

## 遥感遥测中偏振信息的研究进展

弓洁琼, 詹海刚\*, 刘大召

中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力重点实验室, 广东 广州 510301

**摘要** 偏振是光的固有特性之一。地球表面和大气中的任何目标物在与光相互作用的过程中, 由于目标物的表面结构、内部结构以及光入射的角度不同, 都会产生其自身性质决定的特征偏振。而偏振遥感探测就是以目标物辐射能量的偏振特征作为探测信息, 可以在复杂的背景中提取目标的七维信息并很好地分辨目标物上低反射区域和目标轮廓, 解决了传统遥感所不能解决的大气探测和伪装识别方面的问题, 具有良好的应用前景。文章介绍了偏振遥感遥测的机理, 详细阐述了偏振探测的理论模拟、偏振遥感探测仪以及偏振遥感探测技术在大气探测、地球资源探测、海洋表面与水下探测、生物医学、天文探测、军事等领域应用的国内外研究概况、水平和发展趋势, 归纳了目前存在的问题, 并指出目前国内外偏振探测技术的研究方向, 以为后续的同类研究提供参考。

**关键词** 偏振遥感探测; 斯托克斯矢量; 偏振度; 偏振角

**中图分类号:** O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)04-1088-08

### 引言

偏振是光的固有特性之一。地球表面和大气中的任何目标物在与光相互作用的过程中, 由于目标物的表面结构、内部结构以及光入射的角度不同, 都会产生其自身性质决定的特征偏振, 即光的偏振状态的变化包含了这些作用对象的物理状态信息。由于传统遥感探测只考虑了电磁波的辐射强度特性和几何特性丢失了许多信息, 而偏振遥感探测是对电磁波的辐射强度、方向、相位以及偏振状态等波谱特性进行描述, 是传统遥感探测的一个有益补充, 把信息量从三维空间(光强、光谱和空间)扩充到七维空间(光强、光谱、空间、偏振度、偏振方位角、偏振椭率和旋转的方向), 有助于提高目标探测和地物识别的准确度<sup>[1-5]</sup>, 故偏振遥感探测日益受到关注。遥感中偏振信息的重要性已得到美国国家航空航天局(NASA)的认可<sup>[6]</sup>。国内外许多科研机构对偏振探测展开了大量研究, 主要涉及偏振理论、数学方法和模型、偏振测量和仪器、装置和定标及遥感应用等方面。偏振探测在云和大气气溶胶的探测、地质勘探、找矿、土壤分析、环境监测、资源调查、农作物估产、海洋开发利用、灾害估计、农林牧业发展、军事侦察应用、天体探测、生物医药等领域都具有重要的应用价值<sup>[3,4,7]</sup>。本文从偏振探测原理、研究方法、偏振

探测仪和偏振信息的应用 4 个方面, 总结了偏振在遥感探测中的国内外研究现状和进展, 归纳了目前存在的问题, 并提出了开展偏振遥感探测的建议, 以为后续的同类研究提供参考。

### 1 偏振探测的原理

完整的描述光波偏振态的方法有 4 种<sup>[8-10]</sup>: 三角函数表示法、琼斯矢量表示法、斯托克斯矢量表示法、邦加球表示法。1852 年斯托克斯提出用 4 个斯托克斯参量来描述任一光波的强度和偏振态; 由于被描述的光可以是完全偏振光、部分偏振光和自然光, 可以是单色光也可以是非单色光, 并且这 4 个斯托克斯参量都是光强的时间平均值, 能够直接测量, 故在遥感遥测过程中多用斯托克斯矢量表示法。斯托克斯矢量定义如下

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

收稿日期: 2008-12-12, 修订日期: 2009-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(40876093)资助

作者简介: 弓洁琼, 女, 1980 年生, 中国科学院南海海洋研究所博士研究生 e-mail: gongjieqiong@126.com

\* 通讯联系人 e-mail: hgzhn@scsio.ac.cn

$$= \begin{pmatrix} I = I_0 = I_{0^\circ} + I_{90^\circ} = I_{+45^\circ} + I_{-45^\circ} \\ Q = I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \\ U = I_{+45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ V = I_r - I_l \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中:  $E_x(t)$ ,  $E_y(t)$ ,  $\delta_x(t)$ ,  $\delta_y(t)$  分别表示在  $x$  和  $y$  方向上电场的振幅和相位;  $\langle \rangle$  表示求电场强度的时间平均值;  $I_0$  为光波的总强度,  $I_{0^\circ}$ ,  $I_{90^\circ}$ ,  $I_{45^\circ}$ ,  $I_{-45^\circ}$ ,  $I_r$  和  $I_l$  分别表示放置在光波传播路径上一理想偏振片在  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $-45^\circ$  方向上的线偏振光以及左旋( $l$ )和右旋( $r$ )圆偏振光强。

当光束与物质相互作用时, 出射光束的斯托克斯矢量与入射光束的成线性函数关系, 即

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \mathbf{M} \times \mathbf{S}_{\text{in}} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{M}$  是一个  $4 \times 4$  阶矩阵, 表示这种物质的特性及取向, 称作米勒矩阵。当一束光依次通过一连串  $N$  个装置(光学系统)作用时, 总的组合效果由以下米勒矩阵来描述

$$\mathbf{M}_{\text{comb}} = \mathbf{M}_N \mathbf{M}_{N-1} \cdots \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_1 \quad (3)$$

同样, 光的偏振度  $P$ 、偏振角  $\theta$  以及椭率角  $\epsilon$  的定义分别为

$$\begin{aligned} P &= \frac{(Q^2 + U^2 + V^2)^{1/2}}{I} \\ \theta &= \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \\ \tan(2\epsilon) &= \frac{V}{\sqrt{Q^2 + U^2}} \end{aligned} \quad (4)$$

