

〈材料与器件〉

## 典型伪装材料高光谱偏振特性实验检测与分析

贾 榕<sup>1,2</sup>, 王 峰<sup>2</sup>, 尹璋堃<sup>1,2</sup>, 刘 晓<sup>2</sup>

(1. 陆军炮兵防空兵学院 研究生大队, 安徽 合肥 230031; 2. 偏振光成像探测技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 针对传统检测方法无法在复杂背景下同时获取伪装材料偏振信息与光谱信息的局限性, 本文利用高光谱偏振成像技术对典型伪装材料检测并分析其高光谱偏振特性。使用一套分孔径同时式高光谱偏振成像系统, 对伪装涂层和伪装网等典型伪装材料进行高光谱偏振检测并解析出伪装材料的9个偏振参量, 获得了伪装材料与背景的相对反射率随光谱改变的变化规律。结果表明, 利用伪装材料与背景的偏振特性差异, 选择合适偏振参量可以增加目标的纹理细节特征并提高其对比度; 分析其光谱偏振特性, 选择760 nm检测波段有利于快速准确地检测伪装材料。

**关键词:** 伪装材料; 高光谱偏振; 偏振参量; 相对反射率

中图分类号: O436.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2020)12-1170-09

## Experimental Detection and Analysis of Hyperspectral Polarization Characteristics of Typical Camouflage Materials

JIA Rong<sup>1,2</sup>, WANG Feng<sup>2</sup>, YIN Zhangkun<sup>1,2</sup>, LIU Xiao<sup>2</sup>

(1. Army Academy of Artillery and Air Defense, Hefei 230031, China;

2. Key Laboratory of Polarization Imaging Detection Technology in Anhui Province, Hefei 20031, China)

**Abstract:** In view of the limitations of traditional detection methods that can not obtain the polarization information and spectral information of camouflage materials in complex background, this paper uses hyperspectral polarization imaging technology to detect and analyze the high-spectral polarization characteristics of typical camouflage materials. In the experiment, a set of simultaneous aperture hyperspectral polarization imaging system was used to detect the hyperspectral polarization of typical camouflage materials such as camouflage coating and camouflage net, and to analyze the nine polarization parameters of the camouflage material, and obtain the relative reflectance of camouflage material and background with spectral variation. The results show that by using the difference of polarization characteristics between the camouflage material and the background, selecting the appropriate polarization parameter can increase the texture detail of the target and improve its contrast. The spectral polarization characteristics are analyzed, and the 760 nm detection band is selected to facilitate the rapid and accurate detection of the camouflage material.

**Key words:** camouflage material, hyperspectral polarization, polarization information, relative reflectivity

### 0 引言

随着军事高科技的发展, 军事目标伪装技术与军事侦察技术相互促进、相互发展。为了应对敌方的各种侦察手段, 军事目标普遍进行了高科技的伪装。其

中, 先进伪装涂层和伪装网的使用, 使得目标与背景之间的差异变得很小, 传统的检测手段无法有效地从背景中识别出目标。所以随着光学检测技术的不断发展, 复杂背景下伪装目标的检测成为了当前的研究热点。

收稿日期: 2019-04-25; 修订日期: 2020-11-28.

作者简介: 贾榕(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为偏振成像探测技术。E-mail: 2803114834@qq.com.

通信作者: 王峰(1972-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为新型光电成像探测技术。E-mail: wfissky7202@sina.com.

基金项目: 国家自然科学基金(41406109), 安徽省自然科学基金(1708085QD90)。

高光谱偏振成像是近些年来迅速发展的一种新型检测技术,它能更详细、准确地获取目标信息。在国内外已开展了利用光谱偏振技术进行目标检测的相关研究。在国外,2000年美国空军研究所的Goldstein等人分析了多种不同材质的伪装漆板的光谱偏振特性<sup>[1]</sup>。2011年法国国家航天航空研究中心Ceolato等人利用研发的偏振高光谱反射计在可见光至近红外波段对土壤、液体和气体成像<sup>[2]</sup>。在国内2016年北京环境特性研究所的徐文斌等人利用长波红外高光谱偏振测量系统,开展了涂漆目标和镀铝目标的高光谱偏振成像实验<sup>[3]</sup>。2017年炮兵防空兵学院王小龙等人利用高光谱偏振相机分析了模拟荒漠环境下伪装目标高光谱偏振特性<sup>[4]</sup>。综合来看,高光谱偏振检测可以拓展检测的信息量维度,获取目标的多重信息,可以克服利用光强信息进行检测的传统伪装目标检测手段的局限,增强伪装材料探测与识别的正确率。

本文利用搭建的高光谱偏振检测系统在450~950 nm波段对复杂背景中伪装涂层和伪装网等典型伪装材料进行高光谱偏振成像检测,获取伪装材料的光谱偏振信息。

### 1 实验原理

高光谱成像是将光谱技术与成像技术相结合的多维信息获取技术,具有图谱合一和光谱连续的特点。高光谱成像能够同时获取目标区域的2维空间信息和1维光谱信息,其形成的高光谱图像数据具有“数据立方体”的形式和结构,如图1所示。高光谱成像技术对每个空间像元经过色散形成几十个乃至几百个窄波段光谱,其光谱分辨率一般小于10 nm,将同一像元的这些光谱信息作为波长的函数可以绘制出一条完整而连续的光谱曲线,其中光谱曲线可以作为区分不同物质的有效依据。因此,高光谱成像技术获取的数据使得我们可以根据伪装目标与背景之

