

城市夜光遥感相机成像质量分析

孙永雪 姜婷 胡继宝 赵晟达

Imaging quality analysis of urban luminous remote sensing camera

SUN Yongxue, JIANG Ting, HU Jibao, ZHAO Shengda

引用本文:

孙永雪, 姜婷, 胡继宝, 等. 城市夜光遥感相机成像质量分析[J]. 应用光学, 2025, 46(3): 703–708. DOI: 10.5768/JAO202546.0304003

SUN Yongxue, JIANG Ting, HU Jibao, et al. Imaging quality analysis of urban luminous remote sensing camera[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 703–708. DOI: 10.5768/JAO202546.0304003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0304003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

太赫兹时域光谱仪光谱范围和信噪比校准技术

Calibration technology for spectral range and signal-to-noise ratio of terahertz time-domain spectrometer

应用光学. 2023, 44(5): 1068–1072 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0503002>

基于MCRASN的遥感影像变化检测

Remote sensing images change detection based on MCRASN

应用光学. 2024, 45(2): 430–437 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0203005>

低成本小型化遥感光学系统设计

Design of remote sensing optical system with low cost and miniaturization

应用光学. 2024, 45(4): 693–699 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0401004>

基于卫星高光谱遥感的水体和林木面积测绘

Area mapping for water and forest based on satellite hyper-spectral remote sensing

应用光学. 2022, 43(5): 886–892 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0502002>

单光子激光主动探测信噪比数学建模与评估

Mathematical modeling and evaluation of signal-to-noise ratio for single-photon laser active detection

应用光学. 2025, 46(1): 194–201 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0107001>

基于针孔成像面参数提取的单板机镜头显微成像质量评价方法

Method of microscopic imaging quality evaluation for board lens based on image parameter extraction of pinhole imaging

应用光学. 2021, 42(5): 839–847 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0502003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 03-0703-06

引用格式: 孙永雪, 姜婷, 胡继宝, 等. 城市夜光遥感相机成像质量分析 [J]. 应用光学, 2025, 46(3): 703-708.

SUN Yongxue, JIANG Ting, HU Jibao, et al. Imaging quality analysis of urban luminous remote sensing camera[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 703-708.



在线阅读

城市夜光遥感相机成像质量分析

孙永雪, 姜婷, 胡继宝, 赵晟达

(上海卫星装备研究所, 上海 200240)

摘 要: 微光遥感影像被广泛应用于社会经济估算、城市监测、生态环境评估以及公共健康等领域。利用微光遥感在夜间和晨昏时段等低照度条件下进行地物探测, 可与传统的日间遥感形成互补, 形成全天时的对地观测能力。但是在低照度环境下, 遥感相机的成像质量会随着相机进光量的衰减而急剧衰退, 因此, 如何提高图像信噪比是微光遥感需要重点关注的。针对前期研制的某夜光遥感相机的信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 进行了详细分析和建模, 在面阵凝视模式下, 分析信噪比与积分时间、地面辐亮度之间的函数关系, 结果表明: 当积分时间大于 2 ms 时, 信噪比优于 10 dB; 当积分时间大于 15 ms 时, 信噪比优于 20 dB。在条带成像模式下, 分析信噪比与行频及 TDI 级数的关系, 结果表明: TDI 级数一定的情况下, 行频越高, 信噪比越低; 行频一定的情况下, TDI 级数增加, 信噪比增大, 但是信噪比增大的速率随着 TDI 级数增加逐渐减缓。

关键词: 夜光遥感; 信噪比; TDI 级数; 积分时间

中图分类号: TN206; TP702

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0304003

Imaging quality analysis of urban luminous remote sensing camera

SUN Yongxue, JIANG Ting, HU Jibao, ZHAO Shengda

(Shanghai Institute of Spacecraft Equipment, Shanghai 200240, China)

