

偏振遥感成像探测技术及其 在目标毁伤效果评估中的应用研究

王先兵^{1,2}, 乔延利¹, 杨世植¹, 周全³

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽合肥 230031;

2. 安徽省军区司令部, 安徽合肥 230001; 3. 中国人民解放军炮兵学院 一系, 安徽合肥 230031)

摘 要: 在未来高技术战争中, 战场目标毁伤效果评估具有十分重要的作用。基于目标偏振遥感成像探测原理, 介绍了一种能够获取地物目标偏振图像信息的机载多波段偏振遥感成像探测系统; 通过对地面炮兵火力毁伤实验相关数据的对比分析, 探讨了偏振遥感图像信息在反演目标表面毁伤状态方面的能力; 实验结果表明: 偏振遥感成像探测技术在目标毁伤效果评估中具有广阔的应用前景。

关 键 词: 偏振; 遥感; 毁伤效果; 评估

中图分类号: TP 79

文献标识码: A

文章编号: 1673-0127(2007)05-0076-05

Study on the Application of Polarization Remote Sensing Detection Technology to Target Damage Effect Assessment

WANG Xianbing^{1,2}, QIAO Yanli¹, YANG Shizhi¹, ZHOU Quan³

(1. Anhui Institute of Optical and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei Anhui 230031, China;

2. The Headquarters of Anhui Military Area, Hefei Anhui 230001, China;

3. First Department, Artillery Academy, Hefei Anhui 230031, China)

Abstract: In the future high-tech war, battlefield target damage effect assessment has very important function. On the basis of presenting the theories of polarization remote sensing detection, a new airborne multi-band polarization remote sensing imaging system which could collect the polarization image of objects is introduced. Through comparing and analyzing the datum of the artillery firepower injuring tests, the ability to using polarization remote sensing image to retrieve the status of the object surface damage is discussed. Experimental results have shown that polarization remote sensing detection technology plays an important role in the target damage assessment.

Key words: polarization; remote sensing; damage effect; assessment

战场目标毁伤效果评估是对火力打击后目标毁伤情况的科学评价, 是后续作战行动决策的重要依据。在未来的高技术作战条件下, 及时准确

地进行战场目标毁伤效果评估, 不仅可为战役指挥员了解掌握战役火力毁伤任务的完成情况, 适时调整火力计划和火力打击重点, 实施正确的决

收稿日期: 2006-03-24

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2001AA131040)

作者简介: 王先兵, 男, 博士研究生, 主要研究方向: 偏振遥感. wangxb121@tom.com.

乔延利, 男, 研究员, 博士生导师.

策指挥提供科学依据,而且能够最大限度地优化火力,提高战役资源的利用效率。随着无人侦察机、战场毁伤效果侦察评估系统等先进侦察手段的不断发展,利用光学遥感成像技术进行战场目标毁伤效果的侦察与评估是解决我远程炮兵等战役火力打击效果实时评估的有效途径。偏振遥感成像侦察技术作为一种先进的光学遥感技术,与传统的基于目标反射光强度信息的侦察技术相比,在战场侦察和目标毁伤效果评估领域具有独特的优势:① 可同时获取地面目标的偏振态和辐射强度 2 种信息^[1];② 能敏锐地探测到由目标的表面粗糙度、边缘和纹理等属性特征引起的偏振态的变化^[2-3];③ 能探测到一些反射率较低的暗目标和处于其他物体阴影下的目标^[4-5];④ 能揭露一些传统的防光学侦察的伪装目标^[6-8]。本文基于一种能够同时获取地物目标强度信息和偏振信息的机载多波段偏振遥感成像探测系统,通过地面火力毁伤试验和相关数据对比分析,探讨了偏振遥感成像探测技术在战场侦察和目标毁伤效果评估中的应用前景。

1 偏振遥感探测机理

太阳辐射在与地物目标和大气背景的相互作用过程中,不仅其辐射强度和传播方向发生变化,且相位角和偏振面也发生变化。地物目标反射辐射的偏振态变化是与其表面状态和固有属性密切相关,不同类型的地物目标具有不同的偏振特性差异。地物目标反射辐射的偏振态变化信息能够反演出不同地物目标的表面状态和属性特征,光学偏振遥感技术正是基于这一原理进行探测的。

