

# 基于光谱测量数据的自适应波段选择技术

周佳巧<sup>1,2,3\*\*</sup>, 崔文楠<sup>1\*</sup>, 张涛<sup>1\*\*\*</sup>, 黄夏阳<sup>1,4</sup>, 王周春<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海技术物理研究所智能红外感知重点实验室, 上海 200083;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>上海科技大学, 上海 201210;

<sup>4</sup>上海大学, 上海 200444

**摘要** 基于光谱测量数据,综合考虑背景辐射和仪器噪声对目标探测的干扰,提出一种自适应波段选择方法,并进行实验验证。利用声光可调谐(AOTF)成像光谱仪采集光谱数据,光谱扫描波段为 400~1000 nm。对天空背景下的无人机目标和墙面背景下的静态物体目标进行探测,计算各波长的综合信噪比,以综合信噪比最大值的 70%为阈值,选择合适的工作波段。波段选择的结果符合实际情况,所提方法能有效地选择不同目标的最优探测波段。

**关键词** 光电子学; 光电探测; 多种目标; 自适应; 波段选择

中图分类号 TN219

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.232501

## Adaptive Band Selection Technique Based on Spectral Measurement Data

Zhou Jiaqiao<sup>1,2,3\*\*</sup>, Cui Wennan<sup>1\*</sup>, Zhang Tao<sup>1\*\*\*</sup>, Huang Xiayang<sup>1,4</sup>, Wang Zhouchun<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Intelligent Infrared Perception, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Shanghai Tech University, Shanghai 201210, China;

<sup>4</sup>Shanghai University, Shanghai 200444, China;

**Abstract** In this study, we propose an adaptive band selection method based on the spectral measurement data, considering the interference of background radiation and instrument noise on target detection. Further, an acousto-optic tunable filter imaging spectrometer is used to collect the spectral data with a spectral scanning band of 400-1000 nm. An unmanned aerial vehicle target and a static object are detected against a sky background and a wall background, respectively. The integrated signal-to-noise ratio of each wavelength is calculated to be 0.7 times the maximum value and is set as the threshold for selecting an appropriate working band. The band selection result is in accordance with the actual situation. The experimental results demonstrate that the proposed method can effectively select optimal detection bands for different targets.

**Key words** optoelectronics; photoelectric detection; multiple targets; adaptive; band selection

**OCIS codes** 250.0040; 040.1880; 300.6300; 070.4790

## 1 引言

光电探测系统是卫星进行目标探测、执行任务的关键载荷之一。传统的卫星光电探测系统只针对某一特定目标进行设计,根据目标特性和探测要素设定系统参数,卫星发射后系统的工作波段、口径大小、探测视场、分辨率等参数都不能改变,只能执行

单一任务<sup>[1]</sup>。为实现多种类不同目标的探测和识别,卫星光电探测系统需要进行自我控制和自我调整,根据任务需求,在轨实现系统参数的自适应调整,具有更大的自主性和灵活性<sup>[2-3]</sup>。

不同的目标和背景在各个波段具有不同的辐射特性,因此探测不同目标和背景,最优探测波段是不同的。例如对于高温目标,其热辐射主要集中在短

收稿日期: 2019-05-15; 修回日期: 2019-05-17; 录用日期: 2019-05-23

\* E-mail: cuiwennan@mail.sitp.ac.cn; \*\* E-mail: zhoujq1@shanghaitech.edu.cn; \*\*\* E-mail: haozzh@sina.com

波和中波红外,而常温和低温目标则适合在长波红外进行探测。在目标探测过程中,进行波段选择有利于更好地区分目标与背景,有效提高探测概率,并降低虚警概率。智能光电探测系统针对不同场景目标模式,在自适应调整系统参数过程中,首先应选择最优工作波段。自适应波段选择技术是智能光电探测系统实现的关键技术之一。

