

# 城市夜光遥感成像系统设计与杂散光分析

姜守望\*, 夏振涛, 孙永雪, 王珂

上海卫星装备研究所, 上海 200240

**摘要** 根据城市夜光遥感相机研制要求,采用 COOK TMA 离轴三反光学结构形式,设计了一个视场为  $5^\circ \times 2^\circ$ , 焦距为 500 mm,  $F$  数为 3.8, 工作波段为  $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$  的全反射式夜光遥感相机光学系统,采用主镜、次镜、三镜共光轴设计,提高了光学装调的可行性。选择合适的初始结构参数,利用 CODE V 软件进行光线追迹和优化设计,结果表明:光斑的方均根直径为  $2.305 \mu\text{m}$ , 小于  $1/8$  像元,在 25 lp/mm 奈奎斯特频率处的光学调制传递函数大于 0.92, 接近衍射极限。采用外遮光罩、挡光环、光阑及消光漆等消杂光设计来降低杂散光水平,利用 Tracepro 软件对光机系统进行杂散光的仿真分析,结果表明:轴外视场为  $1^\circ \sim 80^\circ$  时,点源透过率在  $10^{-11} \sim 10^{-3}$  量级;太阳抑制角为  $65.96^\circ \sim 80^\circ$  时,点源透过率小于  $1 \times 10^{-9}$ , 满足应用要求。

**关键词** 光学设计; 夜光遥感; 杂散光分析; 遮光罩

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.012201

## Optical Design and Stray-Light Analysis of Urban Night-Light Remote Sensing Imaging System

Jiang Shouwang\*, Xia Zhentao, Sun Yongxue, Wang Ke

Shanghai Institute of Spacecraft Equipment, Shanghai 200240

**Abstract** In this study, an optical system of total-reflection night-light remote sensing is designed using the off-axis three-mirror optical structure of COOK TMA based on the development requirements of the urban night-light remote sensing cameras. Its field of view is  $5^\circ \times 2^\circ$ , focal length is 500 mm,  $F$  number is 3.8, and working waveband is  $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$ . The optical axes of the primary, second, and third mirrors are designed to be coaxial to improve the feasibility of optical installation and adjustment. Initially, the appropriate initial structural parameters are selected. Then, ray tracing and optimization are performed using the CODE V software. Results show that the root-mean-square diameter of the spot is  $2.305 \mu\text{m}$ , which is less than one eighth of a pixel. Further, the optical modulation transfer function is greater than 0.92 at Nyquist frequency of 25 lp/mm, which is close to the diffraction limit. The external baffle, blocking rings, diaphragm, and matte paint are used to decrease the stray-light level. Subsequently, the stray light of the optical-mechanical system is simulated and analyzed using the Tracepro software. The results denote that the point source transmittance is between  $10^{-11}$  and  $10^{-3}$  when the off-axis field of view is  $1^\circ \sim 80^\circ$ . Furthermore, the point source transmittance is less than  $1 \times 10^{-9}$  when the solar suppression angle is  $65.96^\circ \sim 80^\circ$ , which satisfies the application requirements.

**Key words** optical design; night-light remote sensing; stray-light analysis; baffle

**OCIS codes** 220.3620; 120.4820; 230.5160; 290.2648

## 1 引言

夜光遥感是遥感领域发展活跃的一个分支,夜光遥感影像已被广泛用于社会经济参量估算、城市重大事件变革监测以及生态环境评估等

领域<sup>[1-2]</sup>。

目前,具有夜光成像功能的遥感卫星包括搭载可见光成像线性扫描业务系统(OLS)的美国国防气象卫星(DMSP)、搭载可见光近红外成像辐射仪(VIIRS)的美国国家极轨卫星(Suomi-NPP)、吉林

一号卫星和武汉大学珞珈一号卫星<sup>[3-5]</sup>。OLS 和 VIIRS 具有夜光成像功能,但分辨率都较低,只能达到千米级。吉林一号卫星由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制,轨道高度为 656 km,该卫星采用大口径长焦距光学系统,通过凝视成像模式可以获取亚米级分辨率的夜光影像,但其获取的图像帧频低,幅宽仅有十几千米。珞珈一号卫星是全球首颗专业夜光遥感卫星,由武汉大学与长光卫星技术有限公司联合研制,重达 22 kg,该卫星为太阳同步轨道卫星,轨道高度为 645 km,幅宽为 260 km,地面分辨率为 130 m;该卫星采用大相对孔径像方远心光学系统、异形遮光罩杂散光抑制、大像元高灵敏成像器件等技术手段,实现了高灵敏、大动态范围夜光成像,可展现夜光亮度变化的细节,为基于夜光遥感的宏观经济分析等研究提供可靠数据,但其覆盖区域广,地面分辨率低,不能对某一个城市进行更精确的经济参数分析。

