

二元光学反/衍混合Schmidt望远系统光学设计

周崇喜 林大键 杜春雷

(中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 成都 610209)

郭 晴

(中国科学院上海技术物理研究所青年光电工程研究中心, 上海 200083)

摘 要 针对空间光学系统轻型的特点, 采用衍射光学元件取代 Schmidt 校正板来校正系统像差, 设计了一个二元光学反/衍混合 Schmidt 望远系统。光学系统的通光孔径为 $\Phi = 200$ mm, 相对孔径 $F/\# = 1.9$, 波长 $\lambda = 4.3 \mu\text{m}$, 视场 $2\omega = 10^\circ$ 。光学设计采用 OSLO six 软件。光学设计结果: 空间频率 $\nu \leq 60$ cycles/mm 时, 调制传递函数 $MTF \geq 0.4$ 。

关键词 二元光学, 反/衍混合光学, Schmidt 望远系统, 光学设计。

1 引 言

在航空遥感、气象观测、预警等卫星上的光学系统, 要求有尽可能轻的重量和一定的空间分辨率。较大的数值孔径和较短的波长, 有利用分辨率的提高。但大数值孔径将增加光学设计、加工、检测的困难; 另一方面, 所选波长还受到大气窗口、目标、背景的影响, 因此红外波段目前一般均设计成反射式光学系统。

二元光学(BO)是随着电子计算机、大规模集成电路(VLSI)制作技术的发展而发展起来的九十年代的重要的光学分支^[1], 它建立在光衍射原理的基础上。应用二元光学(BOE)可以制成重量轻、结构简单、大孔径的系统, 因而它正被广泛地应用于各种光学系统中。

应用二元光学衍射元件置于双反射离轴望远系统的出瞳处来校正系统的像差, 使系统有很好的成像质量和较小尺寸的二元衍射元件^[2], 但其衍射面浮雕的线宽也将大大减小, 且非同轴性增加了装调的难度。考虑到目前的微细加工技术和 Schmidt 式望远系统可以做成大视场、大孔径系统, 且具有轴上、轴外像差基本一致的特性, 作者设计了一个二元光学反/衍混合 Schmidt 望远系统。用衍射光学元件代替 Schmidt 校正板来校正系统的像差, 其反射面为球面。以解决了 Schmidt 校正板加工的困难, 同时降低了系统的重量。

2 设计方法

当物体位于无穷远, 光阑在单个反射面球心时, 此球面反射镜的像差系数为^[3]:

$$S_I = 2h^4/R^3, \quad S_{II} = S_{III} = S_V = 0, \quad S_{IV} = 2j^2/R. \quad (1)$$

若像面取球面, 其曲率半径 r 为该反射面曲率半径 R 一半时, 该光学系统只需校正球差。把

校正板放在球心, $h_p = 0$, 则校正板只需校正反射镜的球差, 系统所有像差都得到校正。这就是 Schmid 望远系统设计的一般方法。本文用衍射光学元件代替 Schmid 校正板, 来校正系统的球差, 从而校正的其他像差。

2.1 光学系统参数选择

当望远系统的焦距 $f = 380 \text{ mm}$, 分辨率 $R_{es} = 11.4 \mu\text{m}$, 其对于球形线阵中每一小单元的视场角, 总单元数为 6000, 那么像高 $2h_{\text{ima}} = 70 \text{ mm}$, 视场 $2\omega = 10^\circ$ 。非相干照明无像差情况下系统的调制传递函数表示为

$$MTF(\nu) = \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{\nu}{\nu_0} - \frac{\nu}{\nu_0} \left[1 - \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (2)$$

ν_0 为空间截止频率, ν 为实际空间频率, 且 $\nu = R_{es}/2$, R_{es} 为线分辨率, 当要求 $MTF(\nu \leq 11.4 \mu\text{m})$ 大于 0.4 时, 由 (1) 可解得数值孔径

$$NA = \lambda / (2R_{es}) \quad (3)$$

当 $\lambda = 4.3 \mu\text{m}$, $R_{es} = 11.4 \mu\text{m}$, 由上式得 $NA = 0.2$ 。

2.2 衍射型 Schmid 校正板设计

对称型衍射面的位相函数可表示为^[4]

$$\phi(r) = d_{or} \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{i=1}^m df_i r^{2i} \quad (4)$$

