

文章编号 1004-924X(2016)增-0074-08

## 采用光谱探测技术实现伪装目标的快速识别

程 呈<sup>1\*</sup>, 高 敏<sup>1</sup>, 程旭德<sup>2</sup>, 陈一超<sup>3</sup>, 史 睿<sup>4</sup>

1. 军械工程学院 导弹工程系 精确制导研究所, 河北 石家庄 050003;
2. 武汉军械士官学校 导弹系, 湖北 武汉 430075;
3. 军械工程学院 电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003;
4. 北方自动控制技术研究所 火控系统研发部, 山西 太原 030006)

**摘要:**为了在现代战场上实现伪装目标的快速识别,设计了一种基于光谱探测的快速目标识别系统。首先,对基于光谱探测技术的目标识别原理进行推导,分析了物质光谱的产生机理与各个物质之间光谱谱线的差异性。然后,建立了基于光谱探测的快速目标识别系统,并改进了光谱深刻模块,增加不同波段的滤光片仅对疑似目标光谱谱线进行判断,减少了系统产生的计算数据量,增强了目标识别的实时性。实验结果表明:本文提出的探测技术对伪装目标识别的正确率能够达到90%以上;在增加了滤光片之后,系统处理时间为传统系统的1/3,达到了提高系统实时性的目的。基于光谱探测技术的目标识别方法能够在一定的实时性要求下,对伪装目标进行有效识别,具有一定的军事应用价值。

**关键词:**光谱探测;伪装目标;目标识别;滤光片;实时性

**中图分类号:**O433.4;V448.134 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0074

## Fast recognition of camouflage target by spectrum detection technology

CHENG Cheng<sup>1\*</sup>, GAO Min<sup>1</sup>, CHENG Xu-de<sup>2</sup>, CHEN Yi-chao<sup>3</sup>, SHI Rui<sup>4</sup>

1. *Institute of Precision Guidance Technology, Department of Missile Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;*
2. *Department of Missile, Wuhan Ordnance Officer School, Wuhan 430075, China;*
3. *Department of Electronic and Optical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;*
4. *Department of Fire Control Research and Development, North Automatic Control Technology Institute, Taiyuan 030006, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: clarece\_oec@sina.com*

**Abstract:** In order to realize fast recognition of camouflage targets in the modern battlefield, a fast target recognition system was designed based on spectrum detection. The principle of target recognition base on spectrum detection technology derived for analyzing the generation mechanism of substance spectrum and the difference of spectral lines among various targets. Then a fast target recognition sys-

收稿日期:2016-05-23;修订日期:2016-06-13.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 31200777);武器装备预研基金重点资助项目(No. 9140A05040114 JB34015);武器装备预研基金资助项目(No. 9140A05040213JB34069)

tem was established with an improved spectrum detection module and optical filters in different wavebands to identify spectral lines of camouflage target, thus decreasing the amount of generated data for calculation and enhancing the real-time performance of target recognition. The experiment results indicate that the proposed detection technology can recognize the camouflage targets with accuracy above 90%. After adding the optical filters, the processing time is 1/3 of that of the conventional system, which realizes the improvement of real-time performance of the system. The target recognition method based on spectrum detection technology can effectively recognize camouflage target under certain real-time requirement, thus having a great potential in certain military fields.

**Key words:** spectrum detection; camouflage target; target recognition; optical filter; real-time performance

## 1 引 言

随着伪装技术的飞速发展,现代战场上目标的可识别信息越来越少,对目标的高效、快速的识别具有十分重要的意义<sup>[1]</sup>。目前,用于目标识别的方法有很多,传统的目标识别技术包括雷达探测技术<sup>[2]</sup>、激光探测技术<sup>[3]</sup>、红外图像探测技术<sup>[4-5]</sup>和声传感器探测技术<sup>[6]</sup>等。其中,基于雷达、激光探测的目标识别技术需主动向目标发射电磁波,易受战场复杂电磁环境的影响并存在被敌方发现的可能性,不具备被动识别目标的能力<sup>[7]</sup>。红外图像探测技术虽然能够在全天候对目标进行监测,但是红外隐身技术的飞速发展制约了该项技术的应用。声传感器探测技术仅针对于有声目标,具有一定的局限性。