Abstract: Luminous remote sensing images have been widely used in social and economic estimation, urban monitoring, ecological environment assessment and public health. Using luminous remote sensing to detect ground objects in low illumination conditions such as nighttime and twilight, it is complementary to traditional daytime remote sensing to form all-day earth observation capability. However, in low illumination environment, the image quality of remote sensing camera will decline sharply with the attenuation of camera light input, so how to improve the signal-to-noise ratio (SNR) of remote sensing image is the focus of luminous remote sensing. The SNR of a remote sensing camera developed in the early stage was analyzed and modeled in detail. The functional relationship between SNR, integration time and ground radiation brightness was given in the face array staring mode. When the integration time is greater than 2 ms, the SNR is better than 10 dB, and when the integration time is greater than 15 ms, the SNR is better than 20 dB. In strip imaging mode, the relation between SNR and line frequency and TDI series was given. The results show that when the TDI series is constant, the SNR decreases with the increase of line frequency, and when the line frequency is constant, the SNR increases with the increase of TDI series, but the speed of SNR increase gradually slows down with the increase of TDI series.

Key words: luminous remote sensing; signal-to-noise ratio; TDI series; integration time

收稿日期: 2024-05-20; 修回日期: 2024-06-24

基金项目: 国防基础科研基金 (JCKY202203C036)

作者简介: 孙永雪 (1988—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事光学产品研制及卫星综合测试等研究。Email: 983042171@qq.com

引言

随着遥感成像技术的不断发展,遥感影像的类别越来越丰富,其中有关夜光遥感的研究备受关注。夜光遥感影像能够记录低照度条件下地表的可见光和近红外信息,主要来自夜间的灯光。相比日间的遥感影像,夜光遥感影像更能直接反映人类活动,因此,夜光遥感影像被广泛应用于社会经济参量估算、战争分析、生态环境评估以及公共健康等领域^[1-3]。目前,国内外具有夜光遥感功能的卫星主要有:美国军事气象卫星(DMSP)搭载的可见光成像线性扫描业务系统(operational line-scan system, OLS)、美国极轨卫星(S-NPP)搭载的可见红外成像辐射仪(visible infrared imaging radiometer suite, VIIRS)、我国“吉林一号”视频03星及“珞珈一号”。OLS轨道高度833 km,幅宽3000 km,星下点分辨率2.7 km;VIIRS轨道高度824 km,幅宽3040 km,星下点分辨率742 m;“吉林一号”03星轨道高度535 km,幅宽11×4.5 km,星下点分辨率1 m;“珞珈一号”卫星质量22 kg,轨道高度645 km,幅宽260 km,地面分辨率130 m。其中,“珞珈一号”被称为全球首颗专业夜光遥感卫星,是由武汉大学与长光卫星技术有限公司联合研制的科学实验卫星^[4-6]。在微光遥感中,光能量不足导致成像质量快速衰退是不可忽视的问题。本文对前期研制的某夜光遥感相机的成像质量进行分析,分析了不同入瞳辐亮度条件下,不同积分时间和TDI级数对应的信噪比,为该夜光遥感相机的后续测试和使用提供参考。

1 夜光遥感相机设计

根据技术指标要求,研制的夜光遥感相机质量为20 kg左右,实物外形尺寸优于600 mm×300 mm×

500 mm,在600 km轨道可实现7.8 m的星下点分辨率,探测谱段覆盖400 nm~800 nm范围。相机采用离轴三反结构形式,离轴三反光学系统可变自由度较多,装调较为复杂。为了降低相机后续装调难度,在设计阶段,采用主镜、次镜、三镜共轴的设计形式,且主镜和三镜的背部共面,如图1所示,进一步有效减少可调节自由度。

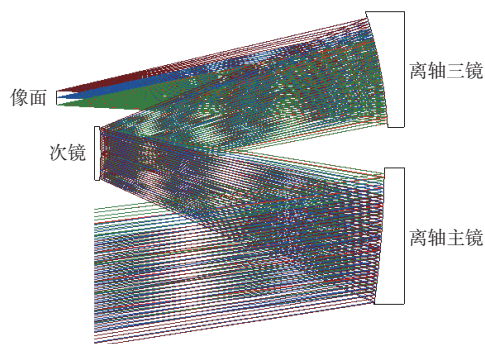


图1 相机光学系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of camera optical system