d_{or} 为衍射级数, m 为所取多项式的项数, df_i 为多项式的各项系数。取 $m = 9$, 即取到第 16 次。经过优化, 得到衍射面的各项系数。

3 设计结果

应用 OSLO six 光学设计软件, 设计了一个 Schmid 望远系统, 如图 1 所示, 衍射透镜位于系统的入瞳处, 作为 Schmid 校正板。系统的结构参数见表 1, 整个系统的通光孔径为 $\phi = 200 \text{ mm}$, 相对孔径 $F/\# = 1.9$, 波长 $\lambda = 4.3 \mu\text{m}$, 视场 $2\omega = 10^\circ$, 分辨率 $R_{es} = 30 \mu\text{rad}$, 调制传递函数 $MTF \geq 0.4$ (空间频率 $\nu \leq 60 \text{ cycles/mm}$)。图 2 为系统的调制传递函数曲线, 图 3 为系统的几何像差曲线。表 2 为衍射面的多项式系数, 从表中可以看出, 10 次幂以后的系数所起的作用已经很小了, 几乎不参与优化。

Table 1. The structure parameters of the system

sur no.	radius	thickness	half aperture	glass	special
0	0.0	1.0×10^{20}	87.49×10^{17}	air	
1	0.0	5.0	100.00	ZnSe	
2	0.0	763.877	100.359	air	diffractive
3	- 763.839	- 294.56560	167.19027	REFL	
4	- 386.73954	- 82.5656	35.09083		

Table 2. The coefficient of diffractive face

df_1	- 1.6171×10^{-5}	df_5	- 1.3357×10^{-35}
df_2	5.2992×10^{-10}	df_6	- 1.3357×10^{-35}
df_3	1.5072×10^{-10}	df_7	- 1.3357×10^{-35}
df_4	6.118×10^{-35}	df_8	- 1.3357×10^{-35}

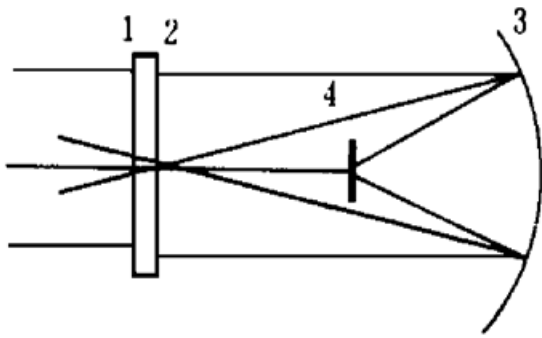


Fig. 1 A Schmidt telescopic system with a diffractive Schmidt corrector. 1: planar surface, 2: diffractive surface, 3: primary mirror, 4: image surface

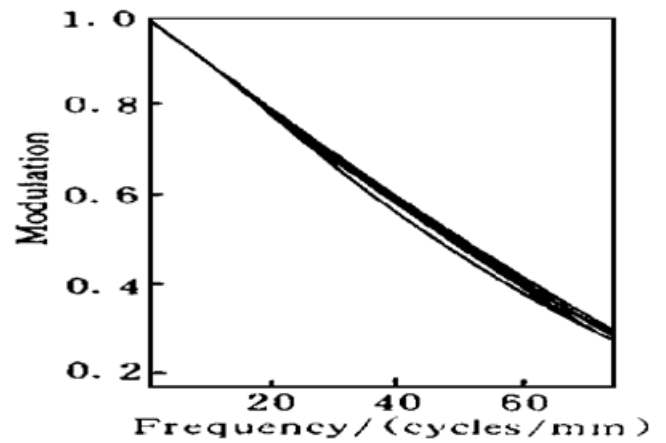


Fig. 2 Modulation transfer functions of the system (diffractive type)

