

文章编号: 1001-3806(2008)05-0468-03

基于双 Wollaston 棱镜的偏振测量系统的精度分析

陈立刚, 洪 津*, 乔延利, 孙晓兵

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要: 为了研究航天偏振辐射计的偏振测量精度, 从偏振参量的反演过程出发, 结合偏振辐射定标的方法, 得出 Wollaston 棱镜安装角度误差和因加工工艺等造成的光束非正交的角度误差对偏振测量有一定的影响。结果表明, 在角度误差一定的前提下, 偏振度测量误差随入射光偏振态的变化而变化; 当 Wollaston 棱镜角度误差都控制在 0.1° 内, 偏振度测量精度满足航天偏振辐射计的指标要求。

关键词: 测量与计量; 信息光学; 偏振度; Wollaston 棱镜; 遥感技术

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A

Accuracy analysis of polarimetric measurement based on double Wollaston prisms

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

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

Abstract In order to study the requirements of space polarizing radiometer on measurement accuracy of degree of polarization, the influence of angular error of Wollaston prism on degree of polarization is presented based on the inversion of the polarization parameters and the method of the radiometric calibration. The results show that measurement errors of degree of polarization change with polarization state of incident light while keeping angular error of Wollaston prism fixed. Measurement accuracy of degree of polarization meets the specification of space polarizing radiometer if the angular error of Wollaston prism is less than 0.1° .

Key words measurement and metrology; information optics; degree of polarization; Wollaston prism; remote sensing

引 言

偏振探测作为遥感探测中的一个新的研究领域备受关注。遥感利用的信息主要集中在电磁强度特性和几何特征, 但偏振完全可以作为遥感的另一维信息来源。偏振状态对于识别不同的地面目标、大气气溶胶、云层等, 都有极大的潜在信息^[1]。光学多角度偏振探测技术和基于多角度偏振信息的大气云和气溶胶反演方法均是国际航天遥感技术和应用的前沿^[2-6]。美国在地球观测系统 (earth observing system, EOS) 计划中的地球观测扫描偏振仪 (earth observing scanning polarimeter, EOSP) 能对全球大气进行偏振观测, 它可提供大气云、气溶胶状态分布和光学厚度等。该仪器装有成对出现的 Wollaston 棱镜, 且它们之间的夹角为 45° , 可以对目标同时获取 0° , 45° , 90° 和 135° 偏振方向的 4 束线偏振光。因此, 在仪器扫描过程中可以同时获取瞬时视场的多波段入射光的线偏振度、偏振角等偏振参量, 避免了因目标强度变化而带来的伪偏振

信息测量。自 2006 年以来, 中国科学院安徽光机所遥感室在民用航天和航空项目的支持下, 也进行了高精度偏振辐射计的研发工作。

为了准确地反演目标的特性, 偏振辐射计通常要求很高的偏振测量精度。Wollaston 棱镜作为偏振辐射计偏振测量的主要部件, 对它的安装精度及自身缺陷与偏振测量精度的关系研究是至关重要的。作者从偏振参量的反演过程出发, 结合偏振辐射定标的方法, 对影响偏振测量精度的 Wollaston 棱镜角度误差进行了研究, 这可以为航天偏振辐射计的设计提供参考。

1 偏振辐射计的偏振测量分析

1.1 偏振辐射计

偏振辐射计光学系统由正交扫描反射镜、望远准直系统、Wollaston 棱镜、分色系统、聚焦系统等部分组成, 如图 1 所示。来自目标的光辐射经由扫描反射镜和补偿反射镜引入望远准直系统, 经过 Wollaston 棱镜形成 o 光和 e 光分离, 经分色系统可分出多个光谱区, 再由聚焦系统将偏振光信号聚焦在探测器上, 在焦面附近利用滤光镜实现多波段的光谱偏振测量。

偏振辐射计的扫描系统采用正交反射镜结构进行偏振补偿, 即两块同样特性的反射镜正交放置, 大气目

作者简介: 陈立刚 (1977-), 男, 博士研究生, 主要研究方向是偏振遥感。

* 通讯联系人。E-mail hongjin@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2007-07-05; 收到修改稿日期: 2007-12-18