相机主要由光机主体和电子学单机组成。光机主体主要包括遮光罩组件、反射主镜组件、反射次镜组件、反射三镜组件、焦平面组件、调焦机构、主框架结构。电子学单机主要包括图像采集单元和数据传输单元,如图2所示。图2中,遮光罩组件起到抑制杂散光进入视场的作用;主、次、三镜组成的离轴三反式光学系统起到望远放大作用;焦平面组件可实现光电信号的转换;主框架结构起到连接镜子组件、焦平面组件、调焦机构、电子学单机等各组件结构,以及提供对外安装接口的作用;电子学单机主要实现CMOS面阵探测器驱动控制、图像数据采集传输,以及与卫星平台通信等功能。选用长光辰芯GSENSE2020BSI探测器,感光面积13.3 mm×13.3 mm,像素尺寸6.5 μm,

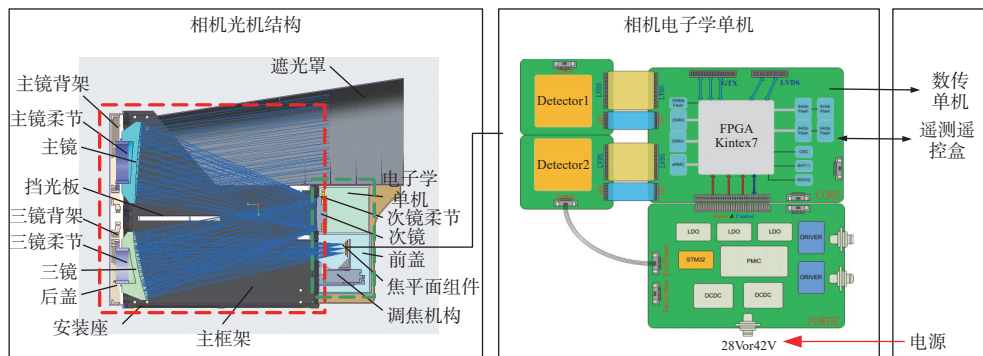


图2 系统组成图

Fig. 2 Composition diagram of system

高灵敏度背照式 CMOS 面阵探测器, 可以增大感光量, 显著提高低照度条件下的拍摄效果。

2 夜光遥感相机成像质量分析

遥感图像的成像质量是一个综合性指标, 大多采用信噪比(SNR)和光学传递函数(MTF)来衡量, 图像的 SNR 反映了图像的灰度分辨率, 图像的 MTF 则反映了图像的空间分辨率^[7-8]。

SNR 即信号与噪声的比值, 是一个无量纲值, 一般用 dB 表示。对遥感相机而言, SNR 定义为辐射光能量在探测器上产生的电子数和噪声电子数之比, 可表示为

$$\text{SNR} = 20 \lg \left(\frac{S}{N} \right) \quad (1)$$

式中: S 为辐射光能量在探测器上产生的电子数; N 为探测器的噪声电子数。

探测器上产生的电子数 S 与到达探测器单个像素表面的光谱辐照度、光谱范围、探测器的量子效率及积分时间有关, 可表示为

$$S = T_{\text{int}} \cdot A_p \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{E(\lambda) \cdot \eta(\lambda)}{f(\lambda) \cdot h} d\lambda \quad (2)$$

式中: T_{int} 为积分时间; A_p 为单个像素面积; $E(\lambda)$ 为像素表面接收的光谱辐照度; $\eta(\lambda)$ 为探测器量子效率; $f(\lambda)$ 为对应波长的频率; h 为普朗克常量。其中, $E(\lambda)$ 可表示为

$$E(\lambda) = \Omega L(\lambda) \tau_0 = \frac{\pi D^2}{4f^2} L_1(\lambda) \tau_\alpha \tau_0 \quad (3)$$