光谱识别技术基于待测物体发射、反射或透射辐射的光谱信息对物体进行识别<sup>[8]</sup>。由于光谱信息是由物体内在性质所决定的,所以每一物质的光谱谱线又称为该物质的光谱指纹,不同物质的光谱谱线之间必定存在差异。光谱识别技术通常是以光谱谱线的波长、强度以及谱线宽度作为物质的光谱特征,对物质进行识别,在生物学、医药学等领域有着广泛的应用前景和重要意义。近些年,光谱识别技术也逐步应用于伪装目标识别等军事领域,相关成果可概括为以下三方面:

(1)光谱探测与传统识别技术形成的复合目标识别算法。李建民等人主要研究了声信息与光谱探测相结合的识别技术,对高速目标进行探测。王博等人主要研究了光谱探测与图像识别的复合目标识别方法,对伪装的目标具有一定的识别能力。

(2)光谱识别算法的改进。张良倍等人将人工神经网络引入光谱探测领域,利用神经网络训练光谱,当训练光谱与待测光谱具有相同定标的情形下,识别率较高。熊宇虹等人将小波包分析引入光谱探测领域,提出了一种基于小波包分析的光谱识别方法。

(3)光谱识别系统的设计与改进。胡皆汉等人研究了一种基于神经网络的光谱识别系统,将神经网络的自适应学习、鲁棒性、容错性等优势赋予光谱识别系统之中,优化了传统的目标识别系统。

本文提出了一种基于光谱探测技术的伪装目标快速识别方法。该方法在传统的光谱识别系统之中加入不同波段的滤光片,通过对比不同波段中环境与伪装目标的光谱谱线,定义定量的特征描述字,利用描述字对目标进行判断。滤光片的增加一方面减少了光谱识别的数据量,增强系统的实时性;另一方面利用不同的波段光谱谱线对比,更有效地进行目标识别,提高识别的准确度。

## 2 理论计算

### 2.1 光谱识别的可行性计算

物质的光谱来源于构成物质分子的振动,是由分子振动的能级跃迁引起的,与分子本身的化学结构、空间几何结构、分子内的力场结构、电子云分布状况以及原子核的性质密切相关<sup>[11]</sup>。分子的红外光谱由谱线构成,通过对谱线与波数的分析,以双原子分子为例,可以得到下列经验公式:

$$\tilde{\nu} = an - bn^2, n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots, \quad (1)$$

式中:  $\tilde{\nu}$  表示波数(波长的倒数);  $a$  和  $b$  表示参数,且不同化合物的参数一般不同。当  $n = 1$  时,对应的谱线为基频谱线,剩下的谱线称为泛频谱线。在此就利用基频谱线作为不同化合物的特征进行分析。将分子中各原子的振动按照经典力学进行处理,得到:

$$\tilde{\nu} = 1302.8 \cdot \sqrt{K/\mu}, \quad (2)$$

式中:  $K$  表示力常数,  $\mu$  表示相对质量,有:

$$\mu = m_1 m_2 / (m_1 + m_2), \quad (3)$$

式中:  $m_1$  和  $m_2$  分别表示分子中不同原子的原子量。需要说明的是,本文以双原子分子为例进行推导,多原子分子的推导方式应按照不同的原子分布结构进行相应的分析。

由上述推导可知,不同的分子(包括同位素组成的分子)具有不同的基频谱线,这也成为了区分目标与周围环境的前提。武器装备一般隐身于树木、房屋等区域,目标本身与周围环境的基本构成差异较大,光谱信息必然会存在差异,从原理上说明了该方法的可行性。

## 2.2 光谱识别技术原理推导

在光谱识别的过程中,待测区域的背景辐射光谱可以表示为:

$$L_e(\lambda) = \int \{ S_c(\lambda, t_c) \tau_c(\lambda, t_c) + B(\lambda, t_c) [1 - \tau_c(\lambda, t_b)] \} d\lambda, \quad (4)$$

