

激光与光电子学进展

基于谐衍射的宽波段大口径衍射光学系统设计

邹金钊^{1,2}, 吴时彬^{1*}, 汪利华¹, 刘盾¹, 杜俊峰¹, 边疆¹¹中国科学院光电技术研究所薄膜光学相机总体室, 四川 成都 610209;²中国科学院大学光电学院, 北京 100049

摘要 为实现大口径衍射光学系统宽波段成像,分析了传统衍射透镜基于 Schupmann 结构光路模型带宽增加带来的中继镜口径变大的问题,提出采用谐衍射透镜作为主镜构建大口径宽波段衍射光学系统,设计了口径为 10 m 谱段覆盖 400~900 nm 的大口径光学系统,中继镜的口径与传统设计相比减小了 2.4 m。为验证该设计方法,设计一套口径为 80 mm、光谱范围为 400~900 nm 的成像光学系统,并对该系统进行了成像实验,通过查看鉴别率靶图像无色差,验证了基于谐衍射透镜为主镜的宽波段成像设计方法,为大口径衍射光学系统设计提供了一种思路。

关键词 光学设计; 宽波段; 谐衍射; 消色差

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222704

Designing a Broadband Large Aperture Diffractive Optical System Based on Harmonic Diffraction

Zou Jinzhao^{1,2}, Wu Shibin^{1*}, Wang Lihua¹, Liu Dun¹, Du Junfeng¹, Bian Jiang¹¹Advanced Imaging Science and Engineering Lab for Space Optical System, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;²College of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

Abstract To realize the broadband imaging of large aperture diffractive optical systems, we analyze the problem of increasing relay lens diameter due to the increased bandwidth of traditional diffractive lenses based on the Schupmann structure optical path model. We propose using a harmonic diffractive lens as the primary mirror to construct a large aperture broadband diffractive optical system. A large aperture optical system with an aperture of 10 m and a spectrum covering 400–900 nm is designed, and the aperture of the relay lens is reduced by 2.4 m compared with the traditional design. To verify the design method, an imaging optical system with an aperture of 80 mm and a spectrum of 400–900 nm is designed, and imaging experiments are carried out on the system. By checking the resolution target image with no chromatic aberration, the broadband imaging design method based on a harmonic diffractive lens as the primary mirror is verified, which provides an idea for designing a large aperture diffractive optical system.

Key words optical design; wide bandwidth; harmonic diffraction; achromatic

1 引言

光学系统口径越大,分辨力越高,反射式大口径光学系统面临面形公差严格、加工难度大、重量大难以运输和空间部署困难等难题,制约着反射式大口径光学系统的发展^[1]。各国研究人员也在探索新型成像光学系统,衍射空间成像光学系统是其中之一。衍射元件通过微纳结构对光波进行调制实现成像,微纳结构制

作在平面薄膜或薄基底材料上^[2],使衍射主镜具有轻量化和易于折叠展开等优点,同时由于衍射主镜为透射光学元件,大口径衍射主镜拼接公差比反射主镜大^[3]。由于衍射元件的这些特点,使得衍射空间大口径望远镜成为可能。

美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室(LLNL)的Hyde等^[4]发表了衍射光学元件作为超大型(25~100 m)望远镜的论文,研究了衍射望远镜消色差模型——

收稿日期: 2022-09-30; 修回日期: 2022-10-04; 录用日期: 2022-11-04; 网络首发日期: 2022-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(61905254)

通信作者: *sbwu@ioe.ac.cn

Schupmann 消色差模型和宽波段成像方案。Koechlin 课题组^[5]在 2010 年研制了口径为 200 mm×200 mm 的以菲涅耳透镜为主镜的衍射成像光学系统,并对土星等目标实现了成像观测,光谱范围为 630~743 nm,光谱宽度为 113 nm。Andersen^[6]设计了口径为 200 mm、光谱范围为 522~562 nm、带宽为 40 nm,以光子筛作为主镜的望远镜成像光学系统。美国国防高级研究计划局(DARPA)开展了“莫尔纹(MOIRE)”^[7-10]衍射薄膜成像项目,计划分阶段研制 10 m 到 20 m 衍射成像空间光学系统,该项目中 10 m 级薄膜衍射成像光学系统光谱带宽仅为 70 nm。前面提到的研究报告,系统设计均采用 Schupmann 消色差模型,理论上该模型可以实现全色宽波段成像。但由于主镜色差大,主镜口径越大、谱段越宽会使得中继镜口径增大,系统重量和工程难度也随之增加,因此 10 m 级系统光谱的带宽较窄。为解决这一问题,增加系统光谱带宽,本文开展了以谐衍射

透镜为主镜设计大口径成像光学系统的研究,提升系统带宽,减小中继镜口径,为大口径宽波段衍射成像系统的研制提供技术支撑。

2 设计方法和原理

2.1 衍射透镜消色差光路结构

衍射透镜色差大,要实现宽波段成像,首先需要开展消色差成像光路设计。Schupmann 消色差光路结构是目前大口径衍射主镜成像光学系统常用的消色差技术途径之一^[11],消色差光路结构如图 1 所示。该光路结构由衍射主镜、中继镜、衍射次镜和会聚透镜组成,其中主镜和次镜均为衍射透镜,具有相同色散和相反光焦度,并处在中继镜的共轭位置,宽波段光线经过主镜、中继镜和消色差次镜后便可实现消色差。消色差后系统光焦度为负,加入会聚透镜使光线会聚后,即可实现宽波段消色差成像。

