

天基紫外跟踪详查光学系统设计

李博 王淑荣* 王俊博

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 为满足天基紫外跟踪观测需求,设计了一套紫外跟踪详查系统,该系统由跟踪相机与详查相机两部分组成。利用望远系统与中继透镜结合的方式实现双视场与双角分辨率。望远系统采用曼金-卡塞格林结构,口径为100 mm,焦距为605 mm。跟踪系统波段范围为250~400 nm,跟踪相机视场为 $2.5^\circ \times 1.9^\circ$,角分辨率优于 $180 \mu\text{rad}$,详查相机波长范围为200~360 nm,视场角为 $0.15^\circ \times 0.11^\circ$,角分辨率优于 $13 \mu\text{rad}$ 。利用光学软件设计并进行分析,跟踪相机与详查相机各视场调制传递函数分别高于0.9和0.8,满足设计指标要求。

关键词 几何光学; 紫外跟踪; 紫外测量; 系统设计

中图分类号 V11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0916003

Optical Design of Space-Based Ultraviolet Tracking and Detailed Reconnaissance System

Li Bo Wang Shurong Wang Junbo

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract A tracking and detailed reconnaissance system is designed for space-based ultraviolet (UV) tracking requirement. The system consists of two parts, tracking camera and detailed reconnaissance camera. Dual field of view and dual angular resolution are achieved by combining telescope system and relay lens. The telescope system is Mangin-Cassegrain structure, with diameter of 100 mm, focal length of 605 mm. For the tracking camera, the wavelength range is 250~400 nm, the field of view is $2.5^\circ \times 1.9^\circ$, and the angular resolution is better than $180 \mu\text{rad}$. For the detailed reconnaissance camera, the wavelength range is 200~360 nm, the field of view is $0.15^\circ \times 0.11^\circ$, and the angular resolution is better than $13 \mu\text{rad}$. The modulation transfer function (MTF) of tracking camera is better than 0.9, and the MTF of detailed reconnaissance camera is better than 0.8. The results meet the requirements of specifications through the design and optical software analysis.

Key words geometric optics; ultraviolet tracking; ultraviolet measurement; system design

OCIS codes 080.2740; 080.3620; 220.2740; 220.4830

1 引言

天基紫外(UV)跟踪观测具有背景信号弱、信噪比高、虚警率低、跟踪精准等特点,与可见、红外观测相比,具有较大的优势。近年来,国外对天基紫外目标观测进行了大量研究。1977年,美国进行了多光谱测量计划(MSMP)实验^[1],获得150 km高空以下低推力火箭发动机喷焰的紫外光谱、空间背景与总辐射强度的数据。仪器波段范围包括真空紫外(VUV)与光谱紫外,实验采用一枚运载火箭发射一个目标发动机和一个装有多光谱测量仪器的敏感

器舱。目标发动机与仪器舱分离后,跟踪器与敏感器舱上的姿态控制系统协同工作,跟踪并探测目标发动机尾羽信号。实验仪器观测到了很强紫外波段信号。1996年,美国弹道中段空间实验(MSX)进行了大量的紫外目标观测跟踪试验,收集了大量的紫外目标与背景数据。MSX采用了高分辨率小视场与低分辨率大视场相结合的观测方式,分别采用了各自的望远系统,因此,系统结构尺寸比较庞大^[2]。美国上一代预警卫星国防支援计划(DSP)也应用了紫外观测跟踪技术。目前,国外已经将紫外探测作

收稿日期: 2013-02-05; 收到修改稿日期: 2013-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(4105014)

作者简介: 李博(1981—),男,博士,助理研究员,主要从事紫外光学遥感技术方面的研究。E-mail: libo0008429@163.com

*通信联系人。E-mail: srwang@ciomp.ac.cn

为防御观测的重要手段之一。

在国内,部分学者已经开展火箭尾羽紫外辐射信号研究^[3-4],日盲紫外技术也已经应用到了机载与车载平台^[5-7],而用于天基紫外的设计及应用尚未开展深入研究。因此有必要对小型化天基紫外跟踪详查系统进行研究^[8-9]。