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斯托克斯矢量, 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 偏振遥感仪和实验观测方法

### 2.1 偏振遥感仪器研究进展

仪器是偏振遥感遥测的基础。国内外各科研机构根据需要研制了不同类型的仪器。

最早的偏振遥感仪器出现在天文领域, 至今已有 150 年之久。美国对机载偏振仪进行了多次试验, 于 1984 年 10 月获得第一张地物目标的偏振图像, 证实了进行偏振遥感探测的可行性<sup>[11-14]</sup>。法国的地球反射光谱的偏振和方向性仪(POLDER)<sup>[15,16]</sup>和美国的地球观测扫描偏振计(EOSP)<sup>[17,18]</sup>是进行大气研究的代表仪器, 可以对地气系统反射的太阳辐射的方向和偏振度进行全球观测, 能把大气散射的辐射跟地表反射的辐射区分开来。EOSP 的 12 个通道, 全部具有偏振分析功能, 可提供平流层以及对流层大气的气溶胶光学厚度和云层状态等特性; 而 POLDER 所具有的 8 个通道中只有 3 个为偏振测量通道, 用于测量全球海洋水色、云和气溶胶等信息。但是 POLDER 和 EOSP 都只能测量线偏振光。另外, 美国哥伦比亚大学研制了可控制偏振光状态的水下偏振测量系统, 该仪器利用圆偏振光的记忆效应极大地提高了图像的对比如<sup>[19]</sup>。以色列的研究人员利用液晶偏振片代替普通的偏振片, 研制了新的偏振测量系统, 提高了偏振片的转换速

度, 取得了较好地测量效果<sup>[20]</sup>。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, 有效地提高了测试效率和精度<sup>[21,22]</sup>。

目前, 国内研制了地面偏振相机、机载偏振相机等偏振成像遥感仪器。中国科学院光学精密机械研究所所研制<sup>[23]</sup>的机载多波段偏振 CCD 相机的样机采用了旋转偏振片和滤光片结构。目前大部分偏振仪都存在体积质量大、功耗高等缺点, 为了解决这些问题, 同时提高系统的可靠性, 王峰等<sup>[24]</sup>设计了专用偏振成像智能传感器, 该仪器既可输出原始的强度图像、偏振度及偏振角图像, 也可在进行一些目标识别处理后输出偏振遥感图像。另外, 中国科学院上海技术物理研究所<sup>[25,26]</sup>研制的六通道可见近红外分光偏振计样机增加了圆偏振测量功能, 可以测量目标辐射或反射光的全偏振态, 从而得到全偏振参数, 其 6 个通道各有独立的光学系统, 能同时对一个目标进行观测。

### 2.2 偏振实验观测方法

实验观测是获得偏振光谱最直接的途径。根据观测地点不同, 可分为两种: 一是实验室或野外利用仪器直接测量, 二是利用机载或星载偏振仪测量; 二者各有利弊, 相互补充。实验室或野外利用仪器直接测量物体的偏振特性, 可以从中获得物质偏振特性的规律, 分析偏振产生的机理, 为偏振的应用提供理论依据和必要的原始资料。国内外多个研究小组在这方面做了大量的研究工作。Egan 等<sup>[27,28]</sup>对飞机、士兵和军用车外壳蒙皮进行了偏振特性研究; Raven 等<sup>[29]</sup>测量了月桂和毛蕊花的偏振特性; 赵云升<sup>[30-35]</sup>、杨之文等<sup>[36]</sup>测量了各种水体、矿石、土壤、草地、黄色环氧板、沥青楼顶、绿帆布、水泥路面及铁板等多种目标物反射光偏振特性。与实验室及野外直接观测物体的偏振光相比, 星载或机载偏振仪则可以长时间大面积同步实时探测, 每小时可以探测几百平方公里; 另外, 机载偏振仪具有很好的战术机动性, 可以不受天气、云等因素影响, 从而满足战略防御和现代战争的要求。国内已有许多研究单位对星载或机载卫星偏振仪进行了研究<sup>[37-40]</sup>, 并且使它们的应用日益广泛, 在我国发生的“5.12”汶川大地震灾情调查中起到了很大的作用。

## 3 偏振的数值模拟

### 3.1 蒙特卡洛模拟

蒙特卡洛模拟既是计算辐射传输的一种工具, 又是一种以概率论和数理统计为基础通过对随机变量的统计实验、随机模拟来求解近似解的数值方法。原则上蒙特卡洛模拟可以计算以任意数学模型表述的介质中辐射传输过程, 故它在数学、物理、化学、医学及工程等方面得到广泛的应用<sup>[41,42]</sup>。由于数值求解矢量传输方程必须求解 4 个耦合的方程组难度较高, 因此人们最早采用蒙特卡洛方法进行模拟来求解矢量传输方程<sup>[43]</sup>。蒙特卡洛模拟最早用来研究大气偏振模拟, 后来 Kattawar 等<sup>[44,45]</sup>将之用来计算大气-海洋耦合系统中的辐亮度、偏振度与偏振方向、水下光场的斯托克斯矢量等参数。Kattawar 与 Adams<sup>[46,47]</sup>基于蒙特卡洛模拟计算水下广场的斯托克斯矢量, 并分析了气-水界面的折射指数对辐亮

