

陆基条件下典型地物和伪装光谱影响因子分析

周冰, 李秉璇*, 贺宣, 刘贺雄, 王法臻

陆军工程大学电子与光学工程系, 河北 石家庄 050000

摘要 近年来,随着军事侦察识别技术的快速发展,用于侦察探测的军事装备已经逐步实现高精度化水平,拥有高技术侦察手段的一方往往可以对目标实施精准打击,大大降低战争胜利的成本。在高光谱成像方面,目前比较成熟的有卫星遥感和高空航空成像技术,这两种成像方式侦察时间大致相同,入射光方向基本一致,并且由于高光谱设备基本垂直于地面,因而反射光方向保持不变,地物的BRDF系数比较固定。在陆军应用时,侦察时间随机,太阳的入射角度时刻变化,而且侦察的方向任意,高光谱在地面或者近地位置,探测方向变化无穷,地物在不同成像条件下的光谱曲线受到物体表面的BRDF系数影响凸显。通过展开不同的实验,挑选了绿地植被和三种人造伪装材料,细致的分析了太阳高度角、方位角和探测角对陆基条件下地物光谱的影响。实验结果表明,虽然四种材料的反射特性存在差异,但在不同的太阳高度角、探测角以及探测器与地物的方位角上呈现相似的规律。对于太阳高度角,当探测角一定时,人造伪装物光谱一般随着太阳高度角的变化整条光谱曲线都发生变化,反射比曲线呈现出平移的规律,而绿地植被在白光波段变化不很明显,在近红外波段的变化很明显,随着太阳高度角的升高先升然后降低;对于方位角而言,四种材料随着方位角的增大,光谱反射比一般先升高后降低,同时后向观测时的反射比一般比前向观测时大;对于探测角,三种材料的光谱反射比与探测角的关系并不很大,但三种材料均在不同的探测角度上出现了“热点”现象。最后,对绿地植被和迷彩伪装板的BRDF模型参数进行了分析,得到了其在不同方向上的反射规律。

关键词 高光谱成像; 反射比; 陆基; 伪装

中图分类号: TP72 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)09-2956-06

引言

现代高科技战争伴随着侦察技术与精确制导技术的发展,目标“发现”即意味着被摧毁,对目标进行伪装已经成为战场目标降低自身被发现概率、提高战场生存能力的首选方式。经过30余年的发展,高光谱成像技术已经成为对抗军事伪装的有效手段。目前已知的伪装手段还不能有效地欺骗高光谱侦察方式。

当前,利用高光谱成像进行目标分类和探测的主要方式是卫星遥感和高空航空侦察,在已知的这两种探测方式中,侦察时间大致相同,因此入射光的方向基本一致;在卫星遥感和高空航空侦察时,一方面侦察时间随机,太阳的入射角度时刻变化;另一方面侦察的方向任意、高度在地面或者近地位置(无人机搭载侦察),探测方向相对变化无穷。侦察过程受物体表面双向反射分布函数(bidirectional reflectance

distribution function, BRDF)系数影响凸显。陆基条件下高光谱成像目标往往分布在地、平原等地区,而遥感探测对于目标的观测方式往往是垂直方向收集数据,对于陆基条件下的高光谱成像而言,探测角度、太阳高度角、探测器与光源的相对方位角都会对目标探测产生影响,导致同种或者相似的地物产生不同的光谱曲线,而这种反射率的变化将会对目标探测带来影响。

对于地物的BRDF的测量,前人已经做了很多研究,赵春燕为了提升光学卫星遥感器的定标频次,提出了一种基于场地高光谱BRDF模型的高频次绝对定标方法^[1]。中国科学院安徽光学精密机械研究所在敦煌辐射校正场开展了针对地表反射率在遥感器视角方向校正的BRDF特性分析,测量了整个场地的BRDF值并建立了模型,分析了场地对不同波段的方向特性^[2]。有报道针对坡地植物的反射比影响因子进行了分析,结果证明了探测天顶角以及坡度、坡向对植被高光谱遥感均有影响。Wang针对黄铜表面的反射特性做了一系

收稿日期: 2020-07-29, 修订日期: 2020-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(61801507)资助

