

文章编号:1001-5078(2023)07-1060-06

· 红外技术及应用 ·

提高空间红外点目标探测系统探测能力的方法

杨小乐¹, 史漫丽¹, 周峰¹, 刘兴新², 行麦玲¹

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100011; 2. 华北光电技术研究所, 北京 100011)

摘要:点目标探测系统是探测与测量系统,要保证弱目标高信噪比并且可同时探测不同强度的目标,实现大动态范围高灵敏度探测。传统成像系统通过切换探测器积分电容和改变积分时间无法同时兼顾信噪比与动态范围。针对采用模拟 TDI 红外探测器的扫描型红外点目标探测系统,本文综合考虑弱目标与背景杂波的辐射强度,提出红外探测器采用 TDI 累加不均匀输出方案,提高相机信噪比,以及图像信噪比,从而提高弱目标探测能力。同时提出 TDI 累加输出与单像元输出自动选择方案解决累加不均匀方案带来的系统动态范围变小问题。结合观测图像需求,给出了探测系统输出响应归一化的方法,最后通过实验测试,验证了系统设计方法的正确性。

关键词:点目标;相机信噪比;图像信噪比;TDI 红外探测器;动态范围

中图分类号:TN219;TN29 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2023.07.012

Methods for improving the detection ability of space infrared point target detection system

YANG Xiao-le¹, SHI Man-li¹, ZHOU Feng¹, LIU Xing-xin², XING Mai-ling¹

(1. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100011, China;

2. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The point target detection system is a detection and measurement system that ensures high signal-to-noise ratio for weak targets and can simultaneously detect targets of different intensities, achieving high sensitivity detection over a large dynamic range. Traditional imaging systems cannot simultaneously balance signal-to-noise ratio and dynamic range by switching the detector's integrating capacitance and changing the integrating time. For the scanning infrared point target detection system using linear TDI infrared detectors, this paper comprehensively considers the radiant intensity of weak targets and background clutter, and proposes that the infrared detector adopts the TDI accumulation uneven scheme to improve the signal-to-noise ratio of the camera, as well as the image signal-to-noise ratio, so as to improve the weak target detection ability. At the same time, a TDI accumulation output and single pixel output automatic selection scheme is proposed to solve the problem of system dynamic range reduction caused by uneven accumulation. Based on the observation image requirements, a method for normalizing the output response of the detection system was proposed. Finally, the correctness of the system design method was verified through experimental testing.

Keywords: pointtarget; camera signal-to-noise ratio; image signal-to-noise ratio; TDI infrared detector; dynamic range

1 引言

空间红外天文望远镜、天基导弹预警系统等是典型的红外空间点目标探测系统^[1],恒星、导弹等目标由于探测距离远,目标尺寸小于探测系统的瞬时视场,在系统成像中小于一个像元,因此表现为点目标特性。点目标探测系统是探测与测量系统,要发现目标并且要测量目标辐射强度,与常规对地成像系统有本质区别。此类系统关注点目标探测信噪比和单帧探测动态范围,保证弱目标高信噪比并且同时探测不同强度的目标,实现大动态范围高灵敏度探测。

由于目标自身辐射强度低,加上大气传输路径衰减等原因,探测器接收到的目标辐射能量往往比较弱,“弱”是指目标信号强度弱、特征不明显。通常采用信噪比、信杂比等指标来对“弱”属性进行量化。

点目标探测系统信噪比除与目标辐射强度、探测距离相关外,与系统自身的光学系统入瞳面积、透过率、探测器探测率、系统噪声以及点目标能量集中相关^[2]。系统动态范围主要由探测器动态范围与系统噪声决定。因此系统确定后,常规办法是采取探测器长短积分时间调节和大小电容调节,即弱目标时采取长积分时间或小电容,提高信噪比,强目标采取短积分时间或者大电容,避免饱和^[3-4]。这两种方式都是将探测器所有像元同时改变积分时间和电容,如此以来,在强弱目标共存时,无法兼顾信噪比与动态范围。

