

同轴超紧凑型主三镜一体化光学系统的设计

杜康^{1,2}, 刘春雨^{1*}, 刘帅¹, 宋伟阳^{1,2}, 徐婷婷^{1,2}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间新技术部, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为解决高空间分辨率和微小卫星空间紧张之间的矛盾, 基于像差理论和同轴四反光学系统, 设计了一种同轴超紧凑型主三镜一体化光学系统。在焦距为 1750 mm、 F 数为 7、全视场角为 1.4° 的条件下对光学系统进行验证, 并分析了其公差和信噪比。结果表明: 光学系统的整体长度小于 200 mm, 仅为焦距的 $1/8.75$, 实现了光学系统的超紧凑化和小遮拦比设计。增加遮拦后, 在奈奎斯特频率为 78 lp/mm 处, 全视场传递函数优于 0.26, 全视场波像差优于 $\lambda/50$; 在太阳高度角为 30° 、地表反射率为 0.05 时, 信噪比优于 24.9。系统结构简单、紧凑, 且成像质量好, 对微小卫星高分辨光学系统的设计有一定的借鉴作用。

关键词 光学系统设计; 同轴四反光学系统; 像差理论; 一体化设计

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.072202

Design of Coaxial Ultra-Compact Primary and Tertiary Mirror Integrated Optical System

Du Kang^{1,2}, Liu Chunyu^{1*}, Liu Shuai¹, Song Weiyang^{1,2}, Xu Tingting^{1,2}

¹Space New Technology Department, Changchun Institute of Precision Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to resolve the contradiction between high spatial resolution and the tight space of microsatellites, a coaxial ultra-compact primary and tertiary mirror integrated optical system was designed based on the aberration theory and the coaxial four-mirror optical system. The optical system was verified under the condition of a focal length of 1750 mm, an F -number of 7, and a full field of view of 1.4° , and its tolerance and signal-to-noise ratio (SNR) were analyzed. The results show that the overall length of the optical system is less than 200 mm, which is only $1/8.75$ of the focal length, suggesting an ultra-compact and small blocking ratio design of the optical system. With increased blocking, the full field transfer function is better than 0.26 and the full field wave aberration is better than $\lambda/50$ at a Nyquist frequency of 78 lp/mm. The SNR is better than 24.9 when the altitude of the sun is 30° and the surface reflectivity is 0.05. The system structure is simple and compact, and the imaging quality is good, which has certain reference for the design of high-resolution optical systems for microsatellite.

Key words optical system design; coaxial four-mirror optical system; aberration theory; integrated design

OCIS codes 220.4830; 110.6770; 110.5200; 220.1250

1 引言

空间遥感技术是衡量一个国家科技水平的重要指标, 也是各个国家必须掌握和极力发展的技术, 广泛应用于军事侦察勘探、环境与灾情监测、气象预

报、摄影测绘、农业发展等领域。随着空间遥感技术的不断发展, 人们对光学遥感器分辨率的要求也不断提高^[1], 而光学镜头会直接影响遥感器的成像效果和体积规模, 很大程度决定了整个遥感器方案的优劣^[2]。可见光遥感相机是近年来发展的重点, 其

收稿日期: 2019-10-23; 修回日期: 2019-11-06; 录用日期: 2019-11-08

基金项目: 国家科技部重大专项(2016YFB0501202)

* E-mail: mmliucy@163.com

遥感感知能力是高效率获取地球信息的关键。线阵推扫式空间光学系统是获取高分辨率卫星影像的主要方式^[3],但线阵 CCD 相机受卫星振动、姿态变化等因素的影响,难以保证图像的保真度。且其时间分辨率受卫星重返时间的影响,难以适应高时间、空间分辨率的发展趋势。因此对地持续观测能力强的视频遥感相机成为高分辨率遥感领域重要的研究方向。

2014 年美国发射的首颗低轨道微纳视频卫星 SkySat 采用马卡结构,地面分辨率为 0.9 m^[4]。2006 年以色列与法国合作发射的对地观测小卫星 VEN μ S,采用传统的两镜折反结构使地面分辨率达到了 m 级^[5]。2014 年 9 月中国国防科技大学研制的试验卫星“天拓二号”发射升空,可拍摄分辨率为 5 m 的黑白视频^[6]。2015 年 10 月,中国长光卫星公司发射的“吉林一号”,采用卡塞格林结构,可拍摄分辨率为 m 级的全彩视频^[7-8]。

