

衍射望远镜光学系统设计

张楠^{1,2}, 卢振武¹, 李凤有¹

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,
吉林 长春 130033; 2.中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 当前对空间望远镜光学系统的要求是: 在宽光谱范围内, 系统具有分辨率高、质量轻等特点, 衍射望远镜可以满足上述要求。利用 Schupmann 提出的消色差理论可实现系统宽光谱覆盖, 采用平面衍射透镜做物镜可使系统轻量化, 降低了成本。设计了一个物镜口径为 1 000 mm, $f/\# = 100$, 用离轴三反射镜做目镜的衍射望远镜。设计结果表明: 系统在 0.65~0.75 μm 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。

关键词: 应用光学; 衍射望远镜; 消色差; 离轴三反射镜

中图分类号: O43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2007)01-0106-03

Optical design of diffractive telescope

ZHANG Nan^{1,2}, LU Zhen-wu¹, LI Feng-you¹

(1.State Key Laboratory for Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2.Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The current requirements on space telescope are wide spectral coverage, high resolution, light weight, and the diffractive telescope can satisfy these requirements. With the help of flat diffractive lens, lighter weight, lower cost system is obtained based on Schupmann's achromatic theory, and such a system that has wide spectral coverage is designed. A design example of diffractive telescope is presented and the aperture of objective lens is 1 000 mm, $f/\# = 100$, off-axis three mirrors are used as eyepiece. It is shown that the system is achromatic and approximately attains diffraction limit at 0.65~0.75 μm , over the view field of $0.02^\circ \times 0.035^\circ$.

Key words: Applied optics; Diffractive telescope; Achromatic; Off-axis three mirrors

0 引言

目前, 在空间对地遥感领域中, 无论是军用还是民用都在努力发展高分辨率的空间望远镜, 并要求它在多光谱范围内, 具有质量轻、分辨率高等特点。传统的空间望远镜设计大都选择多反射镜结构^[1-2], 通过采用高次非球面来校正像差, 为减小质量, 将主镜做成薄膜结构^[3], 但使得系统加工装调困难, 同时元件面形难于控制。而用平面薄膜衍射透镜做物镜的衍射望远镜可以克服传统望远镜的缺点, 达到结构简单且具有

超轻的质量和宽松的面形精度要求, 因为, (1) 位相型衍射元件在可见光波段内可以做成一系列表面深度为 1 μm 左右的浮雕结构, 加上十几个微米厚的平面基底, 整个衍射透镜可以做得很薄, 从而大大降低元件的质量; (2) 入射光经反射镜表面光程差的改变量是镜面面形误差的两倍, 对于高分辨率的反射式望远镜, 一般要求光程差要小于 $\lambda/10$, 元件的面形精度优于 $\lambda/20$, 这在可见光波段是很难实现的。但衍射光学元件是透射型元件, 入射光通过一个等厚的透射表面, 在一个面上的路径延迟被另一个表面抵消, 表面

收稿日期: 2006-02-16; 修订日期: 2006-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60577004)

作者简介: 张楠 (1981-), 女, 山东蓬莱人, 硕士生, 主要从事衍射光学及光学系统设计方面的研究。Email: hunterliangnan@163.com

导师简介: 卢振武 (1955-), 男, 吉林大安人, 研究员, 博士生导师, 主要从事衍射光学元件制作及其应用研究。Email: luzw@ciomp.ac.cn

的面形误差几乎对出射光程不产生影响,使得元件面形具有很宽松的公差要求。美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室已经开始研究衍射空间望远镜并得到了较好的结果^[4-5]。但目前在国内尚未见到有关报道。

设计了一个口径为 1 000 mm,焦距长 8 m 的衍射望远镜。物镜采用平面衍射透镜,质量轻,面形精度低,易控制;目镜采用带有衍射面的离轴三反射镜,使系统结构简单(三个反射面均为普通的二次非球面),体积小,具有很好的色差校正能力。所设计系统具有较好的成像质量,满足当前对空间望远镜的应用要求,解决了传统望远镜质量轻与高分辨率之间的矛盾。

