文章编号 2095-1531(2019)06-1395-08

大口径衍射望远系统初始结构研究

赵 维^{1,3,5},刘 华^{2,3}*,陆子凤^{2,3},卢振武⁴, 王 新¹

(1. 长春理工大学,长春 130022;

2. 东北师范大学物理学院国家级实验教学示范中心,长春130024;

3. 中国科学院光谱成像技术重点实验室, 西安 710119;

4. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033;

5. 吉林警察学院,长春 130117)

摘要:大口径衍射望远系统由于使用透射式的薄膜衍射光学元件作为主镜,不仅质量密度低(表面质量密度可以达到 0.1 kg/m²),同时面形精度要求宽松,发射成本低。本文阐述了衍射望远系统的基本成像原理,并推导出任意大口径系 统的初始结构计算公式,给出了口径为 300 mm、系统焦距为 2 m,工作波段为 0.58 μm 到 0.68 μm 的系统设计实例并研 制了原理验证系统,进行了星点像以及分辨率板实验。成像结果接近衍射极限,与设计结果相符。本文所做工作为大口 径衍射望远系统的设计提供了良好的理论基础和初始模型结构,能够极大地缩短设计周期,提高成像质量。

关键 词:薄膜衍射光学元件;衍射望远系统;超大口径

中图分类号:0436 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20191206.1395

Initial structure of large aperture diffractive telescope

ZHAO Wei^{1,3,5}, LIU Hua^{2,3*}, LU Zi-feng^{2,3}, LU Zhen-wu⁴, WANG Xin¹

(1. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Demonstration Center for Experimental Physics Education,

College of Physics, Northeast Normal University, Changchun 130024, China;

3. Key Laboratory of Spectral Imaging Technology of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

4. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

5. Jilin Police College, Changchun 130117, China)

* Corresponding author, E-mail:liuhua_rain@aliyun.com

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 11874091);中国科学院光谱成像技术重点实验室开放课题;吉林省自然科学基金项目(No. 20180101031JC)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 11874091); Opening Foundation of Key Laboratory of Spectral Imaging Technology; Natural Science Foundation of Jilin Province(No. 20180101031JC)

收稿日期:2018-06-11;修订日期:2018-07-13

中国光学

Abstract: When taking the film diffractive optical elements as main lens, large aperture diffractive telescope has the characteristics such as low mass density (surface mass density can reach 0.1 kg/m²), loose surface shape tolerance (surface accuracy requirements are the magnitude of centimeter) and low launch costs. In this paper, the imaging theory and the configuration of diffractive telescope are discussed. Then, the calculation process of the initial structure of this optical system is derived. A prototype system with 300-mm aperture, 2-m focal length and working wavelength from 0.58 μ m to 0.68 μ m is designed and star image test and resolution board test are carried out. The test result of star image is close to diffraction limit, which is agree well with the design result. The work in this paper can provide theory foundation and initial model for diffractive telescope designer, and can help them to reduce design time and increase imaging quality.

Key words: film diffractive optical elements; diffractive telescope; large aperture

