

文章编号:1002-2082(2018)04-0574-05

短波红外成像系统对激光光斑探测能力分析

陆红强,张璟玥,张宝泉

(西安应用光学研究所,陕西 西安 710065)

摘 要:通过短波红外探测器灵敏度、目标和环境探测输出信噪比、对比度等分析,计算给出不同大气能见度、环境照度条件下,短波红外热像对外界景物和激光光斑的探测距离,并对理论分析进行试验验证。结果表明,在大气能见度 1 km~3 km、环境照度 1 lx~1 000 lx、阈值信噪比 2.25~10、阈值对比度 0.01~0.02 的条件下,短波红外热像对激光光斑探测距离为 0 km~3.5 km。

关键词:短波红外;激光光斑;探测能力

中图分类号:TN929.12

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201839.0406001

Analysis of detection capability of shortwave infrared imaging system on laser spot

Lu Hongqiang, Zhang Jingyue, Zhang Baoquan

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: Through the analysis on the sensitivity of short-wave infrared (SWIR) detectors, the signal-to-noise ratio (SNR) of the target and the environmental detection output and the contrast, the detecting distances of SWIR thermal image to external scenes and laser spots under different atmospheric visibility and ambient illumination conditions were calculated and theoretically analyzed, moreover, the theoretical analysis was verified by testing. The results show that the detection distance of the laser spot by the SWIR thermal image is less than 3.5 km in the conditions of atmospheric visibility 1 km~3 km, ambient illumination 1 lx~1 000 lx, threshold SNR 2.25~10, and threshold contrast ratio 0.01~0.02.

Key words: shortwave infrared; laser spot; detecting ability

引言

短波红外是指波长为 1 μm ~2.5 μm 的红外辐射,其利用目标反射环境中的短波红外辐射来实现探测。短波红外可以提供可见光、近红外、中波红外和长波红外所不能提供的信息,填补近红外和中波红外成像之间的光谱空缺,实现在 3 个大气红外透射窗口的“无缝隙探测”,对在红外波段全面获取目标的信息具有重要意义^[1-7]。

在国外,短波红外探测器及成像系统在机载平台上已经得到广泛运用,逐渐成为机载光电吊舱主要光电传感器之一。国内机载光电系统探测/感知的光谱波段涉及可见光、近红外、中波红

外和长波红外,短波红外成像系统在机载平台上运用较少。

1 短红外探测技术在机载光电吊舱上的运用

在国外,短波红外成像系统已成为机载光电吊舱低照度光电传感器,FLIR 公司推出的 Star SAFIRE 380-HDc、Star SAFIRE 380-HLD 等机载光电吊舱内集成铟镓砷短波红外成像系统,可对车辆目标上的激光光斑进行可视化探测,将红外/彩色视频图像与短波红外视频图像进行融合,增强态势感知能力,如图 1 和图 2 所示。

收稿日期:2017-10-13; 修回日期:2018-03-28

作者简介:陆红强(1979—),男,浙江长兴人,博士,主要从事机载光电总体技术研究。E-mail:lhq205205@163.com

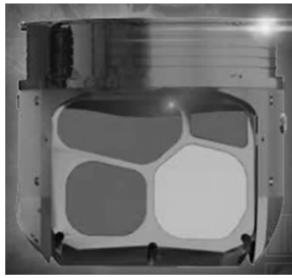


图1 Star SAFIRE 380-HDc 光电吊舱

Fig.1 Star SAFIRE 380-HDc electro-optical pod



图2 Star SAFIRE 380-HLD 光电吊舱对激光光斑探测

Fig.2 Laser spot detected by Star SAFIRE 380-HLD EO pod

2 短波红外探测器灵敏度计算

2.1 短波红外探测器参数

以 Xenics 公司生产的短波红外探测器 XSW-640 为例,探测器主要参数如下。

探测器类型:InGaAs COMS 二极管阵列

像元阵列和尺寸:640 像素 × 512 像素,20 μm × 20 μm

响应波段:900 nm ~ 1 700 nm

量子效率:大于 65% (1 000 nm ~ 1 600 nm)

积分时间范围:1 μs ~ 40 ms (调节补偿为 1 μs)

噪声 (实测值/1 ms 积分时间): < 500 electrons (高动态) / < 95 electrons (高增益)

动态范围:66 dB (高动态范围) / 52 dB (高增益)

