

doi: 10.3788/gzxb20124101.0031

新型三反射光学系统设计

李旭阳^{1,2}, 杨洪涛³, 贺天兵¹, 马臻^{1,2}, 李英才¹, 易红伟¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3 山东交通职业学院, 山东 潍坊 261042)

摘 要:随着空间光学技术的发展,对于空间相机地元分辨率的要求越来越高,而且必须具有多光谱成像能力,因此空间相机光学系统的设计要满足视场大和畸变小的要求.本文以共轴三反射光学系统为基础,研究了一种新型的三反射光学系统.该系统不仅中心遮拦小、光学畸变低,而且实现了全色和多光谱 CCD 的合理排布.设计结果表明:当光学系统的焦距为 $f=12\ 000\ \text{mm}$ 、 F 数为 12、成像谱段位于 $450\sim 900\ \text{nm}$ 时,视场角可以达到 1.6° ,光学系统的线中心遮拦比低于 $1/3$,光学畸变量小于 0.5% ,在 $50\ \text{lp/mm}$ 处调制传递函数优于 0.47,成像质量达到衍射极限,可以满足多光谱高分辨率空间相机对地遥感的使用需求.

关键词:光学设计;空间相机;共轴三反射;全色;多光谱

中图分类号: TH703

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)01-0031-5

0 引言

在空间对地遥感领域,无论是军事还是民用领域都对光学系统的分辨率提出了越来越高的要求.采用非球面的反射式光学系统不仅光学零件数量少,无色差,容易实现轻量化,而且使相机的结构紧凑、体积减小、重量减轻,同时在抗热性能方面也有较强的优势.两镜反射式系统最多能校正两种初级像差,其它像差需要折射元件校正,而三反射系统可以同时校正四种初级像差(球差、彗差、像散和畸变),是最少的可以满足消像差、平像场要求的反射式光学系统.本文以二次成像的共轴三反射光学系统为基础,研究了一种结构对称、杂散光抑制能力强、具备多光谱成像能力的三反射光学系统.

1 光学系统参量分析

以 TDI-CCD 为探测器的空间相机系统属于线性不变离散采样系统,其最终的图像质量由光学系统和 CCD 探测器共同决定,光学系统的分辨率则受限于光学系统的衍射极限,探测器的分辨率决定于像元尺寸^[1].

无像差无遮拦理想光学系统的光学衍射极限,即艾里斑直径如式(1)

$$d_{\text{Airy}} = 2.44\lambda F \quad (1)$$

式中: F 为光学系统的 F 数, $F=f/D$; λ 为光学系统的中心波长, $\lambda=0.65\ \mu\text{m}$

根据瑞利条件,当两个像点照度合成曲线的最小值与最大值相差 26% 时,这两点被认为是可以分辨开来的,瑞利判据下像点的直径如式(2)

$$d_{\text{Rayleigh}} = 1.845\lambda F \quad (2)$$

为了满足 CCD 的采样定理,在采样过程中不丢失信息,应该使 $d_{\text{Rayleigh}} = 2P$, 如图 1.

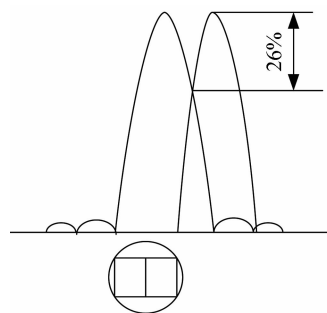


图 1 瑞利条件采样原理
Fig. 1 Rayleigh criterion sampling

$$\text{即: } 1.845\lambda F = 2P \quad (3)$$

式中: P 为 CCD 像敏单元尺寸.

由式(3)可得式(4)

$$\frac{\lambda F}{P} = 1.08 \approx 1 \quad (4)$$

式(4)改写后可得式(5)

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No. 2009CB724006)和西部之光(No. 0929391213)资助

第一作者:李旭阳(1981-),男,助理研究员,博士研究生,主要研究方向为光学设计与辐射定标. Email:lixuyang2004@126.com

导师:李英才(1945-),男,研究员,主要研究方向为空间光学遥感. Email:lyc@opt.ac.cn

收稿日期:2011-04-19;修回日期:2011-07-11

$$\frac{\lambda F}{P} = \frac{1/P}{1/\lambda F} = \frac{2 \times (1/2P)}{1/\lambda F} = \frac{2V_N}{V_C} \quad (5)$$