式中: Ω 为辐射能量到达探测器感光面的立体角; $L(\lambda)$ 为相机入瞳处辐亮度; $L_1(\lambda)$ 为地面反射夜光的光谱辐亮度; D 为相机有效口径; f 为相机焦距; τ_0 为光学系统透过率; τ_α 为大气透过率。

由式(2)和式(3)可得:

$$S = T_{\text{int}} \cdot A_p \cdot \frac{\pi}{4F^2} \cdot \tau_\alpha \cdot \tau_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{L_1(\lambda) \cdot \eta(\lambda)}{f(\lambda) \cdot h} d\lambda \quad (4)$$

式中: 相机 F 数为 3.8; 像素面积 $A_p = 6.5 \mu\text{m}^2$; $\eta(\lambda)$ 为 550 nm 处的量子效率(94%); 频率 $f(\lambda) = \frac{c}{\lambda}$; 大气透过率 τ_α 可使用 MODTRAN 仿真软件进行仿真, 一般大气状况良好时可取 0.6。相机采用离轴三反结构形式, 其透过率 τ_0 主要与各子镜反射膜系有关, 子镜膜系为增强银膜, 如图 3 所示。从图 3 可以看出, 在 400 nm~800 nm 光谱范围内, 相机光学系统平均反射率 $r \geq 97.5\%$, 取系统总体光学效率为 $\tau_0 = 92\%$ 。

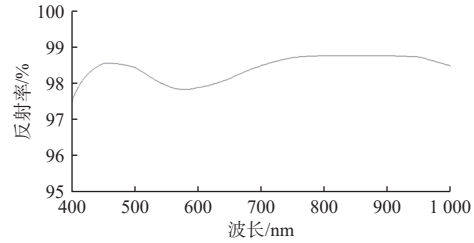


图 3 光学系统反射率

Fig. 3 Reflectivity of optical system

对式(4)进一步优化可得:

$$S = T_{\text{int}} \cdot A_p \cdot \frac{\lambda \cdot \eta}{c \cdot h} \cdot \frac{\pi}{4F^2} \cdot \tau_\alpha \cdot \tau_0 \cdot L_0 \quad (5)$$

式中: $L_0 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_1(\lambda) \cdot d\lambda$ 表示地面反射夜光的积分辐亮度。考虑成像光谱范围 0.4 μm ~0.8 μm , 使用光谱辐射计对典型夜光路灯下地面的辐射亮度进行实测, 测量结果如表 1 所示。

表 1 典型路灯下地面反射积分辐射亮度测量结果

Table 1 Measurement results of ground integral radiance under typical street lamp

景物	$L_0 / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$
繁华路段的景观灯	1.5E-01
主干路(钠灯)	1.5E-02
主干路(LED路灯)	4.09E-03
次干路(LED路灯)	3.01E-03
园区(LED路灯)	2.17E-03

综上所述, 可以得到探测器单像素上产生的电子数 S :

$$S = T_{\text{int}} \cdot A_p \cdot \frac{\lambda \cdot \eta}{c \cdot h} \cdot \frac{\pi}{4F^2} \cdot \tau_\alpha \cdot \tau_0 \cdot L_0 \approx 3\,300\,000 T_{\text{int}} L_0 \quad (6)$$

对于 CCD 探测器, 噪声主要有以下几种^[9-13]:

1) 读出噪声 N_r 。将每个像元的电荷转换为信号, 并将其转换为数字值(ADU 或灰度值)时系统组件产生的所有噪声的组合。

2) 暗电流噪声 N_d 。它是探测器基底材料由于热激发产生的, 即使是在无光照条件下, 热激发效应仍能产生出暗电流, 暗电流使储存在势阱内的电荷数量增加, 从而引起噪声, 其大小与温度有关。

3) 探测器的散粒噪声 N_s 。可以将探测器光生电子的过程看作是独立、均匀、连续发生的随机过程, 单位时间内光生电子的数目并非绝对不变, 而是在一个平均值上做微小的波动, 这一微小的波动便形成散粒噪声, 其分布可近似用离散型泊松分布表示。