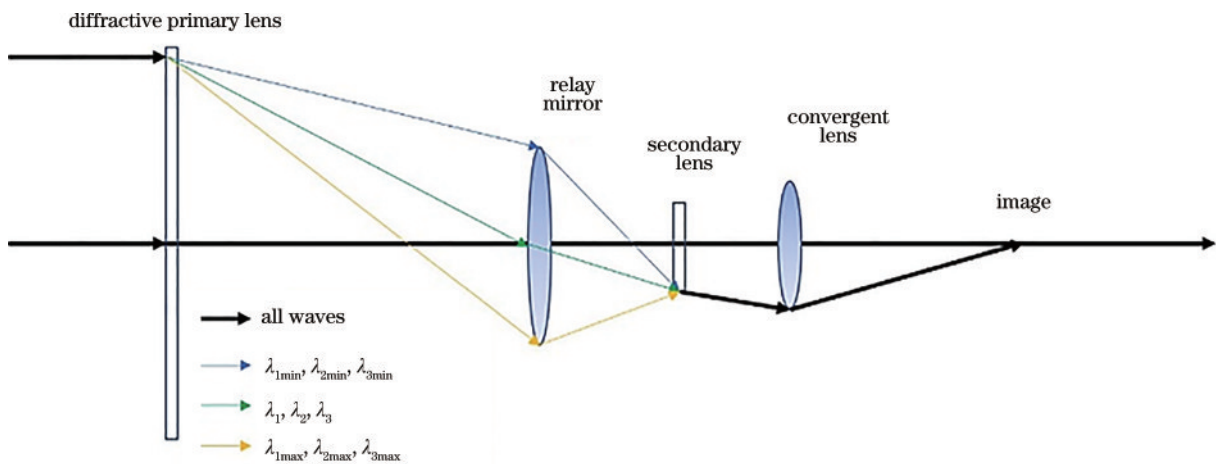


图 1 Schupmann 消色差模型

Fig. 1 Schupmann achromatic model

理论上 Schupmann 消色差模型可以实现 400~900 nm 甚至更宽的波段成像。主镜口径为 10 m、F 数为 10 的光学系统,若光谱覆盖 400~900 nm,系统从主镜到中继镜的光路图如图 2 所示。由于主镜色散较大,从主镜出射的光线在空间上相互分离,所以系统光

谱越宽,中继镜口径会越大。在 Zemax 光学设计软件中进行仿真计算,口径最小的地方已经大于 4.3 m,如果中继镜放置在其他位置口径将会更大,使系统变得笨重,也增加了工程难度。

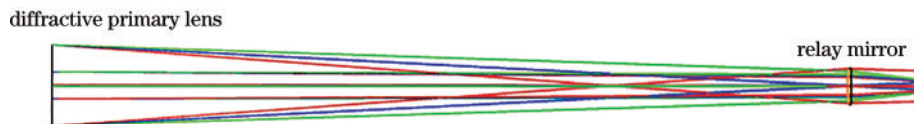


图 2 采用传统衍射透镜的 10 m 口径衍射成像系统部分光路图

Fig. 2 Partial optical path diagram of 10 m diffractive optical system with a traditional diffractive lens

2.2 谐衍射宽波段成像系统设计

由于主镜色差大,带来的工程难度问题使系统很难实现 400~900 nm 宽波段成像,要改变这一问题,需要减小主镜色差。

设计一套以衍射透镜为主镜的成像光学系统,光谱范围为 $(\lambda_{\min}, \lambda_{\max})$ 其中 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为该光谱范围内 3 个

波长, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 关系满足如下公式, m, n 为大于 1 的整数。

$$\lambda_1 = m\lambda_2 = n\lambda_3. \quad (1)$$

当主镜为传统菲涅耳透镜时,每个环带周期相位为 2π ,利用 1 级衍射级次成像,波长 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 的焦点如图 3(a) 所示,波长 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 与焦距 f_1, f_2, f_3 的关系可由

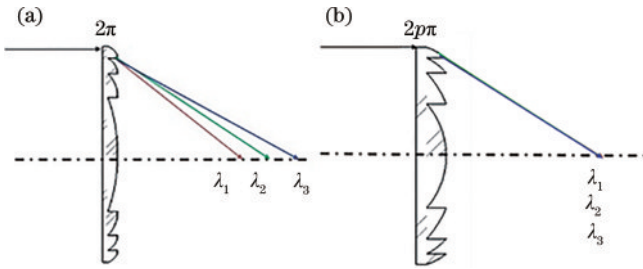


图 3 菲涅耳透镜与谐波衍射透镜。(a)菲涅耳透镜;(b)谐波衍射透镜

Fig. 3 Fresnel lens and harmonic diffractive lens. (a) Fresnel lens; (b) harmonic diffractive lens

如下公式表示,由如下公式和图 3(a)可知,传统菲涅耳透镜存在较大色差。

$$\lambda_1 f_1 = \lambda_2 f_2 = \lambda_3 f_3 \quad (2)$$

主镜采用谐波衍射结构透镜,谐波衍射透镜每个环带周期相位 $2p\pi$ (p 为大于 1 的整数),设计光谱波长 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 满足式(1)时,谐波衍射透镜在 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 的 $1, m, n$ 衍射级次焦点重合如图 3(b)所示,焦距相等,关系可表示为

$$f_1 = f_2 = f_3 \quad (3)$$

以 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为中心波长,光谱范围分别为 $(\lambda_{1min}, \lambda_{1max}), (\lambda_{2min}, \lambda_{2max}), (\lambda_{3min}, \lambda_{3max})$ 的谱段(其中 $\lambda_{1min} = \lambda_{min}, \lambda_{3max} = \lambda_{max}$),焦点也基本重合,3 个谱段光线共光路,这样谐波衍射透镜色差相当于传统透镜的 1/3 左右,这时再采用 Schupmann 消色差模型对其中一谱段消色差进行设计,由于共光路其余 2 个谱段也会实现消色差成像,通过合理设计中心波长,当 $\lambda_{1max} = \lambda_{2min}, \lambda_{2max} = \lambda_{3min}$ 时便实现了在光谱范围 $(\lambda_{min}, \lambda_{max})$ 连续宽波段成像。所设计的谐波衍射透镜色差只有传统菲涅耳透镜的 1/3 左右,因此中继镜口径将会大大减小,系统重量得到很大程度的降低,同时系统研制难度也将下降。

在上述分析中,将光谱范围 $(\lambda_{min}, \lambda_{max})$ 划分为了 3

个谱段,当谱段数量增加时谐波衍射透镜色差会进一步减小,中继镜的口径也会继续下降,但随着谱段增加也会带来新的问题,关于谱段数量的选择,后面将会进一步分析。

2.3 400~900 nm 衍射望远镜系统设计

根据前文的理论与分析,设计了以谐波衍射透镜为主镜,光谱范围覆盖 400~900 nm 的 10 m 口径衍射光学系统,衍射主镜 F 数为 10。其中,一个谱段的中心波长为 632.8 nm,衍射级次 3 级,根据谐波衍射透镜特点^[13],该衍射透镜在波长分别为 949.2、476.4、379.7 nm 处的透镜焦点与该透镜在波长 632.8 nm 处的焦点重合。因此,要设计谱段为 400~900 nm 的成像光学系统,光谱范围和衍射级次如表 1 所示。由表 1 可知,最宽光谱以 632.8 nm 为中心波长的谱段,带宽只有 200 nm,该数值为采用传统菲涅耳透镜设计时的谱段带宽的 0.4 倍,因此中继镜的口径将会大大减小。

