

文章编号:1007-2780(2022)09-1209-07

超宽幅遥感转扫成像分析

谢虹波*, 费 强, 谢新旺, 孙景旭
(季华实验室, 广东 佛山 528200)

摘要:空间遥感成像正朝着小型化、大幅宽和高分辨率的方向发展。区别于常用的沿轨推扫成像方法,本文提出采用反射镜转扫成像的新方法,实现了垂轨千公里级成像。结合卫星运动模型,本文分析了该系统中转扫行频、分辨率以及成像幅宽等计算方法。基于实际的设计参数,文中仿真分析了卫星轨道变化对成像系统的影响。轨道越高,分辨率越低,成像幅宽越大,渡越时间越大,行频越低,对后端读出系统设计要求越低。相反,轨道越低,分辨率越高,成像幅宽越小,渡越时间越小,行频越高,对后端读出系统设计要求越高。

关 键 词:转扫成像;行频匹配;大幅宽

中图分类号:V443⁺.5 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2022-0067

Ultra-wide remotely-sensed rotate-broom scanning imaging analysis

XIE Hong-bo*, FEI Qiang, XIE Xin-wang, SUN Jing-xu

(Ji Hua Laboratory, Foshan 528200, China)

Abstract: Space remote sensing image is developing towards miniaturization, large width and high resolution. Different from the conventional method of push-broom scanning along the orbit, this paper puts forward a new rotate-broom scanning method using the reflector, which can obtain thousand-kilometers-level width. In this system, combining with the satellite motion model, we analyze the calculation methods of scanning line frequency, resolution and image width. Based on the design parameters, we simulate and analyze the influence on the imaging system when the height of satellite orbit changes. When the height of orbit becomes higher, the resolution is lower, the image width is larger, the transit time is larger, the line frequency is lower, and the design requirement for the back-end readout system is lower. On the contrary, when the height of orbit becomes lower, the resolution is higher, the image width is smaller, the transit time is larger, the line frequency is lower, and the design requirement for the back-end readout system is lower.

Key words: rotate-broom scanning image; line frequency matching; large width

收稿日期:2022-03-02;修订日期:2022-03-25.

基金项目:广东省科技计划(No. X190121TC190)

Supported by Science and Technology Planning Project of Guangdong Province(No. X190121TC190)

*通信联系人, E-mail: xiehb@jihualab.com

1 引言

近年来,随着光电成像技术的进步,国防、林业等领域对遥感图像的高空间分辨率、低成本以及高时效性等需求逐步提升,发展轻量化、大幅宽、高性能成像卫星及其星座等逐渐成为主流趋势^[1-2]。国外遥感相机的发展已逐步完成从时间延时积分(TDI)CCD^[3]到CMOS图像传感器的转变,采用CMOS图像传感器既可以实现推扫成像,也可以实现面阵成像,而且大幅度地降低了研制成本和研制周期,且采用CMOS工艺可以很容易和后端的一些数字电路实现单芯片集成,使得航天遥感相机更智能。目前基于CMOS工艺的遥感相机主要分为线阵TDICMOS探测器和面阵CMOS探测器。面阵CMOS探测器可以实现视频成像,且具有更高的动态范围,但是需要配合像移补偿等运用机构;而TDI型的探测器配合运用机构可以实现更大幅宽的成像,更多地被运用在大幅宽推扫成像,通过多片拼接可以实现更宽的幅宽。遥感相机发展的主要方向之一是在保证分辨率的情况下尽可能地扩大幅宽。已有的TDI推扫成像线阵方向都是垂直于飞行方向,在垂轨方向的幅宽依靠探测器的像元数决定,可通过在垂轨方向的多片拼接实现更大的垂轨幅宽,沿轨方向通过卫星飞行速度与行频匹配实现理论上的连续推扫。已有的沿轨推扫方案是目前运用最多的利用卫星的姿轨控以及卫星飞行实现沿轨的大幅宽推扫成像,在垂轨方向采用多片拼接增大幅宽,从而实现对地大面积推扫成像。吉林一号卫星通过垂轨6片探测器拼接实现了136 km、0.75 m的幅宽^[4]。沿轨推扫方案利用卫星本身的姿轨控机构和卫星固有飞行属性实现了推扫,不需要额外的运动机构,大幅简化了相机载荷的整体设计,但是垂轨方向上多片拼接方案会增加系统的成本及装调难度。多片拼接需要更大的焦面,大焦面需要进一步增大光机结构的 F 数,这导致光机结构整体尺寸偏大,光路设计难度更高,这违背了商业航天低成本、小型化、轻量化的初衷。采用垂轨环扫式的光学遥感卫星通过沿轨拼接、垂轨环扫成像方式兼顾了超大幅宽和高分辨率特点,但是已有的垂轨环扫式成像是利用卫星的机动特性实

