

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0335-06

# 用于空间相机的折轴三反系统的光学设计

李旭阳<sup>1,2</sup> 李英才<sup>1</sup> 马 臻<sup>1,2</sup> 易红伟<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 为设计高分辨率可见光空间相机, 研究了三反射式光学系统(TMA)设计过程中需要考虑的问题。通过对折轴三反射光学系统最终视场在像面上的分布, 提出了偏视场、全视场和环视场 3 种折轴三反光学形式, 并进行了光学系统设计。设计了 3 种谱段位于 500~800 nm, 焦距  $f=6000$  mm,  $F$  数为 10 的折轴三反光学系统, 设计结果表明, 3 种系统成像质量均接近或达到衍射极限, 可以满足高分辨率可见光空间相机的使用要求。并对 3 种折轴三反射光学系统的加工装配难度进行了分析和比较, 可以作为其他大口径、长焦距空间相机光学设计的参考。

**关键词** 光学设计; 三反光学系统; 衍射极限; 偏视场; 环视场; 全视场

**中图分类号** TH703 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s2.0335

## Optical Design of Three-Mirror-Anastigmat with Fold Mirror for Space Camera

Li Xuyang<sup>1,2</sup> Li Yingcai<sup>1</sup> Ma Zhen<sup>1,2</sup> Yi Hongwei<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

**Abstract** To design high resolution remote camera optical system, this paper researched the issues in the during of the design of reflective optical system, proposed the three-mirror-anastigmat (TMA) optical systems of field bias, full field and annular field according to fields distributing, and finished its optical system design which was characterized by the spectrum band of 500~800 nm, focal length of 6000 mm and  $F$  number of 10. The result indicates that the image quality of the optical system approaches or reaches the diffraction limit, which can meet the demand for use of high resolution space cameras. Through analyzing and comparing the difficulty in fabricate and assembling of the three kinds of the three-mirror-anastigmat optical systems, it can be a special reference to the design of other large aperture and long focal length space telescope.

**Key words** optical design; three-mirror-anastigmat; diffraction limit; bias field; annular field; full field

## 1 引 言

在空间光学遥感领域, 随着地元分辨率(GSD)的不断提高, 长焦距、大口径、接近衍射极限的光学系统一直是空间光学领域研究的热点。由于全反射式光学系统不产生色差, 宜于轻量化, 在温控方面也有较大的优势, 因此在空间光学领域得到广泛应用。而三反光学系统(TMA)是最小的可以满足消像差、平像场的反射式光学系统<sup>[1~3]</sup>。为了适应大视场的需要, 发展了离轴三反式光学系统<sup>[4]</sup>, 但离轴三反光学系统的加工和装调一直是比较难解决的问题。随着 TDI-CCD 在空间相机上的广泛应用, 不仅可以使光学系统的相对孔径较小, 而且缩小了空间相机

的体积和重量, 使空间相机整体结构更加紧凑。本文以折轴三反射光学系统为例, 分析了偏视场、环视场、全视场 3 种折轴三反射光学系统的设计方法<sup>[5,6]</sup>, 并比较各自的特点和适用范围。

## 2 光学系统参数选择

遥感相机的地元分辨率由光电传感器的像元尺寸、轨道高度及光学系统的焦距决定, 表示为

$$N_{\text{GSD}} = a \cdot H / f, \quad (1)$$

其中  $N_{\text{GSD}}$  为地元分辨率,  $H$  为轨道高度,  $f$  为光学系统焦距,  $a$  为传感器的像元尺寸。

当轨道高度为 600 km, 像元尺寸为 10  $\mu\text{m}$ , 焦距为

**基金项目**: 国家 973 计划(2009CB724006)资助课题。

**作者简介**: 李旭阳(1981—), 男, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事光学系统设计与检测等方面的研究。

E-mail: lixuyang2004@126.com

**导师简介**: 李英才(1945—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间光学方面的研究。E-mail: liyingcai@opt.ac.cn

6 m时,地元素分辨率为 1 m。本文采用 TDI-CCD 图像传感器,单条 CCD 有效像元个数为 6144,像敏单元尺寸为  $10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ ,像敏单元中心间隔为  $10\ \mu\text{m}$ 。

