

文章编号 1004-924X(2017)增-0024-08

## 星载空间目标监视折衍射光学成像系统设计

刘 帅\*, 刘春雨, 王天聪

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**为了监视空间目标和空间碎片,设计了折衍射透镜混合的大视场、大相对孔径的光学成像系统,对该系统的设计指标、工作原理、基于折衍射透镜混合的消色差以及消热差设计方法进行研究。首先,介绍了空间目标监视系统构成及工作原理,根据使用需求确立了光学系统的设计指标。接着,利用折衍射混合透镜进行光学系统的优化设计,包括焦距缩放、调整口径和视场、像差校正等。然后,在分析系统能量集中度分布、像点弥散斑半径、光学传递函数曲线以及色差、畸变等像质评价方法的基础上,不断优化光学系统性能。最后,分析在不同温度下系统的光学传递函数。设计结果表明:光学系统总长 63.4 mm,视场为  $25^\circ \times 25^\circ$ ,焦距为 32.33 mm,相对孔径为 1/1.6,折衍射混合透镜的使用,使得系统垂轴色差为  $-0.828 \mu\text{m}$ ,在  $-50, 20, 70^\circ\text{C}$  温度下,各视场对应光学传递函数均大于 0.6。该折衍射混合光学成像系统实现了消色差和消热差,具有良好的成像性能。

**关键词:**光学设计;折衍射透镜;空间目标监视;大视场

**中图分类号:**O436.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172514.0024

## Refractive-diffractive optical imaging system for satellite-borne surveillance of space targets

LIU Shuai\*, LIU Chun-yu, WANG Tian-cong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: liushuai@ciomp.ac.cn

**Abstract:** In order to monitor space targets and space debris, a refractive-diffractive optical imaging system with wide field of view and large relative aperture was designed. Parameters and working principle of the system, as well as the way of achromatic and athermal design based on the refractive-diffractive lens was studied. Firstly, the structure and principle of the space target surveillance system were introduced, and the design parameters of the optical system were established according to the requirements. Then, the optical system was optimized via refractive-diffractive lens, including focal zoom, adjustment of aperture and field, aberration correction and etc. The performance of the system was further optimized by the analysis of system encircled energy, RMS radius of spot diagram, MTF, color and distortion aberration. Finally, the values of MTF at different temperatures were analyzed. The results indicate that the system exhibits a total length of 63.4 mm, field of view of  $25^\circ \times 25^\circ$ , focal length of 32.33 mm and clear aperture of 20.2 mm. With the refractive-diffractive lens, the lateral

收稿日期:2017-05-28;修订日期:2017-06-11.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA12Z113)

color is  $-0.828 \mu\text{m}$ . The MTF values of all field are above 0.6 at the temperature of  $-50, 20, 70 \text{ }^\circ\text{C}$ . The refractive-diffractive optical imaging system can achieved achromatism and athermalization, thus its imaging performance is stable and fine.

**Key words:** optical design; refractive-diffractive lens; space target surveillance; wide field of view

## 1 引 言

为了适应未来军事斗争获取信息优势的需要,世界各国均大力发展空间目标监视技术,传统的地基空间目标监视易受气象条件、地理位置和时间限制,因此世界各国都开展了天基空间目标监视系统的研究。星载监视光学成像系统是天基空间目标监视系统的重要组成部分,可对重要的空间目标和具有威胁的空间碎片进行精确探测和跟踪,并计算目标的外观尺寸以及轨道参数等信息,故此在空间探测中得到了广泛关注。