表 1 系统光谱范围和衍射级次
Table 1 Wave band and diffraction order

Serial number	Central wavelength / nm	Diffraction order	Wave band / nm	Bandwidth / nm
1	379.7	5	400-420	20
2	476.4	4	420-550	130
3	632.8	3	550-750	200
4	949.2	2	750-900	150

主镜为谐波衍射结构,上述 4 个谱段经过主镜后共光路,采用 Schupmann 消色差模型进行消色差光路设计,10 m 成像系统光路如图 4 所示。中继镜为反射式卡塞格林结构,中继镜 1 的口径为 1.9 m,衍射次镜也为谐波衍射透镜,其衍射级次与主镜相同,衍射次镜制作曲面反射结构上,曲面衍射透镜在消色差的同时也充当会聚透镜的作用。

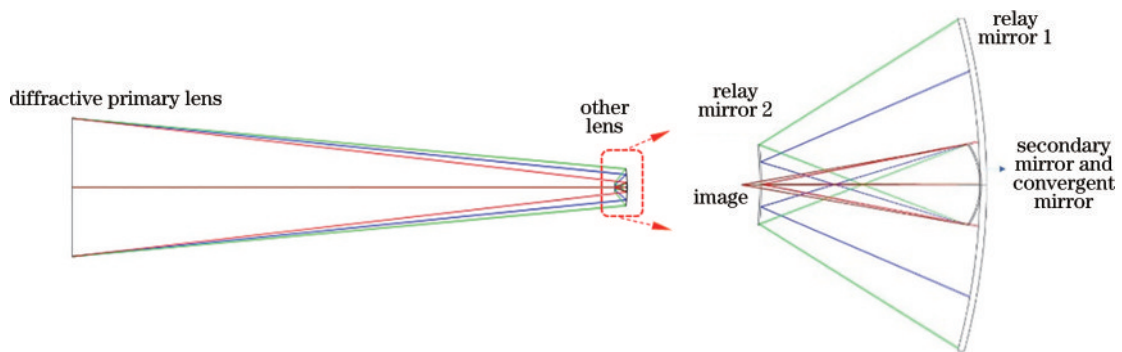


图 4 10 m 衍射光学系统光路图

Fig. 4 Optical path diagram of 10 m diffractive optical system

系统设计时采用多重组态设计,各个谱段的调制传递函数(MTF),如图 5 所示。由图 5 可知,系统各谱段 MTF 接近衍射极限。

10 m 系统的点列图如图 6 所示,环围能量图如图 7 所示。由图 7 可知,在 400~420 nm 波段、420~550 nm 波段、550~750 nm 波段、750~900 nm 波段内,

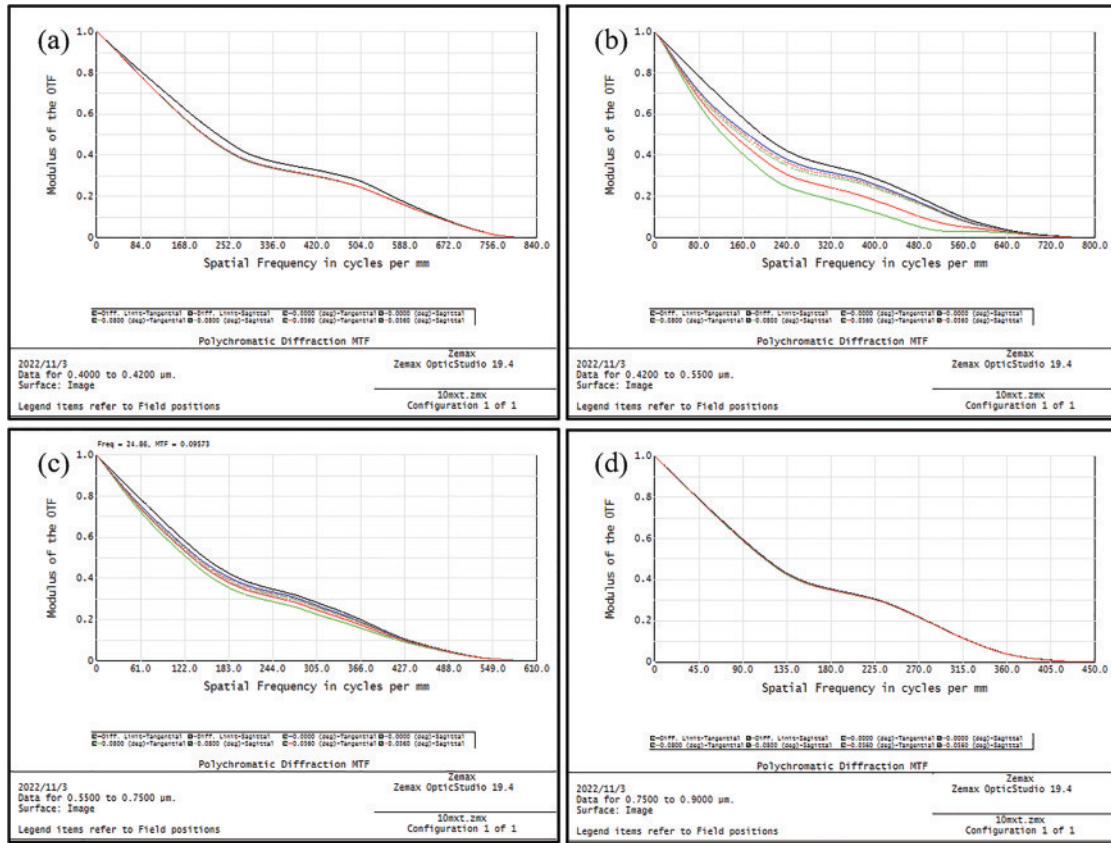


图 5 系统各波段 MTF。(a) 400~420 nm; (b) 420~550 nm; (c) 550~750 nm; (d) 750~900 nm
 Fig. 5 MTF of each wave band of the system. (a) 400~420 nm; (b) 420~550 nm; (c) 550~750 nm; (d) 750~900 nm