式中:  $L_e$  为待测目标的周围环境光谱;  $S_c$  为背景辐射亮度;  $\lambda$  为辐射波长;  $\tau_c$  为背景与识别系统之间的透射率;  $t_c$  为背景表面的平均温度。待测目标的辐射光谱可以表示为:

$$L_c(\lambda) = \int \{ S_c(\lambda, t_c) \tau_c(\lambda, t_c) + B_c(\lambda, t_c) [1 - \tau_c(\lambda, t_b)] \} d\lambda, \quad (5)$$

式中:  $L_c$  为待测目标的光谱;  $S_c$  为目标表面辐射亮度;  $\lambda$  为辐射波长;  $\tau_c$  为待测目标与识别系统之间的透射率;  $t_c$  为猜测目标表面的平均温度。

根据实际探测得到的光谱图像的亮度不同,进而判断出被测目标的相对位置,可表示为:

$$\begin{cases} L_1(\lambda) = L_c(\lambda) - L_e(\lambda) \\ L_2(\lambda) = L_e(\lambda) \end{cases}, \quad (6)$$

式中:  $L_1(\lambda)$  表示目标位置;  $L_2(\lambda)$  表示环境位置。当被测目标处于测试环境中时,光谱探测系

统在不同位置上获得的光谱谱线会有明显差异,这种差异性就是对不同物质识别的基础,在本文中利用该方法实现目标识别。

## 2.3 实现快速识别的改进原理

为满足现代战场实际作战的需要,这里对传统的光谱识别系统进行了改进,增加多个滤光片,仅对几个特征波段进行光谱识别处理,有效降低了数据量,提升了目标识别的速度。同时,伪装目标在全波段产生的光谱图像的亮度可能与周围环境相近,在光谱图上体现出的环境与待测目标的光谱谱线所包围的面积相同。若对视场中的每一点进行全波段光谱识别,最终得到的图像也无法区分环境与待测目标。所以针对伪装目标的特点,不再对全波段进行光谱识别,而仅在特征波段进行识别,有助于识别伪装目标。

光谱识别系统测得的伪装目标的光谱谱线  $L_c(\lambda)$  与周围环境的光谱谱线  $L_e(\lambda)$  存在差异,二者的关系如图 1 所示。

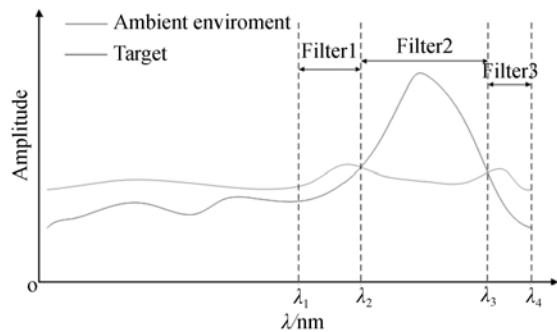


图 1 目标光谱谱线与周围环境光谱谱线示意图

Fig. 1 Spectral of target and ambient environment

图 1 表征了经过全波段光谱探测后待测伪装目标的光谱谱线与环境光谱谱线的关系。从图中可以看出,当  $\lambda \in (\lambda_2, \lambda_3)$  时,  $L_c(\lambda) > L_e(\lambda)$ , 目标的光谱图像较之环境的光谱图像更亮;当  $\lambda \in (\lambda_1, \lambda_2) \cup (\lambda_3, \lambda_4)$  时,  $L_c(\lambda) < L_e(\lambda)$ , 环境的光谱图像更亮。所以,这里利用 3 个滤光片,使得光谱探测尽量在这 3 个特征波段上进行,缩短了分析时间,提高了识别速度。不过特征波段的选择需经过对待测目标的多次光谱分析。

定义光谱描述字集合  $K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$ , 且该集合中元素的个数  $n$  与系统中增加的滤光片

的数量相同。当  $L_c(\lambda) > L_e(\lambda)$  时,  $k_i = 1$ ; 当  $L_c(\lambda) \leq L_e(\lambda)$  时,  $k_i = 0$ 。则对待测区域内每一点的光谱信息进行量化,量化后的光谱信息用于识别伪装目标。