为了对同一城市不同时期、不同城市之间以及同一城市中心区域和城郊区域的经济参数进行精确分析,需要获取一定幅宽,具有较高分辨率且图像质量较高的夜光遥感影像。基于此目的,本文主要开展城市夜光遥感成像系统设计和杂散光分析,这对于后续获取城市夜光遥感影像及分析城市经济参数具有十分重要的意义。

## 2 应用要求及主要设计指标

夜光遥感相机工作在 600 km 轨道,要求在 400~800 nm 光谱范围内对地面城市中心区域及城郊区域的夜间灯光进行成像探测,地物分辨率为 24 m,采用高灵敏度背照式微光探测器接收,探测器像元大小为  $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ ,因此可以推算出系统焦距为 500 mm。一般情况下,城市中心区域的跨度约为 20 km,城市中心区域和城郊区域的总跨度约为 50 km,所以该夜光遥感相机的视场大小约为  $5^\circ \times 2^\circ$ 。根据探测器性能、地物分辨率、光学系统传输效率、目标辐亮度以及图像质量要求,综合确定光学系统的  $F$  数为 3.8。根据探测器的性能参数和总体要求,确定该夜光遥感相机的主要光学技术指标如表 1 所示,其中 GSD 为地物分辨率。

表 1 夜光遥感相机的主要光学技术指标  
Table 1 Main optical parameters of night-light remote sensing camera

| Parameter  | Value                    |
|--|--------------------------|
| Orbit altitude /km   | 600                      |
| Focal length /mm   | 500                      |
| $F$ number   | 3.8                      |
| Field angle  | $5^\circ \times 2^\circ$ |
| Pixel /( $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$ )                          | $20 \times 20$           |
| GSD at 600 km/m  | 24                       |
| Spectral region /nm  | 400-800                  |
| Optical transmittance  | $\geq 90\%$              |
| Point source transmittance at solar depression angle                 | $\leq 1 \times 10^{-9}$  |
| Modulation transfer function at $25\ \text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ | $\geq 0.7$               |

## 3 夜光遥感成像系统设计

### 3.1 系统选型

目前,全反射式光学系统是航天遥感相机设计采用的主要结构形式,具有温度敏感性好、谱段范围宽、口径大、焦距长以及轻量化等诸多优点。全反射式光学系统主要分为同轴三反射镜卡塞格林(TMC)系统、离轴三反二次成像(RUGER TMA)系统和离轴三反一次成像(COOK TMA)系统。图 1 所示为 3 种全反射光学系统的光路图。这 3 种全反射光学系统各有特点,其各自的优缺点如表 2 所示<sup>[6-8]</sup>。

对照表 1 可知:系统要求成像观测视场为  $5^\circ \times 2^\circ$ ,面阵成像,该视场较大,对于 TMC 和 RUGER TMA 系统而言,设计难度较大,这两个系统更适用于大视场线阵成像,即一个方向视场较大,另外一个方向视场较小。另外,在 400~800 nm 的光谱范围内,光学透过率要求优于 90%,采用镀增强银膜设计,可使得单个镜子的平均反射率超过 97.5%。对于离轴三反系统来说,光学系统透过率要达到 92% 及以上才能满足设计要求,而 TMC 系统存在中心遮拦,无法达到设计要求。综合考虑设计指标要求,最终选择 COOK TMA 系统结构形式进行夜光遥感相机的光学系统设计。