目前提高卫星空间分辨率的方式主要有增长光学系统的焦距和降低卫星运行轨道的高度。因后者受电子技术和卫星技术的限制,所以通常使用第一种方式。但增加光学系统的焦距容易导致相机的体积增大、质量增加,而微小卫星的承载能力有限。为了在提高地面分辨率的同时,考虑成本和小卫星平台的适用问题,需要设计体积小、质量轻,且能对面视场成像的长焦光学系统。

主三镜一体化结构在中国科学院成都光电所、大型综合巡天望远镜(LSST)均有应用,但地基光电成像系统,相对于空间光电系统,体积、质量要求较为宽松。成都光电所的主三镜一体化结构,三镜占主镜口径大,遮拦比较大。LSST 虽然采用了主三一体化设计,但其基本形式为带有校正镜组的卡塞格林式光学系统,其筒长焦距比约为 1/3^[9],难以满足微小卫星的实际应用需求。因此本文提出了一种超紧凑型主三镜一体化的多反射镜互嵌式同轴光学系统。根据信噪比计算系统模型,通过合理分配各反射镜的光焦度、二次系数和镜间距,完成全谱段成像的全反射式和小遮拦比设计,在不降低光学系统成像质量的同时,压缩了光学系统的体积和质量。该系统相比传统光学系统在形式和筒长焦距比上均有较大提高,可有效解决高空间分辨率和卫星小型化之间的矛盾。通过主三镜一体化结构,将四镜系统变成两镜系统,系统装调自由度减少到 6 个,大大降低了装调难度^[10]。同时将主镜、三镜的背部支撑结构合二

为一,对低轨轻小型高分辨率动态遥感视频卫星光机结构的轻量化设计有重要意义。

2 总体指标要求和光学参数

根据应用需求,光学成像要求的相机总体指标:

- 1) 谱段范围为 400~750 nm;
- 2) 相机幅宽优于 12 km;
- 3) 调制传递函数(MTF)值在奈奎斯特频率处优于 0.26;
- 4) 像元尺寸为 6.4 μm × 6.4 μm ;
- 5) 地面分辨率优于 1.8 m;
- 6) 系统尺寸优于 250 mm × 250 mm × 200 mm;
- 7) 信噪比(SNR)大于 25 dB。

地面分辨率 g 与探测器像元 p 的关系为

$$f = \frac{p}{g}H, \quad (1)$$

式中, H 为卫星轨道高度,取 500 km,代入相机指标可求得焦距 $f = 1750$ mm。设地面幅宽 $z = 12$ km,则 H 与半视场角 ω 之间的关系为

$$z = 2H \cdot \tan \omega. \quad (2)$$

由(2)式求得相机视场角 $2\omega = 1.4^\circ$ 。奈奎斯特频率 f_n 与像元尺寸 p 的关系为

$$f_n = 1/2p. \quad (3)$$

代入相机指标可求得 $f_n = 78$ lp/mm。

3 光学系统方案分析

轻小型高分辨动态遥感视频卫星的光学系统需具备焦距长、视场大、体积小、质量轻等特点。长焦距透射式系统,透镜口径大不利于加工和装调,且需要较多的透镜校正二级光谱色差,系统的体积和质量大,与微小卫星轻量化的设计理念相悖。而反射式光学系统需要的光学零件少,不存在色差,且结构紧凑、简单,容易实现轻量化。两反光学系统结构简单、易装调,但自由变量较少,在大的相对孔径下像质较差。因此可通过增加反射镜数量来增加自由变量,产生三反系统、四反、五反等系统,增强消除像差能力。三反系统具有同轴三反和离轴三反两种形式,相比两反系统,可以同时校正四种初级像差。离轴三反系统能避免中心遮拦,在空间相机中应用广泛,但结构松散容易导致系统在垂直方向的尺寸较大,难以满足微小卫星的应用需求。因此实验采用同轴方案设计光学系统,由于同轴三反、四反系统的横向距离较

