

# 长焦距面视场同轴三反望远物镜设计

韩琳<sup>1,2</sup> 赵知诚<sup>1,2</sup> 毛保奇<sup>1,2</sup> 孙雯<sup>1,2</sup> 沈为民<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>苏州大学物理与光电·能源学部, 江苏 苏州 215006

<sup>2</sup>江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

**摘要** 随着 Skysat-1 卫星的成功发射, 高分辨率视频相机是目前竞相开发的卫星有效载荷。为降低成本、适应小卫星平台, 亟需设计与研制体积小、重量轻、易实现、能对面视场成像的长焦距光学系统。研究与设计了适于面视场成像的全视场同轴三反望远物镜, 解决其固有的二次遮拦和像面引出困难等问题。由近轴几何光学理论, 导出消除二次遮拦的条件和系统总长与三镜中继成像倍率的关系, 讨论并得到合理的三镜中继成像倍率等参数。利用出瞳附近处的平面镜, 无遮拦地引出像平面, 同时用平面镜组折叠光路, 减小系统总长。给出了确定初始结构参数的方法与结果, 优化设计得到了有效焦距、视场角、 $F$  数分别为 10 m、 $1.1^\circ \times 1^\circ$ 、14.3 的无二次遮拦光学系统, 其总长约为有效焦距的 1/8, 成像质量接近衍射极限。

**关键词** 光学设计; 星载视频相机; 同轴三反望远物镜; 二次遮拦

**中图分类号** 0435 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0722006

## Design of Coaxial Three-Mirror Anastigmat with Long Focal Length and Two-Dimensional Field of View

Han Lin<sup>1,2</sup> Zhao Zhicheng<sup>1,2</sup> Mao Baoqi<sup>1,2</sup> Sun Wen<sup>1,2</sup> Shen Weimin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Modern Optical Technology of Jiangsu Province, Suzhou, Jiangsu 215006, China

**Abstract** There is a race to develop spaceborne high-resolution video cameras since Skysat-1 is launched successfully. To reduce manufacture cost and adapt to small satellite platform, it is urgent to design and develop a long focal length optical system with small volume, light weight, easy implementation and imageable for two-dimensional field of view. The full field of view coaxial three-mirror anastigmat (CTMA) appropriate for two-dimensional field of view imaging is studied. The problems of its inherent secondary obscuration and imaging plane extraction difficulty are solved. The conditions of eliminating the secondary obscuration and the relationship between the total length of the system and the tertiary mirror relay imaging magnification are presented based on paraxial geometry optics. Then the reasonable tertiary mirror relay imaging magnification and other parameters are discussed and obtained. A flat mirror near its exit pupil can be used to deflect the image plane without obscuration. The flat mirror group is used to fold optical path and the total length of the system is decreased. The method and the result for determining the initial structural parameters are presented. The optimized optical system without secondary obscuration is designed, whose effective focal length (EFL), field of view and  $F$  number are 10 m,  $1.1^\circ \times 1^\circ$ , 14.3, respectively. The total length of the system is 1/8 of EFL. Its imaging quality is near diffraction limit.

**Key words** optical design; spaceborne video camera; coaxial three-mirror anastigmat; secondary obscuration

**OCIS codes** 220.4830; 010.0280; 080.4035

## 1 引 言

高分辨率星载视频相机能够实时监测动态目标, 特别适用于灾害应急、目标实时监测等领域。随着

**收稿日期:** 2016-02-22; **收到修改稿日期:** 2016-03-22

**基金项目:** 江苏高校优势学科建设工程

**作者简介:** 韩琳(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学设计与仪器光学等方面的研究。E-mail: Alinda\_h@163.com

**导师简介:** 沈为民(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学设计和仪器光学以及遥感航天技术等方面的研究。

E-mail: swm@suda.edu.cn(通信联系人)