### 3 系统设计

由于本文针对的是伪装目标的识别技术,整个光谱识别系统包括视频图像识别模块和光谱探测识别模块两个部分,如图 2 所示。

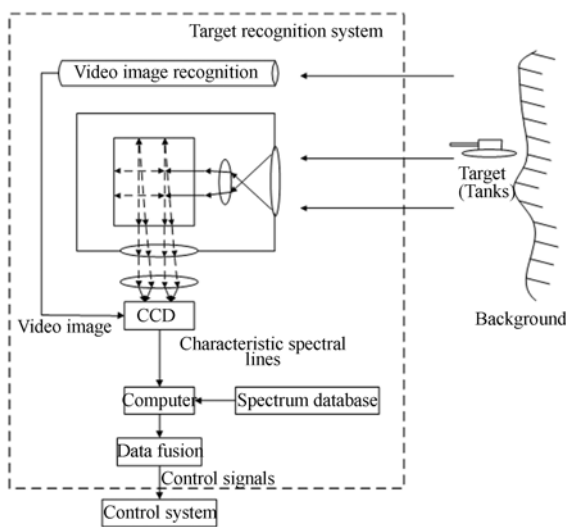


图 2 传统基于光谱探测的目标识别系统结构

Fig. 2 The structure of traditional target recognition system based on spectrum detection

由图 2 所示,传统的视频图像处理模块可以进行大视场范围内的快速识别,但是伪装目标往往是传统视频图像识别模块无法处理的,于是增加光谱探测模块,用于识别伪装目标。传统的光谱探测模块在实际应用中会对待测区域的每一点的全波段(根据探测硬件的不同而不同)光谱进行处理,再根据每一波长下的视场中每点的灰度值进行图像重构,最终通过所有的重构图像对目标进行识别。如图 3 所示。

由图 3 可以直观地看出,在较小的波段范围内进行光谱探测得到的光谱图像中,环境与目标无法区分,对应图 1 中的  $(0, \lambda_i)$  波段范围;所以无需在初始步长设置得到的每一波长下都进行光谱探测,仅选取特定波长范围进行光谱探测也可

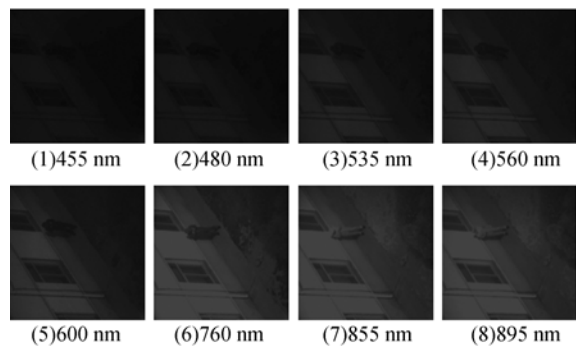


图 3 传统光谱探测实例

Fig. 3 Reconstruction images in traditional spectrum detection

获得与该波段完整探测时所得到的探测结果。同时,减少探测波长范围能够有效降低数据量,提高数据处理速度,提升系统的实时性。基于此,在不影响探测精度的情况下,为了减少光谱探测时的源数据量,本文对传统的光谱探测模块进行了改进,改进后的光谱探测模块的特征结构如图 4 所示。

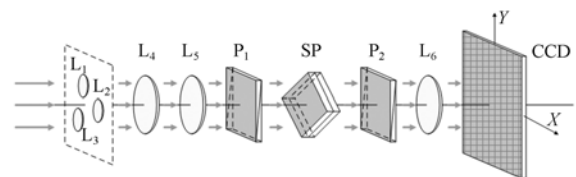


图 4 改进光谱探测模块结构设计

Fig. 4 Scheme of improved spectrum detection module

改进后的光谱探测系统如图 4 所示。其中  $L_1, L_2, L_3$  为前置滤光片,主要针对不同特征波段进行滤波; $L_4, L_5$  构成了的前置望远系统; $P_1$  为偏振片; $SP$  为偏振干涉仪; $P_2$  为检偏器; $L_6$  为像镜;绿色箭头为光路方向。

