

文章编号:1001-5078(2024)06-0929-06

· 红外技术及应用 ·

红外遥感相机成像参数优化研究

金占雷, 晋利兵, 董杰, 吕玮东, 练敏隆, 胡斌, 徐丽娜, 迟冬南, 邓旭光, 张九双, 王斌
(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要:为了更好地优化红外遥感相机成像参数,文章首次提出信噪比-动态范围积相机性能综合评价指标。建立了红外遥感相机的噪声电压模型并深入分析噪声影响,当恒定噪声电压项远大于时变噪声电压项时噪声电压模型可以近似简化为线性模型。进而建模分析了积分电容和积分时间对信噪比和动态范围的影响,并首次提出信噪比-动态范围积作为相机性能评价的指标。信噪比-动态范围积随着积分时间同步增大,积分时间较小时增速较快,积分时间较大时增速迅速下降;信噪比-动态范围积随着积分电容的增大先增加后减小,存在极值。研究结果对红外遥感相机的参数优化设计具有重要作用。

关键词:红外遥感噪声;信噪比;动态范围;信噪比-动态范围积

中图分类号:V447+.1;TH74 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.06.014

Imaging parameters optimization research of infrared remote sensing camera

JIN Zhan-lei, JIN Li-bing, DONG Jie, LV Wei-dong, LIAN Min-long, HU Bin, XU Li-na,
CHI Dong-nan, DENG Xu-guang, ZHANG Jiu-shuang, WANG Bin
(Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to optimize the imaging parameters of infrared remote sensing cameras, a comprehensive evaluation index of signal-to-noise ratio dynamic range product camera performance is proposed in this paper for the first time. A noise voltage model for infrared remote sensing cameras is established and in-depth analysis of the impact of noise is conducted. When the constant noise voltage is much greater than the time-varying noise voltage, the noise voltage model can be approximately simplified into a linear model. Furthermore, the influence of integrating capacitance and integrating time on signal-to-noise ratio and dynamic range is modeled and analyzed, and for the first time, the signal-to-noise ratio dynamic range product is proposed as an indicator for camera performance evaluation. The signal-to-noise ratio dynamic range product increases synchronously with the integration time, with a faster growth rate when the integration time is smaller, and a rapid decrease in growth rate when the integration time is larger. The signal-to-noise ratio dynamic range product increases first and then decreases with the increase of the integral capacitance, and there is an extreme value. The research results play an important role in the parameter optimization design of infrared remote sensing cameras.

Keywords: infrared remote sensing noise; signal-to-noise ratio (SNR); dynamic range (DR); SNR-DR product

1 引言

高信噪比高动态成像一直是红外遥感相机(以下简称“红外相机”)的研究热点^[1-4]。信噪比是目标信号电压和系统噪声电压的比值,提高信噪比第一是提高红外相机采集信号的能力,第二是减小系

统噪声^[5-6];动态范围是饱和电压与平均噪声电压的比值,提高动态范围第一是减小背景占满阱比^[7],第二是减小系统噪声。增加相机口径、降低相机主体温度、抑制电子学噪声等成为提高信噪比、动态范围的主要手段,很多单位都进行了深入研究

并取得了丰硕成果^[8-9]。

有的方法可以同时提高信噪比和动态范围,比如降低相机主体温度可以减小光机背景噪声同时增加有效电压范围从而同时提高信噪比和动态范围,抑制电子学噪声可以减小系统噪声从而同时提高信噪比和动态范围。而有的方法在提高一项性能指标的同时会降低另外一项指标,比如减小积分电容和增加积分时间可以提高信噪比,但却同时会增加噪声而减小动态范围。目前对信噪比和动态范围进行平衡达到相机综合性能最优的研究还比较少,相机成像参数优化目的是合理选择积分电容和积分时间使相机的信噪比和动态范围都处于合理区间,并使综合性能最佳。