式中: V_N 为 CCD 传感器的 Nyquist 频率; V_C 为光学系统的截止频率。

$\lambda F/P$ 不仅反映了探测器采样频率与光学系统截止频率的关系, 同时还反映了相机 Nyquist 频率与截止频率的关系^[2]。当 $V_N=1/2V_C$ 时, CCD 的采样频率与光学系统的截止频率一致, 相机系统的 Nyquist 频率为光学系统截止频率的 1/2, 光学系统在 Nyquist 频率处的衍射极限调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 为 0.36 左右。

空间相机系统最终的图像质量由 MTF 和信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR) 两者共同决定^[3], 遥感相机的输出信号幅值由式(6)决定

$$S = \frac{\pi p^2 \Delta t}{4F^2} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \eta(\lambda) \tau(\lambda) L_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

式中: S 为相机的输出信号; λ_{\max} 和 λ_{\min} 定义相机的波段范围; Δt 为积分时间; $\eta(\lambda)$ 为量子效率; $\tau(\lambda)$ 为光学系统透过率; $L_\lambda(\lambda)$ 为入瞳前的光谱辐亮度。

对于成像波段一定的空间相机, 相机的输出幅值与 $(\lambda F/P)^2$ 成反比, 随着 $\lambda F/P$ 的增加相机的输出幅值将大幅降低, 信噪比也将随之降低, 进而影响最终的图像质量。

由以上分析可知, 空间相机的光学系统与 CCD 探测器即相互联系又相互制约。同时由于光学像差和中心遮挡的存在, 本文选择光学系统的 F 数为 12, 探测器的像敏单元尺寸为 $10 \mu\text{m}$, 即 $\lambda F/P=0.78$ 。即可以保证相机光学系统在 Nyquist 频率处衍射 MTF 优于 0.45, 也可使相机获得的图像具有较好的信噪比, 实现相机光学系统与探测器较好的匹配。

2 光学系统初始结构

在空间遥感领域, 折射式光学系统视场角较大, 但受限于结构尺寸和二级光谱等问题, 焦距一般不会太长, 同时还需要采用特殊的光学材料和复杂的结构来消除二级光谱, 应用受到一定的限制^[4]。折反式光学系统则存在体积大、口径受限等问题。而采用非球面的反射式光学系统不仅零件数量相对较少, 无色差, 而且容易实现轻量化, 使结构紧凑、体积减小、重量减轻, 同时在抗热性能方面也有较强的优势, 因此反射式光学系统在空间光学领域得到了广泛应用^[5]。而三反射消像散系统是最少的可以满足消像差、平像场要求的反射式光学系统, 而共轴三反射系统由于加工制造和装配方便得到广泛应用^[6]。

共轴三反射光学系统的初始结构如图 2 所示: M_1 、 M_2 、 M_3 分别代表三反系统的主镜、次镜、三镜,

其结构参量共有 8 个: 三个反射面的半径 (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 , 三个反射面的二次非球面系数 $-e_1^2$ 、 $-e_2^2$ 、 $-e_3^2$ 。

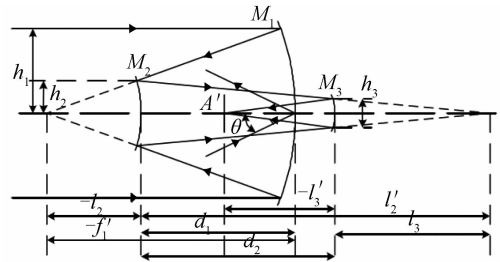


图 2 共轴三反系统的初始结构

Fig. 2 Initial configuration of coaxial three mirrors

三反射光学系统在满足系统焦距及球差、彗差、像散、场曲和畸变条件下剩余三个可变参量, 如果再给定有关结构方面的三个条件, 则整个系统就可以确定了^[7]。

3 光学设计实例

本文的光学系统焦距 $f=12\ 000\ \text{mm}$, 入瞳直径 $D=1\ 000\ \text{mm}$, F 数为 12, 视场角 1.6° 。为了提高 CCD 的行频和转移效率, CCD 传感器采用全色和多光谱分离的形式; 为了能够满足地面幅宽的要求, 使用多片 CCD 进行视场拼接。全色 CCD 每条共有 4 096 个像元, 传感器的像敏单元尺寸为 $10\ \mu\text{m}$, 共有六级积分可选, 全色谱段的 Nyquist 频率为 50 lp/m。多光谱 CCD 分为蓝、绿、红和近红外四个谱段, 每个谱段的像元个数为 1 024 个, 多光谱 CCD 的像敏单元尺寸为 $40\ \mu\text{m}$, 共有五级积分可选, 多光谱谱段的 Nyquist 频率为 12.5 lp/mm。

