

一种高精度偏振遥感探测方式的精度分析

陈立刚, 洪津, 乔延利, 孙晓兵, 汪元钧

中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

摘要 检偏器的角度误差是影响偏振遥感探测精度的重要因素之一, 是许多高精度定量化偏振遥感需要考虑的一个问题。在检偏器(0°, 60°, 120°)放置的测量系统中, 当入射光偏振角接近于0°或180°时偏振测量易产生最大误差值, 而偏振角接近30°, 90°和150°时, 偏振度的测量具有很高的精度; 在检偏器(0°, 45°, 90°)放置方式中, 偏振角接近45°的光束测量易具有最大误差值, 而偏振角接近于0°, 90°和135°时, 角度误差对偏振度测量精度的影响很小。除了个别偏振角外, 对高偏振度入射光束的偏振测量通常具有较大的偏振测量误差。因此, 引进线偏振光的平均偏振度测量精度描述偏振测量装置的优劣, 结果表明检偏器(0°, 60°, 120°)放置方式优于检偏器(0°, 45°, 90°)放置方式。

关键词 偏振遥感; 偏振精度; 检偏器; 偏振度

中图分类号: TP73 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2008)10-2384-04

引言

20世纪90年代初, 法国LILLE大学研发了POLDER (polarization and directionality of the earth reflectance) 偏振仪, 后经法国航天局CNES支持进一步发展成航天偏振仪, 并于1996年搭载日本的ADEOS-1卫星发射升空。它一共设置了9个探测波段, 其中有3个波段(443, 670, 865 nm)为偏振通道, 偏振片-滤光片旋转快速旋转, 对每个通道分别获取相间60度的3个偏振方向数据^[1]。这些数据可以进行气溶胶特性的反映, 而气溶胶可以散射、吸收太阳辐射光, 以及作为云凝结核或改变云的光学性质和生存时间从而影响全球气候变化^[2-4]。2003年, 中国科学院安徽光机所研制成功了机载多波段偏振CCD相机, 获取了航空偏振图像。它采用了平行光路机构, 3个偏振方向即0°, 60°和120°的光筒成一字型排列, 在每个偏振角度上, 分别对目标采集一次图像, 从而可以获得同一目标、不同波段、三个偏振方向的图像数据^[5]。

尽管各种多波段偏振成像仪的光学结构有所差异, 但是它们的偏振测量核心部件通常是相同的, 即采用同一波段的滤光片与不同方位角的检偏器组合进行偏振探测。为了计算的方便, 常见的检偏器方位角还有(0°, 45°, 90°)放置方式, 这两种方式对角度误差的敏感性是不相同的。本文分析了偏振测量精度与检偏器的角度误差及入射光偏振度、偏振角的关系, 并通过引进线偏振光的平均偏振度测量精度评估了检偏器两种放置方式的优劣。

关系, 并通过引进线偏振光的平均偏振度测量精度评估了检偏器两种放置方式的优劣。

1 偏振遥感测量的基本原理

偏振光的偏振信息可以用Stokes矢量 $(I, Q, U, V)^T$ 表示, 其中 I 是非偏振光强, Q 和 U 分别代表两个方向上的线偏振光, V 代表圆偏振光。因为地物反射光中的圆偏振分量很小, 所以在遥感探测中通常假定 $V=0$ 。检偏器+滤光片是偏振遥感探测的重要组成部分, 如图1所示。

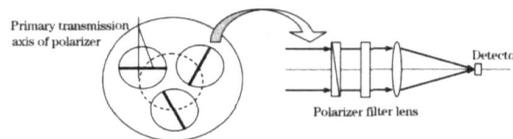


Fig 1 Primary optical picture of polarization measurement

任一 XOY 坐标平面, 在检偏器与 X 轴的夹角为 θ 的偏振通道上观测, 所得的强度可以表示为:

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

要获得不完全的斯托克斯向量, 对一个波段至少要测量3次。3个检偏器的透光轴方向角 θ 可以在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内任意取向, 因此可以构成无数测量矩阵。在偏振遥感探测中,

收稿日期: 2007-09-16, 修订日期: 2007-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(40671135)资助

作者简介: 陈立刚, 1977年生, 中国科学院安徽光学精密机械研究所在读博士研究生 e-mail: ligangchen896@yahoo.com.cn

经常见到 (0°, 60°, 120°) 和 (0°, 45°, 90°) 两种放置方式, 其对应的测量矩阵分别为:

$$A_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -0.5 & \sqrt{3}/2 \\ 1 & -0.5 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \text{ 和 } A_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