现的,对卫星的敏捷性和机动能力提出了新的挑战^[5]。

为了满足商业航天的小型化、低成本需求,本文提出了采用反射镜在垂轨方向转扫扫描的方案,可以实现垂轨方向大幅宽成像。相比于以往多片拼接方案,该方案减小了焦面,可以采用小 F 光机设计,有效减小相机整体尺寸和重量,大幅降低成本。本文中阐述的转扫方案实现了在垂轨方向幅宽达到千公里量级,在沿轨方向上通过卫星飞行实现连续成像,最终形成千公里级宽度的连续转扫成像。

2 成像模型

本系统为垂轨转扫成像系统,转扫方向垂直于卫星飞行方向。转扫机构采用旋转反射镜,通过两面镀膜达到两面均可反射的效果,这里简称两面镜。

广域相机成像光路示意图如图1所示,成像区域对应大小为 E 的物体发出的光到达反射镜,经反射后的光到达离轴三反透镜^[6-7],再经过后光路最终到达焦面上。这里把离轴三反透镜及后光路部分统称为聚焦镜组。假定成像区域为 E 的物体,对应焦面上的光斑大小为 δ_E ,遥感相机物距可以近似等效为轨道高度 H ,可以得出成像公式如式(1)所示:

$$\frac{\delta_E}{f} = \frac{E}{H}, \quad (1)$$

式中, f 为成像系统等效焦距。当 δ_E 探测器的最小像元尺寸为 d 时,此时对应的 E 即为地面分辨率(D)。

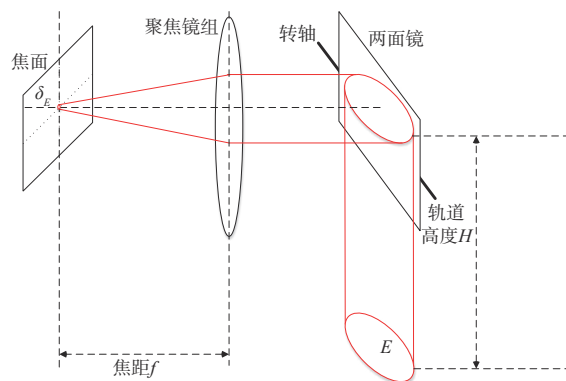


图1 成像光学装置示意图

Fig. 1 Diagram of imaging optical system

2.1 行频匹配

转扫成像系统中一个重要的方面是行频匹配^[8-10],即下一行像元曝光时与上一行像元曝光对应地面相同的成像区域,通过控制转镜转速和探测器曝光时间使两者刚好匹配。行频匹配的精度在一定程度上影响了成像的质量。图1中两面镜匀速转动,转轴垂直于纸面,与飞行方向平行,即两面镜扫摆方向与飞行方向垂直,通过两面镜的转动,可以实现垂轨的宽幅成像。在沿轨方向通过控制扫摆周期使得前后两次扫摆图重合可以实现沿轨连续成像。

考虑沿轨方向相邻两次转扫的图像重叠,设重叠比例为 p ,两面镜转动成像的单面可成像摆角为 θ (由于两面镜转动对应入射光法线转动,因此光学视场成像角度为 2θ)。两面镜属于两面反射,因此每 $180^\circ(\pi)$ 为一个成像周期。轨道高度为 H ,根据万有引力公式可以计算出卫星对应的飞行速度 v :

$$v = \sqrt{\frac{GM_E}{r}}, \quad (2)$$

其中 $r=R+H$, R 为地球半径, M_E 为地球质量,万有引力常量 G 为 $6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ 。

