

文章编号: 0253-2239(2005)02-241-5

几种地物反射光的偏振特性

杨之文 高胜钢 王培纲

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 偏振测量具有很多普通的光强度测量不具备的优点,是研究地表、大气,探索太空的良好辅助手段。为了获得可见-红外偏振光谱,从而考察利用偏振遥感识别目标的可行性,采用求取斯托克斯参量的方法,分别对草地、黄色环氧板、沥青楼顶、绿帆布、水泥路面及铁板六个样品做了反射光偏振特性测量,并对它们的偏振光谱进行了详细比较,分析了其形成原因。结果表明偏振特性与目标的性质、测量波长、观测角度均有很大关系,偏振测量在遥感和目标识别方面具有重要的意义。

关键词: 光学测量; 偏振; 偏振光谱; 斯托克斯参量; 偏振遥感

中图分类号: O433.5 文献标识码: A

Polarization of Reflected Light by Earth Objects

Yang Zhiwen Gao Shenggang Wang Peigang

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

Abstract: Compared with the traditional luminosity and radiation remote sensing methods, polarization measurement has many unique advantages. To achieve visible-infrared polarimetric spectra, the polarimetric spectra of six objects are measured with Stokes parameter method, including both natural objects and man-made objects. Their polarimetric spectra are compared in detail and the forming mechanism are analysed, too. The results show the significance of polarization measurement in remote sensing and object discrimination.

Key words: optical measurement; polarization; polarimetric spectra; Stokes parameters; polarimetric remote sensing

1 引 言

通常当非偏振光束从光滑介质表面反射时,会产生部分偏振光。自从 20 世纪 70 年代以来,各国科研人员就对反射光偏振特性的产生机理及应用价值做了大量研究。比如纽约大学的 Egan^[1~3] 在 1999 年和 2002 年分别对 C-130 型飞机、B-52 型飞机以及军事伪装车辆进行偏振特性研究。英国 Raven^[4] 比较了月桂和毛蕊花的偏振特性,结论类似 Vanderbilt^[5] 通过观测其他植物得到的结果。Liu^[6] 也用偏振测量的手段来说明海洋大气浮尘如何对海洋表面光学特性造成明显的红移影响。另外还有不少对面板材料的实验室研究^[7~9]。

这些工作表明,偏振成像确实具有很多普通的光强度成像不具备的优点,是研究地表、大气,探索

太空的良好辅助手段。法国研制的测量地球反射率的偏振和方向性(POLDER)仪器^[10],已于 1996 年 8 月 17 日由日本 ADEOS 卫星携带进入空间轨道运行。美国 20 世纪 90 年代研制了地球观测扫描偏振计(EOSP)^[11]将于近年发射。然而目前在国内只有少数研究人员关注这一领域,关于地面物体在红外波段的反射光偏振光谱的工作,几乎是空白。为了获得可见-红外偏振光谱,从而考察利用偏振遥感识别目标的可行性,我们分别对草地、黄色环氧板、沥青楼顶、绿帆布、水泥路面及铁板六个样品做了反射光偏振特性测量,结果表明偏振特性与目标的性质、测量波长、观测角度均有很大关系,具有重要的应用价值。

作者简介: 杨之文(1979~),女,2004 年 6 月在中国科学院上海技术物理研究所获得工学硕士学位,主要从事偏振光谱研究工作。E-mail: deven_d@sina.com。

收稿日期: 2003-09-19; 收到修改稿日期: 2004-08-16

2 测量原理

一束光的偏振状态可以由四个斯托克斯参量 I, Q, U, V 完全描述。其定义如下：

$$\begin{cases} I = \langle \tilde{E}_x^2(t) \rangle + \langle \tilde{E}_y^2(t) \rangle \\ Q = \langle \tilde{E}_x^2(t) \rangle - \langle \tilde{E}_y^2(t) \rangle \\ U = 2\langle \tilde{E}_x(t)\tilde{E}_y(t)\cos[\delta_y(t) - \delta_x(t)] \rangle \\ V = 2\langle \tilde{E}_x(t)\tilde{E}_y(t)\sin[\delta_y(t) - \delta_x(t)] \rangle \end{cases} \quad (1)$$

或

$$\begin{cases} I = I_0 = I_{0^\circ} + I_{90^\circ} = I_{+45^\circ} + I_{-45^\circ} = I_l + I_r \\ Q = I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \\ U = I_{+45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ V = I_r - I_l \end{cases} \quad (2)$$