不同物质成分具有独特的辐射、反射和吸收光谱,通过光谱曲线信息容易分析目标和对应背景特性。利用光谱曲线的变化,不仅可以探测到出现的目标,还可以分析目标材料的组成<sup>[4-5]</sup>。经特殊材料外形设计的隐身目标和伪装后不易被察觉的目标都可以利用光谱技术探测到。在远距离目标探测过程中,目标在探测器上通常仅表现为点目标,没有细节和边缘信息,光谱技术可以大幅提高低空间分辨率和低对比度的弱小目标的探测和识别能力<sup>[6]</sup>。因此,本文利用目标和背景的精特征光谱数据,自适应选择不同任务目标最佳探测波段,实现智能探测。

## 2 波段选择技术

宽谱带范围内目标辐射强度变化剧烈,并非一直处于较高水平,为实现稳定探测,需要选择目标辐射强度较大的窄带光谱波段进行探测<sup>[7]</sup>。最优波段的选择有利于提高目标探测概率,并减少图片下传量。针对某典型目标,选取最佳的探测波段时,需从目标与背景的光谱辐射特性入手,综合考虑目标与仪器噪声、背景杂波辐射对目标探测的影响。为更好地实现对目标的有效探测,需要选择目标信号强、背景和噪声对目标探测干扰小的波段,所以采用综合信噪比(SSNR,  $S_{\text{SNR}}$ )法<sup>[8]</sup>。综合信噪比的定义为

$$S_{\text{SNR}}(\lambda) = \frac{I_{\text{T}}(\lambda)}{\sqrt{I_{\text{B}}^2(\lambda) + \sigma_{\text{D}}^2(\lambda)}}, \quad (1)$$

式中: $I_{\text{T}}(\lambda)$ 为目标信号强度; $I_{\text{B}}(\lambda)$ 为背景信号强度; $\sigma_{\text{D}}(\lambda)$ 为成像系统的噪声标准差。

智能光电探测系统在探测目标过程中,利用光谱仪获得探测场景全波段光谱。目标出现后,光谱曲线发生变化。利用最小距离匹配、光谱角匹配<sup>[9]</sup>等算法将探测到的光谱曲线与数据库目标曲线匹配,识别目标。若目标为任务所需探测的目标,需选择最优工作波段进行进一步探测。

波段选择的流程如图1所示。利用阈值分割法选出SSNR曲线图中 $S_{\text{SNR}}$ 较大的波段,获得全波段

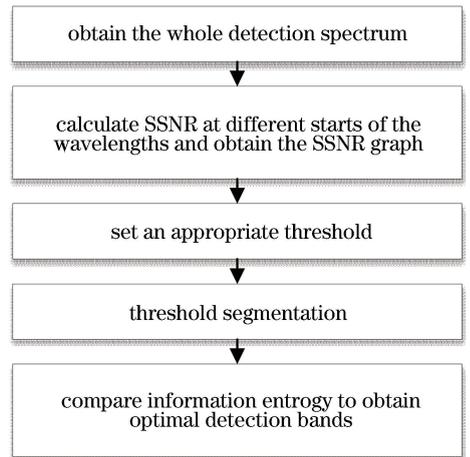


图1 波段选择流程图

Fig. 1 Flowchart of band selection

光谱曲线。令全波段中SSNR的最大值为 $S_{\text{max}}$ ,将 $0.7S_{\text{max}}$ 作为阈值进行阈值分割,获得较优的探测波段区间。若存在多个较优波段,则分别计算每个较优波段的信息熵,选择信息熵最大的波段作为最优探测波段,设定为光学系统波段参数。

光谱仪有多种类型,包括棱镜光谱仪、衍射光栅光谱仪、干涉型光谱仪等<sup>[10]</sup>。自适应波段选择的方案为采用傅里叶变换光谱仪进行外场目标辐射光谱测量<sup>[11]</sup>。在傅里叶光谱数据处理的实现,可校正光谱误差,星上光谱变换前需要先对干涉图进行校正,包括对干涉图进行毛刺剔除、非线性校正和干涉图加窗,之后需要查找干涉图零光程差采样点,并将干涉图顺序调整后,进行傅里叶变换,对提取变换后的光谱进行相位校正,从而去除光谱虚数部分。选择多路独立并行处理单元,可显著提升数据处理效率,满足大面阵多像元数据实时处理的需求,且可以根据像元数量增加或减少处理单元数量,具有极高的兼容性和扩展性<sup>[12]</sup>。