本文根据天基紫外观测的特点,设计了一套天基紫外跟踪详查系统,该系统具有小型化、多波段、跟踪与详查相结合等优点,能够满足空间应用要求。

2 应用要求及主要技术指标

天基紫外跟踪详查系统要求在 200~400 nm 波段范围内对紫外目标发现并识别。天基紫外跟踪详查系统的应用轨道高度为 400 km,作用距离小于 500 km。根据紫外目标、大气背景及大气光学传输特性,火箭目标高度超过 50 km 后,由于臭氧的减少,大气对紫外波段的吸收作用下降,紫外目标信号增强,紫外跟踪详查系统开始进行目标观测识别。1000 km 射程的火箭尾焰在大气层内约为 300 m,大气层外约为 500 m。

根据约翰逊判据,发现目标光学系统焦面需要占 2 pixel×2 pixel,识别目标光学系统焦面需要占 8 pixel×8 pixel。以火箭大气层内尾羽尺寸为基准,对应的紫外跟踪详查系统 500 km 处空间分辨率至少为 150 m(发现目标)与 37.5 m(识别目标)。为了更精确地跟踪目标,获得更细致的目标形貌,考虑到探测器像素尺寸,天基紫外跟踪详查系统 500 km 处空间分辨率为 90 m×71.5 m(180 μrad×143 μrad)与 6.5 m×5 m(13 μrad×10 μrad)。因此,天基紫外跟踪详查系统应同时具有两个空间分辨率。由于这一特点,紫外跟踪详查系统需包括跟踪相机与详查相机。跟踪相机分辨率较低,长波部分接近可见光,可以观测臭氧层甚至地面的紫外目标,波段范围覆盖 240~400 nm,紫外信号强,探测距离较远,用于发现并跟踪目标^[10-12]。详查相机视场较小,但分辨率较高,该相机波段范围覆盖 200~360 nm,将采用不同中心波长的中性密度滤光片用于目标的高分辨率成像与分析目标型号特征。为提高能量利用率,中等口径的紫外望远系统 F 数一般取 6 左右比较合适,紫外探测器 ICCD 尺寸可取 40 mm 或 25 mm,跟踪相机采用 40 mm 的紫外焦面系统,视场角可取 2.5°,望远系统焦距为 605 mm,口径为 100 mm。详查相机与跟踪相机共用一套望远系统,中继系统对望远系统像面进行二次放大,考虑到目标尺寸,可取 25 mm 紫外焦平

面,在保证 13 μrad×10 μrad 分辨率的情况下,对应物方视场角为 0.15°。

在轨观测时,紫外跟踪详查系统角度调整灵活、可进行大角度范围跟踪、角度响应速度快,万向反射镜观测视场范围有限,因此系统在轨工作将采用 MSX 实时调整卫星姿态的方法实现大范围跟踪详查,快速识别紫外来袭目标。紫外跟踪详查系统主要技术参数如表 1 所示。

表 1 紫外跟踪详查系统主要技术指标

Table 1 Main technical parameters of UV tracking and detailed reconnaissance system

Specification	Detailed reconnaissance camera	Tracking camera
Spectral range /nm	200~360	250~400
Focus length /mm	605	605
Aperture /mm	100	100
ICCD size /mm	40	25
Pixel size /pixel	251×244	251×244
Field of view / (°)	0.15×0.11	2.5×1.9
Resolution /μrad	13×10	180×143

3 紫外跟踪详查光学系统

紫外跟踪详查光学系统由跟踪相机与详查相机组成,二者共用一套曼金-卡塞格林望远系统,经过半透半反分束器形成两个像面。跟踪系统的焦面位于经过分束器反射的像面,分束器透射像面处放置详查系统视场光阑,该处的像经过中继透镜放大成像到详查焦面。