作者简介: 周冰, 1976年生, 陆军工程大学电子与光学工程系副教授 e-mail: zhbngxgc@163.com

* 通讯作者 e-mail: 906975318@qq.com

列实验,建立了 BRDF 模型并进行了分析^[3]。有学者也针对其他材料进行了一系列研究^[4-6]。

目前,尚无专门针对陆基应用情况下,地物及伪装的光谱曲线是否仍旧保持“同物同谱”、“异物异谱”的特性进行研究。有必要对高光谱图像中的同一目标光谱特征受观测几何、太阳入射角度、探测器探测角以及探测器与光源方位角的影响,确定地物光谱在不同观测条件下是否存在光谱不确定性,即“同物异谱、异物同谱”现象;如果存在,需对影响的大小及规律进行总结,并相应对后续目标探测算法提出改进意见。特别要加强对作战区域背景光谱特性的研究,对不同地域典型地物的光谱要细化分析,以便于更精确地确定特定背景的光谱参数,以建立不同地区的光谱特性参数数据库。

挑选了北方地区常见的绿色植被、迷彩雨衣以及两种不同的迷彩伪装板作为研究对象,通过实验从多个方向采集了各种材料的光谱曲线,分析了不同探测角度、太阳入射角以及地物方位角对陆基条件下高光谱成像的影响,通过建立 BRDF 模型,分析了不同伪装材料的不同散射特性,为陆基条件下高光谱成像实时伪装识别提供了研究基础。

1 实验部分

1.1 研究方法

自然界的大部分物体都属于非朗伯体,一般使用 BRDF 模型对地物的各向异性进行描述。其中 BRDF 的定义为反射幅亮度和入射幅亮度之比,其计算表达式为式(1)

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (1)$$

式(1)中, $\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r$ 表示入射太阳光的方位角、天顶角以及反射光线的方位角、天顶角。 dE_i 表示光源在入射点附近元面上的入射辐照度, dL_r 为相应的反射辐亮度。BRDF 半经验核驱动模型在不同的领域都得到了广泛的应用,其中 RossThick-LiSparseR 模型具有显著的代表性,其表达式如式(2)所示

$$R(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda) = f_{\text{iso}}(\lambda) + f_{\text{vol}}(\lambda)K_{\text{vol}} + f_{\text{geo}}(\lambda)K_{\text{geo}} \quad (2)$$

该模型将二向性反射分解为了各向同性反射、体散射和几何反射三部分的权重。其中 R 是二向反射率, θ 是光线照射天顶角, ϑ 是观测天顶角, σ 是相对方位角。 K_{vol} 和 K_{geo} 分别为体散射核和几何光学核。三个常数只与波长有关,分别表示均匀散射、体散射和几何光学散射所占比例。

在模型中,由于三个常数仅与波长有关,而体散射核 K_{vol} 和几何光学核 K_{geo} 可以通过探测角、方位角以及太阳高度角进行计算,拍摄的多组数据进行线性拟合可以得到三个常系数的值,进而建立 BRDF 模型,理论上可以求出在任意太阳高度角、探测角以及方位角条件下目标的反射率。

1.2 实验设计

实验使用基于声光可调谐滤波器(acousto-optic tunable filter, AOTF)的 HIS-300 型成像光谱仪,成像波段间隔为 4 nm,可以在 449~801 nm 的光谱范围内获取 89 幅图像,每一幅图像都记录了在不同成像波长条件下地物的辐射亮度

值。实验示意图如图 1 所示(a)所示,其中 A 到 D 依次为浅色伪装板、深色伪装板、漫反射白板、迷彩雨衣。实验过程中获得的高光谱图像灰度图如图 1(b)所示。