各国十分重视星载空间目标监视光学成像系统的研究与应用。美国中段试验卫星(MSX)携带了第一颗空间目标监视可见光探测器(SBV),使用4个CCD拼接,实现全视场 $1.4^\circ \times 6.6^\circ$ ,其探测目标为星等亮度位于7~15之间的低深空碎片以及卫星。天基空间目标监视系统(SBSS)、轨道深空成像仪(ODSI)和地球同步轨道空间态势感知计划(GSSA)等,利用SBV实现地球静止轨道目标探测。加拿大空间监视系统(CSSS)利用蓝宝石卫星搭载离轴三镜消像散望远镜(TMA),望远镜的观测光谱为 $0.3 \sim 0.9 \mu\text{m}$ ,可对距地6 000~40 000 km的多轨道卫星和空间碎片进行探测<sup>[6]</sup>。俄罗斯、英国、德国和日本也在空间监视光学成像方面进行了相关研究<sup>[1-5]</sup>。国内佟静波等人设计了空间碎片天基探测相机的光学系统,实现了暗目标探测<sup>[6]</sup>。王虎等人针对空间碎片探测,进行了多光谱探测相机和大相对孔径可见光光学系统的研究<sup>[7-8]</sup>。常凌颖等人设计了空间目标探测相机,具有较大相对孔径<sup>[9]</sup>。孙鑫研究了空间目标可见光系统,曾德贤对天基探测离焦问题进行了分析<sup>[10-11]</sup>。

为了实现宽视场,大相对孔径且轻便紧凑的空间目标监视光学系统,本文采用衍射透镜来增加优化变量,减少透镜数量,利用折衍射混合透镜进行系统的消色差和消热差设计。该系统焦距为32.33 mm,全视场角为 $25^\circ \times 25^\circ$ ,相对口径为1/1.6。

## 2 星载空间目标监视系统工作原理

图1为星载空间目标监视系统的工作原理,其主要构成部分为光电成像系统和图像采集处理系统。空间目标通过太阳或其他辐射能量在空间的分布,部分或全部区域被照亮,目标表面会形成反射光;反射回波携带着目标的光度信息在空间传输一段距离后被光电成像系统的光学镜头接收,传输到探测器的焦平面,目标光信号转换为携带图像信息的电信号;图像采集与处理单元对图像传感器输出的电信号进行采集,通过一定的图像处理算法对图像进行处理;最后进入图像显示系统,进而实现目标的探测与识别。

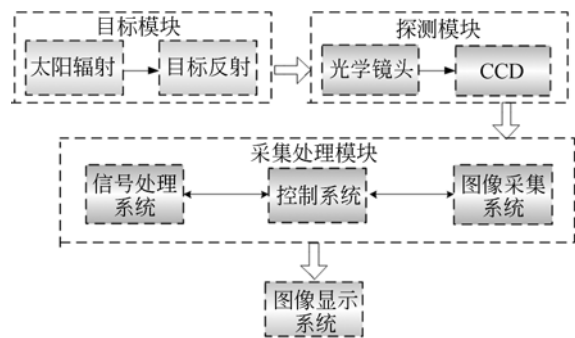


图1 星载空间目标监视系统工作原理

Fig.1 Working principle of satellite-borne surveillance system of space targets

## 3 光学系统设计参数

空间目标监视光学系统要具有较大视场,以便能够快速捕获大天区范围的空间目标或空间碎片,设计视场角 $2\omega$ 为 $25^\circ \times 25^\circ$ ,探测器选取像元尺寸为 $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$ ,像元数为 $1024 \times 1024$ 的CMOS探测器,根据物像关系公式:

$$f' = \frac{r}{\tan \omega}, \quad (1)$$

式中探测面的有效半径  $r=7.168\text{ mm}$ , 计算得到系统焦距  $f'$  为  $32.33\text{ mm}$ 。像点质心位置可达到探测器像元大小的  $1/10$ , 所以此系统空间目标的位置指向精度为  $8.9''$ , 系统设计参数如表 1 所示。

表 1 空间目标监视光学系统的设计参数

Tab. 1 Parameters of space target surveillance system

Parameter	Value
Waveband	Visible spectrum
Field of view/(°)	$25 \times 25$
Primary wavelength/nm	546
F/#	1.6
Focal length/mm	32.33
Back focal length/mm	$>10$

### 4 衍射混合透镜

衍射混合透镜即是折射透镜中加入衍射透镜, 其中二元衍射面可以通过改变刻槽的位置和宽度, 产生任意波面的透镜; 与传统折射面相比, 不再局限于只能更改曲率半径和玻璃材料, 更加灵活, 能提供更多的设计变量, 而且体积小、重量轻、容易复制<sup>[12-13]</sup>。二元衍射面的面型与偶次非球面型相似, 支持平面、球面、二次面和多达 16 阶的多项式非球面。其面型矢高公式为:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^8 \alpha_i r^{2i}. \quad (2)$$

