

# 一种红外衍射望远镜的光学设计

王昊<sup>1,2</sup>, 康福增<sup>1\*</sup>, 赵卫<sup>1</sup>, 谢永军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**设计了一款口径为 3 m 的衍射望远镜, 其工作波段为 7.7~10.3  $\mu\text{m}$ , 光谱宽度  $|\Delta\lambda/\lambda|$  达到了 1/3. 设计结果表明, 系统得到了接近衍射极限的成像质量. 制作了一套缩比的衍射望远镜, 成像质量优异.

**关键词:**衍射望远镜; 菲涅尔透镜; 消色差

**中图分类号:** O439 **文献标识码:** A

## Optical design of infrared diffractive telescope

WANG Hao<sup>1,2</sup>, KANG Fu-Zeng<sup>1\*</sup>, ZHAO Wei<sup>1</sup>, XIE Yong-Jun<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics,

Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A design example of diffractive telescope is presented and the aperture of objective is 3 meters. The operating wavelength of the system is 7.7~10.3  $\mu\text{m}$  and spectral bandwidth  $|\Delta\lambda/\lambda|$  is about 1/3. It is shown that the system approximately attains diffraction limit. We developed a small scale diffractive telescope and its' image quality was perfect.

**Key words:** diffractive telescope, Fresnel lens, color correction

**PACS:** 42.15.Eq, 07.57.Kp

## 引言

随着红外遥感技术的发展, 高分辨红外望远镜的研究已经成为当代的热点, 但是提高分辨率意味着增加光学系统的口径, 会增加系统的重量.

目前研制轻量化、大口径望远镜有两种解决方法<sup>[1-2]</sup>: 一种是将主镜做成薄膜反射镜, 其厚度是毫米量级. 大口径薄膜反射望远镜使得系统装调困难, 同时元件面型难以保障; 另一种是制作衍射望远镜, 用平面薄膜透镜做物镜的衍射望远镜具有重量轻、对面形精度要求低等特点. 入射光通过反射镜表面光程差是镜面面形误差的两倍<sup>[1]</sup>, 而衍射元件是透射型元件, 光通过透射表面产生的光程差对面形误差并不敏感, 使得面形具有宽松的公差要求.

衍射光学元件具有很强的色散, 而且阿贝数只与波长有关. 为了制作宽波段的衍射望远镜, 必须对其消色差. Schumpmann 提出可以在目镜系统中的特定位置放置一个相同色散、相反光焦度的衍射透镜来消色差<sup>[1-2]</sup>.

## 1 研究进展

美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室(LLNL)于1998年提出了一个空间衍射望远镜计划——“眼镜”(Eyeglass)计划<sup>[1-2]</sup>, 该方案由两个卫星(“物镜”卫星和“目镜”卫星)一起构成一个合作望远镜, “物镜”卫星计划由一个口径 25 m 的衍射透镜构成, 负责将光线聚焦于与其相距 1 km 的“目镜”卫星上.

该实验室研制了口径 5 m 的样机, 同时研究了

收稿日期: 2015-11-19, 修回日期: 2016-04-01

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ310633)

Foundation items: Supported by National Key Scientific Apparatus Development of Special Item (2013YQ310633)

作者简介(Biography): 王昊(1992-), 男, 江苏南通人, 博士研究生, 主要从事光学设计方面的研究. E-mail: wanghao14@mails.ucas.ac.cn

\* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: kangfuzeng@opt.ac.cn

Received date: 2015-11-19, revised date: 2016-04-01

大口径平面薄膜衍射物镜的折叠和展开方法. 口径为 5 m 的衍射望远镜样机由 72 个被切割成精确的矩形和三角形的透镜板组成, 如图 1 所示, 焦距为 250 m, 相对孔径为  $f/50$ . 图 2 分别为此大型衍射望远镜对月球表面、太阳斑点、太阳耀斑、木星和土星成的像<sup>[2]</sup>.

在国内, 2007 年长春光机所设计了一个用离轴三反射镜做目镜的衍射望远镜<sup>[3]</sup>, 物镜口径 1 000 mm,  $F/\# = 100$ , 系统在  $0.65 \sim 0.75 \mu\text{m}$  波段,  $0.02^\circ \times 0.035^\circ$  视场范围内, 得到了消色差, 接近衍射极限的成像质量.