Skybox 卫星的成功发射<sup>[1]</sup>, 高分辨率星载视频相机正成为当前各国竞相开发的热点。为了在提高地面像元分辨率的同时, 降低成本和适用于小卫星平台, 亟需设计体积小、重量轻、能够对面视场成像的长焦距光学系统。

长焦距光学系统一般采用全反射镜结构<sup>[2]</sup>, 为了增大视场和缩短筒长, 通常采用同轴三反系统。适用于面视场成像的同轴三反系统, 主要有环形视场和全视场同轴三反系统。1977 年, Korsch D<sup>[3]</sup> 提出了主次镜所成中间实像在主镜中心孔附近、三镜中继成像倍率近于 1 的 2 种环形视场同轴三反系统, 其所称的结构 I 主镜、次镜和三镜在同一轴线上, 用位于三镜之后系统出瞳处的折转平面镜引出像面, 结构 II 主镜和次镜同轴, 中心开孔的折转平面镜位于主次镜所成实像之后, 即主镜中心孔与三镜之间, 三镜光轴垂直于主次镜, 形成十字光路, 系统出瞳通过折转平面镜的中心孔。这 2 种结构的不足之处在于, 由于系统出瞳面远离主次镜的中间实像面, 难以消除折转平面镜引起的二次遮拦, 使其不适用于全视场成像。事实上, Korsch D<sup>[4]</sup> 于 1972 年报道了适于全视场成像、三镜中继成像倍率大于 1 的十字光路同轴三反系统, 结构形式类似于上述结构 II, 主次镜所成中间实像位于主次镜之间, 折转平面镜置于此中间实像附近, 巧妙地让折转平面镜恰好位于系统圆环形出射光瞳的内环内, 消除了折转平面镜引起的二次遮拦, 不足之处是只适用于全视场较小的情况, 随着视场的增大, 折转平面镜会遮拦边缘视场光束。2006 年, 欧洲太空局宽视场成像仪研究组<sup>[5]</sup>通过改进上述 Korsch D 提出的结构 I 并结合结构 II 的特点, 设计了适用于宽全视场成像的同轴三反系统, 其三镜中继成像倍率大于 1, 主次镜所成中间实像位于主次镜之间并接近于系统出瞳面, 中心开孔环形折转平面镜置于三镜之后的系统出瞳附近, 中间实像无遮拦地通过中心孔, 三镜像方光束无遮拦地通过该平面镜的环形孔径。2007 年, Lampton M 等<sup>[6]</sup>较全面地比较了上述环形视场和全视场同轴三反系统, 更详细的理论研究和设计方法鲜见报导。同轴三反系统的难点在于如何消除二次遮拦。郝云彩<sup>[7]</sup>推导了十字光路同轴三反系统无二次遮拦的条件, 但适用于全视场成像的同轴三反系统消除二次遮拦的条件有待进一步探讨。

本文旨在通过研究分析主镜、次镜和三镜在同一轴线的同轴三反系统, 设计适用于全视场成像的长焦距望远物镜。理论上, 导出消除二次遮拦的条件和系统总长与三镜中继成像倍率的关系, 通过优选三镜中继成像倍率等参数, 优化设计得到结构紧凑、成像质量接近衍射极限的全视场长焦距三反望远物镜。

## 2 指标要求

根据应用需求, 卫星平台运行轨道高度 350 km, 地面像元取样距离 0.42 m, 瞬时视场约为  $1.2 \mu\text{rad}$ 。相机工作于可见光 420~780 nm 波段, 所选电荷耦合器件 (CCD) 焦平面探测器像元尺寸为  $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ , 可计算得到要求望远物镜的有效焦距为 10 m<sup>[8]</sup>。随着探测器拼接技术的逐渐成熟, 利用靶面大的探测器可在单位时间内采集足够多的信息, 为了能对地面  $8 \text{ km} \times 7.3 \text{ km}$  范围内的景物凝视成像, 要求全视场角为  $1.1^\circ \times 1^\circ$ 。