上述各项噪声是独立非相关的, 那么总噪声

N 可由各项噪声平方和的平方根表示,即:

$$N = \sqrt{N_r^2 + N_d^2 + N_s^2} \quad (7)$$

式中:读出噪声 $N_r = 1.6$; 暗电流噪声 $N_d = \sqrt{0.2T_{\text{int}}}$; 散粒噪声 $N_s = \sqrt{S}$ 。因此,相机信噪比可表示为

$$\text{SNR} = 20 \lg \left(\frac{3\ 300\ 000 T_{\text{int}} L_0}{\sqrt{1.6^2 + 0.2T_{\text{int}} + 3\ 300\ 000 T_{\text{int}} L_0}} \right) \quad (8)$$

在低照度条件下,提高探测器的感光量是提高成像质量的重要途径。由计算公式(8)可知,探测器选定后,延长积分时间或者加大光学系统的入瞳口径可以增加入瞳辐亮度,进而有效提高信噪比。但是后者会使相机体积增大,带来研制成本倍增,组件加工及装调难度大幅提高等一系列问题,并且给卫星平台的设计、整星的测试及运输和发射等都带来一定难度。延长探测器积分时间,是目前比较多的增加曝光量的方法。结合目前敏捷型微小卫星平台的发展,提高卫星大角度快速姿态机动及高稳定能力,可以有效延长探测器积分时间。

本文采用的相机具备面阵凝视成像和条带推扫成像两种工作模式。

面阵凝视成像模式是通过姿态控制调整卫星姿态,对光学载荷的光轴凝视目标点进行图像采集,实现对地面同一区域在一段时间内持续曝光成像,并且成像时间内载荷与地面目标保持相对静止。不同辐照度下 SNR 与积分时间的关系如图4和图5所示。从图4可以看出,随着积分时间的增加,SNR 增大,但是当积分时间大于 20 ms 后,SNR 增大的趋势逐渐减缓。虽然积分时间原则上不受速高比的限制,可以无限大,但是积分时间越长,对卫星姿态稳定控制精度就越严格。低照度遥感中,一般 SNR 高于 10 dB 的图像是可用的,SNR 达到 20 dB 完全符合成像标准^[1]。由图5可以看出,当积分时间选择 2 ms 时,即可满足在地面辐射亮度 $1.5\text{E-}01 \sim 2.17\text{E-}03 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ 范围内 SNR 优于 10 dB;

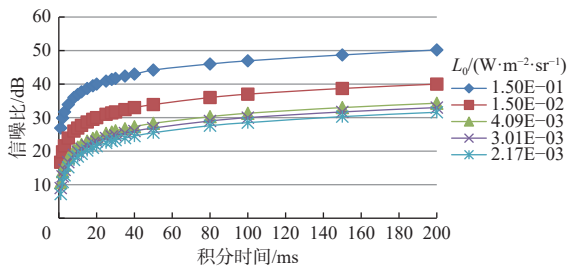


图4 不同积分时间下信噪比 (0~200 ms)

Fig. 4 SNR with different integration time (0~200 ms)

当积分时间选择 15 ms 时,即可满足在地面辐射亮度相同范围内 SNR 优于 20 dB。

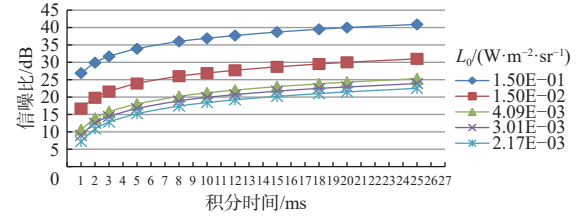


图5 不同积分时间下信噪比 (0~27 ms)

Fig. 5 SNR with different integration time (0~27 ms)