傅里叶光谱仪的优点主要包括:能够对全波段进行数据采集,可涵盖各类目标的最优探测波段;完成一次数据采集的时间较短,实时性高,满足智能探测系统对高速运动目标探测的需求。利用傅里叶变换对光信号进行处理,降低了普通干涉成像仪光栅或棱镜等分光器产生的误差和损耗,还通过干涉增强了光信号,有利于星上对远距离弱小目标的探测。傅里叶光谱技术还适用于没有人工主动光源的情况<sup>[13]</sup>,在太阳、月亮等自然光源下也能完成对被测区域的目标识别,减少设备复杂度,提高了设备的实用性。傅里叶光谱技术将在智能光电探测系统的研究上发挥重要的作用。

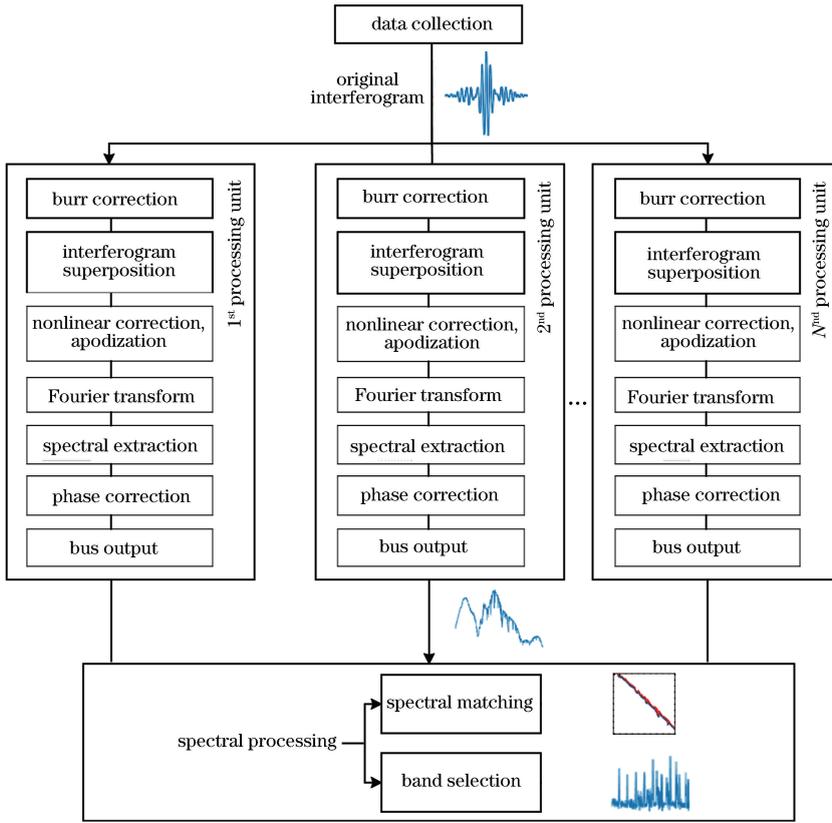


图 2 傅里叶光谱数据处理流程图

Fig. 2 Flowchart of Fourier spectral data processing

### 3 波段选择技术实验

利用声光可调谐光谱仪对自适应波段选择方案进行实验验证。声光可调谐光谱仪使用声光可调谐滤波器(AOTF)作为分光器件<sup>[14]</sup>,分光之后,后面连接商用的 CCD 相机获取图像。AOTF 是根据声光衍射原理制成,由 AOTF 晶体和相连的换能器组成。换能器驱动射频电信号转换为 AOTF 晶体内的超声波振动,能改变晶体内的原子间距。入射光透过晶体发生布拉格衍射,衍射光波长与晶体原子间距相对应。只要改变驱动信号的频