\tilde{E}_x, \tilde{E}_y 和 $\delta(t)$ 表示电场在 x, y 两相互垂直方向上的振幅和相位。 $\langle \rangle$ 表示求时间平均值。(2) 式是斯托克斯参量的光强表示, I_0 为光波的总强度, $I_{0^\circ}, I_{90^\circ}, I_{+45^\circ}, I_{-45^\circ}, I_l$ 和 I_r 分别表示置放在光波传播路径上一理想偏振片在 $0^\circ, 90^\circ, +45^\circ, -45^\circ$ 方向上的线偏光以及左旋(l)和右旋(r)圆偏振光强。

偏振度定义为偏振分量的强度与该光波总强度的比值

$$P = (Q^2 + U^2 + V^2)^{1/2} / I, \quad (3)$$

另外几个重要参量表达式如下：

$$\begin{cases} D_L = \sqrt{Q^2 + U^2} / I, \\ D_C = V / I, \\ \Theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right), \end{cases} \quad (4)$$

D_L 为线偏振度, D_C 为圆偏振度, Θ 为偏振椭圆主轴方位角。

我们采用固定线偏振器, 旋转线性相位延迟器的方法, 经过傅里叶反演得到目标反射光的四个斯托克斯参量^[12], 再由(4)式求出 D_L, D_C 和 Θ , 就得到了反射光的全偏振态信息。

3 测 量

3.1 测量仪器

测量仪器是中国科学院技术物理所研制的六通道可见红外偏振计, 该仪器可进行全偏振态测量, 通过采集的数据反演出目标反射光的全偏振度、偏振椭圆方位角、线偏振度和圆偏振度。偏振计的光谱通道数据见表 1。六个通道各有独立的光学系统, 视场角 1° , 能同时对同一目标进行观测。偏振计可

绕轴上下转动, 从而改变观测角度。

表 1 偏振计的光谱通道

Table 1 Spectrum channels of polarimeter

Spectrum channels	Central wavelength / μm	Bandwidth / μm
Visible and near infrared	0.67	0.04
	0.865	0.05
	0.945	0.03
Near infrared	1.38	0.1
	1.67	0.12
	2.15	0.1

3.2 测量方法

我们于 2003 年 7 月分别对草地、黄色环氧板、沥青楼顶、绿帆布、水泥路面及铁板进行偏振特性实验, 实验中, 观测角从 10° 开始, 再以 5° 递增至 75° , 分别在太阳入射面及其垂直面采集数据, 如图 1 所示。

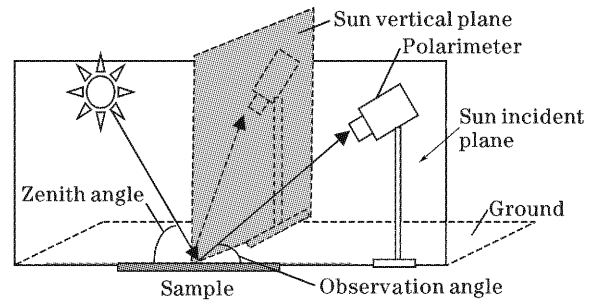


图 1 测量示意图

Fig. 1 Measurement sketch map

为了能更好地对实验结果进行分析, 我们选在晴朗少云风小的天气观测, 对实验环境作了详细记录。

3.3 结果分析

3.3.1 两个观测面的偏振特性比较

我们选取两个典型样品(草地和沥青楼顶)的偏振曲线分别如图 2、图 3 所示。可以看到, 当太阳高度角相同或相近时, 草地在太阳入射面内的偏振度比相应垂直面的小。而其他人工物体则正好相反, 沥青楼顶、水泥路面、铁板在太阳入射面的偏振度比其垂直面相应角度的偏振度大, 这是因为以上样品表面粗糙度小, 入射面内的镜面反射多于垂直面内的镜面反射。在镜面反射时, 依据电磁波理论, 反射光的垂直分量(振动面垂直于入射面的光)始终大于平行分量(振动面平行于入射面的光)。入射角为布儒斯特角时, 反射光的平行分量消失。图 3 中的偏振椭圆方位角接近 180° , 说明反射光中的偏振光是以水平线偏振光为主, 即以垂直太阳入射面的偏振光为主, 符合上述反射理论。