(1)式中的地元分辨率是理想情况下得到的,应该使其与光学系统的分辨能力相匹配,光学系统的分辨能力由其瞬时视场决定<sup>[7]</sup>,表示为

$$\theta = \alpha/f, \quad (2)$$

其中  $\theta$  为相机的瞬时视场。

当像元尺寸为  $10\ \mu\text{m}$ ,焦距为 6 m时,瞬时视场为  $0.34''$ 。

由瑞利判据可得,光学系统的角分辨率由光学系统的入瞳直径决定,如下式所示

$$\alpha = 1.22\lambda/D, \quad (3)$$

其中  $D$  为光学系统的入射光瞳口径。

在可见光部分,取  $\lambda=550\ \text{nm}$ , (3)式可以简化为

$$\alpha = 140/D. \quad (4)$$

令  $\theta = \alpha$ ,则  $D=407\ \text{mm}$ ,光学系统的相对孔径为  $F/14.7$ 。

由以上计算可知,光学系统的有效通光口径至少应大于 407 mm,而现在得到应用的 TDI-CCD 空间相机的相对孔径基本处于  $1/8\sim 1/14$  之间,即对于 6 m 焦距的相机,有效入瞳直径处于 430~750 mm 之间。

相机的地面覆盖宽度将由相机的有效视场角  $2\omega$  决定,当轨道高度  $H$  一定时,地面覆盖宽度  $W$  由下式决定

$$W = 2 \times H \times \tan\omega, \quad (5)$$

其中  $W$  为覆盖宽度, $\omega$  为半视场角。

在 600 km 轨道高度,光学系统的有效视场角为  $1.72^\circ$ 时,幅宽可以达到 18 km。

根据以上分析,设计的光学系统的指标为  $f=6000\ \text{mm}$ ,光学孔径  $D=600\ \text{mm}$ ,相对孔径为  $1/10$ ,有效视场角为  $1.72^\circ$ 。

### 3 光学系统初始结构

共轴三反光学系统的初始结构如图 1 所示,其结构参数共有 8 个<sup>[8]</sup>:3 个反射面的曲率半径  $R_1, R_2, R_3$ ,主镜到次镜的距离  $d_1$ ,次镜到三镜的距离  $d_2$ ,3 个反射面的二次非球面系数  $-e_1^2, -e_2^2, -e_3^2$ ,其中用 5 个自由度来校正初级像差,其余的 3 个自由度用来安排光学系统的结构形式。

共轴三反光学系统可以分为一次成像和二次成像系统<sup>[9]</sup>,在二次成像系统中,一次成像的实像面位于次镜与三镜之间,在一次像面处设置光阑,可以有

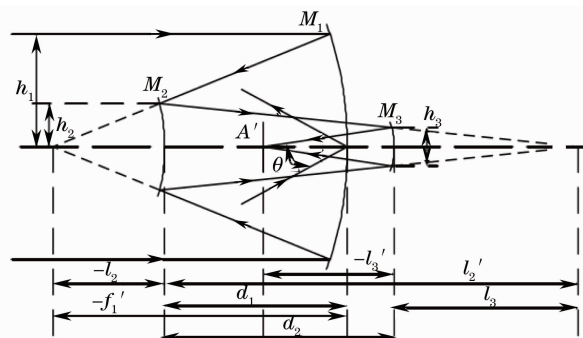


图 1 共轴三反光学系统初始结构

Fig.1 Initial structure of on-axis TMA

效地抑制杂光。

共轴三反光学系统中将不可避免地存在中心遮拦,由图 1 可知,次镜对主镜的遮拦比  $\alpha_1$  为

$$\alpha_1 = l_2/f'_1 \approx h_2/h_1, \quad (6)$$

三镜对次镜的遮拦比  $\alpha_2$  为

$$\alpha_2 = l_3/l'_2 \approx h_3/h_2. \quad (7)$$

当遮拦存在时,虽然空间截止频率保持不变,但调制传递函数在低频部分有所下降,在高频部分有所上升。当中心遮拦为 0.25 时,其光学传递函数的下降不超过  $20\%$ <sup>[10]</sup>,有中心遮拦时的理论衍射极限调制传递函数(modulation transfer function, MTF)如图 2 所示。

