

天基红外探测载荷自适应调节方法研究

蔡萍^{1,2}, 李潇雁^{1,2,3}, 苏晓峰^{1,4}, 胡亭亮¹, 陈凡胜^{1,3,4}

1. 中国科学院智能红外感知重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024;
4. 湖州南太湖中科院上海技术物理所光电工程中心, 浙江 湖州 313000)

摘要: 在天基遥感探测应用中, 动态范围、时空变化率是影响红外高温目标高精度探测与跟踪识别的重要因素。通常受探测器暗电流、电路噪声等因素的影响, 探测系统的单景动态范围一般小于 72 dB 左右, 难以覆盖动态范围达 100 dB 左右的超强目标, 降低了目标的识别能力和定量化描述精度。针对以上问题, 提出了一种探测载荷自适应参数调节技术, 通过自适应双曝光策略调整积分时间, 能够在最大化目标探测信噪比的同时实现对目标能量的精确描述。仿真实验结果表明: 所提方法操作简单, 且能有效地实现整个动态范围内对目标的探测与描述。该方法可为天基目标智能化探测研究提供有益参考。

关键词: 动态范围; 积分时间自适应; 双曝光

中图分类号: TP732.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200076

Research on adaptive adjustment technology for space-based infrared detection load

Cai Ping^{1,2}, Li Xiaoyan^{1,2,3}, Su Xiaofeng^{1,4}, Hu Tingliang¹, Chen Fansheng^{1,3,4}

1. Key Laboratory of Intelligent Infrared Perception, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;
3. Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China;
4. Center of Optoelectronic Engineering, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, South Taihu, Huzhou, Huzhou 313000, China)

Abstract: In the exploration application of space-based remote sensing, dynamic range and spatiotemporal change rate are the important factors affecting the high-precision detection, tracking and identification of infrared high temperature targets. Generally, influenced by the dark current and circuit noise of the detectors, the dynamic range of a single scene of the detection system is usually less than about 72 dB, and it is difficult to cover the super targets with the dynamic range of about 100 dB, which reduces the recognition ability and quantitative description accuracy of the target. In terms of the problems mentioned above, an adaptive parameter adjustment technique for the detection payloads was proposed. By adjusting the integral time through double exposure and

收稿日期: 2020-02-29; 修订日期: 2020-03-25

基金项目: 国家自然科学基金 (61975222)

作者简介: 蔡萍 (1988-), 女, 硕士生, 主要从事空间遥感与光电系统探测等方面的研究。Email: caiping@mail.sitp.ac.cn

导师简介: 胡亭亮 (1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间遥感仪器的光机结构设计方面的研究。Email: hutingliang@mail.sitp.ac.cn

adaptive strategy, the accurate description of target energy could be achieved while maximizing the signal-to-noise ratio of target detection. Simulation results show that the proposed method is simple to operate and can effectively detect and describe targets in the whole dynamic range. This method can provide a useful reference for the research of intelligent detection of space-based objects.

Key words: dynamic range; adaptive integral time; double exposure

0 引言

天基红外弱小目标的高精度探测是实现远程感知、实时跟踪及精确打击的重要环节^[1-2]。受探测距离的影响,红外目标在焦平面上成像面积较小,且缺乏必要的形状、轮廓及纹理等特征信息,表现为微弱亮点^[3-4]。加之探测背景复杂,且易受太阳高度角及云层变化的影响^[5-8],天基红外弱小目标的探测成为近年来研究的难点。

信噪比、灵敏度、动态范围及积分时间是天基红外弱小目标探测系统的重要技术指标。灵敏度反映了探测目标及背景的辐射特性,同时也是系统光学参数,信息获取系统噪声,探测器噪声,响应特性及非均匀性^[9-10]等参数的综合体现^[11-13]。动态范围表征了系统可探测的红外辐射大小,反应了系统的工作性能^[5-6]。仿真分析可知,高温红外目标的辐射强度变化范围可覆盖几十 W/Sr 到几千万 W/Sr^[14]。目标的辐射强度是对其进行识别分类的重要特征^[15],对目标的辐射特征进行全动态范围测量,则仪器的动态范围需达到 100 dB 以上。目前,常用的红外探测系统的动态范围在 60~80 dB 左右^[16],同一场景难以覆盖目标的整个动态范围。同时,对于强辐射背景下的目标探测,在目标能量由弱到强,再由强到弱的变化过程中,目标的搜索发现和目标能量的精确测量将无法同时得到满足。近年来,为提高系统探测性能,部分学者对系统动态范围调整方法做了深入研究。为获得更宽的动态范围,Richards 等^[17]通过在系统光路中加入滤光片轮来控制入射光强,从而改善系统动态范围。Cannata 等^[18]使用两个不同积分时间的电容器控制系统输入电路,在低通量时选择较大的积分时间,高通量时选择较小的积分时间,实现动态范围的可控调节。以上方法虽在一定程度上获得了可调的动态范围,但滤光片轮及电容器的引入使系统结构复杂化,且控制不灵活,难以满足探测即时性的要求。陶坤宇

