

对地遥感中的光谱偏振探测方法研究^①乔延利^② 杨世植 罗睿智 王乐意 荀毓龙

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 安徽 230031)

摘要 简要分析了遥感偏振探测与现行的遥感强度探测在物理含义方面的区别,并举例说明了偏振遥感信息在表达暗目标(或低照度)和人工建筑目标方面有更丰富的内涵。从物理数学方法上简要归纳了遥感偏振信息的处理解译过程。给出了一种航空光谱偏振 CCD 相机的主要技术指标设计,并与法国的 POLDER 偏振仪进行了类比。

关键词 偏振探测, 遥感技术, 应用基础

0 引言

遥感技术的基础是物体对电磁波所呈现的特性(包括波谱强度和偏振特性以及物体本身的几何特征)的描述。目前,遥感利用的信息主要集中在电磁强度特性和几何特征,但是偏振完全可以作为遥感的另一维更有价值的信息来源,从美国航天飞机带回地面的几百幅地球偏振图像充分证明了这一点。同非偏振测量相比,偏振测量能得到更多易于区分目标的特征信息。偏振状态对于识别不同的地面目标(如自然地物和人工设施)、大气气溶胶、云层等,都是极有价值的潜在信息。特别是对反射辐射强度对比度低的表面,利用偏振数据亦能有效地区别^[1,2]。

30 多年前就有人从理论分析中得到,在高空或卫星的侦察成像系统中使用偏振分析可以明显改善由于大气中 Rayleigh 散射和 Mie 散射引起的对比度降低现象,这些也只是考虑了大气的偏振特性。对于自然表面和人工目标,反射辐射的偏振特性取决于其表面的固有属性,如其介质特性、结构特征、粗糙度、水分含量等,还与观察角和辐照条件有关。除了偏振特性能在特殊背景和条件下提高目标的识别率外,对于辨别人为模拟制造的假目标和伪装有独特的区分能力,这是因为与真实目标相比两者有本质的区别。

从物理意义上讲,任一目标表面在给定波长上发射或反射的非相干光束可以应用 4 个斯托克斯参量(Stokes)来全面描述。第

一个斯托克斯参量 I 是辐射总强度的度量,也是目前光学等遥感探测普遍使用的参量。第二个斯托克斯参数 Q 是用于计量水平方向的线偏振量,第三个斯托克斯参数 U 用于计量与水平夹角 45° 的线偏振量, Q 和 U 等同于偏振度 P 和偏振角 θ ,这正是来自目标自身的最本征的辐射信息——偏振辐射信息。到目前为止,这些最本征的信息尚未得到充分的应用,从最新的资料分析可以看出,偏振信息将是 21 世纪初遥感信息应用研究的热点。

从实际应用上来讲,对于地球表面和大气中任何目标,在散射、反射和透射电磁辐射的过程中,都会产生本征性质所决定的偏振信息,这种信息在有效识别非自然目标和研究全球大气过程中具有重要的实用价值。因此,应用偏振信息在研究确定大气气溶胶粒子尺度、化学组成以及总量方面有明显的作用,这些应用不仅针对气象等用户,也极有可能发展成为一种大气污染的有效监测方法。偏振信息能区分冰云和水云,有助于研究高空运载火箭的飞行影响及气象要素。由于偏振信息与地物目标的结构、化学成份、水份含量、岩石中的金属含量等有关,这对于研究水旱环境、土壤墒情、侵蚀等有着广阔的应用前景,也可以用于研究植被生长、病虫害,农作物的估产等。

1 光谱偏振信息的解译模型

偏振通常表述有线偏振、圆偏振或椭圆偏振,地物目标所产生偏振效应基本上是线偏振,圆偏振完全可以忽略。

偏振度的原始定义为:



^① 863 计划(863-308-19-03(3))资助项目。

^② 男,1958 年生,硕士,研究员;研究方向:光学遥感基础,辐射定标,辐射校正;联系人。

(收稿日期:2000-08-02;修订日期:2000-09-20)

$$P = \frac{I_{\text{极大}} - I_{\text{极小}}}{I_{\text{极大}} + I_{\text{极小}}} \quad (1)$$