率,就能改变衍射光的波长,继而达到分光的目的。

本实验使用的 AOTF 光谱仪主要参数如表 1 所示。光谱仪的工作波段为 400~1000 nm,可根据需要选择探测波段范围和扫描步长。由于 560 nm 是光谱仪的换频点,即小于 560 nm 的探测波段使用高频射频信号,大于 560 nm 的探测波段使用低频射频信号,因此在 560 nm 附近光谱仪没有信号。不同波长范围的光谱分辨率不同,整体在 2~10 nm 之间。光谱仪的空间分辨率为 806 pixel × 606 pixel,可探测的工作距离由镜头决定。

表 1 AOTF 光谱仪参数

Table 1 Parameters of AOTF spectrometer

Band range	Working distance	Field of view	Focal length	Scan step	Spectral resolution	Spatial resolution
400-1000 nm	0.5 m to ∞ (according to the lens)	3°-10°	28-150 mm (adjustable)	can be selected as needed	2-10 nm	806 pixel × 606 pixel

#### 3.1 无人机实验

实验 1 以无人机(UAV)为目标进行室外实验探测,探测时的天气为晴朗少云,有微风。以天空为背景,无人机携带塑料袋飞至百米高空,用 AOTF

光谱仪进行探测。实验设定光谱仪扫描波段为 400~1000 nm,扫描步长为 10 nm,共有 60 条通道。RGB 融合图像如图 3 所示。

图 4 所示为 UAV 本体和塑料袋的光谱曲线,



图 3 UAV 目标探测图像

Fig. 3 UAV target detection image

其中点曲线为天空背景光谱曲线,实线为目标光谱曲线,点实线为遮光条件下噪声光谱曲线。从光谱曲线可以看出,在 450~560 nm 波段,即为可见光中的蓝光和绿光波段,蓝天背景信号较强,符合实际情况。另外,由于受到换频点的影响,在 560 nm 波长附近信号降为 0。无人机目标为白色,除了换频点外,在450~800 nm 全波段信号都比较强。若无换频点干扰,塑料袋的信号在 550~670nm 波段范围内均较强。

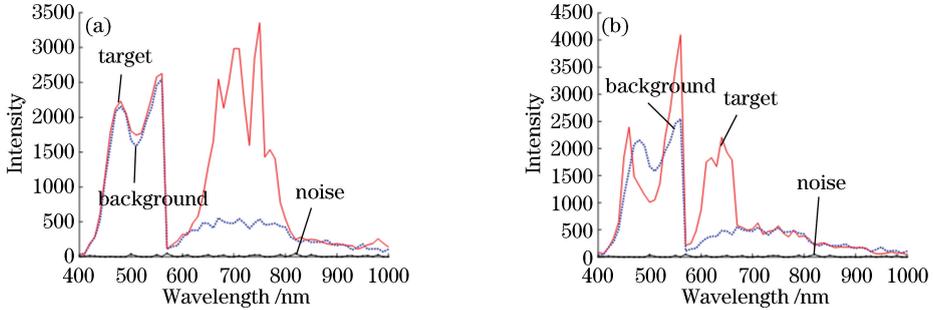


图 4 不同物体的光谱曲线图。(a)无人机;(b)塑料袋

Fig. 4 Spectral curves of different objects. (a) UAV; (b) plastic bag

根据综合信噪比公式  $S_{SNR}(\lambda) = I_T(\lambda) / \sqrt{I_B^2(\lambda) + \sigma_D^2(\lambda)}$ , 获得 SSNR 曲线,将  $0.7S_{max}$  设为阈值选择最优波段,结果如图 5 所示。从图 5(a)可以看到,综合信噪比在 700 nm 处取得最大值,获得的最佳探测波段为 670~760 nm,即在天空背景下,UAV 目标在 670~760 nm 范围内的

探测效果较好,并且在 700 nm 处获得最优的探测效果。从图 5(b)可以看到,综合信噪比在 620 nm 处取得最大值,获得的最佳探测波段为 600~650 nm,即在天空背景下,塑料袋目标在 600~650 nm 波段内的探测效果较好,并且在 620 nm 处其探测效果最优。