2010 年长春光机所设计出单眼衍射望远镜<sup>[4]</sup>, 整个系统的  $F/\# = 3.89$ , 光谱波段为  $0.486 \sim 0.656 \mu\text{m}$ , 单眼视场角  $2\omega = 0.2^\circ$ . 按照生物重叠型复眼结构的机理排放多组子目镜, 先沿铅直方向放置折衍混合物镜, 在该物镜的焦点位置垂轴放置一个子目镜, 做为 0 通道(单眼衍射望远镜); 以折衍混合物镜的后主点为旋转中心, 以其焦距为半径, 沿水平方向, 主光轴每旋转  $0.2^\circ$  垂轴放置一个子目镜作为一个通道, 总共放置 21 个子目镜, 复眼衍射望远镜的结构如图 3 所示. 整个复眼衍射望远镜就覆盖了  $2\omega = 4^\circ$  的视场.

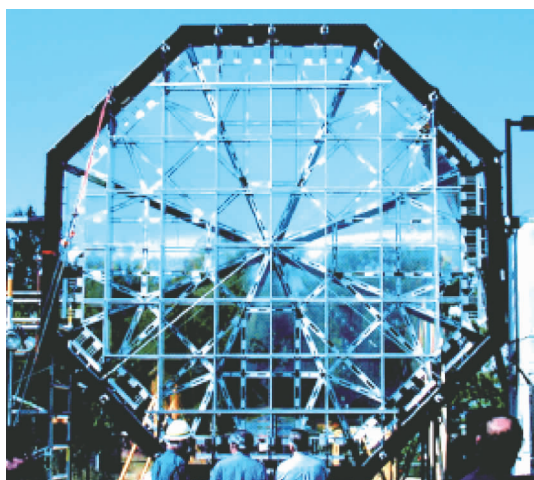


图 1 衍射望远镜样机  
Fig. 1 Diffractive space telescope of America

## 2 设计思想

设计衍射望远镜的困难在于衍射元件独特色散特性:

$$V_0 = \frac{\lambda_0}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (1)$$

对于单个衍射光学器件来说, 不同波长的光线

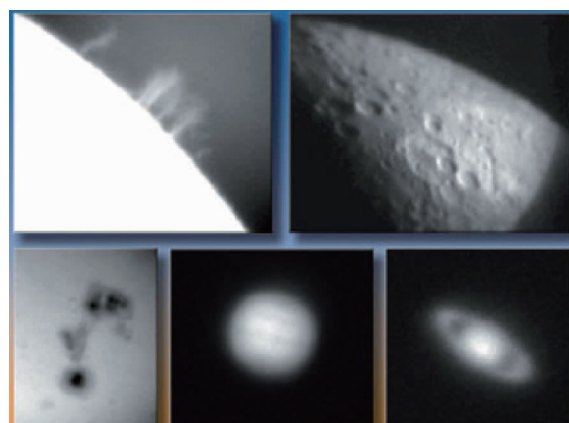


图 2 大型衍射望远镜成像图  
Fig. 2 Images taken from the first large diffractive telescope

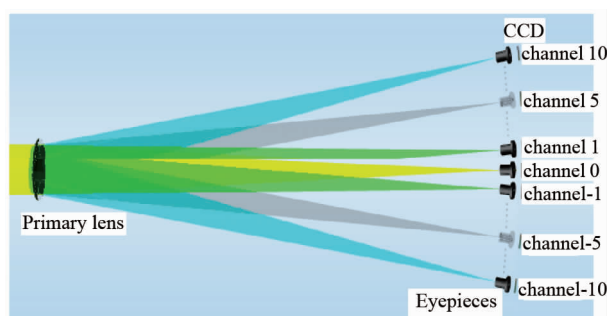


图 3 复眼衍射望远镜示意图  
Fig. 3 The sketch map of the compound diffractive telescope

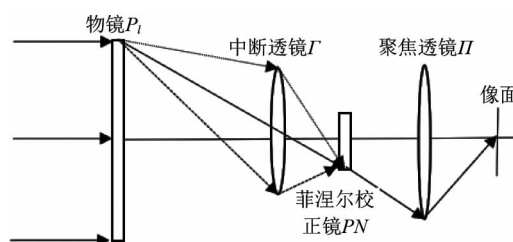


图 4 Schupmann 理论模型  
Fig. 4 Schupmann theory model

具有不同的焦距, 其色差非常大, 一般只适用于单色系统. 对于选用基本衍射结构制成的极大阵列望远镜, 它的光谱宽度受限<sup>[1]</sup>:

$$\left| \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right| \leq f_{\text{number}} \frac{\lambda}{D} \quad (2)$$