本文首先根据相机信号链路建立总噪声电压模型,深入分析恒定噪声电压项和时变噪声电压项影响占比后优化了总噪声电压模型。并且首次提出信噪比-动态范围积作为相机综合性能评价的指标,在信噪比和动态范围权重 1:1 的假设前提下建立了信噪比-动态范围积模型,仿真分析了积分电容和积分时间变化对信噪比-动态范围积的影响,并求得最佳积分电容和积分时间,使相机的信噪比和积分时间同时处于合理范围内并且综合性能最佳。实验结果证明了信噪比-动态范围积模型的正确性,该模型可为相机积分电容和积分时间的优化设计提供理论依据。

2 红外相机噪声建模

2.1 相机信号链路

红外相机镜头收集光信号,滤除波段外无效信息后将有效信号会聚到焦面探测器上,探测器进行光电信号转换输出有效模拟信号,视频电路将模拟信号变换成数字图像信号并进行编码,数字图像信号通过卫星数传设备下传给地面接收设备,地面接收设备进行解码和显示。相机探测器上接收的信号包括相机外部信号和相机内部信号,如图 1 所示。

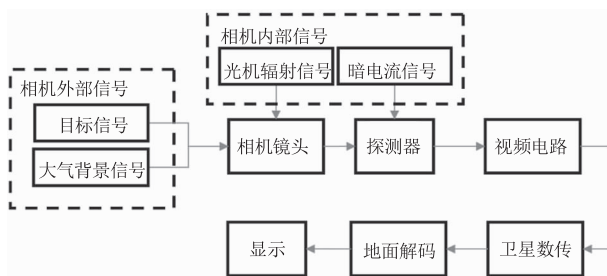


图 1 相机信号传递

Fig. 1 Signal transmission of remote sensing camera

2.2 噪声建模

北京理工大学、华北光电技术研究所从原理层面对遥感相机噪声进行了研究^[10-11]。根据图 1 的相机信号传输过程可知相机系统噪声主要包含光噪声和电噪声,光噪声在系统的前端,包括目标信号噪声、大气背景信号噪声和光机背景信号噪声等;电噪声在系统的后端,包括探测器暗电流噪声、探测器读出电路噪声、视频噪声等,如图 2 所示。

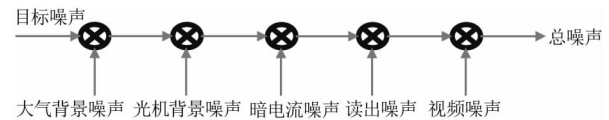


图 2 红外相机噪声来源

Fig. 2 Noises of remote sensing camera

目标在产生有效信号同时,其光子起伏也会产生噪声,目标信号增加与目标噪声的增加是开根号倍数关系。目前是否将目标噪声计入信噪比计算尚无统一说法,为简单起见,本文将目标光子只定义为有效信号,不考虑其光子起伏引起的噪声。

2.2.1 目标响应

假定目标在观测波段内的辐亮度为 L_r ,则目标在焦面探测器单位像元上的光子数 $N_{p,t}$ 为:

$$N_{p,t} = \frac{L_r \tau \Omega}{h\nu} S \eta t \quad (1)$$

式中, τ 是光学系统的传输效率; Ω 为相机的像方孔径角; h 是普朗克常数 $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; ν 是平均光谱频率; S 为探测器像元面积; η 是相机能量集中度,面源目标时 $\eta = 1$; t 是积分时间。

响应电压 U_s 为:

$$U_s = N_{p,t} \phi e / C \quad (2)$$

式中, ϕ 是探测器光电效率; e 是电子电量 $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$; C 是积分电容。

2.2.2 大气背景噪声

假定大气背景在观测波段内的辐亮度 L_a ,在焦面探测器一个像元上的光子数为 $N_{p,a}$ 。光机背景也会在探测器上形成光机背景辐射,一般设计光机温度使光机内辐射远低于大气背景辐射,则大气背景和光机背景在探测器上形成背景噪声电压 $U_{p,n}$ 为:

$$U_{p,n} = \sqrt{N_{p,a}} \phi e / C = \sqrt{\frac{L_a \tau \Omega S t \phi}{h\nu}} e / C \quad (3)$$