为实现大视场探测,基于现有红外探测器阵列规模,本文探测系统采用了扫描机构加线列红外探测器的成像体制。远距离弱目标在探测器焦面上形成的辐射量非常小,同时受高扫描帧频限制,无法采用长积分时间,因此采用模拟 TDI(时间延迟积分)线列红外探测器,通过对同一目标多次曝光累加提高信噪比。根据探测最小目标辐射强度与探测距离要求,结合本探测系统光学系统入瞳面积、透过率、系统噪声等参数,探测器采用最长积分时间(最慢扫描速度下),fF 级小电容下,最小目标在探测器上响应电压仅 10 mV,信噪比约为 10,同时目标辐亮度为 $10^{-2} \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 与背景辐射亮度数量级相同,属于弱目标,在实际探测图像中存在受背景杂波的影响^[5-6],导致图像信噪比不满足检测要求,无法

有效检出的可能。

为解决弱目标探测难题,结合目标检出对图像信噪比的要求,本文提出 TDI 探测器采用累加不均匀的方案,提高弱目标的图像信噪比,同时在此方案基础上为保证系统动态范围不变,可兼顾强目标探测,提出 TDI 累加与单像元输出自动选择的方案,并给出基于上述方案的红外探测系统辐射响应标定方法。采用上述方法实现了在不改变动态范围的情况下,红外点目标探测系统具有更高图像信噪比。

2 模拟 TDI 探测器累加不均匀输出

影响点目标探测的最主要因素是图像信噪比,图像信噪比由相机信噪比与杂波信噪比共同决定。在同样的探测率要求下,高的图像信噪比可以得到低的虚警率^[5-6]。

相机信噪比 SNR_C 的计算如公式(1):

$$SNR_C = \frac{S}{\sigma_c} \quad (1)$$

其中, S 为目标的信号; σ_c 是噪声信号的标准差,其主要由探测器的噪声与成像电路噪声决定,可表示为公式(2):

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_e^2} \quad (2)$$

σ_d 为探测器噪声标准差, σ_e 为成像电路噪声标准差。目前模拟 TDI 探测器噪声与成像电路噪声相当且均小于 1mV。因此弱目标探测时探测器噪声与成像电路噪声共同决定相机信噪比^[2]。

图像信噪比 SNR_T 的计算如公式(3):

$$SNR_T = \frac{S}{\sigma_T} \quad (3)$$

噪声信号标准差 σ_T 在相机自身噪声基础上增加背景杂波噪声^[5-7],如公式(4):

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b^2 + \sigma_d^2 + \sigma_e^2} \quad (4)$$

σ_b 为背景杂波信号标准差, σ_b 与背景杂波信号成正比^[5-7]。

诸如美国的天基红外系统(SBIRS)以地球为观测背景,大气云层反射等引起的杂波干扰容易导致目标信噪比降低,甚至被淹没其中,无法检出^[5-6]。

本项目采用的是模拟 TDI 红外探测器,目标被探测器单像元获取输出信号为 V_{s0} ,电路噪声为 V_{n0} ,实现 N 级 TDI 功能的 N 个像元读出信号分别为 $V_{s1} \sim V_{sN}$ 、电路噪声分别 $V_{n1} \sim V_{nN}$,一个 TDI 通道输出信号 V_s ,噪声 V_n 。

TDI 探测器采用累加平均输出方式, 信噪比^[8-9]如公式 7:

$$V_s = \frac{V_{s1} + V_{s2} + V_{s3} + \dots + V_{sN}}{N} = V_{s0} \quad (5)$$

$$V_n = \frac{\sqrt{V_{n1}^2 + V_{n2}^2 + V_{n3}^2 + \dots + V_{nN}^2}}{N} = \frac{\sqrt{N}V_{n0}}{N} = \frac{V_{n0}}{\sqrt{N}} \quad (6)$$

$$SNR = \frac{V_s}{V_n} = \frac{V_{s0}}{\frac{V_{n0}}{\sqrt{N}}} = \sqrt{N} SNR_0 \quad (7)$$