度与偏振的影响；研究了用标量辐射传输模型计算辐亮度带来的误差大小，并分析了引起该误差的因素。

### 3.2 矢量辐射传输方程数值解法

研究者根据数值解法以及边界条件的不同，发展了多种矢量辐射传输的数值解法。目前最经典的是法国学者 Chami<sup>[48,49]</sup>开发的基于连续阶散射的 OASO 偏振辐射传输模型，该模型将大气-海洋系统的辐射传输过程分解为大气分子与气溶胶、气-水界面、水分子与水溶胶等若干部分，选取典型的海洋气溶胶模型，根据 Cox-Munk 模型确定海-气界面的粗糙度，同时考虑不同水体参数的偏振特性，对浮游植物、无机颗粒等悬浮颗粒物的偏振信息进行模拟。此外，何贤强等<sup>[50]</sup>基于矩阵算法开发了 PCOART 数值计算模型。该模型首先将矢量辐射传输方程进行傅里叶展开，得到与方位角独立的矢量辐射传输方程，并进一步离散天顶角，得到矢量辐射传输矩阵方程，然后利用倍加法计算矢量辐射传输矩阵方程，得到介质中的矢量辐射场分布，最后根据辐射在海洋-大气界面的反射和折射性质，将海洋和大气矢量辐射传输进行耦合，得到整个海洋-大气耦合介质系统的辐射传输数值计算模型。除 OASO 与 PCOART 模型外，其余的矢量辐射传输模型大多是计算大气散射与水面反射的偏振信息，没考虑离水辐射的偏振信息。需要指出的是，目前惟一在轨的偏振传感器 POLDER 反演海洋上空气溶胶的算法，也是假设近红外波段的离水辐亮度为 0，也没有考虑水体上行辐射的贡献<sup>[16]</sup>。

## 4 偏振遥感的应用

### 4.1 探测云和大气气溶胶

地面上空云的分布、种类以及高度、云和大气气溶胶粒子尺寸分布等均能影响大气辐射收支，从而对大气和气象产生很大的影响。虽然已有多种空间遥感仪器对它们进行探测，但都是从辐射强度方面提取信息，因而对探测云内的物理状态(譬如粒子尺寸分布)难以奏效。偏振遥感能很好地克服这些困难。使用辐射测量手段能探测云的相态(冰云或水云)，估计云顶的高度，确定云和大气气溶胶的光学厚度；使用偏振探测能更有效地分析云层内部的物理状态，确定卷云存在与否、冰晶粒子的优势方向及大气气溶胶粒子的尺寸、分布等能对天气的影响的微物理特性参数；偏振探测还可利用探测上层大气中自然形成的亚稳态原子氧的谱线来测量上层大气风场的速度和温度<sup>[51]</sup>。国内外许多学者开展了大量的研究。Goloub, Deuzé, Egan 等<sup>[28, 52-55]</sup>以及段民征<sup>[56]</sup>利用 POLDER/ADEOS-I 资料对洋面或陆地上空气溶胶的光学厚度、Angström 指数、类型、折射率以及密度等进行了研究。孙贤明等<sup>[57]</sup>根据矢量辐射传输理论利用单波长太阳光遥感反演了球形水凝物气溶胶光学厚度和有效半径。Chepfer 等<sup>[58,59]</sup>用 POLDER/ADEOS-I 资料分析了卷云中水平取向的冰晶粒子，并反演获得了卷云特性，而 Buriez 等<sup>[60]</sup>则证实了平面平行云模式假设在用卫星辐射资料反演液水云光学厚度时是有效的。程天海等<sup>[61]</sup>采用矢量传输方程模拟分析了含卷云层的总反射率，并利用卫星观测数据验证了模拟结

果，同时分析研究了卷云微物理特征、光学特征和地表反照率对总反射率和偏振反射率的影响，这为利用多角度偏振遥感数据反演卷云各参数提供了理论基础。

### 4.2 调查地球资源

偏振信息与地物目标的结构、化学成分、水分含量、岩石中的金属含量等地物表面状态密切相关<sup>[62]</sup>。从植被和土壤等不同背景的偏振反射特征来看，树叶的偏振反射数据包含了其表面和内部的结构信息，且与树叶中的水分含量相关<sup>[63]</sup>，因而我们可以利用这些偏振数据对植被的生长和病虫害进行调查和监测，可以对农作物进行估产；随着利用叶与冠层辐射传输模型对植被水分遥感监测的研究<sup>[64]</sup>，干旱监测研究细化到对植被水分的定量估计，从大气-植被-土壤多角度出发进一步推东了植被水分监测的研究进展，同时也建立一个精度更高、更立体的遥感监测干旱系统。由于在热红外波段植被和土壤背景的偏振度很小，故从偏振图像中可以清楚地识别出偏振度通常较大的人工目标<sup>[65]</sup>。偏振遥感在调查行星表面矿物资源方面亦起着很重要的作用<sup>[66,67]</sup>，国内外多家研究单位对各种各样的矿物资源进行了偏振遥感研究<sup>[68,69]</sup>。赵丽丽等<sup>[30]</sup>还从多角度偏振技术的物理机理出发阐述了该技术在当前“重返月球”计划中的可行性。故选择合适的光谱通道进行偏振遥感，我们能取得全球地物光谱数据。因而在矿物资源调查、水旱环境、土壤墒情、侵蚀、植被生长、病虫害、农作物的估产等方面开展地物偏振光谱研究无疑具有很重要的意义。

### 4.3 监测海洋环境

偏振遥感对于水面状态信息有较强的纠偏能力，这在一定程度上可以克服传统遥感的信息量不足的缺陷。海水是否被污染、海面上有无云雾、云雾粒径分布状况、海浪的高低，海水中的组分(浮游植物，黄色物质等)等都能从辐射的偏振状态中反映出来。利用空间遥感能在全局范围内获得与此相关的大量信息，从而为深入研究海洋、进而开发利用海洋创造一定的条件<sup>[49, 70-72]</sup>。由于偏振图像上水面油膜比背景水面更亮<sup>[63, 73]</sup>，因而研究不同油品的溢油水面和不同污染水体的多角度偏振与二向性反射定量关系可以为海水污染等遥感监测提供依据，为水环境监测提供可信的依据<sup>[69, 73-76]</sup>。另外，由于水体镜面反射和太阳耀斑严重影响水体反演，因而对其进行研究可以为水体偏振遥感技术的改善提供技术参考<sup>[34, 35]</sup>。