其中, $(I_{\text{极大}} + I_{\text{极小}})$ 是相互垂直的两个分量的光的强度之和, 即部分偏振光的总强度。通常考虑具有相速相等沿 Z 轴传播的平面波束总能分解为两个分别沿 X 轴和 Y 轴取向的线性极化波 $E_x(z, t)$ 和 $E_y(z, t)$:

$$\begin{cases} E_x(z, t) = E_x \sin(\omega t - \beta z + \varphi_x) \\ E_y(z, t) = E_y \sin(\omega t - \beta z - \varphi_y) \end{cases} \quad (2)$$

其中, E_x 、 E_y 、 ω 、 β 、 φ_x 和 φ_y 分别表示谐波的振幅、振动频率、相位常数和初始位相。

显然当位相差 $\varphi = \varphi_y - \varphi_x = m\pi$ ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 时, 描述的是线偏振光。同样, 当振幅和位相差满足相关条件时, 可以得到圆或椭圆偏振。

定量化地给出偏振光的偏振信息, 有两种表示方法: 一种是 Jones 矢量表示法, 另一种是 Stokes 矢量表示法。在遥感探测过程中多用 Stokes 矢量表示法。通常把 Stokes 矢量 $(S_0, S_1, S_2, S_3)^T$ 写成另一种形式 $(I, Q, U, V)^T$, 其中 I 为非偏振光强, Q 、 U 分别代表两个方向上的线偏振光, V 代表圆偏振光。在遥感探测中通常假定 $V = 0$, 则:

$$\begin{cases} I = S_0 = \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle \\ Q = S_1 = \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle \\ U = S_2 = 2\langle E_x E_y \cos \varphi \rangle \end{cases} \quad (3)$$

上式中, $\langle E \rangle$ 表示时间平均的效果, 在任一 xy 平面, 在与 X 轴的夹角为 α 的方向上进行观测所得到的光强可以下式表述:

$$I(\alpha) = \langle E_x^2 \rangle \cos^2 \alpha + \langle E_y^2 \rangle \sin^2 \alpha + \langle E_x E_y \rangle \sin 2\alpha \quad (4)$$

或:

$$I(\alpha) = \frac{1}{2}(I + Q \cos 2\alpha + U \sin 2\alpha) \quad (5)$$

通常, 只要测出 3 个不同角度的线偏振光的光强 $I(\alpha_i)$, 就可以联立求出 Stokes 4 个参量的前 3 个 I 、 Q 和 U , 并可以求出偏振光的偏振度 P 和偏振角 θ 。分别取 α 等于 0° 、 45° 和 90° 3 个观测方向, 得到的联立方程如下:

$$\begin{cases} I(0^\circ) = (I + Q)/2 \\ I(45^\circ) = (I + U)/2 \\ I(90^\circ) = (I - Q)/2 \end{cases} \quad (6)$$

变化得:

$$\begin{cases} I = I(0^\circ) + I(90^\circ) \\ Q = I(0^\circ) - I(90^\circ) \\ U = 2I(45^\circ) - I(0^\circ) - I(90^\circ) \end{cases} \quad (7)$$

由此, 对应的偏振度和偏振角分别为:

$$\begin{cases} P = \sqrt{Q^2 + U^2}/I \\ \theta = \frac{1}{2} \tan^{-1}(U/Q) \end{cases} \quad (8)$$

2 实用光谱偏振 CCD 相机设计

2.1 航空光谱偏振 CCD 相机设计指标与总体方案

作者计划开展的航空光谱偏振 CCD 相机 (A-PCCD) 的初步设计指标如表 1 所列, 并与法国里尔 (Lille) 航空-PLODER 偏振仪特性参数进行了比较^[4]。由里尔大学开发的 POLDER 偏振仪经法国 CNES 支持进一步发展成航天偏振仪, 并于 1996 年搭载日本 ADEOS-I 卫星发射升空, 获得了许多有价值的研究地球大气的光谱偏振试验图像 (ADEOS-I 卫星在升空半年后失控)。