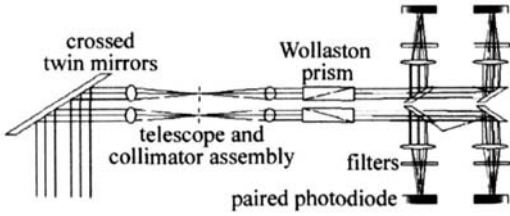


Fig 1 Optical path of polarizing radiometer

标的光辐射经过两次正交反射后,其偏振变化可以得到很好的补偿。望远准直系统采用小视场轴对称的光路,具有很好的空间偏振补偿作用。两个 Wollaston 棱镜是偏振测量的主要部件,它把入射光束调制为 0°, 45°, 90° 和 135° 的 4 束线偏振光,从而进行光束的偏振测量。分光系统的偏振特性对偏振测量不产生影响,通过辐射定标即可以进行校正。

1.2 偏振测量的原理

光束的偏振态可用 Stokes 参量表示,其中第 1 个参量为辐射总强度的度量,也是目前光学等遥感探测普遍使用的参量。第 2 个参量是水平、竖直偏振强度之差,第 3 个参量是与水平、竖直成 45° 偏振强度之差^[1]。每个 Wollaston 棱镜等效为两个检偏器,透过轴与 x 轴成 θ 角检偏器的 Muller 矩阵为:

$$M = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

Stokes 参量为 [I', Q', U'] 的光束经 Wollaston 棱镜调制为 0°, 90°, 45° 和 135° 的 4 束偏振光,它们在探测器上产生的灰度值(扣除暗电流)可以表示为:

$$\begin{cases} S_{1L} = A(I' + Q')/2 \\ S_{1R} = K_1 \times A \times (I' - Q')/2 \\ S_{2L} = C_{12} \times A \times (I' + U')/2 \\ S_{2R} = C_{12} \times K_2 \times A \times (I' - U')/2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} S_{1L} \\ S_{1R} \\ S_{2L} \\ S_{2R} \end{bmatrix} = \frac{A \times I'}{2} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ K_1 & -K_1 & 0 & 0 \\ C_{12} & 0 & C_{12} & 0 \\ C_{12} \times K_2 & 0 & -C_{12} \times K_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ P' \cos 2\phi' \\ P' \sin 2\phi' \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, P 为实际偏振度, φ 为实际偏振角。由 (4) 式和 (5) 式可以得到测量的偏振度 P' 和实际偏振度 P 之间的关系式:

$$P' = P \sqrt{(\cos 2\phi)^2 + (\sin 2\phi \cos 2\delta - \sin 2\delta \cos 2\phi)^2} \quad (6)$$

Wollaston 棱镜安装角度误差分别为 0.1°, 0.2°, 0.3° 和 0.4° 时,线偏振光的偏振度测量值随偏振角的变化曲线如图 2 所示。因两 Wollaston 棱镜角度误差产生的偏振度误差是没有办法通过定标校正的,所以为了保障 0.2% 的偏振测量精度, Wollaston 棱镜安装角度

式中,下标 1L, 1R 和 2L, 2R 分别代表两个偏振通道中的两个双元探测器; A 为绝对辐射定标系数, K₁ 表示 0°, 90° 偏振通道的探测器响应差异比, K₂ 表示 45°, 135° 偏振通道的响应比, C₁₂ 为以上两个偏振通道的响应比。

由 (1) 式可以反演入射光束的 Stokes 参量为:

$$\begin{cases} I' = \frac{S_{1L} + S_{1R} K_1}{A} = \frac{S_{2L} + S_{2R} K_2}{A \times C_{12}} \\ Q' = \frac{S_{1L} - S_{1R} K_1}{A} \\ U' = \frac{S_{2L} - S_{2R} K_2}{A \times C_{12}} \end{cases} \quad (3)$$