待测区域中伪装目标与周围环境发射出的光经过前置滤光片后,特定波段(特征波段)的光线能够透过,又经过偏振片  $P_1$  后,光线变为沿  $P_1$  偏振化方向振动的一束线偏振光。该光束经偏振干涉仪  $SP$  后被剪切切成两束振动方向相互垂直的线偏振光,通过检偏器  $P_2$  变成振动方向完全一致的两束线偏振光,然后经过成像镜  $L_6$  后在探测器上相遇,形成干涉图样<sup>[12]</sup>。该装置中没有狭缝,增大了仪器的光通量。最后进行傅里叶变换,即可得到目标光谱强度随波长的分布及目标像<sup>[13]</sup>。

## 4 伪装目标识别实验与结果分析

### 4.1 测试环境

实验时将光谱探测系统架设在高处(7层建筑物),而待测伪装目标放置于地面植被环境之中。实验采用某型装甲车装备模型作为待测目标,目标伪装的方式包括涂料伪装以及掩盖伪装,在波长为 450~900 nm 以 5 nm 的步长对待测区域进行光谱探测,主要验证本文所提出的基于光谱探测的目标识别方法是否有效识别伪装目标,并分析不同环境条件对目标识别的影响。

### 4.2 数据处理及结果分析

在现代战场上对伪装目标的识别需要识别系统具备一定的实时性,所以在对光谱探测数据进行处理的过程中,必须要兼顾数据处理速度和识别准确程度<sup>[14]</sup>。根据目标与环境的光谱特点,本文在数据处理的过程中只对能反映出伪装目标的特性的点进行分析,结合图 1 具体的处理步骤如下:

Step1:对通过滤光片 2 所形成的图像进行分析,图像中较亮的点集  $M$  即为视场中目标疑似有

效点的集合,而由这些点形成的图像区域即为视场中目标的疑似有效区域,对确定目标的相对位置进行初步判断。

Step2:对通过滤光片 1 和 3 所形成的图像进行分析,图像中较暗的点集  $N$  即为视场中目标疑似有效点的集合<sup>[15]</sup>。

Step3:结合 3 个滤光片处理得到的图像中的点进行判断,确定真正目标点的相对位置。按照上述两步骤的处理结果,当某一点既在点集  $M$  中、又在点集  $N$  中,则认为该点为目标有效点,即  $(x, y) \in M \cap N$ 。

Step4:重复 Step1 至 Step3,对所有的目标有效点进行识别,视场中的目标区域由识别出的目标有效点构成,用于指导武器装备进行精确打击。最终得到的环境与目标的光谱谱线如图 5 所示。

如图 5 所示,其中(1)、(3)和(5)为环境的光谱谱线,而(2)、(4)和(6)为目标的光谱谱线。实际的探测结果与理论推导相一致,说明了应用光谱探测的目标识别技术能够保证探测器对伪装目标的有效识别,但是数据量巨大,对系统的实时性影响较大<sup>[16]</sup>。应用改进的光谱探测模块得到上述不同点的光谱谱线,探测结果如图 6 所示。