在偏振遥感探测中,通常采用 Stokes 矢量 $[I, Q, U, V]^T$ 来描述某一给定波长的太阳辐射经与地物目标相互作用后的反射辐射偏振态信息。其中, I 表示反射辐射的总强度, Q 代表 0° 与 90° 方向上的线偏振光分量差值, U 表示 45° 与 135° 方向上的线偏振光分量差值, V 表示圆偏振光分量。但是,由于绝大部分地物目标的圆偏振光分量在仪器可以检测到的范围内可忽略,所以在偏振遥感中通常不测量 Stokes 矢量的圆偏振光分量 V ^[9]。

理论研究表明:任一 xy 平面内,在与 x 轴的夹角为 α 的方向上进行观测所得到的线偏振光强度为

$$I(\alpha) = \frac{1}{2}(I + Q\cos 2\alpha + U\sin 2\alpha) \quad (1)$$

通常,只要同时测出 3 个不同方向线偏振光的强度 $I(\alpha_i)$,就可联立方程组求解出 Stokes 矢量的前 3 个参数 I, Q, U 的值。如果取 α_i 等于 $0^\circ, 60^\circ$ 和 120° 3 个观测方向,得到的联立方程组为

$$\begin{cases} I = \frac{2}{3}(I(0^\circ) + I(60^\circ) + I(120^\circ)) \\ Q = \frac{1}{2}(I(0^\circ) - I(60^\circ) - I(120^\circ)) \\ U = \frac{1}{2}(I(60^\circ) - I(120^\circ)) \end{cases} \quad (2)$$

由此,可以按方程(3)求解出地物目标反射出的偏振光的偏振度 P 和偏振角 θ 。

$$\begin{cases} P = \sqrt{Q^2 + U^2} / I \\ \theta = \frac{1}{2} \arctan(U/Q) \end{cases} \quad (3)$$

式中: P 的取值范围为 $0 \sim 1$, θ 的取值为 $-\pi/2 \sim \pi/2$ 。在偏振遥感探测中,通常用偏振度和偏振角的大小来分别表示获取的偏振度图像和偏振角图像中不同地物目标对应的像元值,以表征不同地物目标的表面状态和属性特征。

2 地物目标偏振遥感图像信息获取

在偏振遥感成像探测技术研究的基础上,我们成功研制出一种机载多波段偏振 CCD 相机原理样机,它可以同时获取地物目标的多波段光谱图像信息和偏振图像信息。这种偏振遥感成像探测系统主要由光学系统、滤光片轮、CCD 面阵探测器、图像采集卡实时数据记录和一些辅助分系统组成^[10-11],如图 1 所示。该系统具有如下特点:① 对地物目标的偏振探测能力。② 可见光和近红外光谱的多波段可调能力。③ CCD 相机的高空间分辨能力。在进行偏振遥感成像探测时,该系统首先通过 3 路平行光学系统在 3 个偏振方向(即 $0^\circ, 60^\circ$ 和 120°) 上对地物目标进行同时观测,获取某时刻地物目标在 3 个偏振方向上强度图像信息,即对应于公式(1)中 $\alpha = 0^\circ, 60^\circ$ 和 120° 时目标反射光强度的测量值 $I(0^\circ), I(60^\circ)$ 和 $I(120^\circ)$;其次是对 3 个偏振方向分别获取的地物目标图像数据进行几何校正和辐射定标处理,获得目标偏振态信息的归一化数据;再次是运用基于小波变换的遥感图像配准算法,对同一景物在 3 个偏振方向上的 3 幅图像进行几何配准;最后将经过几何配准和归一化的偏振测量数据 $I(0^\circ), I(60^\circ)$ 和 $I(120^\circ)$ 分别代入公式(2),可联立求解出 Stokes