浑浊介质中目标的成像探测是科学与工程界较难解决的问题之一，而偏振探测对于水下目标成像具有独特的优势，它既可用于海底地貌绘制、水文测量、大陆架探测、内陆河港口探测、水下打捞，又可应用于海洋生物变化和海洋环境监测等方面<sup>[77,78]</sup>。由于物体后向散射光的偏振度大于悬浮粒子后向散射光的偏振度，因此采用线偏振或圆偏振光作为照明光源，并在探测器前放置线偏振器或圆偏振器，可以减小悬浮粒子后向散射光的影响，从而提高水下物体的图像对比度。通过对水下消偏振因素和散射体之间的关系的研究<sup>[79,80]</sup>发现，不仅沙子具有强烈的消偏振效应，而且当覆盖层很薄时偏振遥感能够确定被覆盖目标的位置。另外，利用偏振差分图像区分目标和背景，还可以提高探测距离<sup>[81]</sup>。自 1996

年 James 和 John 利用机载偏振激光雷达来探测鱼群以来,人们一直利用该方法来进行渔业探测和渔业调查<sup>[82]</sup>。

#### 4.4 星际空间

早在空间偏振测量用于探测地球和地球大气之前,人们就对金星、火星、土星和天王星的云和气溶胶的化学成分和光学厚度或表面偏振特性进行有效的探测,约有 20 年的历史<sup>[66,67]</sup>。天体发出的光的偏振特性包含了天体自身物理和化学状态的信息,而这些信息是其他探测手段所无法获取的,因此偏振探测技术不仅可以研究恒星、行星以及星云的状态而且还是确定恒星电磁场的一个基本方法<sup>[83]</sup>。由于中子星和黑洞的引力、磁场都可能使其 X 射线偏振角发生扭转,因而利用新型天体探测器测定 X 射线的偏振角有助于深入研究中子星和黑洞等天体,进而推断中子星或黑洞的形状和运动方式<sup>[84]</sup>。由于大气散射的干扰,天文观测通常选择在深夜或晨昏时段进行,因此无法积累有效的白天天文观测数据资料,而利用大气散射偏振特性与恒星光偏振特性的差别和光谱偏振成像技术则能提高白天强背景下天体探测信噪比和对比度,从偏振图像中有效地提取恒星,从而提高恒星的识别概率,实现恒星白天观测,这为白天天文观测数据的获取提供了一条有效的技术途径<sup>[85,86]</sup>。

#### 4.5 生物医学

近年来随着医学诊断技术向无损化方向的不断发展,利用光学手段实现生物组织中的成像问题正在受到越来越广泛的关注,许多新兴的技术正不断地被引入到这一领域的研究中。由于绝大多数生物组织对于 600~1 300 nm 波段的光都呈类似于混浊介质的高散射低吸收,且此波段的光对生物组织没有电离和辐射等危害,因此此波段的光的偏振非常适用于人体组织的无损检测和成像。混浊介质中光的偏振成像技术在生物医学上得到了广泛的应用。偏振成像技术具有价格低廉的优点,并且偏振检测可排除组织界面的镜面反射,因而在激光医学的诊断和治疗中运用偏振成像探测技术可以对生物组织病变前后的偏振特征进行准确测量、对比和分析。例如,偏振光可以显示许多有关皮肤癌的特有信息,皮肤癌大多产生在皮肤表层区域,动手术前利用偏振光快速获得有关病状的信息,可以有效地缩短手术时间和减少病人的痛苦<sup>[87]</sup>;偏振光扫描仪能有效地定量检测出视网膜神经纤维层的受损部位及程度<sup>[88]</sup>。如果将偏振成像探测技术与 X 光相结合,则可以大大提高医疗诊断的可靠性和准确性。同样,利用荧光物质受激发偏振光照射后经过一段时间会放射出激发光波长、偏振状态和激发光相同的偏振光这一特性,可将荧光偏振免疫分析技术推广应用于血药浓度监测、环境中农药残留分析、食品检测等领域<sup>[89,90]</sup>。

#### 4.6 军事应用

自 20 世纪 80 年代以来,偏振手段广泛应用于探测和识别低对比度的伪装人造目标(伪装的士兵、军车、飞机和舰船),预先发现敌方的军事行动,获取战区的地形地貌特征等方面,这为导弹预警和拦截提供了背景性资料。

##### 4.6.1 航行和飞行安全

由于海水状态、海浪的高低以及海面风速的大小等海况都能在偏振信息中反映出来,因而利用偏振遥感技术可以估

测船舶航行参数,从而为海面指挥监控作参考。组成卷云的冰晶对战略导弹和战术导弹的再入弹头具有强烈的侵蚀作用,从而影响命中的准确度,甚至对弹体造成严重损害,因此判断导弹着陆区是否存在卷云,是军方一直希望解决的问题。由于卷云对入射辐射可产生强烈的特征偏振,因此利用星载扫描偏振计能在全局范围内迅速了解卷云和其他云层的分布情况,对于保障导弹以及飞机的飞行安全具有重要意义<sup>[91]</sup>。