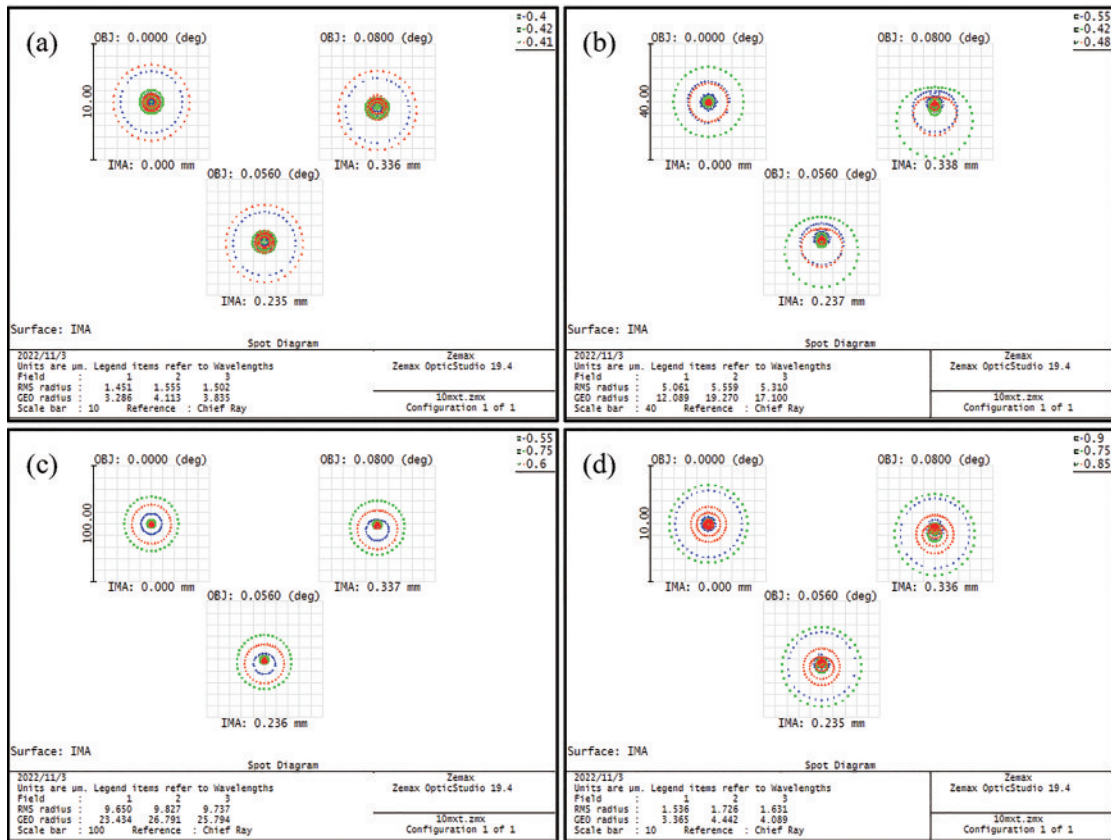


图 6 系统点列图。(a) 400~420 nm; (b) 420~550 nm; (c) 550~750 nm; (d) 750~900 nm
 Fig. 6 Spot diagram of the system. (a) 400~420 nm; (b) 420~550 nm; (c) 550~750 nm; (d) 750~900 nm

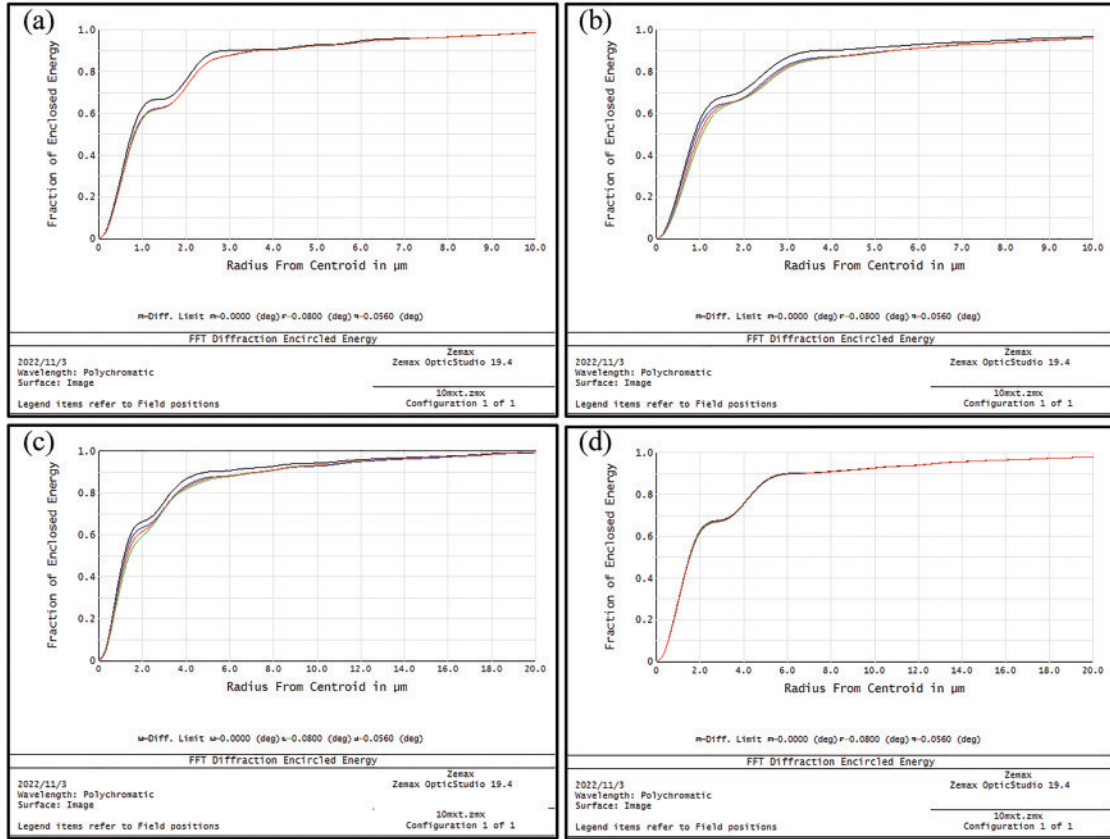


图 7 系统的环围能量图。(a) 400~420 nm;(b) 420~550 nm;(c) 550~750 nm;(d) 750~900 nm
Fig. 7 Energy diagram of different bands. (a) 400–420 nm; (b) 420–550 nm; (c) 550–750 nm; (d) 750–900 nm

80% 的能量分别集中半径为 2.318、2.893、3.764、4.627 μm 范围内。

3 实验验证

为验证谱衍射宽光谱成像光学系统设计方法与成像效果,设计了一套口径为 80 mm、光谱范围为 400~900 nm 的成像光学系统,该光学系统设计方法与 10 m 级成像系统一致。由于系统口径较小,中继镜为反射镜,为减小遮拦采用如图 8 所示的光路结构,形式上与

