

文章编号: 1672-8785(2017)08-0014-05

大视场离轴三反光学系统设计

罗 秦^{1,2,3} 张冬冬¹ 钮新华¹

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083 ;
2. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083 ;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 针对地球环境遥感的大视场和宽光谱的应用需求, 在同轴三反光学系统的基础上, 通过视场离轴实现了无中心遮拦, 并设计了一种焦距为 120 mm、F 数为 3.5、工作波长为 0.4 ~ 1.65 μm 、像元尺寸为 7.5 μm 以及采用 Cook 三片式结构的光学系统。在没有使用自由曲面的情况下, 实现了 $30^\circ \times 4^\circ$ 的大视场。其中, 主镜为六次双曲面, 次镜为二次扁椭圆面, 三镜为四次扁椭圆面。在全视场范围内, 该系统在奈奎斯特频率处的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 大于 0.6, 接近衍射极限。其弥散斑直径的均方根值小于探测器的像元尺寸, 畸变小于 2.5%, 说明本文系统具有优良的成像性能。

关键词: 光学设计; 大视场; 离轴三反光学系统

中图分类号: TH703 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.08.003

Optical Design of Off-axis Three-mirror System with Wide Field

LUO Qin^{1,2,3}, ZHANG Dong-dong¹, NIU Xin-hua¹

- (1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To meet the application needs of wide field and wide spectrum of earth environment remote sensing, a center without obstructing is realized by means of field off-axis on the basis of coaxial three-mirror optical systems. An optical system with a Cook three-mirror structure is designed. The optical system has its focal length of 120 mm, F number of 3.5, operating wavelength of 0.4 to 1.65 μm and pixel size of 7.5 μm . it realizes the $30^\circ \times 4^\circ$ large field of view without any free-form surfaces. In the optical system, the primary mirror is a 6 times hyperboloid; the second mirror is a secondary flat ellipse and the third mirror is a 4 times flat ellipse. The system has its Modulation Transfer Function (MTF) greater than 0.6 at the Nyquist frequency in the whole field of view, which is close to the diffraction limit. Its RMS dispersion spot diameter is less than the pixel size of the detector and its distortion is less than 2.5%. These results show that the system has excellent imaging performance.

Key words: optical design; wide field; off-axis three-mirror system

收稿日期: 2017-03-19

作者简介: 罗秦(1992-), 男, 江西抚州人, 硕士研究生, 主要从事光学系统设计方面的研究。

E-mail: luoqin888@foxmail.com

0 引言

进入 21 世纪以来, 人口快速增长、生态环境持续恶化以及资源逐渐枯竭等问题日益凸显, 人们越来越多地求助于卫星遥感技术来监测环境变化。而环境的不断变化则要求环境遥感监测能够具有越来越高的时间分辨率。时间分辨率取决于卫星的重访周期。刈幅宽度越大, 重访周期越短。这就要求遥感相机的视场越来越大。在国内已发射的遥感卫星中, 宽视场遥感相机大多采用折射式系统。环境遥感需要获取目标的光谱信息。工作波段越宽、光谱分辨率越高, 就越有利于环境信息获取。但折射式系统由于存在二级光谱, 工作波段越宽, 色差校正越难, 所以大视场和宽光谱很难同时实现。一般可以通过 CCD 相机和红外相机的拼接来实现宽光谱覆盖, 但这对于有限的星上空间资源来说又是不利的。2013 年发射的 Proba-V 植被观测卫星基于离轴三反结构实现了 33° 的线视场^[1], 其入瞳口径为 15.5 mm, 相对孔径为 1/6。这说明通过对具有小口径和大 F 数系统的离轴三反结构进行合理优化可以得到大的线视场。但对于具有大口径和小 F 数系统的结构来说, 由于边缘视场像差难以校正, 很难实现很大的视场。

在污染监测、土壤识别、城市和工业用水监测、水库水面监测等中小型环境特征应用方面, 遥感相机的空间分辨率需要达到 50 m 左右, 其光谱范围主要在可见光到短波红外之间。若卫星的轨道高度为 800 km, 由瑞利准则可知, 相机口径需要在 30 mm 以上。由于目前国内大线阵红外探测器技术相对比较落后, 为了实现成像所需的信噪比, 需要实现大的相对孔径。因此, 本文根据三级像差理论计算了大视场离轴三反初始结构。基于视场离轴以及光学设计软件优化, 设计出了一种焦距为 120 mm、相对孔径为 1/3.5、工作波段为 $0.4 \sim 1.65 \mu\text{m}$ 、视场可达 $30^\circ \times 4^\circ$ 、像元尺寸为 $7.5 \mu\text{m}$ 的光学系统。该系统结构紧凑, 成像质量接近衍射极限。