等^[19]提出了自适应调节积分时间技术,以探测场景作为反馈调节积分时间,实现对系统动态范围的调整。该方法虽结构简单易于实现,但仅考虑了场景辐射特性,忽略了探测过程中目标的能量变化及对积分时间过度调节的处理。

针对以上问题,文中提出了一种探测载荷自适应参数调节技术,在整个搜索探测过程中,动态的进行探测系统的参数调整,在实现搜索阶段目标探测最优信噪比的同时保证了跟踪阶段目标能量的有效量化。该方法解决了发现和测量的矛盾,对于实现整个动态范围内红外弱小目标的有效探测与跟踪具有重要意义。

1 系统组成

如图 1 所示,红外探测系统一般由信息获取单元和数据处理单元组成,其探测过程主要包括搜索和跟踪两个阶段。搜索阶段旨在快速发现目标,此时要求目标具有最大的探测信噪比;跟踪阶段则在保证目标探测信噪比的同时需兼顾对目标的测量。而对于能量不均衡的探测场景,同一探测参数已经无法满足实际探测要求。

信息获取单元:主要完成搜索和跟踪两种不同状态下的目标信号获取,完成图像非均匀计算等预处理操作,得到满足目标检测要求的红外探测图像。

自适应信息处理单元:对目标图像进行检测,计算目标的位置、强度、运动等信息,进行背景信息统计,为自适应处理算法提供目标和背景的特性信息;根据检测的目标信息,背景信息,形成自适应参数控制策略,并反馈给信息获取单元,完成探测参数的调节。其中主要的参数调节策略包括:自适应积分时间调节、自适应非均匀控制、高灵敏多帧处理、指向控制等。

文中主要针对自适应积分时间开展分析,研究其在目标探测过程中带来的性能收益。

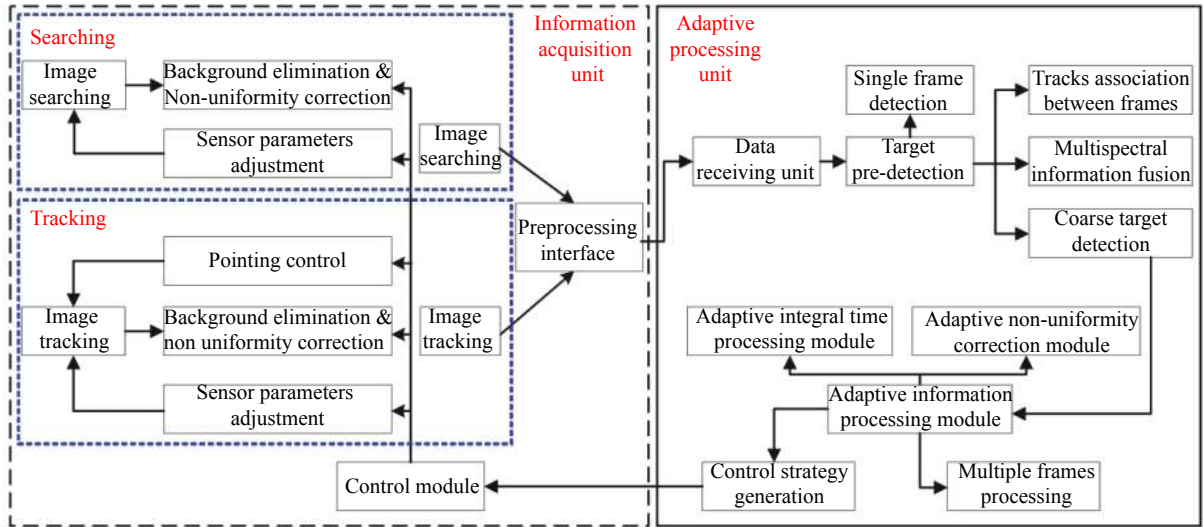


图 1 红外探测系统组成及探测流程

Fig.1 Infrared detection system composition and detection

2 探测系统自适应积分时间调节技术

探测系统的信噪比和信杂比可用以下公式进行表述:

$$SNR = \frac{N_s \cdot T_{int}}{\sqrt{(N_s + N_{dark}) \cdot T_{int} + N_{background} + n_{read}^2}} \quad (1)$$

$$S/C = \frac{N_s \cdot T_{int}}{\sigma N_{background}} \quad \text{其中 } N_{background} \propto IFOV^2 \quad (2)$$