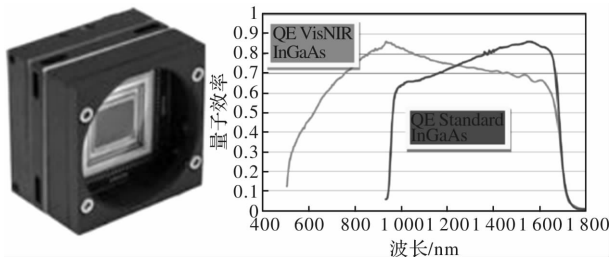


图3 XSW-640 短波红外探测器外形及量子效率

Fig.3 XSW-640 SWIR detector and quantum efficiency curves

2.2 探测器灵敏度计算

在 1ms 积分时间内,短波红外探测器输出信

噪比为

$$\frac{S}{N} = \frac{(D_{QE} \cdot \frac{P}{hf})ev}{i_{dark}} \quad (1)$$

式中: D_{QE} 为量子效率 (计算中取量子效率为 65%); P 为入射光功率; hf 为单光子能量; i_{dark} 为噪声电流; e 为单个电子电荷电量; v 为电荷运动速度。当 SNR 取值为 1 时,可计算得到 P ,从而可得到探测灵敏度 H_{min} 为 $3.6 \times 10^{-2} lx$ 。

2.3 典型环境下短波红外照度

短波红外基于目标对环境辐射或照射激光反射成像, $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内的辐射照度为

$$E_{\lambda_1 \sim \lambda_2} = E_{total} \times (F_{0 \sim \lambda_2} - F_{0 \sim \lambda_1}) \quad (2)$$

式中 $F_{0 \sim \lambda}$ 是波长从 $0 \sim \lambda$ 的黑体辐射占 $0 \sim +\infty$ 黑体辐射的百分比,根据文献 1 给出的环境照度值,计算得到不同环境下 $0.9 \mu m \sim 1.7 \mu m$ 波段照度 E_{atm} 如表 1 所示。

表 1 不同条件下 $0.9 \mu m \sim 1.7 \mu m$ 波段环境照度

Table 1 Environmental illuminance in $0.9 \mu m \sim 1.7 \mu m$ under different environments

天空状态	环境照度 E_{atm}/lx
散射太阳光	$(2.446 \sim 4.9) \times 10^3$
阴天	2.446×10^2
黄昏/阴暗天	2.446×10^1
黎明/暮光	2.446
微明	2.446×10^{-1}

2.4 特定距离上的激光照度

激光测照器对于特定距离的目标进行测照,被照射目标上的激光照度 E_{laser} 为

$$E_{laser} = \frac{P_t \tau_t}{\pi \theta^2 R^2} e^{-\mu R} \quad (3)$$

式中: P_t 为激光照射功率,75 mJ/20 Hz; τ_t 为发射光学系统透过率,取 0.9; μ 为激光发射机到激光光斑之间大气平均衰减系数; θ 为激光束散角,0.11 mrad; R 为激光发射机到激光光斑的距离。

3 激光光斑和环境探测输出信噪比

信噪比 S/N 定义为输出信号与随机噪声均方根的比值,根据 GJB2705-1996 要求,相机探测输出信噪比 S/N 最小值不小于 10。对激光光斑和环境探测输出信噪比为^[8-10]

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{target} = \frac{\rho_{target} (E_{laser} + E_{atm}) \tau_r \theta^2 A_r}{S_d H_{min}} \exp(-\mu R)$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{atm} = \frac{\rho_{atm} E_{atm} \tau_r \theta^2 A_r}{S_d H_{min}} \exp(-\mu R) \quad (4)$$

式中: ρ_{target} 为目标反射率,黑底铬绿涂料平均反射率为 $0.24^{[11]}$; ρ_{atm} 为环境反射率,靶场环境平均反射率为 0.36 ; H_{min} 为探测器阈值灵敏度, 3.6×10^{-2} lx; τ_r 为接收光学系统透过率,取 0.75 ; A_r 为接收面积,接收口径为 $\Phi 61$ mm; S_d 为探测器面积, 1.28×10^{-4} m²。