3.1 系统原理及总体结构参数

双视场双分辨率系统通过分束镜与中继透镜二次成像实现同一目标的大视场低分辨率、小视场高分辨率观测,成像原理如图 1 所示。利用分束器将一次成像的像面反射到第一个焦平面,透射光束形成的像需经中继透镜进行二次放大成像。 L_1 为望远物镜到一次实像面的距离, L_2 为中继透镜系统的物距, L_3 为中继透镜系统的像距, f' 为小视场系统焦距, f'_1 为大视系统场焦距, $f'_1 = L_1$, f'_R 为中继透镜系统的焦距, α_1 为像面半视场角, α_2 为二次像面半视场角, M 为中继透镜垂轴放大率。根据几何光学可知,

$$M = \frac{L_3}{L_2}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{f'_R} = \frac{1}{L_3} - \frac{1}{L_2}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{L_1} - (L_1 + L_2) \frac{1}{L_1} \cdot \frac{1}{f'_R}, \quad (3)$$

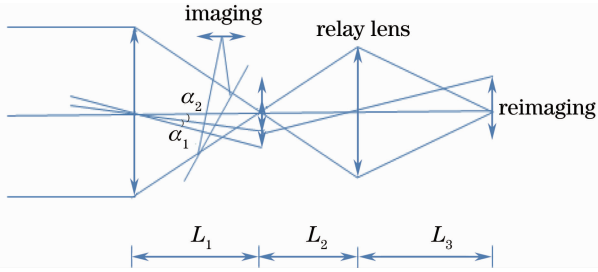


图 1 二次成像原理

Fig. 1 Principle of reimaging

紫外跟踪详查光学系统分辨率需求已知,根据探测器像素尺寸可以获得系统的焦距 f'_1 、 f' 与视场角 α_1 、 α_2 , 中继透镜垂轴放大率 M 可根据跟踪相机分辨率与详查相机分辨率计算得出。根据分辨率要求,紫外跟踪系统初始结构的 M 取 10。由(1)~(3)式可以获得中继系统焦距约为 330 mm, 这样可以基本确立紫外跟踪详查系统总体结构。

3.2 望远系统

根据光学系统结构,首先设计曼金-卡塞格林望远系统,其结构如图 2 所示。由于望远系统与跟踪系统只差半透半反分束器,这也相当于设计跟踪系统。望远镜口径为 100 mm,有效焦距为 605 mm。由于两个波长覆盖范围为 200~400 nm。望远镜各光学元件表面均采用球面,系统前端有一个透镜型校正器,系统后端有两个场校正器。所有折射部件采用高质量的融石英制作。将光束面积遮拦比抑制到 0.25。

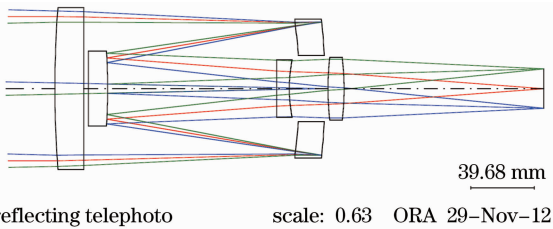


图 2 望远系统结构

Fig. 2 Structure of telescope system

3.3 中继放大系统

中继镜用来将望远系统主焦面成像到详查相机的光电阴极上。中继镜的放大倍率为 10。理论上,给望远镜设计一个更长的焦距也可达到同样效果,但这将使系统结构过于庞大,而且也会影响跟踪系统的视场范围。

初始设计采用物方远心,根据视场与分辨率的要求,中继透镜物高为 2.5 mm,像高为 25 mm(探测器口径为 25 mm),焦距为 330 mm,物方数值孔径为 0.083。紫外波段材料较少,由于光学系统波段范围较宽,为了校正色差,系统由 3 个融石英和