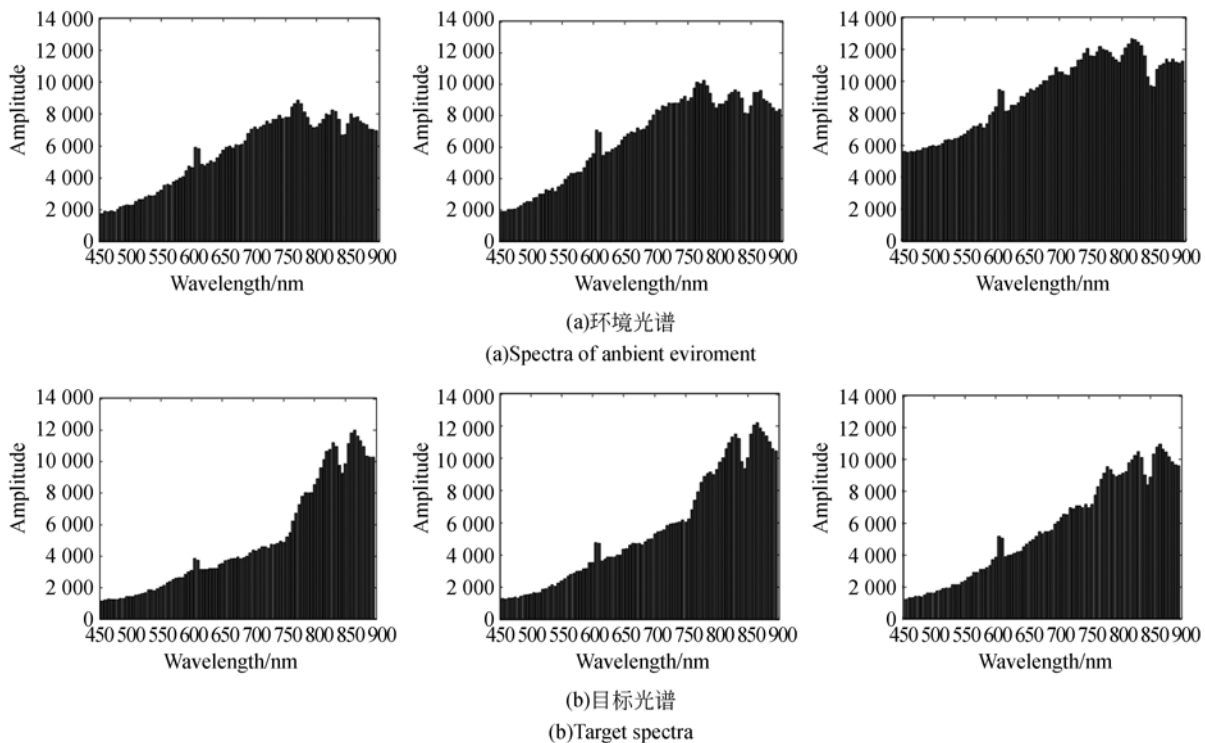


图 5 传统的光谱探测得到视场内不同点的光谱谱线

Fig. 5 Spectral lines of different points in field based on conventional spectrum detection

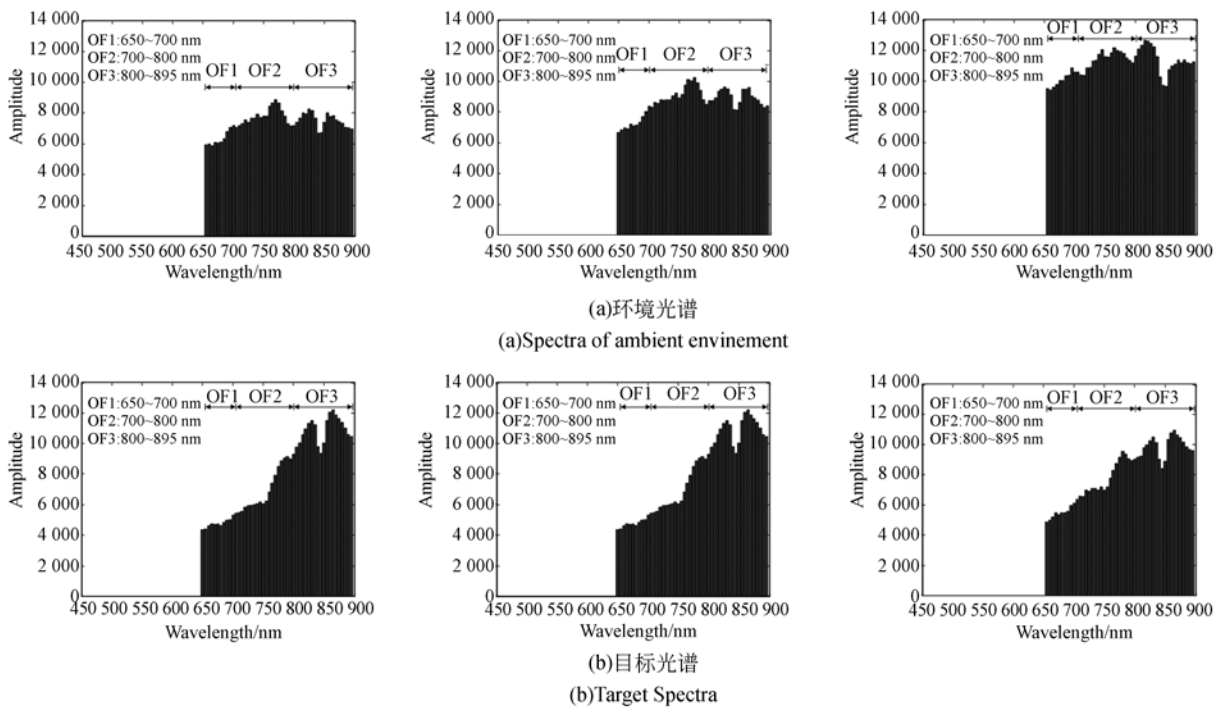


图 6 改进的光谱探测得到的视场内不同点的光谱谱线

Fig. 6 Spectral lines of different points in field based on improved spectrum detection

