

机载偏振遥感仪的偏振定标

邵卫东^{1,2)} 王培纲²⁾ 郑亲波²⁾ 施志华²⁾

(¹⁾苏州大学通讯与电子工程系,江苏,苏州,215021; ²⁾中国科学院上海技术物理研究所,上海,200083)

摘要 针对 $\lambda/4$ 云母波片的相位延迟量相对误差为3%~5%和一些云母片对于沿快轴和慢轴振动的光具有不同的吸收系数,设计了一套基于极值法的偏振标定系统,分析了波片快慢轴吸收系数和相位延迟量对输出光强极值的影响,得到了各个通道波片的标定结果.利用上述结果,对理想线偏振光和非偏光进行了定标,其偏振度误差均小于1%.

关键词 遥感,偏振度, $\lambda/4$ 波片,偏振定标.

POLARIMETRIC CALIBRATION ON AIRBORNE REMOTE SENSING POLARIMETER

SHAO Wei-Dong^{1,2)} WANG Pei-Gang²⁾ ZHENG Qing-Bo²⁾ SHI Zhi-Hua²⁾

(¹⁾Department of Communication and Electronic Engineering, Soochow University, Soochow, Jiangsu 215021, China;

²⁾Shanghai Institute of Technical Physics, CAS, Shanghai 200083, China)

Abstract Based on 3% ~ 5% relative errors of retarder for $\lambda/4$ mica waveplate and different absorption coefficients for the light oscillating along the fast axis and slow axis of mica waveplates, a polarimetric calibration system of the extremum method was proposed, and the influence of both waveplate retarder and its different absorption coefficients on the output light intensity was analysed. Precision measurement results of waveplates in six channels were obtained. The polarized degrees for the ideal linear polarized light and non-polarized light were calibrated on the basis of the above results, and the relative errors were less than 1%.

Key words remote sensing, degree of polarization, $\lambda/4$ wave plate, polarizing calibration.

引言

机载偏振遥感仪(中国科学院上海技术物理研究所研制)测量系统中的偏振元器件包括一个起偏器和一个 $\lambda/4$ 云母波片^[1].由于所用起偏器消光比高达 10^{-5} ,故可忽略起偏器给系统带来的误差.但 $\lambda/4$ 云母波片的相位延迟量误差通常为3%~5%,而且一些云母片是多向色的,即对于沿快轴和慢轴振动的光表现出不同的吸收^[2].因此本篇论文的偏振定标实际上就是对云母波片的精密标定.

6通道机载偏振遥感仪采用平行结构方案,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40nm、50nm、30nm、100nm、120nm和100nm.

图1为各个通道的基本光路,来自目标的反射

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像.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,最后经会聚透镜将光束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.

1 系统模型分析

由于本系统是一个小视场测量系统,在准直镜后可视为平面波. Stokes 矢量 $S = (S_0, S_1, S_2, S_3)^T$ 可以完成描述准单色(或单色)TE平面光波的各种可能偏振态^[3].而式(1)中的 Stokes 衍生矢量 $S_{\text{deri}} = (I, D_L, D_C, \Theta)^T$ ^[4],其物理意义更为直观:光强(I)、线偏振度(D_L)、圆偏振度(D_C)和偏振椭率方位角(Θ).

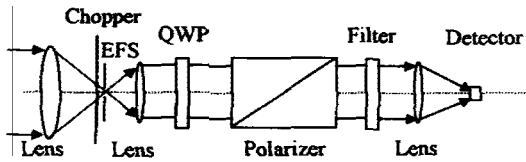


图1 偏振遥感仪单个通道光路图
Fig.1 Schematic diagram of remote sensing polarimeter

$$I = S_0,$$

$$D_L = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0},$$

$$D_c = \frac{S_3}{S_0},$$

$$\Theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right). \quad (1)$$

本文中 Stokes 衍生矢量受到极大重视,其原因是导出 Stokes 参量与待测目标反射或辐射的物理特性更有直接的相关性. 例如,偏振度可以得到待测目标表面材料和粗糙度的信息,而偏振椭圆率主轴方向可以描述目标的轮廓信息^[5].