综合考虑调制传递函数 (MTF) 和信噪比 (SNR) 要求后, 选择入瞳直径 700 mm, 即光学系统的  $F$  数约为 14.3, 期望在探测器奈奎斯特空间频率 41.6 lp/mm 处的 MTF 值高于 0.4。另外, 要求相对畸变低于 0.2 %。

## 3 理论分析

主镜、次镜和三镜在同一轴线上的全视场同轴三反系统光路图, 如图 1 所示, 由主镜 M1、次镜 M2、三镜 M3、折转平面反射镜 M4 和 M5、焦平面 FP 组成, 孔径光阑位于主镜 M1 处。来自地面景物的太阳反射光线, 经过凹面主镜 M1 和凸面次镜 M2 反射后, 在到达三镜 M3 之前形成地面景物的中间实像, 次镜像方光束穿过主镜 M1 和平面镜 M4 中心孔, 经凹面三镜 M3 中继成像和折转平面镜 M4、M5 反射后, 将景物最终成像在焦平面 FP 处。图 1 中 P 表示主镜处入瞳经过次镜和三镜成像后的实出瞳。

主镜和次镜同轴, 次镜将不可避免地遮拦主镜入射光束, 称为一次遮拦, 系统光瞳变成圆环形。除一次遮拦外, 由于三镜与主镜、次镜同轴, 往往容易形成二次遮拦, 次镜像方光束在通过平面镜 M4 中心孔时和三镜像方光束在通过平面镜 M4 的环形通光孔径时, 平面镜 M4 均有可能遮拦光束。为了消除这些可能的二次遮拦, 直观地, 根据光学系统中场与瞳处通光孔径最小的原理, 期望折转平面镜 M4 位于主次镜中间实像附近,

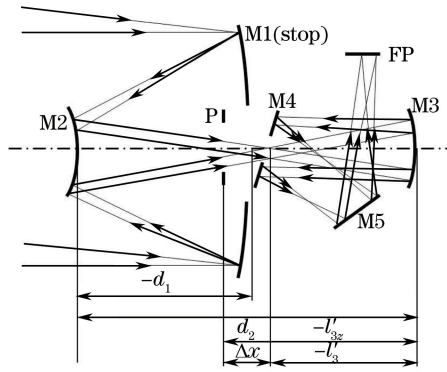


图 1 同轴三反系统光路图

Fig. 1 Layout of coaxial three-mirror system

且系统出瞳位置尽可能与中间实像和平面镜 M4 接近,使得平面镜 M4 的中心孔尽可能小的同时,既能够让次镜像方光束无遮拦地通过中心孔,又能够让三镜像方光束无遮拦地通过平面镜 M4 的环形反射孔径。

为便于分析,系统有效焦距归一化为 1,并采用如图 1 中所示的镜间距符号。由近轴物像关系和近轴光线过渡关系<sup>[9]</sup>,不难导出,主次镜形成的中间实像到三镜的距离、三镜到系统出瞳的距离分别为

$$l'_3 = -\frac{R_2(R_1 + 2d_1)}{2(R_1 + 2R_2 + 2d_1)}, \quad (1)$$

$$l'_{3z} = -\frac{R_3(R_2d_1 + R_2d_2 + 2d_1d_2)}{2(R_1d_1 + R_2d_2 + R_3d_1 + 2d_1d_2 + R_2R_3)}, \quad (2)$$

式中  $R_1, R_2, R_3$  分别为主镜、次镜、三镜的顶点曲率半径。

由(1)、(2)式,可得系统出瞳到中间实像的距离为

$$\Delta_x = -\frac{\alpha_1 d_1 [-(\alpha_1 - 1)^2 + d_1(\beta_2^2 d_1 + \beta_2 d_1 + 1)]}{[(1 - \alpha_1)^2 + \beta_2 d_1][-(1 - \alpha_1)^2 + d_1(1 - \beta_2 + \beta_2 d_1)]} + \frac{\alpha_1 d_1 (1 - \beta_2^2)}{\beta_2 [\beta_2 d_1 + (1 - \alpha_1)^2]}, \quad (3)$$