(a) 实验对象摆放位置

(b) 实验图像灰度图

图 1 拍摄场景示意图

Fig. 1 Schematic diagram of shooting scene

实验中,设定对目标进行前向观测时方位角为正,后向观测时方位角为负。由于高光谱成像仪观测距离较近,应根据天气条件以及成像角度及时的调整高光谱成像仪的光圈、增益,避免出现探测器饱和的现象。实验的迷彩涂层样板为浅绿色迷彩涂层板与深绿色迷彩涂层板,均由军内某研究所提供,该研究所在研究迷彩涂层方面具有很高的权威性,提供的迷彩涂层样板与现役装备基本一致,通过研究伪装板的光谱曲线可以合成目前装备的涂层光谱。同时选取经过计量标定的聚四氟乙烯板(PTFE)作为实验参考板,用来对高光谱仪进行辐射定标,使用 PTFE 进行辐射定标的公式见式(3)

$$R = \frac{\text{地物 DN 值}}{\text{白板 DN 值}} \times \theta \quad (3)$$

式(3)中, θ 为白板的漫反射系数, $\theta=0.989$ 。

2 结果与讨论

2.1 数据分析

2.1.1 太阳高度角对地物光谱曲线的影响

使用成像光谱仪对研究目标以及白板同时进行拍摄,时间为上午 9 点,每隔半小时拍摄一次,共拍摄 5 次,太阳高度角为 43°时的几何示意图如图 2 所示,探测天顶角为 27°,地面的坡度大致为 10°左右。

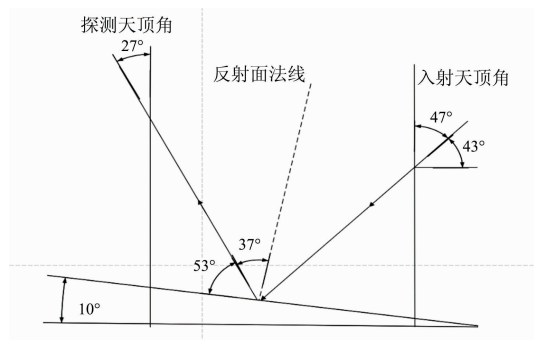


图 2 实验的几何示意图(太阳高度角为 43°)

Fig. 2 Geometry diagram of the experiment
(Solar elevation angle is 43°)

如图 3 所示,从实验结果中可以看出,四种研究对象的光谱曲线与太阳高度角的关系区别较大。在不同的太阳高度角照射下,如图 3(a)所示,绿色植被的光谱发生了变化。在 449~689 nm 之间,绿色植被的光谱基本相似,但波长大于 689 nm,绿色植被的光谱曲线随着太阳高度角的变化较为明显,但其变化并非线性变化,基本规律是随着太阳高度角的升高反射比先升高,在 43°时达到最大,随着太阳高度角进一步增大,绿色植被的反射比反而下降。迷彩雨衣的光谱曲线与其他材料较为不同[如图 3(b)所示],基本随着太阳高度角的增大,迷彩雨衣的光谱整体发生了平移,在太阳高

度角为 50°左右时,整个波段的光谱强度都达到了最大值,并在太阳高度角进一步增大时,迷彩雨衣的光谱曲线强度下降。而两种绿色伪装板的光谱由于图中像素较少[如图 3(c, d)所示],光谱曲线受到噪声的影响相比其他两种材料较明显,迷彩伪装板在可见光波段光谱曲线受太阳高度角变化的影响不很明显,但在近红外波段显现出了与绿色植被相同的变化规律,随着太阳高度角的增大,浅色伪装板的近红外波段光谱逐渐上移后下降,在 50°左右达到峰值,深绿色则在 54°时反射比达到最大。