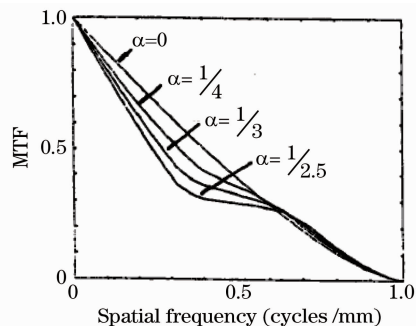


图 2 理论衍射极限调制传递函数

Fig.2 Diffraction limited MTF

折轴三反光学系统是在二次成像共轴三反光学系统的基础上,将折轴镜置于一次像面后,从一次

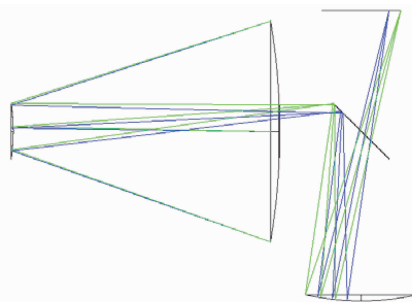


图 3 折轴三反光学系统

Fig.3 TMA optical system

像面发射的光束经折轴镜偏转后入射至三镜，最终光线经过三镜到达成像面，如图 3 所示；折轴三反光学系统能够充分利用光学系统的空间尺寸，在设计良好的情况下，可以使相机的尺寸与焦距之比达到 1:5~1:6 之间，使整个相机的结构紧凑。

### 4 光学设计实例

为了在折轴三反射光学系统的基础上实现其光学设计目标，按视场在像面上的分布情况可分为偏视场、环视场和全视场的光学系统。

折轴三反射光学系统视场在像面上的分布为圆形，但由于二次遮拦的存在，在像面上靠近圆心位置处的一圆形区域的 MTF 降低较快，因此像面上无二次遮拦的区域为环形区域，如图 4 所示。

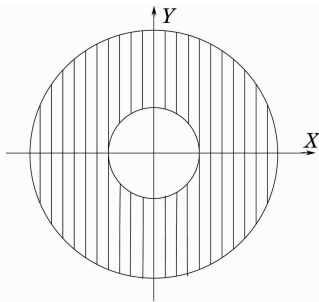


图 4 有效视场

Fig. 4 Effective viewing field

当光学系统的有效视场角为  $1.72^\circ$  时，所对应的地面幅宽为 18 km，在推扫方向的像元数至少应达到 18000 个，本文采用的 TDI-CCD 每片像元个数为 6144，为了达到设计要求，采用 3 片 CCD 拼接的方法来实现。

#### 4.1 偏视场折轴三反系统

偏视场方案采用视场在 X 和 Y 方向均离轴的形式，但视场分布仍关于 Y 轴对称。最终 CCD 在像面上的排布方式如图 5 所示。

根据共轴三反光学系统的计算公式和图 5 的视

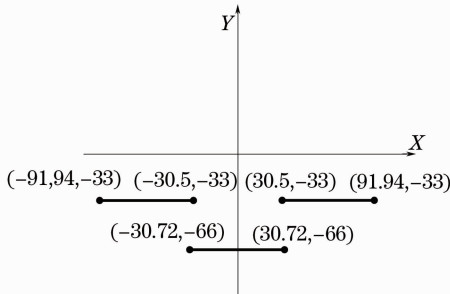


图 5 偏视场的视场分布

Fig. 5 Field distribution of bias field

场分布情况，可以得到光学系统的结构参数如表 1 所示。

表 1 偏视场光学系统参数

Table 1 Optical system parameters of bias field

Name	Radius/mm	Thickness/mm	Conic
Primary mirror	2000.00	799.72	-0.9630
Second mirror	525.13	970.90	-2.2319
Fold mirror	infinity	476.87	0
Third mirror	709.00	859.10	-0.4831