如图 1 所示, 折射透镜按相位  $2\pi$  截取压缩, 或者截取一个曲面, 从而构成相位连续分布的刻蚀浮雕结构, 形成二元衍射透镜。

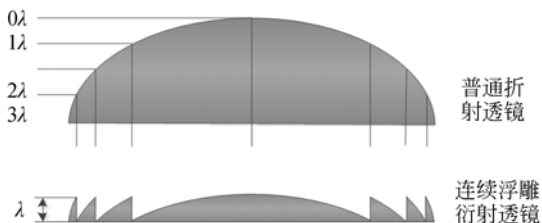


图 2 折射透镜到衍射透镜的演变图

Fig. 2 Evolution from reflective lens to diffractive lens

### 4.1 折射透镜消色差

在可见光波段, 绝大多数光学材料属于正常色散, 用这些材料制成透镜。在结构参数不变的情况下, 折射透镜对于波长越短的光线(蓝色)折射率越大, 而衍射透镜对于波长越长的光线(红色)折射率越大。两组镜片对不同波长光线的折射率相反, 利用此特性组合使用可有效抵消色差。图 3 所示为衍射混合透镜消色差示意图。

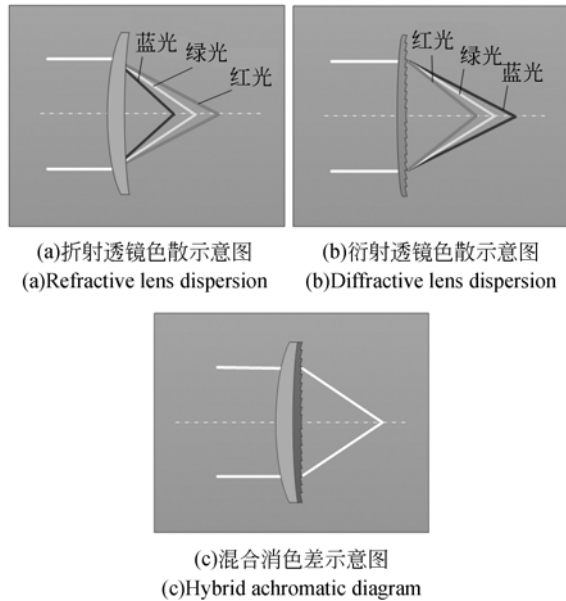


图 3 衍射混合透镜消色差示意图

Fig. 3 Achromatic diagram of refractive-diffractive lens

### 4.2 折射透镜和衍射透镜的热差特性

空间环境复杂多变、温差大, 对光学系统的热稳定特性要求较高。当温度变化时, 透镜材料的曲率半径、厚度、透镜之间的间隔、系统的机械外壳、机械零件等都会发生一定的形变, 光学元件的折射率也会随着温度的变化而变化, 对光学系统的成像性能造成很大影响。

光学元件的热差特性可通过光学热膨胀系数来衡量, 即光焦度在单位温度内的相对变化, 即:

$$x_{f,r} = \frac{d\varphi/dT}{\varphi}. \quad (3)$$

对于折射透镜, 由薄透镜光焦度公式  $\varphi = (n - n_0) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$ ,  $n_0$  为透镜所在空间折射率, 当环境温度  $T$  改变  $\Delta T$  时, 折射率与半径都会相应变化, 光焦度公式两边对  $T$  求导得到:

$$\frac{d\varphi}{dT} = \left[ \frac{dn}{dT} - \frac{dn_0}{dT} \right] \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] + (n - n_0) \left[ -\frac{1}{r_1^2} \frac{dr_1}{dT} + \frac{1}{r_2^2} \frac{dr_2}{dT} \right], \quad (4)$$