1 离轴三反初始结构的计算

本文设计的光学系统采用离轴三反结构, 其初始结构一般都是基于三级像差理论计算得到的。离轴三反系统是在共轴三反系统的基础上, 通过视场离轴或光阑离轴得来的。因此, 这里实际要讨论的是共轴三反系统初始结构的计算。共轴三反系统具有 7 个自由变量。与两反系统相比, 该系统大大增加了消除各种像差的可能性。图 1 所示为同轴三反系统的初始结构。其中, M_1 、 M_2 和 M_3 分别代表三反系统中的主镜、次镜和三镜, 其结构参量共有 8 个, 包括 3 个反射面的半径 (R_1 、 R_2 和 R_3)、主镜到次镜的距离 d_1 、次镜到三镜的距离 d_2 以及 3 个非球面的二次非球面系数 ($-e_1^2$ 、 $-e_2^2$ 和 $-e_3^2$)。引入以下四个轮廓参数^[2]: 次镜对主镜的遮拦系数为

$$\alpha_1 = \frac{l_2}{f'_1} \approx \frac{h_2}{h_1} \quad (1)$$

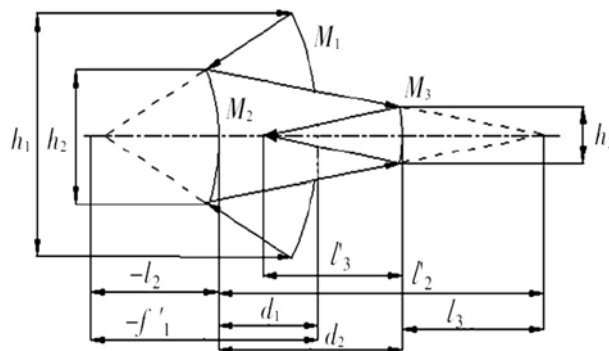


图 1 同轴三反系统的初始结构

三镜对次镜的遮拦系数为

$$\alpha_2 = \frac{l_3}{l'_2} \approx \frac{h_3}{h_2} \quad (2)$$

次镜的放大率为

$$\beta_1 = \frac{l'_2}{l_2} = \frac{u_2}{u'_2} \quad (3)$$

三镜的放大率为

$$\beta_2 = \frac{l'_3}{l_3} = \frac{u_3}{u'_3} \quad (4)$$

通过将上述轮廓参数代入三级像差理论中的 Seidel 像差公式^[3], 可以得到初级像差系数 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 的表达式。具体的推导过程可参考《光学非球面的设计、加工与检验》一书。

为了消除球差、彗差和像散, 令 $S_1=S_2=S_3=0$, 此时可以得到由 4 个轮廓参数表示的 3 个非球面的二次非球面系数 $-e_1^2$ 、 $-e_2^2$ 和 $-e_3^2$ 。为了实现平像场, 令 $S_4=0$, 此时可得到 4 个轮廓参数之间的关系, 所以其中只有 3 个可变轮廓参量。

根据高斯光学理论, 可以推导出轮廓参数与剩余的 5 个结构参数 R_1 、 R_2 、 R_3 、 d_1 、 d_2 之间的关系^[4]:

$$R_1 = \frac{2}{\beta_1\beta_2}f \quad (5)$$

$$R_2 = \frac{2\alpha_1}{(1+\beta_1)\beta_2}f \quad (6)$$

$$R_3 = \frac{2\alpha_1\alpha_2}{1+\beta_2}f \quad (7)$$

$$d_1 = \frac{1-\alpha_1}{\beta_1\beta_2}f \quad (8)$$

$$d_2 = \frac{\alpha_1(1-\alpha_2)}{\beta_2}f \quad (9)$$

基于以上公式, 给定 3 个轮廓参数就可以求出系统的结构参数。在实际计算中, 需要判断其结构的合理性。根据焦距的正负可将其分为有中间成像和无中间成像两种。宽视场离轴三反系统通常采用无中间成像的结构, 一般光焦度分配按照“正-负-正”和反摄远结构的“负-正-正”的原则。传统的“正-负-正”结构可实现长条形大视场, 但无法得到大的圆视场; 而反摄远结构则可实现较大的圆视场, 比如庞志海设计的新型大视场无遮拦三反系统^[5], 其视场可以做到 $20^\circ \times 20^\circ$, 更大的视场需要采用自由曲面^[6]。但这种结构带来的缺点是主镜尺寸很大, 整体比“正-负-正”结构更松散, 而本文需要设计一种具有长条形大视场的系统, 所以采用“正-负-正”光焦度分配。