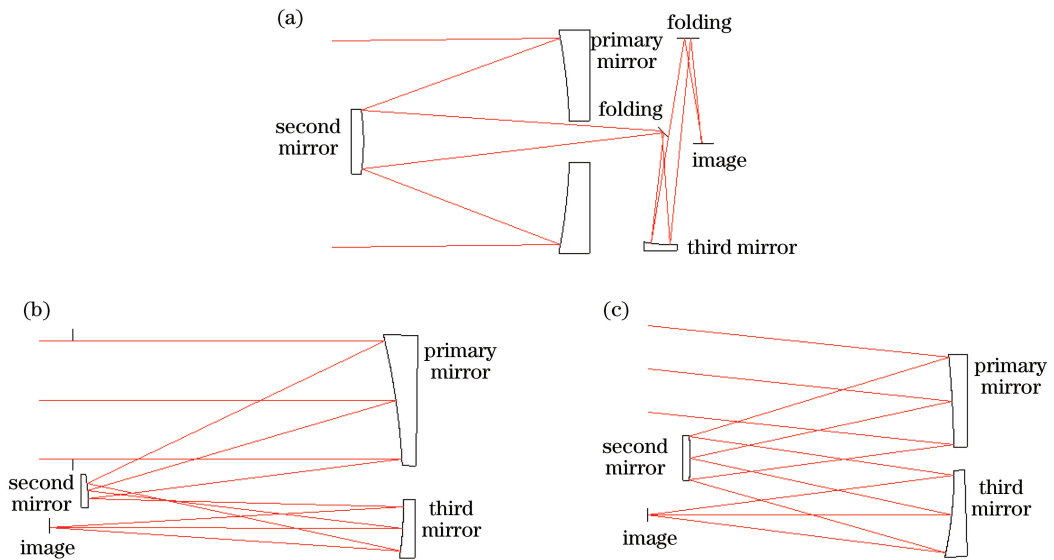


图1 3种全反射式光学系统光路图。(a)同轴三反射镜卡塞格林系统;(b)离轴三反二次成像系统;(c)离轴三反一次成像系统

Fig. 1 Optical path diagrams of three total-reflection optical systems. (a) Coaxial three-mirror Cassegrain system; (b) off-axis three-mirror secondary imaging system; (c) off-axis three-mirror primary imaging system

表2 3种全反射光学系统的优缺点

Table 2 Advantages and disadvantages of three total-reflection optical systems

| System type | Advantage   | Disadvantage   |
|-------------|---|--|
| TMC         | Be suitable for space remote sensor with long focal length and large field (perpendicular to the orbital direction); there is an intermediate image plane, having a strong ability to eliminate stray light; easy to install and adjust | There is a light shield in the center, and the optical efficiency is relatively low; angle of view along the orbital direction is small, about $1^{\circ}$ - $1.5^{\circ}$             |
| RUGER TMA   | There is an intermediate image plane, having a strong ability to eliminate stray light; optical efficiency is relatively high; easy to install and adjust   | System is not rotationally symmetric, and the off-axis of the mirror is large; angle of view is small, about $1.5^{\circ}$ - $3^{\circ}$   |
| COOK TMA    | Field of view is larger, about $3^{\circ}$ - $20^{\circ}$ ; optical efficiency is relatively high; focal length is wide   | There is no intermediate image plane, and stray light suppression is more difficult; mirror is off-axis, and the system is not rotationally symmetric; difficult to install and adjust |

### 3.2 成像系统设计

根据表1中的设计指标要求,选择合适的初始结构,然后利用Code V软件进行光学系统优化设计。考虑到离轴三反光学系统的装调难度较大,在以下三方面进行优化:首先,在系统优化过程中,主、次、三镜采用共光轴设计,即3个镜子的倾斜自由度限制为0,不作为变量,这样可以通过内调焦望远镜定出系统的光轴,将系统光轴作为装调的基准;其次,在光学模型设计过程中,主镜、次镜和三镜的背面相对于光轴为垂直平面,且主镜和三镜的背面共面,这样可以在装调过程中将其背面作为基准;再次,次镜的材

料为石英,内调焦望远镜可以监测次镜的背面是否垂直于光轴,进而判断次镜的调节是否正确。综上所述可知,从光学系统优化、光学模型设计以及材料选择三方面降低了装调难度,最终设计的光学系统的光路如图2所示。

所设计的光学系统的中心视场偏轴为 $8^{\circ}$ ,主镜(PM)与次镜(SM)的间距为355 mm,次镜与三镜(TM)的间距为360 mm,后焦距为415.45 mm,主镜和三镜均为4阶高次非球面,尺寸分别为 $204\text{ mm}\times 166\text{ mm}$ 和 $179\text{ mm}\times 139\text{ mm}$ ,次镜为二次扁椭球面,直径为71 mm。具体的镜面参数如表3所示。