式中  $r_1, r_2$  为透镜前后表面的半径。材料线膨胀系数  $a_g$  为:

$$\frac{dr_1/dT}{r_1} = \frac{dr_2/dT}{r_2} = a_g. \quad (5)$$

联合式(4)和式(5)可推出折射透镜光学热膨胀系数,如下:

$$x_{f,r} = a_g - \frac{1}{(n - n_0)n_0} \left[ n_0 \frac{dn}{dT} - n \frac{dn_0}{dT} \right]. \quad (6)$$

衍射透镜不同环带位置的焦距不同,可表示为:

$$f = \frac{n_0 r_m^2}{2m\lambda}, \quad (7)$$

式中第  $m$  级环带的径向距离为  $r_m$ , 与温度  $T$  的关系表达式为:

$$r'_m = r_m(1 + a_g \Delta T). \quad (8)$$

由此可得衍射透镜的光学热膨胀系数为:

$$x_{f,d} = 2a_g + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT}. \quad (9)$$

由光学热膨胀系数可以看出,折射透镜的热差特性与透镜材料的线性膨胀系数和折射率温度系数有关,衍射透镜的热差特性仅由材料线性膨胀系数决定,因此设计时适当的使用衍射透镜可提高整个系统的消热差性能。

### 4.3 折衍射透镜的像差计算

根据光学系统的光焦度匹配以及透镜的消色差和二级光谱条件,可得:

$$\sum_k h_k \varphi_k = \varphi, \quad (10)$$

$$\frac{1}{h_1^2 \varphi^2} \sum_k \frac{h_k^2 \varphi_k}{\nu_k} = 0, \quad (11)$$

$$\frac{1}{h_1^2 \varphi^2} \sum_k \frac{h_k^2 \varphi_k p_k}{\nu_k} = 0, \quad (12)$$

式中:  $p_k$  为第  $k$  个镜面的部分色散系数,  $\nu_k$  为第  $k$  个镜面的阿贝数,  $\varphi_k$  为第  $k$  个镜面的光焦度,  $h_k$  为近轴光线在第  $k$  个面上的入射高度,  $\varphi$  为折衍射混合透镜的光焦度。

在温度变化范围内,消热差需要机械结构变化产生的像面位移和镜片变化产生的像面位移相互补偿,从而保持焦平面稳定,即有:

$$\frac{1}{h_1^2 \varphi^2} \sum_k h_k^2 \varphi_k x_k = a_H L, \quad (13)$$

式中:  $L$  为镜筒总长度,  $a_H$  为镜筒材料的膨胀系数。

## 5 光学系统设计结果及性能分析

### 5.1 设计结果

根据上述设计指标,利用准对称型双高斯结构,完成大视场、大相对孔径的空间目标监视光学系统设计,结果如图 4 所示。系统总长度为 63.4 mm,结构紧凑,一共有 5 组镜片,在光阑周围,第 2 和第 3 片透镜,第 4 和第 5 片透镜为消色差双胶合透镜;火石玻璃靠近光阑,且凹面对着光阑,在大孔径中可以更好地校正像差,系统后焦距较大为 21 mm,可以在空间相机中添加反射镜装置;为了校正系统的色差和轴外单色像差,第 6 片透镜前表面使用二元衍射面,在不增加镜片数量的情况下使系统具有更好的成像性能,为了减小生产加工负担,衍射面采用旋转对称结构,基地为平面,对 6 阶高次项进行优化。

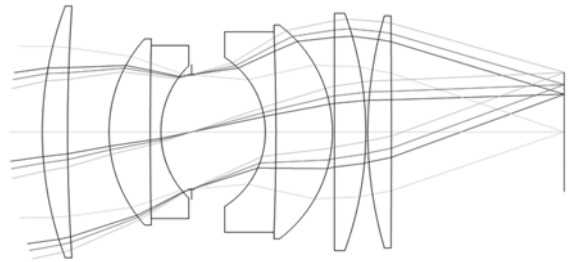


图 4 空间目标监视光学系统的二维结构

Fig. 4 Layout of space target surveillance optical system

衍射系数分别为,  $A_1 = -5.31 \times 10^4$ ,  $A_2 = 9.17 \times 10^5$ ,  $A_3 = -3.39 \times 10^7$ , 衍射面的有效半径为 14.08 mm, 归一化半径为 100。图 5 是二元面的相位函数曲线和环带密度曲线,图中曲线 I 表示随径向坐标  $r$  的增大,二元面的相位周期逐渐增大;曲线 II 表示二元面上刻槽宽度的变化。由曲线 II 可知,越靠近镜片边缘位置,二元面刻槽的线频率越大。二元面刻划线的最大频率为 25 periods/mm, 即一个周期内的最大刻划宽度为 40  $\mu\text{m}$ , 因此采用金刚石切割工艺进行加工。

