

文章编号:1001-5078(2007)12-1237-04

偏振遥感的研究现状及发展趋势

张朝阳,程海峰,陈朝辉,郑文伟

(国防科技大学航天与材料工程学院新型陶瓷纤维及复合材料重点实验室,湖南 长沙 410073)

摘要:偏振遥感以目标辐射能量的偏振特征作为探测信息,能够很好地分辨目标上低反射区域和目标轮廓,在复杂的背景中提取目标的三维信息,解决传统遥感所不能解决的大气探测和伪装识别方面的问题。本文介绍了偏振遥感的基本原理,详细阐述了偏振遥感仪器、数据处理的国内外研究现状,并指出了偏振遥感的未来发展趋势。

关键词:偏振遥感;Stokes 矢量;偏振度;偏振角

中图分类号:0436.3 **文献标识码:**A

The Present Research and Developing Trend of Polarization Remote Sensing

ZHANG Chao-yang, CHENG Hai-feng, CHEN Zhao-hui, ZHENG Wen-wei

(Key Lab of Advanced Ceramic Fibers and Composites, School of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Polarimetric characteristics are used in polarization remote sensing as detective information. It is able to detect the low reflective parts and outline of targets. Polarization remote sensing can also get the three-dimensional information of targets in complicated backgrounds, solve the problem of atmosphere and camouflage detection. The rationale of polarization remote sensing is introduced. The present research of equipments of polarization remote sensing and polarimetric characteristics of targets are particularly expatiated. The development of polarization remote sensing in the future is also pointed out in the paper.

Key words: polarization remote sensing; Stokes vector; polarization degree; polarization angle

1 引言

偏振遥感是一种新型的侦察手段,既能提供辐射强度数据,又能得到偏振信息,克服了传统遥感的不足。传统遥感依据辐射强度得到目标的二维信息,而偏振遥感可以获得三维信息,真正实现目标空间三维结构的反演。

2 偏振遥感的侦察原理

偏振遥感中常用 Stokes 矢量法表示光的偏振态。Stokes 矢量可用光强度表示,能够直接测量,定义如下:

$$S = \begin{pmatrix} I = \langle E_x^2(t) \rangle + \langle E_y^2(t) \rangle \\ Q = \langle E_x^2(t) \rangle - \langle E_y^2(t) \rangle \\ U = 2 \langle E_x(t) \rangle \langle E_y(t) \rangle \cos[\delta_y(t) - \delta_x(t)] \\ V = 2 \langle E_x(t) \rangle \langle E_y(t) \rangle \sin[\delta_y(t) - \delta_x(t)] \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, $E_x(t)$, $E_y(t)$, $\delta_x(t)$, $\delta_y(t)$ 分别表示在 x, y 方向上电场的振幅和相位; $\langle E \rangle$ 的含义是求电场强

作者简介:张朝阳(1980-),男,现为国防科技大学航天与材料工程学院在读博士生,主要从事偏振遥感和伪装隐身技术的研究。
E-mail: zhangcy_nudt@163.com
收稿日期:2007-07-03;修订日期:2007-08-17

度的时间平均值^[1]。通过 Stokes 矢量可以定义偏振度 P 和偏振角 θ :

$$P = \frac{(Q^2 + U^2 + V^2)^{1/2}}{I} \quad (2)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right)$$

偏振测量系统一般都包括相位延迟器和线偏振器两种基本元件,根据不同方向光的强度值,就可以求出目标表面反射光的 Stokes 矢量,从而反演出介质的表面状态和物理、化学性质,这是偏振遥感的理论基础^[2]。

3 偏振遥感的研究现状

目前,国内外关于偏振遥感的研究主要集中在三个方面:偏振遥感仪器、目标偏振特征和偏振信息处理。

3.1 偏振遥感仪器研究

仪器的研究是偏振遥感的基础。目前,国内外各科研机构根据需要研制了不同类型的仪器,早期的仪器是通过偏振片和 $1/4$ 波片的组合来实现的,缺点是需要机械传动装置,效率和精度比较低。后来运用光栅或液晶结构进行了改进。总体来看,偏振遥感仪器的发展还不成熟,需要进一步研究改善。

美国的 EOSP 和法国的 POLDER 是进行大气研究的代表仪器。EOSP 的 12 个探测通道全部具有偏振分析功能,可提供气溶胶分布和云层的状态等特性;而 POLDER 有 3 个偏振探测通道,用以测量全球海洋水色、云和气溶胶等信息^[3]。

