20 m、总长 2 000 m 的衍射主镜成像系统的设计方案,根据这个比例关系,本文的 10 m 口径消色差衍射主镜成像系统的总长应为 1 000 m 左右,但系统的光路过长给支撑结构的设计带来了极大的困难.系统光路过长是制约 Schupmann 消色散方法应用的难题,目前尚未见到短结构宽波段衍射主镜成像系统的设计结果公布.此外,由于衍射主镜的口径为 10 m,图4的 Schupmann 消色差光路的中继透镜、消色差衍射透镜、聚焦透镜的口径均超过 1 m 而无法加工,所以,需要将这三个透镜改为反射镜.再者,为了扩大系统的视场,需要在校正色差的同时对慧差也给予校正,需要对 Schupmann 消色散光路进行适当改进.

图5给出了衍射主镜的色差校正光路,该光路采用2个中继反射镜校正了系统的球差与慧差,将发散的色散光束转变为接近平行的色散光束,然后利用含有衍射面的消色差会聚反射镜校正衍射主镜的色差.该色差校正光路的优点是全部元件均为反射镜,且校正光路结构紧凑.

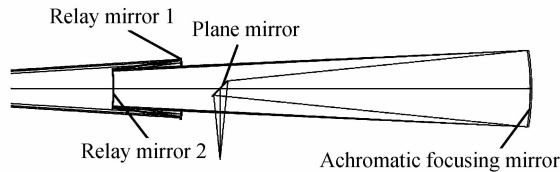


图5 衍射主镜的消色差光路

Fig. 5 Achromatic light path for diffraction primary lens

3 薄膜衍射成像系统的像质分析

将图5所示的消色差光路置于衍射主镜后 103.07 m 处,进而对整个薄膜衍射主镜成像系统进行设计,系统的光路图如图6,系统的结构参量见表1,其中第3面的圆锥系数为 0.043.



图6 消色差衍射主镜成像系统光路

Fig. 6 Light path diagram of imaging system with achromatic diffraction primary lens

表1 消色差衍射成像系统结构参量

Table 1 Structure parameters of achromatic diffraction imaging system

Surface	Radius/m	Thickness/m	Diameter/m
1	∞	100.000	10
2	-12.729	-3.070	2.914
3	-9.290	18.800	1.904
4	-10.442	-14.000	3.418
5	∞	3.167	1.000
Image	∞	-	7.021×10^{-3}

消色差薄膜衍射主镜成像系统的总长为 115.73 m,工作波段为 0.58~0.62 μm ,其不同波长光线的离

焦量曲线如图7,可以看出,两边缘波长 $0.58\ \mu\text{m}$ 与 $0.62\ \mu\text{m}$ 之间的焦距差由图3的 $5.34\ \text{m}$ 减小到 $17.27\ \mu\text{m}$,整个波段的最大焦距差为 $163.94\ \mu\text{m}$.图8、图9分别给出了衍射主镜、消色差会聚反射镜的相位与线频率沿径向的分布曲线,可以看出,衍射主镜的最小周期线宽为 $10\ \mu\text{m}$ 、消色差会聚反射镜的最小周期线宽为 $3\ \mu\text{m}$,衍射主镜与消色差会聚反射镜具有相同色散、相反光焦度,完全符合 Schupmann 消色差原理.

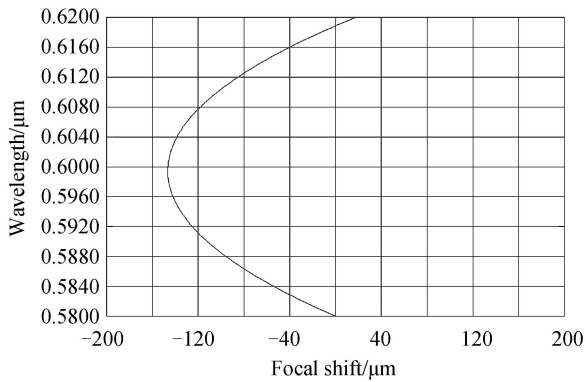


图7 消色差衍射系统中不同波长光线的离焦量曲线
Fig.7 Curve of focal shift of different wavelength for achromatic diffraction system

