

长焦距大视场折反射系统的光学设计*

史光辉 丁甲民

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130023)

提 要

本文介绍了两种折反射系统的最新设计结果。焦距 $f'=1.25\text{ m}$, 相对孔径 $D/f'=1/3.5$, 视场 $2\omega=9^\circ$ 。在全视场内, 弥散斑的 80% 能量集中在半径小于 $5\mu\text{m}$ 的圆内。

关键词: 折反射系统; 光学设计。

一、引 言

典型的施密特型式大视场折反射系统用作长焦距系统体积太大, 且像面是弯曲的。为此法国斯勃特卫星上用的高分辨率可见光 CCD 线扫描相机的光学系统采用了准施密特型式^[1]。在入瞳处放一无光焦度透镜组, 为减小体积, 该透镜组应尽量远离球面反射镜的球心向反射镜靠近。在像方放一正透镜组。系统的焦距 $f'=1.082\text{ m}$, 相对孔径 $D/f'=1/3.5$, 视场 $2\omega=4.6^\circ$ 。由于相机视场为 8.3° , 因此是用两个这样的光学系统来实现的。设计质量达到了弥散斑能量的 80% 集中在直径为 $13\mu\text{m}$ 的圆内。本文给出了两种准施密特型式设计结果, 焦距 $f'=1.25\text{ m}$, 相对孔径 $D/f'=1/3.5$, 视场 $2\omega=9^\circ$ 。这样, 如果仅用于可见光 CCD 线扫描摄影, 用一个光学系统就可以了。

二、设计过程

如果将孔径光阑放在球面反射镜的球心, 则只产生球差和场曲两种像差。为校正这两种像差, 须在球心放一无光焦度非球面校正板或一无光焦度透镜组以校正球差。在象面处放一场镜以校正场曲。但当孔径光阑远离球面反射镜的球心时, 则除球差, 场曲外还将产生彗差, 像散和畸变, 高级像差也随之增加。这就要求两个校正透镜组的作用不仅是校正球差和场曲, 而是要校正全部五种像差, 同时还要考虑校正高级像差。可通过如下步骤来达到校正。场曲用球面反射镜和场镜(在像方的正透镜组)之间的光焦度分配来校正。其余四种像差, 球差、彗差、像散和畸变都和透镜弯曲有关。它们的系数分别为 S_I, S_{II}, S_{III} 和 S_V 。而分离的两组元正好有四个变数 $P_1^{\infty}, W_1^{\infty}$ 和 $P_2^{\infty}, W_2^{\infty}$ 。正好满足校正这四种像差的要求, 列出方程^[2]。

收稿日期: 1990年11月14日; 收到修改稿日期: 1990年12月28日

* 本文在 1990 年全国光学设计和 CAD 软件系统学术讨论会宣讲。

$$\left. \begin{aligned} S_I &= \sum_{i=1}^2 h_i^4 \varphi_i^3 P_i, \\ S_{II} &= \sum_{i=1}^2 (h_i^3 h_{P_i} \varphi_i^3 P_i + j h_i^2 \varphi_i^2 W_i), \\ S_{III} &= \sum_{i=1}^2 (h_i^2 h_{P_i}^2 \varphi_i^3 P_i + 2j h_i h_{P_i} \varphi_i^2 W_i + j^2 \varphi_i), \\ S_V &= \sum_{i=1}^2 \left(h_i h_{P_i}^3 \varphi_i^3 P_i + 3j h_{P_i}^2 \varphi_i^2 + j^2 \frac{h_{P_i}}{h_i} (3 + \mu) \varphi_i \right). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

物在近距离的 P 和 W 与物在无限远的 P^∞ 和 W^∞ 的关系为:

$$\left. \begin{aligned} P &= P^\infty - u_1(4W^\infty - 1) + u_1^2(3 + 2\mu), \\ W &= W^\infty + u_1(2 + \mu), \\ u_1 &= \frac{1}{\theta\varphi}, \quad \mu = \sum_{i=1}^2 \frac{\varphi_i}{n_i}, \quad \left(\sum_{i=1}^2 \varphi_i = 1 \right). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