对于透镜、球面镜这种形状是轴向对称,且与入射光束方向垂直放置的光学元件,在理想情况下并不改变入射光的偏振态. 对于图1所示的测量系统则可简化为图2所示的光路,其中 α 是起偏器透光轴与参考轴的夹角,而 β 为波片快轴与参考轴夹角.

由于偏振光沿着波片的快慢轴的 Fresnel 透射系数的不同,所有延迟器都有一个比较小的二向衰减. 一般线性延迟片可以等效为一理想延迟片和一线性二向衰减片(即部分起偏器)的组合. 应用 Mueller 矩阵表示式可以很容易得到光学系统与偏振相关的透射强度公式,其原因是透射强度明显表示成 Stokes 矢量的第一个分量 S_0 . 为了分析方便,一般取起偏器的透光轴方向为 Y 轴方向,即 $\alpha = 90^\circ$,这时的出射光强为^[3] I_{out}

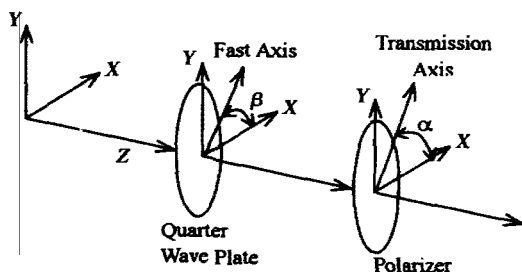


图2 偏振分析原理图
Fig.2 Geometry of the polarization analysis system

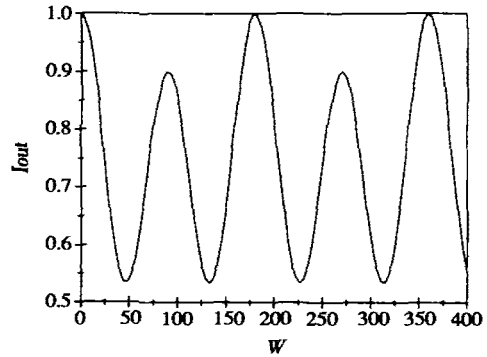


图3 相对光强(有二向色)
Fig.3 Relative intensity with diattenuation

$$I_{out} = \left[\frac{q+r}{4} - \frac{1}{8} D_L (q+r + 2\sqrt{qr}\cos\delta) \cos 2\Theta \right]$$

$$+ \frac{1}{4} [2D_c \sqrt{qr}\sin\delta + D_L (q-r) \sin 2\Theta] \sin 2\beta$$

$$+ \frac{1}{4} (q-r) (D_L \cos 2\Theta - 1) \cos 2\beta$$

$$- \frac{1}{8} D_L (q+r - 2\sqrt{qr}\cos\delta) \sin 2\Theta \sin 4\beta$$

$$- \frac{1}{8} D_L (q+r - 2\sqrt{qr}\cos\delta) \cos 2\Theta \cos 4\beta, \quad (3)$$

式(3)中 δ 是波片的延迟量, β 为波片的快轴方位角, q 和 r 分别为波片快慢轴方向的透过率, q 和 r 的比值反映了波片二向色性的大小.

从式(3)可以看出:包含圆偏振分量(D_c)的那一项正比于 $\sin\delta$,若 $\delta = m\pi$ 时,系统对 D_c 不敏感,因此在全偏振分析中一般选用 $\lambda/4$ 波片,而不采用 $\lambda/2$ 波片. β 值随着波片的转动而改变,可得到一组出射光的光强值 I_{out} . 由这组出射光强和对应的 β 值,通过曲线拟合法或离散傅里叶变换就可反演出入射光的线偏振度 D_L 、圆偏振度 D_c 和偏振椭圆率主轴方位角 Θ .