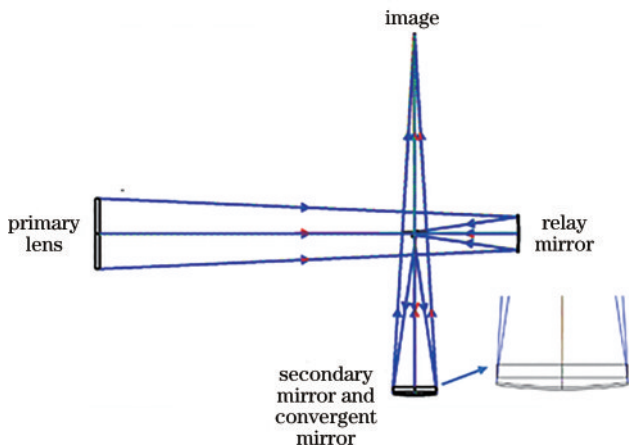


图 8 口径 80 mm 系统光路图
Fig. 8 Optical path diagram of 80 mm diameter system

图 4 有差异,但消色差光路结构原理相同。中心波长和每个中心波长覆盖的光谱范围与 10 m 级系统一致,如表 1 所示。

主镜 F 数为 10,采用 Schupmann 消色差结构对各个谱段进行消色差设计,系统由主镜、中继镜、转折镜、谱衍射消色差次镜、会聚镜组成。系统口径为 80 mm、成像光谱范围为 400~900 nm、视场角为 0.08° 、焦距为 640 mm,各谱段的 MTF 如图 9 所示。

80 mm 系统的点列图如图 10 所示,环围能量图如图 11 所示。由图 11 可知,在 400~420 nm 谱段、420~550 nm 谱段、550~750 nm 谱段、750~900 nm 谱段内,80% 的能量分别集中在半径为 4.615 μm 、7.101 μm 、9.803 μm 、17.048 μm 的范围内。

如图 12 所示,主镜制作在石英基板上,台阶数为 16,周期线宽为 38 μm 。实验成像光路如图 13 所示,采用卤素灯作为照明光源,卤素灯光谱范围覆盖 200 nm 到 2.5 μm ,平行光管 F 数为 10,焦距为 1.2 m,靶标放置在平行光管焦面处提供无穷远目标。

系统的实测 MTF 如图 14 所示(测试时系统含有 CCD,设计 MTF 只包含光学系统)。由于加工装调误差以及 CCD 的影响,与设计相比,实测 MTF 有一定程度地下降。

对靶标成像如图 15 所示。从鉴别率靶标中能分辨 3 号鉴别率靶的 21 线对,对应的频率为 74 lp/mm。

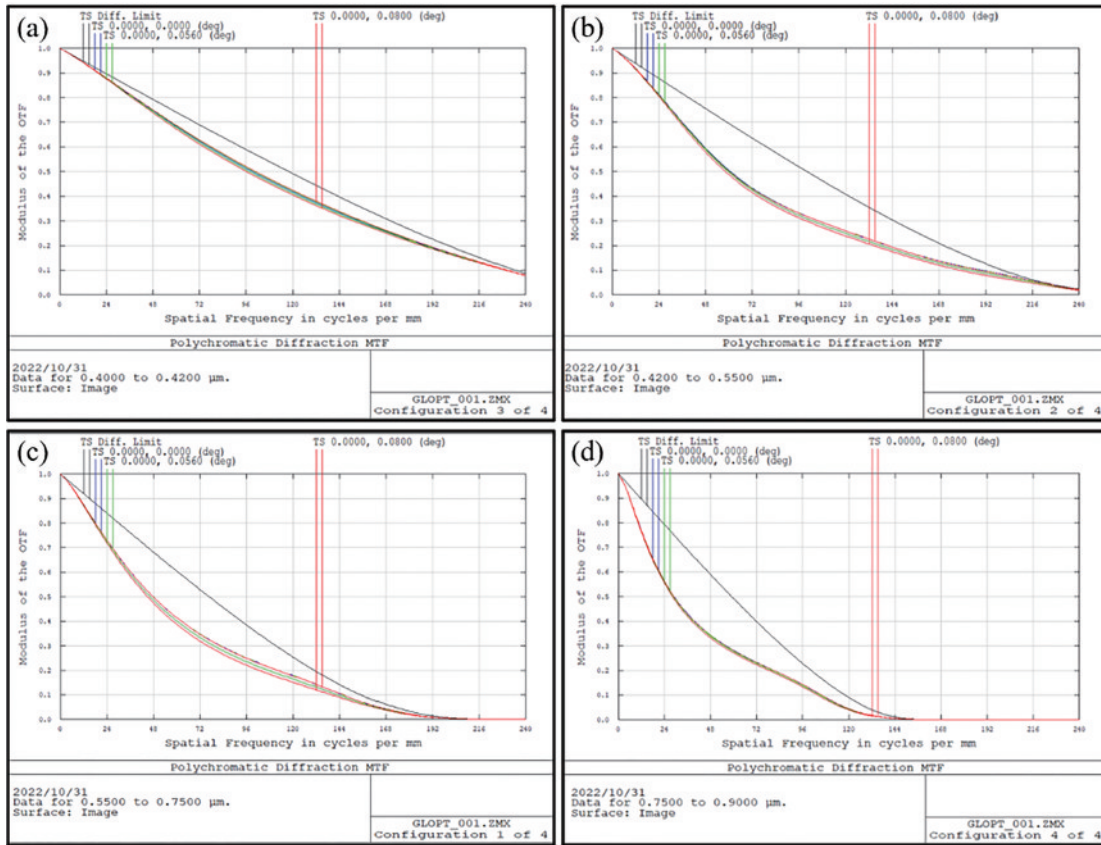


图 9 口径 80 mm 系统的 MTF。(a) 400~420 nm; (b) 420~550 nm; (c) 550~750 nm; (d) 750~900 nm
 Fig. 9 MTF of 80 mm diameter system. (a) 400–420nm; (b) 420–550 nm; (c) 550–750 nm; (d) 750–900 nm