3 个氟化钙材料的镜片组成,中继镜的结构设计如图 3 所示。根据双胶合校正色差的原理,3 个凸透镜采用氟化钙材料。这些材料的热膨胀系数有相当大的差异,所以在设计时不采用双胶合结构。优化结构时要注意控制氟化钙与融石英间距,以保证氟化钙透镜能够进行柔性支撑。

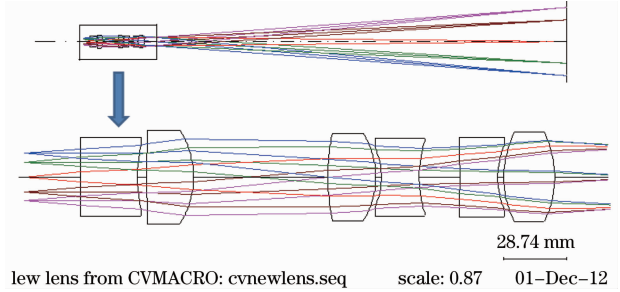


图 3 中继透镜结构

Fig. 3 Structure of relay lens

3.4 整体结构设计及优化

根据望远系统与中继透镜系统结构,合理使用半透半反分束器,能够使光学系统同时具备跟踪与详查两种功能。考虑到 45° 倾斜的平行平板做分束器会产生较大的色差与光轴偏移,分束器的设计需要具有一定独特性,使用两半棱镜组合在一起。斜边的一面镀了一层中性膜,波段范围为 200~400 nm。分束器的两块棱镜均使用融石英块制作,这样即可避免因在会聚光束中插入一倾斜平板而引起固有像差。

利用光学设计软件构建的紫外跟踪详查光学系统整体结构如图 4 所示。根据光学软件多重结构的特点,可对两个像面像质同时优化。跟踪相机与详查相机获得的调制传递函数(MTF)分别如图 5、6 所示;点列图分别如图 7、8 所示;衍射环能分别如图 9、10 所示。设计结果表明,两个相机的 MTF 已经接近衍射极限。两个相机面阵探测器均采用紫外 ICCD,跟踪相机光阴极口径为 40 mm,像素数为 251 pixel \times

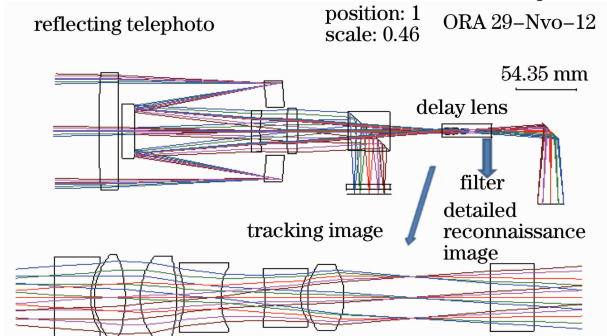


图 4 光学系统整体结构

Fig. 4 Integral structure of optical system

244 pixel,像素尺寸约为0.15 mm,详查相机光阴极口径为 25 mm,像素数为 251 pixel×244 pixel,像素尺寸约为 0.1 mm。设计结果表明,跟踪相机截止频率 3 lp/mm 处 MTF 值高于 0.9,详查相机截止频率 5 lp/mm 处 MTF 高于 0.8,均方根值(RMS)(小于 0.038 mm)与衍射环能(0.08 mm 时均高于 80%)完全满足紫外 ICCD 成像要求。整体光学系统光学参数如表 1 所示。