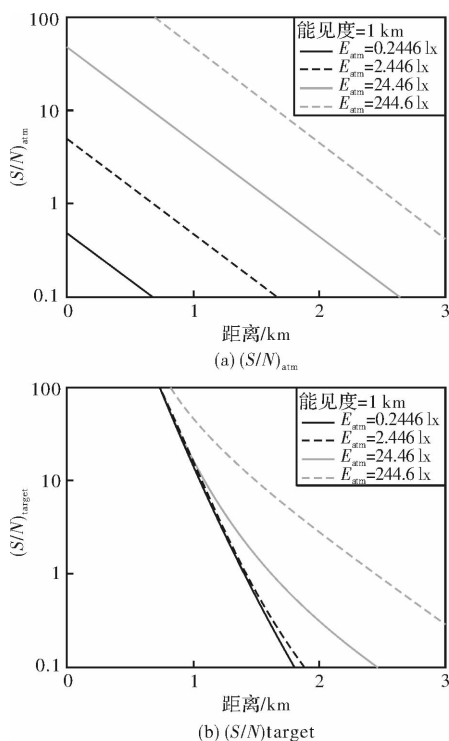


图4 探测输出信噪比

Fig. 4 Detected output SNR

在1 km大气能见度条件下,短波红外热像仪对于环境和激光光斑探测输出信噪比如图3所示。当环境照度分别为0.244 6 lx和2.446 lx时,短波红外热像无法实现特定距离处环境清晰成像;当环境照度分别为24.46 lx和244.6 lx时,能够对0.68 km和1.66 km处环境景物进行清晰成像。当环境照度分别为0.244 6 lx、2.446 lx、24.46 lx和244.6 lx时,能够对1.05 km、1.06 km、1.1 km和1.51 km处激光光斑清晰成像。

采用某InGaAs短波红外热像仪在50 m高度对外界场景进行成像实验,该热像仪采用TEC制冷,探测器分辨率为320像素×256像素、像元尺寸为25 μm×25 μm,光学视场为20°×15°、光学口径为10 mm。

在1 km大气能见度、阴天下午(预计环境照度为244.6 lx)条件下,能够实现对2 km处楼层探测;在1 km大气能见度、阴天晚上(预计环境照度

为1 lx)条件下,无法对0.15 km处楼层探测。如图5所示,实验结果与仿真计算相符。

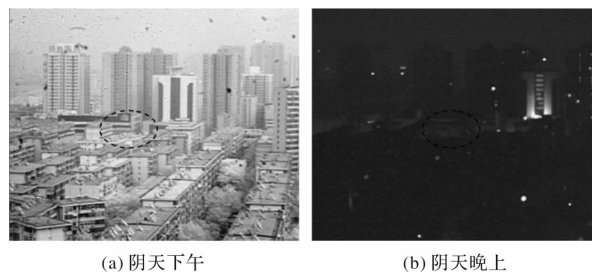


图5 环境探测成像结果

Fig. 5 Environmental detection imaging results

4 激光光斑和背景探测输出对比度

对于特定距离处,目标与背景对比度 C_0 为

$$C_0 = \frac{(E_{\text{laser}} + E_{\text{atm}})\rho_{\text{target}} - E_{\text{atm}}\rho_{\text{atm}}}{(E_{\text{laser}} + E_{\text{atm}})\rho_{\text{target}} + E_{\text{atm}}\rho_{\text{atm}}} \quad (5)$$

短波红外热像仪探测输出目标与背景对比度 C 为

$$C = C_0 \times \text{MTF}_A \times \text{MTF}_{\text{LOS}} \times \text{MTF}_{\text{Optics}} \times \text{MTF}_{\text{detector}} \times \text{MTF}_E \quad (6)$$

式中: MTF_A 为大气对比度调制传递函数,包括含大气通道传递函数和大气湍流传递函数; MTF_{LOS} 为瞄准线稳定性调制传递函数; $\text{MTF}_{\text{Optics}}$ 为光学系统调制传递函数; $\text{MTF}_{\text{detector}}$ 为光电成像探测器调制传递函数; MTF_E 为信号处理调制传递函数。

不同大气能见度条件下,短波红外热像对于激光光斑和背景探测输出对比度如图6所示。大气能见度为1 km、探测输出对比度阈值为0.02,环境照度分别为0.244 6 lx、2.446 lx、24.46 lx和244.6 lx时,短波红外热像对激光光斑探测距离分别为1.55 km、1.43 km、1.16 km和0.81 km。对于高环境照度条件下,激光照度随着距离的增加而降低,当目标辐射亮度和环境辐射亮度相等时,短波红外热像探测输出目标背景对比度为0,无法区分目标和背景。如图6(b)曲线所示,当环境照度为244.6 lx,激光测照距离为1.79 km时,短波红外热像仪探测输出目标/背景对比度为0;在2.64 km处,探测输出目标背景对比度为0.022。仿真结果表明:1)由于激光照度的降低,探测输出目标背景对比度随着测照距离的增加而降低;2)特定距离下,探测输出目标背景对比度随着环境照度的增加而降低;3)探测输出目标背景对比度随着大气能见度的增加而增加。