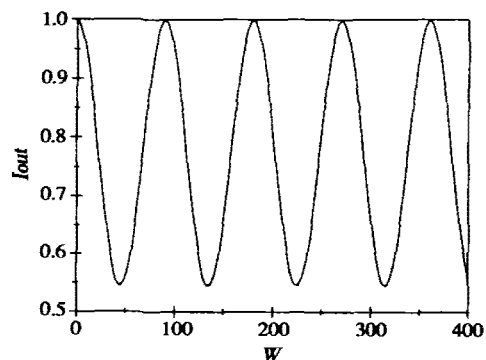


图4 相对光强(无二向色)
Fig.4 Relative intensity with no diattenuation

2 偏振定标

由式(3)可以发现出射光强 I_{out} 是 q, r, β 和 δ 的函数. 本系统中采用的 $\lambda/4$ 云母波片的相位延迟量 (δ) 误差通常为 3% ~ 5%, 其二向色性在某些波段范围内比较大, 因此必须对波片的延迟量和波片的二向色性 (q 和 r) 进行精密标定. 波片的位置 β 由步进电机驱动控制, 步进电机步距精度可达 0.01° , 这样波片的步距误差对整个系统的误差贡献可以忽略, 仅需标定出波片的起始位置 β_0 .

将归一化的衍生 Stokes 矢量 $(1, 1, 0, 90^\circ)^T$ 代入式(3)得

$$I_{out} = \left(\frac{q+r}{4} + \frac{1}{8}(q+r+2\sqrt{qr}\cos\delta) - \frac{1}{2}(q-r)\cos 2\beta + \frac{1}{8}(q+r-2\sqrt{qr}\cos\delta)\cos 4\beta \right) \quad (4)$$

图 3 为式(4)所对应的光强随波片转动的关系曲线, 图 4 为波片无二向色性时 ($q=r=1$) 光强随波片转动的关系曲线. 从图中可以看出: 在波片转动一周内, 出射光强有 4 个极小值和 4 个极大值; 波片无二向色性时, 4 个极大值为同一数值, 而波片有二向色性时, 4 个极大值为两两相等; 4 个极小值无论有无二向色性都为同一数值.

利用以上特性, 可以方便地导出波片的延迟量和二向色性的求解方法. 将式(4)对 β 求导, 并令其为零, 得

$$\sin 2\beta [(q-r) - (q+r-2\sqrt{qr}\cos\delta)\cos 2\beta] = 0$$

即 $\beta = k\pi (k=0, 1, 2, \dots)$ 时, 取得第一极大值 I_{max1}

$$I_{max1} = r \quad (5)$$

$$\beta = \frac{2k+1}{2}\pi (k=0, 1, 2, \dots) \text{ 时, 取得第二极大值 } I_{max2}$$

$$I_{max1} = q \quad (6)$$

$$\cos 2\beta = \frac{q-r}{q+r-2\sqrt{qr}\cos\delta} \text{ 时, 取得极小值 } I_{min}$$

$$I_{min} = \frac{q+r}{4} + \frac{\sqrt{qr}}{2}\cos\delta + \frac{(q-r)^2}{4(q+r-2\sqrt{qr}\cos\delta)} \quad (7)$$

由式(5)和式(6)可以标定波片的二向色性. 式(5)和式(6)表明: 当波片的快轴方向与起偏器方向一致时, 出射光强取得第一极大值 q ; 当波片的慢轴方向与起偏器的方向一致时, 出射光强取得第二极大值 r . 利用偏振光这一性质, 可以定出波片的起始位置 β_0 .

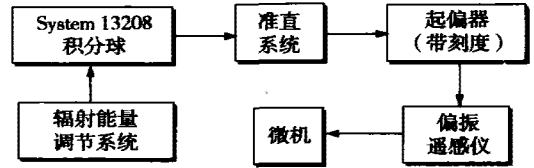


图 5 波片标定和偏振标定方框图
Fig. 5 Sketch diagram of wave-plate calibration and polarimetric calibration

在 δ 接近 90° 时, 式(7)中的第三项远远小于第一项, 故在 $\lambda/4$ 波片的延迟量标定时, 式(7)可近似为

$$I_{min} = \frac{q+r}{4} + \frac{\sqrt{qr}}{2}\cos\delta \quad (8)$$

联立式(5)、式(6)和式(8)得

$$\cos\delta = \left(\frac{4I_{min}}{I_{max1} + I_{max2}} - 1 \right) \cdot \frac{(q+r)}{2\sqrt{qr}} \quad (9)$$

若波片无二向色性时, 满足如下条件:

$$q = r \quad \text{且} \quad I_{max1} = I_{max2} = I_{max}$$

则

$$\cos\delta = \frac{2I_{min}}{I_{max}} - 1 \quad (10)$$

由式(9)或式(10)可定出波片的延迟量.