参量 I, Q, U , 并经数据解析处理得到地物目标的 强度、偏振度和偏振角图像信息。

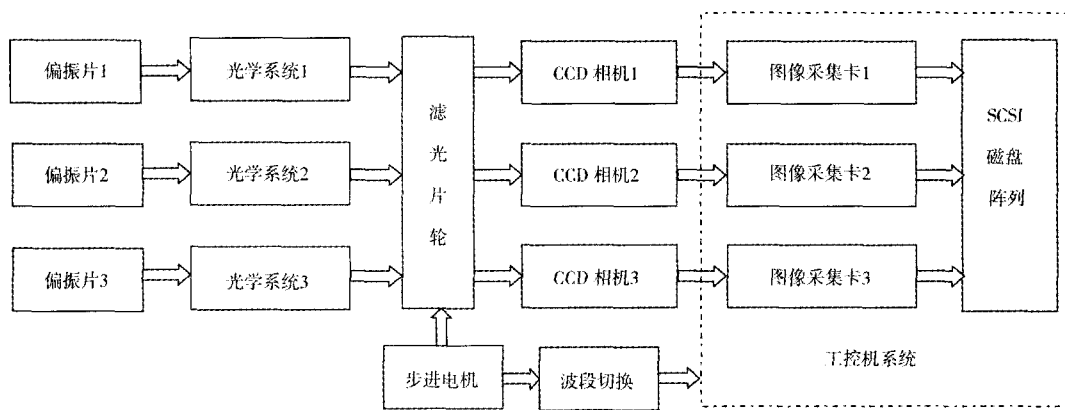


图1 机载多波段偏振 CCD 相机系统原理结构框图

3 实验和结果分析

为验证机载多波段偏振遥感成像探测系统在获取能够反演目标毁伤状态偏振信息方面的能力,检验其在炸点检测及目标毁伤效果评估方面的作用,在某军用靶场进行了地面炮兵实弹射击炸点分布偏振遥感成像探测试验。目标区域是建有少量野战工事的沙质地小山坡,用于模拟敌野战化防御阵地,上面预先铺设有一块白色靶标,用

来标识射击目标。试验时气象条件为晴有少云,并有薄雾。在炮兵部队对地面目标进行实弹射击的同时,利用机载多波段偏振 CCD 相机,对炮兵火力打击的目标区域进行实时观测,获取炮兵火力打击前后的目标区域 3 个偏振方向的强度图像数据,经过几何校正、辐射定标、归一化图像处理和偏振光分量求解运算,可得目标区域偏振图像数据。