式中: N_s 为目标辐射光电子数; T_{int} 为积分时间; N_{dark} 为暗电流电子数; $N_{background}$ 为背景辐射光电子数; n_{read} 为电子学噪声。

这里目标光电子数与目标辐射强度和探测谱段相关, 背景光电子数与系统瞬时视场成正比, 因而对于探测系统的参数自适应调节主要是针对系统的探测积分时间, 根据公式, 长的积分时间有利于探测信噪比的提升。而积分时间的提升同时受探测背景和探测目标饱和的约束, 如图 2 所示, 饱和背景和积分时间的关系为:

$$N_{\lambda} = \frac{4F^2 J_{ph} Q_e}{\pi A_{det} \eta \cdot \tau_{opt} \cdot \Delta \lambda} \cdot \frac{1}{T_{int}} \quad (3)$$

式中: N_{λ} 为背景辐亮度; F 为系统 F 数; J_{ph} 为单光子能量; η 为量子效率, A_{det} 为探测元面积; Q_e 为饱和电子数; $\Delta \lambda$ 为探测谱段宽度; T_{int} 为积分时间; τ_{opt} 为光学透过率。

如图 3 所示, 当目标饱和时, 其与积分时间的关系为:

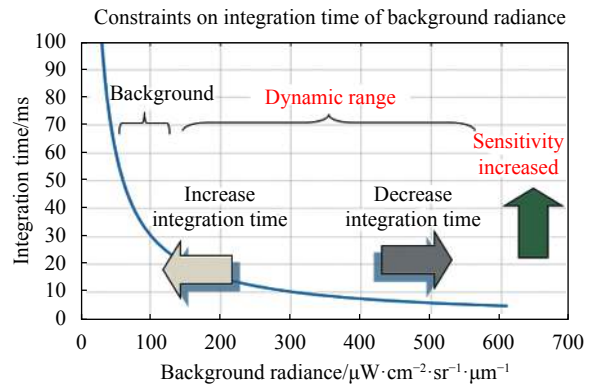


图 2 探测背景与积分时间的约束

Fig.2 Constraints of background and integration time

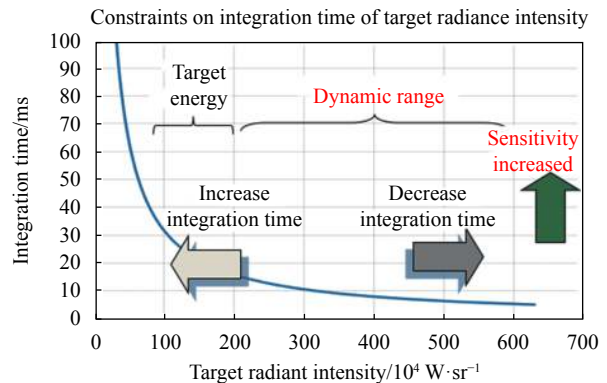


图 3 探测目标与积分时间的约束

Fig.3 Constraints of target and integration time

$$I_{tar} = \frac{4I^2 \cdot J_{ph} \cdot Q_e}{\pi \eta \cdot \tau_{opt} \cdot \tau_{air} \cdot EE \cdot D^2} \cdot \frac{1}{T_{int}} \quad (4)$$

式中： I_{tar} 为目标饱和辐射强度； D 为探测系统口径； l 为探测距离； J_{ph} 为单光子能量； τ_{opt} 为大气透过率； EE 为能量集中度。

为保证探测系统对目标测量的可靠性，在提升灵敏度的同时，需要保证探测背景不能饱和，为保证目标的可测性，又要求目标响应不能饱和，此时当目标的动态范围很宽时，固定积分时间将无法兼顾探测灵敏度和目标可测性间的要求。

2.1 双曝光参数调整技术

为同时兼顾探测灵敏度和强目标的测量能力，对探测系统进行了双曝光参数调整设计，其基本原则为采用两组积分时间交替进行探测成像，两组积分时间可以用下式进行计算：

$$\begin{cases} T_1 = \frac{4F^2 J_{ph} Q_e}{\pi A_{det} \eta \cdot \tau_{opt}} \cdot \frac{1}{\bar{L}_b + \alpha \delta_b} \\ T_2 = \frac{4l^2 \cdot J_{ph} \cdot Q_e}{\pi \eta \cdot \tau_{opt} \cdot \tau_{air} \cdot EE \cdot D^2} \cdot \frac{1}{\beta I_{tar}} \end{cases} \quad (5)$$