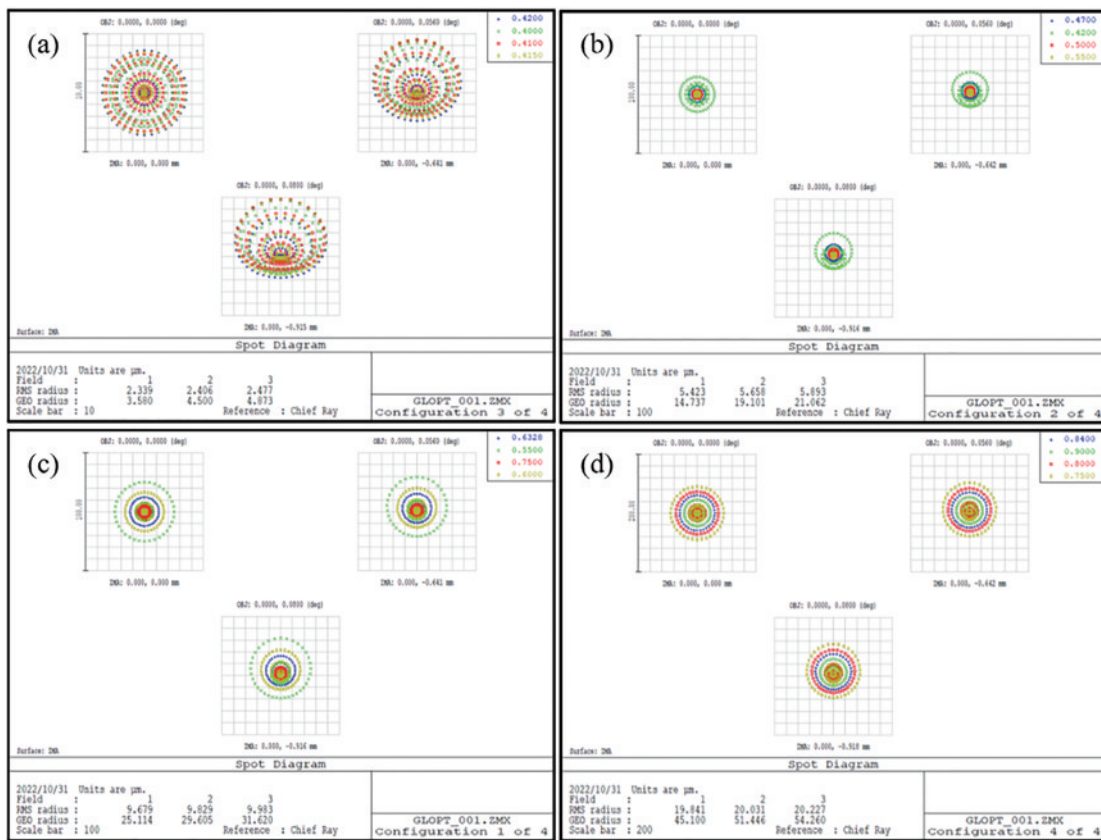


图 10 80 mm 系统的点列图。(a) 400~420 nm; (b) 420~550 nm; (c) 550~750 nm; (d) 750~900 nm
 Fig. 10 Spot diagram of the 80 mm system. (a) 400–420 nm; (b) 420–550 nm; (c) 550–750 nm; (d) 750–900 nm

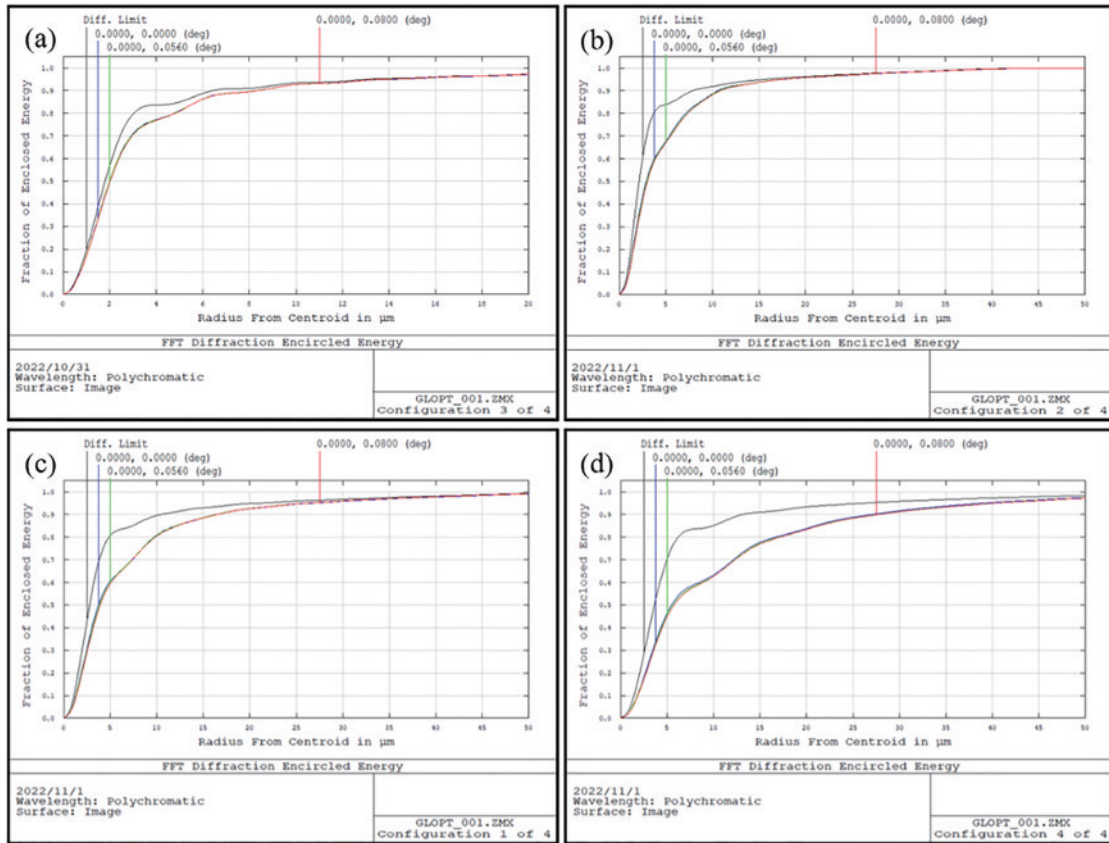


图 11 不同波段的环围能量图。(a) 400~420 nm;(b) 420~550 nm;(c) 550~750 nm;(d) 750~900 nm
Fig. 11 Energy diagram of different bands. (a) 400–420 nm; (b) 420–550 nm; (c) 550–750 nm; (d) 750–900 nm