间的光谱特性差异有效地识别伪装目标。

偏振成像技术是在实时获取目标偏振信息的基础上进行目标重构增强的过程,能够反演出目标的偏振特性。待测目标的偏振特性是指光束被目标透射或反射时的偏振态改变,常用Jones向量、Stokes向量或Muller矩阵来表征。1852年G. G. Stokes提出Stokes向量,既可以表示完全偏振光,也可以表示非偏振光,所以偏振成像检测多用Stokes向量描述。Stokes是用4个表示光强的时间平均值实数作为参数描述光波的偏振态<sup>[5]</sup>。其定义如下:参量 $S_0$ 是总光强; $S_1$ 是水平与垂直线偏振的强度之差; $S_2$ 是45°与135°线偏振的强度之差; $S_3$ 是右旋与左旋圆偏振的强度之差。为了测量目标的偏振信息,通常从获取其斯托克斯参量入手,定义的斯托克斯参量 $[S_0, S_1, S_2, S_3]^T$ 一般写成 $[I, Q, U, V]^T$ 。

由于自然地物中反射光线中的V分量都极其微小,因此一般工程检测和计算中认为其为0。描述偏振光的另两个重要参量就是线偏振度和偏振角,线偏振度是指偏振分量与光强度的比值,用DOLP(degree of line polarization)表示;偏振角也称为方位角,是光矢量与入射面之间的夹角,用AOP(angle of polarization)表示。

在垂直于光的传播方向的平面放置角度为 $\theta$ 的偏振片,获取的偏振分量与光强度关系为:

$$I_{(\theta)} = \frac{1}{2}[I + Q \cos(2\theta) + U \sin(2\theta)] \quad (1)$$

由式(1)可知,若要计算入射光的线偏振态Stokes参数 $(I_{in}, Q_{in}, U_{in})$ ,只需 $\theta$ 取3个角度进行成像测量即可。常见的有Pickering(0°, 45°, 90°)方法,改进的Pickering(0°, 45°, 90°, 135°)方法<sup>[6]</sup>,以及Fessenkov(0°, 60°, 120°)方法,均可以求出斯托克斯参量<sup>[7]</sup>。

本文选取的 $\theta$ 分别为0°、60°和120°,由偏振成像检测器获取目标的偏振原始图像数据,可以计算得到来自目标的光波参数 $(I_{in}, Q_{in}, U_{in})$ 图像数据,得到:

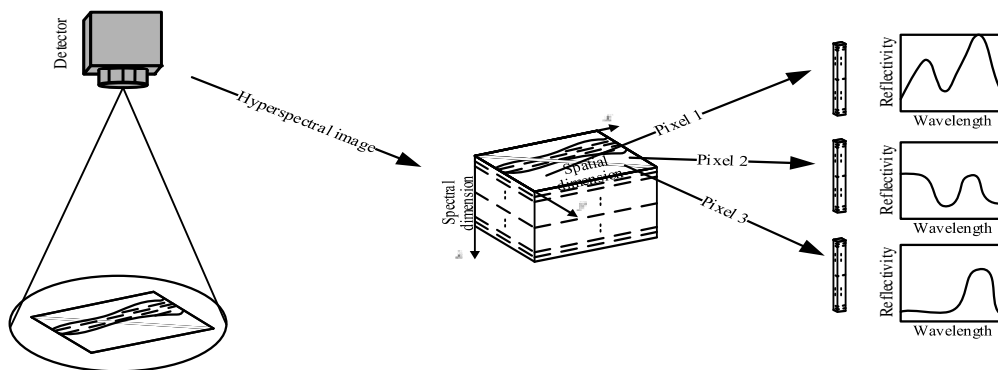


图1 高光谱成像过程

Fig.1 Hyperspectral imaging process

$$\begin{cases} I_{out}(0^\circ) = \frac{1}{2}(I_{in} + Q_{in}) \\ I_{out}(60^\circ) = \frac{1}{2}(I_{in} - \frac{1}{2}Q_{in} + \frac{\sqrt{3}}{2}U_{in}) \\ I_{out}(120^\circ) = \frac{1}{2}(I_{in} - \frac{1}{2}Q_{in} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_{in}) \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可求得目标的线偏振态 Stokes 参数:

$$\begin{cases} I_{in} = \frac{2}{3}(I_{out}(0^\circ) + I_{out}(60^\circ) + I_{out}(120^\circ)) \\ Q_{in} = \frac{2}{3}(2I_{out}(0^\circ) - I_{out}(60^\circ) - I_{out}(120^\circ)) \\ U_{in} = \frac{2}{\sqrt{3}}(I_{out}(60^\circ) - I_{out}(120^\circ)) \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可以计算出目标线偏振度和偏振角:

$$DOLP = \sqrt{Q_{in}^2 + U_{in}^2} / I_{in} \quad (4)$$

$$AOP = 0.5 \times \arctan(U_{in} / Q_{in}) \quad (5)$$

根据以上偏振参量还可以计算出电矢量在 X 轴方向上的分量  $E_x$ 、在 Y 轴方向上的分量  $E_y$  以及二者之差  $E_x - E_y$ ，根据线偏振度和 Stocks 矢量的定义，令  $P_{in} = DOLP$ ，可得<sup>[8]</sup>:

$$\begin{cases} E_x^2 + E_y^2 = I_{in} \cdot P_{in} \\ E_x^2 - E_y^2 = Q_{in} \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)式可以计算出  $E_x$ 、 $E_y$  和  $E_x - E_y$ :

$$\begin{cases} E_x = \sqrt{\frac{I_{in} \cdot P_{in} + Q_{in}}{2}} \\ E_y = \sqrt{\frac{I_{in} \cdot P_{in} - Q_{in}}{2}} \\ E_x - E_y = \sqrt{\frac{I_{in} \cdot P_{in} + Q_{in}}{2}} - \sqrt{\frac{I_{in} \cdot P_{in} - Q_{in}}{2}} \end{cases} \quad (7)$$