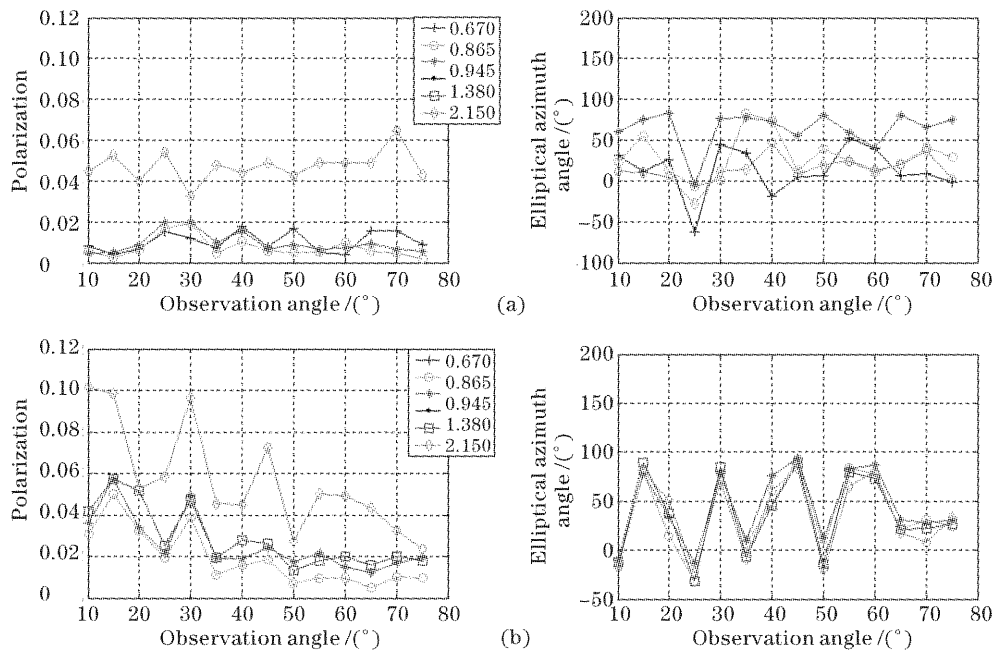


图 2 草地在太阳入射面内(a)和垂直太阳入射面内(b)的偏振曲线

Fig. 2 Polarization of grass in sun incident plane (a) and in sun vertical plane (b)

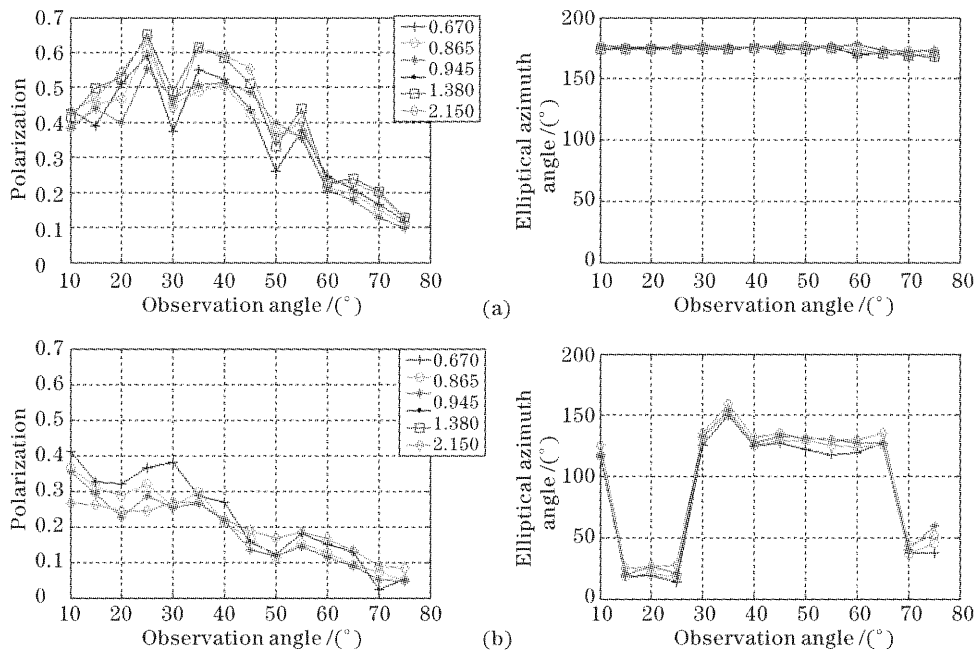


图 3 沥青楼顶在太阳入射面内(a)和在垂直太阳入射面内(b)的偏振曲线

Fig. 3 Polarization of asphaltum in sun incident plane (a) and in sun vertical plane (b)