需要说明的是,考虑到目标识别过程中噪声的影响,所得到的目标光谱谱线结果是由该点周围 8 点的谱线均值计算而来的<sup>[17]</sup>。图 6 给出了改进后光谱探测模块的结果,在增加滤光片后,450~650 nm 无目标特征的波长范围不再进行光谱探测,有效降低了数据量。而增加滤光片并不会影响对目标以及环境的光谱探测精度<sup>[18]</sup>。按照原理推导中光谱谱线的量化规则,对目标谱线结果进行量化,得到的目标识别结果如表 1 所示。

表 1 目标识别结果及耗时

Tab. 1 Results of target detection and time consuming

测试点	量化结果	实际结果	耗时/s	
			原系统	改进系统
Point 1	(0, 1, 1)目标	目标	125	37
Point 2	(0, 1, 1)目标	目标	132	40
Point 3	(0, 0, 0)环境	环境	120	38

## 5 结 论

本文基于光谱探测技术提出了一种基于光谱探测的伪装目标识别快速识别方法。该方法在传统光谱探测系统的基础上改进了光谱探测模块,增加了滤光片,仅对目标特征波段进行探测并对

最终得到的测试点的光谱结果进行量化,根据量化结果对测试点的性质进行判断。对比数据处理结果与实际结果可知,系统耗时约为原系统的三分之一,且识别正确率较高,满足现代战场上的实时性要求,具有良好的军事应用价值。

下一步工作主要集中于以下 3 个方面:

(1)对量化指标的精细化设置

为精确识别目标与环境的边界,需要对量化指标进行精细化处理,光谱探测时目标与环境的边界光谱谱线不能仅用 1 和 0 进行简单量化因为这样会对最终的目标边界识别的准确性造成影响,导致最终的目标识别不准确。精细化指标的建立能够区分目标边界与环境的细微差异,为目标边界的识别提供技术支持。

(2)武器装备的光谱数据库的建立

应建立武器装备的光谱数据库,与实际过程中探测得到的目标光谱结果进行比对,不仅能够缩短系统对目标的识别时间,并且能够提供不同目标的光谱谱线数据,为目标识别系统中光谱探测模块的滤光片波段的选择提供数据支持。

