

文章编号: 0258-7025(2003)01-0060-05

分光偏振计技术研究

邵卫东, 王培纲, 王桂平, 郑亲波

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要 给出了通过测量斯托克斯参量, 进而确定光全偏振态的一种方法。基于该方法成功研制了一台六通道分光偏振计, 并从空中获得了地面不同目标反射光偏振态的遥测数据。

关键词 物理光学; 分光偏振计; 斯托克斯参量; 偏振度; 离散傅里叶变换

中图分类号 O 436.3 **文献标识码** A

Study on Spectropolarimeter

SHAO Wei-dong, WANG Pei-gang, WANG Gui-ping, ZHENG Qin-bo

(Shanghai Institute of Technical Physics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract The paper reports a method and a spectropolarimeter for determining the polarization state of an emitted or reflected light in terms of its Stokes parameters. The polarization remote data of different objects on the terrestrial surface were obtained from the plane, which will play an important role in developing polarization remote sensing.

Key words physical optics; spectropolarimeter; Stokes parameters; polarization degree; discrete Fourier transformation (DFT)

1 引言

偏振是光场(电磁场)的矢量特性的表征。物体(固体、气体、液体或等离子体)的内部结构或表面特征能改变光的偏振特性, 即物体使入射光的偏振特性受到调制。根据测量到的光偏振特性反推(解调)出物体的某些特征, 确定出此种物体的存在或存在的状态, 这便是偏振遥感的物理基础。随着遥感探测技术的发展, 偏振遥感已成为国际上的一个热门研究课题^[1]。

偏振遥感对于云和大气气溶胶的探测、地质勘探、环境检测、农林牧业发展、海洋开发利用、地质资源调查、军事领域等许多方面具有重要价值。美国在1984~1985年间利用航天飞机进行了多次偏振成像试验, 获取了云区、海面、各种农作物的偏振图像(红、绿、蓝三色), 得到了许多有意义的结果^[2~5]。

20世纪80年代后期, 法国开始研制测量地球反射光谱的偏振和方向性(POLDER)仪器, 它已于1996年8月17日由日本ADEOS卫星携带进入空间轨道运行。该仪器的主要用途是探测云和大气气溶胶以及陆地表面和海洋状况^[6]。美国20世纪90年代研制了地球观测扫描偏振计(EOSP), 在1990年已完成B阶段(方案)的最后报告, 并安装于美国的地球观测系统(EOS)航天器上。其测量目的有二: 第一为云的特性(包括光学厚度、粒子大小、相态和云顶气压); 第二为平流层和对流层大气的气溶胶光学厚度。此外, 其测量结果尚可用于其他EOS仪器海洋和陆地测量数据的订正, 探索气溶胶光学性质的变化, 以及探索地表特征与土壤性质的关系^[7,8]。

地球目标反射光的偏振度主要是线偏分量, 而圆偏振分量通常很小^[9], 即斯托克斯参量 V (参见第二部分详细定义)近似为零, 因而目前几乎所有的

收稿日期: 2001-09-29; 收到修改稿日期: 2001-11-22

基金项目: 国家高技术 863-308 资助项目。

作者简介: 邵卫东(1969—), 男, 中国科学院上海技术物理研究所读博士, 主要从事偏振遥感方面的研究。E-mail: wdshao@sohu.com

偏振遥感仪器均只能测量线偏振光(假设斯托克斯参量 V 等于零)。但对于一些高导电材料(如金属、炭灰或者含炭的气溶胶)以及双折射材料(如植物的叶子)的散射,均能产生比较大的圆偏振^[3]。

本文报道了一台六通道分光(三个可见光和三个近红外)偏振计的原理性样机,它是通过可转动的 $\lambda/4$ 波片与固定的偏振棱镜组合,测量目标辐射或反射光的全偏振态。与通常的偏振遥感仪器相比,该分光偏振计不仅能测量线偏光,而且能测量椭圆偏振光及部分偏振光。这对于军事目标识别具有特别重要意义。