长,需利用折轴反射镜,系统复杂。所以将同轴四反系统的三镜与主镜一体化,用次镜充当四镜,得到主三镜一体化的光学系统。

同轴系统的孔径存在中心遮拦,导致有效通光孔径减小,而光学系统的 MTF 值受限于系统的 F 数、工作波长和有效通光口径。因此,中心遮拦会引起同轴系统的 MTF 值下降^[11]。表 1 为在中心波长 $\lambda = 575 \text{ nm}$ 时,主三镜一体化光学系统在奈奎斯特频率为 78 lp/mm 处的 MTF 值与遮拦比的关系,其中遮拦比为遮拦口径 D_r 与光学系统入瞳口径 D_0 的比值。可以看出,要使奈奎斯特频率处的 MTF 值较高,需要对系统的遮拦进行有效控制。

表 1 系统遮拦比与 MTF 的关系

Table 1 Relationship between system blocking ratio and MTF

System blocking ratio	0	0.24	0.43	0.7
MTF	0.59	0.5	0.36	0.3

4 光学系统设计

同轴主三镜一体化结构是由同轴四反结构演变而来,图 1 为同轴四反结构的一般形式, M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 分别为主镜、次镜、三镜和四镜, l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 分别为主镜、次镜、三镜、四镜的物距, l'_1 、 l'_2 、 l'_3 、 l'_4 分别为主镜、次镜、三镜、四镜的像距, F 为系统焦点, f_1 为主镜焦距, w 为系统半视场角。

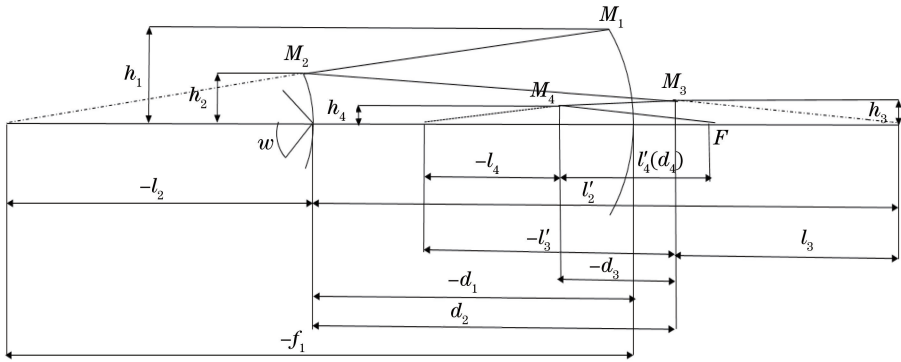


图 1 同轴四反系统结构图

Fig. 1 Structure of coaxial four-mirror optical system

系统共有 6 个自由变量: α_1 、 α_2 、 α_3 、 β_1 、 β_2 、 β_3 , 分别为次镜对主镜的遮拦比、三镜对次镜的遮拦比、四镜对三镜遮拦比、次镜放大率、三镜放大率、四镜放大率。

设系统的孔径光阑在主镜上,系统焦距为 f_1 , 根据高斯几何光学对光学系统初始结构进行求解, 则主镜曲率为

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{l_2}{f_1} \approx \frac{h_2}{h_1} \\ \alpha_2 = \frac{l_3}{l'_2} \approx \frac{h_3}{h_2} \\ \alpha_3 = \frac{l_4}{l_3} \approx \frac{h_4}{h_3} \\ \beta_1 = \frac{l'_2}{l_2} \approx \frac{u_2}{u'_2} \\ \beta_2 = \frac{l'_3}{l_3} \approx \frac{u_3}{u'_3} \\ \beta_3 = \frac{l'_4}{l_4} \approx \frac{u_4}{u'_4} \end{cases} \quad (4)$$