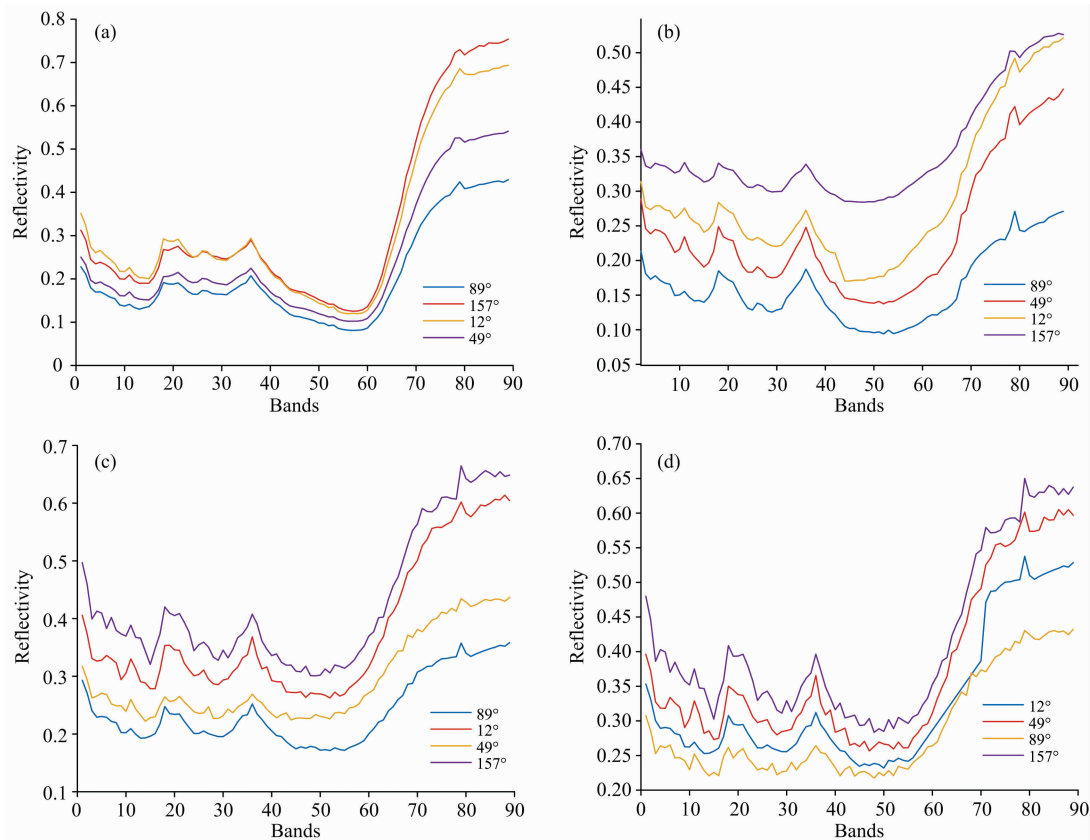


图 3 不同太阳高度角下四种研究对象的光谱曲线

(a): 绿地植被的光谱曲线; (b): 迷彩雨衣的光谱曲线;

(c): 浅绿色伪装板的光谱曲线; (d): 深绿色伪装板的光谱曲线

Fig. 3 Spectral curves of four research objects under different solar altitudes

(a): Spectral curves of green vegetation; (b): Spectral curves of camouflage rain coats;

(c): Spectral curve of light green camouflage board; (d): Spectral curve of dark green camouflage board

当探测角以及探测器与太阳的方位角不变时,之所以会发生这种变化,主要是因为实验研究的三种物体均为非朗伯体,存在二向性反射。有研究曾经发现植物的叶片在主平面入射角等于探测角时反射比值最大,其他方向逐渐减小。实验的结果基本上符合该研究提出的理论,从实验中可以看出,陆基条件下绿地植被的光谱曲线在可见光波段的反射比变化不如其在近红外波段更敏感,并且随着太阳高度角的增大,可见光和近红外波段的植被反射比并不呈现线性变化,在近红外波段的反射比受到太阳高度角的影响变化较大。实

验的误差可能是由于植物叶片表面的灰尘以及粗糙水平不一致,而且校园内的植被并非天然生长而成,而是人工修建而成,因此实验结果会与理论结果产生一定的误差。对于伪装板,陆基条件下的高光谱特性相对于绿地植被较为不同,由于在场景中伪装板的像素较少,因此其光谱受到噪声的影响较大,反射比曲线比较杂乱,在红外波段的反射比最大值出现在 50°。对于迷彩雨衣,其反射比曲线基本上随着太阳高度角的变化在整个波长范围内发生平移,其基本规律与迷彩伪装板类似,在 33°~50°之间,光谱反射比逐渐增大,随着

太阳高度角进一步增大, 光谱反射比反而减小, 导致迷彩雨衣和伪装板与绿地植被的最大反射比对应的太阳高度角不同的原因可能是人造伪装物的表面比较平整, 导致其光谱反射比在 50°附近达到最大。