$U_{p,n}$ 背景噪声电压受大气背景、光机辐射、积分电容、积分时间的影响。随着积分时间增加,背景噪声绝对值增加,相对占比减小。积分时间的增加有

助于提高信噪比,但积分时间的增加不是无限的,可能要以降低帧频为代价,而且对于地轨相机,由于与背景、目标的相对运动,积分时间的增加可能会带来图像模糊,并不能带来信噪比的提高。减小积分电容会使背景噪声绝对值增加,相对占比减小,也是提高信噪比的有效手段,但是减小积分电容会显著减小动态范围,使用时需综合考虑。除了增加相机积分时间,降低背景噪声主要靠降低大气背景、光机辐射实现,合理选择大气吸收谱段可以大幅减小大气背景辐射。光机背景辐射与工作谱段、光机结构形式、光机温度及滤光片位置有关,光机辐射通过规划温度梯度和降低光机温度实现,同时滤光片应尽量离探测器近且保持低温。

2.2.3 探测器暗电流噪声

探测器性能主要受到暗电流的制约。探测器暗电流产生物理机制主要有扩散电流机制、产生复合电流机制、直接隧穿机制和陷阱辅助隧穿机制^[12]。为了减小暗电流,一般需要将探测器降到一个低温水平,短中波碲镉汞红外器件工作温度为80~100 K。

假设探测器的暗电流是*i*,则暗电流噪声电压 $U_{d,n}$ 为:

$$U_{d,n} = \sqrt{\frac{it}{e}} e/C = \sqrt{ite}/C \quad (4)$$

与背景噪声电压类似,暗电流噪声电压随着积分时间增加,暗电流噪声绝对值增加,相对占比减小,积分时间的增加有助于提高信噪比。对于短波探测器,目前工艺水平暗电流噪声可以做到比背景噪声小一个数量级。

2.2.4 探测器读出电路噪声

1/f 噪声、电容热噪声和固定图形噪声是读出前置放大器电路中最主要的噪声源^[13],读出电路噪声电压定义为 $U_{r,n}$ 。读出电路噪声不随积分时间变化,一般要求读出电路噪声小于满阱背景噪声。

2.2.5 视频电路噪声

视频电路噪声主要有以下来源:量化噪声、电路固有噪声、采样噪声、耦合噪声。量化噪声是由模数转换芯片的有效位数决定的,它决定了模数转换芯片输出能够达到的最高信噪比。电路固有噪声主要来源于有源器件和无源器件在电流流过状态下表现出来的热噪声,可以通过增大电容和电流来减小。采样噪声主要是采样电路中由于时钟抖动引入的幅度噪声,可以通过采用抖动小的时钟源或减小输入

信号频率来减小。耦合噪声是由于数字电路的快速切换影响到模拟电路的信号而产生的噪声,它可以通过合适的数字模拟电路隔离以及提高模拟电路的抗干扰能力来减小。视频电路的总噪声电压用 $U_{v,n}$ 来表示,视频电路噪声不随积分时间变化,由于视频电路的结构和功率比读出电路小,一般视频电路噪声小于读出电路噪声。

2.2.6 噪声的合成

一般目标信号的波动不计入噪声,背景噪声、探测器暗电流噪声、读出电路噪声和视频电路噪声视为相互独立的随机噪声,采用方和根法进行噪声的合成得到相机总噪声电压 $U_{t,n}$:

$$U_{t,n} = \sqrt{U_{p,n}^2 + U_{d,n}^2 + U_{r,n}^2 + U_{v,n}^2} \quad (5)$$

2.3 噪声模型简化

将式(3)、(4)代入式(5)并进行归类组合,相机总噪声电压可以表示为恒定噪声电压项和时变噪声电压项的合成,如式(6)所示:

$$U_{t,n} = \sqrt{\frac{(A+i)et}{C^2} + (1+k_1^2)U_{r,n}^2} \\ = \sqrt{U_{p,i}^2 + U_{e,n}^2} \quad (6)$$

式中, $A = L_a \tau \Omega S \phi e/hv$; $k_1 = U_{v,n}/U_{r,n}$; $U_{e,n} = \sqrt{1+k_1^2}U_{r,n}$ 为恒定噪声电压项, $U_{p,i} = \sqrt{\frac{(A+i)et}{C^2}}$ 为时变噪声电压项。