##### 4.6.2 导弹制导

由于大气气溶胶对光的散射和吸收严重影响海表水面舰艇及其他军种的电-光系统(比如巡航导弹的激光制导、电光成像侦察系统)的性能,因而气溶胶的探测极其重要。同时,气溶胶的探测与其他气象要素的探测相比难度大,偏振遥感很好地解决了这一难题。一方面,偏振遥感图像可以使尘雾图像更加清晰,有效地退化并复原由大气气溶胶引起的图像,提高图像的对比度和清晰度,从而拓宽成像距离;另一方面,由偏振遥感探测大气气溶胶取得的数据可以保障导弹准确命中目标,提高导弹的命中杀伤力,提高电光成像侦察系统的实际效能起重要作用<sup>[92]</sup>。

##### 4.6.3 军事目标识别

人造物体和自然界自然状态的物体的偏振性能之间存在明显差异,利用偏振遥感可以辨别出常规遥感手段所无法识别的伪装目标。车辆、舰船、飞机、雷达等绝大多数军事目标都是由金属构成的。对于非金属的假目标和伪装网,由于其偏振特征不同于金属,因此利用偏振遥感探测技术很容易发现并识别目标<sup>[93,94]</sup>;即使是用金属构成的伪装材料进行伪装,但由于自然背景绝大多数是非金属的且相对粗糙,故利用偏振光对粗糙度的敏感性和目标与背景之间的差异还是能够突显伪装目标的外形轮廓。另外,在热红外波段利用偏振成像可以有效地抑制背景影响从而提高目标探测效率,较好地解决了普通红外图像中背景杂乱的问题<sup>[95-97]</sup>。热红外偏振遥感还可以通过探测导弹或舰船行进过程中的烟雾、尾焰或气泡来实现对舰船的跟踪<sup>[98]</sup>。

##### 4.6.4 军事目标伪装

准确找到敌方的伪装军事目标大大有利于我方。同样,目标的伪装和假目标的应用也可以迷惑欺骗敌方的侦查,保护己方的重要目标,耗费敌方的精确制导弹药,这在现代战争中已经得到了广泛的应用<sup>[92]</sup>。随着人们对偏振探测技术的利用以及识别伪装目标和假目标能力的提高,传统的伪装技术与装备已经不能有效地对抗偏振遥感侦察,因此需要根据偏振遥感的侦察特点,发展新型伪装器材,以适应未来战争中对抗敌方多种侦察手动的需要。首先,由于偏振角信息可以细致地反映目标的外形特征,从而以此识别军事目标,因此通过伪装手段改变目标的外形偏振特征使其与背景的偏振特征一致是降低其识别能力的有效方法。其次,由于偏振探测利用的是目标表面与自然背景的偏振散射特征的不同这一特点,故可通过成分调节、表面形态和粗糙度设计研制新型的伪装涂料,使其不仅要与自然背景有着相似的反射光谱,而且具有较低的偏振度,与背景相融合。最后,由于烟雾有很强的消偏振作用,因此烟幕伪装不仅能够遮蔽军事目

标的偏振信息,也能够遮蔽目标的可见光、近红外与热红外特征信息,它是现有伪装技术中对抗偏振侦察的较好方法<sup>[99]</sup>。

## 5 发展趋势

偏振在生活中常见的应用就是偏振太阳镜,它可以大大减小物体的反射光强,保护眼睛;在高速光纤通信系统中偏振模色散会对信息的高速传递造成不利影响,利用偏振检测手段可以对其加以控制从而消除这种不利影响<sup>[100]</sup>。但迄今为止,偏振的最大潜在价值则体现在偏振遥感上。作为新型的探测手段,偏振遥感在目标识别和信息提取方面有着传统遥感所不具备的优势。虽然由于前人对该领域进行了长期的研究使偏振遥感探测技术取得很大的进展,但还有很多问题亟待解决。

### 5.1 偏振仪器

随着偏振成像探测技术的广泛应用,偏振成像探测平台呈现出向着小型平台、体积受限平台、无人值守平台方向发展的趋势。为了满足以上特殊偏振探测平台的需要,需研制一种微小型、高可靠性的偏振成像探测系统,该系统需具有更高分辨率、更高精度、更高信噪比且工作稳定的性能,从

而为偏振遥感做好硬件准备。另外,由于许多物体(比如金属)的反射或散射光是圆偏振光或椭圆偏振光,而现有的几种偏振探测仪器(POLDER, EOSP)只能探测线偏振光,故要研制能够测量全偏振遥感仪,并对其偏振响应进行严格定标。

### 5.2 目标的偏振特性

在更广泛的测试条件下更宽的波段范围收集研究不同目标的偏振特性数据,对其进行分析并最终了解偏振特征随目标、天气、地点、太阳高度角等影响因素的变化规律,以做好偏振遥感的软件基础。但由于目标偏振特性和二向散射分布的复杂性,目标散射光偏振特征的研究的工作量将会非常巨大,这要求更多的研究工作者从事此方面的研究,投入更多经费。

### 5.3 理论模拟

理论模拟对偏振遥感的实际应用起着重要的指导作用,在实验研究的同时,还需要在理论模拟上有所突破。上文提到海洋对水体的理论模拟认为水体各组分的竖直分布采用的是各向同性的,不符合实际水体中悬浮颗粒物的实际分布;其认为海洋表面是平面,没有考虑海面变化、海浪等因素,这亦不符合海洋的实际情况,应该进一步改进海面模型<sup>[101]</sup>,因而需要进一步深入研究偏振遥感的理论模拟。