式中： T_1 为长积分时间，其以背景的能量为输入，获取最优的探测灵敏度； \bar{L}_b 为平均背景辐射亮度值（假定探测背景满足高斯分布）； δ_b 为背景统计起伏的标准差； α 为调优因子，一般取 3，用于控制场景中出现饱和点的概率； T_2 为短积分时间，其以目标动态范围区间为输入，目的在于保留对强目标的探测能力； I_{tar} 为目标先验能量区间； β 为调优项，调节目标饱和的概率。 T_1 和 T_2 如图 4 所示，积分时间 T_1 对应的饱和点为 I_1 ，积分时间 T_2 对应的饱和点为 I_2 ；其中 I_1 覆盖背景能量区间， I_2 覆盖目标能量区间。

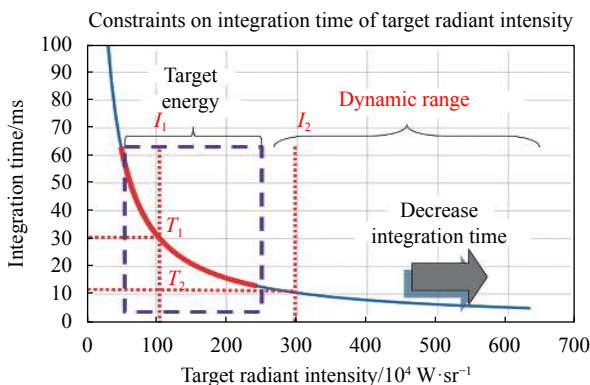


图 4 探测积分时间选取依据

Fig.4 Method of integration time selection

2.2 自适应积分时间调整技术

在充分利用星上预处理单元的目标检测能力的基础上，对目标进行实时参数调整，可以有效提升系统的可用度。此小节从目标特性的角度出发，进行最优参数调整。

自适应信息处理单元位于星上预处理器与信息获取载荷之间，通过接收预处理器的检测结果信息，获取目标与背景的灰度特性，进行适应性参数调整。自适应参数调整分为两个阶段：目标搜索阶段和目标跟踪阶段。

(1) 搜索阶段

在探测系统未发现目标时，为尽可能提升系统的探测灵敏度，积分时间的设计以背景响应为准，采用如下公式进行最优积分时间的求解，可获取最优的系统 NEI 的值。

$$T_b = \frac{4F^2 J_{ph} Q_e}{\pi A_{det} \eta \cdot \tau_{opt}} \cdot \frac{1}{\bar{L}_b + k \delta_b} \quad (6)$$

随着时间的变化，探测背景的也会存在明显漂移，特别是在短波谱段，图 5 反应了不同太阳高度角下的探测背景变化情况。

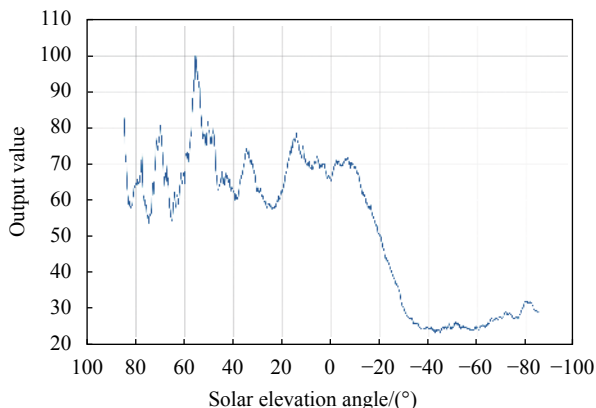


图 5 探测背景随太阳高度角的变化情况

Fig.5 Background intensity with the sun altitude

受高云及太阳高度角变化影响，探测背景也存在较大的波动。因而直接采用上式进行积分时间求解，积分时间的调整频率会过快，为此对积分时间的调整采用了差异控制策略，引入 ΔDN 值，当背景灰度差异超过某一设定值时，再进行积分时间调整。搜索阶段的积分时间控制流程如图 6 所示。