2.3.1 恒定噪声模型简化

假定 $0 \leq k_1 \leq 1$,则 $\sqrt{1+k_1^2} \approx 1 + \frac{k_1^2}{2}$,工程中恒定噪声电压项可以简化为:

$$U_{e,n} = \sqrt{(1+k_1^2)}U_{r,n} \approx (1+k_1^2/2)U_{r,n} \quad (7)$$

2.3.2 总噪声模型简化

当 $e(A+i)t/C^2 \ll (1+k_1^2)U_{r,n}^2$,即恒定噪声电压项远大于时变噪声电压项时,则相机总噪声电压式(6)可以用式(8)直线拟合进行近似:

$$U_{t,n} = \left(1 + \frac{k_1^2}{2}\right)U_{r,n} + \frac{dU_{t,n}}{dt}t \\ = \left(1 + \frac{k_1^2}{2}\right)U_{r,n} + \frac{1}{2} \frac{\frac{e}{C^2}(A+i)}{\left(1 + \frac{k_1^2}{2}\right)U_{r,n}}t \quad (8)$$

本节对相机总噪声电压模型进行了深入分析,当恒定噪声电压项远大于时变噪声电压项时的总噪声电压模型可以简化为线性模型,为相机总噪声的

评价提供了简化方法。

3 成像参数影响分析

对于红外相机来说信噪比 SNR 和动态范围 DR 越大代表相机性能越高。本文以 A 为确定值,分析探测器积分时间 t 和积分电容 C 变化对成像性能的影响。

3.1 SNR 、 DR 、 R_{SD} 建模

根据公式(2)、(6),红外目标探测信噪比 SNR 和动态范围 DR 可以表示为:

$$SNR = \frac{U_s}{U_{i,n}} = \frac{A \frac{L_T \eta t}{L_a C}}{\sqrt{\frac{(A+i)et}{C^2} + (1+k_1^2)U_{r,n}^2}} \quad (9)$$

$$DR = \frac{U_f}{U_{i,n}} = \frac{U_f}{\sqrt{\frac{(A+i)et}{C^2} + (1+k_1^2)U_{r,n}^2}} \quad (10)$$

由公式(9)、(10)可知, SNR 随着积分电容 C 的减小、积分时间 t 增大而增大,而 DR 与 SNR 变化方向相反,无法让 SNR 、 DR 同时最优。为了让系统整体效能最优,将 SNR 、 DR 视为同等重要,引入信噪比-动态范围积 R_{SD} 作为评判指标, RSD 量纲为 1。

$$R_{SD} = SNR \cdot DR \quad (11)$$

为了直观表示 R_{SD} 与积分时间 t 和积分电容 C 的变化关系,分别将 R_{SD} 对 t 和 C 分别进行求导,结果如下:

$$\frac{dR_{SD}}{dt} = \frac{(1+k_1^2)U_{r,n}^2 U_f A \frac{L_T \eta}{L_a C}}{U_{i,n}^4} \quad (12)$$

$$\frac{dR_{SD}}{dC} = \frac{[(e(A+i)t - (1+k_1^2)U_{r,n}^2 C^2)]U_f A \frac{L_T \eta t}{L_a}}{U_{i,n}^4 C^4} \quad (13)$$

从式(12)可以看出 dR_{SD}/dt 始终大于 0。从式

$$(13) \text{ 可以看出 } C = \sqrt{\frac{e(A+i)t}{(1+k_1^2)U_{r,n}^2}} \text{ 时 } dR_{SD}/dC = 0,$$