典型的  $\lambda/D \sim 10^{-8}$ ,  $F/\# = 100$ ,  $|\Delta\lambda/\lambda| \sim 10^{-6}$ , 可见此种望远镜的光谱宽度很窄.

为了设计出宽波段衍射镜头, 必须进行消色差. Schupmann 提出: 有色差的元件, 其色差的校正都可以通过在第一个元件的共轭像处放置一个相同色散、相反光焦度的元件实现. 该理论对衍射光学系统同样适用. 我们采用物镜衍射透镜和目镜衍射透镜

相结合实现对色差的校正. 基于 Schupmann 理论的衍射望远镜<sup>[1-2,5]</sup>如图 4 所示,其中物镜  $P_1$  为超大口径平面型衍射光学透镜,是该混合系统的主口径,  $P_N$  为色差校正平面型衍射透镜(菲涅尔校正镜),  $\Gamma$  为中继透镜且位于物镜  $P_1$  焦平面处,  $\Pi$  为聚焦透镜. 成像基本原理如下:一束平行光通过物镜  $P_1$ , 由于衍射透镜的色散效应,不同颜色的光被发散到不同方向;中继透镜将发散光线重新聚焦于菲涅耳校正镜  $P_N$  表面的相应点,聚集的光线通过菲涅耳校正镜  $P_N$ , 平衡各条光线的相位,将通过物镜  $P_1$  时产生的色差消除,这样便消除了衍射光学元件由于自身波长的依赖性所带来的色散效应,入射的平行光将在像平面上聚于一点,使该成像系统具有较宽的光谱范围,并得到高质量的成像效果. 通过此种设计可以将  $|\Delta\lambda/\lambda|$  提高到  $10^{-1}$ .

### 3 设计结果

针对大口径红外衍射望远镜进行了设计,技术指标如下:

表 1 设计指标  
Table 1 Parameters of optical design

Wavelength range	7.7 ~ 10.3 $\mu\text{m}$
Focal length	6 m
F/number	2
Field	0.78°
Aperture	3 m
System length	15 m

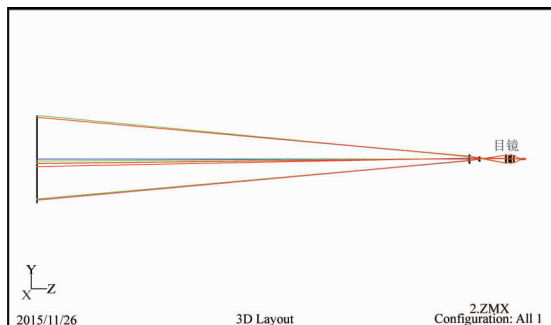


图 5 系统光路图  
Fig. 5 Optical-path of the optical system

系统的光路和目镜系统分别如图 5、6 所示. 图 7 和图 8 分别是该光学系统的球差曲线和 MTF 曲线,可知该系统的像差校正得比较好,取得了接近衍射极限的成像质量. 为验证加工、装调特性以及杂散光的影响,设计并制作了一个缩比的红外衍射望远镜. 主要技术指标见表 2.