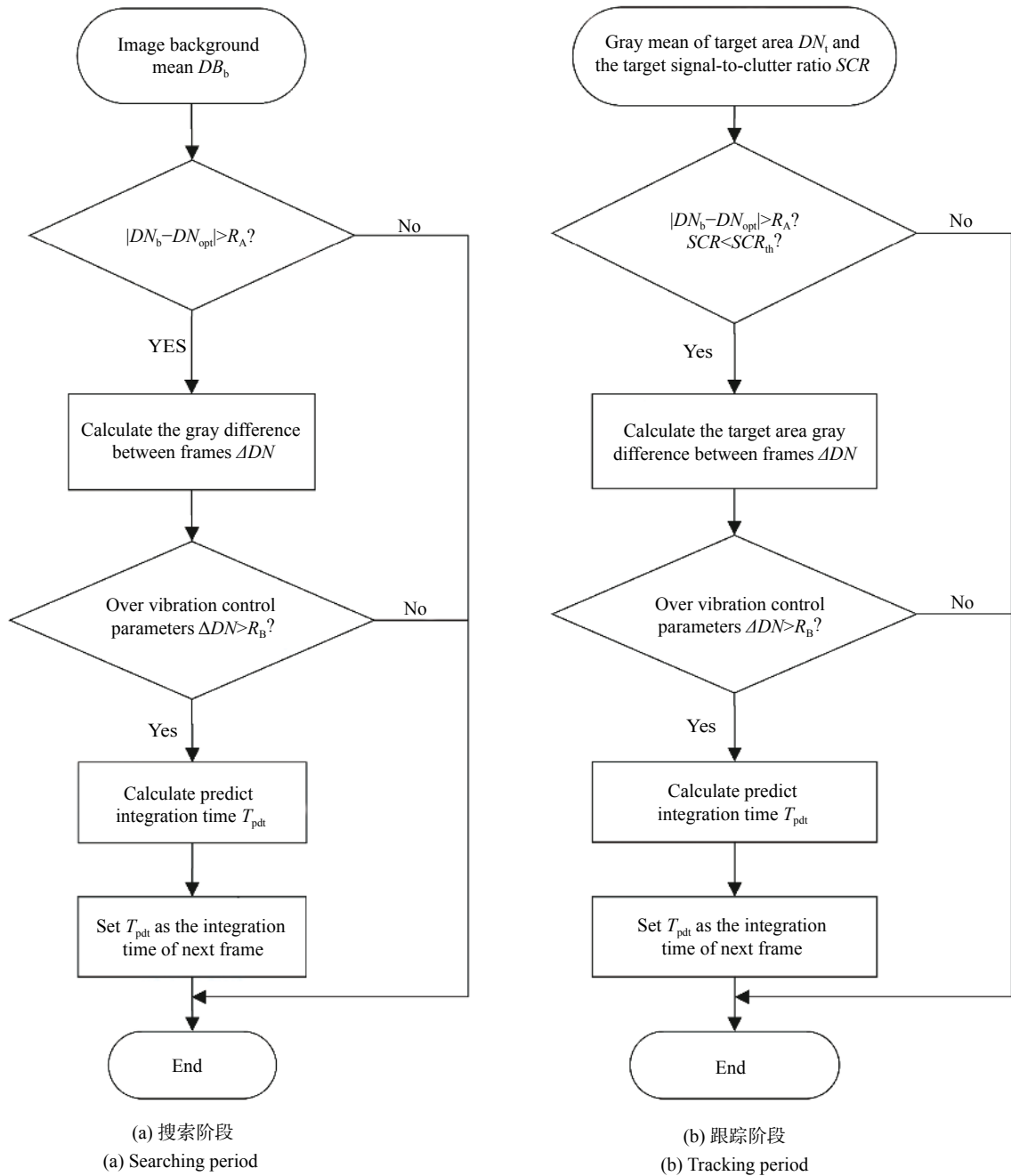


图 6 自适应积分时间调整流程

Fig.6 Adaptive adjustment process of the integration time

(2) 跟踪阶段

在完成目标检测后, 预处理模块将目标参数信息传递给自适应数据处理模块, 为保证对目标的测量能力, 此时积分时间的调整以目标的灰度特性为输入, 为防止积分时间的过度调节, 引入了双边界调优策略, 如图 7 所示, 计算公式如下:

$$T = \begin{cases} T_b & (T > T_b) \\ T & (I_{set} + \alpha < I < I_{set} - \beta) \\ \frac{I_{set} - B}{I_{tar} - B} \cdot T & (I_{set} + \alpha < I < I_{set} - \beta) \end{cases} \quad (7)$$

式中: T_b 为搜索阶段的积分时间设定值; I_{set} 为目标强度调优设定值; B 为背景均值; I_{tar} 为目标强度测量值; α 和 β 为上下调优边界。

