

红外多光谱技术在昼夜交替时段探测的应用

赵慧洁, 谷建荣, 籍 征, 李 娜, 李岩松

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 当利用红外探测系统在昼夜热交替时段进行目标探测时, 由于探测场景中目标和背景温度差会发生较大变化, 使得目标和背景之间的红外辐射差异在这一阶段的某些时刻很可能接近于 0, 体现在热红外图像中即为目标与背景“融合”为一体, 从而产生红外探测系统的“盲区”现象, 导致在昼夜热交替时段传统热红外探测系统无法有效识别目标。针对这一问题, 在分析热红外探测系统在昼夜热交替时段致盲原因的基础上, 提出一种基于中红外多光谱的昼夜热交替时段探测方法并研制了原理样机, 通过利用不同目标之间的红外光谱特性差异实现热交替时段目标的识别与区分。实验结果表明, 红外多光谱技术能有效提高传统热红外探测系统在昼夜热交替时段的目标探测能力, 相比同一时刻中波红外宽波段成像, 红外多光谱成像中目标和背景的 DN 值比值平均提高了约 18%, 能够为全天时红外探测系统的实际应用提供很好的借鉴。

关键词: 红外多光谱; 热红外系统; 昼夜热交替; 辐射对比度

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0204002

Application of infrared multi-spectral technique in the diurnal cycle detection

Zhao Huijie, Gu Jianrong, Ji Zheng, Li Na, Li Yansong

(School of Instrumentation Science & Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: When detecting a target over the diurnal cycle, due to the large temperature variation of targets and background objects, the infrared image contrast between target and background in a scene would probably approach to zero, by which the target would be blended into the background in thermal infrared image, causing the blindness of thermal infrared system, lowering the detection accuracy and even making the thermal sensor lose the target. Concerning this issue, based on the brief theoretical analysis on how the thermal crossover over the diurnal cycle influenced a conventional thermal infrared system, a mid-infrared (3–5 μm) multi-spectral method using different infrared spectral characteristics of different targets to solve the issue was presented. Furthermore, the prototype design and how multispectral technology was employed to help solve the thermal crossover detection problem were also described. The experimental results show that the multi-spectral infrared imaging system can increase the contrast of the detected images by 18% compared to the MWIR broadband image and effectively solve the failure of the conventional infrared sensor during the diurnal cycle, which is of great significance for infrared surveillance applications.

Key words: infrared multi-spectral; thermal infrared system; diurnal cycle; radiation contrast

收稿日期: 2017-08-03; 修订日期: 2017-10-07

基金项目: 国家自然科学基金(61177008)

作者简介: 赵慧洁(1966-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光学遥感载荷设计方面的研究。Email: hjzhao@buaa.edu.cn

0 引言

相对于可见光探测系统而言,热红外探测系统通过感知目标与背景之间的热辐射差异进行目标的探测与识别,因而具备全天候探测能力并被广泛应用于遥感、安防等民用及军事领域^[1]。但当利用热红外探测系统在昼夜热交替时段进行目标探测时,由于目标和背景受外界温度变化^[2]、自身热惯性以及发射率等内外因素的综合影响,很可能在这一阶段的某些时刻目标和背景之间的红外辐射差异接近于0,使得目标与背景融合为一体,进而导致红外探测系统的致盲,无法完成目标的有效探测^[3]。针对这一问题,学界学者从不同角度进行了研究。一些学者从低对比度红外图像处理的角度对问题进行了研究,基于直方图的图像灰度线性或非线性变换技术和小波算法等图像处理方式被应用于图像对比度增强而实现目标探测^[4-7],但这种方法的缺点在于前者在增强目标和背景对比度的同时容易将噪声放大,而后者在处理过程中存在着大量的数据计算,容易导致较高的探测虚警率。另一些学者从热红外探测系统的探测机理出发,探讨了利用红外多光谱探测技术解决该问题的可行性。由于光谱成像能在获取二维空间几何信息的同时还能获取目标的光谱信息^[8-9],因此利用目标之间不同的光谱特性在理论上是能够解决昼夜热交替时段红外探测系统致盲问题。Michael T.Eismann 和 Craig R.Schwartz 等人分别利用基于傅里叶变换和棱镜色散的红外双波段成像系统对昼夜交替时刻的目标探测进行了研究分析^[10-11],结果表明红外多光谱技术能较好地解决这一时刻目标丢失的问题,能够实时有效地从背景中探测到目标。但受到光谱分辨率、带宽以及传感器辐射灵敏度等条件的约束,当时的实验并未获得真正的实验图像数据和准确的测量数据,但他们的研究为解决这一问题提供了一种潜在的方法。