1引言

衍射望远成像是一种重要的对地观测手段, 是目前国外研究的热点课题。衍射成像系统具有 大口径、轻量化、可折叠展开、分辨率高、公差要求 低等特点,采用衍射望远成像系统不但可以节约 发射成本,还能够显著降低制造成本。鉴于这种 应用潜力,美国从1995年开始,一直致力于相关 技术研究,目前该技术已经成为未来天基对地监 视系统极具潜力的技术之一[1-9]。衍射望远系统 包括衍射主镜和校正镜两大部分。利用 Schupmann 提出的消色差理论,即任何一个有色差的元 件的色差校正均可通过将另外一个与其有相同色 散、相反光焦度的元件放在第一个元件的共轭像 位置来实现,从而消除衍射元件的严重色差,进行 宽光谱成像。这种系统的基本结构虽然简单,但 是其口径大、长度长、同时包含着两个衍射元件, 在进行系统设计时,如果初始结构的参数选取不 当,则根本无法构建系统。美国弗莫尔国家实验 室虽然进行了衍射望远系统的设计工作,但是给 出的是基于离轴三反校正镜的初始结构计算,计 算过程极其复杂^[10],同时又不具有普遍性。目前 针对衍射望远系统的设计,基本上都是直接给出 具体设计结果,具有普遍意义的初始结构模型建 立方法的研究尚未见报道[11-12]。中国科学院长 春光学精密机械与物理研究所长期以来一直从事 衍射望远系统方面的研究工作,获得了很多成 果^[13-18]。本文根据衍射望远系统的成像原理,将 衍射望远系统分成4个单元结构,并根据所要设 计的衍射望远系统的技术指标,分别推导出这4 个单元结构参数的计算公式,利用 Matlab 形成计 算软件。利用此软件计算出口径为300 mm,系统 焦距为2000 mm 的衍射望远系统初始结构,在 Zemax 光学设计软件中建立了模型,印证了计算 结构的准确性。同时根据初始结构设计加工了演 示系统,进行了星点像和分辨率板的测试,结果显 示像质接近衍射极限。结果表明本文提出的初始 结构计算方法简单、有效、可行,利用计算软件可 以快速计算出任意技术指标的结构参数,为设计 者提供了很好的结构模型,缩短了设计周期,提高 了设计质量。

2 衍射望远系统的成像原理

利用衍射光学元件的特点(轻薄、可折叠、面 形公差宽松),将大口径衍射元件作为主镜,设计 轻量化的空间望远系统。但是由于衍射元件色差 大,后续还需要通过光学系统对其进行色差校正, 以拓宽其工作谱段,该光学系统就是校正镜。校 正镜主要是利用 Schupmann 提出的消色差理论对 衍射主镜色差进行校正。大口径空间望远系统由 两部分构成:衍射主镜和校正镜。其中校正镜包 括场镜,菲涅尔校正镜与聚焦透镜。衍射望远镜 成像原理如图1所示。





其中场镜的口径决定了系统的消色差波段。 由此可以得出更深层的条件:

$$D_{\rm fc} = \frac{D_{\rm df}}{N} , \qquad (1)$$

$$f_{\rm fc} = -\frac{1}{N^2} f_{\rm df},$$
 (2)

其中,N为衍射主镜与菲涅尔校正镜的口径之比, 简称放大倍率。根据这一成像原理,只要初始的 系统技术指标值确定了,就可分别求解任意光学 元件的口径、焦距以及各元件到后面光学元件的 距离,从而确定整体结构。其中系统技术指标中 给出的参数包括:衍射望远系统的口径 D_s ;衍射 主镜的口径 D_{dt} ;菲涅尔校正镜的口径 D_{fc} ;聚焦透 镜的口径 D_c ;衍射望远系统的焦距 f_s ;衍射主镜 的焦距 f_{dt} ;菲涅尔校正镜的焦距 f_{fc} ;聚焦透镜的 焦距 f_{dt} ;菲涅尔校正镜的生活 λ_1 ;系统成像波 段中的长波 λ_2 ;系统的中心波长 λ_0 ;系统的视场 角 α ;放大倍率 N_o 所有焦距均是对应于中心波 长的,长、短波长和中心波长满足以下关系 $\lambda_0 = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}_o$