单幅沿轨方向的幅宽与设计指标相关,最终与选用的探测器相关。这里假定 L 为沿轨方向成像区域的幅宽,探测器在沿轨方向的总像素为 N ,则 $L=D \times N$, D 为地面分辨率。

考虑前后图像重叠比例 p ,则可以计算出单幅图像所占的最大时间 T 为

$$T = \frac{(1-p)L}{v}. \quad (3)$$

在时间 T 内对应一个成像周期,即转镜转动 180° ,转镜的角速度为 $\omega = \frac{\pi}{T}$ 。由于转镜转动可成像区域为 θ ,因此成像时间为 $t = \frac{\theta}{\pi} \times T$,这里 θ 和 π 均为弧度制。

探测器的角度分辨率为 $\delta = \frac{d}{f}$,其中 d 为像元尺寸, f 为焦距,因此垂轨方向的行数 $M = \left\lceil \frac{2\theta}{\delta} \right\rceil$,单幅图像的大小为 $M \times N$,对应的行频为 $f_i = \frac{M}{t}$ 。

2.2 分辨率及幅宽

由于地球是一个球体,当转镜转到不同的角度时,物距 S 其实是变化的,角度越大则物距变化越明显,这也就对应地球上的分辨率变化。图2为扫描成像模型。

这里假定对应星下点时,转镜角度对应绝对零点。当光轴转到 α 角时,此时对应地球上的P点,P点与地心连线与相机与地心连线之间夹角为 β ,根据几何关系可以计算出 β :

$$\beta = \arcsin[(1 + H/R) \sin \alpha] - \alpha. \quad (4)$$

由于探测器最小像元为 d ,光学系统的角度分辨率为 $\delta = \frac{d}{f}$,因此 α 角的最小改变量为 δ ,此时对应的地面分辨率 Δx 为

$$\Delta x = R \times \Delta \beta. \quad (5)$$

因此角度 α 处对应的分辨率为

$$\Delta x_\alpha = R \times \left\{ \arcsin \left[(1 + H/R) \sin \left(\alpha + \frac{\delta}{2f} \right) \right] - \arcsin \left[(1 + H/R) \sin \left(\alpha - \frac{\delta}{2f} \right) \right] - \frac{\delta}{f} \right\}, \quad (6)$$

其中 R 为地球半径, H 为轨道高度, f 为光学系统等效焦距, α 为光轴的角度。

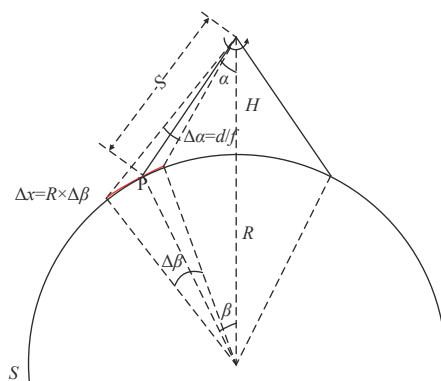


图2 扫描成像模型

Fig. 2 Model of scanning image

垂轨方向的转扫幅宽 W 为

$$W = 2R \times \{ \arcsin[(1 + H/R) \sin \alpha] - \alpha \}. \quad (7)$$

总的幅宽为 $L \times W$,对应的像素数为 $N \times M$ 。

在实际运用过程中,由于地球自转的影响,实际地面物体像移速度是多个速度的合成,存在一个偏流角^[11-12],如图3所示, v_s 为卫星相对地心

的飞行速度; v_m 为沿飞行方向的地移速度, $v_m = \frac{R}{R+H} \times v_s$; v_e 为地球自转速度; θ 为卫星轨道平面的倾角; v_p 为合成速度, φ 为偏流角,通过几何计算可以得到合成速度以及偏流角。为了实现更好效果的成像效果,最好保证转扫方向与合成速度方向正交。

3 成像系统参数分析

以成熟的太阳同步轨道来分析,系统中的一些参数如表 1 所示。对应轨道高度为 600 km 时,对应的卫星飞行速度 v_s 为 7.56 km/s,对应的地移速度 v_m 为 6.91 km/s,星下点分辨率 D 为 4.8 m,沿轨幅宽 L 为 118 km,转镜转动 180° 对应时间 T 为 14.023 s,有效成像时间 t 为 3.355 s,转镜角速度 ω 为 $12.82^\circ/\text{s}$,像元对应的角分辨率 δ 为 8 urad,成像范围 2α 为 $\pm 43^\circ$,垂轨方向总行