条带推扫成像模式是在成像过程中,卫星姿态不进行机动,利用卫星与地球的相对运动,对地面上沿飞行方向一致的一段区域连续成像,形成长条形遥感图像,并利用拼接技术实现大范围区域成像。该模式下积分时间与星下点像在探测器上的移动速度有关^[14-16],可表示为

$$T_{\text{int}} \leq \frac{a}{v_p} = \frac{a}{\frac{v_G}{H} \cdot f} \quad (9)$$

$$v_G = \frac{R}{R+H} \cdot v_H = \frac{R}{R+H} \cdot \sqrt{\frac{G \cdot M}{R+H}} \quad (10)$$

式中: a 为探测器像素尺寸,取 $6.5 \mu\text{m}$; v_p 为星下点像在探测器上的移动速度,即像移速度; v_G 为星下点的移动速度; H 为卫星轨道高度,取 600 km ; f 为相机焦距,取 500 mm ; R 为地球半径; v_H 为轨道速度; G 为万有引力常数; M 为地球质量。在地面分辨率一定的情况下,单级积分时间只与轨道高度有关。本相机轨道高速为 600 km ,可计算出 $T_{\text{int}} \leq 1.13 \text{ ms}$,即行频要高于 885 Hz 。

针对积分时间短导致曝光量不足的问题,可以采用分级积分的方式增加积分时间,即对同一目标多次曝光,最后将电子数叠加后读出。虽然增加 TDI 级数可以提高相机的信噪比,但是同时会对卫星姿态提出更高的控制精度要求。若卫星姿态控制精度达不到要求,会使像点在探测器上移动,产生非正常的像移,进而导致图像质量下降。若积分级数为 m ,暗电流噪声 $N_{dm} = \sqrt{m0.2T_{\text{int}}}$,散粒噪声 $N_{sm} = \sqrt{mS}$,由于是在像素读出前进行叠加,所以读出噪声不变, $N_{rm} = N_r = 1.6$ 。因此,可推导出:

$$N_m = \sqrt{1.6^2 + m0.2T_{\text{int}} + m3\ 300\ 000 T_{\text{int}} L_0} \quad (11)$$

$$\text{SNR}_m = 20 \lg \left(\frac{m3\ 300\ 000 T_{\text{int}} L_0}{\sqrt{1.6^2 + m0.2T_{\text{int}} + m3\ 300\ 000 T_{\text{int}} L_0}} \right) \quad (12)$$

由公式(12)可以得出 SNR 与行频、积分级数的关系, 如图 6~图 10 所示。由图 6~图 10 可以看出, 积分级数一定的情况下, 行频越高, SNR 越低; 行频一定的情况下, 积分级数增加, SNR 增大, SNR 增大的速率随着积分级数增加逐渐减缓。行频选择 5 kHz, 积分级数选择 10, 可满足 SNR 优于 10 dB; 积分级数选择 70, 可满足 SNR 优于 20 dB。行频选择 10 kHz, 积分级数选择 20, 可满足 SNR 优于 10 dB; 积分级数选择 140, 可满足 SNR 优于 20 dB。行频选择 15 kHz, 积分级数选择 25, 可满足 SNR 优于 10 dB; 积分级数选择 215, 可满足 SNR 优于 20 dB。行频选择 20 kHz, 积分级数选择 35, 可满足 SNR 优于 10 dB; 积分级数选择 285, 可满足 SNR 优于 20 dB。行频选择 25 kHz, 积分级数选择 40, 可满足 SNR 优于 10 dB; 积分级数选择 355, 可满足 SNR 优于 20 dB。