3 衍射望远镜的初始结构计算

3.1 衍射主镜和尺寸的确定

衍射光学望远镜的初始结构设计中,衍射主 镜的尺寸通常都是根据系统的初始结构确定的。 衍射主镜的口径 *D*_a就是光学系统的口径;衍射主 镜的焦距通常用中心波长下的焦距表示,并且焦 距通常很大。为了使中心波长的入射光通过场镜 中心,衍射主镜到场镜的距离 *d*₁应等于衍射主镜 在中心波长下的焦距。

$$D_{\rm df} = D_{\rm s}, \qquad (3)$$

$$d_1 = f_{\rm df}.\tag{4}$$

$$\Phi = M \Sigma A_{\rm dfi} \rho^{2i}, \qquad (5)$$

其中 M 是衍射级次, A_{iii} 是 ρ 的 2i 次幂的系数,即衍射元件位相的系数, ρ 是归一化的径向孔径坐标。

其中衍射主镜的第一项系数 A_{df} 与 f_{df} 的关系为:

$$A_{\rm dfl} = -\frac{\pi}{\lambda f_{\rm df}} \,. \tag{6}$$

3.2 场镜参数的确定

由于衍射主镜和菲涅尔校正镜相对于场镜为 共轭关系。令场镜的焦距为*f*_f,根据理想光学系 统成像公式有:

$$\frac{1}{f_{\rm f}} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} , \qquad (7)$$

其中,*d*₂是场镜到菲涅尔校正镜的距离。根据消 色差解析条件以及几何关系,有:

$$d_2 = \frac{1}{N}d_1. \tag{8}$$

由于衍射主镜对不同色光具有不同的焦距, 在子午面内,长波与短波的光线分别交于场镜的 上顶点和下顶点,且截距高度一样,这样才能保证 中心波长的光线通过场镜中心,具体关系如下。

$$\frac{D_{\rm df}}{D_{\rm f1}} = \frac{f_{\rm df} \frac{\lambda_0}{\lambda_1}}{f_{\rm df} \frac{\lambda_0}{\lambda_1} - d_1} \,. \tag{9}$$

D_{f1}为场镜初始口径,具体计算公式如下:

$$D_{\rm fl} = \frac{(d_1 - f_{\rm df})D_{\rm df}}{f_{\rm df\lambda_1}} , \qquad (10)$$

其中, $f_{d\lambda_1} = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} f_{df}$,为波长 λ 的衍射主镜焦距。考虑到轴外视场会使得场景口径增加,增加的值为:

$$D_{f2} = 2f_{df} \tan \alpha, \qquad (11)$$

 α 是系统的视场角。最终场镜的口径 D_{f} 是二者之 和,即:

$$D_{\rm f} = D_{\rm f1} + D_{\rm f2}. \tag{12}$$

3.3 菲涅尔校正镜参数的确定

根据 Schupmann 消色差原理知,选定了放大 倍率系数 N,即可得到菲涅尔校正镜的焦距:

$$f_{\rm fc} = -\frac{1}{N^2} f_{\rm df},$$
 (13)

令归一化半径为实际半径,可以求得菲涅尔 校正镜位相的第一项系数 A_{fel}:

$$A_{\rm fe1} = -\frac{\pi}{\lambda f_{\rm fc}} , \qquad (14)$$

菲涅尔校正镜的口径 D_{fc}:

$$D_{\rm fc} = \frac{D_{\rm df}}{N} \,. \tag{15}$$

令菲涅尔校正镜到聚焦透镜的距离为 d₃,由 于需要消除菲涅尔校正镜衍射主镜的色差,故其 负光焦度很大,光束经过该校正镜片以后急剧发 散,因此聚焦透镜往往放置在距离菲涅尔校正镜 很近的位置,甚至合二为一,间距为零。

3.4 聚焦透镜参数的确定

当场镜出主波长的边缘光线在衍射主镜处的 交点在光轴之上时, D_{df}为正数;传播到场镜处,由 于光线通过场镜中心,所以 D_{fa0}为0;光线继续传 播,到达校正镜与聚焦透镜处,主波长的边缘光线 与光学元件的交点在光轴之下,此时 D_{fa}与 D_o为负。