采用累加不平均输出方式, 探信噪比如下公式(10):

$$V_s = V_{s1} + V_{s2} + V_{s3} + \dots + V_{sN} = NV_{s0} \quad (8)$$

$$V_n = \sqrt{V_{n1}^2 + V_{n2}^2 + V_{n3}^2 + \dots + V_{nN}^2} = \sqrt{N}V_{n0} \quad (9)$$

$$SNR = \frac{V_s}{V_n} = \frac{NV_{s0}}{\sqrt{N}V_{n0}} = \sqrt{N} SNR_0 \quad (10)$$

两种方式信噪比相同, 并且均为单像元的 \sqrt{N} 倍。采用累加不平均方式目标的信号提高了 N 倍, 探测器噪声 σ_d 提高 N 倍, 根据公式(2)成像电路噪声 σ_e 未发生变化, 则此时探测器的噪声大于成像电路噪声, 此时相机信噪比如公式(11)所示大于采用累加平均方案时相机信噪比。

$$SNR_c = \frac{NS}{\sqrt{(N\sigma_d)^2 + \sigma_e^2}} \approx \frac{NS}{\sqrt{(N\sigma_d)^2}} \approx \frac{S}{\sqrt{\sigma_d^2}} \quad (11)$$

对于图像信噪比, 虽然背景杂波同样因为累加不平均输出变大, 但在实际图像的目标检测时, 会对图像进行预处理, 去除大面积的背景杂波, 则背景杂波噪声 σ_b 不会完全的增加 N 倍, 则图像信噪比会有进一步的提升(与去背景能力相关)。综上通过采用累加不平均方案可以提高探测系统相机信噪比与图像信噪比, 是提高弱目标检出能力的有效手段。

3 TDI 累加输出与单像元输出自动选择

本项目采用模拟 TDI 红外探测器, TDI 运算过程是电荷域计算, 探测器积分电容依据目标电子数选择, 探测器采用累加平均方案, 单像元满阱电子数 Q 与饱和输出电压 V_{sat} 关系如下^[8-10]:

$$Q = \frac{V_{sat} \times C}{e} \quad (12)$$

其中, e 为电子电量; C 为电容值。

探测器采用累加不平均方案, 则目标电子数为单像元满阱的 $1/N$ 时(N 代表 TDI 级数), 探测器输出饱和, 因此系统动态变小为累加平均方案的 $1/N$, 如公式(13)所示, 这是累加不平均方案的缺点:

$$\frac{1}{N} \times Q \times e}{C} = V_{sat} \quad (13)$$

为保证探测系统动态范围不变, 本文提出 TDI 累加输出与单像元输出自动选择方案, N 级 TDI 累加输出饱和时, 探测器自动输出 TDI 最后一级像元的信号, 即单像元信号。该方案每一个 TDI 通道的 TDI 方向的最后一个像元(记为 A 像元)的工作方式不同于其它像元。A 像元积分后信号既参与正常的 TDI 累加运算, 同时可以通过另一信号通路单独输出。在每个 TDI 通道的输出级设计比较器 U1 和输出选择开关 K1, 小信号时 N 个像元参与 TDI 转移、累加后输出, TDI 累加输出小于比较器 U1 的比较电压 V_{set} (V_{set} 设置为饱和电压, 尽可能增大 TDI 累加输出的动态范围), 比较器输出信号会控制输出选择开关输出 TDI 累加结果, 随着信号能量的增加, TDI 累加输出饱和和大于比较器比较电压 V_{set} , 比较器输出信号会控制输出选择开关输出 A 像元信号。原理图如图 1 所示。