式中  $\alpha_1$  和  $\beta_2$  分别是次镜的遮拦系数和三镜的中继成像倍率。

为使系统出瞳位于中间实像附近,以利于消除折转平面反射镜引起的二次遮拦,(3)式右方的值应尽可能地接近 0。

由近轴光线追迹轴外视场边缘光线,可得次镜半口径尺寸,近似等于主镜的中心孔半径

$$\rho = \frac{\alpha_1}{2F} - d_1 \tan \omega, \quad (4)$$

式中  $F, \omega$  分别是系统的  $F$  数、半视场角。

系统出瞳为次、三镜对位于主镜上的入瞳所成的像,二次运用近轴成像公式,不难推得系统出瞳内环半径

$$\delta_1 = \left(\frac{\alpha_1}{2F} - d_1 \tan \omega\right) \times \frac{R_2 R_3}{2(R_1 d_1 + R_1 d_2 + R_3 d_1 + R_2 R_3)}. \quad (5)$$

主镜和次镜所成景物中间实像高度,由主次镜组合焦距和视场角决定,而主次镜组合焦距等于系统有效焦距与三镜中继成像倍率的比值,可得中间实像高度为

$$\delta_2 = \frac{1}{\beta_2} \times \tan \omega. \quad (6)$$

由(5)式和(6)式,可得系统出瞳内环与中间实像尺寸之差为

$$\Delta_y = \left(\frac{\alpha_1}{2F} - d_1 \tan \omega\right) \times \frac{\alpha_1 d_1 \beta_2}{(1 - \alpha_1)^2 - d_1(1 - \beta_2 + d_1 \beta_2)} - \frac{1}{\beta_2} \times \tan \omega. \quad (7)$$

为使次镜像方光束穿过折转平面镜中心孔时无遮拦,(7)式右方的值至少应大于 0。光学系统总长由次镜到三镜的距离  $d_2$  决定,可用次镜遮拦系数、三镜中继放大倍率及主次镜间距表示为

$$d_2 = \frac{\alpha_1}{\beta_2} \left[1 - \frac{d_1(1 + \beta_2)}{\beta_2 d_1 + (1 - \alpha_1)^2}\right]. \quad (8)$$

一般来说,视场角  $\omega$  和  $F$  数由相机性能要求决定,由(3)式、(7)式和(8)式可知,设定系统出瞳到中间实像的距离、系统出瞳内环与中间实像尺寸之差及系统总长时,可由此三式求解得到主次镜间距  $d_1$ 、次镜遮拦系数  $\alpha_1$  和三镜中继成像倍率  $\beta_2$ 。然而,由这 3 式联立得到的是 3 元高次方程组,得到解析解十分困难,直接的办法是在这些参数的经验取值范围内,通过分析系统出瞳到中间实像的距离、系统出瞳内环与中间实像尺寸之差及系统总长,由其变化规律寻求合理解。

根据设计经验,取次镜遮拦系数  $\alpha_1 = 0.25^{[10]}$ , 分别取主次镜间距  $d_1 = -0.05, -0.06, -0.07, -0.08, -0.09$ 。由(3)式得到系统出瞳到中间实像的距离,随三镜中继成像倍率的变化曲线如图 2 所示。当主次镜间距一定时,系统出瞳随着三镜中继成像倍率增大,先靠近、后重合、最后远离中间实像。当三镜中继成像倍率  $\beta_2 \approx 2.1$  时,系统出瞳到中间实像的距离几乎与主次镜间距无关,系统出瞳位于中间实像左侧。若认为系统出瞳到中间实像的距离绝对值小于 0.02 时,二者很接近,则由图 2 可知,三镜中继成像倍率的合理取值范围为  $1.1 < \beta_2 < 5.6$ 。