对于无光焦度透镜组, 正、负透镜的光焦度相等。且注意到在像差方程中, P 的系数和光焦度 φ 有关的项是 φ^3 , 在 W 的系数中为 φ^2 , 并且有关系 $\bar{P} = \overleftarrow{P}$, $\bar{W} = -\overleftarrow{W}$, 箭头方向表示计算时取的光线走向。取正、负透镜的折射率 n 值相等。令正、负透镜的弯曲分别为 Q_1 和 Q_2 , 利用单透镜的 P^∞ 和 W^∞ 公式可得出:

$$P^\infty = \bar{P}^\infty - \bar{P}_2 = \bar{P}_1^\infty - \bar{P}_2^\infty = \frac{2+n}{n} (\bar{Q}_1^2 - \bar{Q}_2^2) + \frac{3}{n-1} (\bar{Q}_1 - \bar{Q}_2), \quad (3)$$

$$W^\infty = \bar{W}_1^\infty + \bar{W}_2 = \bar{W}_1^\infty - \bar{W}_2^\infty = \frac{n+1}{n} (\bar{Q}_1 - \bar{Q}_2). \quad (4)$$

于是求出:

$$\left. \begin{aligned} \bar{Q}_1 - \bar{Q}_2 &= \frac{n}{n+1} W^\infty, \\ \bar{Q}_1 + \bar{Q}_2 &= \frac{n+1}{n+2} \left(\frac{P^\infty}{W^\infty} - \frac{3n}{n^2-1} \right). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由 \bar{Q}_1 和 \bar{Q}_2 可求出无光焦度透镜组的四个半径。这样在像差联立方程中, 如果取 P 和 W 系数中的 φ 为无光焦度组中单透镜的, 则得出的 P 和 W 就是无光焦度组的。取 φ 为正值则正透镜在前, 取负值则负透镜在前。将此编成一个程序, 由要求的 S_I , S_{II} , S_{III} 和 S_V (由球面反射镜和分光棱镜产生、取信号) 求出两组的 P^∞ 和 W^∞ 。无光焦度组的半径由该程序直接输出。有光焦度组的结构型式和半径用另一个程序求出^[3]。

求出初始解后, 用 CAOD 软件*中的像差分析程序进行像差分布计算。该程序给出了纵向色差、横向色差、正弦差, 像散, 场曲和轴外弧矢、子午宽光束的弥散斑的, 逐面的初级量和高级量的分布, 以帮助设计者分析产生高级像差的原因和寻求解决的途径。由解像差方程到进行像差分布计算这一过程, 一般要反复多次, 直至求出高级像差小到满足要求为止。

为校正高级像差可利用的因素有: 无光焦度组单透镜光焦度的选择及选择正透镜在前还是负透镜在前; 球面反射镜和场镜之间距离的选择; 场镜的结构型式和光焦度分配的选择以及两透镜组的玻璃的选择等。一般来说, 像差之间都是相关的。但因无光焦度组处在光瞳位置, 因此对高级轴向色差、高级球差、高级彗差和轴外球差有较大影响。而场镜因靠近像面, 因此对高级倍率色差, 高级场曲和高级像散影响较大。

* 由中国科学院长春光学精密机械研究所与光电研究所合作开发。

如果所有的可变因素都进行了最佳选择,还是满足不了校正高级像差的要求,就需要增加一组元,利用这增加一组元的可变因素(光焦度分配、玻璃选择和透镜弯曲等)就可求出满足高级像差要求的解。

接下来是透镜加厚和像差平衡。加厚带来的像差变化和透镜组的相对孔径及弯曲状态有关。高级像差变化要比初级像差变化小得多。对于这样一个经过初始解优化选择出来的系统,在进行像差平衡时,用手工的方法比用像差自动平衡程序更有效。

为减轻地面目标对比度的降低和防止杂光以及考虑 CCD 器件的传递函数随波长的增加而显著下降的特性,将光波波长选在 $0.51\mu\text{m}$ 至 $0.73\mu\text{m}$ 是合适的。统筹考虑了太阳光谱,大气衰减影响,CCD 光谱灵敏度和选用的黄色滤光片的光谱透过特性等,选择设计用的三种波长为 $0.57\mu\text{m}$, $0.645\mu\text{m}$ 和 $0.69\mu\text{m}$ ^[4]。在计算混合光传递函数时,将这三种光的权重取相等可得出较准确的结果。在设计时应力求这三种波长光的像质达到同样的好。