2 偏振分析理论

四个斯托克斯参数可以完全描述准单色(或单色)TE 平面光波的各种可能偏振态,其中每一个参数都有强度的量纲。用横电场的笛卡儿分量来表示,以 I, Q, U, V 为标记的四个斯托克斯参数可表示如下^[10]

$$\begin{aligned} I &= L_{0^\circ} + L_{90^\circ} = L_{45^\circ} + L_{135^\circ} & Q &= L_{0^\circ} - L_{90^\circ} \\ U &= L_{45^\circ} - L_{135^\circ} & V &= L_{\text{rep}} - L_{\text{lep}} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 L_{X° 为用一起偏方向与参考方向成 X° 的理想线偏器插入被测光束中所测到的光强值, L_{rep} 和 L_{lep} 分别为插入理想右旋和左旋圆偏振器所测到的光强值。

从目标辐射的四个斯托克斯参数即可确定入射辐射的偏振特性,算出辐射的偏振度 P , 偏振椭圆方位角 α 和偏振椭率 $\tan 2\epsilon$, 如下式所示^[10]

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2} / I \\ \alpha &= \frac{1}{2} \tan^{-1}(U/Q) \end{aligned}$$

$$\tan 2\epsilon = \frac{V}{\sqrt{Q^2 + U^2}} \quad (2)$$

若 $P = 1$, 则表示入射辐射为完全偏振光。其中当 $\tan \epsilon = 0$ (即 $V = 0$) 时, 则是线偏振光; 当 $\tan \epsilon = 1$ 时, 则为圆偏振光; 当 $\tan \epsilon$ 为其他值时代表椭圆偏振光。

若 $P < 1$ 时, 入射辐射代表部分偏振光。

任何偏振测量系统中的基本偏振元器件为位相延迟器(又称波片)和线偏器。若入射光的斯托克斯矢量为 S_i

$$S_i = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} \quad (3)$$

当它通过图 1 所示系统后, 其透射光的斯托克斯矢量 S_o 为

$$S_o = M(\alpha)M(\beta)S_i \quad (4)$$

式(4)中 $M(\alpha)$ 为偏振方向与参考方向成 α 角的理想线偏器的米勒矩阵, $M(\beta)$ 为快轴与参考方向成 β 角且延迟量为 δ 的波片的米勒矩阵。 $M(\alpha)$ 和 $M(\beta)$ 的表达式分别如式(5)和式(6)所示^[11]:

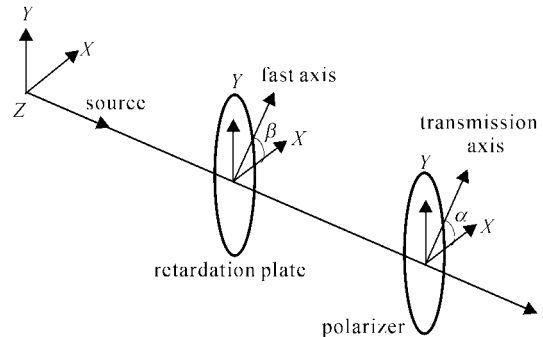


图 1 偏振分析系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of the polarization analysis

$$M(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\alpha) & \sin(2\alpha) & 0 \\ \cos(2\alpha) & \cos^2(2\alpha) & \cos(2\alpha) \cdot \sin(2\alpha) & 0 \\ \sin(2\alpha) & \cos(2\alpha) \sin(2\alpha) & \sin^2(2\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$M(\beta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\beta) + \sin^2(2\beta)\cos\delta & \cos(2\beta)\sin(2\beta)(1 - \cos\delta) & -\sin(2\beta)\sin\delta \\ 0 & \cos(2\beta)\sin(2\beta)(1 - \cos\delta) & \sin^2(2\beta) + \cos^2(2\beta)\cos\delta & \cos(2\beta)\sin\delta \\ 0 & \sin(2\beta)\sin\delta & -\cos(2\beta)\sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \quad (6)$$

斯托克斯矢量的第一个分量 I 对应总光强, 应用米勒矩阵表示式(4)可以得到通过以上偏振测量系统的辐射强度表达式为

$$I_i(\alpha, \beta, \delta) = \frac{1}{2} \{ I + (Q \cos 2\beta + U \sin 2\beta) \cos 2(\alpha - \beta) +$$

$$[(U \cos 2\beta - Q \sin 2\beta) \cos \delta + V \sin \delta] \sin 2(\alpha - \beta) \quad (7)$$