表 1 所设计的光学系统形式如图 6 所示。

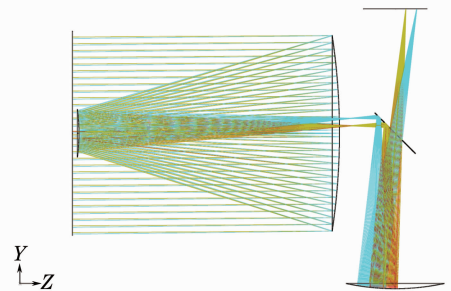


图 6 偏视场的系统形式

Fig. 6 System layout of bias field

为了评价整个视场的成像情况，分别用调制传递函数、点列图评价成像质量，从图 7，图 8 中可以看到，所有视场的调制传递函数 (MTF) 均接近衍射极限，50 lp/mm 的各个视场的传递函数达到 0.50，各

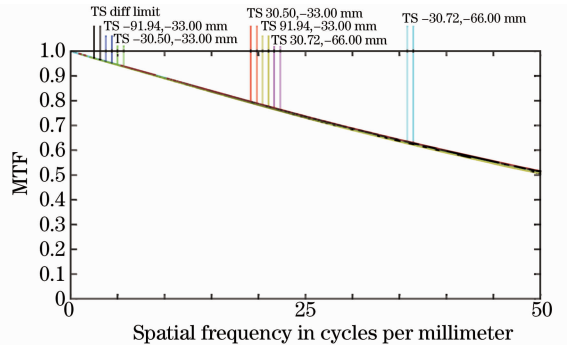


图 7 偏视场的 MTF 曲线

Fig. 7 MTF curve of bias field

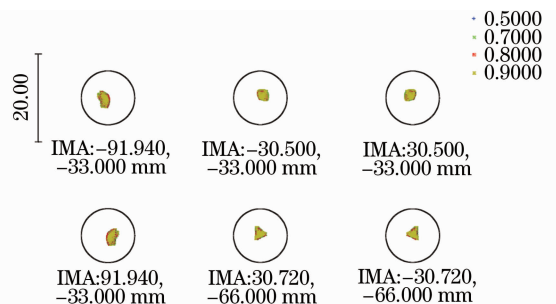


图 8 偏视场的点列图

Fig. 8 Spot diagram of bias field

视场光线所成像点的半径均方根值均在  $1.3 \mu\text{m}$  以内,因此该系统的成像质量基本完好。

折轴三反光学系统中折轴镜的设计是一个重要的问题,折轴镜虽然不产生光焦度,但其位置却对成像光束的最终结果产生较大的影响。对在不同的成像光路中,折轴镜的形式也存在巨大的差异,在半视场光路中,折轴镜仅作为反射镜使用,可以设计成平行平板形式,如图 9 所示。

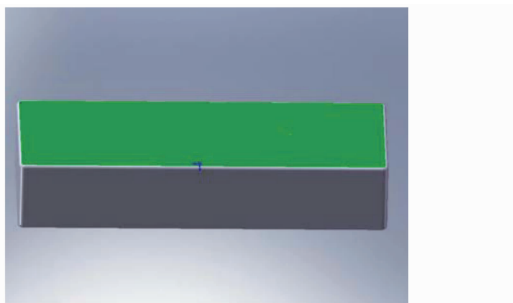


图 9 偏视场折轴镜

Fig. 9 Fold mirror of bias field

### 4.2 环视场折轴三反系统

环视场方案也采用  $X$  和  $Y$  方向均离轴的排布形式,但与半视场不同的是,环视场的 3 条 CCD 分别分布在  $Y$  轴的正向和负向。视场分布如图 10 所示。

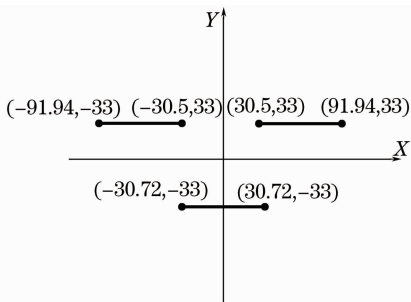


图 10 环视场的视场分布

Fig. 10 Field distribution of annular field

根据共轴三反系统的计算公式和图 10 的视场分布情况,进行优化设计可以得到光学系统的结构参数如表 2 所示。

表 2 环视场光学系统参数

Table 2 Optical system parameters of annular field

Name	Radius/mm	Thickness/mm	Conic
Primary mirror	2000.00	799.72	-0.9603
Second mirror	525.14	990.91	-2.2319
Fold mirror	infinity	456.87	0
Third mirror	709.00	859.11	-0.4831