2.1.2 探测器与光源方位角对光谱曲线的影响

为了研究探测器与光源的方位角对光谱曲线的影响, 在上午 9 点对伪装板和迷彩服以及绿地进行拍摄, 实验中, 保持 34°的探测角分别在 12°, 49°, 87°和 152°相对方位角分别对场景进行拍摄, 实验结果分别如图 4(a—d)所示。

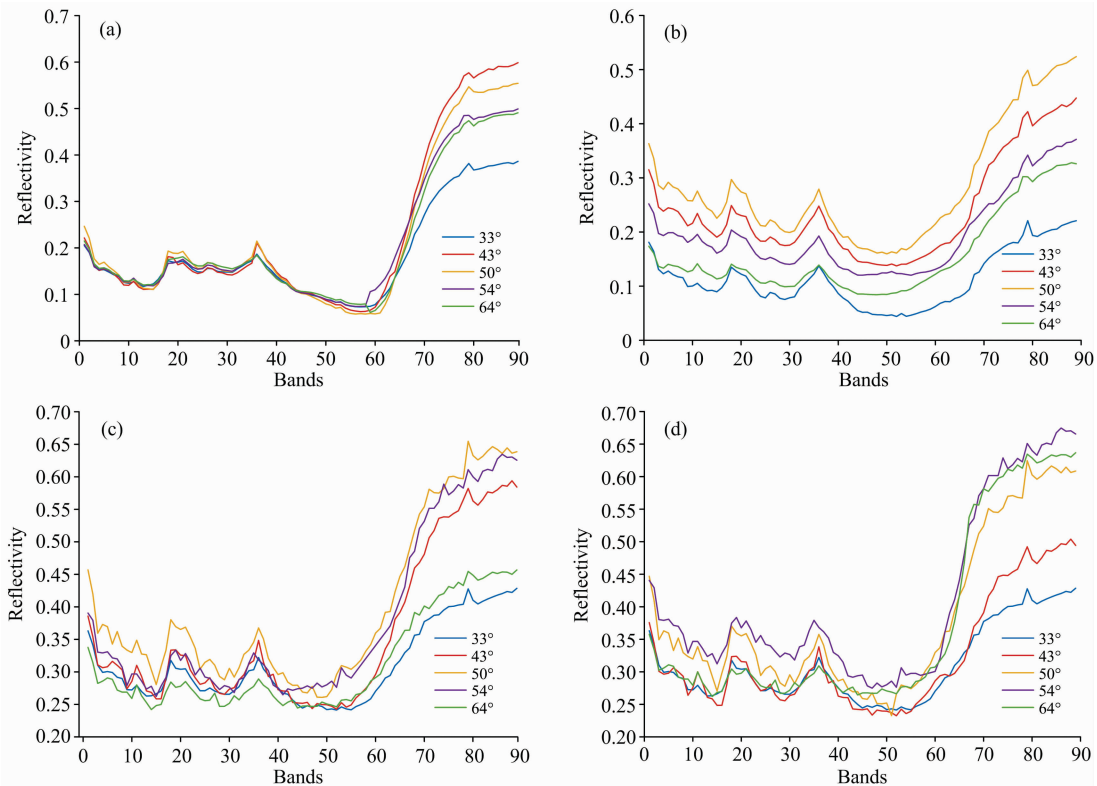


图 4 不同方位角下三种研究对象的光谱曲线

- (a): 绿地植被的光谱曲线;
- (b): 迷彩雨衣的光谱曲线;
- (c): 浅绿色伪装板的光谱曲线;
- (d): 深绿色伪装板的光谱曲线

Fig. 4 Spectral curves of three research objects under different azimuths

- (a): Spectral curves of green vegetation;
- (b): Spectral curves of camouflage rain coats;
- (c): Spectral curve of light green camouflage board;
- (d): Spectral curve of dark green camouflage board