根据上面的公式可以计算出差分信息 PDI:

$$PDI = I_{max} + I_{min} = \frac{(1 + P_{in}) \cdot I_{in}}{2} - \frac{(1 - P_{in}) \cdot I_{in}}{2} \quad (8)$$

高光谱成像技术能够获取目标的光谱信息，偏

振成像技术能够获取目标的偏振信息。高光谱偏振成像技术将高光谱成像技术和偏振成像技术相融合，能够同时获取目标的光谱信息和偏振信息，极大地拓宽了信息获取的维度。高光谱偏振数据体现了目标在连续的上百个光谱波段数据，对每一个波段的偏振信息分别进行解析，就可以得到目标在不同光谱波段上的线偏振度、偏振角等 9 个偏振参量，将这些偏振参量作为波长的函数可以绘制多条完整且连续的偏振-光谱曲线。这些偏振-光谱曲线反映了目标的偏振信息与检测光谱之间的关系，同样可以很好地表征伪装目标与背景之间的差异信息，更有效地识别伪装材料。

## 2 实验设计

### 2.1 实验装置

本文使用的是一套分孔径同时式高光谱偏振成像系统，系统实物图和系统主视场位置图如图 2 所示。

该成像系统是由  $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$  三个偏振方向相互独立平行成像的 3 套高光谱成像系统组合而成。3 套高光谱成像系统设计完全相同，以此保证 3 个不同偏振方向高光谱成像的同向性。系统的每个方向均由起偏器、声光可调滤光片 (acousto-optic tunable filter, AOTF)、检偏器和探测器等部件组成，有效工作波段是  $450 \sim 950 \text{ nm}$ ，光谱分辨率为  $2 \sim 8 \text{ nm}$ ，量化值优于 12 bit，帧频最大为 20 fps，成像距离小于 1 km，成像功耗  $\leq 40 \text{ W}$ ，待机功耗  $\leq 6 \text{ W}$ ，光谱切换速度  $\leq 1 \text{ ms}$ <sup>[4]</sup>。

### 2.2 目标及条件选择

军事应用上，使用伪装涂层和伪装网是伪装军事目标的重要方法，减小了目标与背景在“谱”和“色”上的差异性。为了验证高光谱偏振检测对伪装材料的检测效果，并分析其光谱偏振特性，实验检测方案设计如下:

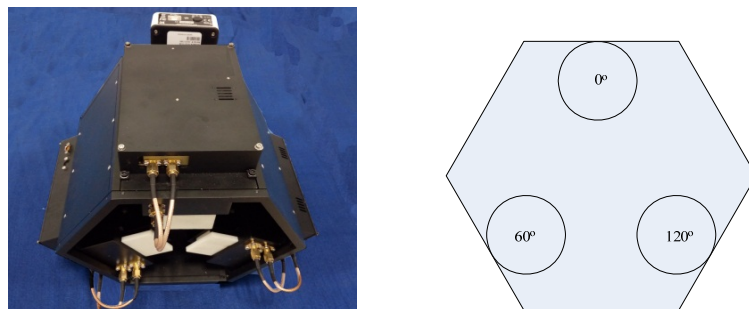


图2 分孔径同时式高光谱偏振成像系统

Fig.2 Split-aperture simultaneous hyperspectral polarization imaging system

①实验设计在外场的复杂背景下对伪装材料进行实验,对某型号 1:1 伪装目标的伪装涂层和伪装网进行实景检测,背景包括树林、草地以及沙土等自然地物。

②根据文献[9]分析,在 $\theta_i$ 和 $\theta_r$ 不变的情况下, $\varphi$ 为 $180^\circ$ 时自然地物偏振特性最大。对于实验目标的材质不同,其布儒斯特角各不相同,所以在无先验信息的条件下选取 $60^\circ$ 观测角和 $180^\circ$ 方位角对伪装材料进行检测,如图3所示。

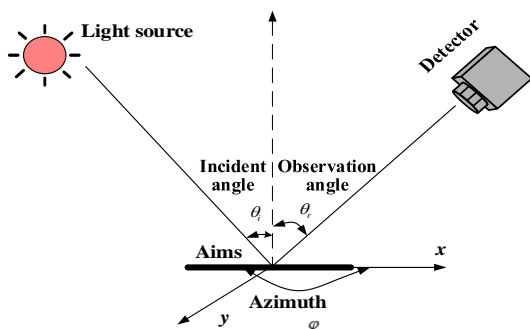


图3 实验设计

Fig.3 Experimental design

③选择可见光波段（400~700 nm）和近红外波段（700~950 nm）进行目标检测,其中可见光波段光谱分辨率为2 nm,近红外波段光谱分辨率为8 nm,所以为了提高采集图像的精度,将光谱分辨率设置为5 nm。实验条件如表1、表2所示。

### 2.3 数据处理方法

分孔径同时式高光谱偏振成像系统获得的是目标辐射亮度值,而非目标反射率。因此,在数据处理时,为了获取伪装目标反射光谱曲线,需将辐射亮度值转换为反射率,这个过程称为光谱反演<sup>[10]</sup>。光谱反演主要是从 $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$ 三个偏振方向高光谱图像和解析的偏振参量中,计算伪装材料与背景

的相对反射率随波长的变化规律。图像信息解析流程如图4所示。

表1 环境条件

Table 1 Environmental conditions

Detection angle	Temperature	Humidity	Illuminance	Air pressure
$60^\circ$	$20^\circ\text{C}$	60%	54 klx	1000 hPa