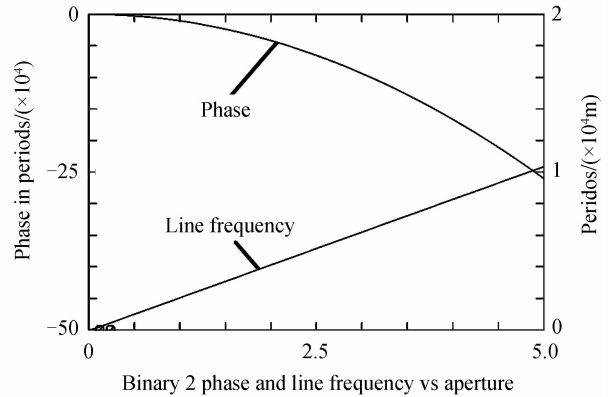


图8 衍射主镜的相位和线频率径向的分布曲线
Fig.8 Curve of phase and line frequency versus aperture of diffraction primary lens

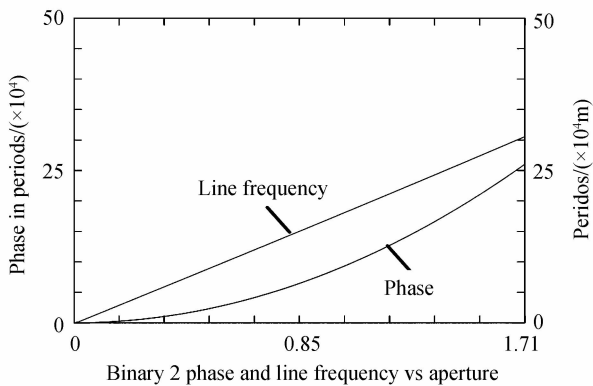


图9 消色差镜的相位和线频率径向的分布曲线
Fig.9 Curve of phase and line frequency versus aperture of achromatic diffraction mirror

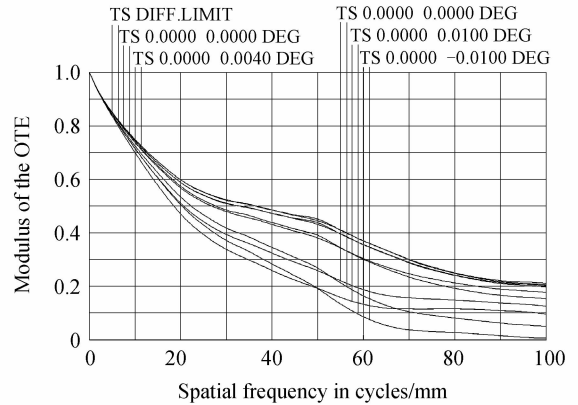


图10 消色差衍射主镜成像系统的 MTF 曲线
Fig.10 MTF curve of imaging system with achromatic diffraction primary lens

图10给出了 0.02° 视场、 $40\ \text{nm}$ 带宽的消色差薄膜衍射主镜成像系统的 MTF 曲线.图11给出了该系统的点列图,弥散斑半径的均方根值在 $2.52\sim 16.16\ \mu\text{m}$ 之间.可以看出,该系统的色差及单色像差均得到了有效校正.

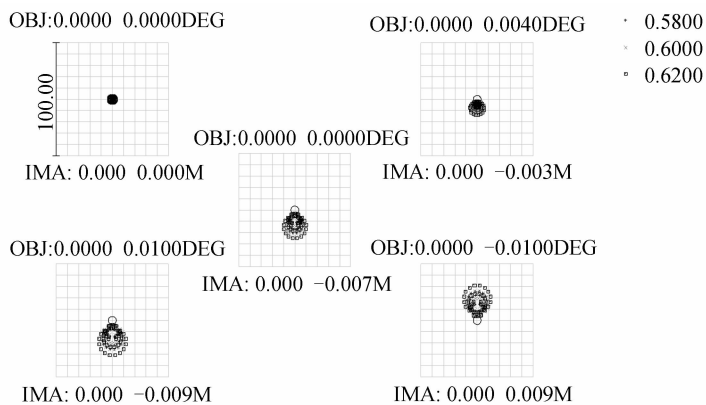


图11 消色差衍射主镜成像系统的点列图
Fig.11 Spot diagram of imaging system with achromatic diffraction primary lens