同样地,采用给定的视场角与  $F$  数指标时,可由(7)式得到,系统出瞳内环与中间实像尺寸之差随三镜中继成像倍率的变化曲线,如图 3 所示。表明当主次镜间距一定时,系统出瞳内环半径随三镜中继成像倍率增大逐渐接近直至大于中间实像高度。当系统出瞳内环半径大于中间实像高度,即  $\Delta_y > 0$  时,满足消除二次遮拦的条件,则三镜中继成像倍率的合理取值范围为  $3.2 < \beta_2 < 5.6$ , 且主次镜间距越小,要求三镜中继成像倍率越高。

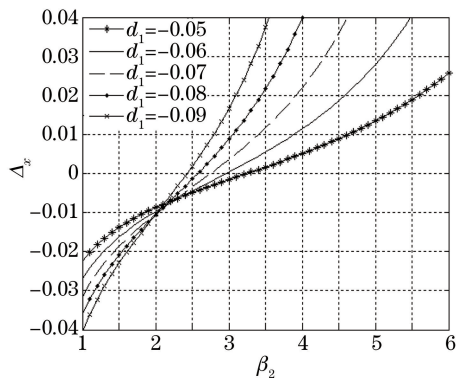


图 2 系统出瞳到中间实像的距离随三镜中继成像倍率的变化曲线

Fig. 2 Curves of distance from exit pupil to intermediate real image varies with tertiary mirror relay imaging magnification

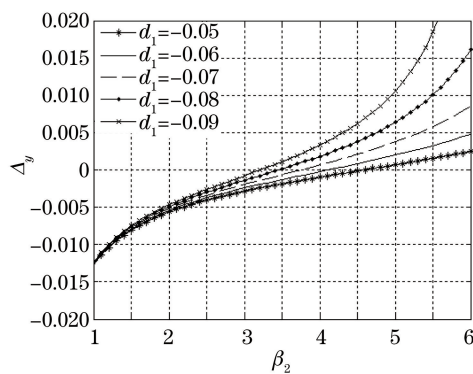


图 3 系统出瞳内环与中间实像尺寸之差随三镜中继成像倍率的变化曲线

Fig. 3 Curves of size difference between exit pupil inner and intermediate real image varies with tertiary mirror relay imaging magnification

表 1 初始结构参数

Table 1 Initial structure parameters

Surface	Radius /mm	Thickness /mm	Material	Conic coefficient
Stop	-1592.19	-597.07	Mirror	-0.97
2	-621.95	1176.22	Mirror	-4.19
3	-1020.99	-623.39	Mirror	-0.59
4	Infinity	2195.61	Mirror	-
5	Infinity	-	-	-

系统总长随三镜中继成像倍率的变化同样可由(8)式得到,如图 4 所示。可见当主次镜间距一定时,系统总长随三镜中继成像倍率增大先变短后变长,存在极小值点;随着主次镜间距减小,系统总长极小值也减小,对应的三镜中继成像倍率增大。因此,为了使结构紧凑,可选择主次镜间距  $d_1 = -0.05$  等较小的值,但值得注意的是,此时对应于系统总长最小的三镜中继成像倍率会过大,会致使三镜的像距过长,需使用较多的折叠平面镜,才能紧凑化整个系统。因此,在实际设计过程中,需要合理选取主次镜间距。在所设计的系统中,取主次镜间距  $d_1 = -0.06$ , 系统总长极小值对应的三镜中继成像倍率  $\beta_2 = 4.5$ , 总长约等于主次镜间距

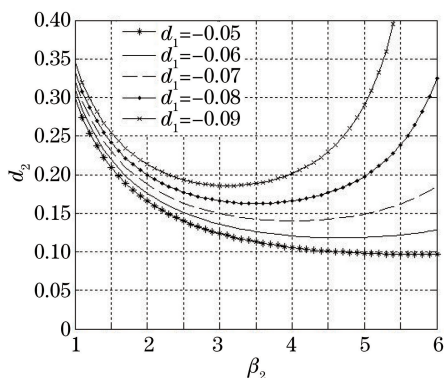


图 4 系统总长随三镜中继成像倍率变化的曲线

Fig. 4 Curves of total length of the system varies with tertiary mirror relay imaging magnification