## 参 考 文 献

- [1] Clarke D, Grainger J F. Polarized Light and Optical Measurement. Oxford: Pergamon Press, 1971.
- [2] JIN You(金 友). Optics, Mechanics & Electronics Information(光机电信息), 2000, 17(10): 11.
- [3] SHAO Wei-dong, WANG Pei-gang, ZHENG Qin-bo(邵卫东, 王培纲, 郑亲波). Infrared(红外), 2000, 21(9): 7.
- [4] YANG Zhi-wen(杨之文). Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory(光谱实验室), 2003, 20(6): 815.
- [5] JIANG Jing-shan(姜景山). Space Science and Application(空间科学与应用). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2001.
- [6] National Aeronautics and Space Administration Earth Observing Scanning Polarimeter. Phase-B Final Report (Contract No. NASS-30756), 1990.
- [7] WANG Zhen, HONG Jin, QIAO Yan-li, et al(汪 震, 洪 津, 乔延利, 等). Optical Technique(光学技术), 2007, 33(2): 196.
- [8] Azzam R M A, Bashara N M. Ellipsometry and Polarized Light, Netherlands: North-Holland Publishing Company, 1997.
- [9] Hendrik Christoffel van de Hulst. Light Scattering by Small Particles. New York: Dover Publications, 1981.
- [10] Egan W G. Photometry and Polarization Remote Sensing. New York: Elsevier, 1985.
- [11] Egan W G. SPIE, 1989, 1166.
- [12] Egan W G. SPIE, 1992, 1747.
- [13] Egan W G, Johnson W R, Whitehead W S. Applied Optics, 1991, 30(9): 435.
- [14] Egan W G, Israel S, Johnson W R, et al. Applied Optics, 1992, 31(10): 1542.
- [15] Andre Y, Laherrere J M, Bret-dibat T, et al. SPIE, 1995, 2572.
- [16] <http://smc.cnes.fr/POLDER>.
- [17] Larry D T. SPIE, 1992, 154.
- [18] <http://eosps0.gsfc.nasa.gov/>.
- [19] Nothdurft R, Yao G. Optics Express, 2006, 14(11): 4656.
- [20] Namer E, Schechner Y Y. Proceedings of SPIE, 2005, 5888: 1.
- [21] Lee J K, Shen J T, Heifetz A, et al. Optics Communications, 2006, 259: 484.
- [22] Shahriar M S, Shen J T, Hall M A, et al. Optics Communications, 2005, 245: 67.
- [23] PAN Ling, HONG Jin, QIAO Yan-li, et al(潘 玲, 洪 津, 乔延利, 等). Journal of Atmospheric and Environmental Optics(大气与环境光学学报), 2006, 1(1): 69.
- [24] WANG Feng, HONG Jin, QIAO Yan-li, et al(王 峰, 洪 津, 乔延利, 等). Chinese Journal of Sensors and Actuators(传感技术学报), 2007, 20(6): 1448.
- [25] SHAO Wei-dong, WANG Pei-gang, WANG Gui-ping, et al(邵卫东, 王培纲, 王桂平, 等). Chinese Journal of Lasers(中国激光),