文中将在讨论昼夜热交替时段目标和背景热辐射的基础上,分析中红外多光谱应用于昼夜热交替时段目标探测的可行性,并提出具体的红外多光谱探测解决方案,通过红外多光谱成像原理样机完成对昼夜热交替时段的目标探测实验,获取相关数据以验证文中的结论。

1 理论背景

1.1 昼夜热交替时段热红外探测系统致盲分析

昼夜热交替时段,热红外探测系统在接收目标和背景自身热辐射的同时,也会接收到太阳经目标和背景的反射辐射,如图 1 所示。

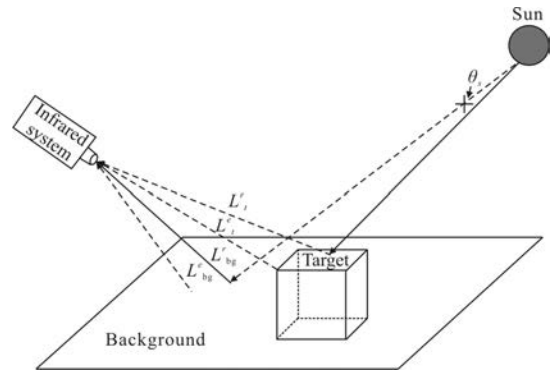


图 1 热红外探测系统接收辐射示意图

Fig.1 Schematic diagram of receiving radiation of the thermal infrared detecting system

热红外探测系统接收到的目标和背景辐射可表达为:

$$\begin{cases} L_{bg}(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi) = L_{bg}^r(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi) + L_{bg}^e(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi, T) \\ L_t(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi) = L_t^r(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi) + L_t^e(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi, T) \end{cases} \quad (1)$$

式中: L_t^e 和 L_{bg}^e 分别是目标和背景的自身辐射; L_t^r 和 L_{bg}^r 则是目标和背景反射的太阳辐射; $\lambda, \theta_v, \theta_s$ 和 T 分别对应波长, 测量系统观测天顶角, 太阳高度角和温度; 而 φ 则是 θ_v 和 θ_s 之间的方位角。

由于 DN 值与辐射 L 之间的关系可表达为:

$$DN = a \cdot L + b \quad (2)$$

因此目标和背景之间的 DN 值之差可写为:

$$C = |DN_t - DN_{bg}| = |a(L_t - L_{bg})| = |a(L_t^e - L_{bg}^e) + (L_t^r - L_{bg}^r)| \quad (3)$$

假设目标和背景的反射率分别为 ρ_t 和 ρ_{bg} , 如果忽略散射和透射, 目标和背景的吸收率为 $\alpha_t = 1 - \rho_t$ 和 $\alpha_{bg} = 1 - \rho_{bg}$ 。而由于漫反射的存在, 利用双向反射分布函数 BRDF 代替目标和背景的反射率以更好地体现太阳辐射的各向异性特性对反射率的影响。因此公式(3)可写为:

$$C = a \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} ([1 - BRDF_t(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi)] L_t^e(\lambda, T) -$$

$$[1 - \text{BRDF}_{\text{bg}}(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi)] L_{\text{bg}}^e(\lambda, T) d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [\text{BRDF}_t(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi) - \text{BRDF}_{\text{bg}}(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi)] L_s(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

式中： $L_s(\lambda)$ 为太阳辐射； $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为红外测量系统的工作波长范围，如果 θ_v 、 θ_s 和 φ 是恒定不变的常数，BRDF 则仅与物体本身的材料属性有关。