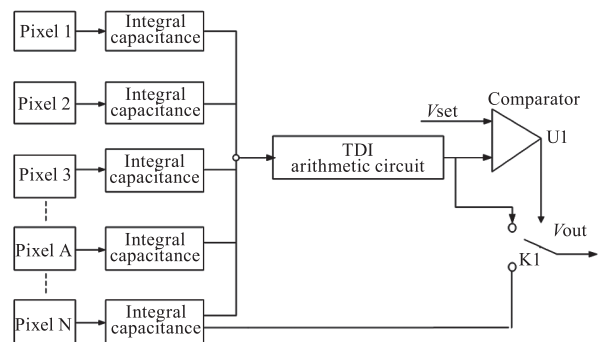


图 1 自动选择方案原理图

Fig. 1 Schematic diagram of automatic selection scheme

为保证探测器每一个 TDI 通道都能够根据实际探测目标独立工作, 每一个 TDI 通道中均设置了一个比较器和输出选择开关, 并且考虑到电路中有噪声干扰, 比较器设计成抗干扰的迟滞比较器, 避免当 TDI 累加输出接近比较电压 V_{set} , 自动选择开关 K1 出现频繁切换的现象。同时因目标测量反演需求, 每一个 TDI 通道比较器的比较结果通过移位寄存器输出作为标识位, 通过该标识可以判断该 TDI 通道

输出状态是单像元输出还是 TDI 累加输出。

在单像元输出时因不具备 TDI 功能,相比于 TDI 累加输出信噪比低了 \sqrt{N} 倍,但此时目标信号累加已经饱和,目标不再是弱目标,系统信噪比仍然可以满足要求。通过 TDI 累加输出与单像元输出自动选择,系统最终饱和时可探测目标的电子数仍然如公式 12 所示,与累加平均方案相同,保证探测系统的动态范围未发生变化。

4 系统的辐射响应特性

根据上述设计,探测系统每个 TDI 通道的输出响应曲线分为 TDI 累加输出与单像元输出两段。一个 TDI 通道的理论辐射响应特性曲线如图 2,横坐标为输入能量,纵坐标为探测器输出电压量化后 DN 值。当输入能量小时,TDI 通道处于 TDI 累加输出状态,随着输入能量增大,TDI 累加输出线性增大。TDI 累加输出的系统的辐射响应方程如公式 (14) 所示:

$$DN_{\text{TDI}} = L \times K_{\text{TDI}} + C_{\text{TDI}} \quad (14)$$

其中, DN_{TDI} 为 TDI 累加输出的 DN 值; K_{TDI} 与 C_{TDI} 为 TDI 累加输出时辐射响应的斜率和截距; L 为输入能量。

当探测系统输入能量增加到一定值时,TDI 累加输出电压饱和并大于比较器设定阈值电压时,TDI 通道输出转换为单像元线性输出。此时系统的辐射响应方程如公式 (15) 所示:

$$DN_s = L \times K_s + C_s \quad (15)$$

DN_s 为单像元输出的 DN 值, K_s 与 C_s 为单像元输出斜率与截距,TDI 累加输出的斜率 K_{TDI} 是单像元输出斜率 K_s 的 N 倍(N 代表 TDI 级数即累加倍数)。由图 2 可知本系统的辐射响应特性与常规探测系统全动态内单调线性是不同的。

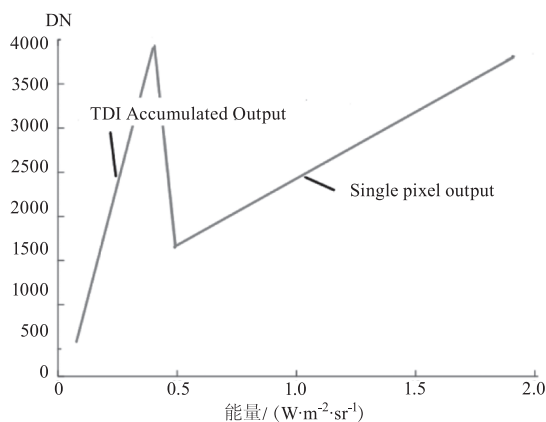


图 2 探测系统辐射响应曲线

Fig. 2 Detection system response curve

使用中探测背景复杂,探测器不同的 TDI 通道输入能量不同,必然导致有的工作在累加输出状态,有的工作在单像元输出状态,如不加处理则探测图像会显示异常。因此需要在探测系统成像电路中对探测器 TDI 累加进行归一化处理,将其响应斜率归一化至与单像元输出保持一致,将系统辐射响应曲线变为与常规探测系统一样的单条线性直线。因为是在成像电路 AD 量化后数字端进行运算处理,不影响 TDI 累加输出时系统的信噪比。