三、设计结果

对应 CCD 像元大小为 $10\mu\text{m}$ 的耐奎斯特频率为 50lp/mm 。图 1(a), 1(b), 1(c)和表 1 以及图 2(a), 2(b), 2(c) 和表 2 分别为两种结构型式的系统图, 点列图和调制传递数值。在计算调制传递函数和点列图时没有考虑中心遮栏的影响。中心遮栏孔为一长条形,对调制传递函数影响不是很大。边缘视场完全没有栏光。

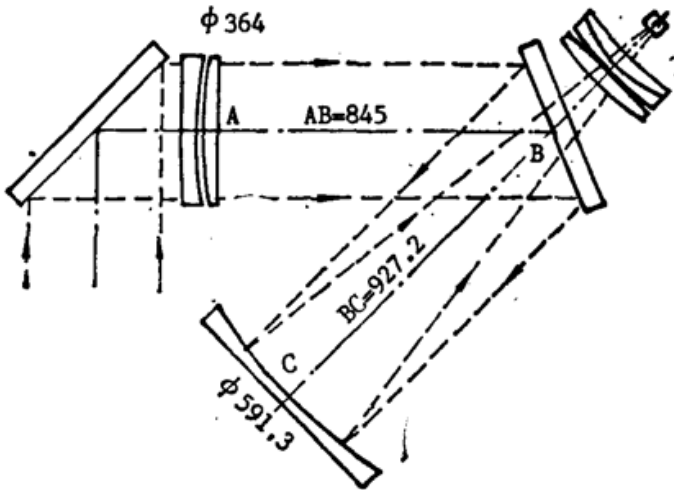


Fig. 1(a) Optical system of SPOT type

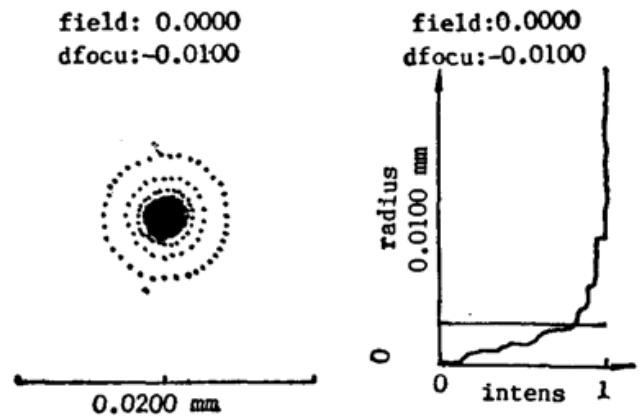


Fig. 1(b) Spot diagram of zero field of view

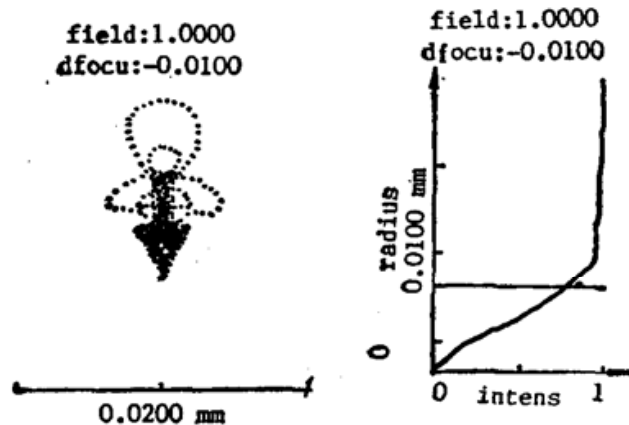


Fig. 1(c) Spot diagram of full field of view

Table 1 Values of MTF at 50 cycles/mm

W. L.(μm)	field			
	0	0.4	0.7	1
0.570	0.82	0.83	0.83	0.81
0.645	0.84	0.84	0.83	0.83
0.690	0.82	0.83	0.81	0.81
average	0.83	0.83	0.82	0.82