表 2 所示的光学系统如图 11 所示。

为了评价整个视场的成像情况,分别用调制传递函数、点列图评价成像质量,从图 12,13 中可以看

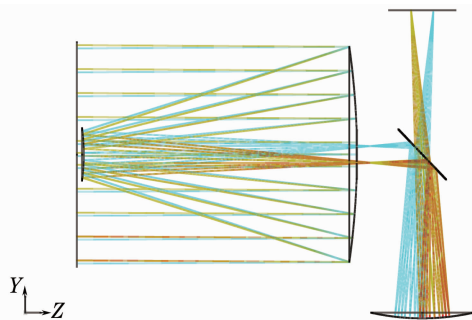


图 11 环视场的系统形式

Fig. 11 System layout of annular field

到,所有视场的调制传递函数均接近衍射极限,50 lp/mm 的各个视场的传递函数达到 0.51,各视场光线所成像点的半径均方根值均在  $1.2 \mu\text{m}$  以内,该系统的成像质量完好。

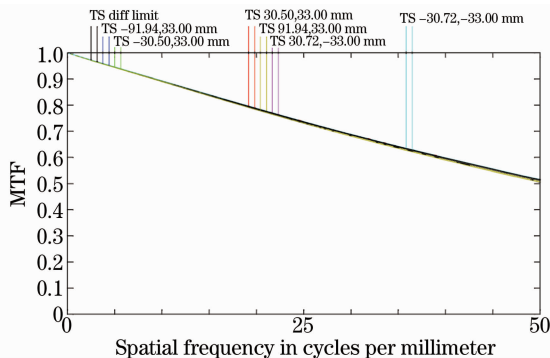


图 12 环视场的 MTF 曲线

Fig. 12 MTF curve of annular field

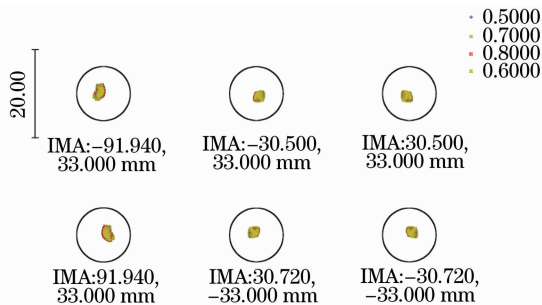


图 13 环视场点列图

Fig. 13 Spot diagram of annular field

环视场方案中,折轴镜即要反射通过主次镜入射的光线,又需要使从三镜反射的光线从折轴镜中穿过,而且两者的边缘光线不能相交,因此环视场折轴三反系统的折轴镜可以设计为中心空缺的平行平板,如图 14 所示。

### 4.3 全视场折轴三反系统

全视场方案采用其中的两条 CCD 沿  $X$  轴排布,另外一条 CCD 与  $X$  轴有一定的偏离,但整个视场仍关于  $Y$  轴对称。采用此种方法可以利用整个

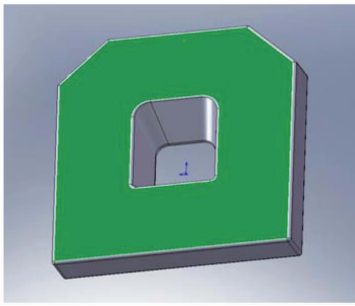


图 14 环视场折轴镜

Fig. 14 Fold mirror of annular field

光学系统的有效视场。最终 CCD 在像面上的排布如图 15 所示。

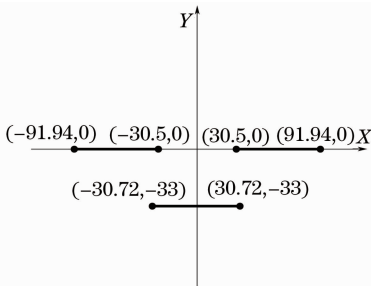


图 15 全视场的视场分布

Fig. 15 Field distribution of full field

根据图 15 的视场分布和共轴三反光学系统的计算方法,进行优化可以得到光学系统的结构参数如表 3 所示。

表 3 全视场光学系统参数

Table 3 Optical system parameters of full field

Name	Radius/mm	Thickness/mm	Conic
Primary mirror	2000	799.75	-0.9608
Second mirror	525.18	970.93	-2.2320
Fold mirror	infinity	476.87	0
Third mirror	709.05	859.25	-0.4832