式中, K₁, K₂ 和 C₁₂ 可以通过积分球发出的非偏振光进行测定。

2 Wollaston 棱镜的角度误差影响

(2) 式用矩阵可以表示为:

$$\begin{bmatrix} S_{1L} \\ S_{1R} \\ S_{2L} \\ S_{2R} \end{bmatrix} = \frac{A}{2} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ K_1 & -K_1 & 0 & 0 \\ C_{12} & 0 & C_{12} & 0 \\ C_{12} \times K_2 & 0 & -C_{12} \times K_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I' \\ Q' \\ U' \end{bmatrix} = \frac{A \times I'}{2} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ K_1 & -K_1 & 0 & 0 \\ C_{12} & 0 & C_{12} & 0 \\ C_{12} \times K_2 & 0 & -C_{12} \times K_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ P' \cos 2\phi' \\ P' \sin 2\phi' \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, P' 是测量的偏振度, φ' 是测量的偏振角。当两个 Wollaston 棱镜安装产生 δ 的角度误差时,即其中一个 Wollaston 棱镜对入射光进行偏振分量时,偏离 45° 和 135° 的角度误差为 δ 用积分球定标的系数 K₁, K₂ 和 C₁₂ 不变,其测量方程可以表示为:

误差不能大于 0.1°。从 (6) 式可以很容易看出,对偏

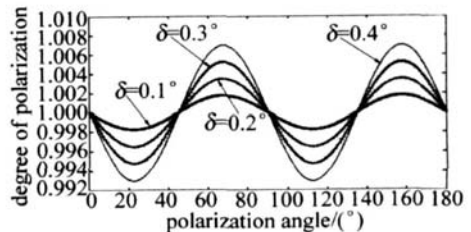


Fig 2 Relations between measured values of degree of polarization of linearly polarized light and polarization angle

振度较大的入射光束易产生较大的偏振度测量误差。

图3为Wollaston棱镜角度误差是 0.1° 时,偏振辐射计对偏振度分别为 1.0602 和 0 的4种入射光的偏振度测量误差(没有考虑光学系统的偏振影响)。

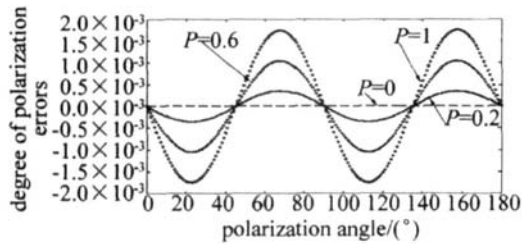


Fig. 3 Relations between measurement error of degree of polarization and polarization angle ($\delta = 0.1^\circ$)

由图2和图3可知:(1)随Wollaston棱镜角度误差的增大,偏振度的测量误差相应增大;(2)角度误差一定的前提下,偏振辐射计对线偏振度的测量误差最大,对自然光理论上不产生误差;(3)当角度误差取负值时,测量的偏振度、偏振度误差恰好与图2图3中的曲线关于x轴对称;(4)入射光束的偏振角为 0° , 45° , 90° ,

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ K_1 & K_1 \times \cos(180^\circ + 2b) & K_1 \times \sin(180^\circ + 2b) \\ C_{12} & C_{12} \times \cos(90^\circ + 2a) & C_{12} \times \sin(90^\circ + 2a) \\ C_{12} \times K_2 & C_{12} \times K_2 \times \cos(270^\circ + 2c) & C_{12} \times K_2 \times \sin(270^\circ + 2c) \end{bmatrix} \quad (7)$$

用(7)式置换(5)式的测量矩阵,可以得到此时测量的偏振度 P 和实际偏振度 P 之间的关系。图4为角度误差取不同数值时对应的线偏振度测量误差的变化曲线。可以看出:当两个Wollaston棱镜安装角度误差小