为了简化计算, 令 d_1 和 d_2 相等, 则只剩下两个自由变量。焦距 f 为 -120 mm, 取 $\alpha_1=0.3$, $\alpha_2=2.1$, 根据以上公式即可得到一组初始结构参数(见表 1)。

2 设计结果

将上节算得的系统初始结构输入到光学设计软件中。加上约束条件, 借助该软件进行结构优化设计。图 2 所示为最终设计的光学系统的光路结构。

表 1 离轴三反光学系统的初始结构参数

反射镜	R (mm)	d (mm)	$-e^2$
主镜	-477.2	167	-1.366
次镜	-97.3	-167	1.48
三镜	-122.2	75	0.17

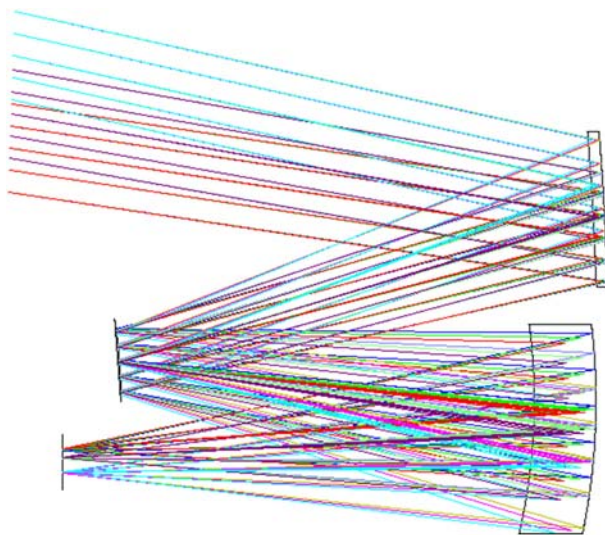


图 2 光学系统的结构图

本文系统的光阑位于次镜。三面反射镜的光轴同轴。通过视场离轴的方式实现了无遮拦。X 轴方向上的视场为 $\pm 15^\circ$, Y 轴方向上的视场为 $6.5^\circ \sim 10.5^\circ$ 。通过系统整体 Y 轴偏心和系统整体绕 X 轴倾斜 2° , 使得主镜与三镜之间保持足够的距离, 像面与次镜之间也保持足够的距离, 互不产生干涉, 为反射镜支撑结构设计留下空间距离。通过增加非球面反射镜的高次项来提高系统的消像差能力。主镜是六阶双曲面, 次镜是凸的二次扁椭圆面, 三镜是四阶扁椭圆面。三面反射镜分别经过离轴后取母镜上的有效口径。表 2 列出了本文系统的具体结构参数。