在理想情况下,对于 $\lambda/4$ 波片, $\delta = \pi/2$ 。为计算方便,选取偏振棱镜透光轴方向为坐标轴 x 轴(即 $\alpha = 0$),于是方程(7)可简化为

$$I_t(\beta) = \frac{1}{2}I_1 + \frac{1}{4}Q_1(1 + \cos 4\beta) + \frac{1}{4}U_1 \sin 4\beta - \frac{1}{2}V_1 \sin 2\beta \quad (8)$$

不难发现,方程(8)是一傅里叶级数,可写为

$$I_t(\beta) = C_0 + C_2 \cos 2\beta + C_4 \cos 4\beta + S_2 \sin 2\beta + S_4 \sin 4\beta \quad (9)$$

对于某一观察目标,旋转 $\lambda/4$ 波片并在一周内进行 $N(N = 2L, L$ 为整数)次等间距测量,得到 N 个 $I_t(\beta)$ 值,利用离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transformation),可得

$$\begin{cases} C_K = \frac{2}{N} \cdot \frac{1}{1 + \delta_{K0} + \delta_{KL}} \cdot \sum_{i=1}^N I(\beta_i) \cdot \cos(K \cdot \beta_i) \\ S_K = \frac{2}{N} \cdot \frac{1}{1 + \delta_{K0} + \delta_{KL}} \cdot \sum_{i=1}^N I(\beta_i) \cdot \sin(K \cdot \beta_i) \end{cases} \quad (10)$$

式中 $K = 0, 1, \dots, L, \delta_{Kj}$ 是 δ 符号

$$\beta_i = (i - 1) \cdot \frac{2\pi}{N} \quad i = 1, \dots, N$$

比较方程(8)和方程(9)中三角函数对应的系数,可以求出入射辐射的斯托克斯参量

$$\begin{cases} I = 2(C_0 - C_4) \\ Q = 4C_2 \\ U = 4S_4 \\ V = -2S_2 \end{cases} \quad (11)$$

从而可见,只要测量出 N 次光强,便可得到目标辐射的四个斯托克斯参量。进而再由方程(2)得到入射辐射的偏振度 P ,偏振椭圆方位角 α 和偏振椭率 $\tan 2\varepsilon$ 。

3 偏振测量系统和定标

3.1 偏振测量系统

我们研制的六通道分光偏振计采用平行结构方案,6个通道均匀分布在一个圆周上。6个通道的中心波长分别为 $0.67 \mu\text{m}, 0.865 \mu\text{m}, 0.945 \mu\text{m}, 1.38 \mu\text{m}, 1.67 \mu\text{m}$ 和 $2.15 \mu\text{m}$,其带宽分别为 $40 \text{ nm}, 50 \text{ nm}, 30 \text{ nm}, 100 \text{ nm}, 120 \text{ nm}$ 和 100 nm 。可见和近红外通道选用硅光探测器,而短波红外通道则选用室温PbS红外探测器,它们的探测率 D^* 分别为 $1 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 和 $5 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 。每个通道的有效口径为 15 mm ,瞬时视场为 0.5° 。可见近红外通道信噪比大于250,而短波红外通道信噪比大于200。

每一通道的基本光路如图2,来自目标反射光进入6个相似的物镜系统,它们的光轴相互平行,在视场光阑处形成目标的像,视场光阑限定观察测量

目标的范围,它决定了仪器的空间分辨率(0.5°)。步进电机带动6个 $\lambda/4$ 波片转动,完成各自通道的偏振分析。这6束光分别经过准直镜, $\lambda/4$ 波片,起偏器和滤光片,最后经会聚透镜将各束光汇集到各自的探测器上,形成的电信号经放大,滤波,解调,A/D转换后,再送入微机进行数据反演。