$$r_1 = \frac{2f_1}{\beta_1\beta_2}, \quad (5)$$

次镜曲率为

$$r_2 = \frac{2\alpha_1 f_1}{(1 + \beta_1)\beta_2}, \quad (6)$$

三镜曲率为

$$r_3 = \frac{2\alpha_1\alpha_2 f_1}{1 + \beta_2}, \quad (7)$$

四镜曲率为

$$r_4 = \frac{2\alpha_1\alpha_2\alpha_3 f_1}{1 + \beta_3}, \quad (8)$$

主镜到次镜间距为

$$d_1 = \frac{(1 - \alpha_1)f_1}{\beta_1\beta_2}, \quad (9)$$

次镜到三镜间距为

$$d_2 = \frac{\alpha_1(1 - \alpha_2)f_1}{\beta_2}, \quad (10)$$

式中, h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 分别为主镜、次镜、三镜、四镜的半径, u_2 、 u_3 、 u_4 分别为次镜、三镜、四镜的物方孔径角, u'_2 、 u'_3 、 u'_4 分别为次镜、三镜、四镜的像方孔径角。

三镜到四镜间距为

$$d_3 = \frac{(1 - \alpha_3)\alpha_1\alpha_2 f_1}{\beta_3}, \quad (11)$$

四镜到像面距离为

$$d_4 = \alpha_1\alpha_2\alpha_3 f_1, \quad (12)$$

由赛德尔像差理论可知,光学系统的像差系数 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 、 S_{IV} 、 S_V 是关于 α_1 、 α_2 、 α_3 、 β_1 、 β_2 、 β_3 以及四个反射镜的二次曲面系数 $-e_1^2$ 、 $-e_2^2$ 、 $-e_3^2$ 、 $-e_4^2$ 的函数^[12],可表示为

$$\begin{cases} S_I = S_I(\alpha_i, \beta_i, e_i^2) \\ S_{II} = S_{II}(\alpha_i, \beta_i, e_i^2) \\ S_{III} = S_{III}(\alpha_i, \beta_i, e_i^2) \\ S_{IV} = S_{IV}(\alpha_i, \beta_i, e_i^2) \\ S_V = S_V(\alpha_i, \beta_i, e_i^2) \end{cases} \quad (13)$$

令 $S_I = S_{II} = S_{III} = S_{IV} = S_V = 0$, 且 $S_I = S_{II} = S_{III} = S_V = 0$ 可求得 4 个二次项系数 $e_i^2 (i=1, 2, 3, 4)$ 。令 $S_{IV} = 0$, 平场条件如(14)式所示^[13], 即 S_{IV} 只与系统结构参数有关

$$1/r_1 + 1/r_3 = 1/r_2 + 1/r_4. \quad (14)$$

当系统的焦距、口径和系统尺寸等相关参数给定时,选择合理的 α_i 、 β_i 给各反射镜分配光焦度,完成系统初级像差的校正。

对于主三镜一体化结构,初始结构参数需满足的条件:1) $d_2 = -d_3$; 2) $r_2 = r_4$; 3) $e_2^2 = e_4^2$ 。

为了实现光学系统的小遮拦比设计,需约束主三镜一体化结构的遮拦比。根据以往设计经验,取次镜对主镜遮拦比 $\alpha_1 = 0.25$ ^[14]。由近轴光线追迹轴外视场光线,根据主镜半口径 h_1 与半视场角 w 可求出次镜 h_2 半口径为

$$h_2 = \alpha_1 \frac{h_1}{f_1} - d_1 \tan w. \quad (15)$$

光学系统总长 L 由次(四)镜到三镜的距离 d_2 与后工作距 L_x 决定,可用次镜对主镜遮拦比、四镜对三镜遮拦比、三镜放大率及主镜到次镜距离 d_1 表示为

$$\begin{cases} L = d_2 + L_x \\ d_2 = f_1 \frac{\alpha_1}{\beta_2} \left[1 - \frac{d_1(1 + \beta_2)}{\beta_2 d_1 + (1 - \alpha_1)^2} \right]. \end{cases} \quad (16)$$

联立(4)式、(10)式、(16)式可得

$$\begin{cases} h_3 = \alpha_2 h_2 \\ \alpha_2 = \frac{d_1(1 + \beta_2)}{\beta_2 d_1 + (1 - \alpha_1)^2}. \end{cases} \quad (17)$$