实验结果可以看出, 四种研究对象光谱曲线随着方位角变化的基本规律相同, 在相对方位角从 12°到 157°的过程中, 研究对象光谱曲线都是先下降后上升, 在不同波长呈现的规律具有差异性, 如图 4(a)所示, 绿色植被的光谱曲线比较平滑, 在 449~601 nm 以及 701~801 nm 之间的光谱受方位角的影响较大, 601~701 nm 之间的光谱变化则比较小, 整体上呈现“两头翘, 中间平”的规律, 迷彩雨衣和迷彩伪装板的光谱则没有明显的规律, 如图 4(b,c)所示。三种研究对象的光谱随着方位角的增大光谱反射比曲线都是先增大后减小, 其光谱值在接近 90°左右达到最低值, 得出这样的结论是因为当探测光线和入射光线在同一平面内时, 以此平面为对称面, 理论上在对称面上, 探测天顶角等于入射天顶角时反射率最高, 由对称面两侧偏离探测角, 反射率随着方位角的增大呈现降低的趋势, 但过了 90°之后, 随着接近对称面, 反射率又进一步提高。实验中, 之所以 152°的光谱反射比比 12°时的反射比更大, 主要是因为后向观测时探测器收集的光线

较多, 同等条件下反射比要比前向观测更大。

2.1.3 探测角度对光谱曲线的影响

探测角同样也是影响地物光谱曲线的重要影响因素, 使用高光谱仪对浅色伪装板、迷彩雨衣以及绿地植被从后向 40°到正向 50°分别进行测量并记录光谱值, 在室内进行实验, 卤钨灯是填充气体内部具有部分卤族元素或者卤化物的充气白炽灯, 发出的光线在近红外和白光波段与太阳光光谱比较近似, 因此本实验使用卤钨灯模拟光谱进行实验, 光谱的入射天顶角为 40°, 分别从后向 40°到正向 50°之间每隔 10°对三种研究对象成像, 选取 449, 649, 725 和 801 nm 四个波段进行分析, 实验结果如图 5(a, b, c)所示。

从实验图中可以看出, 三种研究对象的光谱与不同探测角的关系呈现出相同的规律, 在白光和近红外波段中, 探测角对地物光谱的影响较小, 研究对象的光谱变化不是很明显, 但在实验中发现, 三种研究对象均在某个探测角度反射比出现极大值, 绿地植被在后向 30°时反射比达到最高, 伪

装板在后向 10°左右时反射比达到最高, 迷彩雨衣在后向 20°左右反射比达到最大, 其原因主要是三种材料的粗糙度从小到大顺序依次为伪装板、迷彩雨衣和绿地植被, 粗糙度越大, 探测角的“热点”就越靠近垂直方向, 并且伪装板与迷彩雨衣的光谱吸收率相对绿地植被要高, 这也造成了偏离垂直方向光谱反射比下降。