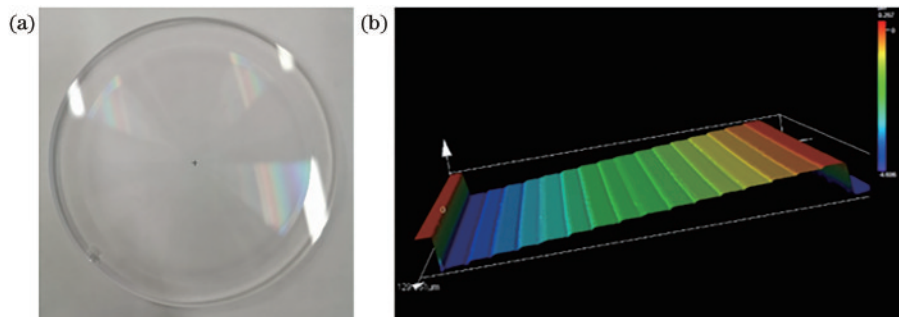


图 12 谐衍射透镜。(a)谐衍射透镜;(b)谐衍射透镜结构 16 台阶
Fig. 12 Harmonic diffractive lens. (a) Harmonic diffractive lens; (b) 16-level structure of the harmonic diffractive lens

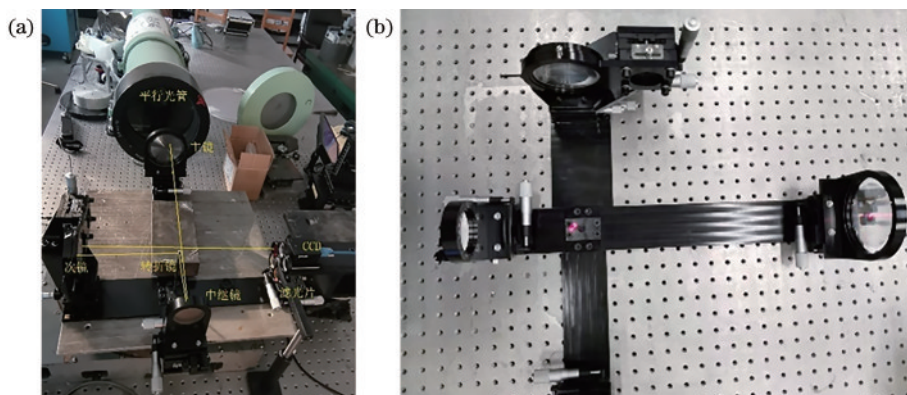


图 13 实验光路图。(a)实物图;(b)放大图
Fig. 13 Optical path diagram of the experiment. (a) Physical map; (b) enlarged view

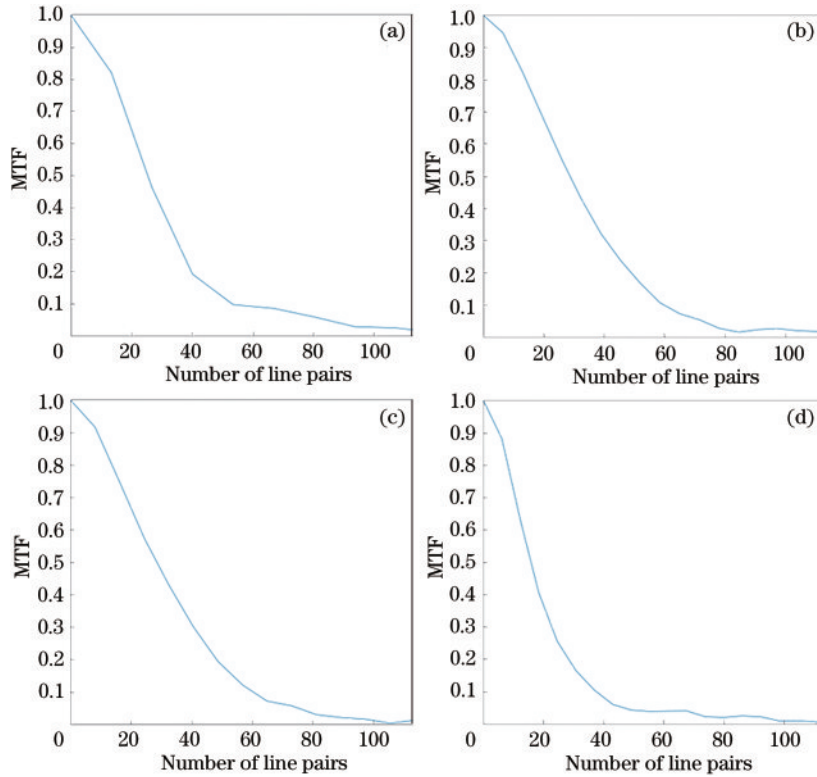


图 14 80 mm 系统实测 MTF。(a) 400~420 nm;(b) 420~550 nm;(c) 550~750 nm;(d) 750~900 nm
 Fig 14 Measured MTF of the 80 mm system. (a) 400~420 nm; (b) 420~550 nm; (c) 550~750 nm; (d) 750~900 nm

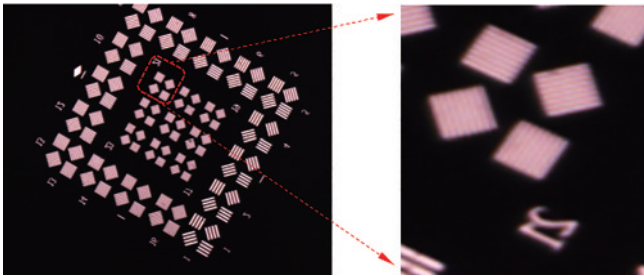


图 15 鉴别率靶标成像
 Fig. 15 Imaging of the discrimination rate target

且图像上无色差,验证了系统的消色差能力。

4 讨 论

1) 与传统衍射消色差成像对比,理论上主镜不采用谐衍射透镜而采用普通衍射透镜如菲涅耳透镜也能实现 400~900 nm 宽波段成像,与第二节 10 m 谐衍射透镜参数一致,菲涅耳透镜口径设置为 10 m, F 数为 10 时,中继镜放置在距离主镜 100 m 的位置,此时中继镜口径为 4.3 m,中继镜口径为谐衍射透镜的 2.3 倍。上述实例中 10 m 系统和 80 mm 系统设计时,在波长为 632.8 nm 处设定衍射级次 p 为 3 级。当选择更大衍射级次时,理论上衍射级次越大,相同带宽范围内中心波长就越多,所设计的光谱范围每个谱段就越窄,这样系统中继镜口径也就越小。例如,当中心波长为 632.8 nm,衍射级次为 5 时,光谱范围为 400~900 nm 的中心波长和谱段分别如表 2 所示,中心波长为 791 nm 的谱段带