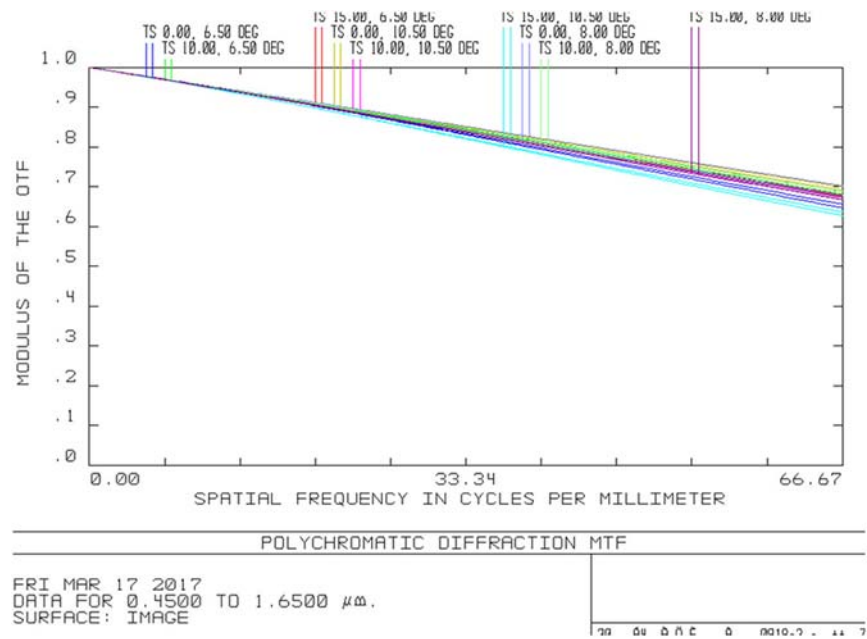


图 3 MTF 曲线

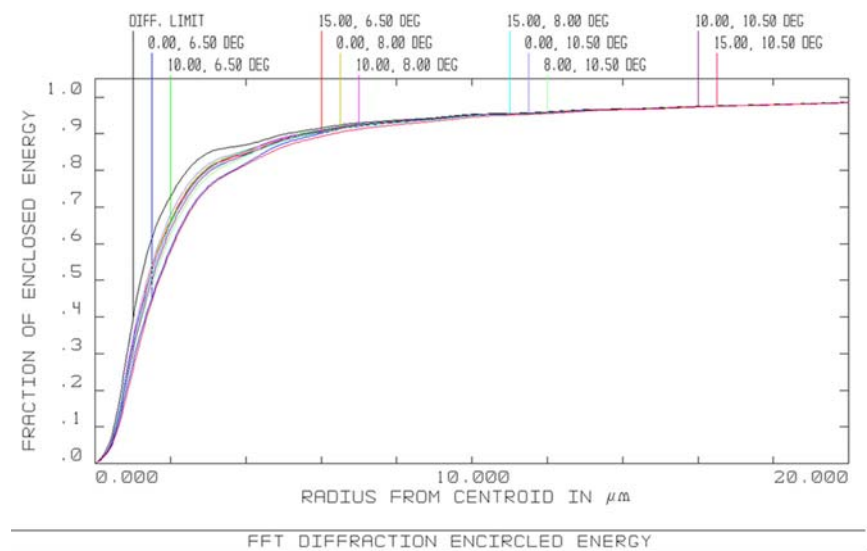


图 4 能量集中度

表 2 光学系统的结构参数

反射镜	主镜	次镜	三镜
曲率半径 (mm)	-1212.6	-205.88	-237
间距 (mm)	-176.9	171.9	-192.9
圆锥系数	-1.799	3.855	0.1989
4 阶	-1.5E-10	—	1.9E-10
6 阶	-6.0E-15	—	—
母镜大小 (mm)	242	53	192
有效口径 (mm)	170×52	30	184×72
离轴量 (mm)	-69	-15	11

图 3 为系统优化后的 MTF 曲线图。可以看出，全视场的 MTF 在奈奎斯特频率处都大于 0.6，接近衍射极限。图 4 所示为系统的能量集中度曲线。在像元尺寸内，能量集中度达到 90%。