1 设计原理

设计衍射望远镜的主要障碍是衍射元件有很大的色散,只能对极窄频谱范围内的光线精确聚焦,要想实现衍射透镜的宽带应用就要对其进行色差校正。传统的折射透镜通常采用不同色散的玻璃组合做成胶合结构,可以在某一频谱范围内实现色差校正。但衍射透镜却不能简单地用同样的方法校正色差,因为所有衍射元件具有相同的色散特性,即衍射元件的阿贝数只与波长有关:

$$V_0 = \frac{0}{\lambda_1 - \lambda_2} \tag{1}$$

式中: λ_0 是设计波长; λ_1 、 λ_2 分别是所用波段的最短和最长波长。文中采用衍射元件不单独校色差,而是将物镜衍射透镜与目镜衍射透镜结合实现色差的校正。其理论依据是由 Schupmann 提出的^[5],即:任何一个有色差的光学元件,其色差的校正可通过将与第一个元件具有相同色散、相反光焦度的元件放在第一个元件的共轭像位置来实现。这个原理的优点是可以实现全波段消色差,而不是局限在某一个较窄的频谱范围内。基于 Schupmann 理论的衍射望远镜系统的结构如图 1 所示。多色光经过衍射物镜发生色散,到达目镜时,各颜色光线在空间与频谱上分开。接继系统 T 理

论上是一个理想系统,它将来自物镜的不同颜色的空间分开的光线会聚于一点,再由目镜衍射透镜将各颜色光线在频谱上重新合为一束光。

理论上,系统 T 可以采用任何形式的消色差结构,这里选用反射镜系统来实现,因为反射系统可以有效减小目镜体积,其单色像差与衍射元件平衡进行校正。为满足消色差的要求,物镜与目镜衍射组分的光焦度的关系为:

$$f_N = -\frac{1}{2} f_1 \tag{2}$$

式中: f_1 为物镜衍射透镜的光焦度; f_N 为目镜衍射面的光焦度; β 是系统的垂轴放大率,与 $f/\#$ 的关系为:

$$f_N/\# = f_1/\# \tag{3}$$

式中: $f_1/\#$ 是物镜衍射透镜的 f 数; $f_N/\#$ 是目镜衍射面的 f 数。为了尽可能减小目镜尺寸,将系统 T 放在物镜的中间波长对应的焦点位置处。要减小目镜系统长度及目镜衍射透镜的尺寸,要求 β 尽量小,由公式(4),由目镜衍射透镜的 $f_N/\#$ 决定,而 $f_N/\#$ 由其特征尺寸决定:

$$S_m \geq 2 \lambda_0 f_N/\# \tag{4}$$

式中: S_m 是衍射透镜的最小特征尺寸。由上述关系,在保证目镜最短及单色像差的要求下,可确定衍射面及共轴三反射镜的初始结构,在此基础上用 ZEMAX 软件进行优化,可得到满意的成像质量。

2 设计实例

基于 Schupmann 的消色差理论,设计了一个衍射望远镜,系统 $f/\#=8$,工作波段 0.65 ~0.75 μm ,视场 0.02 °×0.035 °。其结构参数如下:物镜(孔径光阑)口径 1 000 mm, $f_1/100$,距目镜 100 m,反面衍射面 $f_N/2$ (反面衍射面做在三镜上),目镜口径 84 mm,长度 253 mm。目镜系统参数如表 1 所示,离轴三反射镜采用视场离轴。

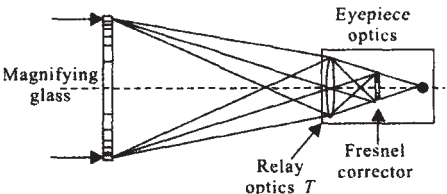


图 1 Schupmann 理论模型
Fig.1 Schupmann theory model

表 1 系统结构参数
Tab.1 System structure parameters

	Magnifying glass	Primary	Secondary	Tertiary
Radius/mm		- 577.0	- 85.5	- 57.6
Conic	0	- 1.01	- 1.91	- 0.33