令 TDI 累加和单像元输出两个辐射方程输入能量 L 相等,即可获得 TDI 累加输出到单像元输出的归一化方程如公式 (16):

$$DN_s = DN_{\text{TDI}} \times \frac{K_s}{K_{\text{TDI}}} + C_s - \frac{K_s}{K_{\text{TDI}}} C_{\text{TDI}} \quad (16)$$

归一化后的探测系统辐射响应特性曲线如图 3。

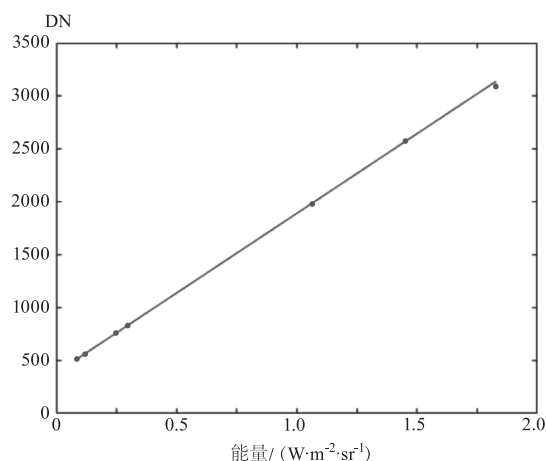


图 3 归一化后的探测系统辐射响应曲线

Fig. 3 New infrared detector normalized radiation response curve

5 系统的试验验证

实际探测系统采用 1024×4 线列 TDI 红外探测器,共 1024 元,每个通道采用 4 级 TDI 累加输出,TDI 通道的比较器阈值电压设置为饱和电压。如果采用累加平均 TDI 红外探测器,探测器噪声 0.6 mV,成像电路噪声 0.8 mV,在要求的成像参数下,经计算最弱探测目标经光学系统在探测器产生的电压为 10 mV,不考虑背景杂波,探测系统相机信噪比为 10。采用累加不平均方案 TDI 红外探测器,按照探测器的信号、噪声均放大 TDI 级数倍,根据 TDI 级数的不同,得到的相机信噪比不同,具体图 4 所示,横坐标为 TDI 级数,纵坐标为相机信噪比,随着 TDI 级数即累加倍数的增加信噪比增加,但 4 级 TDI 后信噪比变化趋于平缓。