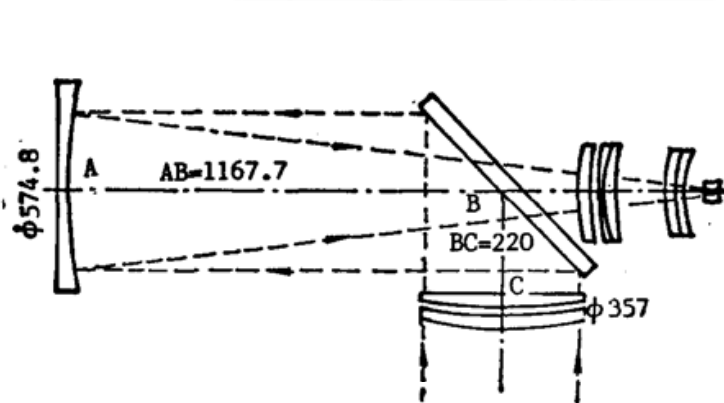


Fig. 2(a) Optical system of another type

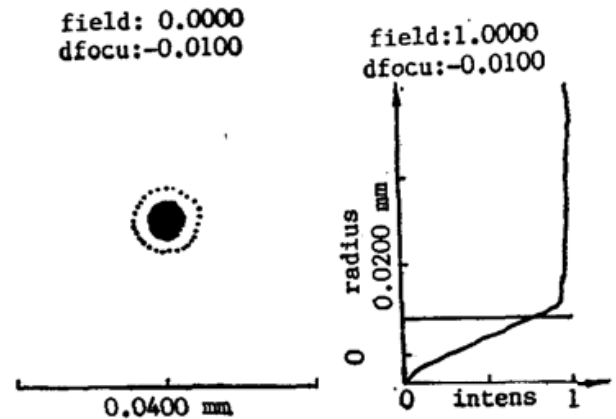


Fig. 2(b) Spot diagram of zero field of view

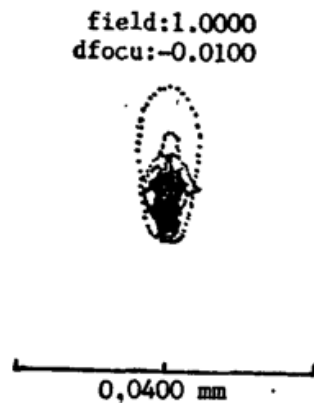


Fig. 2(c) Spot diagram of full field of view

Table 2 Values of MTF at 50 cycles/mm

W. L.(μm)	field			
	0	0.4	0.7	1
0.570	0.82	0.82	0.83	0.80
0.645	0.85	0.84	0.84	0.84
0.690	0.84	0.83	0.81	0.79
average	0.84	0.83	0.83	0.81

经计算、中心波长 $0.645 \mu\text{m}$ 的理想调制传递函数值为 0.86。由表 1 和表 2 可见, 两种设计结果的调制传递函数值均接近理想。点列图的右侧图中的横线表示集中弥散斑能量 80% 的半径。两种设计结果在全视场内该半径的最大值分别为 $2.8 \mu\text{m}$ 和 $4.2 \mu\text{m}$, 都小于应达到的 $5 \mu\text{m}$ 。

参 考 文 献

- [1] Otrio G; *NASA TM* 75830, 1980. 22.
[2] 王之江;《光学设计理论基础》, (科学出版社, 北京, 1965) 239。
[3] 史光辉;《仪器仪表学报》, 1988, 9, No. 4 (Nov), 362~367。
[4] Bruce M; *Proceedings of SPIE*, 1983, 424 (Aug), 39~49.

Optical design of catadioptric lenses with long focal length and wide field of view

SHI GUANGHUI AND DING JIAMIN

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Changchun 130022)

(Received 14 November 1990; revised 28 December 1990)

Abstract

This paper reported two novel optical designs of catadioptric lenses with focal length $f' = 1.25\text{m}$ relative aperture $D/f' = 1/3.5$ and covers field $2\omega = 9^\circ$. Eighty per cent of energy of the blur spot is concentrated in a circle with radius less than $5\mu\text{m}$ over full field of view.

Key words: catadioptric, optical design.