全色和多光谱 CCD 在像面上呈对称排布, 排布方式如图 3。

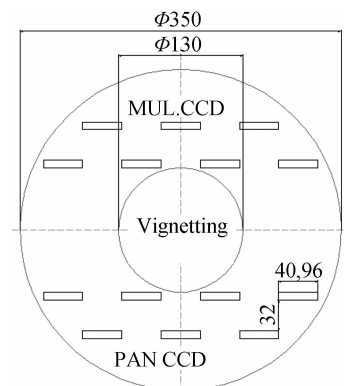


图 3 视场排布

Fig. 3 Field distribution

根据共轴三反射光学系统的初始结构公式计算得到: 光学系统的入瞳位于主镜上, 主镜为接近抛物面的椭球面, 同时为了缩小主次镜的间隔, 主镜采用大相对孔径的反射镜, 次反射镜为凸双曲面, 第三反

射镜采用椭球面. 具体光学参量如表 1.

表 1 光学系统参量

Table 1 Optical system parameter

Name	Radiu/mm	Distance/mm	Conic
Primary mirror	3 000.00	1 000.06	-0.973 1
Second mirror	857.84	2 125.60	-2.315 3
Third mirror	1 203.60	750.00	-0.542 8
Fold mirror 1	Infinity	430.00	0
Fold mirror 2	Infinity	620.15	0

共轴三反射光学系统由于受到自身结构的限制,系统畸变一般不会很小. 通过降低光线的入射高度和减小光线的入射角度能够控制畸变,即通过缩短主次镜的焦距、提高三镜放大率,在有效视场内使畸变量得到有效控制. 同时在光学系统出瞳处 45° 放置折轴反射镜 1 将光路折出,为了缩短系统尺寸再加入一块折轴镜 2 进行光路折叠,为了使 45° 放置的折轴反射镜即不遮拦主次镜的出射光线,又使三镜的出射光线全部经过 45° 放置的折轴镜到达像面,45° 放置的折轴折轴镜的位置选择在靠近一次像面和光学系统出瞳之间. 光学系统形式如图 4.

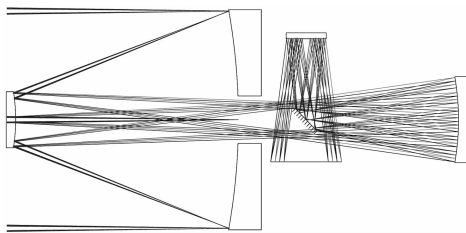


图 4 光学系统形式
Fig. 4 Optical system layout

为了反映整个光学系统的成像情况,分别用调制传递函数、点列图、波像差和视场畸变来评价各个视场的成像质量,分别如图 5~8.