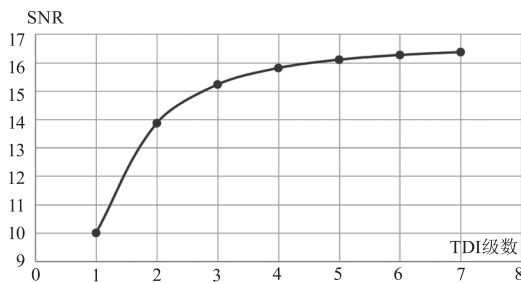


图 4 TDI 累加倍数与相机信噪比的关系

Fig. 4 Relationship between TDI accumulation multiple and camera SNR

通过在探测系统前放置面源黑体,实测探测系统的辐射响应与信噪比,并验证归一化系数与归一化效果。

在真空罐内,将低温黑体(250K - 400K)放置在探测系统入光口前,能够覆盖相机光学系统口径。低温黑体模拟弱目标^[11]。测试系统如图 5 所示。

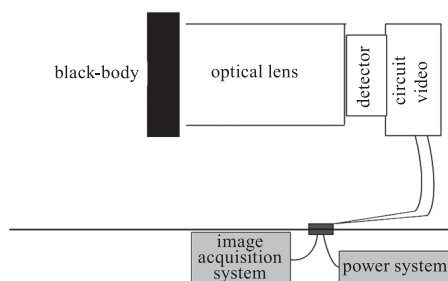


图 5 辐射响应测试系统

Fig. 5 Radiation response test system

实验中,根据探测背景与目标辐射能量,结合谱段以及黑体发射率(取 0.98)计算背景与背景加目标等效到相机入口的黑体温度,实际测试,分别采集两个黑体温度的图像。背景图像 DN 值为 473,背景加目标图像 DN 值为 529,两幅图像 DN 值相减得到目标 DN 值为 56,折算到电压为 38 mV,与理论设计 40 mV 基本一致,即通过 4 级 TDI 累加信号放大了约 4 倍。背景图像噪声为 2.4 mV 与理论设计 2.5 mV 基本一致,则弱目标相机信噪比为 15.8,与理论设置一致,即采用 TDI 累加输出将弱目标探测时信噪比由 10 提升到 15.8。

通过改变黑体温度来改变辐亮度,从而改变探测器接收到的辐射能量,获得不同辐亮度输入时探测器的输出电压。选取探测器第 512 元,其实测辐射响应曲线如图 6 所示,横坐标为输入能量,纵坐标为输出电压量化后 DN 值(12 位量化)。

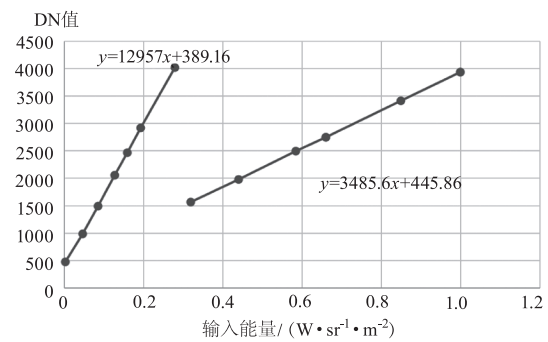


图 6 实测辐射响应曲线

Fig. 6 Measured radiation response curve

如图 6 所示实测探测系统的辐射响应曲线与理论一致,在输入辐射能量 $0.27 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 时 TDI 累加输出饱和,输出发生跳变为单像元输出,系统输入能量约为 $1 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 时单像元输出饱和。

TDI 累加输出响应斜率 12957,是单像元输出响应斜率 3507 的 3.7 倍,也与理论设计 4 倍基本一致。

根据上述测试得到辐射定标方程,利用公式 16 得到归一化方程如公式(17):

$$DN_s = DN_{\text{TDI}} \times 0.27 + 340.02 \quad (17)$$

通过归一化方程将 TDI 累加输出归一化后与单像元输出定标点合并计算归一化后全动态的辐射定标方程与辐射响应曲线如图 7,归一化后全动态范围内的辐射定标方程与单像元一致,并且线性单调,线性相关系数大于 0.99,系统最大可探测输入能量仍约 $1 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

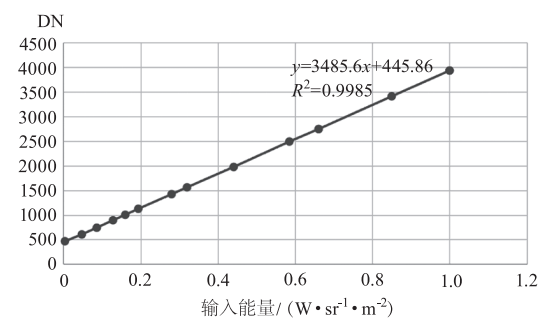


图 7 归一化后的辐射响应曲线

Fig. 7 Normalized radiation response curve

6 结论

本文从空间点目标探测系统的特点出发,针对扫描机构加线列 TDI 红外探测器的成像体制,结合目标探测图像信噪比,提出采用红外探测器 TDI 累加不均匀输出方案,将相机信噪比提高了约 1.6 倍,并且提高了探测系统图像信噪比,有效保证系统弱