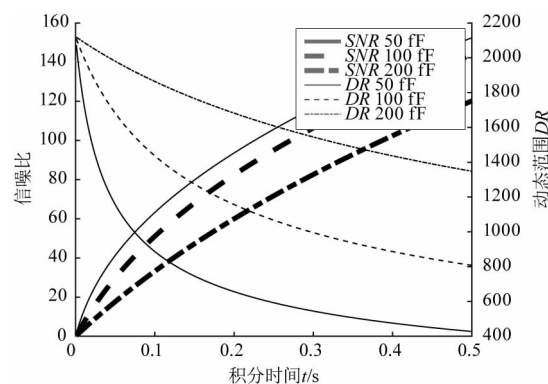
即 R_{SD} 达到最大值。

3.2 实例分析

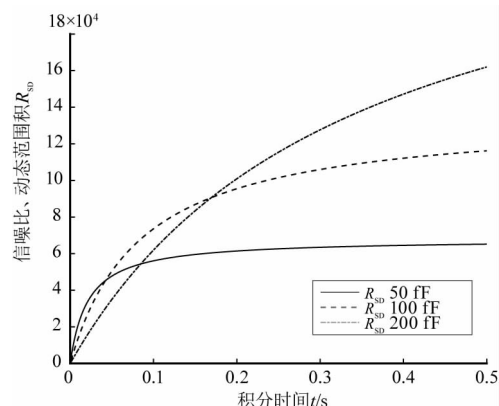
以某红外相机为例,其参数可以表示为 $A = 6.3415 \times 10^{-13}$,满阱电压 $U_f = 2.1 \text{ V}$, $L_T/L_a = 0.2$, $\eta = 0.6$, $(1+k_1^2)U_{r,n}^2 = 1 \text{ mV}^2$, $i \ll A$ 。

3.2.1 积分时间 t 对成像性能的影响

积分时间 t 对成像性能的影响仿真结果如图 3 所示,由图(a)可以看出当积分电容 C 恒定时,随着积分时间 t 的增加, SNR 增加、 DR 下降。由图(b)可以看出信噪比-动态范围积 R_{SD} 在 t 较小时增速较快, t 较大时增速迅速下降。以 $C = 50 \text{ fF}$ 为例,在 $0 < t < 0.1 \text{ s}$ 区间, R_{SD} 由 0 增加到 80%;在 $0.1 \text{ s} < t < +\infty$ 区间, R_{SD} 由 80% 增加到 100%,增加速度明显下降。



(a) 积分时间 t 对信噪比 SNR 和动态范围 DR 的影响



(b) 积分时间 t 对信噪比-动态范围积 R_{SD} 的影响

图 3 积分时间 t 对成像性能的影响

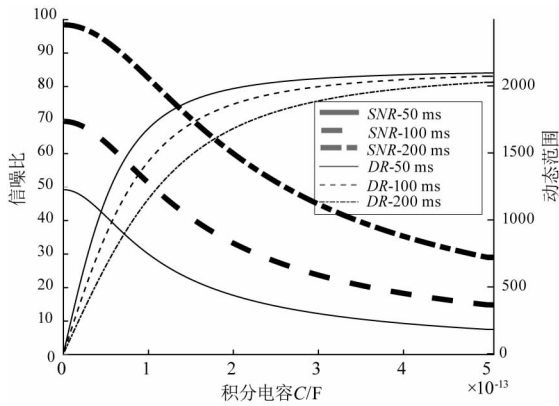
Fig. 3 Effect of t on SNR , DR and R_{SD}

对于 $C = 50, 100, 200 \text{ fF}$ 三种状态,积分电容 C 越大 $R_{SD, \max}$ 越大。从全局看,同时增大积分电容 C 和提高积分时间 t 可以有效提高 R_{SD} ;而在 t 较小时,积分电容 C 越小, R_{SD} 更大,综合优化效果更佳。

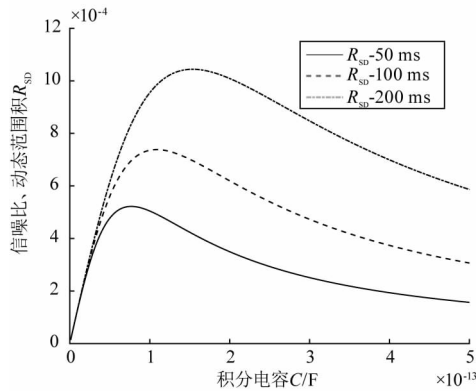
3.2.2 积分电容 C 对成像性能的影响

积分电容 C 对成像性能的影响仿真结果如图 4 所示,由图 4(a)可以看出当积分时间恒定时,随着积分电容增大, SNR 减小, DR 增大。随着积分电容增大,信噪比-动态范围积 R_{SD} 先增大后减小,当