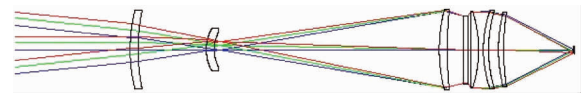


图 6 目镜系统  
Fig. 6 Eyepiece

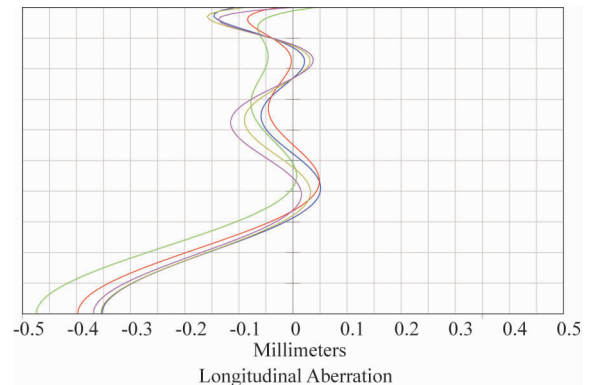


图 7 球差曲线图  
Fig. 7 Spherical aberration curve

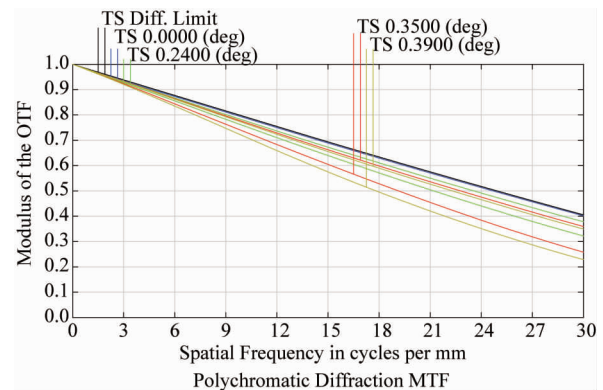


图 8 传递函数曲线  
Fig. 8 MTF curve

表 2 设计指标  
Table 2 Parameters of optical design

Wavelength range	7.7 ~ 10.3 $\mu\text{m}$
Focal length	78 mm
F/number	0.975
Field	$11^\circ$
Aperture	80 mm
System length	457.5 mm

整个衍射望远镜光学系统光路如图 9 所示,由九块锗透镜构成. 其中,物镜和菲涅耳校正镜均为衍射透镜. 图 10 为光学系统的球差曲线,以五/七级球差为主,有少量的更高级球差.

图 11 和图 12 表示的是物镜和菲涅耳校正镜的二元面相位分布. 物镜的特征尺寸为  $77 \mu\text{m}$ ,菲涅耳

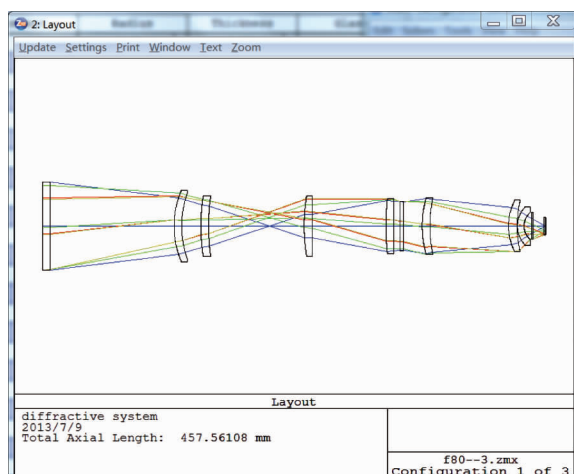


图9 系统光路图  
Fig.9 Optical-path of the optical system

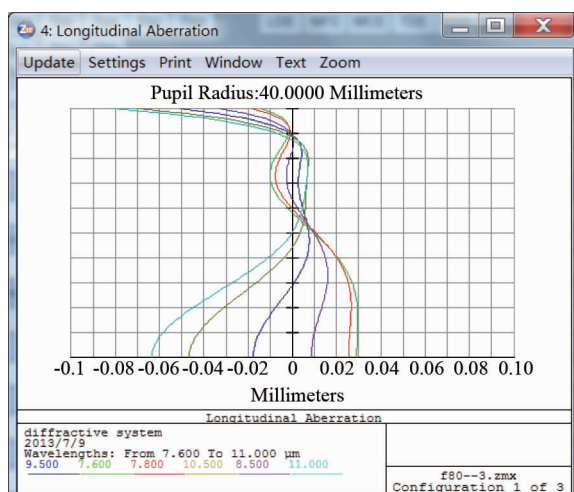


图10 球差曲线图  
Fig.10 Spherical aberration curve

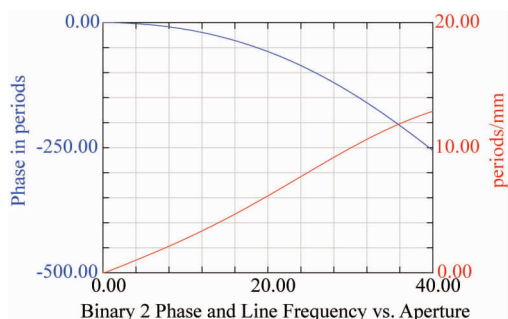


图11 物镜的多元面相位分布  
Fig.11 Phase plot of the binary surface of objective

校正镜的特征尺寸为  $210 \mu\text{m}$ .