表 3 所设计的光学系统如图 16 所示。

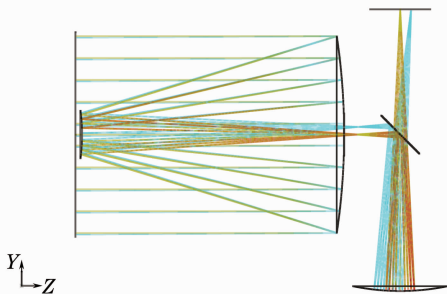


图 16 全视场系统形式

Fig. 16 System layout of full field

为了评价整个视场的成像情况,分别用调制传递函数、点列图评价成像质量,从图 17,18 中可以看到,所有视场的调制传递函数均接近衍射极限,50 lp/mm

的各个视场的传递函数达到 0.52,各视场光线所成像点的半径均方根值均在 1.0 μm 以内,因此该系统的成像质量完好。

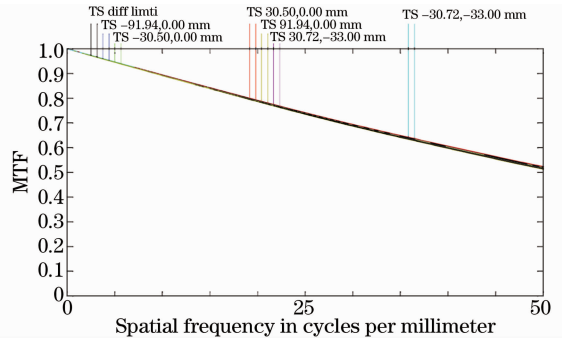


图 17 全视场的 MTF 曲线

Fig. 17 MTF curve of full field

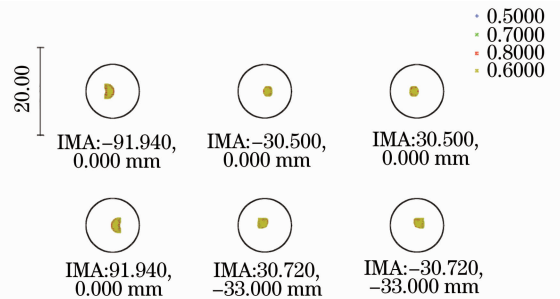


图 18 全视场点列图

Fig. 18 Spot diagram of field

全视场方案中,折轴镜既需要反射主次镜的光线,又需要透过三镜反射的光线,而且两者的边缘光线不能相交,因此全视场折轴三反系统的折轴镜如图 19 所示。

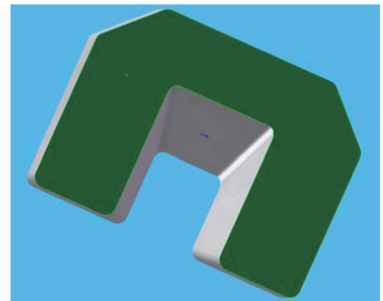


图 19 全视场折轴镜

Fig. 19 Fold mirror of full field

## 5 比较

为了方便空间相机光学系统的选择,分别从视场角、中心遮拦、调制传递函数、成像质量和可实现程度等方面对 3 种折轴三反射光学系统进行了对比。

表 4 对 3 种光学系统的视场角进行了比较。

表 4 3 种光学系统的视场角

Table 4 Field angle of three optical systems

	bias Field	Annular field	Full field
Effective field angle	1.72°	1.72°	1.72°
Design field angle	1.87°	1.78°	1.72°

从表 4 可以看出,为了实现相机的地面幅宽,偏视场光学系统所需要设计的视场角最大,环视场次之,全视场最小。

表 5 对 3 种光学系统的中心遮拦和调制传递函数(MTF)进行了比较。

表 5 中心遮拦和调制传递函数

Table 5 Central obscure and MTF

	Field bias	Annular field	Full field
Central obscure	0.227	0.223	0.213
MTF(50 lp/mm)	0.500	0.510	0.520