- 2003, 30(1): 60.
- [26] SHAO Wei-dong(邵卫东). Doctoral Dissertation, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences(in Chinese). 2002.
- [27] Egan W G, Duggin M J. Proceedings of SPIE, 2000, 4133: 172.
- [28] Egan W G, Duggin M J. Proceedings of SPIE, 2002, 4481: 188.
- [29] Raven P N, Jordan D L. Opt. Eng., 2002, 41(5): 1002.
- [30] ZHAO Li-li, ZHAO Yun-sheng(赵丽丽, 赵云升). Progress in Geophysics(地球物理学进展), 2006, 21(3): 1003.
- [31] ZHAO Li-li, ZHAO Yun-sheng, DU Jia, et al(赵丽丽, 赵云升, 杜嘉, 等). Advances in Water Science(水科学进展), 2007, 18(1): 118.
- [32] ZHAO Yun-sheng, JIN Lun, SONG Kai-shan, et al(赵云升, 金伦, 宋开山, 等). Journal of Northeast Normal University • Natural Science Edition(东北师范大学 • 自然科学版), 2000, 32(4): 93.
- [33] ZHAO Yun-sheng, WU Tai-xia, LUO Yang-jie, et al(赵云升, 吴太夏, 罗杨洁, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2006, 10(3): 294.
- [34] LUO Yang-jie, ZHAO Yun-sheng, HU Xin-li, et al(罗杨洁, 赵云升, 胡新礼, 等). Optical Technique(光学技术), 2006, 32(2): 205.
- [35] LUO Yang-jie, ZHAO Yun-sheng, WU Tai-xia, et al(罗杨洁, 赵云升, 吴太夏, 等). Science in China (Series D: Earth Sciences)(中国科学D辑: 地球科学), 2007, 37(3): 411.
- [36] YANG Zhi-wen, GAO Sheng-gang, WANG Pei-gang(杨之文, 高胜钢, 王培刚). Acta Optica Sinica(光学学报), 2005, 25(2): 241.
- [37] LIU Hou-tong, CHI Ru-li, HU Shun-xing, et al(刘厚通, 迟如利, 胡顺星, 等). High Power Laser Particle Beams(强激光与粒子束), 2008, 20(5): 715.
- [38] SHAO Wei-dong, WANG Pei-gang, ZHENG Qin-bo, et al(邵卫东, 王培刚, 郑亲波, 等). Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报), 2003, 22(2): 137.
- [39] HUANG Lu, XU Tao, LIU Tong-huai(黄鲁, 徐涛, 刘同怀). Journal of Data Acquisition & Processing(数据采集与处理), 2004, 19(2): 228.
- [40] LU Xiao-mei, JIANG Yue-song, RAO Wen-hui(路小梅, 江月松, 饶文辉). Acta Optica Sinica(光学学报), 2007, 27(10): 1771.
- [41] XU Lan-qing, LI Hui, XIAO Zheng-ying(徐兰青, 李晖, 肖郑颖). Acta Physica Sinica(物理学报), 2008, 57(9): 6030.
- [42] SUN Xian-ming, HAN Yi-ping, SHI Xiao-wei(孙贤明, 韩一平, 史小卫). Acta Physica Sinica(物理学报), 2007, 56(4): 2098.
- [43] Gordon H R, Du T, Zhang T. Applied Optics, 1997, 36: 6938.
- [44] Kattawar G W, Plass G N, Guinn J A. Journal of Physical Oceanography, 1973, 3(4): 353.
- [45] Kattawar G W, Adams C N. Limnology and Oceanography, 1989, 34: 1453.
- [46] Kattawar G W, Adams C N. SPIE, 1990, 1302: 2.
- [47] Adams C N, Kattawar G W. Applied Optics, 1993, 32(24): 4610.
- [48] Chami M, Dilligeard E, Santer R P. SPIE, 1997, 3222: 476.
- [49] Chami M, Santer R, Dilligeard E. Appl. Opt., 2001, 40(15): 2398.
- [50] He X Q, Pan D L, Bai Y, et al. Science in China(Series D: Earth Sciences), 2007, 50(3): 442.
- [51] ZHANG Chun-min, YANG Jian-feng, YUAN Xin-jing, et al(张淳民, 杨建峰, 原新晶, 等). Journal of Optoelectronics Laser(光电子 • 激光), 2000, 11(4): 444.
- [52] Goloub P, Tanré D, Deuze J L, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(3): 1586.
- [53] Deuzé J L, Herman M, Goloub P, et al. Geophysical Research Letters, 1999, 26(10): 1421.
- [54] Deuzé J L, Goloub P, Herman M, et al. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(DI2): 15329.
- [55] Egan W G, Liu Q. Proceedings of SPIE, 2002, 4481: 228.
- [56] DUAN Min-zheng, LÜ Da-ren(段民征, 吕达仁) Chinese Journal of Atmospheric Sciences(大气科学) 2008, 32(1); 2007, 31(5): 757.
- [57] SUN Xian-ming, HA Heng-xu(孙贤明, 哈恒旭). Acta Physica Sinica(物理学报), 2008, 57(9): 5565.
- [58] Chepfer H, Brogniez G, Goloub P. J Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 1999, 63: 521.
- [59] Chepfer H, Goloub P, Spinhirne J, et al. J Appl. Meteorol., 2000, 39: 154.
- [60] Buriez J C, Doutriaux B M, Parol F, et al. Journal of Atmosphere Science, 2001, 58(20): 3007.
- [61] CHENG Tian-hai, GU Xing-fa, CHEN Liang-fu, et al(程天海, 顾行发, 陈良富, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2008, 57(8): 5323.
- [62] Priest R G, Meier S R. Opt. Eng., 2002, 41(5): 988.
- [63] NIU Zheng(牛铮). Remote Sensing Technology and Application(遥感技术与应用), 1997, 12(3): 49.
- [64] ZHANG Jia-hua, GUO Wen-juan, YAO Feng-mei(张佳华, 郭文娟, 姚凤梅). Journal of Basic Science and Engineering(应用基础与工程科学学报), 2007, 15(1): 45.
- [65] Baruch B D, Oppenheim U P, Balfour L S A. Proceedings of SPIE, 1971, 1992: 68.
- [66] Pomraning G C, McCormick N J. J. Opt. Soc. Am. A., 1998, 15(7): 1932.
- [67] Goloub P, Deuzé J L, Herman M, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(1): 78.

