

面向高光谱探测的伪装效果评价方法

刘 恂, 华文深, 杨 佳

(军械工程学院, 河北 石家庄 050003)

摘 要: 20 世纪 80 年代发展起来的高光谱成像技术能充分探测并利用地物的光谱信息, 有着较强的伪装识别能力, 而传统的伪装评价方法主要基于伪装和背景的空间特征, 不适用于基于光谱特征的高光谱伪装探测技术。提出了一种面向高光谱探测的伪装效果评价方法。该方法以伪装目标和背景的光谱特征及光谱导数特征的综合相似度为评价指标, 综合相似度值越大则说明伪装效果越好。同时通过实验评价了三种伪装材料的伪装效果, 其中绿色棉质布料与背景综合相似度为 0.976 6, 伪装效果最佳。最后在高光谱图像分类技术基础上提出了错分率的概念, 验证了评价方法的客观性。所提出的伪装评价方法对于面向高光谱探测的新型伪装材料的设计有一定的指导意义。

关键词: 伪装效果评价; 高光谱成像; 光谱特征; 高光谱分类; 错分率

中图分类号: E951.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3228-05

Camouflage effect evaluation based on hyperspectral detecting technology

Liu Xun, Hua Wenshen, Yang Jia

(Mechanical Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Camouflage is an important factor for winning the modern warfare by preserving fighting capacity. Hyperspectral imaging technology is an efficient method for camouflage detection for its ability of detecting and utilizing targets' spectral information. Traditional camouflage effect evaluation method mainly based on spatial characteristics, which cannot work when hyperspectral imaging technology is used. So a new camouflage effect evaluation method was proposed for hyperspectral detection, which was based on the comprehensive similarity of camouflage and background combined characters of spectrum and its derivative. Target with higher comprehensive similarity meant better camouflage effect. Experiment was conducted to assess the camouflage effects of three camouflage materials by the new method. The camouflage effect of green cloth outperforms others with the comprehensive similarity 0.976 6. And error rate based on hyperspectral classification technology was proposed to verify the objectivity of the new method. The new camouflage effect evaluation method has a certain guiding significance for the design of the new camouflage material.

Key words: camouflage effect evaluation; hyperspectral imaging; spectral characters; hyperspectral classification; error rate

收稿日期: 2014-02-12; 修订日期: 2014-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(10376044); 国家 863 计划

作者简介: 刘恂(1991-), 男, 硕士生, 主要从事光电对抗方面的研究。Email: liuxundd@163.com

导师简介: 华文深(1967-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光电检测与光信息处理研究。Email: huawensh@126.com

0 引言

在现代化信息战争中,被发现就意味着被打击,有效的伪装方法对于保存自身战斗力,赢得战争的胜利发挥着至关重要的作用^[1]。伪装效果评价方法提出了衡量伪装效果的标准,可用于指导伪装材料的设计及伪装场景的布置,对于降低军事目标的可探测性、保存自身战斗力有着重要意义。

传统的伪装目标探测,主要依靠全色或者彩色光学仪器(如普通数码相机)获取的图像来判读目标信息,该方法不能获得分辨率较高且波段连续的光谱信息^[1-2]。面向传统图像和多波段图像探测技术的伪装评价方法,主要分析比较了伪装目标和背景在斑点形状、尺寸大小、颜色亮度及纹理特征等空间特征的差异,而很少考虑目标与背景的光谱差异。而且传统的伪装评价方法的客观性验证通常是建立在统计理论的基础上,需要进行大量实验,可操作性不强^[3-7]。基于高光谱成像技术的伪装探测方法主要通过获取并利用地物的光谱信息来探测伪装目标^[8],这使得基于空间特征的伪装评价方法不再适用。因此文中提出了一种面向高光谱探测的光学伪装效果评价方法,该方法以伪装目标与背景的光谱特征及光谱导数特征综合相似度为评价指标,同时提出了基于高光谱分类技术的目标对背景的错分率的概念,对该评价方法的客观性进行了验证。

1 光谱相似度

高光谱探测技术是利用光谱成像仪来获取目标的二维空间信息以及光谱信息^[9]。高光谱成像仪在探测目标时,将被测物的辐射分解成不同波段的谱辐射,被测物在各个分解后的波段上分别成像,这些波段具有波段窄且连续的特点,通常在 400~2 500 nm 范围内分解的波段宽度小于 10 nm,波段数能达几十甚至上百个。而大部分地表目标的吸收峰半宽度为 20~40 nm,高光谱图像的光谱分辨率足够区分出具有诊断性光谱特征的地面目标。而传统的光学探测器的波段宽度一般为 100~200 nm,且光谱不连续^[8],较难发现与背景在较宽波段内辐射量相近的目标。