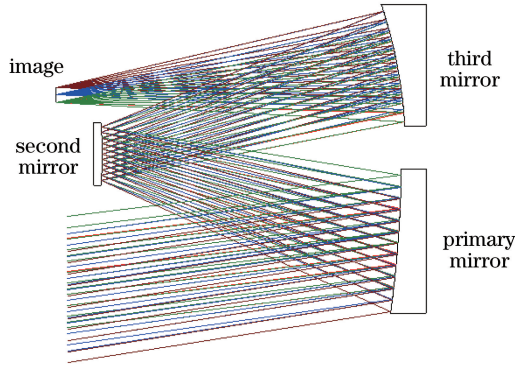


图 2 光学系统的光路

Fig. 2 Optical path diagram of proposed optical system

表 3 镜面参数

Table 3 Parameters of mirrors

| Mirror | Off-axis distance /mm | Radius /mm | Conic coefficient | 4 <sup>th</sup> order term |
|--------|-----------------------|------------|-------------------|----------------------------|
| PM     | -103.6                | -1382.49   | -2.786            | $-5.1460 \times 10^{-11}$  |
| SM     | —                     | -404.84    | 0.759             | —                          |
| TM     | 105.5                 | -561.99    | 0.246             | $2.2440 \times 10^{-11}$   |

### 3.3 像质分析

由图 3 可以看出,各视场弥散斑的方均根(RMS)直径最大值为  $2.305 \mu\text{m}$ ,而所选择探测器的像元尺寸大小为  $20 \mu\text{m}$ ,即小于探测器像元尺寸的  $1/8$ ,成像质量良好,且系统允许的公差较宽松,满足

加工及装调要求。

微光探测器像元的尺寸为  $20 \mu\text{m}$ ,对应的奈奎斯特频率为  $25 \text{ lp/mm}$ ,从图 4 可以看出,该频率处的调制传递函数(MTF)值大于  $0.92$ ,接近衍射极限,故总体满足对微光相机的 MTF 要求。