从表 5 可以看出,由于偏视场光学系统视场角较大,导致中心遮拦过大,系统的 MTF 下降较快,而全视场光学系统的设计视场角得到了合理的应用,因此成像质量较好。

表 6 对 3 种系统的成像质量和可实现程度进行了比较。

表 6 成像质量和难度

Table 6 Image quality and difficulty

	Bias field	Annular field	Full field
RMS radius / $\mu\text{m}$	1.3	1.2	1.0
Difficulty	easy	a wee bit difficulty	difficulty

从表 6 可以看出,全视场光学系统的成像质量较高,但加工与装配难度较大。偏视场加工与装配难度较低。

从以上的比较可知,对于不同需求的空间相机,在兼顾成像质量和可实现程度的基础上可以采用不同的设计形式,在地面幅宽要求不高的情况下,可以选择偏视场光学系统以减少加工和装配的难度,当对相机的地面幅宽要求较高时,选择全视场光学系统可以有效地减少中心遮拦,提高整个系统的成像质量。当 CCD 的尺寸较大时或需要在像面上排布多种图像传感器时,可以选择环视场光学系统<sup>[11]</sup>。

## 6 结 论

以二次成像的折轴三反光学系统视场在最终像面上的分布为出发点,较为系统地分析了偏视场、环

视场和全视场 3 种折轴三反光学系统的设计形式和实现方法,同时对 3 种设计方案进行了较为详细的对比,分析了各自的优缺点和适用范围。

随着非球面加工技术、干涉测量辅助装调技术的应用及发展进步,折轴三反射光学系统在空间相机上将会得到广泛的应用。本文的分析内容和光学形式也可作为其他大口径空间相机光学设计的参考。

## 参 考 文 献

- 1 Shi Guanghui. High resolution optical systems used to observation from the satellites to the earth and problems in design [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, **7**(1): 16~246  
史光辉. 卫星对地观测高分辨率光学系统和设计问题[J]. *光学精密工程*, 1999, **7**(1): 16~246
- 2 Zhong Xing, Zhang Lei, Jin Guang. Research on long focal length on-axis TMA system for high resolution remote sensing [C]. *SPIE*, 2007, **6722**: 67220R
- 3 Liang Minyong, Liao Ningfang, Feng Jie *et al.*. Design and optimization of three cylindrical reflectors optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1359~1363  
梁敏勇,廖宁放,冯洁等. 三反射式柱面光学系统设计及优化[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1359~1363
- 4 Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin *et al.*. Design on three-reflective-mirror used in space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 216~219  
常军,翁志成,姜会林等. 用于空间的三反射镜光学系统设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(2): 216~219
- 5 M. Lampton, M. Sholl. Comparison of on-axis three-mirror-anastigmat telescopes[C]. *SPIE*, 2007, **6687**: 66870S
- 6 M. J. Sholl, M. L. Kaplan, M. L. Lampton. Three mirror anastigmat survey telescope optimization [C]. *SPIE*, 2008, **7010**: 70103M
- 7 Xue Mingqiu. On optical system with high spatial resolution and wide angle of view in remote Sensing[J]. *J. Suzhou Institute of Silk Textile Technology*, 2000, **20**(2): 1~6  
薛鸣球. 高分辨宽覆盖遥感相机光学系统研究[J]. *苏州丝绸工学院学报*, 2000, **20**(2): 1~6
- 8 Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004. 130~138  
潘君华. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州大学出版社, 2004. 130~138
- 9 Fan Xuewu, Ma Zhen, Chen Rongli *et al.*. Study on three-mirror reflective optic system having one image surface [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 1001~1003  
樊学武,马臻,陈荣利等. 具有二次像面的三反射光学系统的研究[J]. *光子学报*, 2003, **32**(8): 1001~1003
- 10 Liu Xiping, Yang Jianfeng. Three-mirror system 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 methodic design of IR imaging system with large aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1475~1478  
潘君华. 大口径红外成像系统的光学设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1475~1478