对于光学伪装而言,主要是提高目标与背景的背景的反射光谱的相似度。目标的反射光谱特性与背景越

相似,则越不易被探测,伪装效果越好。同时利用高光谱成像技术探测伪装目标时,主要利用的是高光谱数据中的光谱信息,通常将光谱特性相同或相近的被测物视为同一类,只有当目标和背景的光谱差异超过一定阈值时,才能将目标和背景区分开来,从而才能完成目标的探测。因此文中将伪装目标和背景光谱相似性作为评价伪装效果的指标。

1.1 光谱特征相似性

在高光谱数据分析中,通常将每一个像元用一个由该像元各波段图像的灰度值构成的向量表示:

$$\mathbf{X}=[x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (1)$$

式中: \mathbf{X} 称为该像元的光谱向量,其中 x_i 为第 i 波段对应图像中像元的灰度值, n 为波段数。设高光谱图像中有 m 个像元均对应于同一地物,用这 m 个像元的平均光谱向量 \mathbf{M} 表征该地物的光谱特征:

$$\mathbf{M}=\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \mathbf{X}_k \quad (2)$$

文中使用光谱角(Spectral Angel, SA)距离作为光谱特征距离的度量。设目标和背景的平均光谱向量分别为 \mathbf{M}_t 、 \mathbf{M}_b ,则其光谱角距离定义为:

$$\text{SA}(\mathbf{M}_t, \mathbf{M}_b)=\cos \langle \mathbf{M}_t, \mathbf{M}_b \rangle = \frac{\mathbf{M}_b \mathbf{M}_t^T}{[(\mathbf{M}_b \mathbf{M}_b^T)(\mathbf{M}_t \mathbf{M}_t^T)]^{1/2}} \quad (3)$$

式中: \mathbf{M}^T 表示 \mathbf{M} 的转置。公式(3)计算得到的是向量 \mathbf{M}_t 、 \mathbf{M}_b 间的广义夹角的余弦值,将其作为光谱特征距离 d_s ,其值越小说明其光谱特征相似性越好。从公式(3)可以看出,光谱角距离大小与向量的模无关,即不会受到向量模大小的影响。因此,光谱角距离对于乘性干扰具有良好的抗干扰性,不易受照度变化的影响。使用光谱角距离来度量光谱特征相似性可以消除或减弱部分通过改变地物光谱向量模而产生光谱变异的同物异谱现象的影响,如太阳入射角、地形、坡向和观测角等^[10]。因此使用光谱角距离来度量光谱特征相似性,就应用于伪装评价而言,更具客观性和普遍适用性。

1.2 光谱导数特征相似性

设高光谱图像波段数为 n ,光谱向量为 \mathbf{X} 对应像元的光谱导数向量 \mathbf{X}' 定义如下:

$$\mathbf{X}'=[\ln x_2 - \ln x_1, \ln x_3 - \ln x_2, \dots, \ln x_n - \ln x_{n-1}] \quad (4)$$

式中: \mathbf{X}' 为 $n-1$ 维向量。光谱导数反映了光谱曲线斜率及变化情况,是对光谱曲线形态特征的描述,可以

增强光谱曲线在坡度上的细微变化,通常这些变化与地物的吸收特性有关,是物质的本质特性的体现。同时,参考文献[11]证明使用光谱导数特征描述伪装目标和背景的相似度,可以进一步消除部分大气效应,增强伪装效果评价的客观性。因此文中选择目标和背景光谱导数特征相似性作为伪装效果评价又一重要因素。同样采用平均光谱导数向量间的广义向量角来度量其相似度,其计算方法类似光谱特征距离的计算,定义光谱导数特征距离为 d_d :

$$d_d = SA(M'_t, M'_b) \tag{5}$$

式中: M'_t, M'_b 分别表示伪装目标和背景的平均光谱导数向量。

1.3 综合光谱相似度

将光谱特征距离和光谱导数特征距离以一定的权值相加得到综合光谱相似度 d_c :

$$d_c = w_1 \cdot d_s + w_2 \cdot d_d \tag{6}$$

式中: (w_1, w_2) 为权值向量,且满足 $w_1 + w_2 = 1$; d_c 为综合光谱相似度,即伪装效果评价指标, d_c 越大说明目标和背景的相似度越好,从而伪装效果就越好,不易被高光谱成像技术探测,相反 d_c 越小说明相似度越差,伪装效果越差,易被探测。