表 1 设计光谱偏振 CCD 相机主要技术指标比较

比较项目	光谱偏振 CCD 相机	
	A-PCCD	法国航空-PLODER
探测器	Si-CCD 面阵	Si-CCD 面阵
制冷器	无	电子制冷器
光谱波段及分辨率	450 ~ 700nm/ (30 ~ 50nm) (中心波长位置任意可调)	443.670nm/(20nm), 865nm/(40nm) (其余波段不获取偏振信息)
偏振角	$0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$	$0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$
FOV/IFOV	$2.8^\circ/0.2\text{mrad}$	$V:102^\circ, H:86^\circ/0.3'$
量化精度	10	12
重量	~ 15kg	14kg
检测对象	低照度暗目标等	晴天天空等

从航空光谱偏振 CCD 相机的主要功能与特点考虑, 首先是要获取偏振图像信息, 其次是在飞行过程中获取图像。为了获取某一瞬时目标真正的偏振信息, 至少应从两个以上方向来检测偏振。因此, 本系统采用了偏振三通道探测, 三路采用同一个前置光学系统和同一分光器件, 通过分束器和 3 个不同方向的偏振片入射到 CCD 相机, 从而获得地物目标的偏振信息。系统采用模块化设计, 分两大模块: 光学模块和控制模块。

2.2 关键问题

在偏振信息的探测上, 由于信息相对较弱, 普通 CCD 相机已不能满足要求, 需要高性能、大面阵及大动态范围的 CCD 器件, 同时也需要高量化精度的数据采集器件。从当前技术水平看, 动态范围大于 70db 的 CCD 器件已成熟且价格也较适中, 10 位以上的数据采集器件技术上也没有困难。通过精心设

计,由计算机精密控制滤光片和偏振片的转动,获取偏振信息是可以实现的。

对小型的 CCD 偏振相机而言,相机质量的大小是一个很重要的指标。而通常微型机及小型运载平台的发射和运行环境条件较差,如何使其既满足轻量化要求又有很好的机械性能和很好的防辐射能力,是一个错综复杂的问题。相机结构轻量化需采用突破常规的薄壁结构,选择与飞机机械接口合适的位置,选择轻质、高比刚度要求的材料。在满足测量要求的前提下,尽可能采用先进的小像元尺寸的 CCD 器件,使光学系统焦距适当缩小,减轻镜头的体积和质量。电子学设计需要使电路板最少。

相对来讲,光学系统的设计是非常重要的,既要满足系统的消偏设计,又要满足进入系统的能量需求。在设计过程中,作者采用了如图 1 所示的光路图。前置光学系统的相对孔径为 1:4,焦距 $f = 300\text{mm}$,中继光学系统的相对孔径也是 1:4,焦距 $f = 150\text{mm}$,光学系统的消偏设计通过两个正交的反射面来完成。

光谱偏振 CCD 相机的辐射定标,特别偏振度的定标是一个十分突出的关键问题。法国(搭载日本 ADEOS-I 卫星)的 POLDER 偏振仪是采用积分球辐射定标系统,先对起辐射响应进行定标,然后在积