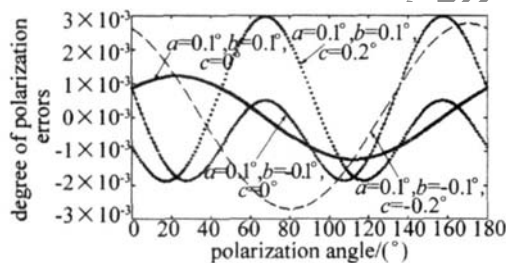


Fig. 4 Relations between measured values of degree of polarization errors of linearly polarized light and polarization angle

到因棱镜加工工艺等原因而造成光束非正交的角度误差时,偏振度测量误差随偏振角的变化比较混乱;入射光束的偏振角为 0° , 45° , 90° , 135° 时,偏振度测量误差将不一定出现最小值。实际测量中,大气目标的散射或反射光的偏振度通常小于 1 ,即偏振度测量误差比相应图4中曲线的数值要小。

4 结论

Wollaston棱镜的非理想光束分量导致了偏振度测量误差随入射光偏振态(偏振度或偏振角)的变化而变化。为了保障较高偏振测量精度的指标,航天偏

135° 时,Wollaston棱镜角度误差对偏振度的测量不影响;偏振角为 22.5° , 67.5° , 112.5° , 157.5° 时,Wollaston棱镜角度误差对偏振度的测量影响最大;(5)四象限探测器之间的影响差异、光学系统的透过率差异(偏振、信噪比影响除外)对偏振度的测量理论上不产生影响。

3 实际情况分析

理想的基于Wollaston棱镜的偏振测量系统,最重要的是对入射光 0° , 45° , 90° , 135° 偏振方向进行光束分离,分离后的空间光束传播路径(棱镜内及棱镜后)对偏振测量没有多大影响(可以通过辐射定标校正)。Wollaston棱镜是由两块光轴互相垂直的方解石或石英直角棱镜拼合而组成^[7-8],由于棱镜加工或光束非垂直入射等方面的原因,Wollaston棱镜对入射光并不一定是正交分束的,通常可以保障在 0.1° 内。综合以上因素考虑,Wollaston棱镜的作用可以等效为对入射光进行(0° , $45^\circ + a$, $90^\circ + b$, $135^\circ + c$, a , b , c 表示角度误差)偏振方向的光束分离,其测量矩阵为:

偏振辐射计的设计需要考虑很多因素,而Wollaston棱镜角度误差等产生的偏振度测量误差是很难通过定标校正的,所以为了保障 0.2% 的偏振测量精度,Wollaston棱镜安装角度误差不能大于 0.1° 。

参 考 文 献

- [1] QIAO Y L, YAN Sh Zh, LUO R Zh. Research on polarized spectral monitoring for remote sensing of earth [J]. High Technology Communication, 2001, 11(7): 36-39 (in Chinese).
- [2] TRAVIS L D. Remote sensing of aerosols with the earth observing scanning polarimeter [J]. SPIE, 1992, 1747: 154-164.
- [3] CARNS B, EDGAR E R, JOSEPH D L, et al. Research scanning polarimeter and airborne usage for remote sensing of aerosols [J]. Proc SPIE, 2003, 5158: 33-44.
- [4] CARNS B, EDGAR E R, LARRY D T. The research scanning polarimeter calibration and ground-based measurements [J]. SPIE, 1999, 3754: 186-196.
- [5] CARNS B, LAVEIGNE J R A E L, et al. Atmospheric correction of hyperspec TIR measurements using the research scanning polarimeter [J]. Proc SPIE, 2004, 5432: 95-105.
- [6] CHOWDHARY J, CARNS B M, SHCHENKO M I, et al. Constraining aerosol single scattering albedos from multiangle, multispectral photopolarimetric observations over the ocean [J]. Proc SPIE, 2004, 5571: 127-139.
- [7] ZHU H F, SONG L K, WU F Q, et al. Calculation of the splitting angle of Wollaston prism by means of coordinate conversion [J]. Laser Technology, 2003, 27(4): 362-364 (in Chinese).
- [8] ZHOU J, SU G Y, SHI R Y. The influence of adjustable beam splitting prism on laser beam [J]. Laser Technology, 2002, 26(1): 75-78 (in Chinese).