聚焦透镜的作用是将由菲涅尔校正镜出射的 光聚焦到像面位置处以成像。由于聚焦透镜与校 正镜的间距为零,二者的口径相同:

$$D_{\rm c} = D_{\rm fc}, \qquad (16)$$

根据中心波长光线的几何成像计算公式

$$l_2 = d_2, \qquad (17)$$

$$\frac{1}{l'_2} + \frac{1}{l_2} = \frac{1}{f_{\rm fc}} , \qquad (18)$$

可以求得:

$$l'_{2} = \frac{f_{\rm fc}d_{2}}{d_{2} - f_{\rm fc}} \,. \tag{19}$$

经过菲涅尔校正镜出射的光进入聚焦透镜,

最终到达像面。系统的像面位置为聚焦透镜到像面的距离,设为 d_4 。利用成像公式有:

$$\frac{1}{d_4} + \frac{1}{l'_3} = \frac{1}{f_c} , \qquad (20)$$

$$d_4 = \frac{l'_3 f_c}{l'_3 - f_c} \,. \tag{21}$$

同时由衍射望远系统的系统焦距计算公式:

$$\frac{1}{f_{\rm s}} = \frac{1}{D_{\rm df}} \left(\frac{D_{\rm df}}{f_{\rm df}} + \frac{D_{\rm fc}}{f_{\rm fc}} + \frac{D_{\rm c}}{f_{\rm c}} \right) , \qquad (22)$$

化简得:

$$f_{\rm c} = \frac{D_{\rm c}}{\frac{D_{\rm df}}{f_{\rm s}} - \frac{D_{\rm df}}{f_{\rm df}} - \frac{D_{\rm fc}}{f_{\rm fc}}}.$$
 (23)

3.5 衍射望远镜光学系统初始结构设计实例

首先根据上述计算公式,编写初始结构设计 软件。在该软件中只要输入需要实现的系统技术 指标参数(见表1),即可获得衍射望远系统4部 分初始结构参数(见表2)。

表1 衍射望远系统技术指标参数

Tab.1Technical parameters of the

参数	参数值		
$D_{\rm s}$	300 mm		
$f_{ m s}$	2 000 mm		
$\lambda_1 \ \lambda_0 \ \lambda_2$	0.58 µm 0.63 µm 0.68 µm		
α	0.05°		
$f_{ m df}$	30 m		

表2 衍射望远系统4部分结构的初始参数

 Tab. 2
 Initial parameters of the four-part components of diffractive telescope system

	参数	参数值
衍射主镜	$D_{ m df}$	300 mm
	$A_{ m dfl}$	-0.166 2
	d_1	30 000 mm
	$D_{ m f}$	76.169 4 mm
场镜	$F_{ m f}$	4 285.714 3 mm
	d_2	5 000 mm
	$D_{ m fc}$	50 mm
菲涅尔校正镜	$A_{ m fc1}$	- 5.984
	$d_{ m fc}$	0
	$D_{ m c}$	50 mm
聚焦透镜	$F_{ m c}$	227.272 7 mm
	d_{2}	333, 333 3 mm

在 Zemax 光学设计软件中输入相关参数,构 建该系统的模型。其波前差(OPD)图与传递函 数(MTF)图见图2。





Fig. 2 OPD and MTF diagrams of diffraction telescope systems at zero field of view

由波前差图形可以看出该系统的初级球差比 较大,这主要是因为计算过程中有一些一级近似 导致像面位置偏差而引起的。可以通过调整像面 位置而将其消除。将像面向后调整 0.045 mm,成 像质量将得到大幅度改善。调整后的 OPD 图与 MTF 图见图 3。



图 3 像面调整后的系统 OPD 和 MTF 图

Fig. 3 OPD and MTF diagrams of diffraction telescope system after image surface adjustment





利用真实透镜代替理想透镜,真实透镜的焦

距与理想透镜相近,并进一步优化,最终设计出能

够实际加工的衍射望远系统,其 OPD 图与 MTF 图见图4。

物镜和菲涅耳校正镜,并且加工出其他光学元件 和机械固定元件,集成形成3部分结构:衍射主 镜、场镜、目镜(菲涅耳校正镜和聚光镜集成体), 在实验室进行了系统搭建和相关实验。