2 伪装效果评价实验

2.1 伪装评价实验结果

实验场景设置如图 1 所示, A 为作训迷彩服, B 为绿色棉质布料, C 为某种塑料草皮, D 为真实草

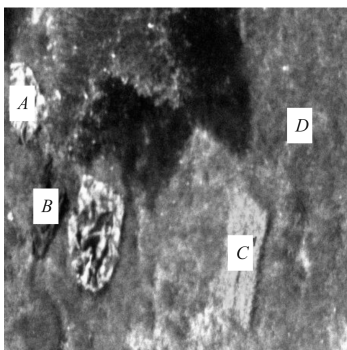


图 1 实验场景设置

Fig.1 Experimental scene setting

坪。 A, B, C 作为伪装目标, D 作为背景。使用高光谱成像仪在 449~801 nm 波段范围内,以 4 nm 的步长对其成像得到 89 个波段图像。使用高光谱数据处理

软件 ENVI 获取伪装目标和背景的平均光谱数据,得到其光谱特征曲线,由公式(4)得到其光谱导数特征曲线。图 2 为伪装目标 A 和背景 D 的光谱特征曲线(a)及光谱导数特征曲线(b)。

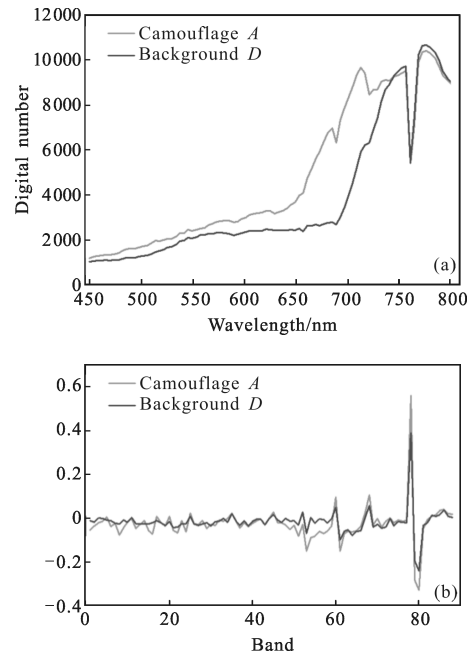


图 2 伪装目标 A 及背景 D 的光谱特征曲线及光谱导数特征曲线

Fig.2 Spectral curves and spectral derivative curves of camouflage A and background D

分别计算伪装目标 $A \sim C$ 与背景 D 的光谱特征距离 d_s 、光谱导数特征距离 d_d 以及综合光谱相似度 d_c ,其中为突出光谱特征距离的作用,将权值向量设为 $(0.6, 0.4)$,结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,伪装目标 B 与背景的光谱特征距离 d_s 、光谱导数特征距离 d_d 及综合光谱相似度 d_c 均大于 A, C 。说明伪装目标 B 的伪装效果最佳, A 次之, C 最差。

表 1 伪装目标与背景的综合相似度

Tab.1 Similarity of camouflage and background

Targets and background	d_s	d_d	d_c
AD	0.965 1	0.913 8	0.944 6
BD	0.989	0.958 1	0.976 6
CD	0.908 2	0.904 9	0.906 8
Rank	$B \setminus A \setminus C$	$B \setminus A \setminus C$	$B \setminus A \setminus C$

2.2 伪装评价客观性验证

根据伪装效果好则不易被探测的原则,设置实验验证伪装效果评价的客观性。高光谱图像分类技术是探测伪装目标的常用方法。高光谱图像分类是基于图像像元的光谱特征与空间特征,对每个像元或比较均匀的像元组中所代表的不同类别地物进行类别属性的确定和标注。其中基于光谱特征高光谱图像分类技术主要考虑图像的光谱信息。像元的光谱信息表达了不同地物的差异,不同的地物类型,如伪装目标与背景,具有不同的光谱信息特征,是作为基于光谱特征高光谱图像分类中区分不同地物的理论依据,具有相同或者相近光谱特征的像元将分到同一类。当伪装目标与背景的光谱相似性较高时,则两者的错分率较高。其中伪装对背景的错分率定义为:

$$\eta = \frac{X}{Y} \times 100\% \quad (7)$$

式中: η 为错分率; Y 为某类伪装目标在高光谱图像中对应的总像元数; X 为该伪装目标对应像元中错分为背景的像元数。错分率较高,则说明伪装目标与背景的光谱相似度较高,目标较难探测,伪装效果好。其中常用的高光谱分类方法有最小距离分类(Minimum Distance Classifier, MDC)、最大似然分类(Maximum Likelihood Classifier, MLC)、支持向量机分类(Support Vector Machine, SVM)以及光谱角匹配分类(Spectral Angle Mapper, SAM)等^[9]。实验采用这四种分类方法对高光谱图像分类,并计算伪装目标 A 、 B 、 C 相对于背景 D 的错分率,得到的结果见表 2。从表 2 可以看出,使用四种分类方法得到的伪装目标 A 、 B 、 C 相对于背景 D 的错分率 η_{AD} 、 η_{BD} 、 η_{CD} 均满足 $\eta_{BD} > \eta_{AD} > \eta_{CD}$,上一步实验得到的伪装目标 A 、