的 2 倍。此时,由图 2 和图 3 可见,系统出瞳靠近中间实像,且其内环半径大于中间实像高度,满足消除二次遮拦的条件,因此取值较为合理。

次镜遮拦系数、三镜中继成像倍率、主次镜间距和系统总长确定后,为了计算完整的初始结构参数,首先,利用文献[11]中由总光焦度要求和平场条件得到的(5.1)~(5.3)式,确定次镜放大率、三镜遮拦系数及 3 块反射镜的顶点曲率半径;然后,利用文献[11]中初级像差公式(5.4)~(5.6),根据球差、彗差和像散校正要求,求解联立方程组可得到主镜、次镜及三镜的二次非球面系数,从而确定了三反系统的归一化初始结构参数;最后,根据系统有效焦距等指标要求,缩放该初始结构,并设置入瞳、视场和波长,则得到满足指标要求的初始结构,对其进一步优化,可得到满足成像质量要求的光学系统。

#### 4 设计结果

利用上节分析结果和求解方法,得到满足上述指标的初始光学系统如图 5 所示,主镜、次镜和三镜同轴,主次镜所成中间实像位于主次镜之间,利用中间实像附近倾斜放置的中心开孔环形折转平面镜,一方面解决了探测器难以安装的问题,另一方面使得折转平面镜的中心孔尽可能小。初始结构参数列于表 1,由表可知,三镜中继成像倍率为 4.5,系统出瞳与中间实像的距离为 186 mm,有利于消除二次遮拦。图 6 是初始光学系统像面上的点列图,可见随着视场的增大,像斑也迅速增大,这是由于高级像差增大的缘故。

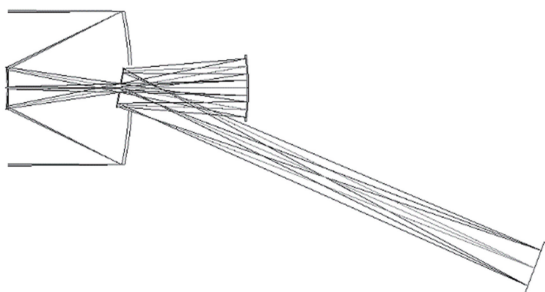


图 5 初始光学系统

Fig. 5 Initial optical system

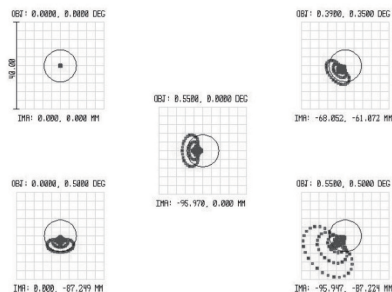


图 6 初始光学系统点列图

Fig. 6 Spot diagram of initial optical system

在初始光学系统的基础上,通过设置恰当的变量、建立合理的优化品质函数及约束关系,展开优化设计。优化设计得到的同轴三反系统光路如图 7 所示,焦距 10 m,  $F$  数 14.3,视场角  $1.1^\circ \times 1^\circ$ 。其主要结构参数如表 2 所示。与采用高次非球面的同轴三反系统相比,主镜、次镜和三镜均为二次非球面,较易设计检测光路,降低了研制难度。主镜采用接近于抛物面的椭球面,用于控制球差。次镜采用双曲面,用于控制球差和子午彗差的平衡。三镜采用椭球面,用于控制子午彗差和像散的平衡。主次镜形成的中间实像位于主镜中心孔附近,可在中间实像处放置视场光阑消除杂光<sup>[12-13]</sup>。系统无二次遮拦,集光能力强。由于光路过长,通过在三镜和像面之间添加平面镜组折叠光路,缩短系统总长。系统总长为 1380 mm,约等于焦距的 1/8。