目镜三反射镜的结构见图 2, 系统传递函数曲线见图 3,

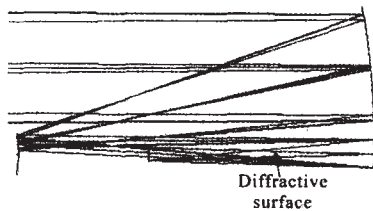


图 2 目镜结构图

Fig.2 Layout of eyepiece

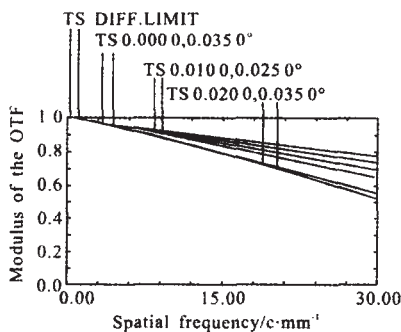


图 3 传递函数曲线

Fig.3 MTF curve

垂轴色差曲线如图 4 所示。

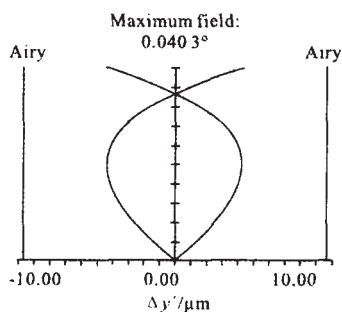


图 4 垂轴色差曲线

Fig.4 Lateral color curve

从上面的设计结果可以看出, 由于目镜离轴三反射镜采用视场离轴, 三个反射镜实际是共轴的, 彼此没有偏心和倾斜, 主镜与三镜在同一平面上, 且三反射镜均为简单的二次非球面, 因此整个目镜系统加工

装调都很容易, 且目镜系统体积小。系统传递函数曲线接近衍射极限, 在空间频率 30 lp/mm 处, MTF 值能达到 0.5 以上。色差校正很好, 弥散范围小于 8 μm。

3 结 论

用平面衍射透镜做物镜的衍射望远镜具有质量轻、面形精度要求低的特点。采用离轴三反射镜做目镜, 系统体积小、质量轻、加工装调容易。由于目镜系统口径有限, 使得整个系统的可用带宽仍然受到限制, 未能达到理论上的全光谱消色差, 可以将物镜做成衍射透镜, 关于这个问题将在后续文章中进行讨论。由于衍射望远镜物镜距目镜较远, 为保证目镜口径小、质量轻, 系统的视场角一般很小, 这个问题有待解决。文中所设计的衍射望远系统在所用的频谱内成像质量很好, 解决了传统空间望远镜的缺点, 为今后研制口径更大、分辨率更高的空间望远镜系统提供了很好的技术准备。

参考文献:

- [1] XUE Ming-qiu. Research on long focal optical system [J]. High Speed Photography and Photonics(薛鸣球.长焦距光学系统研究.高速摄影与光子学), 1989,18(4):289-293.
- [2] PAN Jun-hua. A study of the optical system with three mirrors of second order surface [J]. Acta Optica Sinica(潘君骅.具有三个二次曲面反射镜的光学系统研究.光学学报), 1988,8(8):717-721.
- [3] COULTER D R, JACOBSON D N. Technology for the next generation space telescope [C]// Proceedings of SPIE, UV, Optical, and IR Space Telescopes and Instruments, 2000, 4013: 784-794.
- [4] HYDE R A, DIXIT S N, WEISBERG A H, et al. Eyeglass: a very large aperture diffractive space telescope [C]// Proceedings of SPIE, Highly Innovative Space Telescope Concepts, 1999, 4849: 28-39.
- [5] HYDER A. Eyeglass.1. very large aperture diffractive telescopes [J]. Appl Opt, 1999, 38(19):4198-4212.