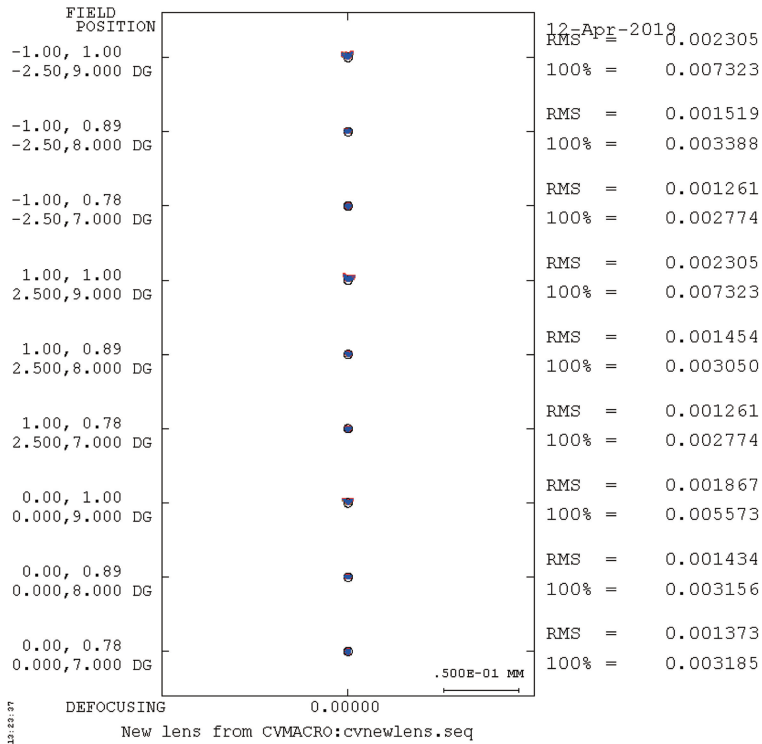


图 3 点列图

Fig. 3 Spot diagram



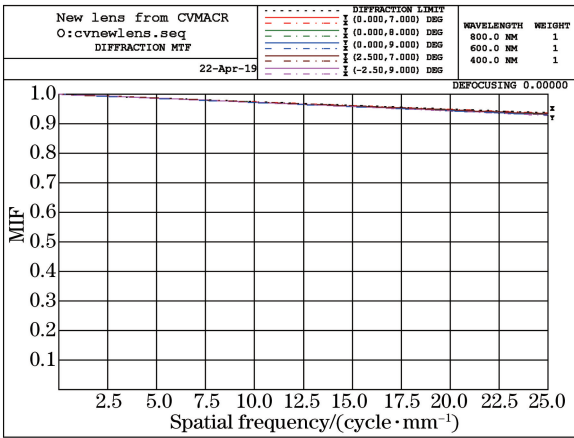


图 4 MTF 曲线

Fig. 4 MTF curves

## 4 消杂光设计与分析

### 4.1 消杂光设计

杂散光对夜光遥感相机的影响比较严重。探测目标的亮度较弱,容易受到轴外视场杂散光的影响,如果在轴外视场引入亮度较强的光源,当光线进入微光相机并到达探测器后,会直接导致探测器饱和,并将目标信号完全淹没,从而无法对视场内的目标进行成像观测,因此,需要对夜光遥感相机的光机结构进行消杂光设计,以提高夜光相机系统抑制杂散光的能力。该夜光遥感相机为离轴三反一次成像光学系统,无中间成像面,较难实现对杂散光的抑制。该系统杂散光的主要来源为轴外视场光线经过光机内部结构一次散射或多次散射到达探测器上的杂散光线。详细的消杂光设计<sup>[9-13]</sup>如图 5 所示。

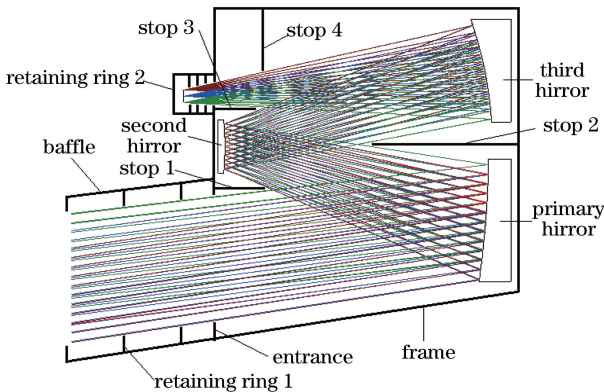


图 5 夜光遥感相机系统图

Fig. 5 System diagram of night-light remote sensing camera

#### 1) 外遮光罩设计

外遮光罩是遮挡杂散光的重要部件。理论上,遮光罩越长,对杂散光的抑制越好,但实际上,遮光

罩的长度会受到卫星总体要求的限制。此外,遮光罩的刚性较差,尺寸太长会降低相机整体的模态,因此需要对外遮光罩的长度进行合理设计。如图 5 所示,外遮光罩主要用来阻止轴外视场的一次反射光线到达相机入光口位置,因此遮光罩的长度  $L$  计算公式为

$$L = \frac{D_0}{\tan \gamma - \tan \omega}, \quad (1)$$

式中: $D_0$  为入光口位置的口径; $\omega$  为系统视场角; $\gamma$  为太阳规避角。由卫星所处轨道高度可以计算出太阳的规避角为  $65.96^\circ$ ;由光学设计可知,入光口在  $X$  方向的口径约为 230 mm,在  $Y$  方向的口径约为 175 mm,在  $X$  方向的视场角为  $\pm 2.5^\circ$ ,在  $Y$  方向视场角为  $\pm 1^\circ$ 。将以上数据代入(1)式,可以计算出外遮光罩在  $X$  方向上的长度为 152.7 mm,在  $Y$  方向上的长度为 114.2 mm。因此,外遮光罩的长度确定为 153 mm。

#### 2) 挡光环设计

对于微光遥感相机,挡光环也是消杂散光的一个重要部件,因此,在外遮光罩的内壁加上挡光环 1 (挡光环的高度为 30 mm,与边缘光线的间隙约为 2 mm,设置三级挡光环),在探测器焦面前加上挡光环 2 (挡光环与边缘光线的间隙约为 2 mm,同样设置三级挡光环)。