分球出口处加入起偏器完成仪器的偏振度定标。作为偏振探测仪器,除了在光学系统设计等方面应尽量减弱自身偏振的影响外,对系统自身偏振的检测也属于定标检测的内容。

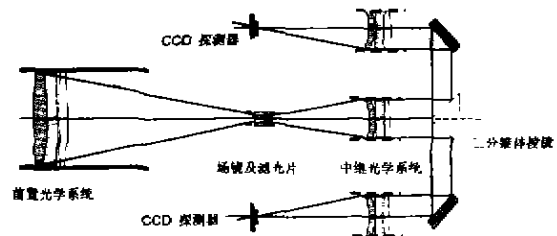


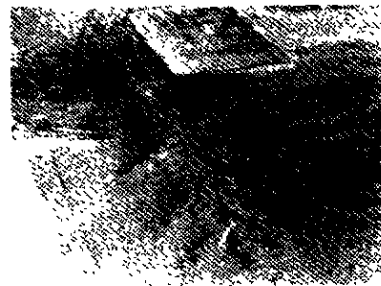
图 1 光学系统原理框图

3 光谱偏振信息应用的初步结果

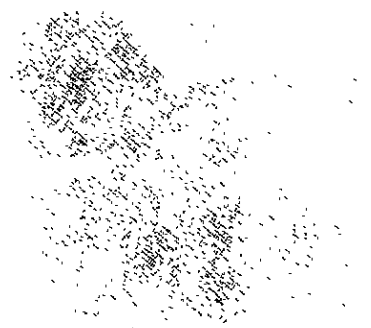
1998 年,作者研制出一台随机调谐波段验证性光谱偏振 CCD 相机,图 2 是利用验证性光谱偏振 CCD 相机在一高楼楼顶对距离 300 多米的建筑及其环境以大倾角观测获得的 4 幅光谱(强度和偏振)图像。图 2(a)和(b)分别是 510nm 处的强度和偏振图像,可见偏振图像有更高的分辨能力;图 2(c)和(d)分别是 630nm 处的强度和偏振图像,很显然,偏振图像比一般的强度图像信息更加丰富,特别表现在人工目标细节的识别上^[3]。



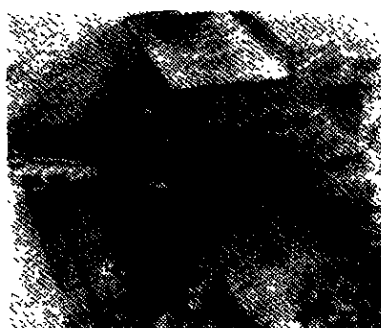
(a)强度图(510nm)



(b)偏振图(510nm)



(c)强度图(630nm)



(d)偏振图(630nm)

图 2 光谱偏振与光谱强度图像获取实验结果对比

4 结束语

许多实际应用已经证明,空间的偏振探测在研究宇宙中的彗星、新星以及小行星等方面是卓有成效的。对地偏振遥感信息的获取不仅仅是传感器技术本身的问题,还必须认真考虑各种物质及介质的偏振作用,如美国航天飞机所带回的400多幅对地观测的偏振图像使人们认识到偏振探测能提供更丰富的信息,然而这些偏振图像中记录的是航天飞机窗口、大气及地面等综合的偏振作用,因此这些花费巨大代价的偏振图像信息很难有效地定量应用。

遥感信息在地球-大气系统中的辐射传输及其复合形成机理,即地球表面及大气偏振作用的基础

研究是制约光谱偏振遥感应应用发展主要因素。此外,偏振遥感信息较之一般强度遥感信息在解决哪些应用问题上有突出作用,即偏振遥感信息的主要用户是谁,这些也是推动偏振遥感技术发展的根本要素。

参考文献:

- [1] Baur T. *Photonics Spectra*, 1999, (1): 125
- [2] Currant P J. *Remote Sensing of Environment*, 1982, 12: 491
- [3] 刘建国. 波段随机调谐偏振成像光谱技术研究:[学位论文]. 合肥:中科院安徽光机所, 1999
- [4] Deuze J L, et al. *SPIE*, 1997, 3121: 342

Research on Polarized Spectral Monitoring for Remote Sensing of Earth

Qiao Yanli, Yang Shizhi, Luo Ruizhi, Wang Leyi, Xun Yulong

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract

The differences in physics between remote sensing using polarization of light and that using intensity of light are briefly analyzed. It is illustrated that polarization includes more information contents than intensity in describing dark targets (or low irradiance) and man-made targets. The interpretation procedures for polarization information are summarized systematically. An airborne polarized spectral CCD camera is designed and compared with POLDER polarimeter made by France.

Key words: Polarization detect, Remote sensing, Foundation and applications

(上接第43页)

DCT Coefficient and Error Concealment

Gu Jian, Yu Shengsheng, Zhou Jingli, Zheng Junhao, Chen Jiazhong

(National Storage Lab, Computer Sci. & Eng. Department,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract

The intra-block spatial redundancy can be compressed with DCT based image compression algorithm, but the inter-block spatial redundancy is not compressed which can be used to carry out DCT based error concealment. DCT based image compression algorithm can compress the spatial redundancy of intra-block but not inter-block. DCT based error concealment can carry out the intra-block spatial redundancy. The authors analyze the different influence of DC, AC coefficient on image quality and propose three DCT coefficient reconstruction algorithm, namely, SREC, ACREC and PREC. The DCT based error concealment algorithm can be used for image reconstruction on client and concealment error caused by storage system or transmission channel.

Key words: Error concealment, Image compression, RAID