美国哥伦比亚大学研制了水下偏振测量系统,研究结果证实圆偏振光的记忆效应能够极大地提高图像的对比度,该仪器采用 633nm 激光光源,光斑直径 2cm,利用一个 CCD 相机接收散射光,通过一个可调节的波片和偏振片来控制偏振光的状态,如图 1 所示。

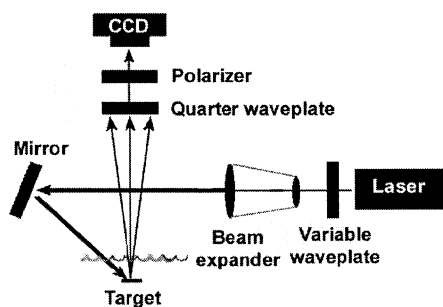


图1 实验装置示意图

Fig.1 schematic diagram of the experimental setup^[4]

以色列的研究人员指出了偏振仪器中利用机械传动装置控制偏振片的缺点,测试了可以提高转换速度的液晶偏振片,取得了较好地效果^[5]。美国西北大学利用光栅和分光系统代替偏振片,研制了一种全息偏振计,如图 2 所示^[6-7],可以有效提高测试效率和精度。

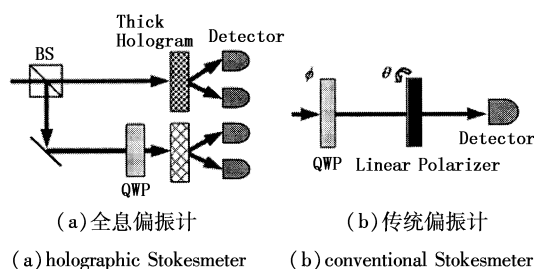


图2 偏振测量装置示意图

Fig.2 polarization schematic setup

中科院安徽光机所研制了机载多波段偏振 CCD 相机的样机,采用的是旋转偏振片和滤光片结构。通过测试三个不同方向上的光强度,计算 Stokes 矢量中的 I, Q, U 三个参数。该偏振遥感系统采用三个科学级 CCD 相机分别输出三个偏振方向的图像数据,通过步进电机带动滤光片旋转进行波段切换^[8],这要求三个相机的视场要精确控制在同一个目标上。当然,也可以采用单个相机,利用旋转偏振片的方式进行数据采集,这就要求精确控制偏振片的旋转角度。

中科院技术物理所研制了六通道可见红外偏振计,该仪器增加了圆偏振测量功能,可得到全偏振参数。六个通道各有独立的光学系统,视场角 1° ,能同时对一个目标进行观测。光谱通道范围是 $0.67 \sim 2.15 \mu\text{m}$,波段宽度 $0.03 \sim 0.12 \mu\text{m}$ ^[9]。

3.2 目标偏振特征研究

目标偏振特征受到诸多因素的影响,相同辐射强度的被测物体可能有不同的偏振状态^[10]。因此,目标偏振特征的研究对偏振遥感数据的反演具有重要意义。

3.2.1 大气探测与资源调查

偏振探测大气可以得到云层的分布、种类及气溶胶粒子的尺寸等参数,弥补了传统遥感在大气探测中的不足。W. G. Egan 等人对大西洋上空的浮尘进行了偏振测量,得出了浮尘的复折射系数和密度^[11]。

偏振信息与地物表面状态密切相关。科研人员研究了植被和土壤等不同背景的偏振反射特征,指

出树叶的偏振反射数据包含了表面和内部的结构信息,而且与树叶中的水分含量相关^[12];在热红外波段植被和土壤背景的偏振度很小,而人工目标的偏振度普遍较大^[13],在偏振图像中可以清楚地识别出来。美国海军对不同反射率的粗糙表面作了偏振测量,发现低反射率表面的偏振度更高^[14]。另外,偏振度还是湿度的敏感指示器^[15],湿度增大或电导率较高时,材料表面散射时将产生圆偏振分量,具有双折射性质的材料也能产生圆偏振。

3.2.2 海洋与船舶监测

偏振遥感也被用在海洋探测方面,偏振遥感对于水面状态信息有较强的纠偏能力,一定程度上克服了传统遥感的缺陷。已有的研究表明,海水状态、海浪的高低以及海面风速的大小等都会在辐射的偏振信息中反映出来,偏振遥感技术还可以估测船舶航行参数,为海面指挥监控作参考。