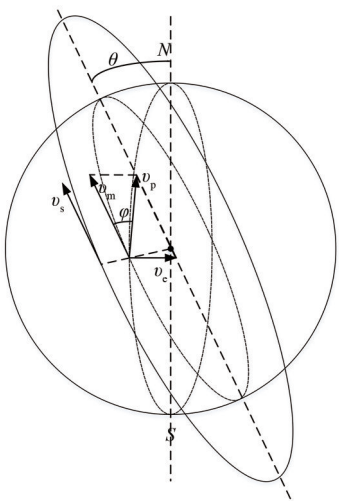


图 3 偏流角
Fig. 3 Drifting angle

数 M 为 187.623 K,垂轨方向幅宽为 1 171 km,行频为 55.93 kHz。当像素深度为 10 bit 时,对应的峰值数据率为 12.8 Gbps。

表 1 成像系统中的参数值

Tab. 1 Parameters of imaging system

H/km	f/mm	$p/\%$	$d/\mu\text{m}$	$\alpha/(\text{^\circ})$	N	M_E/kg	R/km
600	437.5	10	3.5	43°	$24 \times 1\,024$	$5.974\,2 \times 10^{24}$	6 371

前面定义,当光轴对着星下点时,对应地面分辨率最高。当转镜转动到最大摆角时,此时对应地面的分辨率最低,分辨率从 4.8 m 变到 10 m。图 4 是分辨率随着转镜摆角的变化关系。

卫星在轨运行时由于多方面原因,轨道高度会发生变化。轨道高度的变化会影响成像系

统的多个指标。这里假定光学系统参数不变,焦距 f 、重叠部分比例因子 p 、像元尺寸 d 、摆角范围 α 、沿轨总的像素数 N 不变。

轨道高度 H 从 600 km 变到 440 km 时,分辨率与轨道高度的关系如图 5 所示。对应星下点,当轨道高度从 600 km 变到 440 km 时,分辨率从

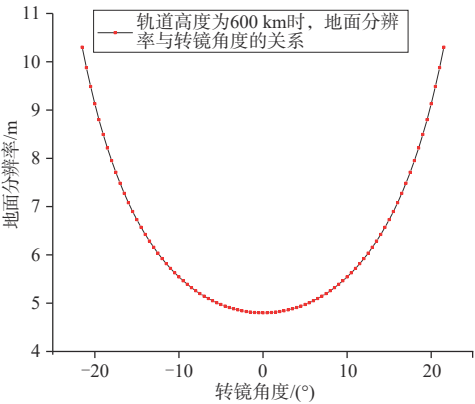


图 4 分辨率与转角的关系
Fig. 4 Relationship between the resolution and rotating degree

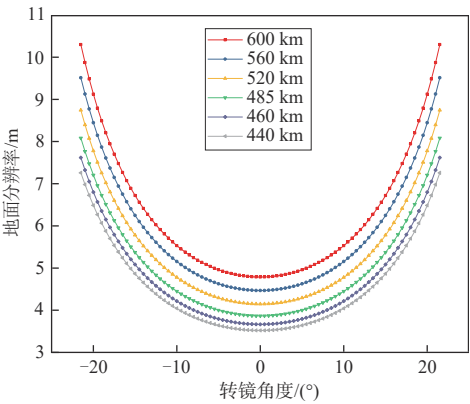


图 5 不同轨道高度下的分辨率与转角的关系
Fig. 5 Relationship between the resolution and rotating degree with different heights

4.8 m变到3.52 m,分辨率与轨道高度是反相关关系。

图6是轨道变化时成像幅宽与轨道高度的变化关系。可以看到高度为600 km时,转扫幅宽可以达到1 170 km。当轨道高度变为440 km时,转扫幅宽为848 km。

为了保证相邻两次转扫图片存在10%重叠,转镜转扫 180° 的周期会随着轨道变化,图7是转镜转扫 180° 的周期与轨道高度的关系。为了满足重叠比例因子 p 不变,当轨道变高时,转镜的转扫周期变大,高度为600 km时,转扫周期 T 为14.04 s,有效成像时间 t 为3.35 s。