从公式(4)可以看出在昼夜热交替时段，伴随着目标和背景温度差会发生变化，目标和背景之间的 DN 值之差可能降低为 0 从而使目标与背景融合为一体，导致红外探测系统致盲。为了具体说明这一问题，将一天 24 h 划分为 5 个时间段，如图 2 所示。

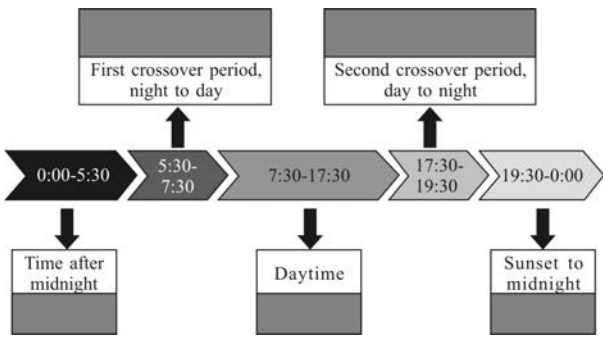


图 2 时间段划分示意图

Fig.2 Five time zones over one day

在 0:00~5:30 这一时段，由于目标通常与背景材质不同，目标与背景温差也不为 0，因此致盲现象通常不会发生；在 5:30~7:30 这一时段是“夜-昼”交替时段，在晴朗天气下，对于热惯性小的目标，如金属，其温度上升速度要快于背景目标，因此致盲现象通常会发生，反之，对于热惯性大的目标，如水体，致盲现象不一定会发生；在 7:30~17:30 这一时段是白昼时段，在没有其他外部天气影响下，由于目标温度高于背景温度，因此致盲现象通常不会发生；在 17:30~19:30 这一时段是“昼-夜”交替时段，对于热惯性小的目标，其温度下降速度要快于背景目标，因此致盲现象也通常会发生；在 19:30~0:00 这一时段是夜晚时段，由于目标与背景温差不为 0，因此致盲现象通常不会发生。

1.2 红外多光谱用于解决“盲区”的可行性

定义 $\text{RRD}(\lambda, T)$ 为目标和背景在测量波长范围内的相对热辐射，如公式(5)所示，其中太阳到达地球表面的辐照度 $L_s(\lambda)$ 由 MOTRAN 软件通过设定参

数计算得到，在设定条件下 $L_s(\lambda)$ 可以看做一个不变量，那么 $\text{RRD}(\lambda, T)$ 则只是温度、目标和背景发射率的函数。下面将分别讨论温度和发射率对相对热辐射的影响。

$$\text{RRD}(\lambda, T) = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [(\alpha_t L_t^e(\lambda, T_1) + (1 - \alpha_t) L_s(\lambda)) - (\alpha_{\text{bg}} L_{\text{bg}}^e(\lambda, T_2) + (1 - \alpha_{\text{bg}}) L_s(\lambda))] d\lambda / \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\alpha_{\text{bg}} L_{\text{bg}}^e(\lambda, T_2) + (1 - \alpha_{\text{bg}}) L_s(\lambda)) d\lambda \quad (5)$$

第一种情况，假设目标和背景的发射率相同，环境温度为 300 K，目标和背景的温差在 ± 5 K 范围内变化。由图 3 所见，在中波红外的 3.7~4.8 μm 波段范围， $\text{RRD}(\lambda, T)$ 的变化区间大约在 -15%~20%。

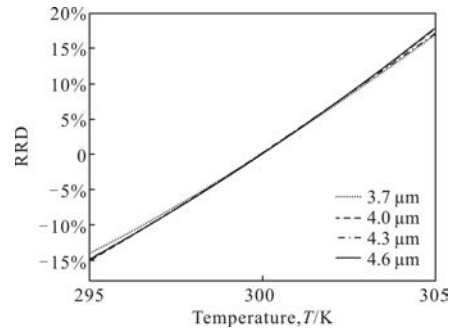
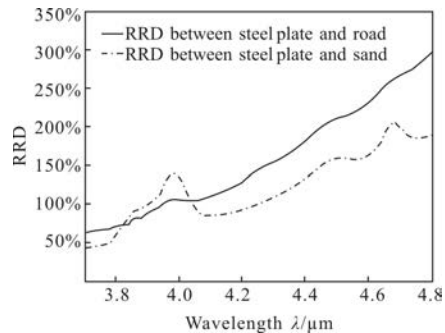