4 实验验证

利用激光直写以及离子刻蚀技术加工出衍射



图 5 星点像测试系统示意图





图 6 星点像测试系统实物图 Fig. 6 Physical map of star point test system

4.1 星点像测试

利用波长为632.8 nm 的 He-Ne 激光器,经扩 束镜扩束后进入显微物镜。在显微物镜的聚焦点 处放置 5 μm 大小的针孔作为星点孔,由此会聚 后的激光经过小孔滤波后形成点光源,将点光源 放置在平行光管前焦面上,出射平行光束。测量 示意图如 5 所示,实物图如图 6 所示,星点像成像 结果如图7所示,可见不管轴上还是轴外星点成 像都是很理想的艾里斑,表明成像质量很好。



(a) 轴上 (a) On-axis

(b) 轴外 (b) Off-axis



4.2 衍射望远系统的分辨率板成像测试

系统分辨率板测试使用红光 LED 作为照明 光源(波长为 620 nm-630 nm-640 nm),在平行光 管的后焦面上放置分辨率板,其测试系统示意图 如图 8所示,实物测试图如图 9 所示,实验结果见 图 10。



图 8 分辨率板测试系统示意图 Fig. 8 Schematic diagram of resolution board test system



图 9 分辨率板测试的实验装置图 Fig. 9 Physical map of resolution board test system



图 10 分辨率板的测试结果

Fig. 10 Results of resolution board test

由图 10 可以看出,当分辨率线对达到 120 lp/mm,系统仍然能够分辨出来,这与图 4 的 设计结果相仿,表明该系统的成像质量满足预期 要求,证实了该方法可以有效地设计任意大口径 衍射望远系统。当然由于该系统衍射主镜到相机 的空间距离比较长(30 m),空气抖动会对成像造 成一定影响。同时衍射主镜为振幅型衍射元件, 除了使用的衍射1级以外,衍射0级、衍射-1 级、2级等各个级次的光线都会进入相机,形成比 较严重的杂散光,降低成像对比度。因此本系统 在接近衍射极限时的分辨率成像对比度比较差。

5 结 论

利用本文提出的初始结构计算方法以及计算 软件,可以计算出任意大口径衍射系统的初始结 构,根据这种初始结构参数,就可以在光学设计软 件中形成系统模型,然后替换成具有相同光焦度 的透镜或者反射镜,并进行系统性整体优化,最终 形成理想的衍射望远光学系统。接着,设计并且 搭建了原理验证系统,其口径为300 mm、系统焦 距为2 m,波段为0.58 μm到0.68 μm。对该系统 的星点像和分辨率板的实验测试结果表明,利用 此种方法设计的衍射望远系统非常简单、有效。 利用本文提出的初始结构计算方法和软件,可以 为任意大口径衍射望远系统提供很好的初始结构 模型,有助于缩短设计周期,获得理想的设计结 果。

参考文献:

- [1] HYDE R A. Eyeglass. 1. Very large aperture diffractive telescopes [J]. Appl. Opt., 1999, 38(19):4198-4212.
- [2] HYDE R A, DIXIT S, WEISBERG A, *et al.*. Eyeglass: a very large aperture diffractive telescopes [J]. *SPIE*, 2002, 4894: 28-39.
- [3] BARTON M, BRITTEN J A, DIXIT S N, et al. . Fabrication of large-aperture lightweight diffractive lenses for use in space
 [J]. Appl. Opt., 2001, 40(4):447-451.
- [4] PAUL A, CHRIS S, JEANETTE D, et al. Aaron seltzer ball aerospace and technologies corp, boulder co 80301moire-initial demonstration of a transmissive diffractive membrane optic for large lightweight optical telescopes [J]. SPIE, 2012, 8442:84422.
- [5] OLHA A, GEOFF A, MICHAEL E. Dickinson optical testing of a membrane diffractive optic for space-based solar imaging
 [J]. SPIE, 2014, 9006:90060D1-9006D12.
- [6] HOWARD A M, JAMES B BE. Reviresco large diffractive/refractive apertures for space and airborne telescopes [J]. SPIE, 2013, 8739;873904-873915.
- [7] ASMOLOVA, GEOFF A, MICHAEL D, et al. Trey quiller thomas murphey optical analysis of a membrane photon sieve space telescope[J]. SPIE, 2013, 8739:87390C-8739C12.
- [8] GEOFF A, OLHA A. Thomas Dickinson Falcon SAT-7: a membrane space telescope [J]. SPIE, 2014, 9085: 908504-