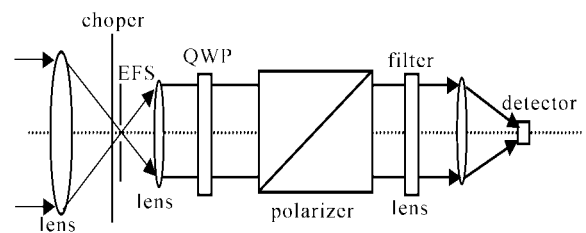


图2 分光偏振计光路图

EFS:有效场阻;QWP:1/4波片

Fig. 2 Schematic diagram of spectropolarimeter

EFS: effective field stop; QWP: quarter wave plate

3.2 辐射定标

采用System 1208积分球作为标准光源对系统进行辐射定标。该积分球本身的辐射稳定度小于1%。由于积分球射出的光是自然光,可以很方便地对6个通道分别进行定标,得到分光偏振计的辐射测量误差小于5%。图3给出了 $0.865 \mu\text{m}$ 通道的响应曲线(其他通道类似)。

3.3 偏振定标

偏振定标的关键是如何获得标准偏振源。我们采用格兰泰勒(LGP-4)偏振棱镜来获得理想线偏光。LGP系列A级偏振棱镜消光比达 $1E-5$ (获得线偏光的偏振度为 0.99998),适用的波段为 $0.3 \sim 2.5 \mu\text{m}$,完全能满足定标要求。

图4给出了通道2入射线偏光的偏振角为 0° 时

的测量原始数据波形,其他通道以及其他偏振角的波形都很相似,只是初始位相和幅度相异而已。

表 1 给出了通道 2(0.865 μm)定标的详细结果(其他几个通道结果类似)。由表 1 的数据不难发现,对于理想线偏光,分光偏振计偏振度误差小于 1%,偏振角误差小于 1°。采用同样的方法,对于自

然光(积分球作为标准光源,其偏振度近似为零),分光偏振计偏振度误差也小于 1%。

由前面的辐射定标可知,分光偏振计的辐射测量误差小于 5%,而偏振度误差则小于 1%。这是因为偏振度是两个辐射强度之比,故偏振测量精度无需准确的辐射量校准就可以达到相当高的精度。

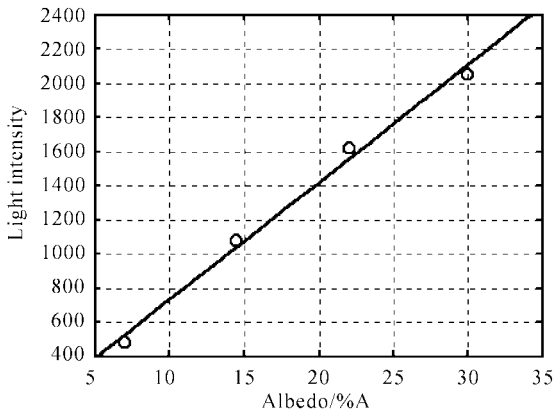


图 3 系统对来自积分球标准光源的响应曲线(通道 2)
Fig. 3 Responsive curve of channel two from system 1208

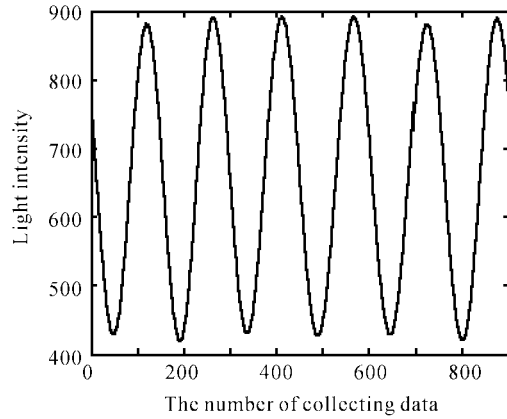


图 4 起偏器方位角为零度时的测量数据(通道 2)
Fig. 4 Data from a linearly polarized source at azimuth zero degree of channel two

表 1 通道 2 定标结果(0.865 μm)

Table 1 Spectropolarimeter calibration of channel 2 (0.865μm)

Polarization state of incident light		Deduced results			
$\alpha /(^{\circ})$	P	P	$\alpha /(^{\circ})$	$\tan 2\varepsilon$	Error of P
0	0.99998	1.0099	0.012	0.01366	0.99%
30	0.99998	0.9906	30.027	0.00305	0.94%
60	0.99998	0.9938	60.045	-0.01376	0.62%
90	0.99998	0.9943	89.672	-0.00426	0.57%
120	0.99998	0.9911	120.214	0.01302	0.89%
150	0.99998	0.9999	150.388	0.02752	0.00%