#### 3) 光阑设计

根据光学系统的光线走向和相机主框架,可以在相机主框架结构内部设置若干个光阑,以最大限度地减少直接照射到探测器上的一次散射光。根据图 5 可以对光阑的位置进行如下设计:在入光口与次镜之间设置光阑 1;在主镜与三镜之间设置光阑 2;在次镜与探测器之间设置光阑 3;在三镜与探测器之间设置光阑 4。以上光阑与边缘光线的间隙均约为 2 mm。

#### 4) 消光漆喷漆设计

在关键面上需喷涂消光漆,如主镜、次镜和三镜的孔径光阑表面、主框架内壁、各光阑表面以及挡光环表面。为了最大程度地降低杂散光水平,选择型号为 SB-3A 的国产消光漆,该消光漆的吸收率可达 98%,具有很强的消光性能和抗静电性能。

## 4.2 杂散光分析

### 1) 杂散光评价标准

目前,常用点源透过率(PST,  $\alpha_{PST}$ )作为抑制杂散光能力的评价标准,在杂散光分析软件中通常采用点源透过率评价杂散光的水平。点源透过率是评

价不同离轴角度下光学系统对杂散光抑制能力的主要指标,其定义为离轴角为 $\theta$ 的光源(点源或者平行光光源)经过光学系统到达探测器的辐照度 $E_d(\theta)$ 与光源在光学系统入口上的辐照度 $E_i(\theta)$ 之比,即

$$\alpha_{\text{PST}} = \frac{E_d(\theta)}{E_i(\theta)}, \quad (2)$$

分别计算视场外不同离轴角下的 PST,就可以获知光学系统对杂散光的抑制水平。

## 2) 表面散射特性

将上述杂散光仿真分析三维光机模型导入到光学仿真软件 Tracepro 中,并将镜子、结构材料表面的散射特性设置成 ABg 模型,具体各材料表面的散射特性参数如下:对于反射镜镜面,光谱范围为 $0.4\sim 0.8\ \mu\text{m}$ ,反射率 $\geq 97\%$ ,吸收率 $\geq 1\%$ ,双向反射分布函数(BRDF)参数 A、B、g 分别为 0.00076、

0.015、2;对于框架、遮光罩、光阑及挡光环(表面喷 SB-3A 消光漆),吸收率=98%,BRDF 参数 A、B、g 分别为 0.00265、0.1、2。

## 3) 蒙特卡罗追迹和分析

设置光线追迹阈值为 $1\times 10^{-9}$ ,追迹 5000000 条以上光线,分别对 X 方向和 Y 方向进行追迹。在边缘视场的一次散射杂散光较多,与其他角度的杂散光辐射相比也是大量级的杂散光辐射,故均从离轴视场角 $1^\circ$ 开始进行杂散光分析。

对于 X 方向,在视场内 $\pm 2.5^\circ$ 和轴外视场 $3.5^\circ\sim 80^\circ$ 内选取若干个角度进行光线追迹,将追迹得到的结果绘制成 PST 曲线,如图 6 所示。可见:光线在 $4.5^\circ\sim 65.96^\circ$ 内入射时,PST 在 $10^{-10}\sim 10^{-3}$ 之间;而太阳抑制角为 $65.96^\circ\sim 80^\circ$ 时,PST 在 $10^{-11}\sim 10^{-10}$ 之间,满足指标要求。