炮兵对野战阵地进行火力打击的炸点分布检测试验结果如图 2 所示。

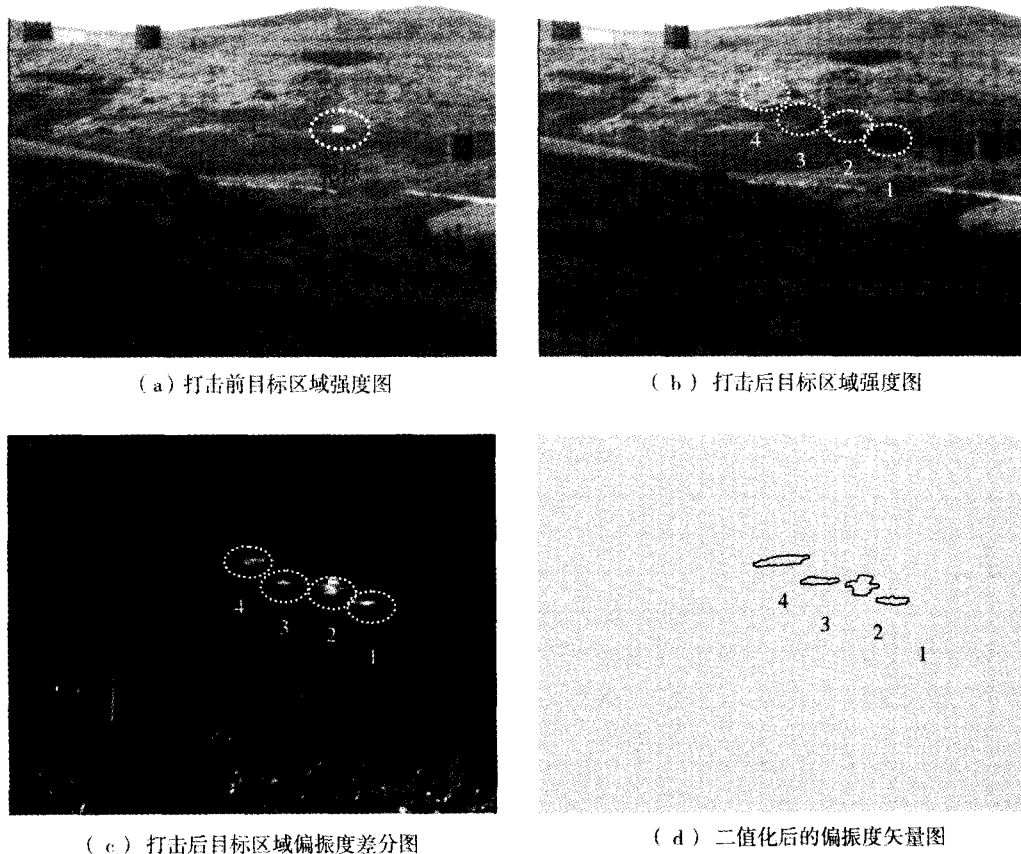


图2 炮兵火力打击前后目标区域的强度图和偏振图

图 2 中给出了火力打击前后用机载多波段偏振 CCD 相机获取的目标区域某一波段的强度图像和偏振图像。其中,图 2(a)和图 2(b)分别是炮兵火力打击前的目标区域强度图像和打击后的目标区域强度图像,图 2(c)是火力打击后目标区域的偏振度差分图像,图 2(d)是对偏振度差分图像采用单阈值分割法作二值化处理后转化成的偏振度矢量图像。

比较图 2(a)和图 2(b)可以看出:除 1 号弹坑外,其他 3 个弹坑的具体位置是很难从图 2(b)中发现的,尤其是当弹坑区域的灰度值与其背景的灰度值对比度比较小时,就更难以从复杂的环境背景中检测出弹坑的具体位置,如图 2(b)中的 3 号

弹坑。而在偏振差分图像上弹坑与环境背景的平均偏振度对比度非常大,使得 4 个弹坑的具体位置和区域大小非常明显地显示在图 2(c)中。为了定量描述炮兵火力打击后目标区域的强度图像和偏振差分图像中弹坑(炸点)与环境背景的对比度,在表 1 中给出了图 2(b)和图 2(c)中的弹坑与环境背景的平均灰度值和平均偏振度值及它们之间的对比度。目标与背景的对比度定义为

$$C = \left| \frac{D_T - D_B}{D_T + D_B} \right| \quad (4)$$

式中: D_T 和 D_B 分别表示弹坑目标和背景的平均灰度值或平均偏振度值。

表 1 弹坑与背景的灰度和偏振度及其对比度

目标与背景	灰度值	对比度	偏振度	对比度
1 号弹坑	127.9		224.3	
沙土背景 1	144.1	0.060	4.8	0.801
草地背景 1	161.1	0.115	18.7	0.846
2 号弹坑	120.2		235.5	
沙土背景 2	154.9	0.126	22.6	0.825
草地背景 2	177.8	0.193	18.1	0.857
3 号弹坑	140.6		197.4	
沙土背景 3	157.4	0.564	23.6	0.786
草地背景 3	175.7	0.111	17.9	0.834
4 号弹坑	132.6		215.0	
沙土背景 4	159.5	0.921	22.3	0.812
草地背景 4	200.4	0.204	14.8	0.871

从表 1 中可以看出,弹坑与草地或沙土背景的偏振度对比度都明显大于它们的灰度对比度,其提高的幅度都达到 60% 以上。这是由于弹坑底部与沙土或草地背景的光谱反射率比较接近,并且弹坑底部与沙土背景表面都是质地相同的土壤,它们的光谱反射率基本相同,造成弹坑与背景在强度图像上的灰度值差值相差不大,因而难以从背景中辨别出弹坑。而在偏振图像上由于弹坑位置的表面粗糙度、松结度和表面取向等表面结构参数发生了一定程度的改变,使得其反射光的偏振态发生较大变化,与周围背景反射光谱的偏振态有较大差异。所以,弹坑与背景的偏振度对比度相对于其灰度对比度有显著提高,使得我们能够从偏振图像中很容易地从背景中检测出目标的变化部分,即弹坑的具体位置和区域大小。