$C = \sqrt{\frac{e(A+i)t}{(1+k_1^2)U_{r,n}^2}}$ 时 R_{SD} 为极大值,如图 4(b)所示。



(a)积分电容C对信噪比SNR和动态范围DR的影响



(b)积分电容C对信噪比-动态范围积 R_{SD} 的影响

图4 积分电容C对成像性能的影响

Fig.4 Effect of C on SNR,DR and R_{SD}

对于 $t = 50, 100, 200$ ms 三种积分时间状态,随着积分增大 $R_{SD,max}$ 对应最佳积分电容 $C_{R,max}$ 越来越大,如图5所示。

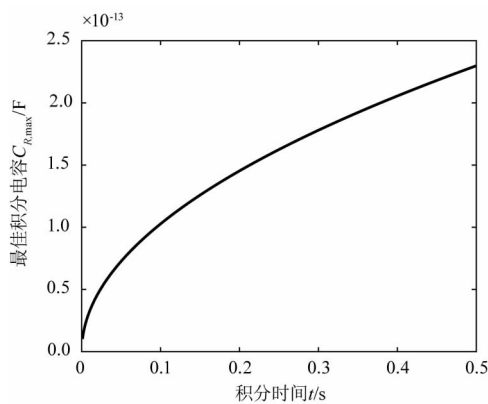


图5 最佳积分电容 $C_{R,max}$ 与积分时间 t 的关系

Fig.5 Relation between $C_{R,max}$ and integration time t

4 实验验证

采用积分电容 $C = 70$ fF、270 K 黑体进行信噪比-动态范围积的实验验证。实验测试结果如表1所示,可以看出随着积分时间 t 的增加,信噪比-动态范围积 R_{SD} 也逐渐增加; t 较小时, R_{SD} 增加较快,

当 t 较大时, R_{SD} 增速迅速放缓。实验结果与图3(b)理论计算结果一致,证明了信噪比-动态范围积 R_{SD} 模型的正确性。

表1 R_{SD} 和积分时间关系测试结果

Tab.1 Results between R_{SD} and integration time t

积分时间 t /ms	信噪比-动态范围积 R_{SD} ($C = 70$ fF)
5	3770.4
10	6650.6
20	11147.0
50	18077.1
100	23459.9
150	26570.0

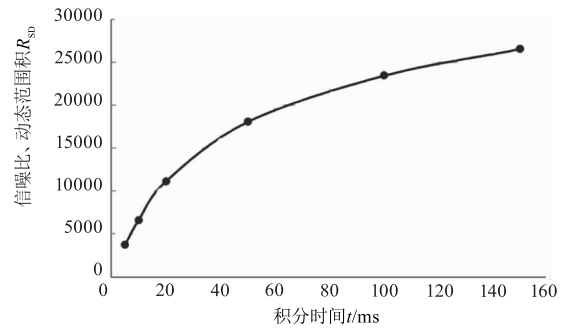


图6 R_{SD} 随着 t 同步增大

Fig.6 R_{SD} increases with t synchronously

5 结论

本文建立了红外相机噪声电压模型,并在深入分析噪声影响后得到恒定噪声电压项远大于时变噪声电压项时的线性简化噪声电压模型。首次引入信噪比-动态范围积相机性能评价参数,假定信噪比和动态范围权重 1:1 建立了信噪比-动态范围综合积模型,仿真分析了积分电容、积分时间与综合积的函数关系,并求得综合积最优时的积分电容。进行了积分电容 70 fF 的信噪比-动态范围积 R_{SD} 的实验验证,实验结果与理论仿真结果一致:当 t 较小时, R_{SD} 增加较快,当 t 较大时, R_{SD} 增速迅速放缓,证明了信噪比-动态范围综合积理论模型的正确性。本文为红外相机设计时噪声的评估计算,积分电容和积分时间的参数选择和优化提供理论依据。