表2 检测距离

Table 2 Detection distance

Distance/m	Camouflage coating	Camouflage network
	263	270

## 3 伪装材料数据处理与特性分析

实验以伪装涂层和伪装网为研究目标,首先在相同检测角度和光照条件下,对伪装材料的9个偏振参量绘制相对反射率的光谱曲线图,找到9个偏振参量随波段改变而变化的规律,分析各波段检测目标的最优偏振参量;然后在高光谱偏振检测波段450~950 nm中,寻找伪装目标最优检测波段,该波段有利于对伪装材料的检测和表面属性分析;最后根据偏振高光谱数据分析得到最优检测波段后,分析该波段伪装材料的特征。

### 3.1 伪装涂层数据处理与特性分析

图5给出了伪装涂层的9个偏振参量的光谱特性曲线,由图可知:

①在相同检测角度和光照条件下,比较9个偏振参量的相对反射率光谱图可以发现,背景的相对反射率突出特征是在690 nm波段有1个很强的吸收谷;目标的相对反射率突出特征是曲线的波动性较大,反映在曲线的尖峰,这是由于伪装涂层对不同波段有响应差异性;

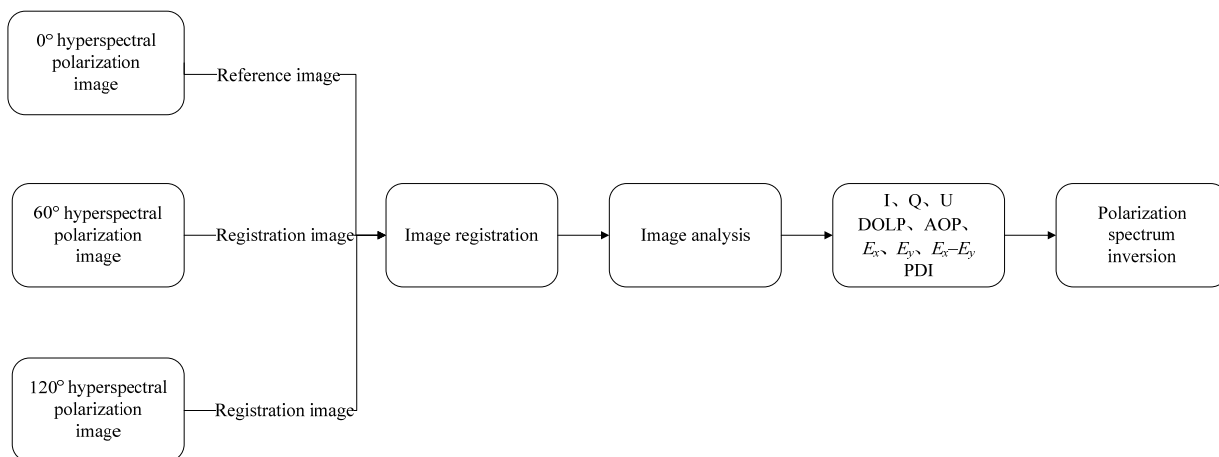


图4 实验数据处理流程

Fig.4 Experimental data processing flow

②在 450~680 nm 的可见光波段, (a)图、(f)图和 (h)图 3 个偏振参量背景 的相对反射率明显高于目标的相对反射率, 能够有效检测伪装涂层, 其中, (a)图和(f)图在该波段目标的相对反射率整体变化缓慢, 在 550 nm 波段附近目标与背景的相对反射率差值达到峰值;

③在 680~700 nm 波段背景有很强的吸收谷, 此时目标与背景的相对反射率极为接近, 不利于区分目标;

④在 700~950 nm 的近红外波段, 背景的相对反射率开始有一个急剧增加的过程, (a)图、(f)图、(g)图和(i)图 4 个偏振参量背景的相对反射率明显高于目标的相对反射率, 能够有效检测伪装涂层, 其中, (a)

图、(f)图和(g)图在近红外波段目标的相对反射率整体变化缓慢, 且在 760 nm 波段附近目标与背景的相对反射率差值达到峰值; 实验数据表明使用近红外波段相比可见光波段更有利于检测目标, 760 nm 波段为最佳检测波段。

图 6 给出了 760 nm 典型检测波段解析的伪装涂层偏振参量。由于标准差是图像像素灰度值相对于均值的离散程度, 图像信息量越大, 标准差越大; 信息熵反映图像纹理信息, 纹理细节越丰富, 信息熵越大; 对比度是图像对比度测量。因此, 选用标准差、信息熵和对比度这 3 个属性来评价衡量偏振参量图像。计算偏振图像中伪装涂层的信息熵、标准差、与背景的对 比度, 结果如表 3 所示。