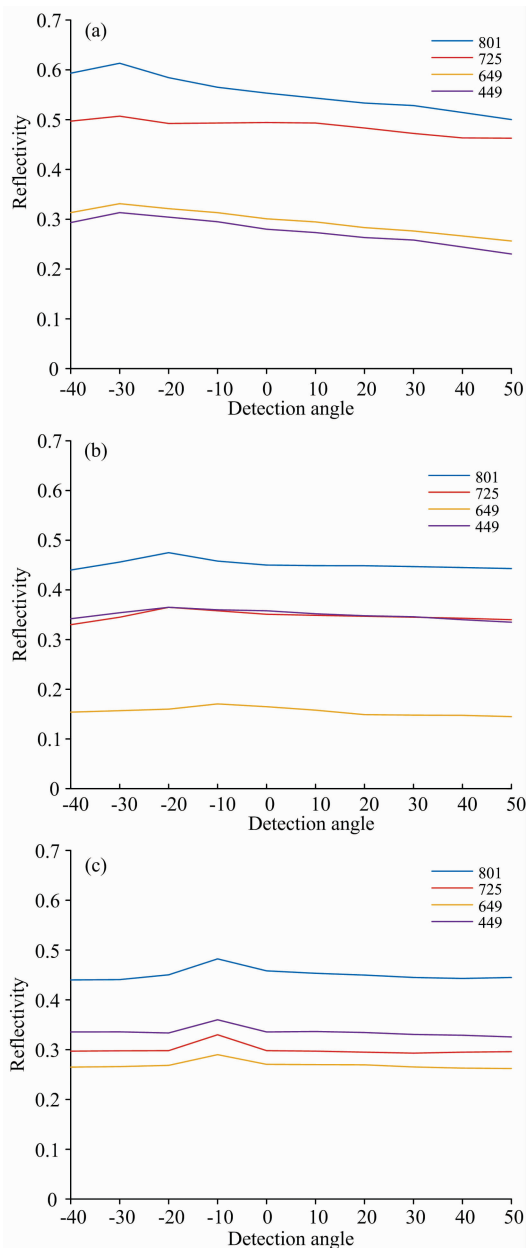


图 5 不同探测角下三种对象的光谱曲线

(a): 绿地植被的光谱曲线; (b): 浅色伪装板的光谱曲线;
(c): 迷彩雨衣的光谱曲线

Fig. 5 Spectral curves of three types of objects under different detection angles

(a): The spectral curve of green vegetation;
(b): The spectral curve of light camouflage board;
(c): The spectral curve of camouflage raincoat

2.2 BRDF 模型分析

为了深入分析典型绿地植被与伪装材料的反射特性, 使用采集到的多张影像分别计算 K_{vol} 和 K_{geo} 通过同一波段数据进行线性拟合求出 f_{iso} , f_{geo} 和 f_{vol} 三个系数的值, 通过分析不同材料的三种不同系数的值, 可以分析出不同材料在不同波长的反射特性。绿地植被与人造伪装材料最主要的区别就是绿地植被具有明显的红边效应, 因此主要分析近红外波段 (725~801 nm) 之间的地物反射特性, 两种材料的模型参数如图 6 所示。

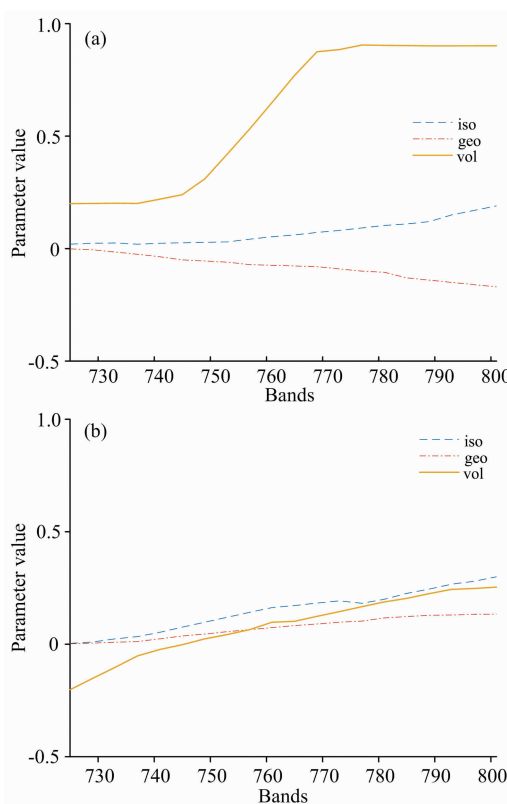


图 6 近红外波段绿地植被和迷彩伪装板的 BRDF 参数

(a): 绿地植被; (b): 迷彩伪装板

Fig. 6 BRDF parameters of greenbelt vegetation and camouflage board

(a): Green vegetation parameter value;

(b): Model Parameter values of camouflage board

从图中模型分析的结果可以看出, 在近红外波段, 两者的散射特性存在明显的差别。在近红外波段范围内, 伪装板和绿色植被的模型参数区别很大, 可以认为 f_{iso} 是当太阳天顶角为 0°时垂直观测的反射率。 f_{vol} 代表散射类型, 如果其值大于零则代表后向散射占主导, 反之则为前向散射为主, 随着波长增大, 绿地植被前向散射越来越强, 而伪装板在 725~760 nm 时都为后向散射占主导, 760~801 nm 时为前向散射占主导。