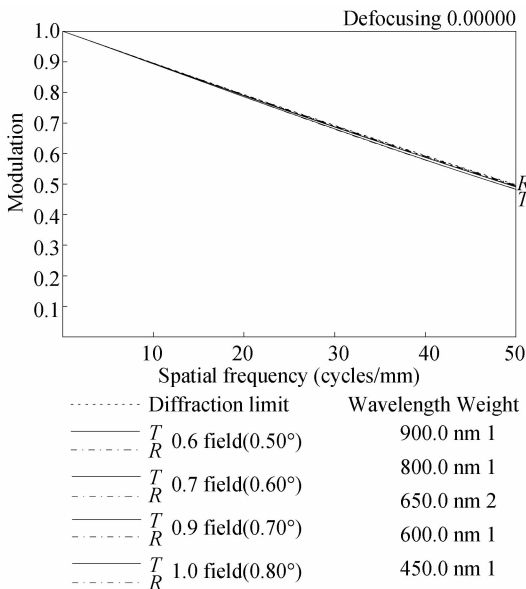


图 5 MTF 曲线
Fig. 5 MTF curve

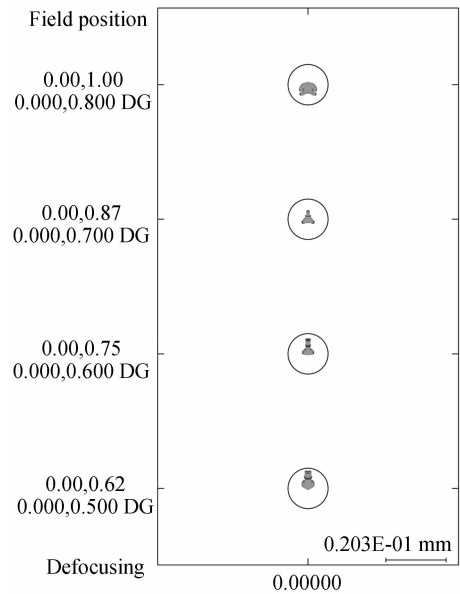


图 6 点列图
Fig. 6 Spot diagram

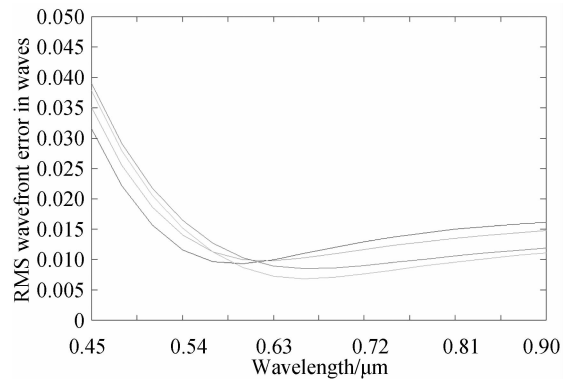


图 7 RMS 曲线
Fig. 7 RMS curve

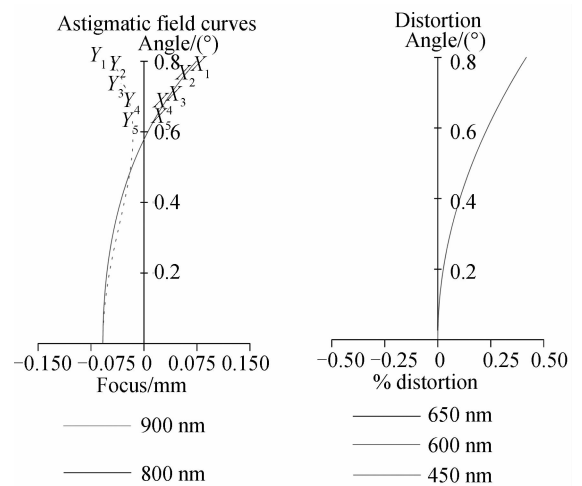


图 8 场曲和畸变
Fig. 8 Field curves and distortion

由图 5 可知所有视场的调制传递函数均达到衍射极限且系统无渐晕,在 50 lp/mm 时各视场 MTF 均达到 0.47,图 6 中各视场光线所成像点的半径均方根值均在 2.4 μm 以内,远小于光学系统的艾里斑直径. 由图 7 可知各个视场在 0.45~0.9 μm 波段内

的波像差 RMS 优于 0.04λ 。图 8 中在各个视场基本无像散,最大视场边缘的光学系统畸变量小于 0.5% ,整个系统成像质量良好。

光学系统的畸变对 TDI-CCD 积分成像的影响如图 9。

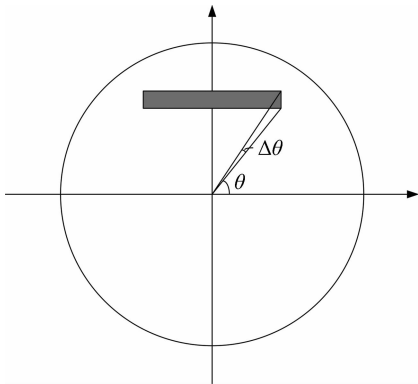


图 9 畸变分析

Fig.9 Distortion analysis

TDI-CCD 在推扫方向上起始点的畸变为 $f(\theta)$,在终点的畸变量为 $f(\theta + \Delta\theta)$,则在推扫方向上的畸变量为

$$f(\theta + \Delta\theta) - f(\theta) \quad (7)$$

利用泰勒级数展开,并忽略高次项,式(7)可改写为式(8)

$$f(\theta + \Delta\theta) - f(\theta) = f'(\theta)\Delta\theta \quad (8)$$

由式(8)可知,当积分级数越多时, $\Delta\theta$ 值越大,则 TDI-CCD 在积分时间内的光学畸变量也越大。本文全色谱段采用 96 级积分时,由光学畸变所引起的像移小于 0.1 个像元,因此光学畸变对推扫成像基本无影响。