(3)不同环境对光谱探测的影响

战场环境复杂多变,需对不同环境下的光谱识别能力进行研究,以应对战场的复杂环境。对

不同的伪装方式下的目标进行识别,研究不同伪

装技术对于光谱探测的影响。

### 参考文献:

- [1] 李建民, 王高. 基于多光谱辐射特性的高速目标识别定位系统[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(11): 3147-3151.  
LI J M, WANG G. High-speed target recognition positioning system based on multi-spectral radiation characteristics[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(11): 3147-3151. (in Chinese)
- [2] 徐琰珂, 梁晓庚, 贾晓洪. 雷达/红外复合导引头信息融合算法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 30-36.  
XU Y K, LIANG X G, JIA X H. Information fusion algorithm for radar/IR compound seeker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 30-36. (in Chinese)
- [3] 董登峰, 周维虎, 纪荣祎, 等. 激光跟踪仪精密跟踪系统的设计[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 309-318.  
DONG D F, ZHOU W H, JI R W, *et al.*. Design of precise tracking system of laser tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2): 309-318. (in Chinese)
- [4] 王朋, 荣志斌, 何俊华, 等. 基于压缩感知的偏振光成像技术研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(2): 282-288.  
WANG P, RONG ZH B, HE J H, *et al.*. Polarization imaging based on compressed sensing theory[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 282-288. (in Chinese)
- [5] 吴杰, 冯祖仁, 刘恒, 等. 水下目标多元声传感阵列网络定位方法[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(4): 40-45.  
WU J, FENG Z R, LIU H, *et al.*. A network localization method with multi-acoustic sensor array for underwater target[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(4): 40-45. (in Chinese)
- [6] 聂海涛, 龙科慧, 马军, 等. 采用改进尺度不变特征变换在多变背景下实现快速目标识别[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2349-2356.  
NIE H T, LONG K H, MA J, *et al.*. Fast object recognition under multiple varying background using improved SIFT method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8): 2349-2356. (in Chinese)
- [7] 王博, 高玉斌, 鲁旭涛. 基于光谱探测与图像识别的反伪装目标系统研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(5): 1440-1444.  
WANG B, GAO Y B, LU X T. Research on anti-camouflaged target system based on spectral detection and image recognition[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(5): 1440-1444. (in Chinese)
- [8] 郭平, 覃冬梅, 胡占义, 等. 一种光谱识别的新方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2003, 23(4): 811-815.  
GUO P, QIN D M, HU ZH Y, *et al.*. A novel method for spectral signal pattern recognition[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2003, 23(4): 811-815. (in Chinese)
- [9] 张良培, 李德仁. 神经网络在光谱识别中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 1999, 19(2): 158-166.  
ZHANG L P, LI D R. Artificial neural network application in spectral recognition[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 1999, 19(2): 158-166. (in Chinese)
- [10] 熊宇虹, 温志渝, 陈刚, 等. 基于小波包分析的光谱识别方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(8): 1332-1335.  
XIONG Y H, WEN ZH Y, CHEN G, *et al.*. Spectral signal recognition based on wavelet packet analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, 25(8): 1332-1335. (in Chinese)
- [11] 胡皆汉, 郑学仿. 实用红外光谱学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
HU J H, ZHENG X F. *Practical Infrared Spectroscopy*[M]. Beijing: The Science Publishing Company, 2011. (in Chinese)
- [12] 魏宇童, 刘尚阔, 颜廷昱, 等. 偏振型干涉成像光谱仪谱线位置定标方法的研究[J]. 物理学报, 2016, 65(8): 080601.  
WEI Y T, LIU SH K, YAN T Y, *et al.*. Study on the methods of calibrating spectral line position of interference imaging spectrometer[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2016, 65(8): 080601. (in Chinese)
- [13] 张淳民. 干涉成像光谱技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
ZHANG CH M. *Study on Interference Imaging Spectroscopy*[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [14] MOLOKANOV G F. Guidance of an aircraft to the launch point of guided weapons[J]. *Journal of Computer and Systems Sciences International*,

- 2006, 45(6): 128-135.
- [15] CAO Z J, XU L Y, FENG, J. L.; Automatic target recognition with joint sparse representation of heterogeneous multi-view SAR images over a locally adaptive dictionary [J]. *Signal Processing*, 2016, 126(2): 27-34.
- [16] MARK R S, JAMES W S. A practical target recognition system for close range photogrammetry [J]. *The Photogrammetric Record*, 2014, 29(4): 337-355.
- [17] FAN S J, FAN H Q, XIAO H T, *et al.*. Observability analysis of feature aided terminal guidance systems[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2015, 1(5): 127-133.
- [18] 张磊, 杨敏珠, 邹曜璞, 等. 红外傅里叶光谱仪的仪器线形函数及工程应用[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(12): 3322-3328.
- ZHANG L, YANG M ZH, ZOU Y P, *et al.*. Instrument line shape of infrared Fourier transform spectrometer and its engineer applications [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(12): 3322-3328. (in Chinese)

#### 作者简介:



程 呈(1991—),男,山西临猗人,博士研究生,2013年、2015年于军械工程学院分别获得学士、硕士学位,主要从事精确制导、红外制导系统、光谱识别等技术的研究工作。E-mail:clarence\_oec@sina.com

#### 导师简介:



高 敏(1963—),男,山西临汾人,博士,教授,博士生导师,1983年于军械工程学院获得学士学位,1992年于北京理工大学获得博士学位,主要从事计算机视觉、精确制导、图像末制导等技术的研究工作。E-mail:gaomin1103@gmail.com