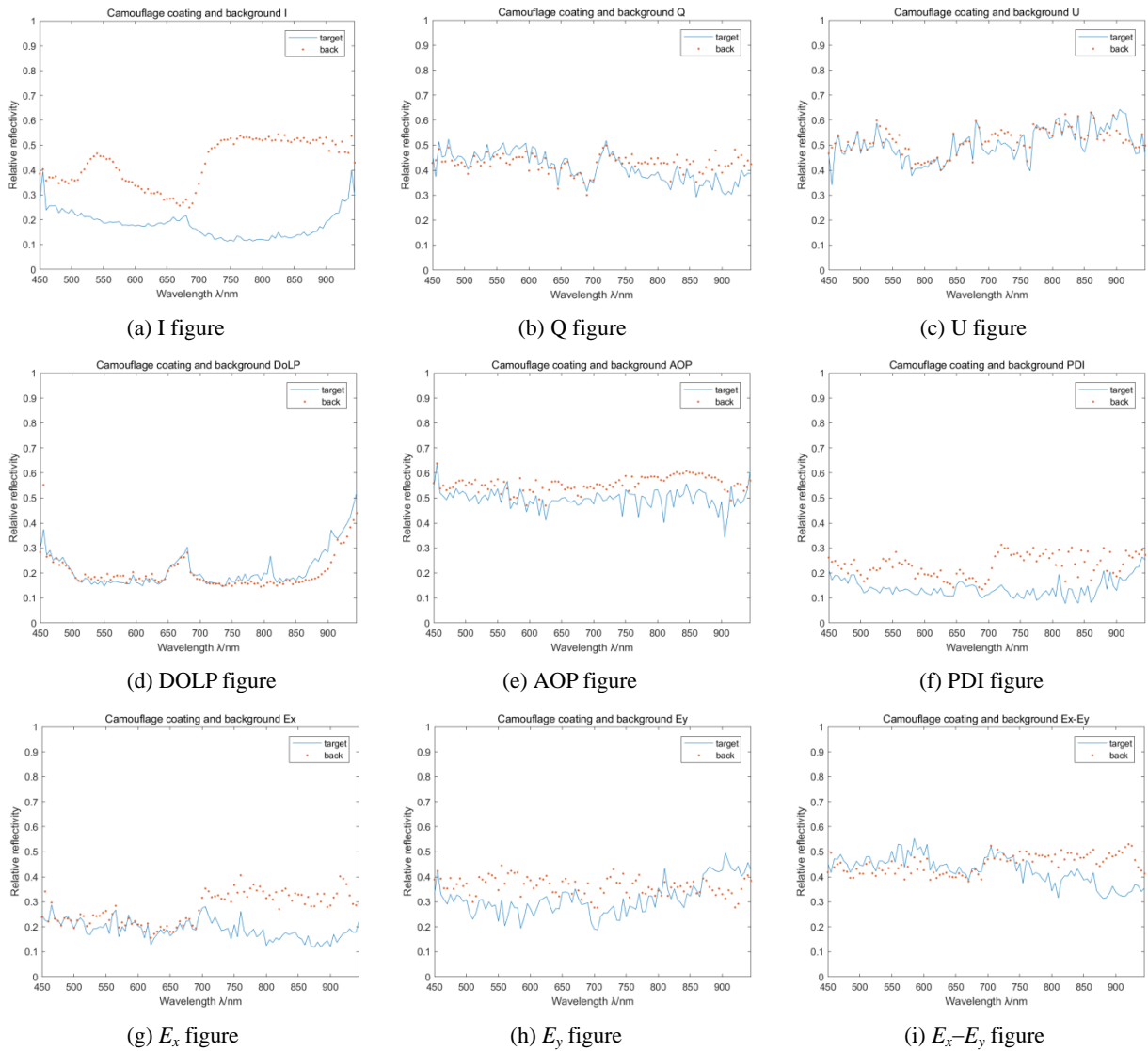


图 5 伪装涂层光谱特性曲线

Fig.5 Camouflage coating spectral characteristic curve



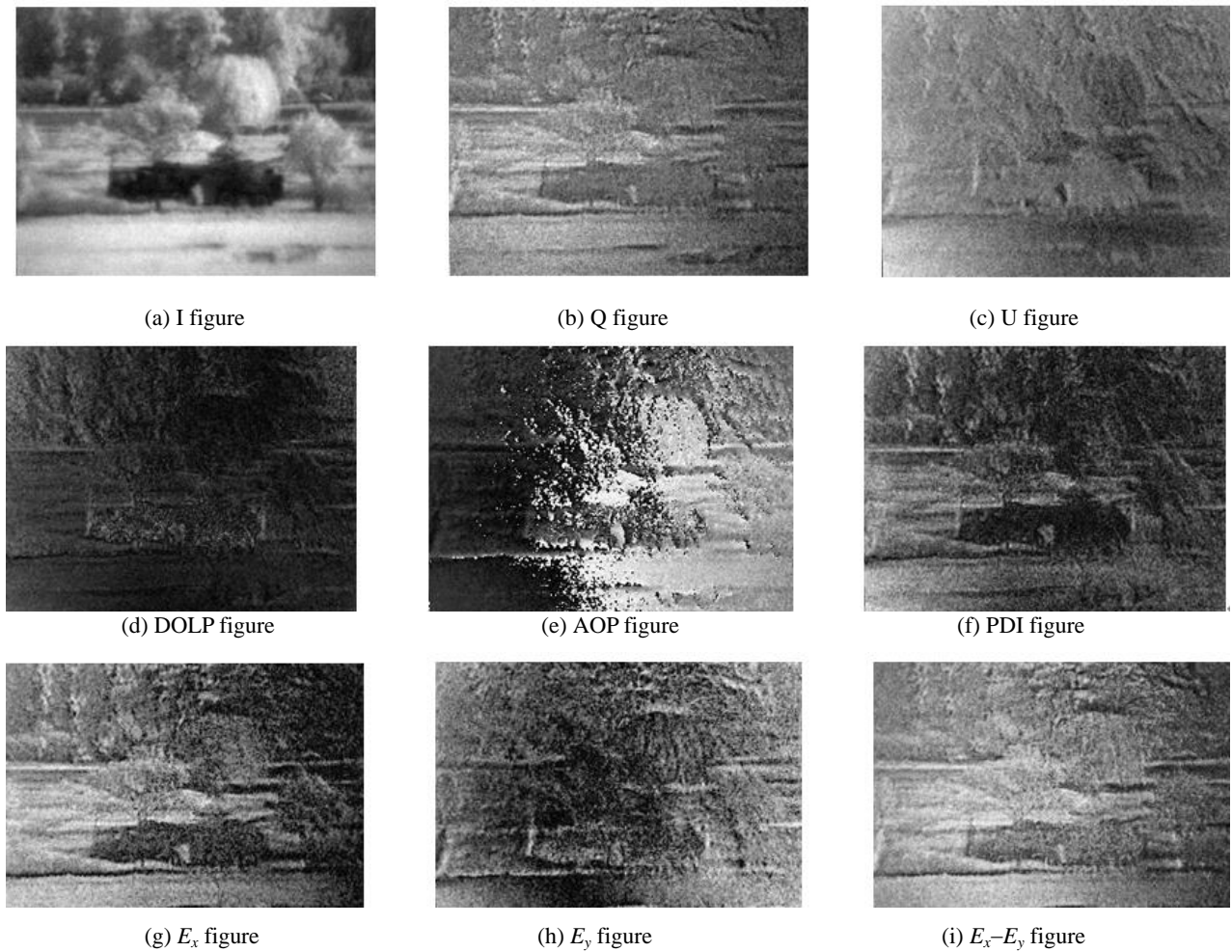


图6 伪装涂层偏振解析图

Fig.6 Camouflage coating polarization analysis

表3 图像评价指标结果

Table 3 Image evaluation index result

	I figure	Q figure	U figure	DOLP figure	AOP figure	PDI figure	$E_x$ figure	$E_y$ figure	$E_x-E_y$ figure
Information entropy	6.912	7.027	6.685	6.583	7.859	6.917	7.538	7.453	7.270
Standard deviation	10.21	8.742	3.787	4.310	14.22	8.857	9.902	4.945	7.167
Contrast	36.82	0.899	6.151	4.840	5.119	1.254	8.760	8.623	3.624

实验结果表明对于伪装涂层,在相同检测条件下:①(e)图的信息熵要高于其他偏振参量,相比较(a)图提升了1.21倍,说明其图像信息更加丰富;②(e)图的标准差要高于其他偏振参量,相比较(a)图提升了1.39倍,说明其描绘细节的能力更加突出;③(a)图的对比度要高于其他的偏振参量,说明(a)图伪装涂层与背景高光谱偏振特性差异大。

### 3.2 伪装网数据处理与特性分析

图7给出了某型伪装网的9个偏振参量的光谱特

性曲线,由图可知:

①在相同检测角度和光照条件下,比较9个偏振参量的相对反射率光谱图可以发现,背景相对反射率突出特征是在690nm波段附近有1个很强的吸收谷;目标的相对反射率突出特征是曲线的波动性较大,反映在曲线的尖峰,这是由于伪装网对不同波段有响应差异性;

②在450~680nm的可见光波段,(a)图、(e)图和(h)图3个偏振参量背景相对反射率明显高于目标

的相对反射率，能够有效检测伪装网；

③在 680~700 nm 波段背景有很强的吸收谷，此时目标与背景的相对反射率极为接近，不利于区分目标；

④在 700~950 nm 的近红外波段，(a)图、(d)图、(f)图、(g)图和(h)图 5 个偏振参量的目标与背景相对反射率差别较为明显，能够有效检测伪装网；其中，(a)图和(f)图在近红外波段目标的相对反射率整体变化缓慢，在 760 nm 波段附近目标与背景的相对反射率差值达到峰值，实验数据表明使用近红外波段比可见光波段更有利于检测该型伪装网，且 760 nm 波段为最佳检测波段。

⑤与伪装涂层对比可以发现，在可见光波段伪装网的目标与背景的相对反射率差值较小，在复杂背景中具有较好的光学伪装效果；而伪装涂层和伪装网均

在近红外波段与背景特征差别大，且都是 760 nm 波段为特征波段，利于目标检测；

图 8 给出了 760 nm 典型检测波段解析的伪装网偏振参量。计算偏振图像中目标的信息熵、标准差、与背景的对比度，结果如表 4 所示。

实验结果表明：①(i)图的信息熵要高于其他偏振参量，相比较(a)图提升了 1.12 倍，说明其图像信息更加丰富；②(e)图的标准差要高于其他偏振参量，相比较(a)图提升了 2.24 倍，说明其描绘细节的能力更加突出；③(a)图的对比度要高于其他的偏振参量，说明(a)图伪装网与背景高光谱偏振特性差异大；④对比可以发现，虽然伪装网和伪装涂层两者材质的不同，但是解析出的(e)图描绘目标细节能力较好，(a)图对比度更高，为下一步高光谱偏振信息融合提供依据。