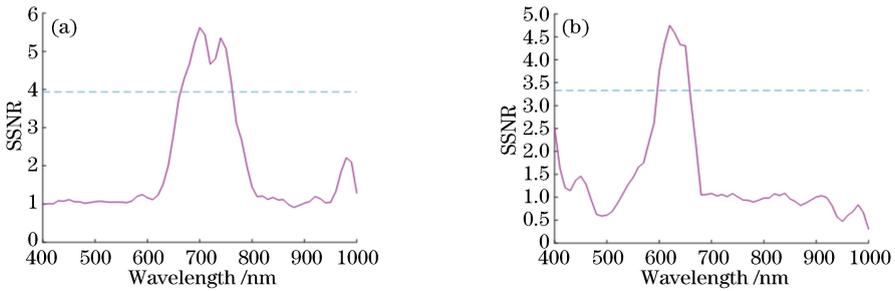


图 5 不同物体的 SSNR 曲线。(a) UAV;(b)塑料袋

Fig. 5 SSNR curves of different objects. (a) UAV; (b) plastic bag

图 6 为选取的一部分通道的单波段探测图像,可以看到:UAV 目标的信号强度在整个波段内都较强;小于 600 nm 的波段中,天空背景亮度较大,不利于 UAV 的探测;而大于 800 nm 之后,目标和背景信号都减弱,噪声信号干扰较大,也不是理想的探测波段。因此在 670~760 nm 波段,UAV 目标的信号较强,背景信号较弱,探测效果较好,并且在 700 nm 的探测效果最好。塑料袋从 520 nm 波段开始,由暗转为亮,其信号逐渐增强。由于在小于

600 nm 波段,背景信号较强,不适合塑料袋目标的探测。在 600~650 nm 波段内,天空背景信号减弱,塑料袋信号依旧较强,这是塑料袋目标最佳探测波段。

### 3.2 静态物体实验

实验 2 以室外建筑的墙面为背景,对静态物体目标进行探测。实验环境为阴天、微风。以盒子为目标,如图 7 所示。扫描波段为 400~1000 nm,以 5 nm 的步长进行扫描,通道数为 120 和 60。