表 2 主要结构参数

Table 2 Principal structure parameters

Surface	Radius /mm	Thickness /mm	Material	Conic coefficient
Stop	-1535.10	-549.89	Mirror	-0.97
2	-720.76	1377.92	Mirror	-4.62
3	-1356.05	797.92	Mirror	-0.57
4	Infinity	800.00	Mirror	-
5	Infinity	-850.00	Mirror	-
6	Infinity	598.00	Mirror	-
7	Infinity	-	Mirror	-

为反映整个光学系统的成像质量情况,分别用 MTF、点列图和畸变来评价各视场的成像质量。系统 MTF 曲线如图 8 所示,由图可知各个视场 MTF 值均接近衍射极限,边缘视场 MTF 值在奈奎斯特频率 41.6 lp/mm 处为 0.42,高于指标要求的 0.4。

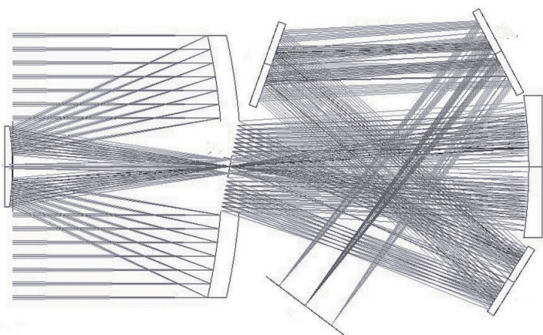


图 7 同轴三反系统光路

Fig. 7 Layout of coaxial three-mirror system

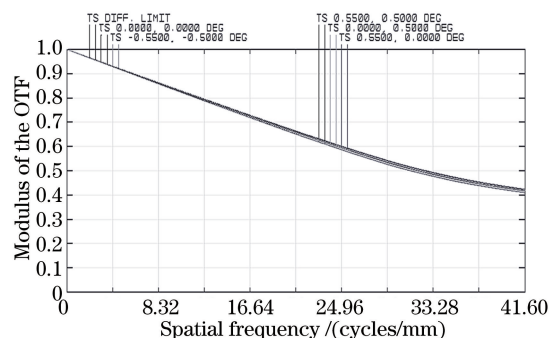


图 8 调制传递函数曲线

Fig. 8 MTF curves

图 9 为各视场在像面上的点列图。可见在整个波段和全视场范围内,点列图均位于艾里斑范围内,系统具有衍射受限的成像特性。图 6 和图 7 都说明了系统成像质量良好。

图 10 是像面上的畸变曲线,横坐标表示相对畸变,用百分比表示,纵坐标表示不同视场角。由图可以看出,边缘畸变最大,为 0.018%,远小于指标要求的 0.2%。

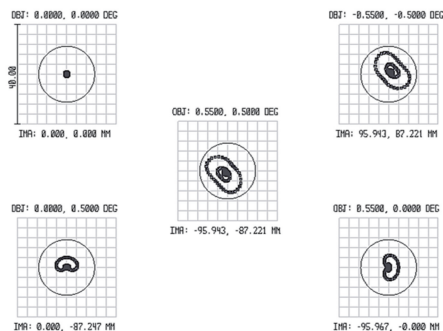


图 9 点列图

Fig. 9 Spot diagram

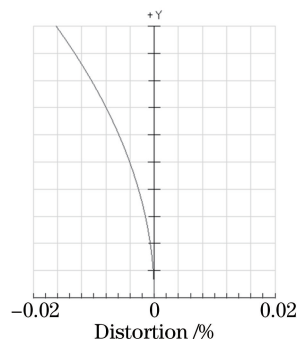


图 10 畸变曲线

Fig. 10 Distortion curves

综上所述,设计结果符合指标要求,结构紧凑,后截距长,成像质量接近衍射极限,畸变小。与现有应用的同轴三反系统相比,设计的同轴三反适用于更宽的面视场成像,具有无需体积庞大的外遮光罩、无二次遮拦、总长与焦距的比值小等优势,同时存在主镜的相对孔径较大、次镜的非球面度较大等缺点。