总的看来,对于野战阵地这种特殊的目标与背景而言,目标偏振特性的变化是由它们的表面

状态和土壤含水量等发生变化引起的。偏振遥感探测技术提高了偏振图像中目标与背景的对比度,使得弹坑更易于从背景区分出来,从而能够检测出弹坑的具体位置和区域大小。此外,在地面火力毁伤试验中,还对沙石路等其他一些目标进行了毁伤效果偏振遥感成像探测实验。

试验结果表明:与目标纹理和表面状态密切相关的偏振遥感信息,能够作为战场侦察和评估火力打击后目标毁伤情况的重要依据。在战场目标毁伤效果评估方面,偏振遥感成像探测技术比传统的光学遥感成像探测技术更具优势,主要是由于后者是基于目标反射光的强度信息来反演目标的表面状态,对于同一种材料组成的目标,其表面状态的微小变化在其强度图像上引起的变化较小,难以采用普通算法来挖掘强度图像上目标区域的变化信息。而前者主要是利用火力打击前后目标在 3 个偏振方向上的辐射量差异来获取目标

的偏振态变化信息,这意味着偏振遥感成像探测技术增强了对目标变化部分探测的灵敏度,使得我们能够利用目标的偏振遥感信息反演出目标表面状态的变化,从而进一步评估出目标的毁伤效果。

4 结 论

研究表明,地物目标的偏振特性与其表面状态密切相关,战场目标毁伤的重要特征之一就是目标表面状态的变化,基于目标光谱偏振信息的偏振遥感成像探测技术能探测到目标表面状态的细微变化,使其在战场毁伤效果评估方面具有极大的应用潜力。随着无人机遥感平台和装载于无人机的一体化光谱偏振侦察装备的不断发展,偏振遥感成像探测技术将在打击效果评估、伪装目标识别等军事侦察应用领域发挥其独特的优势,为战场毁伤效果评估提供一种有效的技术手段。

参考文献 (References)

- [1] 曹汉军,乔延利,杨伟锋,等. 偏振遥感图像特性表征及分析[J]. 量子电子学报,2002,19(4):373-378.
- [2] 孙晓兵,乔延利,洪 津,等. 人工目标偏振特征实验研究[J]. 高技术通讯,2003,13(8):23-27.
- [3] 孙晓兵,洪 津,乔延利. 一种基于偏振角参数图像的特征提取方法研究[J]. 遥感技术与应用,2005,20(2):256-260.
- [4] DUGGIN M J, EGAN W G, GREGORY J. Measurements of polarization of targets of differing albedo and shadow depth[J]. SPIE,1999(3699):212-217.
- [5] DUGGIN M J, LOE R. Algorithms for target discrimination and contrast enhancement using narrowband polarimetric image data[J]. SPIE, 2001(4481):247-256.
- [6] FORSELL G, KARLSSON E V. Measurements of polarization properties of camouflaged objects and of the denial of surfaces covered with cenospheres[J]. SPIE, 2003(5075):246-258.
- [7] EGAN W G. Detection of vehicles and personnel using polarization[J]. SPIE,2000(4113):233-237.
- [8] 孙晓兵. 伪装目标及相关材料的多波段偏振特征研究[D]. 合肥:中科院安徽光学精密机械研究所,2005:103-123.
- [9] 乔延利,杨世植,罗睿智,等. 对地遥感中的光谱偏振探测方法研究[J]. 高技术通讯,2001,11(7):36-39.
- [10] 罗睿智,乔延利,曹汉军,等. 航空型多波段偏振遥感探测及其光学系统的研究与设计[J]. 量子电子学报,2002,19(4):143-148.
- [11] 宋志平,洪 津,乔延利. 机载多波段偏振 CCD 相机原理样机的电子学系统设计研究[J]. 光电子技术与信息,2002,15(4):11-14.

(责任编辑:孙陆青)