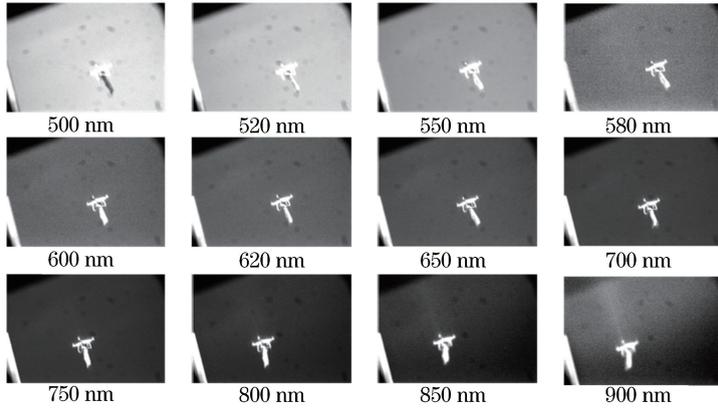


图 6 UAV 携带塑料袋单通道探测图像

Fig. 6 Single-channel detection images of plastic bag carried by UAV

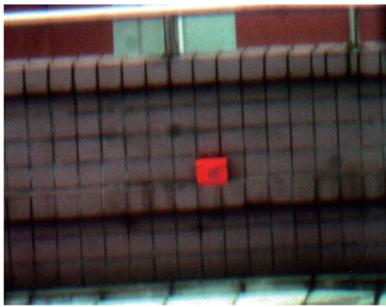


图 7 盒子探测图

Fig. 7 Box detection picture

图 8(a)为以 5 nm 为步长进行扫描的光谱曲线图,点实线为遮光情况下仪器噪声曲线,点曲线为墙面的背景曲线,实线为盒子的目标曲线。图 8(b)为

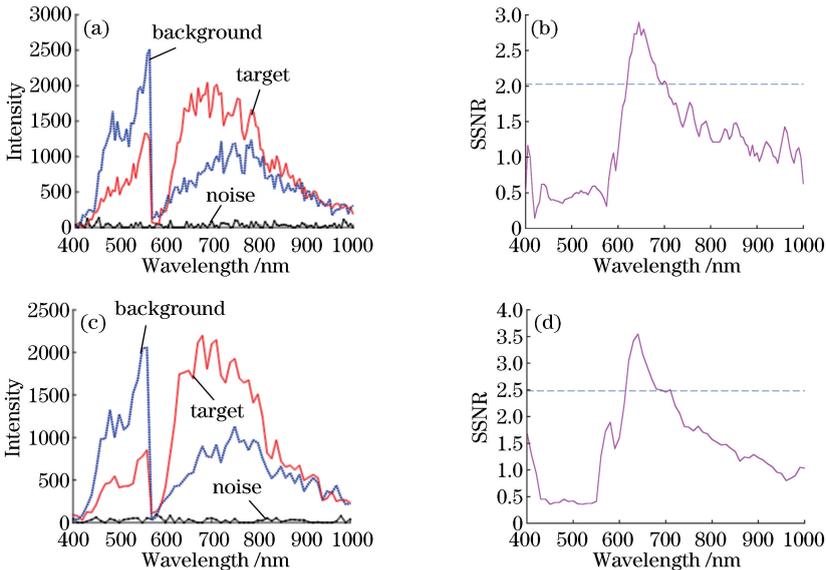


图 8 不同扫描间隔时盒子的光谱曲线和 SSNR 曲线图。(a) 5 nm 扫描间隔,光谱曲线;(b) 5 nm 扫描间隔, SSNR 曲线;(c) 10 nm 扫描间隔,光谱曲线;(d) 10 nm 扫描间隔,SSNR 曲线

Fig. 8 Spectra and SSNR curves of box with different scan intervals. (a) 5 nm scan interval, spectral curve; (b) 5 nm scan interval, SSNR curve; (c) 10 nm scan interval, spectral curve; (d) 10 nm scan interval, SSNR curve

5 nm 为步长进行扫描的 SSNR 曲线图,SSNR 最大处的波长为 645 nm,以 SSNR 峰值的 70%为阈值截取最优探测波段,得到的最优波段为 620 ~ 705 nm。图 8(c)为以 10 nm 为步长进行扫描的光谱曲线图,图 8(d)为对应的 SSNR 曲线图,最大 SSNR 处的波长为 640 nm,最优探测波段为 620 ~ 710 nm。可见,以 5 nm 和 10 nm 为扫描间隔进行扫描,目标和背景的光谱曲线相近,SSNR 曲线的变化趋势一致,波段选择结果也相近,但 5 nm 扫描间隔的结果较 10 nm 扫描间隔结果更加精确一点。

图 9 为不同波段下成像光谱仪探测到的图像,可以看到,从 600 nm 开始,盒子由暗转为亮,且信号逐渐增强,背景信号也开始增强。在 620 ~

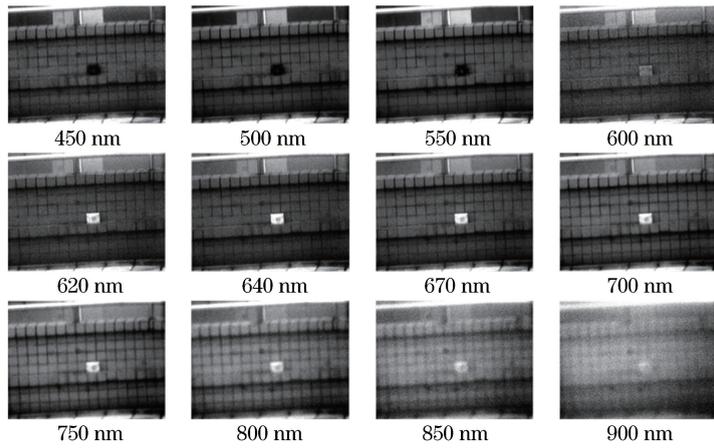


图9 盒子单通道探测图像

Fig. 9 Single-channel detection images of box

700 nm波段,盒子信号达到最强,远远高于背景信号,是最佳探测波段。700 nm之后,盒子信号开始减弱,背景信号增强,噪声干扰加大,探测效果较差。综上可知,波段选择结果与实际情况非常吻合。