- [ 6 8 ] ZHAO Hu, YAN Lei, ZHAO Yun-sheng(赵 虎, 晏 磊, 赵云升). *Geography and Geo-Information Science(地理与地理信息科学)*, 2003, 19(4): 81.
- [ 6 9 ] ZHAO Yun-sheng, WU Tai-xia, SONG Kai-shan, et al(赵云升, 吴太夏, 宋开山, 等). *Mining Research and Development(矿业研究与开发)*, 2005, 25(3): 63.
- [ 7 0 ] Lakhtanov G A, Churov V E, Piotrovskaya A P. *Complex Remote Sensing of Lakes*, 1987, 5: 76.
- [ 7 1 ] Mukai S, Sano I, Okada Y. *Adv. Space. Res.*, 1999, 23(8): 1397; 2000, 25(5): 1025.
- [ 7 2 ] Gilerson A, Zhou J, Oo M, et al. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5568.
- [ 7 3 ] ZHAO Nai-zhuo, ZHANG Jing-qi, ZHAO Yun-sheng, et al(赵乃卓, 张景奇, 赵云升, 等). *Acta Pedologica Sinica(土壤学报)*, 2008, 45(2): 380.
- [ 7 4 ] ZHAO Dong-zhi, CONG Pei-fu(赵冬至, 丛丕福). *Remote Sensing Technology and Application(遥感技术与应用)*, 2000, 15(3): 160.
- [ 7 5 ] HUANG Meng, DU Jia, ZHAO Yun-sheng, et al(黄 猛, 杜 嘉, 赵云升, 等). *Infrared(红外)*, 2007, 28(1): 1.
- [ 7 6 ] Burns W, Herz M J. *Final Report, CR 22739, NASA, Oceanic Society, San Francisco*, 1976.
- [ 7 7 ] YANG Hua-yong, LIANG Yong-hui(杨华勇, 梁永辉). *Optical-Mechanical-Electrical Information(光机电信息)*, 2003, 20(12): 6.
- [ 7 8 ] ZHANG Zheng-yu, ZHOU Shou-heng(章正宇, 周寿桓). *Journal of Xidian University(西安电子科技大学学报·自然科学版)*, 2001, 28(6): 797.
- [ 7 9 ] Weidemann A, Fournier G R, Forand L, et al. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5780: 59.
- [ 8 0 ] Brun G L, Jeune B L, Cariou J, et al. *SPIE*, 1992, 1747: 128.
- [ 8 1 ] WANG Hai-yan, YANG Ting-wu, AN Yu-ying(王海晏, 杨廷梧, 安毓英). *Acta Photonica Sinica(光子学报)*, 2003, 32(1): 9.
- [ 8 2 ] Churnside J H, Hunter J R. *SPIE*, 1996, 38.
- [ 8 3 ] Koschinsky M, Kneer F, Hirzberger J. *Astron. Astrophys.*, 2001, 365(3): 588.
- [ 8 4 ] LIU Bi-liu, SHI Jia-ming, ZHAO Da-peng, et al(刘必蕊, 时家明, 赵大鹏, 等). *Infrared(红外)*, 2008, 29(5): 5.
- [ 8 5 ] YE Song, FANG Yong-hua, SUN Xiao-bing, et al(叶 松, 方勇华, 孙晓兵, 等). *Journal of Atmospheric and Environmental Optics(大气与环境光学学报)*, 2007, 2(3): 222.
- [ 8 6 ] SUN Xiao-bing, HONG Jin, LUO Dong-gen(孙晓兵, 洪 津, 骆冬根, 等). *Journal of Atmospheric and Environmental Optics(大气与环境光学学报)*, 2007, 2(6): 499.
- [ 8 7 ] Smith M H. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4257: 82.
- [ 8 8 ] ZHONG Yong, SHI Wei, AI Feng-rong, et al(钟 勇, 施 维, 艾凤荣, 等). *Chinese Journal of Neuro-Oncology(中国神经肿瘤杂志)*, 2007, 5(2): 84.
- [ 8 9 ] WANG Zhan-hui, ZHANG Su-xia, SHEN Jian-zhong, et al(王战辉, 张素霞, 沈建忠, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2007, 27(11): 2299.
- [ 9 0 ] XUE Ji-xiong, JIN Ou, WU Sheng-hua, et al(薛继雄, 金 瓯, 吴胜华, 等). *Strait Pharmaceutical Journal(海峡药学)*, 2008, 20(4): 107.
- [ 9 1 ] WANG Pei-gang(王培刚). *Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程)*, 1995, 24(4): 63.
- [ 9 2 ] SHI Jia-ming, LU Yuan(时家明, 路 远). *The Principle of Infrared Countermeasure(红外对抗原理)*. Beijing: Publishing House of PLA(北京: 解放军出版社), 2002.
- [ 9 3 ] Goldstein D H. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4133: 112.
- [ 9 4 ] Hors L L, Hartemann P, Olf D, et al. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4370: 94.
- [ 9 5 ] Forssell G, Karlsson E H. *SPIE*, 2003, 246.
- [ 9 6 ] Aron Y, Gronau Y. *Proceedings of SPIE*, 2005, 653.
- [ 9 7 ] WANG Zhen, QIAO Yan-li, HONG Jin, et al(汪 震, 乔延利, 洪 津, 等). *Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程)*, 2007, 36(6): 853.
- [ 9 8 ] WANG Jiang-an, ZONG Si-guang, MA Zhi-guo(王江安, 宗思光, 马治国). *Laser and Infrared(激光与红外)*, 2003, 33(3): 172.
- [ 9 9 ] ZHANG Chao-yang, CHENG Hai-feng, CHEN Zhao-hui, et al(张朝阳, 程海峰, 陈朝辉, 等). *High Power Laser Particle Beams(强激光与粒子束)*, 2008, 20(4): 553.
- [ 100 ] WANG Mu-guang, LI Tang-jun, JIAN Shui-sheng(王目光, 李唐军, 简水生). *Acta Physica Sinica(物理学报)*, 2003, 52(11): 2818.
- [ 101 ] LI Zhong-xin, YU Ya-qiu, CHEN Dong(李中新, 余亚秋, 陈 东). *Progress in Natural Science(自然科学进展)*, 2001, 11(9): 981.

## A Review on Polarization Information in the Remote Sensing Detection

GONG Jie-qiong, ZHAN Hai-gang\* , LIU Da-zhao

Key Laboratory of Environment Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

**Abstract** Polarization is one of the inherent characteristics. Because the surface of the target structure, internal structure, and the angle of incident light are different, the earth's surface and any target in atmosphere under optical interaction process will have their own characteristic nature of polarization. Polarimetric characteristics of radiation energy from the targets are used in polarization remote sensing detection as detective information. Polarization remote sensing detection can get the seven-dimensional information of targets in complicated backgrounds, detect well-resolved outline of targets and low-reflectance region of objectives, and resolve the problems of atmospheric detection and identification camouflage detection which the traditional remote sensing detection can not solve, having good foreground in applications. This paper introduces the development of polarization information in the remote sensing detection from the following four aspects. The rationale of polarization remote sensing detection is the base of polarization remote sensing detection, so it is firstly introduced. Secondly, the present researches on equipments that are used in polarization remote sensing detection are particularly and completely expatiated. Thirdly, the present exploration of theoretical simulation of polarization remote sensing detection is well detailed. Finally, the authors present the applications research home and abroad of the polarization remote sensing detection technique in the fields of remote sensing, atmospheric sounding, sea surface and underwater detection, biology and medical diagnosis, astronomical observation and military, summing up the current problems in polarization remote sensing detection. The development trend of polarization remote sensing detection technology in the future is pointed out in order to provide a reference for similar studies.

**Keywords** Polarization remote sensing detection; Stokes vector; Polarization degree; Polarization angle

(Received Dec. 12, 2008; accepted Mar. 8, 2009)

\* Corresponding author