对波片精密标定的实验装置如方框图 5 所示, 起偏器(带刻度)的透光轴方向与偏振遥感仪中起偏器的透光轴方向一致(即与参考方向 X 轴成 90° 角). 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 $2.5\mu\text{m} \sim 0.3\mu\text{m}$, 完全能满足定标要求.

通过以上方法可对 6 个通道的波片进行精密标定, 其结果如表 1 所列.

表 1 波片标定结果
Table 1 Results of wave-plate calibration

	通道 1	通道 2	通道 3	通道 4	通道 5	通道 6
起始位置	64.7°	54.8°	6.1°	126.2°	156.8°	66.0°
延迟量	89.7°	88.6°	87.5°	92.1°	90.8°	88.5°
二向色	无	无	无	$q=0.96r$	无	$q=0.885r$

3 偏振定标结果

为了获得偏振定标结果, 采用图 5 所示的测量

系统. 旋转起偏器使得偏振椭圆率主轴方位角 Θ 改变, 而线偏振度 ($D_L \approx 1$) 和圆偏振度 ($D_C \approx 0$) 始终保持不变. Θ 从 0° 开始逐渐步进到 180° , 步进角为 30° (Θ 角可以是任意角, 步进角也不必是等间距), 得到 7 个不同 Θ 时的 Stokes 衍生矢量测量值.

表 2 给出了通道 4 ($1.38\mu\text{m}$) 定标的详细结果 (其他几个通道结果类似). 由表 2 的数据不难发现, 对于理想线偏光, 偏振遥感仪的偏振度误差小于 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), 偏振遥感仪的偏振度误差也小于 1%.

表 2 通道 4 定标结果 ($1.38\mu\text{m}$)

Table 2 Remote sensing polarimeter calibration of channel 4 ($1.38\mu\text{m}$)

Incident light		Deduced results			
$\Theta(^{\circ})$	D_L	$\Theta(^{\circ})$	D_C	Error of $\Theta(^{\circ})$	
0	0.9934	0.180	0.00506	0.180	$D_L = 0.997 \pm 0.004$
30	0.9992	29.359	0.00962	-0.641	
60	1.0015	59.294	0.00671	-0.706	
90	0.9908	90.595	-0.00510	0.595	$D_C = 0.002 \pm 0.005$
120	0.9995	120.519	-0.00294	0.519	
150	0.9997	150.015	-0.00289	0.015	
180	0.9940	0.4400	0.00613	0.440	

4 结论

对偏振遥感仪的精密标定是一项十分困难的工作, 偏振定标主要是标定各个通道 $\lambda/4$ 波片的起始位置、波片的精确延迟量以及波片的二向色性. 其偏振标定结果表明: 对于理想线偏振光 (线偏振度为 0.99998) 和自然光其偏振度测量准确度均小于 1%. 如果能研制出宽波带 ($0.40\mu\text{m} \sim 3.0\mu\text{m}$) 消色差 $\lambda/4$ 波片的延迟器, 那么偏振定标容易得多. 目前这项研究工作正在实施之中.

REFERENCES

- [1] SHAO Wei-Dong. Study on airborne remote sensing polarimeter. Doctoral dissertation, Shanghai Institute of Technical Physics. *China Academia of Sinica*. (邵卫东. 机载偏振遥感仪技术研究, 中国科学院上海技术物理所博士论文), 2002, 4, 21—22
- [2] LI Jing-Zhen. *Optical Handbook Shanxi*; Shanxi Science and Technology Publishing House (李进正. 光学手册. 山西: 山西科技出版社), 1986, 566—570
- [3] Azzam R M A, Bashara N M. *Ellipsometry and polarized light*. M. (North-Holland Publishing Company), 1977, Chap. 1
- [4] Matthew H Smith, Miranda A Miller, Robert V Blumer, et al. Infrared Stokes polarimeter calibration. *Proc. SPIE V*, 2000, 4133; 55—64
- [5] James D Howe, Maranda A Miller, Robert V Blumer, et al. Polarization sensing for target acquisition and mine detection. *Proc. SPIE*, 2000, 4133; 202—213