实验3以玩偶为目标进行探测,如图10所示,获得目标光谱曲线。

以5 nm作为扫描间隔获取光谱曲线,如图11所示。从图11可以看到,玩偶信号在500~560 nm波段内较强,SSNR曲线没有最高峰值,在560 nm处存在一个凹陷。根据可见光黄光波段为577~597 nm和SSNR曲线图存在的异常,可以推断:若无560 nm处换频点的干扰,SSNR曲线应该在560~580 nm处达到峰值,那么最优探测波段应为500~650 nm。



图10 玩偶探测图

Fig. 10 Doll detection picture

485 nm开始由暗转为亮,600 nm波段附近受换频点干扰,图像噪音较大。650 nm以后背景信号越来越强,玩偶信号开始减弱,探测能力下降。因此以墙面为背景,玩偶在500~650 nm探测效果较理想。

从图12的单通道图像中可以看到,玩偶在

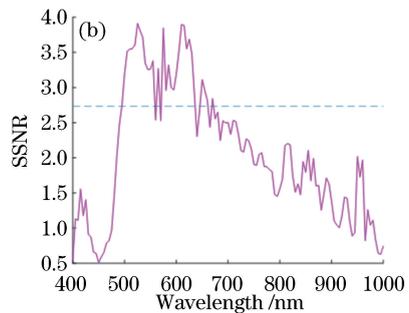
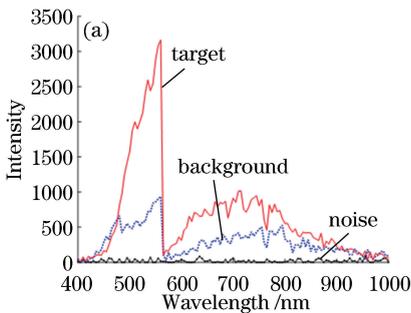


图11 5 nm扫描间隔时玩偶的光谱曲线和SSNR曲线图。(a)光谱曲线图;(b)SSNR曲线图

Fig. 11 Spectral curve and SSNR curve of doll with 5 nm scan interval. (a) Spectral curve; (b) SSNR curve

## 4 结 论

在400~1000 nm波段范围内,无人机目标在天空背景下的最佳探测波段是670~760 nm,塑料袋目标在天空背景下的最佳探测波段是600~650 nm,在墙面背景下盒子的最佳探测波段是

620~700 nm,玩偶在500~650 nm的探测效果较理想。经过实验验证分析,利用综合信噪比选取的最佳波段符合实际目标探测规律,是比较合理、有效的方案。

AOTF光谱仪因串扰大、偏振敏感等缺点在智能探测的应用上有一定的局限性,需要展开对开放

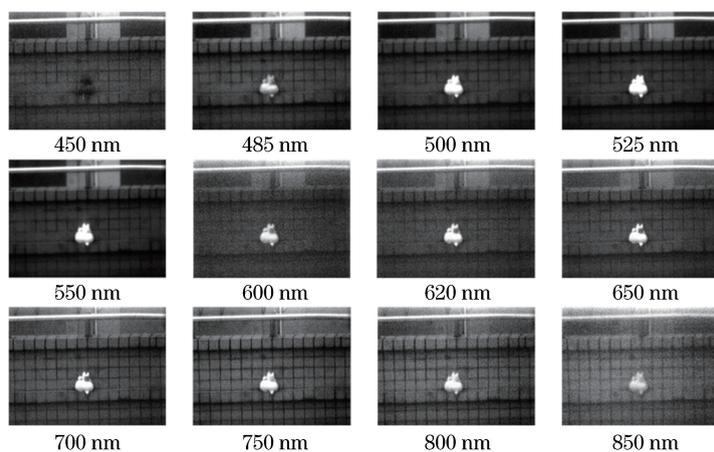


图 12 玩偶单通道探测图像

Fig. 12 Single-channel detection images of doll

式傅里叶光谱仪的深入研究,扩大其在遥感和对地观测等领域的应用范围。分析并验证傅里叶光谱仪在智能目标探测应用的可行性,研究光谱测量数据和背景目标模型之间的联系,协调高速目标动态变化和光谱扫描延迟性之间的关系,以满足目标成像、定位、跟踪、识别等任务需求。