### 5.2 成像质量评价

空间探测相机要求能够精准的捕获目标,因

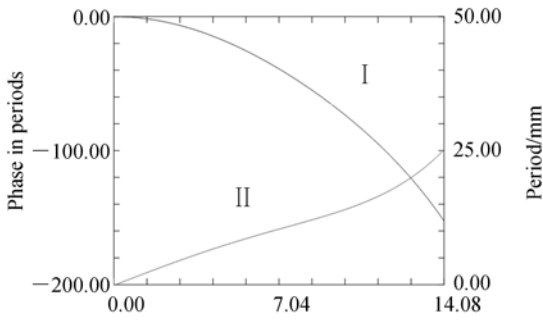


图 5 光学系统二元衍射面的相位特征

Fig. 5 Binary surface phase plot of optical system

此对成像性能的要求较高,为了全面评估光学系统的成像特性,设置了 $0^\circ, 8^\circ, 10^\circ, 12.5^\circ$ 共 4 个视场。图 6 是系统点列图,4 个视场对应的点列图弥散斑均方根(RMS)半径分别为 2.984, 4.722, 6.306, 10.132  $\mu\text{m}$ ,均小于探测器像元尺寸,可以很好地避免成像面的辉光现象。

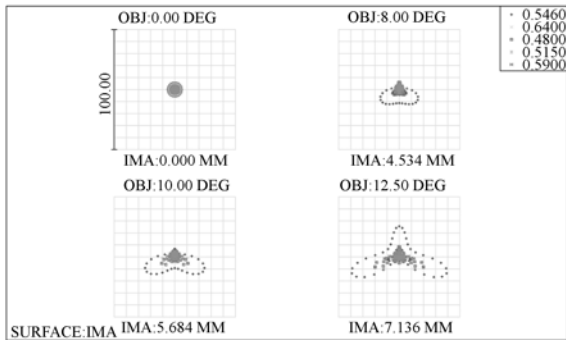


图 6 光学系统点列图

Fig. 6 Spot diagram of optical system

图 7 是系统能量集中度曲线。由图可知,所有视场在 7  $\mu\text{m}$  的半径内,能量分布均达到 80% 以上,弥散斑半径分别为 3.8, 4, 4.2, 6.6  $\mu\text{m}$ ,能量分布比较集中,且在一个像元内成像性能优异。图 8 是相对照度曲线,由图可见各个视场的相对照度值能达到 90% 以上,轴外物体成像光线很好地参与了成像,像面光照度均匀性良好。

垂轴色差是影响目标定位的关键因素,为了更好的消除色差,使用了折衍射透镜混合的方式。如图 9 是系统的垂轴色差曲线,表征了系统两个极限波长下主光线交点的垂轴距离,最大视场的垂轴色差为 -0.828  $\mu\text{m}$ ,小于艾里斑半径,不影响成像效果。