表 2 伪装目标相对于背景的错分率

Tab.2 Error rate of camouflage target to background

Targets	Error rate/%				d_c
	η (MDC)	η (MLC)	η (SVM)	η (SAM)	
AD	13.22	0.35	1.24	4.09	0.944 6
BD	14.19	2.80	6.30	7.92	0.976 6
CD	1.41	0.01	0.69	0.65	0.906 8
Rank	$BD \setminus AD \setminus CD$	$BD \setminus AD \setminus CD$	$BD \setminus AD \setminus CD$	$BD \setminus AD \setminus CD$	$BA \setminus C$

B 、 C 相对于背景 D 的光谱相似度关系满足 $B > A > C$, 两者结果相吻合,验证了基于光谱特征及光谱导数特征的综合相似度的伪装效果评价方法的客观性。

3 结 论

提出了一种面向高光谱探测的伪装效果评价方法,对指导面向高光谱探测的新型伪装材料的设计有着重要意义。该评价方法充分利用了地物的光谱信息,以伪装目标和背景的光谱特征距离及光谱导数特征距离的综合相似度为指标,实用性强。同时特征距离度量为向量的广义角余弦值,使得评价指标有较强的抗干扰能力,客观性强。通过实验,利用高光谱分类技术,提出了错分率的概率,验证了其客观性及准确性。

参考文献:

- [1] Ma Yongping, Zhang Wei, Liu Dongxu. Characteristics of hyperspectral reconnaissance and threat to ground military targets[J]. *Aerospace Shanghai*, 2012, 29(1): 37-41. (in Chinese)
麻永平, 张伟, 刘东旭. 高光谱侦察技术特点及其对地面军事目标威胁分析[J]. 上海航天, 2012, 29(1): 37-41.
- [2] Wei Feng, He Mingyi, Mei Shaohui, et al. Hyperspectral data feature extraction using spatial coherence based neighborhood preserving embedding [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1249-1254. (in Chinese)
魏峰, 何明一, 梅少辉. 空间一致性领域保留嵌入的高光谱数据特征提取[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1249-1254.
- [3] Zhu Huanhuan, Du Sidan. Camouflage assessment based on wavelet texture characteristics [J]. *Computer Engineering*, 2008, 34(16): 227-229. (in Chinese)
朱欢欢, 都思丹. 基于小波纹理特征的迷彩伪装评价[J]. 计算机工程, 2008, 34(16): 227-229.
- [4] Xu Ying, Yao Shuliang. Optic camouflage effect evaluation method based on image analyses [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2010, 25(4): 69-72. (in Chinese)
徐英, 姚树良. 基于图像分析的光学伪装效果评价方法研究[J]. 光电技术应用, 2010, 25(4): 69-72.
- [5] Hu Jianghua, Zhu Chao, Wang Youjun, et al. A method for detection and evaluation on pattern painting camouflage effect[J]. *China Measurement Technology*, 2007, 33(2): 67-69. (in Chinese)

- 胡江华, 朱超, 王友军, 等. 一种迷彩伪装效果检测评价方法[J]. 中国测试技术, 2007, 33(2): 67-69.
- [6] Cui Baosheng, Xue Shiqiang, Ji Yanjun, et al. Camouflage effectiveness evaluation based on image feature [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1178-1183. (in Chinese)
崔宝生, 薛士强, 姬艳军, 等. 图像特征的伪装效果评估技术[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1178-1183.
- [7] Liu Zunyang, Shao Li, Wang Zirong, et al. Visible light camouflage effectiveness assessment combining information of color and distribution [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 984-988. (in Chinese)
刘尊洋, 邵立, 王自荣, 等. 综合颜色和分布信息评价可见光伪装效果[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 984-988.
- [8] Zhang Chaoyang, Cheng Haifeng, Chen Zhaohui, et al. The development of hyperspectral remote sensing and its threatening to military equipment [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2008, 23(1): 10-12. (in Chinese)
张朝阳, 程海峰, 陈朝辉, 等. 高光谱遥感的发展及其对军事装备的威胁[J]. 光电技术应用, 2008, 23(1): 10-12.
- [9] Zhang Bing, Gao Lianru. Hyperspectral Image Classification and Target Detection [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
张兵, 高连如. 高光谱图像分类与目标探测 [M]. 北京: 科技出版社, 2011.
- [10] Zhang Liangpei, Zhang Lifu. Hyperspectral Remote Sensing [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2011. (in Chinese)
张良培, 张立福. 高光谱遥感 [M]. 北京: 测绘出版社, 2011.
- [11] Tong Qingxi, Zhang Bing, Zheng Lanfen. Hyperspectral Remote Sensing-Principle, Technology and Application [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感-原理、技术及应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.