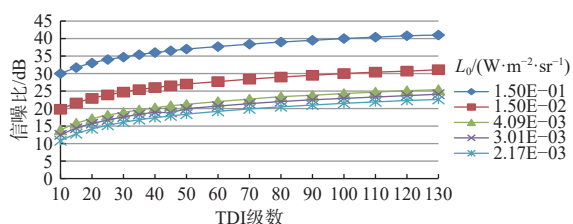


图 6 行频 5 kHz 时不同 TDI 级数下信噪比

Fig. 6 SNR on 5 kHz line frequency with different TDI series

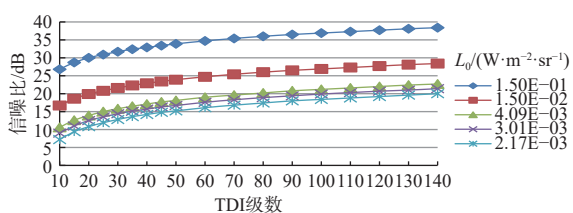


图 7 行频 10 kHz 时不同 TDI 级数下信噪比

Fig. 7 SNR on 10 kHz line frequency with different TDI series

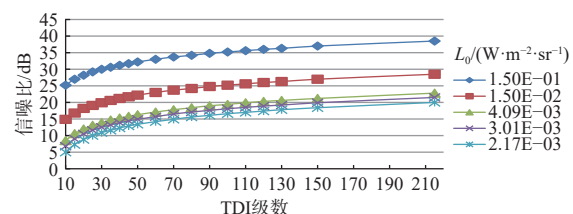


图 8 行频 15 kHz 时不同 TDI 级数下信噪比

Fig. 8 SNR on 15 kHz line frequency with different TDI series

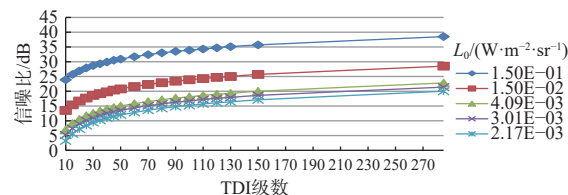


图 9 行频 20 kHz 时不同 TDI 级数下信噪比

Fig. 9 SNR on 20 kHz line frequency with different TDI series

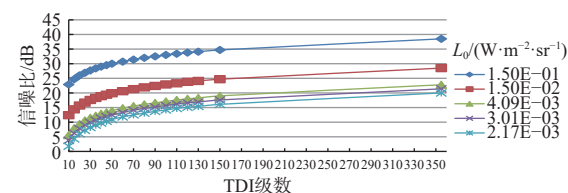


图 10 行频 25 kHz 时不同 TDI 级数下信噪比

Fig. 10 SNR on 25 kHz line frequency with different TDI series

虽然增加积分时间和提高 TDI 级数可以提高信噪比, 但同时对卫星姿态稳定控制精度的要求也会更严格, 所以在选定积分时间和 TDI 级数的同时, 还需要考虑平台控制精度, 避免引起非正常像移, 导致成像质量下降。

3 结论

针对低照度遥感成像的特殊情况, 分别在凝视模式与推扫模式下, 对某项目研制的夜光遥感相机开展信噪比分析, 分析了影响相机信噪比的主要因素。凝视模式下, 采用增加积分时间, 进而增加进光量的方式提高相机的信噪比, 给出了信噪比与辐亮度、积分时间的定量关系。虽然原则上积分时间可以无限大, 但是需要长时间、大角度保持与星下点相对静止, 并且要考虑实际的姿态控制精度。推扫模式下, 采用增加 TDI 级数的方式提高相机的信噪比, 给出了信噪比与辐亮度、行频、TDI 级数之间的定量关系。虽然增加积分级数可以提高信噪比, 但是会引起非正常像移, 进而导致成像质量下降。本文对设计的夜光遥感相机信噪比与影响因素之间的定量关系进行分析, 不仅为后续该相机不同成像模式下的参数选择提供参考, 也为其他低照度遥感相机的成像质量分析提供了思路。

参考文献:

- [1] 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): 1013948.
- LI Deren, LI Xi. Application of night-time light remote sensing in evaluating of socioeconomic development[J]. Journal of Macro-Quality Research, 2015, 3(4): 1013948.
- [2] 郑渊茂, 何原荣, 王晓荣, 等. 夜光遥感数据应用述评与展望[J]. 遥感信息, 2020, 35(3): 1-10.
- ZHENG Yuanmao, HE Yuanrong, WANG Xiaorong, et al. Application review and prospect of nighttime light remote sensing data[J]. Remote Sensing Information, 2020, 35(3): 1-10.
- [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.
- LI Xiang. 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.
- [4] 吴文玉. “珞珈一号”夜光遥感影像质量提升方法研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2021.
- WU Wenyu. Research on the method of improving the quality of Luoja-1 night-light remote sensing image[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2021.
- [5] 郭晗. 珞珈一号科学试验卫星[J]. 卫星应用, 2018, 1(7): 70.
- GUO Han. Luoja-1 scientific experimental satellite[J]. Satellite Application, 2018, 1(7): 70.
- [6] 姜守望, 夏振涛, 孙永雪, 等. 城市夜光遥感成像系统设计及杂散光分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 206-213.
- JIANG Shouwang, XIA Zhentao, SUN Yongxue, et al. Optical design and stray-light analysis of urban night-light remote sensing imaging system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 206-213.
- [7] 薛旭成, 石俊霞, 吕恒毅, 等. 空间遥感相机 TDI CCD 积分级数和增益的优化设置[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 858-862.
- XUE Xucheng, SHI Junxia, LYU Hengyi, et al. Optimal set of TDI CCD integration stages and gains of space remote sensing cameras[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(4): 858-862.
- [8] 陈世平. 关于遥感图像品质的若干问题[J]. 航天返回与遥感, 2009, 30(2): 10-17.
- CHEN Shiping. Some issues about the remote sensing image quality[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2009, 30(2): 10-17.
- [9] 余达, 刘金国, 何昕, 等. 基于电子倍增的高光谱成像链模型的系统信噪比分析[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 29-36.
- YU Da, LIU Jinguo, HE Xin, et al. System signal-to-noise ratio analysis of hyper spectral imaging chain model based on electron multiplication[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 29-36.
- [10] 李广泽, 刘金国, 宁飞, 等. 基于等效成像模型的立体测绘相机成像信噪比分析[J]. 仪器仪表学报, 2021, 33(5): 1097-1101.
- LI Guangze, LIU Jinguo, NING Fei, et al. Imaging SNR analysis of stereo mapping camera based on equivalent imaging model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 33(5): 1097-1101.
- [11] 王新涛, 郑建华, 李明涛. 小行星地基光学监测信噪比分析[J]. 光学精密工程, 2021, 39(12): 2764-2772.
- WANG Xintao, ZHENG Jianhua, LI Mingtao. Analysis of signal-to-noise ratio for space-based optical surveillance of asteroids[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 39(12): 2764-2772.
- [12] 孙成明, 袁艳, 赵飞. 空间目标地基成像探测信噪比分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1655-1659.
- SUN Chengming, YUAN Yan, ZHAO Fei. Analyses of SNR for space-based imaging detection of space object[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(5): 1655-1659.
- [13] 陈新锦, 袁艳, 李立英, 等. 目标探测的信噪比分析[J]. 应用光学, 2007, 28(4): 397-400.
- CHEN Xinjin, YUANYan, LI Liying, et al. Analyses of signal-to-noise ratio for target detection[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(4): 397-400.
- [14] 张洋, 钟兴. 微小卫星低照度遥感成像的信噪比[J]. 应用科学学报, 2017, 35(1): 91-98.
- ZHANG Yang, ZHONG Xing. Signal-to-noise ratio in low light images from microsatellite[J]. Journal of Applied Sciences, 2017, 35(1): 91-98.
- [15] 刘则洵, 万志, 李宪圣, 等. 时间延迟积分 CCD 空间相机信噪比的影响因素[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1830-1836.
- LIU Zexun, WAN Zhi, LI Xiansheng, et al. Influence factors on SNR of TDICCD space camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 1830-1836.
- [16] 王德江, 董斌, 李文明, 等. TDICCD 电荷转移对遥感相机成像质量的影响[J]. 光学精密工程, 2011, 19(10): 2501-2502.
- WANG Dejiang, DONG Bin, LI Wenming, et al. Influence of TDI CCD charge transfer on imaging quality in remote sensing system[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(10): 2501-2502.