980415.

- [9] ANGLE F, WANG M R, YANG J J. Achromatic hybrid refractive-diffractive lens with extended depth of focus[J]. *Appl. Opt.*, 2004, 43(30):5618-5630.
- [10] JIM E, ROD H, RICHARD B. Twenty meter space telescope based on diffractive Fresnel lens [J]. SPIE, 2004, 5166: 148-156.
- [11] 张楠,卢振武,李凤有. 衍射望远镜光学系统设计[J]. 红外与激光工程,2007,36(1):106-108.
 ZHANG N,LU ZH W,LI F Y. Otical design diffractive telescope[J]. Infrared and Laser Engineering,2007,36(1):106-108. (in Chinese)
- [12] 朱威,徐瑛,颜树华.宽光谱超大孔径反衍望远系统设计[J].应用光学,2008,29(1):40-44.
 ZHU W,XU Y,YAN SH H. Design of broad bandwidth reflective-diffractive hybrid telescope with super large aperture
 [J]. Journal of Applied Optics,2008,29(1):40-44. (in Chinese)
- [13] YUE J Y, LIU H, LU ZH W, et al. Compound diffractive telescope system: design stray light analysis, and optical test
 [J]. Chin. Phys. B, 2010, 19(1):010702.
- [14] LU ZH W, ZHANG N, LIU H, et al. Compound telescope [J]. SPIE, 2006, 6289:1-6.
- [15] YUE J Y, LU ZH W, LIU H, et al. Imaging analysis of a novel compound diffractive telescope system [J]. SPIE, 2009, 7426:74260Z-1.
- [16] 刘民哲,刘华,许文斌,等. 用于空间望远镜的薄膜光子筛[J]. 光学 精密工程,2014,22(8):2127-2134.
 LIU M ZH,LIU H,XU W B,*et al.*. Membrane photon sieve for space telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*,2014,22(8): 2127-2134. (in Chinese)
- [17] 刘华,卢振武,闫勇.大口径衍射望远系统公差分析及测量[J]. 光子学报,2013,42(10):1203-1207.
 LIU H,LU ZH W,YAN Y. Large aperture diffractive telescope tolerance analysis and measurement[J]. Acta Photonica Sinica,2013,42(10):1203-1207. (in Chinese)
- [18] JIN G, YAN J L, LIU H, et al. Flat-stitching error analysis of large-aperture photon sieves [J]. Applied Optics, 2014, 53 (1):90-95.

作者简介:



赵 维(1983—),女,吉林长春人,硕 士,讲师,2005年、2008年于长春理工大 学分别获得学士、硕士学位,主要从事 光电成像器件与系统方面的研究。Email:zhaowei_0102@163.com



刘 华(1976—),女,辽宁抚顺人,博 士,研究员,2001年于东北师范大学获 得学士学位,2006年于中国科学院长春 光学精密机械与物理研究所获得博士 学位,主要从事光学检测、光学设计、衍 射光学方面的研究。E-mail:liuhua_rain @ aliyun.com



王 新(1978—),男,辽宁凌海人,博 士,教授,博士生导师,系主任,主要从 事光电成像器件与系统方面的研究。 E-mail:wangxin971241@163.com