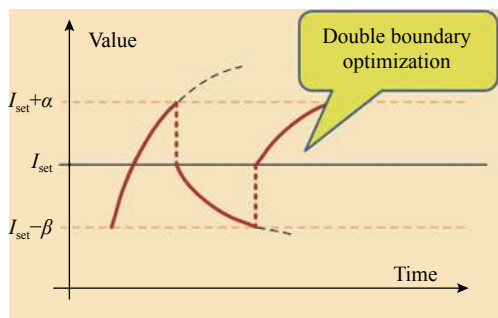


图 7 自适应积分时间双边界调优策略

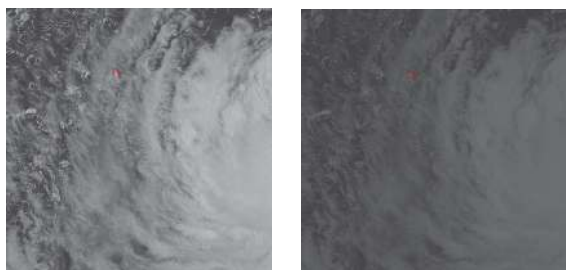
Fig.7 Double boundary optimization strategy of adaptive integration time

3 实验验证

3.1 双曝光参数调整技术

针对双曝光的设计进行了软件仿真测试,下图给出了两种曝光积分时间下的探测器响应输出结果。

如图 8(a) 所示,长积分时间下,背景具有较强的响应输出,可获取最优的目标探测灵敏度,但目标响应已经饱和,此时失去了对目标的测量能力,信息的丢失将严重影响目标后期的分类识别能力。如图 8(b) 所示,短积分时间下目标表现为不饱和状态,根据探测器积分时间响应斜率可以求解目标能量值。



(a) T_1 积分时间下的响应输出 (a) System response in T_1 (b) T_2 积分时间下的响应输出 (b) System response in T_2

图 8 不同积分时间下的仿真结果

Fig.8 Simulation results in different integration time

图 9 给出了两组积分时间下的目标输出能量的变化曲线。对主动段目标,由于观测高度,观测角度,发动机关机等影响,其辐射能量存在很大的起伏,特别是主动段前期,目标辐射快速增加,很快超过探测系统的测量区间,目标饱和,并持续了一段时间后目标能量下降,恢复探测能力。根据仿真结果,采用双曝光技术可以有效的兼顾高灵敏度探测和宽动态范围测量的能力。

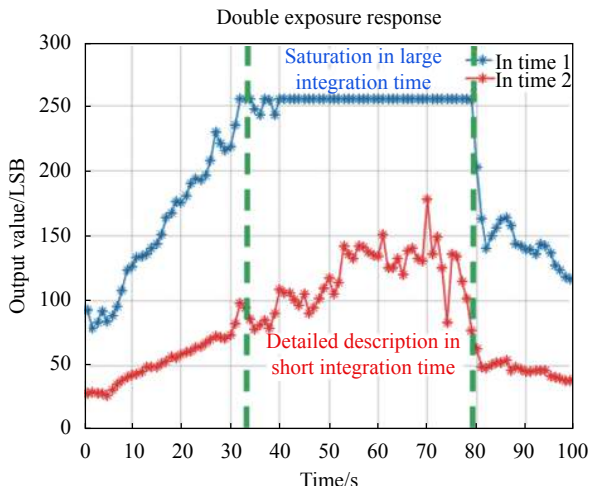


图 9 双曝光模式下的目标能量测量结果

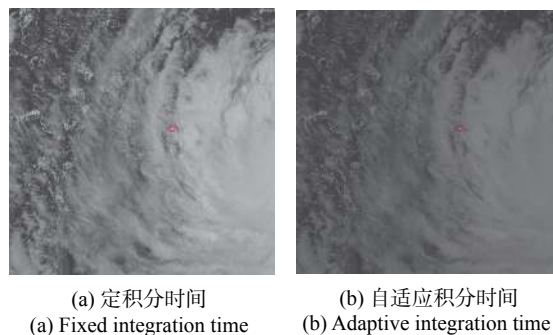
Fig.9 Target energy test result of double exposure

采用双曝光的模式属于以时间换动态范围的方法,其主要特点为:

- (1) 高积分时间实现高灵敏探测,低积分时间实现亮目标的测量;
- (2) 同一场景内出现多个目标时,以最亮目标设定短积分时间;
- (3) 由于采用交替模式,双曝光模式下将会牺牲一半的探测帧频,如搜索模块采用双曝光处理后,最高成像帧频将由 10 fps 降为 5 fps;
- (4) 双曝光技术的动态范围提升为 I_2/I_1 ;
- (5) 为降低系统带宽需求, T_1 和 T_2 进行交替成像时,下传图像以 T_1 图像为基准,当出现饱和时,将统一像素替换为 T_2 中的图像数据,并记录饱和点位置。

3.2 自适应积分时间调整技术

通过对自适应积分时间控制策略进行仿真分析,建立了仿真数据源,分别比对定积分时间和自适应积分时间的测试结果,如图 10 所示。



(a) 定积分时间 (a) Fixed integration time (b) 自适应积分时间 (b) Adaptive integration time

图 10 仿真输入

Fig.10 Simulation input

图 11 为积分时间随目标响应变化进行的积分时间调整结果, 为保证对目标的测量能力, 当目标输出能量快速增加时, 自适应处理模块控制积分时间进行下调, 保证目标的响应不出现饱和的情况, 当目标能量降低后, 积分时间又逐步增加。