草地之所以例外可能与其特殊的草叶生长姿态及测量时的风向有关。我们测量时发现,从垂直太阳入射面的方向观察草地,草地看起来更茂盛,色泽更亮,说明垂直面获得的镜面反射光更多。另外,测量草地时太阳在西边,有南风三级,叶面向北边略微倾倒,这也令垂直观测面上的镜面反射光增强。从偏振图看到,草地在太阳入射面内的偏振度随观测

角度没有明显变化,这正是漫反射的体现,而在垂直面的偏振度则随观测角的增大而减小,和其他目标的趋势相同,所以该方向的镜面反射增强了,偏振度也比入射面的高。

由于反射光的偏振度随太阳入射光高度角的增加而增加^[13],而且如前文所述高度角相等时太阳入射面的偏振度大于垂直面的话,黄色环氧板和绿帆

布在入射面(且高度角大)的偏振度比在垂直面内(且高度角小)的高一倍甚至几倍的现象就可以得到合理的解释。

经过两个平面内偏振度的比较,可以发现人造物体表面与自然物体表面存在较大差异。因此可以通过同时测量两个方向偏振度,对其加以比较的方法,进行目标识别。另外,由于植物不同生长阶段的叶面

姿态不同,偏振测量还具有预测植物长势的能力。

3.3.2 六样品之间偏振特性比较

为了方便六个样品之间的比较,我们根据波段分类,作出六幅偏振图。其中波长数据完备且比较典型的有 $0.865\ \mu\text{m}$, $0.945\ \mu\text{m}$ 和 $2.15\ \mu\text{m}$,见图4。垂直面内的漫反射较多,曲线的规律性不强,因此我们在太阳入射面内进行比较。

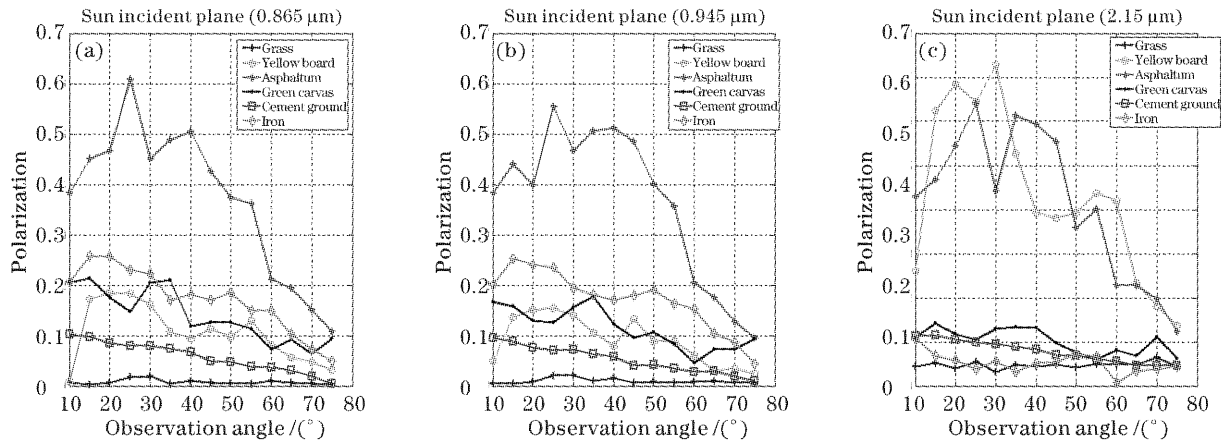


图4 夏季样品偏振光谱

Fig. 4 Fig. 4 Polarimetric spectra of summer samples

首先分析六条曲线的分布情况。因为波长接近, $0.865\ \mu\text{m}$ 和 $0.945\ \mu\text{m}$ 的偏振光谱非常相似,而在 $2.15\ \mu\text{m}$ 则无论是偏振度大小还是曲线分布都有了显著变化。我们发现人工物体表面的偏振度普遍偏大,其中沥青楼顶偏振度最大达到0.6以上,与其他目标形成鲜明对比。而一般作为探测目标天然背景的草地,偏振度很低,且几乎不随波长和观测角度变化。这在偏振遥感中相当容易获得高对比度的图像,对于目标识别十分有利。根据偏振度的大小及变化,我们将六种样品分成三种类型:偏振度始终较大的沥青楼顶;偏振度始终较小的草地和水泥路面;偏振度随波长变化较厉害的黄色环氧板、绿帆布和铁板。这样就可以依据待测目标与探测背景的性质选择合适的测量波长。