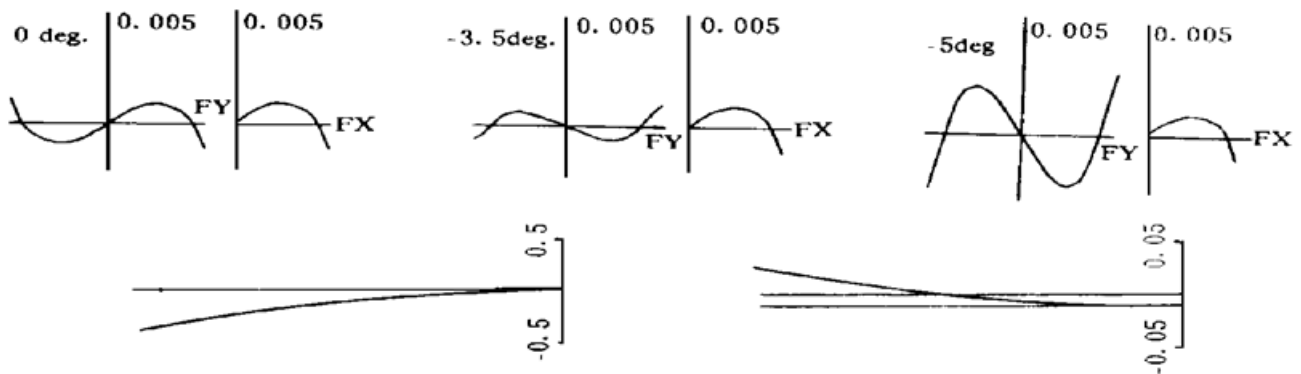


Fig. 3 Ray intercept curves (mm)

4 衍射型 Schmidt 校正板的二元量化

首先必须计算出各环的半径。计算各环的半径可由(4)式得出

$$\text{relief}(r) - nh_{\max} = 0, \quad (n = 0, 1, 2, \dots, n_{\max}) \quad (5)$$

其中

$$\text{relief}(r) = \sum_{i=1}^m df_i r^{2i} \quad (6)$$

$$n_{\max} = \text{int} [\text{relief}(r_{\max})/h_{\max}] \quad (7)$$

$h_{\max} = \lambda/(n_{\text{dif}} - 1.0)$ 为最大浮雕深度, n_{dif} 为衍射透镜的折射率。

通过(5)式得出各环半径 r_n 。采用等位相量化, 第二次直写时的数据比第一次增加一倍, 第三次依次类推。图 4 为校正板衍射面位相等线图。

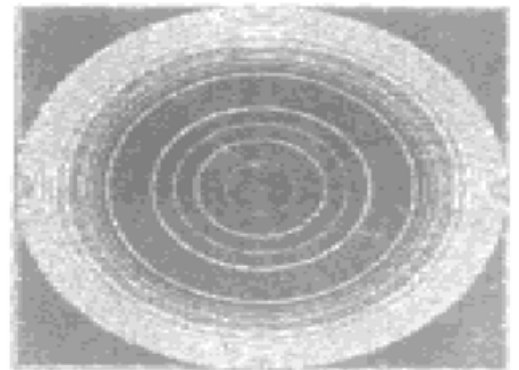


Fig. 4 Profile of the phase of the corrector diffractive surface

参 考 文 献

- [1] Cary Blough, G. Michael Morris, Hybrid lenses offer high performance at low cost. *Laser Focus World*, 1995, 31(11): 67~74

- [2] Daniel M. Brown, Off-axis spherical element telescope with binary optic corrector. *Proc. SPIE*, 1991, **1555** : 114~ 127
- [3] 王之江, 光学设计理论基础, 北京, 科学出版社, 1985
- [4] Yongtian Wang, Sijiong Zhang, John Macdonald, Ray tracing and wave aberration calculation for diffractive optical elements. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(7) : 2021~ 2025

Optical Design of Hybrid Reflective/Diffractive Binary Optics Schmidt Telescope

Zhou Chongxi Lin Dajian Du Chunlei

(State Key Lab of Opt. Tech. on Microfabrication, Institute of Optics and Electronics,
The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)

Guo Qing

(Optoelectronic Engineering Research Center, Shanghai Institute of Technonical Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083)

(Received 10 March 1996; revised 16 April 1997)

Abstract A binary optics reflective/diffractive Schmidt telescope was designed using diffractive optical element (BOE) to replace the Schmidt corrector to correct aberrations. Using OSLO six program, we designed a Schmidt telescope with the following parametres: aperture= 200 mm, $F/\# = 1.9$, wavelength $\lambda = 4.3 \mu\text{m}$, field of view $2\omega = 10$ degrees, and $MTF \geq 0.4$ (for spatial frequency $\nu \leq 60$ cycles/mm).

Key words binary optics, hybrid reflective/diffractive optics, Schmidt telescope, optical design.