本文所设计的光学系统不仅实现了全色和多光谱 CCD 的对称排布,同时光学系统的主反射镜、次反射镜、第三反射镜和 45° 放置的折轴镜沿光轴排布,第二块折轴镜和 CCD 按光轴对称排布,整个系统具有较好的对称性。最后二次成像的三反射系统具有一次像面,便于设计一次像面光阑消除视场外杂光,同时 45° 放置的折轴镜位于光学系统出瞳处,也便于放置里奥光阑再次进行杂光的抑制,系统具有较好的杂光抑制能力^[8-10]。

4 结论

本文所研究的光学系统的成像质量仅与三块非

球面反射镜的面形质量和安装精度相关,而对两块折轴反射镜的安装精度要求较低,从而降低了系统的精度要求和装配难度。两块折轴镜利用了光学系统的中心遮拦和视场排布特征将所用视场合理引出,并通过参量的优化和光焦度的合理分配使有效视场内的光学畸变量低于 0.5% 。与偏视场使用的共轴三反系统相比,增加了有效视场的使用效率,与折轴三反系统相比,减少了折轴镜的安装精度对系统成像质量的影响,降低了装配难度。

同时本文所设计的光学系统体积、质量、外形尺寸、适应性、工艺性都能满足一定的空间应用需求。随着大口径非球面加工技术、微应力装配技术、干涉测量技术、计算机辅助装调技术等在空中光学中的应用,新形式的共轴三反射光学系统也将会得到广泛的使用。

参考文献

- [1] FIETE R D. Modeling the imaging chain of digital cameras [M]. SPIE, 2011, **1**:109-126.
- [2] FIETE R D. Image quality and $\lambda F/P$ for remote sensing systems[J]. *Optical Engineering*, 1999, **38**(7):1229-1240.
- [3] FIETE R D, Comparison of SNR image quality metrics for remote sensing system[J]. *Optical Engineering*, 2001, **40**(4): 574-585.
- [4] 张以谟. 应用光学[M]. 北京:电子工业出版社,2008:309-311.
- [5] LI Xu-yang, LI Ying-cai, MA Zhen, et al. Optical system design of space camera with large F number and long focal length[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7):2093-2097. 李旭阳,李英才,马臻,等. 大 F 数、长焦距空间相机光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7):2093-2097.
- [6] FIGOSKI J W. Alignment and test results of the QuickBird telescope using the ball optical system test facility[C]. *SPIE*, 1999, **3785**:99-108.
- [7] 潘君华. 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**:130-138.
- [8] JANG H S, JUNG D J, LEE S. Optical design of the multi-spectral camera for the high-resolitional earth observation [C]. *SPIE*, 2005, **6024**: 602404.
- [9] LAMPTON M, SHOLL M. Comparison of on-axis three-mirror-anastigmat telescopes[C]. *SPIE*, 2007, **6687**: 66870S1-8.
- [10] FAN Xue-wu, MA Wei-hong, CHEN Rong-li. Study on three-mirror reflective optic system having one image surface [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8):1001-1003. 樊学武,马卫红,陈荣利. 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.

Design of a New Type On-axis Three-mirror-anastigmat Optical System

LI Xu-yang^{1,2}, YANG Hong-tao³, HE Tian-bing, MA Zhen^{1,2}, LI Ying-cai¹, YI Hong-wei¹

(1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(3 *Shandong Transport Vocational College, Weifang, Shandong 261042, China*)

Abstract: With the development of space optical technology, space camera is required to be characterized by both high resolution of ground sample distance and ability of multi-spectral imaging. Thus the optical system design must be satisfied with the demand of large field of view and small distortion. Based on the on-axis three-mirror-anastigmat system, a new type of optical system was designed, which is characterized by small central obscuration, low optical distortion and reasonable arrangement of panchromatic and multi-spectral CCD. The results indicate that the field angle reaches 1.6° , the system line central obscure coefficient is lower $1/3$, the optical system distortion is less than 0.5% , MTF is superior to 0.47 at 50 lp/mm, the image quality reaches the limit of optical diffraction, when the focal length is $12\,000$ mm, focal ratio is 12 , and the spectrum band is from 450 to 900 nm. So the proposed optical system can meet the demand of high resolution multi-spectral space cameras.

Key words: Optical design; Space camera; On-axis three-mirror-anastigmat; Panchromatic; Multi-spectral