图 3 相同发射率条件下 3.7~4.8 μm 波段的 RRD 曲线

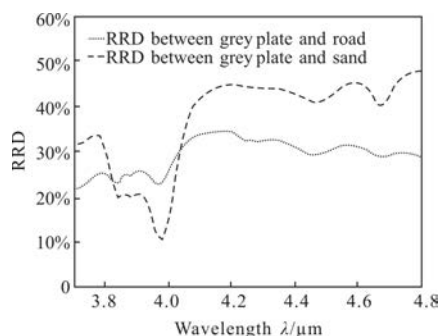
Fig.3 RRD curves under the condition of the same emissivity in 3.7~4.8 μm region

第二种情况，假设目标物是灰色电镀金属板和钢板，背景则分别是硬化路面和沙地，它们的温度均为 300 K。使用软件传感器从红外模块获取四种物质的发射率，代入公式(5)，从图 4 看出，在 3.7~4.8 μm



(a) 钢板于路面和沙地背景下 3.7~4.8 μm 波段的 RRD 曲线

(a) RRD curves of steel plate on the background of road and sand in 3.7~4.8 μm waveband



(b) 灰色电镀金属板于路面和沙地背景下 3.7~4.8 μm 波段的 RRD 曲线

(b) RRD curves of grey galvanized metal plate on the background of road and sand in 3.7~4.8 μm waveband

图 4 相同温度条件下 3.7~4.8 μm 波段的 RRD 曲线

Fig.4 RRD curves under the condition of the same temperature in 3.7~4.8 μm region

波段, $RRD(\lambda, T)$ 的变化区间除了在极个别波段低于 20%, 大部分位于 30%~300%, 在总体趋势上, 相比较于第一种由温度变化引起的 $RRD(\lambda, T)$ 变化, 目标和背景的发射率对相对辐射差的影响更占据主导作用。换句话说, 在中波红外波段, 利用目标和背景在特征波段发射率的不同能够用来解决昼夜热交替时段热红外探测器的致盲问题。

2 红外多光谱探测系统设计

为了验证红外多光谱技术在昼夜热交替时段的目标探测能力, 同时考虑到仪器设计的紧凑性和便携性, 提出了如图 5 所示的红外多光谱探测解决方案并完成原理样机的研制。图 5 中, 红外多光谱探测

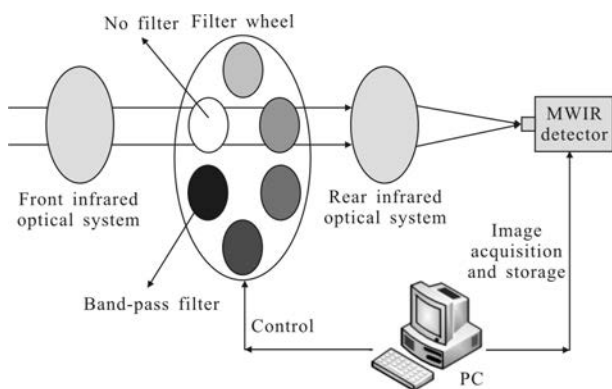


图 5 红外多光谱探测原理图

Fig.5 Schematic of infrared multi-spectral detecting system

系统的探测器为工作波段为 3.7~4.8 μm 制冷型中红外探测器, 面阵大小 320×256, 系统焦距 100 mm, 视场大小 5.5°×4.4°, 探测系统通过由瑞典 Spectrogon 公司生产的 5 片中波红外窄带滤光片组成的电动滤光轮完成多光谱图像获取, 滤光片的中心波长分别为 3 700、3 800、4 120、4 420、4 720 nm。同时, 滤光轮上还保留一个未安装滤光片的通孔使得系统能够分时获取中红外全波段和多光谱图像以便于进行对比分析, 原理样机如图 6 所示。