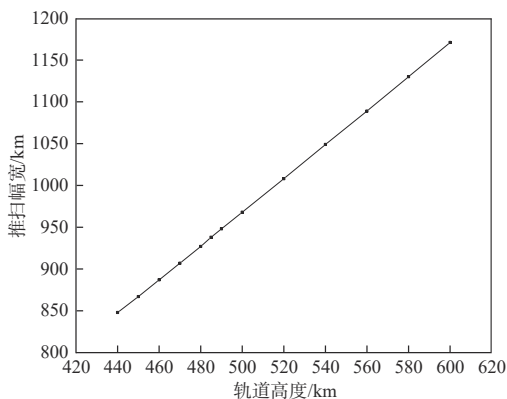


图6 转扫幅宽与轨道高度的关系

Fig. 6 Relationship between the scanning width and orbital height

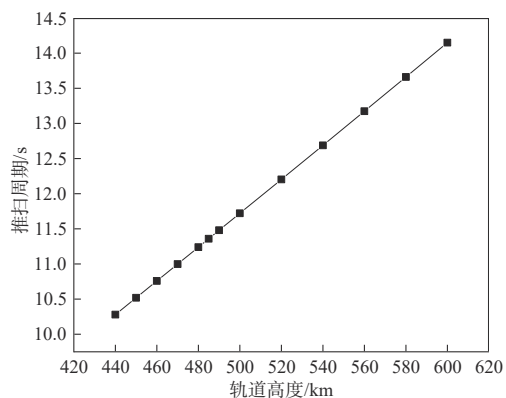


图7 重叠比例因子 p 为10%时,转镜转扫 180° 周期与轨道高度的关系。

Fig. 7 Relationship between the time of rotating 180° and orbital height with 10% overlap

图8表明重叠比例因子 p 不变时,转扫行频与轨道高度成反相关关系。高度越低,行频越

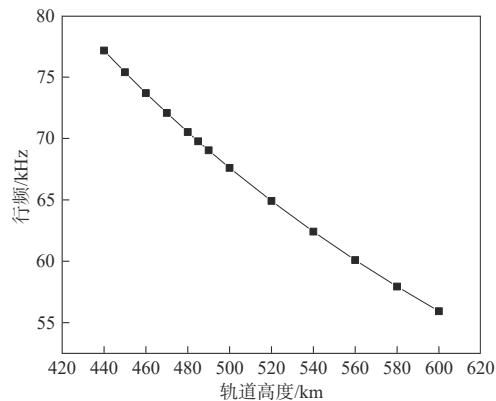


图8 重叠比例因子 p 为10%时,转扫行频与轨道高度的关系。

Fig. 8 Relationship between the scanning line frequency and orbital height with 10% overlap

大,总的的数据率越大。

4 结 论

文中针对超宽幅转扫成像系统进行了分析,重点讨论了轨道变化对成像的影响。在实际工程化过程中有几个方面需要进一步考虑和优化。首先,由于偏流角的存在导致最终的转扫图像是一个平行四边形,在实际工程运用中为了更好地实现TDI成像,可以适当调节卫星的姿态,减小偏流角的影响。另外在轨道高度不变情况下,成像分辨率随转镜角度改变而变化,角度越大,分辨率越低,星下点对应的分辨率最高,这会导致最终的图像在转扫方向存在图像比例不一致,越靠近图像边沿,图像畸变的越明显,这个现象可以通过后期图像处理来优化。

本文针对采用二面镜进行转扫光学成像的遥感相机进行了一些系统分析,从航天运用的角度分析各个指标对成像系统的影响,重点分析讨论了变轨对成像系统的影响,从分辨率、成像幅宽、转扫周期及行频等角度分析轨道高度的影响。轨道越高,分辨率越低,成像幅宽越大,在保证相邻转扫图像重叠比例因子不变情况下,渡越时间越大,行频越低,对后端读出系统设计要求越低;轨道越低,分辨率越高,成像幅宽越小,在保证相邻转扫图像重叠比例因子不变情况下,渡越时间越小,行频越高,对后端读出系统设计的要求越高。本文中涉及的光学系统可实现垂轨方向千公里级的遥感成像,沿轨方向可连续成像,