图 5 所示为本文系统的弥散斑。其最大 RMS 半径为 2.4 μm ，小于探测器像元的一半尺寸。

图 6 所示为系统的场曲和畸变。边缘视场处的场曲在 0.1 mm 以内，像散约为 0.06 mm，畸变小于 2.5%，成像质量优良。

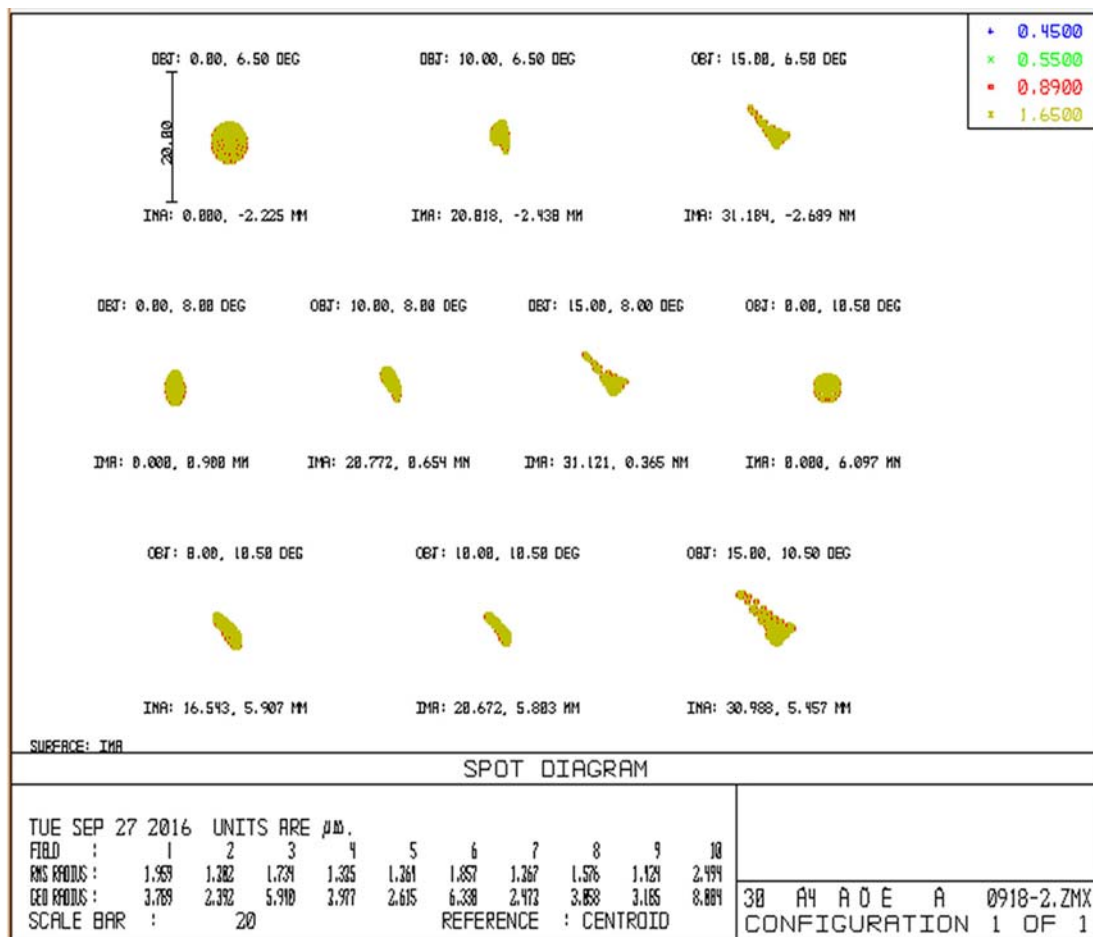


图 5 本文系统的弥散斑

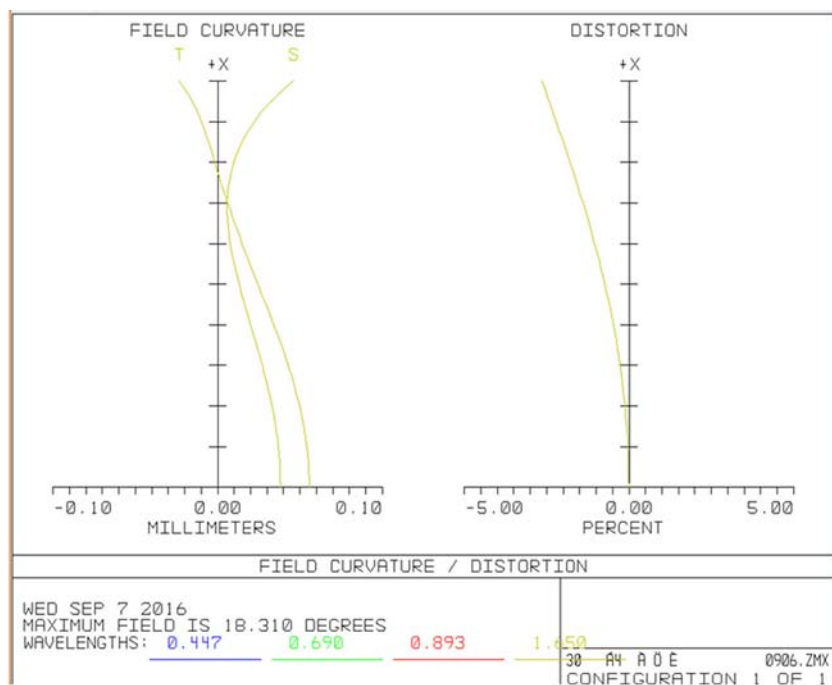


图 6 本文系统的场曲和畸变

(下转第 47 页)