## 参 考 文 献

- [1] Zhou J Q, Cui W N, Zhang T. Adaptive detection system based on measurement data [J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(2): 142-146.  
周佳巧, 崔文楠, 张涛. 基于测量数据的自适应探测系统技术方法研究 [J]. *红外技术*, 2019, 41(2): 142-146.
- [2] Chien S, Sherwood R, Tran D, *et al.* Onboard autonomy on the Earth observing one mission [C] // *AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference*, September 20-22, 2004, Chicago, Illinois. USA: AIAA, 2004: 1-8.
- [3] Vladimirova T, Yuhaniz S. An intelligent decision-making system for flood monitoring from space [J]. *Soft Computing*, 2011, 15(1): 13-24.
- [4] Toth D, Aach T. Detection and recognition of moving objects using statistical motion detection and Fourier descriptors [C] // *12th International Conference on Image Analysis and Processing*, 2003. Proceedings., September 17-19, 2003, Mantova, Italy. New York: IEEE, 2003: 7839699.
- [5] Kalluri H R, Prasad S, Bruce L M. Decision-level fusion of spectral reflectance and derivative information for robust hyperspectral land cover classification [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(11): 4047-4058.
- [6] Li Y Q, Li S Z, Jia Y. Application of spectral imaging technologies in detection and recognition of marine targets [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2015, 13(1): 79-86.  
李越强, 李庶中, 贾宇. 光谱成像技术在海上目标探测识别中的应用探讨 [J]. *光学与光电技术*, 2015, 13(1): 79-86.
- [7] Yuan Z W, Huang S C, Xiong Z G, *et al.* Narrowband detection waveband selection for infrared warning satellites based on synthetic signal-to-noise ratio [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(9): 090401.  
苑智玮, 黄树彩, 熊志刚, 等. 基于综合信噪比的红外预警卫星窄带探测波段选择 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(9): 090401.
- [8] Xu Y N, Li J W, Wu K F, *et al.* Detection band selection for mid-wave infrared spectrum using synthetic signal-to-noise ratio [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2126-2131.  
许元男, 李军伟, 吴开峰, 等. 采用综合信噪比的中波光谱探测波段选择 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(7): 2126-2131.
- [9] Kwon H, Nasrabadi N M. Kernel RX-algorithm: a nonlinear anomaly detector for hyperspectral imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(2): 388-397.
- [10] Dereniak E L, Hagen N A, Johnson W R, *et al.* Imaging spectropolarimetry [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5074: 272-285.
- [11] Lü J G, Liang J Q, Liang Z Z, *et al.* Analysis of atmospheric disturbance on spectrum detection by spatial modulation Fourier transform spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1130003.

- 吕金光, 梁静秋, 梁中翥, 等. 空间调制傅里叶变换光谱仪光谱探测中的大气扰动分析[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1130003.
- [12] Zou Y P. Research of on-board data processing techniques for Fourier transform spectrometer[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- 邹曜璞. 星载傅里叶光谱仪星上数据处理研究[D]. 上海: 中国科学院大学, 2016.
- [13] Sun H B, Liu G S, Gu H, *et al.* Application of the fractional Fourier transform to moving target detection in airborne SAR[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(4): 1416-1424.
- [14] Chang L Y, Zhao B C, Qiu Y H, *et al.* Optical and mechanical design of imaging spectrometer based on acousto-optic tunable filter[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(3): 345-349.
- 常凌颖, 赵葆常, 邱跃洪, 等. AOTF 成像光谱仪光机系统设计[J]. 应用光学, 2010, 31(3): 345-349.