如图13所示为光学系统的场曲与畸变,光学系统畸变为2.3%.图14所示为设计的光学系统的传递函数,系统传递函数曲线接近衍射极限,空间频率

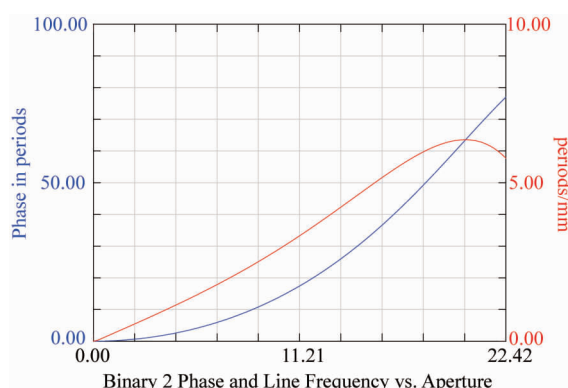


图12 菲涅尔校正镜的多元相位分布  
Fig.12 Phase plot of the binary surface of Fresnel corrector

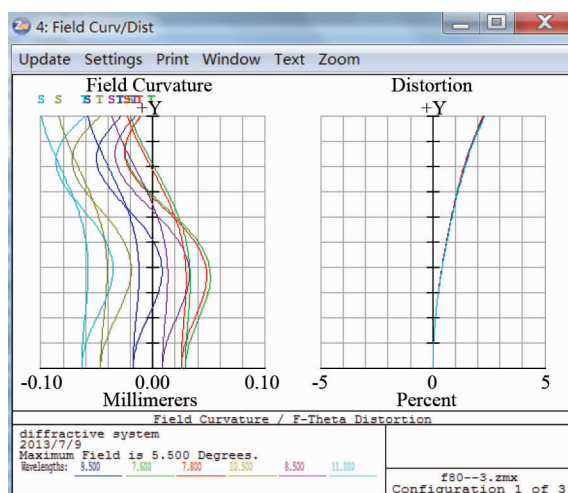


图13 场曲与畸变曲线  
Fig.13 Field curvature and distortion curve

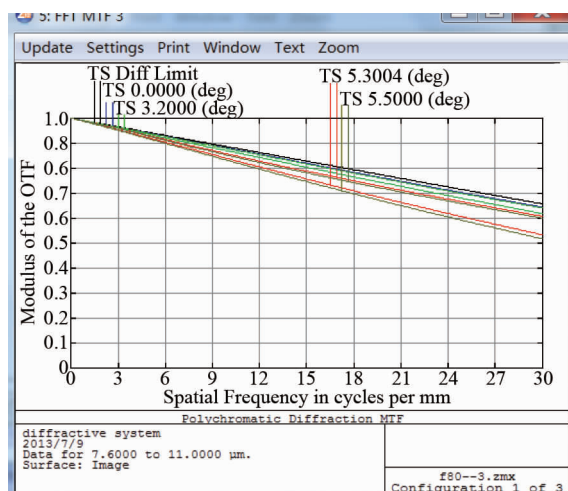


图14 传递函数曲线  
Fig.14 MTF curve

在  $30\text{lp/mm}$  时系统在全视场情况下,子午和弧矢方向的 MTF 均大于 0.52.