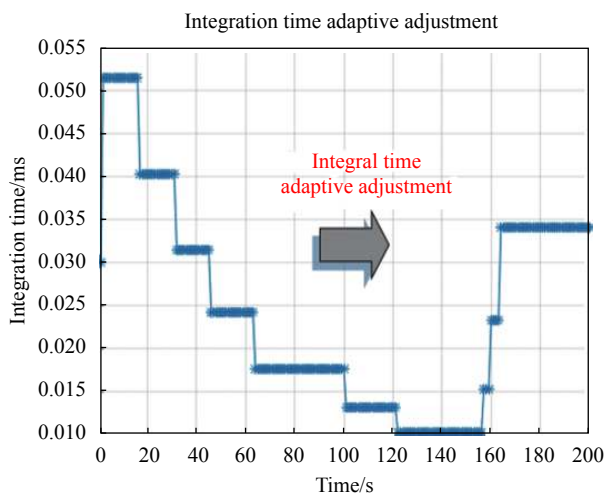


图 11 自适应积分时间调整结果

Fig.11 Output with adaptive integration time

图 12 为常规模式与自适应积分时间控制模式的差异对比, 常规模式下, 目标能量增加后很快就饱和了, 而自适应模式下, 在目标能量较低的前期, 进行了积分时间的提升, 以提高探测灵敏度, 当目标能量达到一定值后, 逐步降低积分时间使目标不达到饱和, 保留目标的能量信息, 通过积分时间响应特性可还原出目标的本身能量值。自适应积分时间调节的探测灵敏度由 T_b 决定。

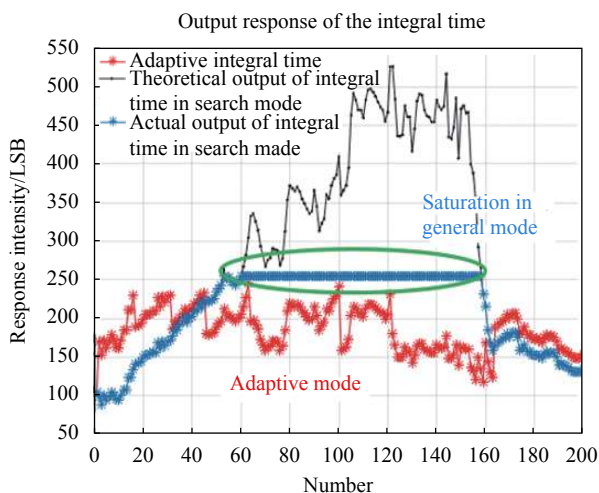


图 12 目标响应输出结果

Fig.12 Target response output result

$$NEI = \frac{n_{base} \cdot 4I^2 J_{ph}}{\pi \eta D^2 E E \tau_{opt} \tau_{air} T_b} \quad (8)$$

式中: n_{base} 为探测系统本底噪声电子数; η 为量子效率; 则测试过程中的系统动态范围变化由其积分时间范围决定:

$$n = \frac{T_{max}}{T_{min}} = \frac{0.05 \text{ ms}}{0.01 \text{ ms}} = 5 \quad (9)$$

针对文中特定仿真目标, 采用自适应积分时间调整使得探测系统的动态范围提升了 5 倍, 覆盖了整个目标的动态范围区间, 保证了目前的全动态范围测量能力。

4 结 论

对积分时间调整方法中的双曝光策略和自适应调整策略进行了详细介绍, 并通过软件仿真分析验证了方法的可行性。根据仿真测试结果, 双曝光策略操作简单, 具备弱目标探测能力和强目标测量能力的优点, 但对不同类目标探测时性能差异较大。自适应积分时间调整策略需要有预处理单元的配合, 具有最优化探测性能的特点, 可作为红外探测载荷搜索跟踪过程中的自适应参数调整控制策略。

参考文献:

- [1] Wang Yuxiang, Han Zhenduo, Wang Hongmin, et al. Detection method for dim small infrared targets based on adaptive background prediction [J]. *Laser and Infrared*, 2012, 42(10): 1181-1186. (in Chinese)
王宇翔, 韩振铎, 王宏敏, 等. 一种基于自适应背景预测的红外弱小目标检测方法[J]. *激光与红外*, 2012, 42(10): 1181-1186.
- [2] Fang Shengnan, Gu Xiaojing, Gu Xingsheng. Infrared target tracking with correlation filter based on adaptive fusion of responses [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 0626003. (in Chinese)
房胜男, 谷小婧, 顾幸生. 基于自适应响应融合的相关滤波红外目标跟踪[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(6): 0626003.
- [3] Sun Lihui, Wang Yongzhong, Zhou Bing. Self-adaptive infrared image background suppressed algorithm based on local statistical character [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 182-185. (in Chinese)
孙立辉, 王永仲, 周冰. 基于局部统计特征的自适应红外背景抑制算法[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(1): 182-185.