图 6 中红外多光谱探测系统原理样机

Fig.6 Prototype of mid-infrared multi-spectral detecting system

3 实验验证与分析

原理样机被安置于楼顶以实现地对地观测, 木板、镀锌金属板和铁板三个目标物放置于楼下的混凝土路面上, 如图 7 所示。目标距离探测系统的垂直高度约为 40 m, 直线距离约为 100 m。

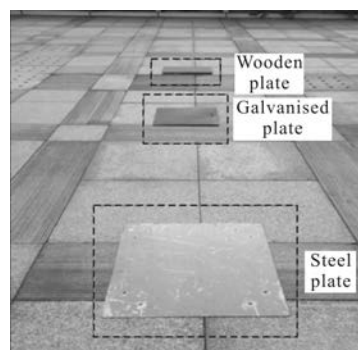


图 7 三个不同目标物和背景的对地观测示意图

Fig.7 Visible image of target site consisting of three different plates and natural background

为了最大限度减小环境温度、相对湿度以及太阳辐射等因素对实验的影响, 在少云、相对于干燥且温度变化较为剧烈的一天进行实验, 实验时间为该天的 0:00 至 23:59, 环境温度、图像数据都按照每分钟

一次的速率进行采集,为了便于描述,将“夜-昼”交替时刻称为第一阶段,“昼-夜”交替称为第二阶段。如图 8(c)所示,分别在 06:57 和 18:48 左右,两块金属板目标与背景在宽波段图像进行了融合,验证了在昼夜热交替时段无法从中波红外宽波段图像中探测到目标这一致盲现象的存在。

进一步,用目标和背景的 *DN* 值比值来量化目标从背景中的可探测程度,将两融合阶段目标和背景的 *DN* 值比值列于表 1,数值越接近于 1,表示目标和背景的融合度更高,探测系统致盲的程度也就更高。

表 1 红外宽波段图像目标和背景 *DN* 值比值

Tab.1 *DN* value ratio of target and background in infrared broadband image

Time	Wooden plate	Galvanised sheet	Steel sheet
First stage	0.850	0.989	1.017
Second stage	0.824	1.011	1.020

将图 8 中的两阶段光谱图像中的目标和背景 *DN* 值比值均列入表 2,左侧值为第一阶段,右侧为第二阶段,数据显示 5 个波段对比度均有了明显提升,而且在整体趋势上,随着波长的增大,对比度提升更为明显,这也与图 4(a)中所示相符合。

计算结果表明,相比同一时刻中波红外宽波段成像,两阶段多光谱图像镀锌金属板 *DN* 值比值分别提升 10.0%~27.1% 和 8.5%~24.5%,铁板提升 5.9%~34.8% 和 5.0%~33.2%。

表 2 两阶段红外光谱图像融合目标和背景 *DN* 值比值

Tab.2 *DN* value ratio of fusion target and background in the two stage infrared spectrum image

Waveband/nm	Galvanised sheet	Life-up	Steel sheet	Life-up	Galvanised sheet	Life-up	Steel sheet	Life-up
3 700	1.088	10.0%	1.077	5.9%	1.097	8.5%	1.071	5.0%
3 800	1.135	14.8%	1.150	13.1%	1.131	11.9%	1.133	11.1%
4 120	1.257	27.1%	1.286	26.4%	1.223	21.0%	1.256	23.1%
4 420	1.250	26.4%	1.322	30.0%	1.257	24.3%	1.359	33.2%
4 720	1.228	24.2%	1.371	34.8%	1.259	24.5%	1.357	33.0%