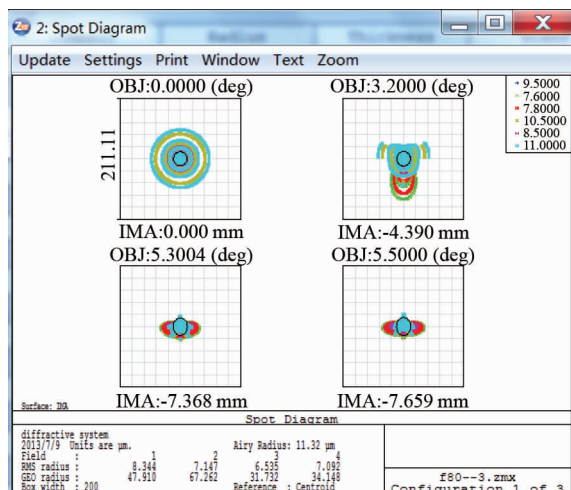


图 15 点列图  
Fig. 15 Spot diagram

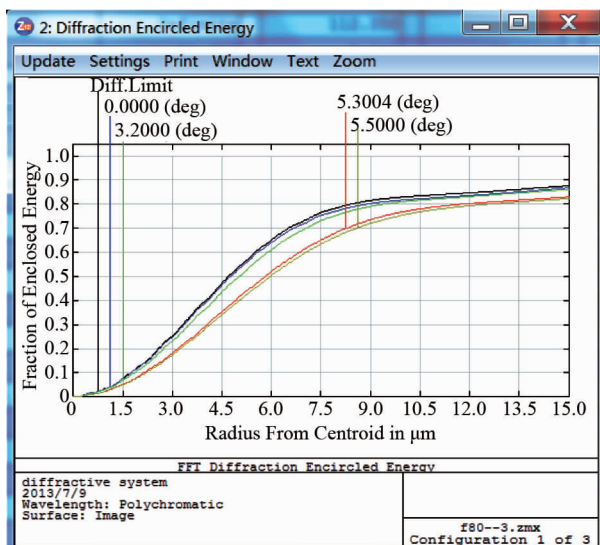


图 16 能量集中度  
Fig. 16 Diffraction encircled energy

考虑到探测器的通用性,设计兼顾了像元尺寸为  $17\ \mu\text{m}$  和  $30\ \mu\text{m}$  的探测器.图 15、16 分别为系统的点列图和能量集中度图.从图中能够反映出系统的像差得到了有效校正.

#### 4 测试结果

据此制作了一台衍射式宽波段望远镜,产品实物如图 17 所示.将非制冷红外焦平面探测器 Tau 2 640 搭载在红外衍射望远镜上,同时对相距 50 m 左右的建筑进行成像,成像效果如图 18 所示,最小分辨长度为 20 mm,虽然有杂散光影响,但是总体成像质量好.

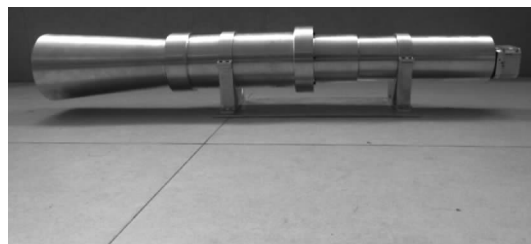


图 17 实物图  
Fig. 17 The photo of the telescope



图 18 成像效果图  
Fig. 18 Image of the buildings

#### 5 结论

设计了一款 3 m 口径的红外衍射望远镜,不仅设计性能优异,而且具有很宽的光谱范围.另外通过缩比模型进一步验证了该类衍射望远镜的工程可实施性.不足在于对衍射望远镜的杂散光分析不够充分,在后续的文章中论述.

#### References

- [1] Hyde R A. Eyeglass. 1. Very large aperture diffractive telescopes[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(19), 4198 - 4212.
- [2] Hyde R A, Dixit S, Weisberg A, et al. Eyeglass: a very large aperture diffractive telescopes[C]. In Proceedings of SPIE, Highly Innovative Space Telescope Concepts, 2002, **4849**:28 - 39.
- [3] ZHANG Nan, LU Zhen-Wu, LI Feng-You. Optical design of diffractive telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering* (张楠, 卢振武, 李凤有. 衍射望远镜光学系统设计. *红外与激光工程*). 2007, **36**(1):106 - 108.
- [4] YUE Jin-Ying. Performance test of the compound diffractive telescope[D]. Changchun Institute of optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences(岳中英. 复眼衍射望远镜系统的检测. 中科院长春光学精密机械与物理研究所), 2010.
- [5] XU Yan. Design of lightweight optical remote sensing system by binary optical technology[D]. National University of Defense Technology (徐琰. 利用二元光学技术设计轻量化光学遥感系统. 国防科学技术大学), 2006.