次镜对主镜遮拦比 α_1 , 三镜对次镜遮拦比 α_2 可由主镜到次镜的距离 d_1 与三镜放大率 β_2 限制。

由 F 数、后工作距与主镜到次镜的距离可以求得 h_1 、 h_2 、 h_3 和一组确定的初始结构参数 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 、 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 。

对主三镜一体化光学系统的信噪比进行分析,从而确定系统的 F 数。在太阳高度角为 30° , 地表反射率为 0.05 的光照条件下,用 MODTRAN 进行仿真计算得出不同波长的辐射亮度图,如图 2 所示。对图 2 进行积分后,得到系统入瞳处的辐亮度 $S = 8.336901 \times 10^{-4} \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{cm}^2)$ 。

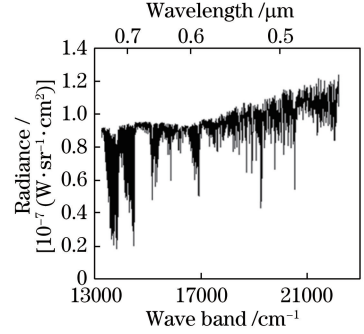


图 2 不同波段的辐亮度曲线

Fig. 2 Radiance curves of different bands

在入瞳亮度已知时,设 τ 为光学系统反射率, T_{int} 为曝光时间, R_{CMOS} 为互补金属氧化物半导体(CMOS)探测器量子效率, σ_s 为散粒噪声, σ_d 为暗电流噪声, σ_r 为实际测量的电子噪声, V 为卫星对地飞行速度,可得出信噪比的数学计算模型^[15]

$$\begin{cases} R_{\text{SN}} = 20 \log \left[\frac{\pi S \tau T_{\text{int}} R_{\text{CMOS}}}{4F^2 \sqrt{\sigma_s^2 + (T_{\text{int}} \sigma_d)^2} + \sigma_r^2} \right] \\ T_{\text{int}} \approx \frac{g}{2V} \\ \sigma_s^2 = \frac{\pi L \tau T_{\text{int}} R_{\text{CMOS}}}{4F^2} \end{cases} \quad (18)$$

根据信噪比数学模型,可求得在太阳高度角 30° , 地表反射率为 0.05, $R_{\text{SN}} \geq 25 \text{ dB}$ 时, F 数小于 7, 与三镜对主镜遮拦比 $\alpha_3 = \alpha_1\alpha_2$ 小于 0.45。得到一组初始光学结构为

$$\begin{cases} r_1 = -541.669 \\ r_2 = -785.308 \\ r_3 = -191.604 \\ r_4 = -785.308 \\ h_1 = 125 \\ h_2 = 32.6 \\ h_3 = 55.65 \\ d_1 = -209.986^\circ \\ d_2 = 217.980 \\ d_3 = -217.980 \\ d_4 = 269.980 \end{cases} \quad (19)$$

(19)式中的光学参数均以 mm 为单位,当四镜系统近似变为二镜系统,系统中可优化自由变量减少,为获得更好的像质需适当增加主镜上的高次非球面。表 2 为设计的光学系统参数。

表 2 结构参数

Table 2 Structural parameters

Mirror	Diameter/mm	Radius/mm	Thickness/mm	Conic	Sixth-order coefficient
Primary	250.0	-173.684	-150	-0.873	4.252×10^{-16}
Secondary	54.8	-98.429	160	-11.811	0
Tertiary	105.8	-67.784	-150	-0.256	0
Fourth	54.8	-98.429	200	-11.811	0

由表 2 可知,主镜为含 6 次项的偶次非球面,可表示为 $z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r_1^2}} + a_3r_1^6$, 其中 c 为曲率的倒数、 k 为二次项系数。 $c = 1/-173.684$; $k = -0.873$; $a_3 = 4.252 \times 10^{-16}$ 。次镜、四镜为双曲面,三镜为椭球面,可用零位补偿干涉检测,获得高次非球面的面形误差。系统结构如图 3 所示,主镜、次镜采用类卡塞格林结构,存在中间像面,系统重复利用次镜对光路进行折叠,总长仅为 200 mm,筒长焦距比为 1/8.75,相比传统的同轴系统结构,大大缩小光学系统体积,满足微小卫星的发展需求。