在反演斯托克斯向量时, 可建立线性方程组:

$$A \times S = b \quad (3)$$

其中: A 为 3 * 3 测量矩阵, S 是斯托克斯向量 (I, Q, U)^T, b 是探测器的输出强度向量。检偏器和滤光片的正确组合后, 通过轮子的转动达到间接测量斯托克斯向量的目的, 即由 (3) 式就可得到光束的斯托克斯向量。

2 角度误差对偏振探测的影响

实际应用中, 3 个检偏器的定位会有一些的误差, 下面以 (0°, 60°, 120°) 放置方式为例, 分析角度误差对测量精度的影响。对于实际中的偏振测量, 可建立线性方程组:

$$A \times S = b \quad (4)$$

$$\text{其中 } A = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2a & \sin 2a \\ 1 & \cos 2(\frac{\pi}{3} + b) & \sin 2(\frac{\pi}{3} + b) \\ 1 & \cos 2(\frac{2\pi}{3} + c) & \sin 2(\frac{2\pi}{3} + c) \end{bmatrix}, a, b, c$$

分别为 3 个检偏器的误差角度, S 为实际光束的斯托克斯向量 (I, Q, U)^T。易证明, 假如三个检偏器的角度误差相等, 则 P 的理论值始终等于地物反射光的偏振度 P 。因此可以假定初始位置 0 是准确的, 即 $a=0$ 。结合 (3) 和 (4) 两式可以得到测量值与实际斯托克斯向量的关系式:

$$S = A^{-1} \times A \times S \quad (5)$$

地物反射光束的斯托克斯向量可以用偏振度 (线偏振度) P 和偏振角 θ 表示, 即 ($I(1, P\cos(2\theta), P\sin(2\theta))^T$)。所以, (5) 式可以表示为:

$$\frac{1}{I} \begin{bmatrix} 1 \\ P \cos(2\theta) \\ P \sin(2\theta) \end{bmatrix} = A^{-1} \times A \times \begin{bmatrix} 1 \\ P \cos(2\theta) \\ P \sin(2\theta) \end{bmatrix} \quad (6)$$

实验中测量的偏振度 P 可以由 (6) 式中的第二行和第三行的平方根除以 $\frac{1}{I}$ 得到, 而 $\frac{1}{I}$ 可以由 (6) 式中的第一行得出, 即实际测量的偏振度 P 是关于三个检偏器的定位角度误差 a, b, c 和地物反射光的偏振度 P 、偏振角 θ 的函数。

$$P(a, b, c, P, \theta) =$$

$$\frac{\sqrt{(2 - \cos 2a - \cos 2b) P \cos 2\theta - (\sin 2a + \sin 2b) P \sin 2\theta}^2 + I(\sqrt{3} \cos 2a - \sqrt{3} \cos 2b) P \cos 2\theta + (\sqrt{3} \sin 2a - \sqrt{3} \sin 2b) P \sin 2\theta}^2}{3 + (1 + \cos 2a + \cos 2b) P \cos 2\theta + (\sin 2a + \sin 2b) P \sin 2\theta} \quad (7)$$

所以, 因角度的偏移误差所引起的最大偏振度误差可以表示为:

$$P = \left| \frac{\partial P}{\partial a} \right|_{a=45^\circ \text{ 或 } 60^\circ} + \left| \frac{\partial P}{\partial b} \right|_{b=90^\circ \text{ 或 } 120^\circ} \quad (9)$$

3 偏振探测系统性能指标的探讨

测量矩阵的条件数是方程组 $A \times S = b$ 的解 S 对测量系数矩阵 A 、右端 b 中数据有微小扰动时敏感性的一种量度。条件数越小, 测量矩阵的误差对反演斯托克斯向量的影响就越小。图 2 给出了检偏器取不同测量角度时对应的测量矩阵的 2-范数的条件数。可以看出: $b=1/6, c=1/3$ 或 $b=1/3, c=1/6$ 时, 测量矩阵的条件数最小且 $\text{Cond}(A_1)_2 = 1.4142$ 。

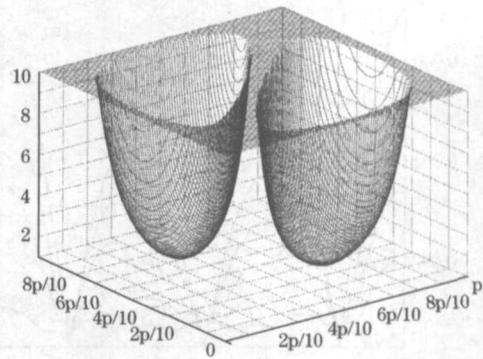


Fig. 2 Condition number of measurement matrices

偏振遥感探测中, 经常用到的还有 (0°, 45°, 90°) 放置方式, 其测量矩阵对应的 2-范数的条件数为: $\text{Cond}(A_2)_2 = 2.4142$ 。所以, 仅对反演斯托克斯向量的准确性来说, 检偏器的放置方式 (0°, 60°, 120°) 比 (0°, 45°, 90°) 要好, 且是最优的放置方式。但偏振遥感测量的最终目标是地物反射光束的偏振度, 用向量长度改变量或改变量的相对误差都不能很好的反映偏振度的测量精度。