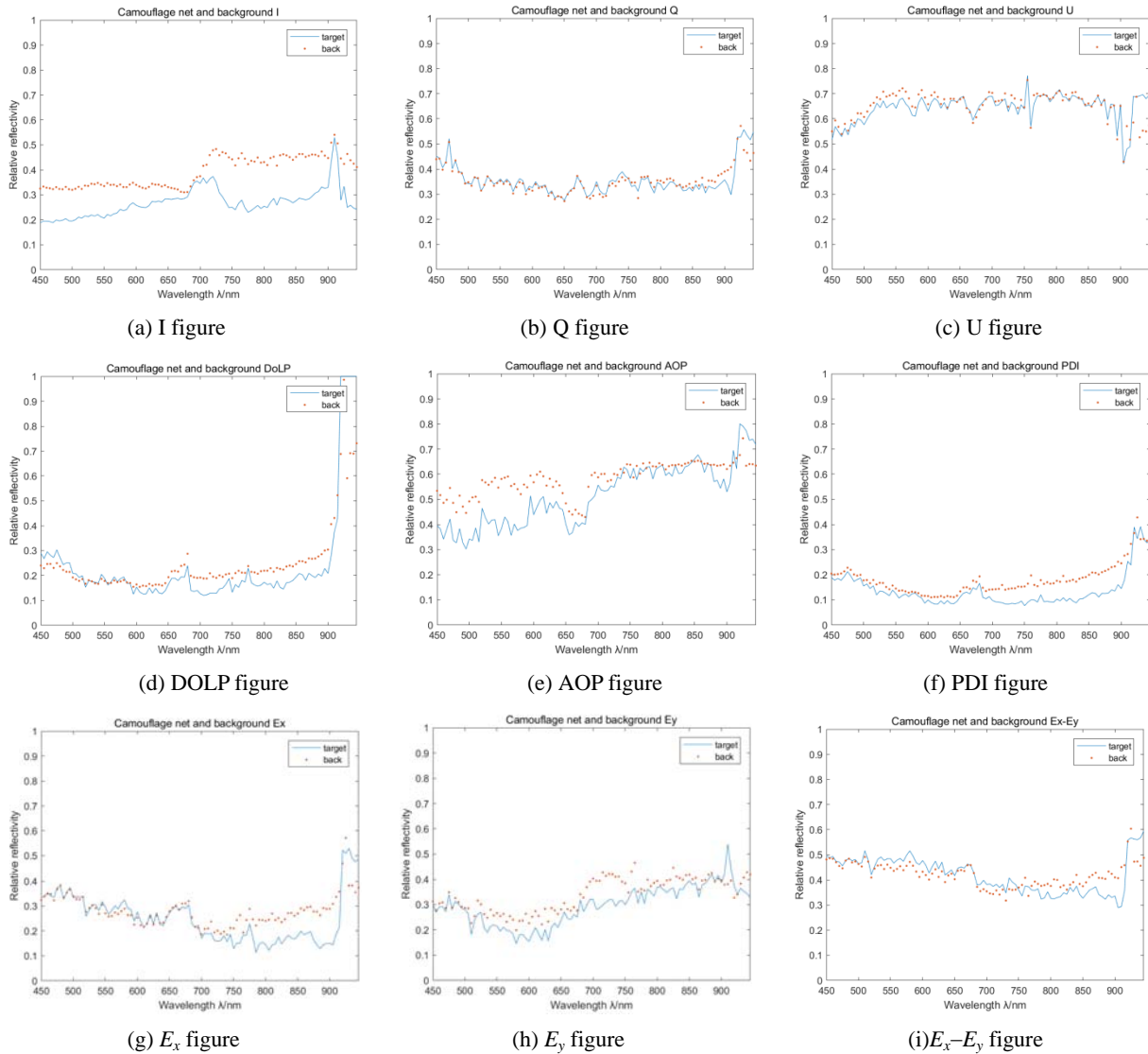


图 7 伪装网光谱特性曲线

Fig.7 Camouflage network spectral characteristic curves

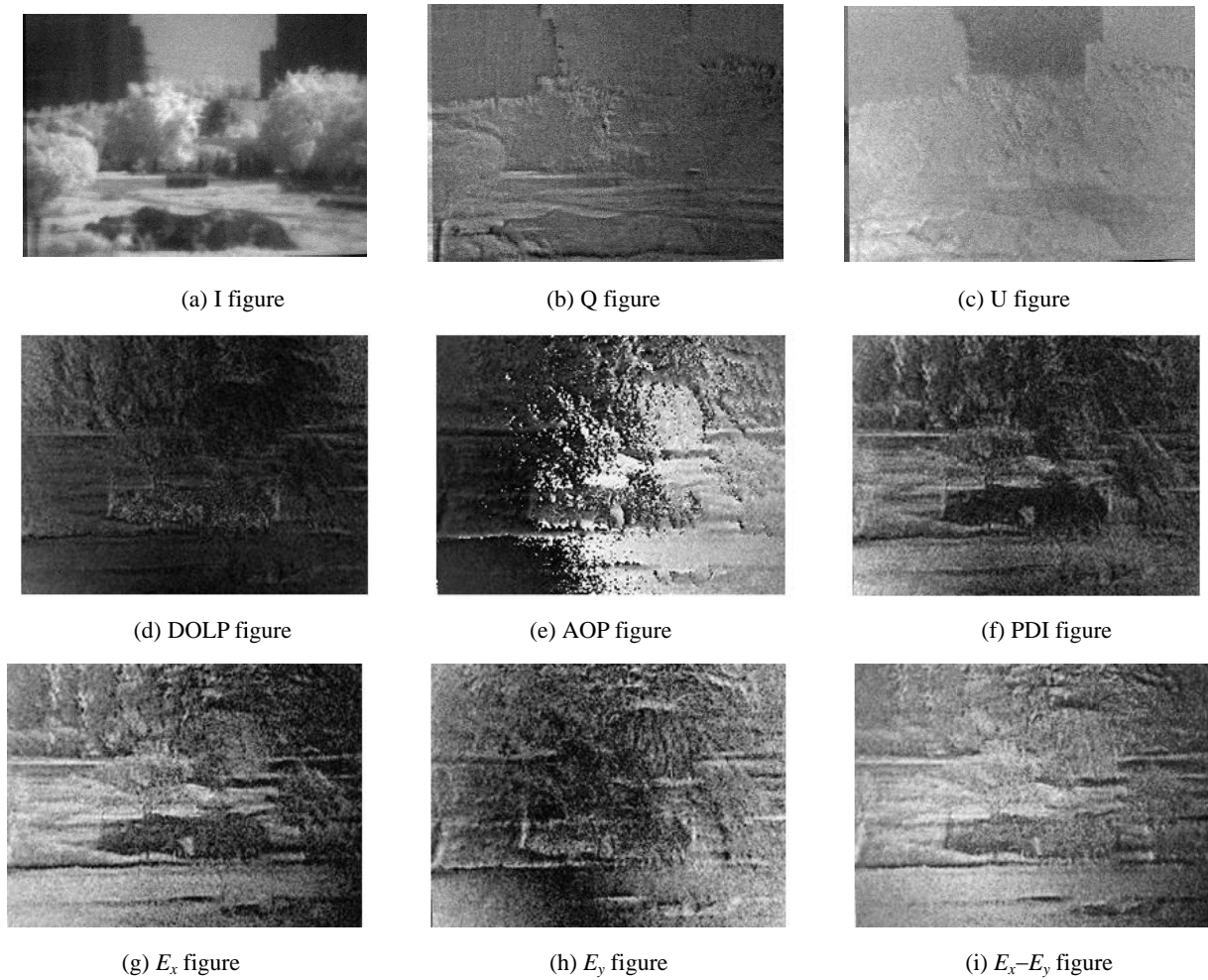


图8 伪装网目标偏振解析

Fig.8 Camouflage net target polarization analysis

表4 图像评价指标结果

Table 4 Image evaluation index result

	I figure	Q figure	U figure	DOLP figure	AOP figure	PDI figure	$E_x$ figure	$E_y$ figure	$E_x-E_y$ figure
Information entropy	6.937	6.669	6.410	6.385	7.603	6.493	7.01	7.587	7.794
Standard deviation	8.821	5.593	3.060	3.907	19.76	3.257	6.902	9.549	8.510
Contrast	15.72	1.959	0.589	7.693	2.715	6.413	11.29	5.146	4.929

#### 4 结论

通过高光谱偏振成像检测技术对典型伪装材料的高光谱偏振特性进行研究,可以发现在相同检测条件下能得出以下结论:①相对于传统光谱测量,使用高光谱偏振成像检测能获得伪装材料偏振参量的连续光谱曲线,分析找到不同探测波段有效检测伪装目标的偏振参量,为伪装材料的高光谱偏振特

性研究提供科学依据;②不同波段检测伪装材料时,目标与背景的相对反射率差异变化较大,实验中分析得出760 nm波段是伪装涂层和伪装网等典型伪装材料成像检测的特征波段,使用该波段进行成像检测有利于复杂背景下的伪装目标检测和识别,对伪装材料的单波段检测研究具有指导意义;③分析伪装目标最优检测波段的偏振参量特征,可以发现AOP



图描绘目标细节能力更强,为下一步伪装目标融合检测奠定基础;④鉴于不同材质的伪装材料对偏振光谱反射的差异性特点,通过偏振高光谱对不同伪装材料进行识别和分类具有一定可行性。

本文初步探讨了典型伪装材料的高光谱偏振特性,实际检测时,还会有其他因素影响伪装材料高光谱偏振特性差异,下一步工作将建立多种伪装材料高光谱偏振模型,深入研究这些相关因素。

### 参考文献:

- [1] Goldstein D H. Polarimetric characterization of federal standard paints[C]//*Polarization Analysis, Measurement, and Remote Sensing III*, 2000, **4133**: 112-124.
- [2] Ceolato R, Rivière N, Hespel L, et al. Supercontinuum laser-based instrument to measure hyperspectral polarized BRDF[C]//*Optics and Photonics for Counterterrorism and Crime Fighting VII*, 2011, **8189**: 818913.
- [3] 徐文斌,陈伟力,李军伟,等.采用长波红外高光谱偏振技术的目标检测实验[J].*红外与激光工程*, 2017, **46**(5): 504005-0504005(7).  