4 结 论

本文设计了口径为 10 m、工作波段为 0.58~0.62 μm 、视场为 0.02°、总长仅为 115.73 m 的合成孔径衍射主镜成像系统。与美国的 MORIE 卫星指标相比,本系统的波段、系统总长与 MORIE 卫星相符,视场略大于 MORIE 卫星的。本文利用反射式色差校正光路实现了薄膜衍射主镜系统的大视场、宽波段、短结构成像方式,可为超大口径薄膜衍射成像系统的工程化研究提供参考。若拓展本系统的工作波段会造成色差过大而无法校正,可尝试采用谐衍射薄膜主镜分波段成像的设计方案,下一步可深入开展此项研究。

参 考 文 献

- [1] TPAUL A L, CHRIS S, JEANETTE D. MOIRE-initial demonstration of a transmissive diffractive membrane optic for large lightweight optical telescopes[C]. SPIE, 2012, **8442**: 1-14.
- [2] DANIEL C, DAVID J. Technology for the next generation space telescope[C]. SPIE, 2000, **4013**: 784-794.
- [3] PAUL A L, ALLISION B, JAMES C. Optical performance for the James Webb space telescope[C]. SPIE, 2004, **5487**: 825-832.
- [4] JAMES W C, PAUL A L. Optical design and analysis of the James Webb space telescope; optical telescope element[C]. SPIE, 2004, **5524**: 30-41.
- [5] PATERSON C, MUNRO I, DAINTY J C. A low cost adaptive optics system using a membrane mirror[J]. *Optics Express*, 2000, **6**(9): 175-185.
- [6] ENRIQUE J F, PABLO A. Membrane deformable mirror for adaptive optics: performance limits in visual optics[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(9): 1056-1069.
- [7] PAUL A L, JEANETTE D, KEVIN W. MOIRE-ground demonstration of a large aperture diffractive transmissive Telescope[C]. SPIE, 2014, **9143**: 1-15.
- [8] THOMAS D. ADDEDPT-apparatus for direct detection of exoplanets by diffractive pupil telescope[C]. SPIE, 2014, **9143**: 1-8.
- [9] DAVID W, LARRY C, JEANETTE D. MOIRE primary diffractive optical element structure deployment testing[C]. 2nd AIAA Spacecraft Structures Conference, Kissimmee, Florida, 2015, 56: 1-10.
- [10] DAVID W, JEANETTE D, CHRIS P. MOIRE thermal vacuum structural stability testing[C]. 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, Kissimmee, Florida, 2015, 5: 1-9.
- [11] DAVID W, JEANETTE D, BRANDON B. MOIRE strongback thermal stability analysis and test results[C]. 56rd AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Kissimmee, Florida, 2015, 5: 1-15.
- [12] KEVIN W, ROBERT M, JEANETTE D. Large aperture diffractive receiver for deep space optical communications[J]. *Imaging and Applied Optics*, 2015, **53**(3): 7-11.
- [13] ZHANG Y, JIAO J, WANG B. Transmissive diffractive membrane optic for large aperture lightweight optical telescope [C]. SPIE, 2015, **9622**: 1-14.
- [14] ZHENG Y, RUNG P, CAO S. A concept design of deployable space membrane diffractive telescope[C]. SPIE, 2015, **9678**: 1-6.
- [15] LIU Ming-zhe, LIU Hua, XU Wen-bin. Membrane photon sieve for space telescope[J]. *Optical and Precision Engineering*, 2014, **22**(8): 2127-2134.
刘民哲, 刘华, 许文斌. 用于空间望远镜的膜光子筛[J]. *光学精密工程*, 2014, **22**(8): 2127-2134.
- [16] HYDE R. Eyeglass. 1. very large aperture diffractive telescopes[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(19): 4198-4212.
- [17] ZHANG Jian, LI Meng-juan, YIN Gang-hua, et al. Large-diameter membrane Fresnel diffraction elements for space telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(6): 1289-1296.
张健, 栗孟娟, 阴刚华, 等. 用于太空望远镜的大口径薄膜菲涅尔衍射元件[J]. *光学精密工程*, 2016, **24**(6): 1289-1296.
- [18] EARLY J, HYDE R. Twenty meter space telescope based on diffractive Fresnel lens[C]. SPIE, 2004, **5166**: 150-151.