目标探测能力。同时提出 TDI 累加输出与单像元输出自动选择方案解决累加不平均方案带来的系统动态范围变小问题。结合观测图像需求,给出了探测系统输出响应归一化的方法,最后通过实验测试,验证了系统设计方法的正确性。

参考文献:

- [1] Long Liang, Wang Shitao, Zhou feng, et al. In-orbit radiometric calibration methods for remote sensing system to detect space infrared point target[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2012, 2(33): 73-80. (in Chinese)
龙亮, 王世涛, 周峰, 等. 空间红外点目标遥感探测系统在轨辐射定标[J]. 航天返回与遥感, 2012, 2(33): 73-80.
- [2] He Lin, Deng Wudong. Area array TDI space camera for GEO target detection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023. (in Chinese)
何林, 邓武东, 等. 面向 GEO 目标探测的面阵 TDI 空间相机[J]. 红外与激光工程, 2023.
- [3] Li Fuwei, Zhang Yunqiang. Influence of integration time on IRFPA imaging system[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 5(29): 727-730. (in Chinese)
李福巍, 张运强. 积分时间对红外焦平面成像系统的影响[J]. 应用光学, 2008, 5(29): 727-730.
- [4] Zhang Dawei, Li Jiangyong. Research of the automatic-gain control method for infrared imaging system[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(10): 1119-1122. (in Chinese)
张大伟, 李江勇. 用于红外成像系统的自动增益控制方法研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(10): 1119-1122.
- [5] Lin Zaiping. Weak target track-before-detect technologies for space-based infrared image [D]. Changsha: National University of Defense Techonology, 2012. (in Chinese)
林再平. 天基红外图像弱目标检测前跟踪技术研究 [J]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- [6] Gai Fangqin, Wang Chunmei, et al. A new pre-processing algorithm for dim target detection in satellite IR image frame[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(7): 784-787. (in Chinese)
盖芳钦, 王春梅, 等. 卫星红外图像点目标检测预处理 [J]. 激光与红外, 2010, 40(7): 784-787.
- [7] Yang Tianyuan, Zhou Feng, Xing Mailing. Design of point target sampling system of space scanning camera [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2016, 37(2): 82-91. (in Chinese)
杨天远, 周峰, 行麦玲. 空间扫描相机点目标采样系统设计 [J]. 航天返回与遥感, 2016, 37(2): 82-91.
- [8] Tang Ju, Lu Wengao, Chen Zhongjian, et al. 288 × 4 IRFPA ROIC with TDI [J]. Infrared Technology, 2007, 4(29): 206-210. (in Chinese)
唐矩, 鲁文高, 陈中建, 等. 具有时间延时积分(TDI)功能的 288 × 4 红外焦平面读出电路 [J]. 红外技术, 2007, 4(29): 206-210.
- [9] Tao Kunyu, Li Fuwei, Zhou Yanping, et al. IRFPA imaging system dynamic range adaptive adjust technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 2(37): 265-269. (in Chinese)
陶坤宇, 李福巍, 周彦平, 等. 红外焦平面成像系统动态范围自适应技术研究 [J]. 红外与激光工程, 2008, 2(37): 265-269.
- [10] Fang Dan. Skill analysis of readout intergrated circuits of IRFPA [J]. Infrared Technology, 2004, (26): 23-28. (in Chinese)
方丹. 红外焦平面阵列读出电路技术分析 [J]. 红外技术, 2004, 2(26): 23-28.
- [11] Tian Qijie, Chang Songtao, et al. Radiometric calibration based on low temperature black body for infrared systems with high dynamic range. [J]. ACTA Photonica Sinica, 2017, 46(4): 1-8. (in Chinese)
田棋杰, 常松涛, 等. 采用低温面源黑体实现红外系统宽动态范围定标 [J]. 光子学报, 2017, 46(4): 1-8.