然后来观察六条曲线的整体趋势。偏振度一般在观测角为 10° 时较小,然后迅速增大,在 20° 到 40° 之间出现一个或几个极大值,随后再次减小。这给实际应用时提供了选择角度的依据。

3.3.3 其他比较

现在国外的偏振仪器大多都只能测量目标的线偏振度,例如美国的EOSP、法国的POLDER。我们的实验仪器则实现了全偏振态测量。六个样品中, $0.67\ \mu\text{m}$ 到 $1.67\ \mu\text{m}$ 五个波段的圆偏振度基本上

不超过 ± 0.02 , $2.15\ \mu\text{m}$ 波长的圆偏振度稍大,但在 ± 0.08 之间。因此对于偏振度较大的人造物体,圆偏振的影响可以忽略。但草地在太阳入射面内, $2.15\ \mu\text{m}$ 的圆偏振贡献大于线偏振,且以左旋圆偏振为主。我们分析这是光在草叶内部多次反射的结果。于是我们考虑利用草地的这个特性,将圆偏振度与线偏振度的比值作为指针,可以方便快捷的判断所观测的目标是人造物体还是类似草地的自然物体。

另外,在多云的天气我们也做过几次实验。与上述结果相比较发现多云天气的偏振度很小,随观测角的变化也不明显,没有较明显的规律可循。故偏振测量应首选在晴天进行。

4 结 论

不同物体的反射光偏振光谱存在较大差异,其偏振度是太阳高度角、观测角、方位角和测量波长的函数,并且与样品本身的特性(例如粗糙度、含水量、构成材料的理化特性等)息息相关。根据样品与其偏振光谱之间的联系,以及自然物体跟人造物体偏振度的明显对比,我们可以将偏振遥感作为光度遥感的辅助手段,从而更有效地识别目标。

参 考 文 献

- 1 W G Egan, M J Duggin. Optical enhancement of aircraft detection using polarazation[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4133**: 172~178
- 2 W G Egan, M J Duggin. Synthesis of optical polarization signatures of military aircraft[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4481**: 188~194
- 3 W G Egan. Detection of vehicles and personnel using polarization[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4133**: 233~237
- 4 P N Raven, D L Jordan. Polarized directional reflectance from laurel and mullein leaves[J]. *J. Opt. Engng.*, 2002, **41**(5): 1002~1012
- 5 V C Vanderbilt, L. Grant, C. S. T. Daughtry. Polarization of light scattered by vegetation[J]. *Proc. IEEE*, 1985, **73**(6): 1012~1024
- 6 W G Egan, O Liu. Polarized MODTRAN 3. 7 applied to characterization of ocean color in the presence of aerosols[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4481**: 228~241
- 7 Stephanie H Sposato, Matthew P Fetrow. Two long-wave infrared spectral polarimeters for use in understanding polarization phenomenology[J]. *J. Opt. Engng.*, 2002, **41**(5): 1055~1064
- 8 R G Priest, S R Meier. Polarimetric microfacet scattering theory with applications to absorptive and reflective surfaces[J]. *J. Opt. Engng.*, 2002, **41**(5): 988~993
- 9 D H Goldstein. Polarimetric characterization of federal standard paints[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4133**: 112~123
- 10 J Lorsignol, P Hollier, J P Desshayes. Polarisation and directionality of the Earth's reflectances; the POLDER instrument [C]. *Proc. SPIE*, 1991, **1490**: 155~165
- 11 Earth Observing Scanning Polarimeter (EOSP), *Phase-B Final Report*. R. Contract No. NAS5-30756, CDRL Sequence Number 3, DM LB87-0016, SBRC Reference No. 90-1056, 1990
- 12 H G berry, A E Livingston. Measurement of the Stokes parameters of light[J]. *Appl. Opt.*, 1979, **16**(12): 3200~3205
- 13 G Rondequx, M Herman. Polarization of light reflected by crop canopies[J]. *Remote Sens. Environ.*, 1991, **38**: 63~75