假设检偏器相对于初始位置 0 的两个定位角度分别为 α 和 β , 其对应的测量方程组为:

$$A \times S = b \quad (7)$$

$$\text{其中: 测量矩阵 } A = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ 1 & \cos 2\beta & \sin 2\beta \end{bmatrix}, \text{ 结合 (7) 和 (3)}$$

式可以得到类似 (6) 式的矩阵方程:

$$\frac{1}{I} \begin{bmatrix} 1 \\ P \cos(2\theta) \\ P \sin(2\theta) \end{bmatrix} = A^{-1} \times A \times \begin{bmatrix} 1 \\ P \cos(2\theta) \\ P \sin(2\theta) \end{bmatrix} \quad (8)$$

按照以上同样的处理方法, 可以得到实际测量的偏振度为:

为了处理方便, 可以假设检偏器在实际中具有相同的安装角度误差 (采用法国 POLDER 的定位精度要求 10), 因此可以得到测量的偏振度误差随入射光的偏振角的变化曲线, 如图 3 所示。

从图 3 可以看出: (1) 在 $(0^\circ, 60^\circ, 120^\circ)$ 放置方式中, 当偏振角接近 0 或 180 时偏振测量具有最大误差值, 而偏振角接近 $30^\circ, 90^\circ$ 和 150° 时, 对偏振度的测量具有很高的精度, 即角度误差的影响很小; (2) 在 $(0^\circ, 45^\circ, 90^\circ)$ 方式中, 对偏振角接近 45° 的偏振度测量误差最大, 而偏振角接近 $0^\circ, 90^\circ$ 和 135° , 角度误差对偏振度测量的影响很小; (3) 通常情况下, 对高偏振度入射光束的偏振测量具有较高的测量误差 (除了以上接近于 0 的偏振度误差值所对应的几个特殊偏振角度外)。

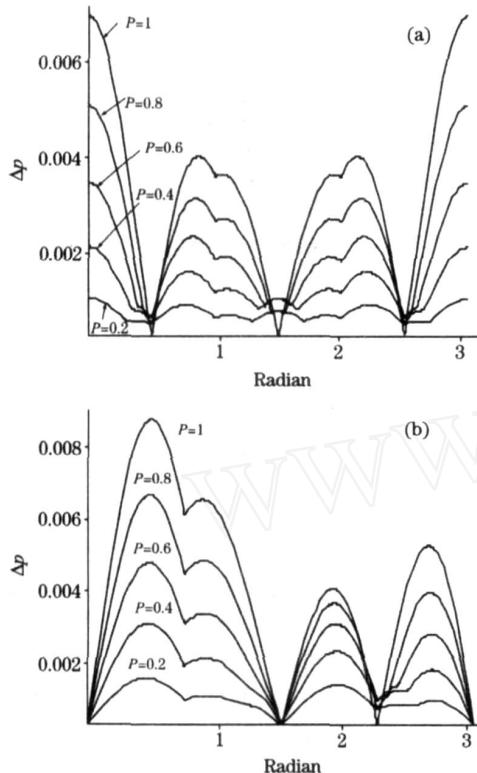


Fig 3 Dependence of degree of polarization error on polarization angle of incident light

(a): $(0^\circ, 60^\circ, 120^\circ)$, $\theta = 10^\circ$;

(b): $(0^\circ, 45^\circ, 90^\circ)$, $\theta = 10^\circ$

在偏振遥感探测中, 偏振度的测量精度会因光束的不同偏振态而发生变化, 即使偏振度等于 1 的光束在某些方位角处的测量精度也会高于非线偏振光的测量精度。低、中分辨率 CCD 相机的像元总是对应比较宽阔的地物目标, 而其反射光的偏振角通常总是随机的, 使得不同像元的测量精度也不一致。因此, 可以假定地物不同反射光束出现的偏振角几率是均等的, 则有

$$P = \frac{1}{\theta} \times P_d \quad (10)$$

其中: P 为平均偏振度误差, 它反映了测量系统对一确定

偏振度的入射光的测量精度。

表 1 为检偏器定位误差均为 10° 时, 两种放置方式的平均测量误差随入射光束偏振度的变化。可以看出, 对各种不同偏振度的入射光束来说, $(0^\circ, 60^\circ, 120^\circ)$ 方式要好于 $(0^\circ, 45^\circ, 90^\circ)$ 方式; 平均偏振度误差在偏振度等于 1 时取最大值, 即此数值可以在一般情况下作为评估系统测量部件偏振精度的一个指标 (称为平均偏振度测量精度)。