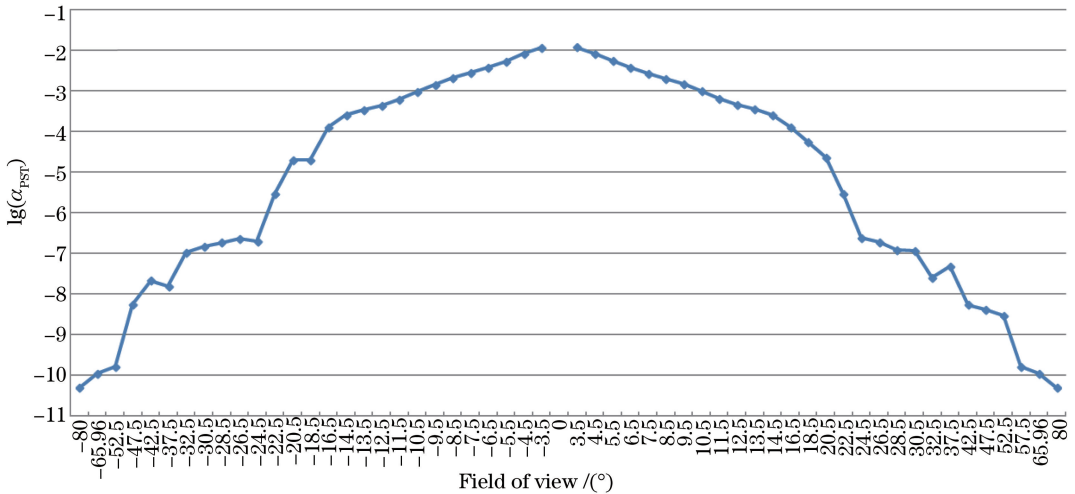


图 6 X 方向的点源透过率曲线

Fig. 6 Curve of point-source transmittance in X direction

对于 Y 方向,在视场 $-7^\circ\sim -9^\circ$ 内,以 $-8^\circ$ 中心视场为零视场,在轴外视场 $1^\circ\sim 65.96^\circ$ 之间选取若干个角度进行光线追迹,将追迹结果得到的数据绘制 PST 曲线,如图 7 所示。可见:光线在 $3^\circ\sim 65.96^\circ$ 的离轴角内入射时,PST 在 $10^{-10}\sim 10^{-3}$ 之间;而太阳抑制角为 $65.96^\circ\sim 80^\circ$ 时,PST 在 $10^{-11}\sim 10^{-10}$ 之间,满足指标要求。

由图 6、7 中的 PST 仿真数据可以看出,本文采取的杂散光抑制措施使得夜光遥感相机能够满足成像质量要求。

## 5 结 论

根据城市夜光遥感相机设计指标的要求,采用 COOK TMA 离轴三反光学结构形式,设计了一个视场为 $5^\circ\times 2^\circ$ ,焦距为 500 mm, F 数为 3.8,工作波

段为 $0.4\sim 0.8\ \mu\text{m}$ 的全反射式微光遥感相机光学系统,在 25 lp/mm 奈奎斯特频率处的 MTF 大于 0.92,接近衍射极限,成像质量良好,轴外视场为 $1^\circ\sim 80^\circ$ 时,点源透过率在 $10^{-11}\sim 10^{-3}$ 量级,太阳抑制角为 $65.96^\circ\sim 80^\circ$ 时,点源透过率小于 $1\times 10^{-9}$ ,满足应用要求。相比于吉林一号卫星,该成像系统具有较大幅宽,能够快速获取覆盖城市夜光的遥感影像,且图像质量较高;相比于珞珈一号卫星,该设计结果可以满足获取较高分辨率城市夜光遥感影像的要求,使研究人员可以更加精确地分析城市经济参数,同时为分析城市经济发展提供了一个性能优良的遥感光学仪器。此外,本设计可与珞珈一号卫星形成互补,对区域和城市经济参数评估分析具有重要意义。后续将进一步对该城市夜光遥感相机的性能进行实验验证。