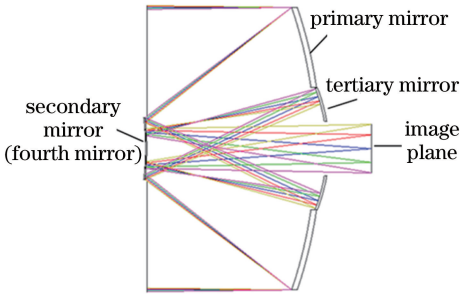


图 3 光学系统光路图

Fig. 3 Optical path diagram of optical system

MTF 是评价光学系统性能的参数^[16]。如图 4 所示的光学系统加遮拦后的 MTF 曲线接近衍射极限且在奈奎斯特频率处各视场的调制传递函数均大于 0.28。光学系统全视场波像差(RMS)小于 $\lambda/50$ ($\lambda = 575 \text{ nm}$),如图 5 所示。

系统场曲及畸变图如图 6 所示,图中纵坐标表示归一化视场,S、T 分别代表弧矢面与子午面(即纸面与垂直纸面向里的表面),可以看出系统成像最大畸变位于最大视场处,小于等于 0.5%,场曲小于等于 0.1 mm,这表明系统成像质量良好,结构参数设计合理,很大程度上校正了光学系统的畸变。图 7 为视场角在 $0^\circ, 0.4^\circ, 0.7^\circ, -0.7^\circ, -0.4^\circ$ 下的光学系统点列图,可以看出全视场内弥散斑最大几何半径与像元尺寸相当,这也证明了系统的成像质量较好。

少,为获得更好的像质需适当增加主镜上的高次非球面。表 2 为设计的光学系统参数。

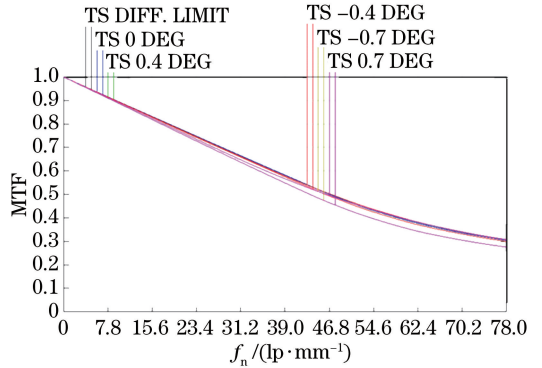


图 4 系统的 MTF

Fig. 4 MTF of the system

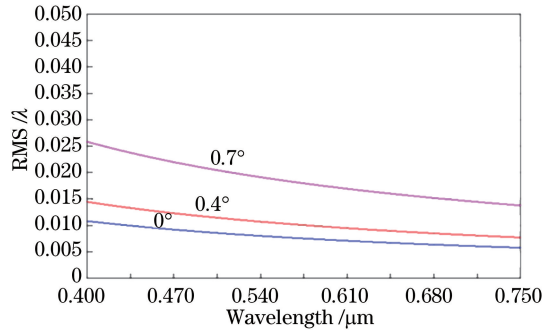


图 5 系统 RMS

Fig. 5 RMS of the system

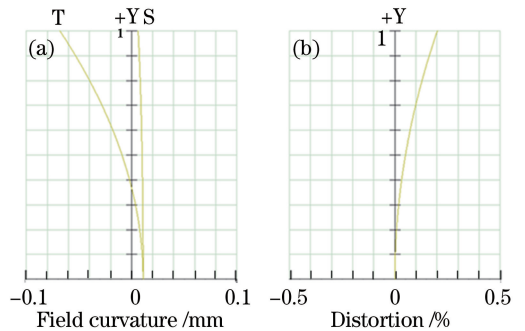


图 6 系统的场曲及畸变图。(a)场曲;(b)畸变

Fig. 6 Field curvature and distortion of the system.