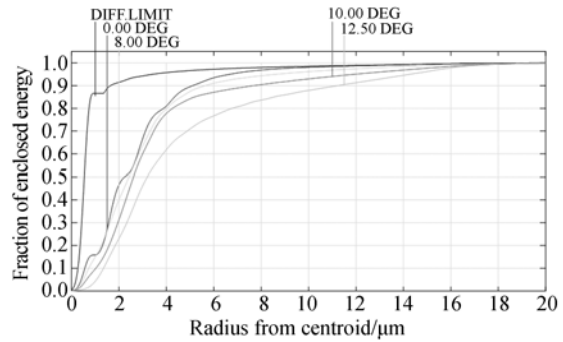


图 7 能量集中度

Fig. 7 Encircled energy

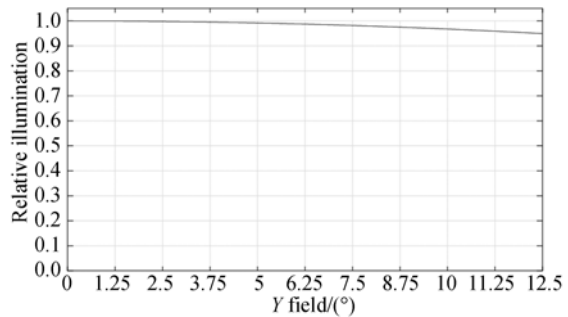


图 8 相对照度曲线图

Fig. 8 Relative illumination diagram

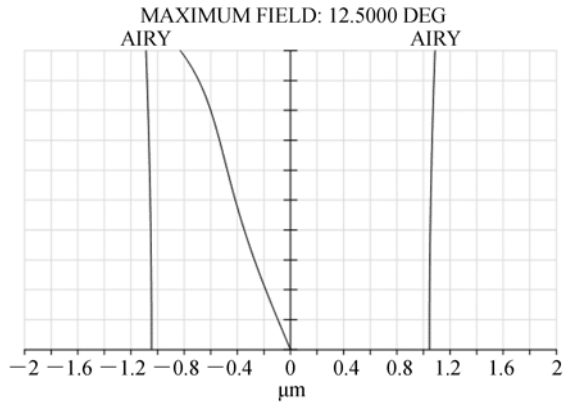


图 9 垂轴色差

Fig. 9 Lateral chromatic aberration

图 10 是系统的畸变曲线, $0^\circ, 8^\circ, 10^\circ, 12.5^\circ$  4 个视场对应的绝对畸变大小分别为 0%、-0.170%、-0.262%、-0.398%,系统畸变在 -0.5% 内,满足成像需求。

随着卫星在空间移动,环境温差比较大,空间目标监视光学系统需要进行一定的热控设计。工作时温度对光学件的曲率半径、厚度间隔、折射率

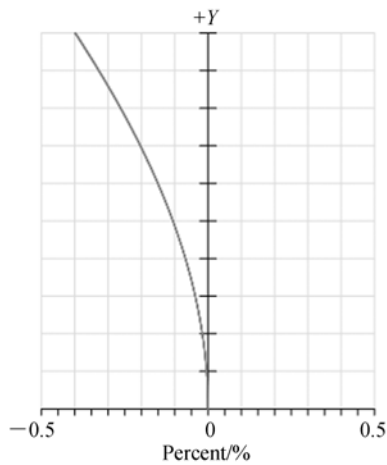


图 10 畸变  
Fig. 10 Distortion

等系统结构参数产生影响,利用折衍射透镜混合不仅可以消色差,还大大提高了系统的消热差特性。

对于成像光学系统来说,光学传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 是比较全面的评价方法。图 11 是光学系统在不同温度下的光学调制传递函数曲线,图像传感器的像元尺寸是  $14\ \mu\text{m}$ ,计算可得探测器的奈奎斯特频率为  $36\ \text{lp/mm}$ 。表 1 是不同温度下,奈奎斯特频率为  $36\ \text{lp/mm}$  时,四个视场的子午视场(T)和弧矢视场(S)的光学传递函数值,可以看出常温下中心视场的 MTF 值为 0.86,接近衍射极限,边缘视场的 MTF 值在 0.6 以上,环境温度从  $-50, 20, 70\ ^\circ\text{C}$  变化时,各视场 MTF 数值变化很小;而当温度升高时,MTF 曲线几乎没有变化,表明光学系统的消热差特性良好。