XU Wenbin, CHEN Weili, LI Junwei, et al. Target detection experiment using long-wave infrared hyperspectral polarization technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(5): 504005-0504005 (7).
- [4] 王小龙,王峰,刘晓,等.荒漠背景下典型伪装目标的高光谱偏振特性[J].*激光与光电子学进展*, 2018, **55**(5): 051101.  
WANG Xiaolong, WANG Feng, LIU Xiao, et al. Hyperspectral polarization characteristics of typical camouflage targets in desert background[J]. *Advances in Laser and Optoelectronics*, 2018, **55**(5): 051101.
- [5] 薛模根.偏振光反射成像检测技术及应用[M].北京:电子工业出版社, 2018: 10-30.  
XUE Mogen. *Polarized Light Reflection Imaging Detection Technology and Application*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018: 10-30.
- [6] Bevington P R, Robinson D K, Blair J M, et al. Data reduction and error analysis for the physical sciences[J]. *Computers in Physics*, 1993, **7**(4): 415-416.
- [7] Deschamps P Y, Bréon F M, Leroy M, et al. The POLDER mission: instrument characteristics and scientific objectives[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, **32**(3): 598-615.
- [8] 谢琛,王峰.伪装涂层红外偏振辐射特性实验研究[J].*红外技术*, 2015, **37**(10): 890-894.  
XIE Chen, WANG Feng. Experimental study on infrared polarization characteristics of camouflage coatings[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(10): 890-894.
- [9] 马文静.偏振高光谱图像多维度信息提取及目标检测算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.  
MA Wenjing. Research on Multi-dimensional Information Extraction and Target Detection Algorithm for Polarized Hyperspectral Image[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [10] 童庆禧,张兵,郑兰芬.高光谱遥感[M].北京:高等教育出版社, 2006: 51-59.  
TONG Qingxi, ZHANG Bing, ZHENG Lanfen. *Hyperspectral Remote Sensing*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 51-59.