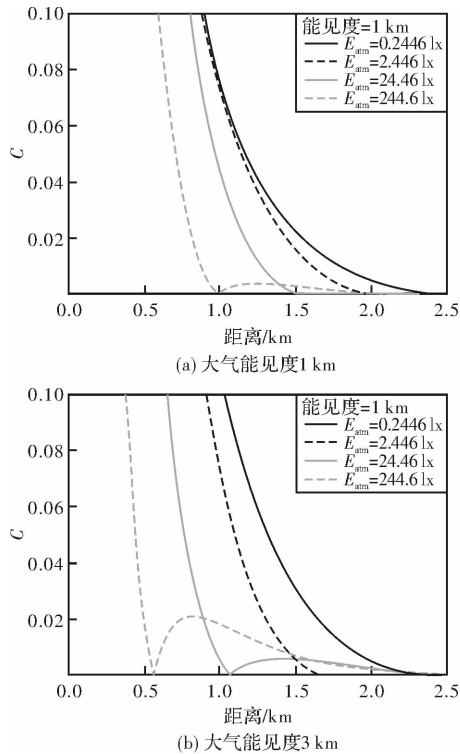


图6 探测输出对比度
Fig. 6 Detected output contrast ratio

5 结论

由于短波红外热像仪具有穿透能力强,可以对激光光斑进行可视化探测等特点,在机载平台上已经得到广泛的运用。基于文中激光测照器和短波红外热像仪设定参数,计算结果表明:短波红外热像仪对激光光斑探测距离与大气能见度、环境照度、阈值信噪比、阈值对比度、探测器灵敏度等众多因素有关,在大气能见度1 km~3 km、环境照度1 lx~1 000 lx、阈值信噪比2.25~10、阈值对比度0.01~0.02条件下,短波红外对激光光斑探测距离为0 km~3.5 km。

短波红外对于激光光斑的探测,还存在如下规律:

1) 当环境照度较低时,受限于探测灵敏度,短波红外对于环境态势(周围树木、道路等)探测能力差;

2) 当环境照度较高,或目标背景和辐射源(太阳)成为镜面反射时,受限于探测输出对比度,激光光斑将无法从背景中区分;

3) 当环境照度较高时,对于短波红外热像仪进行滤光设计(以激光波段为中心),可降低环境照

度,提高激光光斑的探测信噪比和探测距离。

参考文献:

- [1] CAI Yi, HU Xu. Short wave infrared imaging technology and its defence application[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006,35(6):643-647.
蔡毅,胡旭.短波红外成像技术及其军事应用[J].红外与激光工程,2006,35(6):643-647.
- [2] ZHANG Weifeng, ZHANG Ruolan, ZHAO Lusheng, et al. Development progress of InGaAs short-wave infrared focal plane array[J]. Infrared Technology, 2012,34(6):361-365.
张卫锋,张若岚,赵鲁生,等. InGaAs 短波红外探测器研究进展[J]. 红外技术,2012,34(6):361-365.
- [2] MARC P H, DOUGLAS S M. Overview of SWIR detectors, cameras, and applications [J]. SPIE, 2008,6939:693901-693911.
- [3] DRIGGERS R G, HODGKIN V, VOLLMER-HAUSEN R. What good is SWIR? Passive day comparison of VIS, NIR, and SWIR[J]. SPIE, 2013, 8706:8706L1-8706L15.
- [4] MALCHOW Douglas. High speed short wave infrared (SWIR) imaging and range gating cameras[J]. SPIE, 2007,6541:654106L1-654106L12.
- [5] LIU Junhua, GAO Xinjiang, ZHOU Xun. Developments and perspectives of SWIR InGaAs focal plane arrays[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(5):683-688.
刘军华,高新江,周勋.短波红外 InGaAs 焦平面探测器的技术进展[J]. 半导体光电, 2015, 36(5): 683-688.
- [6] GUO Hui, PENG Chaxia, JIAO Gangcheng, et al. Shortwave-infrared-extended image intensifier technology and its application[J]. Journal of Applied Optics, 2014,35(3):476-483.
郭晖,彭岔霞,焦岗成,等.向短波红外延伸的微光夜视技术及其应用[J].应用光学,2014,35(3): 476-483.
- [7] Manual of Infrared photoelectric system -Infrared radiation[M]. Tianjin: The 8358rd Research Institute at the Third Academy of the China Aerospace and Industry Corporation, 1997: 176.
航天工业总公司八三五八所.红外光电系统手册—红外辐射[M].天津:航天工业总公司第三研究院八三五八所,1997:176.
- [8] CHEN Xinjin, YUAN Yan, LI Liying, et al. Analysis of signal-to-noise ratio for target detection[J].

Journal of Applied Optics, 2007,28(4):397-401.

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):397-401.

[9] YANG Bingxin. Study on the SNR of TDICCD cam-

era [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing,

2005,26(2):22-24.

杨秉新. TDICCD 相机的信噪比的研究[J]. 航天返回

与遥感,2005,26(2):22-24.