而为了验证该探测系统在不同条件下的探测能力,在有轻度雾霾,相对湿度为 62% 的一天早上进行

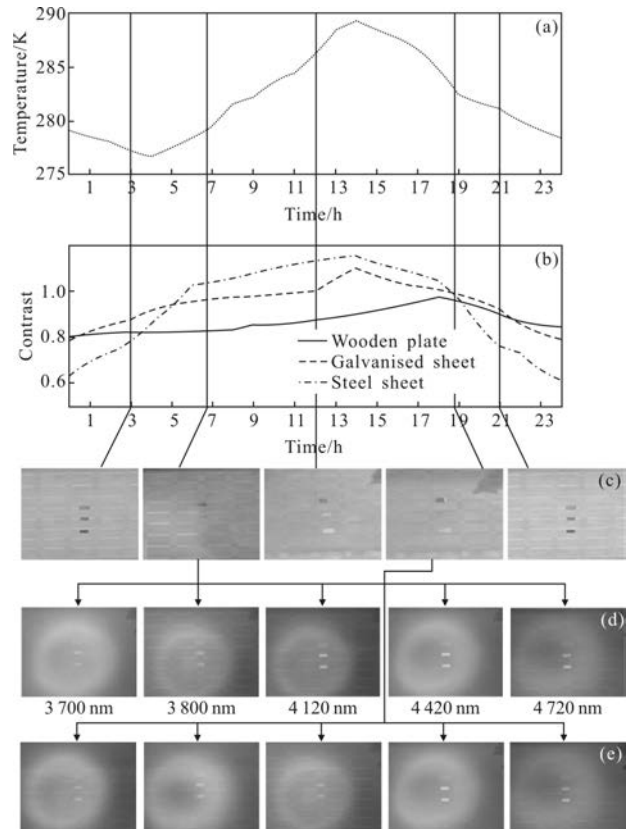


图 8 (a) 24 h 环境温度变化曲线;(b)宽波段图像三目标与路面背景对比度曲线;(c)5 个阶段的红外宽波段图像;(d)第一阶段红外光谱图;(e)第二阶段红外光谱图

Fig.8 (a) Ambient temperature during the 24-hour test; (b) contrast curve among the three targets and the background of road; (c) images of the targets in the five time zones; (d) images of the targets at 4 120 nm, 4 420 nm, and 4 720 nm at the first diurnal cycle; and (e) images of the targets at 4 120, 4 420, and 4 720 nm at the second diurnal cycle

实验,在不间断的观测过程中,某一时刻镀锌金属板和铁板与背景在宽波段图像中进行了融合,如图 9(a)

所示,经计算此刻两目标与背景的 DN 值比值分别为 1.001 和 1.048,这也与表 1 数据相类似,值越接近于 1,表示目标和背景的融合度更高;而同时刻获取到该时刻的红外多光谱图像如图 9(b)~(f)所示。

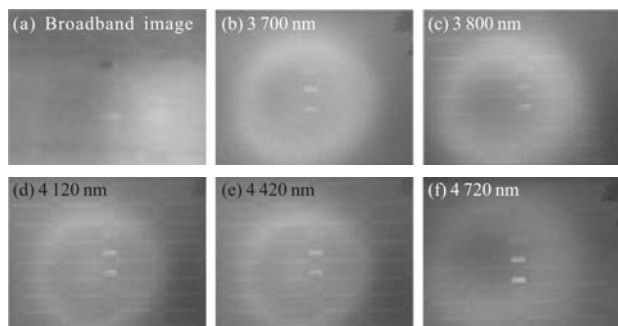


图 9 轻度雾霾条件下的宽波段图像和光谱图像

Fig.9 Broadband and spectral images under mild smog conditions

由表 3 可以看出,在轻度雾霾条件下,受到大气中气溶胶吸收和散射的影响,多光谱图像中镀锌金属板和的铁板的 DN 值比值提升分别为 8.4%~18.2%和 2.3%~14.2%,虽然提升量没有良好天气条件下的明显,但在图像中仍然能分辨出目标和背景,这说明红外多光谱探测系统在轻度雾霾条件下也能够用来解决昼夜热交替时段探测器的致盲问题。

表 3 轻度雾霾条件下光谱图像融合目标和背景 DN 值比值

Tab.3 DN value ratio of fusion target and background of the spectral image under mild smog conditions

Waveband /nm	Galvanised sheet	Life-up	Steel sheet	Life-up
3 700	1.085	8.4%	1.072	2.3%
3 800	1.073	7.2%	1.080	3.1%
4 120	1.102	10.1%	1.087	3.7%
4 420	1.099	9.8%	1.108	5.7%
4 720	1.183	18.2%	1.197	14.2%

4 结 论

文中针对在昼夜热交替时段传统热红外探测系统因目标和背景融合而导致探测系统致盲,无法识别目标的问题进行了探讨。在分析昼夜热交替时段探测系统致盲原因的基础上,提出利用中红外多光