3 结论

挑选了绿地植被和三种人造伪装材料, 通过不同的实

验, 细致地分析了太阳高度角、方位角以及探测角对陆基条件下高光谱成像的影响。从实验结果中可以看出, 虽然三种材料的反射特性存在不同, 但在不同的太阳高度角、方位角以及探测角整体上呈现相同的规律。对于太阳高度角来说, 当探测角一定时, 陆基条件下的地物光谱一般随着太阳高度角的增大升高先升高再降低, 其中, 人造伪装物的光谱随着太阳高度角的变化整个光谱曲线都发生变化, 反射比曲线呈现出平移的规律, 而绿地植被在白光波段变化不是很明显, 在近红外波段的变化很明显, 随着太阳高度角的增大先升高

后减低; 对于方位角而言, 三种材料随着方位角的增大光谱反射一般先升高后降低, 同时后向观测时的光谱反射比一般比正向观测反射比高; 对于探测角进行的实验, 发现三种材料的光谱与探测角的关系并不是很大, 但三种材料在不同的探测角度上出现“热点”现象。对绿地植被和迷彩伪装板的 BRDF 参数进行了分析, 分析其 BRDF 模型的不同特点。研究结论可以作为下一步高光谱图像分类的新依据, 并为陆基条件下的高光谱图像分析奠定了基础。

References

- [1] ZHAO Chun-yan, WEI Wei, ZHANG Yan-nan, et al(赵春艳, 韦 玮, 张艳娜, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2019, 39(8).
- [2] YU Tan-qi, WEI Wei, ZHANG Yan-nan, et al(余谭其, 韦 玮, 张艳娜, 等). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2018, 47(6): 191.
- [3] Ma W, Liu Y, Liu Y. Optical Review, 2020, 27: 5965.
- [4] Liu Y, Yu K, Liu Z, et al. Infrared Phys. Technol. , 2018, 91: 78.
- [5] Keding Y, Yongsheng F, Xiaoning Y, et al. Comput. Digit. , 2018, 46: 644.
- [6] Li M Z, Zhao J G, Yang F. J. Equip. Acad. , 2016, 27: 116.

Study on the Spectral Characteristics of Ground Objects in Land-Based Hyperspectral Imaging

ZHOU Bing, LI Bing-xuan*, HE Xuan, LIU He-xiong, WANG Fa-zhen

Electronic and Optical Engineering Department, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050000, China

Abstract In recent years, the military equipment used for reconnaissance has achieved high precision levels. The high-tech reconnaissance methods can often perform precise strikes on targets, greatly reducing victory in war. Two commonly used methods for acquiring hyperspectral data are hyperspectral satellite remote sensing and high-altitude aerial technology. These two imaging methods have the same reconnaissance time. The direction of light source is basically the same. Because the hyperspectral equipment is basically perpendicular to the ground, the reflected light direction usually keeps unchanged, the BRDF coefficient of the ground features is basically relatively fixed. In army application, the reconnaissance time is random, the incident angle of the sun changes all the time, and the reconnaissance direction is arbitrary, the hyperspectral position is on the ground or near the ground, the detection direction changes endlessly. The spectral curves under different conditions are greatly affected by the BRDF coefficient of the object surface. This paper analyzes the influence of the sun's altitude, azimuth and the detection angle on the camouflage and green vegetation spectrum under land-based conditions. The results show that although the reflection characteristics of the three materials are different, they present similar laws at different solar altitude angles, azimuth angles and detection angles. When the detection angle is constant for the solar altitude angle, the reflectance curves of the artificial camouflage and the green vegetation first increase and then decrease with the increase of the solar altitude angle. The green vegetation changes more obviously in the near-infrared band; for the azimuth, as the azimuth angle increases, the spectral reflectance of the three materials generally increases first and then decreases. At the same time, the reflectance during backward observation is generally larger than forwarding observation; for the detection angle, the relationship between the spectral reflectance of the material and the detection angle is not very obvious, but the three materials all have “hot spots” at different detection angles. Finally, this paper analyzes the BRDF model parameters of greenbelt vegetation and camouflage panels and obtains their reflection laws in different directions.

Keywords Hyperspectral imaging; Reflectance; Land-based; Camouflage

* Corresponding author

(Received Jul. 29, 2020; accepted Nov. 5, 2020)