(a) Field curvature; (b) distortion

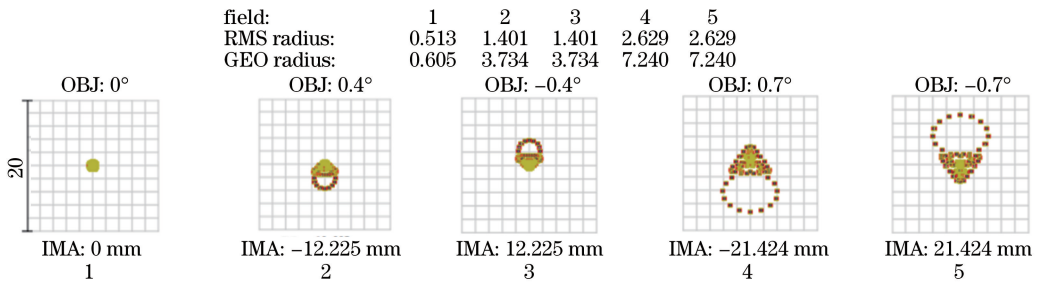


图 7 光学系统的点列图
Fig. 7 Dot chart of optical system

5 公差分析

光学系统的公差直接影响了光学系统的可加工性,加工、装调误差会影响实际光学系统的成像质量,因此在光学系统设计完成后,还需对公差进行分析,确保其可实现性。将 MTF 值作为公差敏感度,通过分析元件倾斜、偏心、镜间距以制定合理的公差,图 8、图 9、图 10 分别表示不同参数对公差的影响其中,GEO 为几何最大半径。

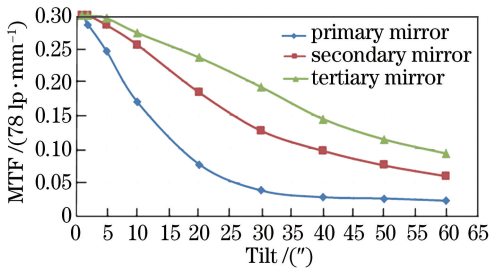


图 8 倾斜角对 MTF 的影响
Fig. 8 Effect of tilt angle on MTF

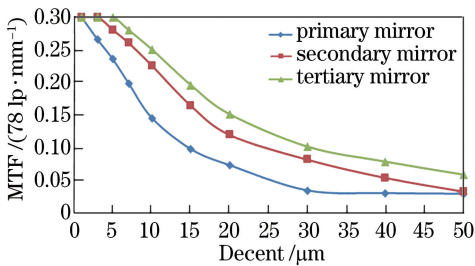


图 9 偏心对 MTF 的影响
Fig. 9 Effect of decent on MTF

根据加工难度,将光学系统曲率半径加工误差控制在 1 个光圈范围内,根据各反射镜的公差影响因子合理分配各光学组件的参数,令倾斜公差为 $-5''$;偏心公差为 $-2 \mu\text{m}$;主镜次镜的间距公差为 $-2 \mu\text{m}$,次镜三镜的间距公差为 $-4 \mu\text{m}$ 。进行 500 次蒙特卡罗数值分析,结果如表 3 所示,在 78 lp/mm 处,MTF 值有 50% 的情况下大于 0.25。

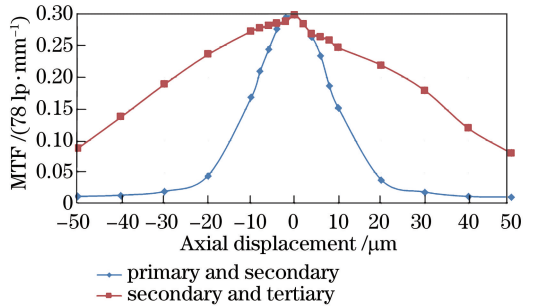


图 10 轴向位移对 MTF 的影响
Fig. 10 Effect of axial displacement on MTF

表 3 蒙特卡罗的分析结果

Table 3 Monte Carlo analysis results

Sample probability / %	MTF
90	0.22393852
80	0.23627643
50	0.25643672
20	0.26995264
10	0.27398883
2	0.28189667