谱成像技术解决这一问题的方案并对该方法的可行性进行了理论分析,设计并研制出了工作波段为 3.7~4.8 μm 的红外多光谱探测系统原理样机,在选取合适时机的基础上搭建实验平台分别进行了夜-昼、昼-夜两阶段的成像实验,对获取到的实验数据进行了系统分析。实验结果表明,红外多光谱成像中目标和背景的 DN 值比值相比同一时刻宽波段成像提高约为 2.3%~34.8%,能有效解决昼夜交替阶段目标和背景相融合而无法探测的问题,为下一步实现真正意义的全天候红外探测提供了一种可行的研究手段。

参考文献:

- [1] Sun Zhaolei, Hui Bin, Qin Mofan, et al. Object detection method based on saliency measure for infrared radiation image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (9): 2633-2637. (in Chinese)
孙照蕾, 惠斌, 秦莫凡, 等. 红外图像显著目标检测算法 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2633-2637.
- [2] Gong Jiamin, Guo Tao, Cao Yi, et al. Correlativity analysis between image gray value and temperature based on infrared target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45 (3): 0304006. (in Chinese)
巩稼民, 郭涛, 曹懿, 等. 红外靶标的图像灰度与温度相关性剖析 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 0304006.
- [3] Retief S J P, Willers C J, Wheeler M S. Prediction of thermal crossover based on imaging measurements over the diurnal cycle [C]//AeroSense 2003. International Society for Optics and Photonics, 2003: 58-69.
- [4] Zhou Xiaojun, Tan Wei, Liu Meng, et al. A new method of contrast enhancement of infrared image [J]. *Radio Engineering*, 2015(2): 26-29. (in Chinese)
周小军, 谭薇, 刘萌, 等. 一种红外图像对比度增强新方法 [J]. 无线电工程, 2015(2): 26-29.
- [5] Zhang Yan, Shi Yaotao, Wu Chunfeng, et al. An improved histogram equalization enhancement algorithm for infrared images [J]. *Infrared*, 2014, 35(9): 43-47. (in Chinese)
张燕, 史要涛, 武春风, 等. 基于改进直方图均衡的红外图像对比度增强算法 [J]. 红外, 2014, 35(9): 43-47.
- [6] Gong Wupeng, Wang Yongzhong. Contrast enhancement of infrared image via wavelet transform [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2000, 22 (6): 117-119. (in Chinese)
宫武鹏, 王永仲. 一种基于小波变换的红外图像对比度增

- 强技术[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(6): 117-119.
- [7] Chang Hongtao, Meng Qinghu. An infrared image enhancement algorithm based on wavelet transform [J]. *Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science*, 2015, 36(1): 48-51. (in Chinese)
常宏韬, 孟庆虎. 基于小波变换的一种红外图像增强算法 [J]. 河南科技大学学报 (自然科学版), 2015, 36(1): 48-51.
- [8] Meng Qinghua. Review of target recognition technology in infrared spectral imaging [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2015, 12(21): 81. (in Chinese)
孟庆华. 红外光谱成像目标识别技术综述[J]. 科技创新导报, 2015, 12(21): 81.
- [9] Zhang Ruolan, Chen Jie. From single-band to ultraspectral-infrared spectral imaging technology oriented to Multi-dimension information awareness [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(4): 257-264. (in Chinese)
张若岚, 陈洁. 从单波段到超光谱--面向多维信息感知的红外光谱成像技术[J]. 红外技术, 2014, 36(4): 257-264.
- [10] Michael T Eismann, Jack N Cederquist, Craig R Schwartz. Infrared multispectral target/background field measurements [C]//SPIE Signal and Data Processing of Small Targets, 1994, 2235, doi:10.1117/12.179108.
- [11] Craig R Schwartz, Michael T Eismann, Jack N Cederquist, et al. Thermal multispectral detection of military vehicles in vegetated and desert backgrounds [C]//SPIE Targets and Backgrounds: Characterization and Representation II, 1996, 2742, doi:10.1117/12.243007.