- [4] Lv P Y, Sun S L, Lin C Q, et al. Space moving target detection and tracking method in complex background [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 91: 107-118.
- [5] He Ming, Wang Yadi, Wang Xinsai, et al. Scene-based dynamic range adaptive adjust technology of infrared focal plane array. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(3): 1001-1005. (in Chinese)
贺明, 王亚弟, 王新赛, 等. 场景自适应的红外焦平面成像动态范围调整技术[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(3).
- [6] Hu Jianming, Qiao Kai, Zhi Xiyang, et al. Influence of complex environment on the detectability of weak and small aerial target under space-based observation mode [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(3): 351-357. (in Chinese)
胡建明, 乔凯, 智喜洋, 等. 天基观测条件下复杂环境对空中弱小目标可探测性的影响[J]. *红外与毫米波学报*, 2019, 38(3): 351-357.
- [7] Tian Changhui, Yang Baihui, Cai Ming, et al. Effect of atmospheric background on infrared target detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 438-441. (in Chinese)
田昌会, 杨百愚, 蔡明, 等. 大气背景对红外目标探测的影响[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 438-441.
- [8] Liu R, Li X, Han L, et al. Track infrared point targets based on projection coefficient templates and non-linear correlation combined with Kalman prediction [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2013, 57(2): 68-75.
- [9] Cui Kun, Chen Fansheng, Su Xiaofeng, et al. Adaptive non-uniformity correction method for IRFPA with integration time changing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(11): 1104001. (in Chinese)
崔坤, 陈凡胜, 苏晓锋, 等. 自适应积分时间改变的红外焦平面非均匀校正方法[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(11): 1104001.
- [10] Wang Yingrui. Influence of non-uniformity of IRFPA responsibility on system sensitivity [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(3): 258-261. (in Chinese)
王英瑞. 红外探测器响应非均匀性对系统灵敏度的影响[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(3): 258-261.
- [11] Zhao Yunfeng. Research on high sensitivity long wavelength infrared information acquisition technology[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics), 2018.
- 赵云峰. 高灵敏度长波红外信息获取技术研究[D]. 上海: 中国科学院大学(上海技术物理研究所), 2018.
- [12] Liu Ming, Deng Jun, Feng Xianfei, et al. Design of highly sensitive space point target detection system [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(1): 121-128. (in Chinese)
刘明, 邓军, 冯献飞, 等. 高灵敏度空间点目标探测系统设计[J]. *中国光学*, 2018, 11(1): 121-128.
- [13] Long Liang, Zhang Lisha, Wu Limin. Testing technology of ultra-high sensitivity long-wave infrared camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(5): 0504001. (in Chinese)
龙亮, 张丽莎, 吴立民. 甚高灵敏度长波红外相机测试技术[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(5): 0504001.
- [14] Tian Qijie, Li Zhou, Chang Songtao, et al. Measurement method of infrared radiometric characteristic for high temperature small targets [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017(10): 1012004. (in Chinese)
田棋杰, 李周, 常松涛, 等. 高温小目标红外辐射特性测量方法[J]. *光学学报*, 2017(10): 1012004.
- [15] Chen Boliang. Important applications of IRFPA imaging advices [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(2): 168-172, 182. (in Chinese)
陈伯良. 红外焦平面成像器件的重大应用[J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(2): 168-172, 182.
- [16] Huang Sijie. Research on technology of geosynchronous orbit high dynamic range information acquisition[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics). 2015. (in Chinese)
黄思婕. 地球静止轨道大动态范围信息获取技术研究[D]. 上海: 中国科学院大学(上海技术物理研究所), 2015.
- [17] Richards Austin A, D'Souza Shariff. A novel NIR camera with extended dynamic range[C]//International Society for Optics and Photonics. In *Thermosense XXVIII*, 2006, 6205: 62050G.
- [18] Cannata R F, Hansen R J, Costello A N, et al. Very wide dynamic range SWIR sensors for very low background applications[C]//SPIE, 1999, 3698: 756-765.
- [19] Tao Kunyu, Li Fuwei, Zhou Yanping, et al. Infrared imaging system dynamic range adaptive adjust technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 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, 37(2): 265-269.