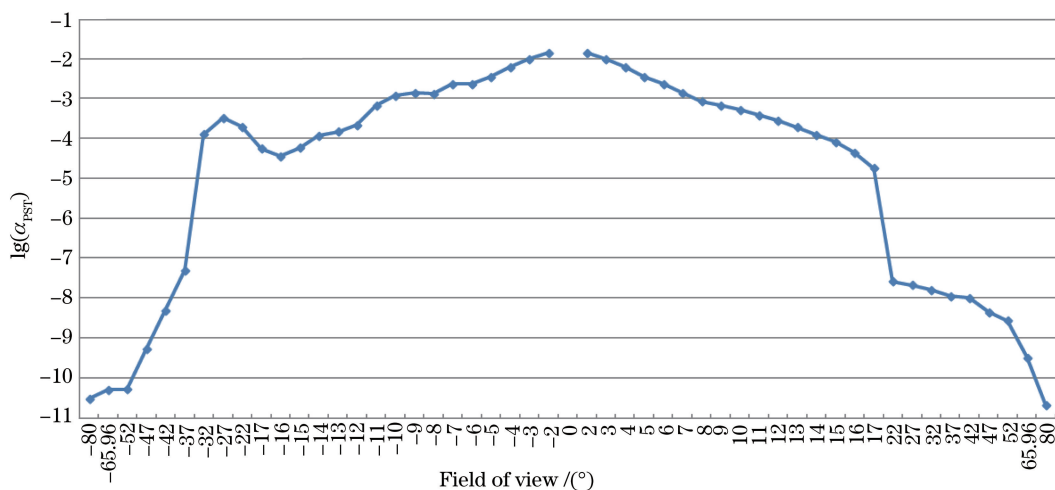


图7 Y方向的点源透过率曲线

Fig. 7 Curve of point-source transmittance in Y direction

## 参 考 文 献

- [1] Li D R, Li X. Applications of night-time light remote sensing in evaluating of socioeconomic development [J]. Journal of Macro-Quality Research, 2015, 3 (4): 1-8.  
李德仁, 李熙. 夜光遥感技术在评估经济社会发展中的应用[J]. 宏观质量研究, 2015, 3(4): 1-8.
- [2] Li X. Study on spatiotemporal change and driving force of resident income of China from 2005 to 2015 based on night light remote sensing data [D]. Nanjing: Nanjing University, 2018: 2-3.  
李翔. 基于夜光遥感数据的中国 2005-2015 年居民收入时空变化与驱动力研究[D]. 南京: 南京大学, 2018: 2-3.
- [3] Xiang S M, Fan X W, He N, et al. Review on low light level remote sensing imaging technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55 (2): 020009.  
向世明, 樊学武, 何娜, 等. 微光遥感成像技术研发动态评述[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 020009.
- [4] Jin G, Xu W, Qu H S. Design of high resolution optical remote sensing satellite with platform and payload integration [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018.  
金光, 徐伟, 曲宏松. 星载一体化高分辨率光学遥感卫星总体设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018.
- [5] Zhang Y T, Chai M Y, Sun D X, et al. Digital TDI technology based on global shutter sCMOS image sensor for low-light-level imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0911001.  
张元涛, 柴孟阳, 孙德新, 等. 全局快门 sCMOS 图像传感器数字 TDI 微光成像技术[J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0911001.
- [6] Zhang X F, Chen L Z, Du S J. Optical system design of off-axis three-mirror camera with resolution of 1 m [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50 (6): 062204.  
张晓飞, 陈力子, 杜少军. 1 m 分辨率离轴三反相机光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50 (6): 062204.
- [7] Xue Q S. Optical design and stray light analysis for large aperture catadioptric star sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0222001.  
薛庆生. 折反式大口径星敏传感器光学设计及杂散光分析[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0222001.
- [8] Qi G. Design and test of large size baffle for off-axis three-mirror space optical remote sensor [D]. Changchun: Jilin University, 2015: 15-41.  
齐光. 离轴三反空间光学遥感器大尺寸遮光罩的结构设计与试验验证[D]. 长春: 吉林大学, 2015: 15-41.
- [9] Mu Y J, Li R, Wan Y, et al. Stray light analysis and suppression for spaceborne lidar system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0510005.  
穆永吉, 李蕊, 万渊, 等. 星载激光雷达系统杂散光分析与抑制[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0510005.
- [10] Zou G Y, Fan X W. Baffle design and stray light analysis of the off-axis three-mirror telescope [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(3): 605-609.  
邹刚毅, 樊学武. 离轴三反射望远镜遮光罩设计与杂散光分析[J]. 光子学报, 2009, 38(3): 605-609.
- [11] Wang C L, Chen G L, Sun S L, et al. Stray light

- analysis of the cook three-mirror off-axis reflective telescope[J]. Science Technology and Engineering, 2006, 6(18): 2822-2823, 2834.
- 王成良, 陈桂林, 孙胜利, 等. 库克三反射离轴望远镜杂散光分析[J]. 科学技术与工程, 2006, 6(18): 2822-2823, 2834.
- [12] Zhang K, He X, Liu Q. Analysis and suppression of stray light in spaceborne visible light camera [J]. Infrared, 2014, 35(9): 10-14.
- 张凯, 何欣, 刘强. 空间可见光相机的杂散光分析与抑制[J]. 红外, 2014, 35(9): 10-14.
- [13] Shu X X. Analysis and suppression of stray light in visible light optical system[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences, 2015: 8-9.
- 舒星星. 可见光光学系统杂光分析及抑制[D]. 成都: 中国科学院大学, 2015: 8-9.