## 5 结 论

研究与设计主镜、次镜和三镜在同一轴线上的全视场同轴三反系统,适用于面视场成像。重点分析讨论

了消除二次遮拦条件及系统总长与三镜中继成像倍率的关系,确定合理的三镜中继成像倍率,结合初级像差理论,给出初始结构参数求解方法与结果。优化设计得到的同轴三反系统,无二次遮拦,结构紧凑,系统总长约为焦距的1/8。利用MTF曲线、点列图及畸变曲线对系统进行像质评价,结果表明具有良好的成像质量,满足指标要求。虽然所设计系统的光学非球面加工检测难度有所降低,但主镜相对孔径较大,导致需研磨去除的非球面量较大,次镜装调公差较严,这些问题有待实际研制过程中克服。随着非球面加工技术、干涉测量辅助装调技术的应用和发展,此同轴三反系统在小面阵凝视和视频遥感相机中有潜在应用价值。

### 参 考 文 献

- 1 Murthy K, Shearn M, Smiley B D, *et al.*. Sky Sat-1: very high-resolution imagery from a small satellite[C]. SPIE, 2014, 9241: 92411E.
- 2 Xue Mingqiu, Shen Weimin, Pan Junhua. Optical system for space remote sensing[C]. The Development of Modern Optics and Photonics-to Celebrate the 65 Anniversary of Academician Wang Daheng Engaged in Scientific Research Activities, 2003: 243-265.  
薛鸣球, 沈为民, 潘君骅. 航天遥感用光学系统[C]. 现代光学与光子学的进展-庆祝王大珩院士从事科研活动六十五周年专集, 2003: 243-265.
- 3 Korsch D. Anastigmatic three-mirror telescope[J]. Appl Opt, 1977, 16(8): 2074-2077.
- 4 Korsch D. Closed form solution for three-mirror telescope, corrected for spherical aberration, coma, astigmatism, and field curvature[J]. Appl Opt, 1972, 11(12): 2986-2987.
- 5 C D Fstudy report for WIFI-a wide field imager for supernovae surveys and dark energy characterization[R]. 2006: 76-97.
- 6 Lampton M, Sholl M. Comparison of on-axis three-mirror-anastigmat telescopes[C]. SPIE, 2007, 6687: 66870S.
- 7 Hao Yuncai. Study for optical design of space detailed reconnaissance camera[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Materia Medica, Chinese Academy of Sciences, 2000: 53-61.  
郝云彩. 空间详查相机光学系统研究[D]. 上海: 中国科学院上海药物研究所, 2000: 53-61.
- 8 Liu Jun, Huang Wei, Xu Weicai, *et al.*. Optical design of the off-axis three-mirror reflective telecentric system with wide field of view[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 122203.  
刘 军, 黄 玮, 许伟才, 等. 大视场像方远心离轴三反射镜光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 122203.
- 9 Zhang Yimo. Appliedoptics[M]. Beijing: China Machine Press, 1982: 35-36.  
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982: 35-36.
- 10 Liu Xinping, Yang Jianfeng. Three-mirrorsystem with a folded mirror[J]. Acta Photonica Sinica, 1998, 27(1): 73-76.  
刘新平, 杨建峰. 折轴三反射镜成像光学系统结构研究[J]. 光子学报, 1998, 27(1): 73-76.
- 11 Pan Junhua. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 133-134.  
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 133-134.
- 12 Wang Xiaokun. Optical design of a high resolution space camera[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122001.  
王孝坤. 一种高分辨力空间相机的光学设计[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122001.
- 13 Chen Zhe, Zhang Xingxiang, Chen Changzheng, *et al.*. A common aperture coaxial three-mirror optical system with high resolution[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(11): 1116002.  
陈 哲, 张星祥, 陈长征, 等. 高分辨率共孔径同轴三反光学系统[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1116002.