在遥感成像方面具有很大的实用价值,在实际工程运用中,应该综合考虑,依据本文中的模型和分析结果,结合具体的使用环境,优化系统设计,使其具有一定的鲁棒性。

参 考 文 献 :

- [1] AUGENSTEIN S, ESTANISLAO A, GUERE E, *et al.* Optimal scheduling of a constellation of earth-imaging satellites, for maximal data throughput and efficient human management [C]//*Proceedings of the 26th International Conference on Automated Planning and Scheduling*. London: AAAI, 2016: 345-352.
- [2] 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.
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. (in Chinese)
- [3] 石俊霞,李佩玥,李洪法,等. 遥感TDICCD相机侧摆成像及定位精度优化[J]. 液晶与显示, 2014, 29(5): 777-784.
SHI J X, LI P Y, LI H F, *et al.* Scroll imaging of space TDI CCD remote sensing camera and optimization of image location accuracy [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(5): 777-784. (in Chinese)
- [4] 武红宇,白杨,王灵丽,等. 吉林一号宽幅01星宽幅相机在轨几何定标及精度验证[J]. 光学精密工程, 2021, 29(8): 1769-1781.
WU H Y, BAI Y, WANG L L, *et al.* On-orbit geometric calibration and accuracy verification of Jilin1-KF01A WF camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(8): 1769-1781. (in Chinese)
- [5] 薛武,王鹏,钟灵毓. 线阵垂轨环扫式光学遥感卫星影像几何纠正[J]. 光学精密工程, 2021, 29(12): 2924-2934.
XUE W, WANG P, ZHONG L Y. Geometric correction of optical remote sensing satellite images captured by linear array sensors circular scanning perpendicular to the orbit [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(12): 2924-2934. (in Chinese)
- [6] 张亮,安源,金光. 大视场、长焦距离轴三反射镜光学系统的设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 278-280.
ZHANG L, AN Y, JIN G. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view and long focal length [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 278-280. (in Chinese)
- [7] 杨晓飞,韩昌元. 利用离轴三反镜光学系统确定各镜的装调公差[J]. 光学技术, 2005, 31(2): 173-176.
YANG X F, HAN C Y. Study on decision of alignment priority using mirror tolerance in a three mirror off-axis optical system [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(2): 173-176. (in Chinese)
- [8] 马天波,郭永飞,李云飞. 科学级TDI CCD相机的行频精度[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 2028-2035.
MA T B, GUO Y F, LI Y F. Precision of row frequency of scientific grade TDI CCD camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(9): 2028-2035. (in Chinese)
- [9] 李国宁,韩双丽,张宇,等. TDI CCD相机大姿态角推扫成像行频精确匹配[J]. 电子测量技术, 2015, 38(6): 73-79, 91.
LI G N, HAN S L, ZHANG Y, *et al.* Exact matching for row frequency of TDI CCD camera under the big attitude angle scanning imaging [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2015, 38(6): 73-79, 91. (in Chinese)
- [10] 胡燕,金光,常琳,等. 椭圆轨道TDI CCD相机像移匹配计算与成像验证[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2274-2284.
HU Y, JIN G, CHANG L, *et al.* Image motion matching calculation and imaging validation of TDI CCD camera on elliptical orbit [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2274-2284. (in Chinese)
- [11] 陶淑苹. 数字域TDI CMOS相机调偏流方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(S1): 214-218.
TAO S P. Drift angle adjusting method for CMOS cameras based on TDI in digital domain [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(S1): 214-218. (in Chinese)
- [12] 姬琪,王栋,闫得杰,等. 火星环绕器姿轨控制误差对高分相机像质的影响[J]. 光学精密工程, 2022, 30(2): 185-190.
JI Q, WANG D, YAN D J, *et al.* Influence of attitude and orbit control error of Mars orbiter on image quality of high-resolution camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(2): 185-190. (in Chinese)

作者简介:



谢虹波(1991—),男,江西九江人,博士,助理研究员,2019年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事空间光学遥感器成像系统及量子通信系统的研究。E-mail:xiehb@jihualab.com