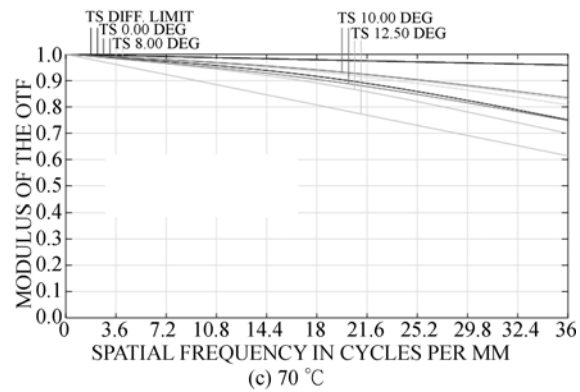
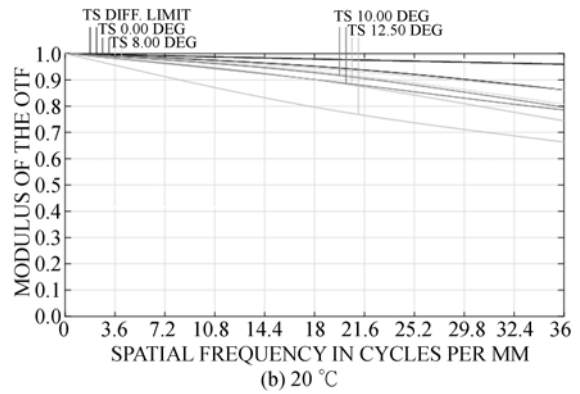


图 11 不同温度下的光学传递函数曲线  
Fig. 11 MTF curves at different temperatures

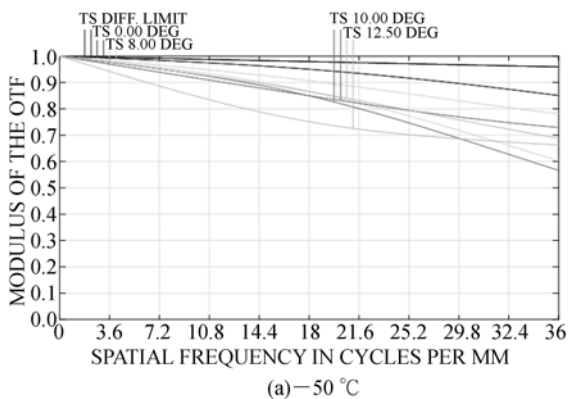
表 2 各温度下极限频率的光学传递函数值

Tab. 2 MTF values of limit frequency at different temperatures

视场	温度/ $^\circ\text{C}$		
	-50	20	70
$0^\circ\text{T}$	0.850	0.861	0.750
$0^\circ\text{S}$	0.850	0.861	0.750
$8^\circ\text{T}$	0.602	0.806	0.828
$8^\circ\text{S}$	0.780	0.860	0.807
$10^\circ\text{T}$	0.566	0.795	0.835
$10^\circ\text{S}$	0.729	0.785	0.748
$12.5^\circ\text{T}$	0.687	0.744	0.699
$12.5^\circ\text{S}$	0.662	0.663	0.613

## 6 结 论

本文根据大视场、大相对孔径空间目标监视光学系统的要求,提出了折衍射透镜混合消色差和消热差的设计方法,并介绍了星载空间目标监



视光学系统的结构和工作原理。然后研究了折衍射透镜的消色差、消热差特性及像差计算。最后,给出了折衍射混合光学系统的设计结果和成像性能分析。设计结果表明:系统焦距为 32.33 mm,

相对孔径为 1/1.6,全视场角为  $25^\circ \times 25^\circ$ ,垂轴色差为  $-0.828 \mu\text{m}$ ,畸变在  $-0.5\%$  内,光学传递函数在不同温度下接近衍射极限,基本满足大视场空间目标监视光学系统的使用需求。