表 2 衍射级次增大时的光谱范围
 Table 2 Wave band with increased diffraction order

Serial number	Central wavelength /nm	Diffraction order	Wave band /nm	Bandwidth /nm
1	791	4	711-900	189
2	632.8	5	580-711	131
3	527.3	6	489-580	91
4	452	7	420-489	69
5	395.5	8	400-420	20

宽最宽(189 nm),中继镜口径进一步减小。

2) 谐衍射级次的选择,理论上衍射级次 p 越大,在成像光谱范围谐衍射波段越多,每个波段覆盖的光谱范围越窄,中继镜口径将会越小。但随着衍射级次 p 的增大,谐衍射透镜微结构厚度也会越来越大。衍射透镜具有折射效果,此时系统成像性能也会下降,在其余衍射级次会引入波前像差。由厚度对其余衍射级次波长引入的光程差应小于 $1/4$ 波长来计算 p 的最大范围。中心波长为 λ_p ,则谐衍射透镜微结构最高深度 h 为

$$h = \frac{p\lambda_p}{n(\lambda_p) - 1}, \quad (4)$$

式中: $n(\lambda_p)$ 为基底材料在波长 λ_p 处的折射率,对应在谐衍射波长 λ_m 处的波前光程差 w 为

$$w = \frac{p\lambda_p [n(\lambda_m) - 1]}{n(\lambda_p) - 1} - m\lambda_m = \frac{m\lambda_m [n(\lambda_m) - n(\lambda_p)]}{n(\lambda_p) - 1}, \quad (5)$$

根据瑞利判据,若成像像质较好,则波前光程差应当满足:

$$w \leq \lambda_m/4. \quad (6)$$

光谱范围为 400~900 nm, λ_p 为 632.8 nm 时, λ_m 为 400 nm, 当基底材料为石英材料时, $n(\lambda_m)$ 为 1.47011, $n(\lambda_p)$ 为 1.45702, 代入上式计算, 谐衍射级次 p 最大为 5, 若衍射级次再大, 谐衍射透镜存在折射特性会使系统像质下降, 因此应保证在波长为 632.8 nm 处的谐衍射级次 ≤ 5 。

3) 衍射级次与加工要求的关系, 在 80 mm 实验系统设计时谐衍射级次选择为 3 级, 谐衍射级次越高, 为保证衍射效率, 谐衍射透镜的台阶数也随之增加。谐衍射级次为 3 级时, 衍射效率大于 80%, 台阶数只需大于 12 台阶。若谐衍射级次选择为 5 级, 衍射效率大于 80%, 台阶数需要大于 20 台阶, 台阶数越多加工难度越大。考虑到现有加工水平, 口径为 80 mm 的实验系统在波长为 632.8 nm 处的衍射级次为 3 级。

5 结 论

采用谐衍射透镜为主镜, 基于 Schupamnn 消色差结构, 次镜为与主镜衍射级次相同的谐衍射透镜设计, 与传统衍射透镜设计相比, 实现宽波段成像的同时, 减小中继镜口径, 为轻量化空间成像奠定了基础。设计了口径为 80 mm 谐衍射成像系统, 光谱范围为 400~900 nm, 成像结果达到预期, 验证了成像性能, 为更大口径衍射轻量化光学系统设计提供了一种思路。

参 考 文 献

- [1] 汪利华, 吴时彬, 杨伟, 等. 拼接菲涅耳透镜子镜失调误差分析[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0712002.
Wang L H, Wu S B, Yang W, et al. Analysis of stitched Fresnel lens segmented mirrors miss-adjustment error[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0712002.
- [2] 刘盾, 杨伟, 吴时彬, 等. 主镜台阶数目对衍射成像系统传递函数的影响分析[J]. 光电工程, 2017, 44(8): 786-790, 843.
Liu D, Yang W, Wu S B, et al. Effect of the number of primary lens level on the MTF of diffractive imaging system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(8): 786-790, 843.
- [3] 刘韬. 天基衍射成像系统及相关技术发展研究[J]. 国际太空, 2014(8): 46-52.
Liu T. Research on development of space-based diffraction imaging system and related technologies[J]. Space International, 2014(8): 46-52.
- [4] Hyde R A. Eyeglass. 1. Very large aperture diffractive telescopes[J]. Applied Optics, 1999, 38(19): 4198-4212.
- [5] Koechlin L, Serre D, Deba P. The Fresnel interferometric imager[J]. Astrophysics and Space Science, 2009, 320(1/2/3): 225-230.
- [6] Andersen G, Tullson D. Broadband antihole photon sieve telescope[J]. Applied Optics, 2007, 46(18): 3706-3708.
- [7] Atcheson P, Domber J, Whiteaker K, et al. MOIRE: ground demonstration of a large aperture diffractive transmissive telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9143: 91431W.
- [8] Atcheson P D, Stewart C, Domber J, et al. MOIRE: initial demonstration of a transmissive diffractive membrane optic for large lightweight optical telescopes[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8442: 844221.
- [9] Tandy W, Atcheson P, Domber J, et al. MOIRE gossamer space telescope-structural challenges and solutions[C]//53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, April 23-26, 2012, Honolulu, Hawaii. Virginia: AIAA Press, 2012: 1670.
- [10] Tandy W D, Atcheson P, Domber J L, et al. MOIRE space telescope-challenges and solutions in large scale testing[C]//54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, April 8-11, 2013, Boston, Massachusetts. Virginia: AIAA Press, 2013: 1458.
- [11] 周岩, 吴时彬, 汪利华, 等. 大口径折反式中波红外衍射望远镜系统设计[J]. 应用光学, 2021, 42(5): 767-774.
Zhou Y, Wu S B, Wang L H, et al. Design of catadioptric middle infrared diffractive telescope system with large aperture[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(5): 767-774. [知网中文][知网英文]
- [12] 毛文峰, 张新, 曲贺盟, 等. 红外双色宽波段高衍射效率衍射光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1022002.
Mao W F, Zhang X, Qu H M, et al. Broad dual-band kinoform infrared double-layer diffractive optical system design[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1022002.
- [13] 巩畅畅, 刘鑫, 范斌, 等. 基于 RGB 三波段的消色差衍射透镜设计与分析[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1105001.
Gong C C, Liu X, Fan B, et al. Design and analysis of diffractive achromats based on RGB three-band[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1105001.