表 2 不同目标的测量结果比较(通道 2)

Table 2 Comparison of measurement results of different objects (channel 2)

	Farmland (reaped)	Sand beach	Yellow trees	Green trees	Water surface
P	0.0984	0.0416	0.0461	0.0373	0.1356
$\alpha /(^{\circ})$	132.32	93.09	137.04	128.36	96.59
$\tan 2\varepsilon$	-0.103	0.0307	-0.410	0.154	0.0087

4 遥测结果

依据上述偏振分析方法研制的 6 通道可见近红外分光偏振计,已经顺利完成了 2000 年 10 月份的航空飞行实验(哈尔滨),从空中获得大量地面目标

(农田、草地、沙滩、森林、水面等)的可见近红外和短波红外波段偏振特性的实际测量数据。

表 2 给出了通道 2(0.865 μm)对不同目标测出的偏振测量结果,表 3 则给出了大片绿树林不同波段的测量结果。可以发现,对于不同目标其偏振特

性有较明显的差别,而同一目标不同波段的偏振特性亦有相当明显的差异,这对开展偏振遥感具有重要意义。

表 3 大片绿树林不同波段测量结果比较

Table 3 Comparison of measurement results of green trees in different bands

	670 nm	865 nm	945 nm	1670 nm	2150 nm
P	0.1269	0.0373	0.0291	0.0503	0.0962
$\alpha /(^{\circ})$	124.62	128.36	127.85	124.37	125.57
$\tan 2\varepsilon$	0.261	0.154	-0.186	-0.404	-0.174

General notes:

1. All the data in table 2 and table 3 are acquired on condition that the incident radiation coming from the sun at an angle 57.2° to the surface normal and the observation direction is parallel to the surface normal.
2. No data for channel 4 in table 3 because of the absorption band of water vapour in 1380 nm.

5 结 论

所研制的 6 通道分光偏振计不仅能对线偏光,而且能对椭圆偏振光及部分偏振光进行遥感测量。在取得偏振测量结果的同时,还能够提供辐射量的测量数据。但由于目前还没有标准偏振光源(即能提供各种可能偏振态的光源),所以只对理想线偏光和自然光两种情况进行了定标。开展偏振定标光源的研究,对今后进一步开展偏振遥感,显得尤为迫切。

参 考 文 献

- 1 Walter G. Egan. Polarization in remote sensing [C]. *SPIE*, 1992, **1747**:2~48
- 2 K. L. Coulson, V. S. Whitehead, Charles Campbell. Polarized views of the earth from orbital altitude [C]. *SPIE*, 1986, **637**:35~51
- 3 Walter G. Egan. Polarization in remote sensing II [C]. *SPIE*, 1989, **1166**:23~32
- 4 Walter G. Egan, W. R. Johnson, V. S. Whitehead. Terrestrial polarization imagery obtained from the space shuttle: characterization and interpretation [J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(9):435~442
- 5 Walter G. Egan, S. Israel, W. R. Johnson *et al.*. High-resolution space-shuttle polarimetry for farm crop classification [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(10):1542~1548
- 6 Jean Lorsignol, Pierre Hollier, Jean-Pierre Deshayes. Polarization and directionality of the earth's reflectance: the POLDER instrument [C]. *SPIE*, 1991, **1490**:155~163
- 7 Earth Observing Scanning Polarimeter (EOSP) [R]. Phase-B Final Report [Contract No NAS5-30756/December (1990)] National Aeronautics and Space Administration
- 8 Larry D. Travis. Remote sensing of aerosols with the earth observing scanning polarimeter [C]. *SPIE*, 1992, **1747**:154~164
- 9 M. J. Duggin, S. A. Israel, V. S. Whitehead *et al.*. Use of polarization methods in earth resources investigation [C]. *SPIE*, 1989, **1166**:11~22
- 10 R. M. A. Azzam, N. M. Bashara. Ellipsometry and Polarized Light [M]. North-Holland Publishing Company, 1977, Chap. I
- 11 Wei Guanghui *et al.*. Matrix Optics [M]. Beijing: Weapon Industry Publishing Company, 1995 (in Chinese)