### 参考文献:

- [1] 宋博. 美国天基空间态势感知系统发展[J]. 国际太空, 2015(12): 13-20.  
SONG B. Development of U. S. space-based space situational awareness system[J]. *Space International*, 2015(12): 13-20. (in Chinese)
- [2] 刘海印, 曹秀云, 林飞. 2016 年美军空间态势感知能力建设及发展动向分析[J]. 中国航天, 2017(2): 9-12.  
LIU H Y, CAO X Y, LIN F. Analysis of construction and development trend of American air situation awareness in 2016[J]. *Aerospace China*, 2017(2): 9-12. (in Chinese)
- [3] 司耀锋. 加拿大首颗军用卫星——“蓝宝石”升空[J]. 国际太空, 2013(3): 39-42.  
SI Y F. Canada's first military satellite, "Sapphire", lifted off[J]. *Space International*, 2013(3): 39-42. (in Chinese)
- [4] 夏春秋. 天基空间目标观测大视场离轴反射系统研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.  
XIA CH Q. *The Study on Off-axis Optical System with Wide Field of View for Space-based Detection Camera*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [5] 尚玲. 天基可见光探测相机光学系统设计及杂散光分析[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2011.  
SHANG L. *Optical System Design and Stray Light Analysis of a Space-based Visible Camera*[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
- [6] 佟静波, 张宏伟, 吴建福. 空间碎片天基探测相机光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S2): 48-55.  
TONG J B, ZHANG H W, WU J F. Optical system design of space-based detection camera of space debris[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S2): 48-55. (in Chinese)
- [7] 王虎, 罗建军. 空间碎片多光谱探测相机光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1188-1193.  
WANG H, LUO J J. Optical system design of multi-spectral camera for space debris[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1188-1193. (in Chinese)
- [8] 王虎, 罗建军. 新型紧凑型大相对孔径可见光光学系统[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 851-855.  
WANG H, LUO J J. A novel compact large relative aperture visible optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 851-855. (in Chinese)
- [9] 常凌颖, 赵葆常, 汶德胜, 等. 空间目标探测相机光学系统设计[J]. 中国激光, 2010, 37(S1): 136-140.  
CHANG L Y, ZHAO B CH, WEN D SH, et al.. Optical system design of visible camera for space target detection[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(S1): 136-140. (in Chinese)
- [10] 孙鑫, 白加光, 王忠厚, 等. 一种用于空间目标捕获的宽视场可见光光学系统的设计[J]. 光子学报, 2009, 38(6): 1548-1551.  
SUN X, BAI J G, WANG ZH H, et al.. Optical system design of visible-spectra camera for space-object capture[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(6): 1548-1551. (in Chinese)
- [11] 曾德贤, 胡炳梁, 宋海军. 空间碎片天基光学探测系统离焦问题分析[J]. 光子学报, 2016, 45(1): 141-145.  
ZENG D X, HU B L, SONG H J. Analysis of defocus in space based space optical debris detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(1): 141-145. (in Chinese)
- [12] VELDKAMP W B, MCHUGH T J. Binary optics[J]. *Scientific-American*, 1992, 266(5): 92-97.
- [13] 张宇, 王文生. 制冷式红外双波段共光路折衍混合摄远物镜设计[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 522006.

ZHANG Y, WANG W SH. Design of cooled infrared dual-band common path refractive-diffractive

telephoto objective[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 522006. (in Chinese)

#### 作者简介:



刘 帅(1992—),男,湖北襄阳人,助理研究员,2014 年于长春理工大学获得学士学位,2017 年于北京航空航天大学获得硕士学位,主要从事光学设计和光电成像系统方面的研究。E-mail: liushuai@ciomp. ac. cn



刘春雨(1982—),女,吉林四平人,博士,副研究员,2006 年于吉林大学获得学士学位,2011 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学系统设计。E-mail: mmliucy@163. com

### 论文勘误说明

本刊 2017 年第 25 卷第 10 期增刊第 281 页论文:“红外焦平面探测器信号处理模块设计”(文章编号:1004-924X(2017)增-0281-07)的通讯作者汪晓,作者署名单位信息出现错误,做出修正如下:

1. 作者单位中文信息更正为:

作者:“葛 军<sup>1</sup>,汪 晓<sup>1,2\*</sup>,任月敏<sup>1</sup>”

单位:“1. 中国科学院 上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室 红外探测与成像技术重点实验室,上海 200083;2. 中国科学院大学,北京 100049”

2. 作者单位英文信息更正为:

作者:“GE Jun<sup>1</sup>,WANG Xiao<sup>1,2\*</sup>,REN Yue-min<sup>1</sup>”

单位:“1. State Key Laboratory of Infrared Physics,Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083,China;2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049,China”