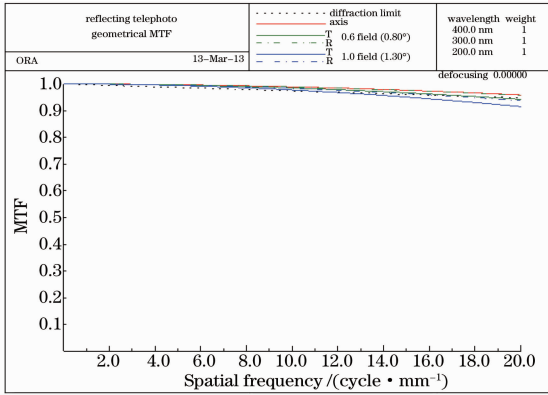


图 5 跟踪相机的 MTF 曲线

Fig. 5 MTF curves of tracking camera

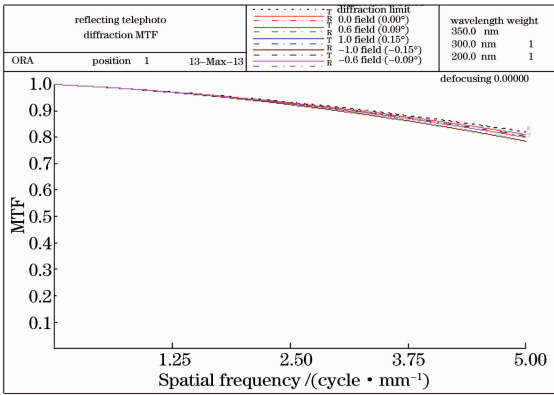


图 6 详查相机的 MTF 曲线

Fig. 6 MTF curves of detailed reconnaissance camera

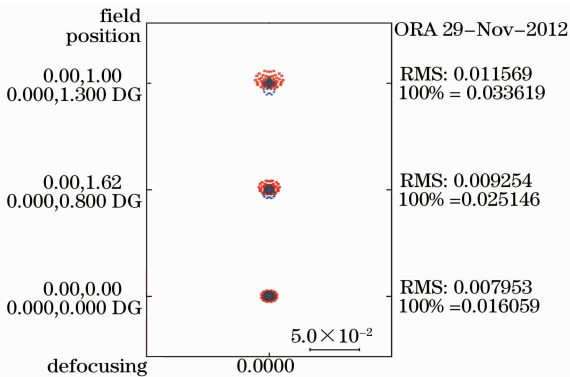


图 7 跟踪相机点列图

Fig. 7 Spots of tracking camera

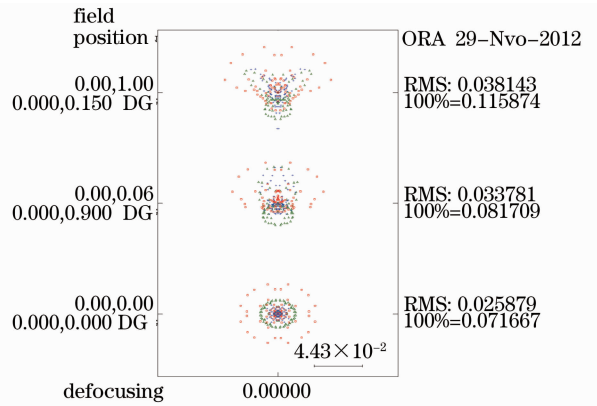


图 8 详查相机点列图

Fig. 8 Spots of detailed reconnaissance camera

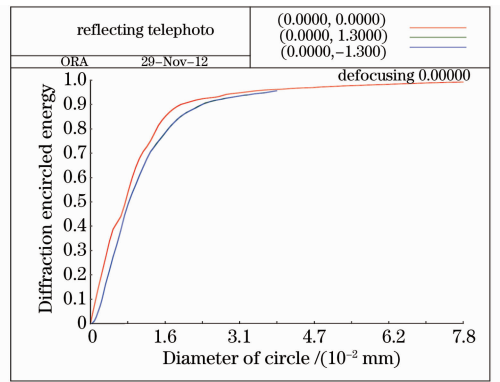


图 9 跟踪相机衍射环能

Fig. 9 Encircled energy of tracking camera

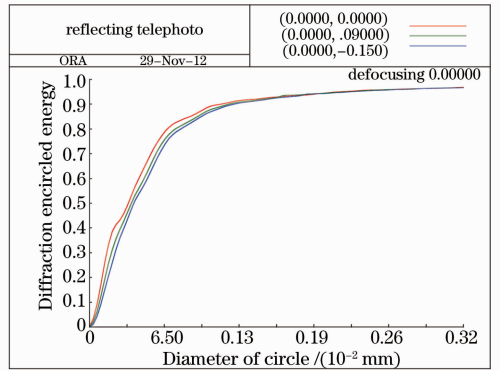


图 10 详查相机衍射环能

Fig. 10 Encircled energy of detailed reconnaissance camera

4 结 论

根据天基紫外观测特点设计了一套紫外跟踪详查系统,该系统包括曼金-卡塞格林望远系统、分束器与中继透镜,其中中继透镜对望远系统成的像进行二次放大。该方法可以实现两种不同空间分辨率观测,低分辨率观测进行跟踪,高分辨率观测进行详查。设计结果表明,该系统成像质量接近衍射极限,

跟踪相机与详查相机各视场 MTF 分别高于 0.9 与 0.8, 满足光学系统指标要求。紫外跟踪详查系统具有结构简单化、集约化、成像质量高、无非球面和易于实现的特点, 适应航天遥感需求。

参 考 文 献

- 1 Adalbert McIntyre. Multispectral measurements program (MSMP) results and status[C]. SPIE, 1978, 156, 116—119.
- 2 Bruce D Guilmain. Midcourse space experiment (MSX), an overview of the program, organization, targets, and schedule [C]. SPIE, 1993, 2232, 188—199.
- 3 Guo Aiyan, Bai Tingzhu, Hu Haihe, *et al.*. Analysis of ultraviolet radiation characteristics of solid propellant rocket motor exhaust plume[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1016002.
国爱燕, 白廷柱, 胡海鹤, 等. 固体火箭发动机羽烟紫外辐射特性分析[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1016002.
- 4 Lou Ying, Bai Tingzhu. A study on UV missile plume emission model[C]. SPIE, 2006, 6031: 60310F.