偏振探测对于水下目标成像具有独特的优势。加拿大和法国的科研人员利用偏振激光雷达研究了水下消偏振因素和散射体之间的关系^[16-17],结果表明沙子具有强烈的消偏振效应,但是对于很薄的覆盖层,偏振遥感能够确定被覆盖目标的位置。金属目标生锈使消偏振能力迅速增加,这在水下探测中是个很有用的特征。美国 Columbia 大学通过研究发现水下偏振信息受传播介质的影响很大,在低散射介质中圆偏振光有很好的成像效果,但是在高散射介质中变差^[4]。

3.2.3 军事目标识别

偏振遥感在军事目标识别方面有着广阔的应用前景,可以辨别出常规遥感手段所无法识别的伪装目标,热红外偏振遥感还可以利用导弹发射过程中的烟雾和尾焰对导弹进行追踪。

美国空军研究室对涂覆了军用油漆的铝板作了偏振检测,发现目标偏振度与表面反射率成正比,与入射角度成正比^[18]。中国科技大学^[19]研究了草丛中的迷彩伪装涂层,发现利用偏振角度图像可以抑制背景影响,把迷彩涂层区分出来。Thales 实验研究中心根据 Kubelka-Munk 理论建立了模型描述涂料的散射特性,模型同时把面散射和体散射考虑进来,利用表面参数如粗糙度、反射率、散射系数得出涂料消偏振效应的预测模型,实验验证模型和实测结果符合得很好^[20]。

偏振遥感的实验研究表明在热红外波段利用

偏振成像可以有效地抑制背景影响提高目标探测效率^[21-22]。纽约大学对飞机以及军事伪装车辆进行偏振特性研究^[23-24],结果显示偏振度受波长影响很小,受探测方位角影响很大;自然背景如沙滩和林地的偏振度较低,相比之下偏振度较大的军事目标在偏振图像中非常明显^[25]。美国陆军利用自主研发的偏振成像仪采集了野外数据,实验发现植被因为随机分布没有偏振散射的取向性,而人造目标却显示出比较一致的偏振取向,可以用偏振角度图像有效地识别^[26]。偏振遥感在军事上的应用方兴未艾,目前已经在许多方面显示出独特优势。许多科研机构进行大量投入来研究目标和背景偏振特征,为偏振遥感的实际应用做准备。

3.3 偏振遥感数据处理

偏振遥感测量所得的 Stokes 参数和偏振度、偏振角信息可以直接用来成像,或者经过不同的信息提取算法处理后成像;也可以利用一定的算法将多个参数合成一幅图像^[27],合成后的图像包含多个信息,融合了各个参数成像的优点,可以减小图像的背景噪声,提高偏振图像的分辨能力^[28]。

美国格里菲斯空军基地通过强度和偏振数据来合成图像,显著改善热成像系统的探测性能和识别功能。图像通过一个光线追踪电脑软件 (FLIR) 来计算表面热红外辐射的偏振特性,生成合成图像,建立了新的目标边缘探测、分割和识别算法。结果证明对于大范围的观测高度和探测角度,运用强度和偏振数据合成的算法比单一强度数据的算法有了显著改善,如图 3 所示^[29]。

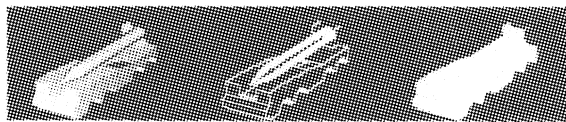


图3 FLIR 合成图像(左)、图像的真实边缘(中)、辐射强度图像(右)

Fig.3 image of target by FLIR(left), images of the true edges(middle), images of radiant intensity(right)

4 偏振遥感的发展趋势

偏振遥感作为新型的侦察手段,在目标识别和信息提取方面有着传统遥感手段所不具备的优势,具有广阔的发展前景。国外在这方面做了大量的实验研究,包括目标偏振散射特征研究、偏振信息处理和特征提取、偏振遥感仪器的研制等。目前研究方向主要集中在两个方面,其一是研制更高分辨率、更

高精度、更高信噪比且工作稳定的偏振仪器,为偏振遥感做好硬件准备;其二是在更广泛的测试条件下研究不同目标的偏振特性,对其进行分析并最终了解偏振特征随不同影响因素的变化规律。做好偏振遥感的软件基础^[2]。但由于目标偏振特性和二向散射分布的复杂性,关于目标散射光偏振特征的研究的工作量将会非常巨大。在实验研究的同时,还需要在理论模拟上有所突破,为偏振遥感的实际应用做指导。

参考文献:

- [1] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 22 - 23.
- [2] 杨之文. 地面物体偏振光谱的获取及分析[J]. 红外, 2004, 4: 1 - 9.
- [3] 孙晓兵, 乔延利, 等. 人工目标偏振特性实验研究[J]. 高技术通讯, 2003, 8: 23 - 27.
- [4] R Nothdurft, G Yao. Applying the polarization memory effect in polarization-gated subsurface imaging[J]. Optics Express, 2006, 14(11): 4656 - 4661.
- [5] E Namer, Y Y Schechner. Advanced visibility improvement based on polarization filtered images[J]. Proc. SPIE-5888, 2005: 1 - 10.
- [6] J K Lee, J T Shen, A Heifetz, et al. Demonstration of a thick holographic Stokesmeter[J]. Optics Communications, 2006, (259): 484 - 487.
- [7] M S Shahriar, J T Shen, M A Hall, et al. Highly polarization-sensitive thick gratings for a holographic Stokesmeter[J]. Optics Communications, 2005, 245: 67 - 73.
- [8] 杨之文, 高胜钢, 王培刚. 几种地物反射光的偏振特性[J]. 光学学报, 2005, 25(2): 241 - 245.
- [9] F Cremer, W D Jong, K Schutter. Infrared polarization measurements of surface and buried anti-personnel landmines[C]//Abinask C, Dubey Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VI. USA: SPIE - 4394[C]. 2001, 164 - 175.
- [10] L B Wolff. Applications of polarization camera technology[J]. IEEE, 1994, 10(5): 30 - 38.
- [11] W G Egan, Q Liu. Polarized MODTEAN 3. 7 applied to characterization of ocean color in the presence of aerosols[J]. Proc. SPIE - 4481, 2002: 228 - 241.
- [12] V C Vanderbilt, L Grant. Polarization of light scattered by vegetation[J]. Proc. IEEE - 73, 1985: 1012 - 1024.
- [13] B Ben-Dor. Polarization properties of targets and backgrounds in the infrared[J]. Proc. SPIE - 1971, 1992: 68 - 76.
- [14] R G Priest, S R Meier. Polarimetric microfacet scattering theory with applications to absorptive and reflective surfaces[J]. Opt. Eng. 2002, 41(5): 988 - 993.
- [15] 曹汉军, 乔延利, 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.
- [16] A Weidemann, G R Fournier, L Forand, et al. In Harbor underwater threat detection/identification using active imaging. Photonics for Port and Harbor Security[J]. Proc. SPIE - 5780, 2005: 59 - 70.
- [17] G L Brun, B L Jeune, J Cariou, et al. Analysis of polarization signature of immersed targets[J]. Polarization and Remote Sensing. SPIE - 1747, 1992: 128 - 139.
- [18] D H Goldstein. Polarimetric characterization of federal standard paints[J]. Proc. SPIE - 4133, 2000: 112 - 123.
- [19] 孙伟, 刘政凯. 利用偏振技术识别人造目标[J]. 光学技术, 2004, 30(3): 267 - 269.
- [20] L L Hors, P Hartemann, D Dolfi, et al. A phenomenological model of paints for multispectral polarimetric imaging[J]. Proc SPIE - 4370, 2001: 94 - 105.
- [21] G Forssell, E H Karlsson. Measurements of polarization properties of camouflaged objects and of the denial of surfaces covered with cenospheres[J]. SPIE - 5075, 2003: 246 - 258.
- [22] Y Aron, Y Gronau. Polarization in the LWIR[J]. Proc. SPIE - 5783, 2005: 653 - 661.
- [23] W G Egan, M J Duggin. Optical enhancement of aircraft detection using polarization[J]. Proc. SPIE - 4133, 2000: 172 - 178.
- [24] W G Egan, M J Duggin. Synthesis of optical polarization signatures of military aircraft[J]. Proc. SPIE - 4481, 2002: 188 - 194.
- [25] W G Egan. Detection of vehicles and personnel using polarization[J]. Proc. SPIE - 4133, 2000: 233 - 237.
- [26] 高国龙. 用高光谱和偏振图像进行遥感[J]. 红外, 2003, 8: 36 - 41.
- [27] Ranj Ith T, Chaveli Ramesh. A lifting transformation algorithm for multi-sensor fusion[J]. CRL Technical Journal, 2001, 3(3): 1 - 5.
- [28] Henri Maitre, Isabelle Bloch. Image fusion[J]. Vistas in Astronomy, 1997, 41(3): 329 - 335.
- [29] C S L Chun, F A Sadjadi, D Ferris. Automatic target recognition using polarization-sensitive, thermal imaging[J]. SPIE - 2485, 1995: 353 - 364.