参考文献:

[1] Wen Gaojin, Wang Hongmin, Zhong Can, et al. Optimization method for infrared nonuniformity parametric correction based on image entropy[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2021, 42(4): 91-98. (in Chinese)

- 文高进,王洪民,钟灿,等.基于图像熵的红外非均匀性参数化校正优选方法[J].航天返回与遥感,2021,42(4):91-98.
- [2] Li Xiaoman, Zhao Yanhua, Ma Wenpo. Analysis of the means to improve the temperature sensitivity of thermal IR remote sensing system[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(8):1655-1660. (in Chinese)
李晓曼,赵艳华,马文坡.热红外传感器温度灵敏度提升手段简析[J].遥感学报,2021,25(8):1655-1660.
- [3] Lü Yuan, Cong Mingyu, Zhao Yini, et al. Research on real-time absolute radiometric calibration technology of infrared cameras[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(7):106-119. (in Chinese)
吕原,丛明煜,赵旖旎,等.红外相机实时绝对辐射定标技术研究[J].红外与激光工程,2022,51(7):106-119.
- [4] Wang Wei, Zhang Luhe. On-orbit modulation transfer function test for short-wave infrared camera[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(12):1228009. (in Chinese)
王伟,张露鹤.短波红外相机调制传递函数在轨测试[J].激光与光电子学进展,2024,61(12):1228009.
- [5] Zhong Yu, Wu Xiaoyan, Huang Shucai, et al. Sensitivity analysis of SNR model for satellite-based infrared detector[J]. Infrared Technology, 2014, 36(7):582-587, 595. (in Chinese)
钟宇,吴晓燕,黄树彩,等.星载红外探测器信噪比模型灵敏度分析[J].红外技术,2014,36(7):582-587,595.
- [6] Cao Yiming, Zhang Wei, Cong Mingyu. Analysis of signal-to-noise ratio calculation for satellite-based infrared staring sensor[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(4):191-195. (in Chinese)
曹移明,张伟,丛明煜.星载红外凝视相机信噪比计算分析[J].宇航学报,2007,(4):955-959.
- [7] Liu Tianjiao. Research on infrared camera large dynamic range testing technology[D]. Changchun: Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2022:10-11. (in Chinese)
刘天娇.红外相机大动态范围测试技术研究[D].长春:中国科学院大学,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2022:10-11.
- [8] Wu Limin, Zhou Feng, Wang Huaiyi. Research of operation range model for detecting moving point target in deep space background[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2010, (3):21-26. (in Chinese)
吴立民,周峰,王怀义.深空背景下运动点目标探测距离模型研究[J].航天返回与遥感,2010,(3):21-26.
- [9] Tang Hongchen, Xu Peng, Ruan Ningjuan, et al. Detection of hypersonic moving point target[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2018, 39(6):46-54. (in Chinese)
唐宏晨,徐鹏,阮宁娟,等.高超声速运动点目标检测[J].航天返回与遥感,2018,39(6):46-54.
- [10] Ma Ning, Liu Sha, Li Jiangyong. Analysis on spatial noise and temporal noise of IR thermal imager[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(6):717-721. (in Chinese)
马宁,刘莎,李江勇.红外热像仪的空间噪声和时间噪声分析[J].激光与红外,2017,47(6):717-721.
- [11] Li Xiangmin, Ni Guoqiang. Noise analysis of infrared cameras[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37:523-526. (in Chinese)
李相民,倪国强.红外热像仪的噪声分析[J].红外与激光工程,2008,37:523-526.
- [12] Li Jingguo. Noise analysis and study of ROIC for infrared focal plane array[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(5):542-545. (in Chinese)
李敬国.红外焦平面读出集成电路噪声分析研究[J].激光与红外,2010,40(5):542-545.
- [13] Liu Chengkang, Yuan Xianghui, Zhang Xiaofei. Fixed pattern noise and its suppression in CMOS ROIC[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2002, 23(3):170-173. (in Chinese)
刘成康,袁祥辉,张晓飞.CMOS读出电路中的噪声及抑制[J].半导体光电,2002,23(3):170-173.