Table 1 Dependence of average error on degrees of polarization (angular error equal 10°)

偏振度	$(0^\circ, 45^\circ, 90^\circ)$	$(0^\circ, 60^\circ, 120^\circ)$
0.2	0.00070	0.00050
0.4	0.00143	0.00103
0.6	0.00220	0.00161
0.8	0.00304	0.00229
1	0.00397	0.00309

表 2 为两种检偏器放置方式下, 偏振测量部件的测量精度 (偏振度等于 1) 随不同角度误差的变化。可以看出在各种角度误差下, 检偏器的 $(0^\circ, 60^\circ, 120^\circ)$ 放置方式也要好于 $(0^\circ, 45^\circ, 90^\circ)$ 方式。

Table 2 Dependence of average error of degree of polarization on angular errors ($p = 1$)

角度误差	$(0^\circ, 45^\circ, 90^\circ)$	$(0^\circ, 60^\circ, 120^\circ)$
0.05°	0.12 %	0.09 %
0.10°	0.24 %	0.19 %
0.15°	0.36 %	0.28 %
0.20°	0.48 %	0.37 %
0.25°	0.60 %	0.46 %
0.30°	0.71 %	0.56 %
0.35°	0.83 %	0.65 %
0.40°	0.95 %	0.74 %

4 结束语

在偏振遥感探测中, 偏振度的测量精确受偏振测量部件的测量准确性和前面光学系统的偏振特性影响, 而这些影响又因入射光束的偏振态不同而有很大差异。为了避免入射光束的影响, 使用线偏振灵敏度 (LPS) 这一指标反映光学系统的偏振特性^[6], 类似地, 可以引用线偏振光的平均偏振度测量精度粗略地作为偏振测量部件的一个检测指标。

对于大视场的光学系统而言, 其偏振特性可以通过视场定标及辐射、偏振定标进行校正。但因检偏器的角度误差而产生的偏振测量误差是无法校正的, 所以检偏器的放置精度及放置方式很重要, 它是提高偏振遥感探测精度的关键问题之一。

参 考 文 献

- [1] Deschamps P Y, Herman M, Podaire A, et al. SPIE, 1992, 1746: 72.
- [2] Deuze J L, Breon F M, Deschamps P Y, et al. SPIE, 1992, 1747: 178.
- [3] Deuze J L, Goloub P, Herman M, et al. SPIE, 1997, 3121: 347.
- [4] Travis L D. SPIE, 1992, 1747: 154.
- [5] Luo R Z, Qiao Y L, Duan L F. Proceedings of SPIE, 2003, 4891: 442.
- [6] Waluschka E, Silverplate P, Ftaclas C, et al. SPIE, 1992, 1746: 96.

Accuracy Analysis on a Sort of Polarized Measurement in Remote Sensing

CHEN Li-gang, HONG Jin, QIAO Yan-li, SUN Xiao-bing, WANG Yuan-jun

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

Abstract Angular error of polarizer in polarimetric measurement is an important element affecting the measurement accuracy of degree of polarization, so angular error of polarizer should be considered in remote sensing of high-accuracy quantitative polarization. Simulation study shows that polarimetric measurement is relative to the polarization state (polarization angle or degree of polarization) of incident light in a specific measurement system of polarization. In the measurement mode of polarizer setting (0° , 60° , 120°), there is a maximum error of polarization measurement at the 0° or 180° polarization angle while a minimum error at the 30° , 90° and 150° polarization angle; In the measurement mode of polarizer setting (0° , 45° , 90°), there is a maximum error of polarization measurement near the 45° polarization angle while a minimum error at the 0° , 90° and 135° polarization angle. The larger degree of polarization of incident light often contributes to the bigger measurement error except for incident light with several polarization angles. So the polarization measurement may be evaluated by the average degree of polarization of linearly polarized light introduced in this paper. It is indicated that the measurement mode of polarizer setting (0° , 60° , 120°) is better than that of (0° , 45° , 90°).

Keywords Remote sensing; Polarimetric accuracy; Polarizer; Degree of polarization

(Received Sep. 16, 2007; accepted Dec. 28, 2007)