6 结 论

针对高分辨率动态遥感微小卫星的应用需求,基于赛德尔像差理论,设计了一种主三镜一体化的同轴四反光学系统。在满足微小卫星系统信噪比优于 25 dB 实际成像需求下,对焦距为 1750 mm,成像全视场角为 1.4° ,相对孔径为 1/7 的光学系统进行验证实验。该系统重复利用次镜,将镜面数量由 4 面减到 2 面,相比 LSST 系统去除了校正镜组,装调自由度数量由 18 个减少到 6 个,大大减小了装调难度和结构的体积、质量,实现了光学系统的轻量化;增加遮拦后,全视场 MTF 在奈奎斯特频率处优于 0.26,成像质量优良。实现了长焦距下,系统的超紧凑化、小遮拦比,筒长仅为焦距的 1/8.75,相比 LSST 系统提高了 2.92 倍,对空间高分辨率微小卫星光学系统的超紧凑

化设计具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Zhang X J, Fan Y C, Bao H, et al. Applications and development of ultra large aperture space optical remote sensors [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(11): 2613-2626.
张学军, 樊延超, 鲍赫, 等. 超大口径空间光学遥感器的应用和发展[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2613-2626.
- [2] Wang X Y. Development and prospect of space optical technology [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2018, 39(4): 79-86.
王小勇. 空间光学技术发展展望[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(4): 79-86.
- [3] Cheng Y F, Jin S Y, Wang M, et al. A high accuracy image mosaicking approach of optical remote sensing satellite for multi-camera system [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0828003.
程宇峰, 金淑英, 王密, 等. 一种光学遥感卫星多相机成像系统的高精度影像拼接方法[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0828003.
- [4] Murthy K, Michael S, Byron D, et al. SkySat-1: very high-resolution imagery from a small satellite [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9241: 92411E.
- [5] Jeremy T, Francesc T, Hagolle O. The VEN μ S super-spectral camera [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6361: 63611E.
- [6] Zhang M Q. TOP 10 Chinese space news [J]. Satellite Application, 2015(1): 9-11.
张曼倩. 中国航天十大新闻[J]. 卫星应用, 2015(1): 9-11.
- [7] Zhang Z C. Jinlin NO.1 satellite group[J]. Satellite Application, 2015(11): 89.
张召才. 吉林一号卫星组星[J]. 卫星应用, 2015(11): 89.
- [8] Li K. Structure design and stability study of smart video camera[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
李凯. 灵巧视频相机结构设计及其稳定性研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2015.
- [9] Douglas N, Angeli G, Claver C, et al. Overview of the LSST active optics system [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9150: 91500G.
- [10] Meng Q Y, Wang W, Ji Z H, et al. Design of off-axis three-mirror system based on integration of primary and tertiary mirrors [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(2): 578-582.
孟庆宇, 王维, 纪振华, 等. 主三镜一体化离轴三反光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 578-582.
- [11] Luo Q, Niu X H, Zhang D D. Project design of large aperture infrared optical systems [J]. Aerospace Shanghai, 2018, 35(1): 97-103.
罗秦, 钮新华, 张冬冬. 大口径红外光学系统方案设计[J]. 上海航天, 2018, 35(1): 97-103.
- [12] Pan J H. The design, manufacture and test of the aspherical optical Surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 12-13.
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: 12-13.
- [13] Xu M M, Xue D L, Zeng X F. Design of compact optical system with large aperture and ultra long focal length [J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(5): 638-643.
徐萌萌, 薛栋林, 曾雪峰. 大口径超长焦距紧凑型光学系统设计[J]. 应用光学, 2018, 39(5): 638-643.
- [14] Han L, Zhao Z C, Mao B Q, et al. Design of coaxial three-mirror anastigmat with long focal length and two-dimensional field of view [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0722006.
韩琳, 赵知诚, 毛保奇, 等. 长焦距面视场同轴三反望远物镜设计[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0722006.
- [15] Yao Y, Xu Y S, Ding Y L, et al. Optical-system design for large field-of-view three-line array airborne mapping camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(9): 2335-2344.
姚园, 许永森, 丁亚林, 等. 大视场三线阵航空测绘相机光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2018, 26(9): 2335-2344.
- [16] Chen H D, Xue C X. Design of mid-wave infrared optical system with high variable ratio miniaturization [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0222001.
陈虹达, 薛常喜. 高变倍比小型化中波红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2020, 40(2): 0222001.