- 5 Wang Zhengfeng, Fu Xiuhua, Zhang Jing, *et al.*. Research of imaging filter in solar blind ultraviolet alarm system[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1207002.
王正凤, 付秀华, 张 静, 等. 日盲紫外告警系统中成像滤光片的研制[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1207002.
- 6 J L Rapanotti. Fluent-based modeling of rocket exhaust signatures[C]. SPIE, 2006, 6239: 62390S.
- 7 Guo Aiyan, Bai Tingzhu, Tang Yi, *et al.*. UV plume simulation for a solid propellant rocket[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(s1): 295—299.
国爱燕, 白廷柱, 唐 义, 等. 固体火箭发动机羽烟紫外辐射仿真研究[J]. 光学学报, 2009, 29(s1): 295—299.
- 8 Yu Xiangyang, Wang Shurong, Huang Yu, *et al.*. Development of ultraviolet annular imager for earth limb and nadir sounding simultaneously[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1211004.
于向阳, 王淑荣, 黄 煜, 等. 地球临边/天底同时探测的紫外环形成像仪[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1211004.
- 9 Zhang Zhenduo, Wang Shurong. Measurement of extraterrestrial solar ultraviolet spectrum from the solar backscatter ultraviolet spectrometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(6): 061201.
张振铎, 王淑荣. 星载臭氧垂直探测仪地外太阳紫外光谱测量[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(6): 061201.
- 10 R Jeenu, K Pinumalla, D Deepak. Size distribution of particles in combustion products of aluminized composite propellant [J]. J Propulsion and Power, 2010, 26(4): 715—723.
- 11 F W Schenkel, B S Orgorzalek. Auroral images from space: imagery, spectroscopy, and photometry [J]. APL Tech Dig, 1987, 8: 308—317.
- 12 R C Henry, J Murthy, M Allen, *et al.*. Spectroscopy and imaging of the cosmic diffuse UV background radiation [C]. SPIE, 1992, 1764: 61—71.

栏目编辑: 张 腾