

基于 LCVR 调谐的全偏振多谱段成像系统

张颖, 赵慧洁, 程宣, 熊胜军

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191

摘要 提出一种新型全偏振多谱段成像系统, 将液晶相位可变延迟器 LCVR 应用于全偏振成像技术, 在可见-近红外波段上可快速实现光的全偏振态的精确调制。系统由光学镜头、LCVR、偏振片、滤波片和 CCD 探测器组成。文章首先介绍了系统结构、工作原理和光学设计, 并提出了适合本系统的偏振定标方法, 建立了偏振定标系统, 实现了利用较小面积的偏振源对系统进行高精度偏振定标; 再利用该成像系统进行了室外试验, 获取了全偏振光谱图像, 所获取的图像有较高的空间分辨率和光谱分辨率, 最后对图像进行初步的数据处理, 得到了被测物的偏振度图像。试验验证了该成像系统的全偏振多谱段数据成像获取能力, 成像数据可应用于目标识别、目标分类等方面的分析。

关键词 光学系统设计; 液晶相位可变延迟器; 偏振定标; 偏振光谱遥感

中图分类号: TH74 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1009-0593(2011)05-1375-04

引言

偏振成像遥感从本质上是太阳光经大气层后入射到物体表面上, 被物体表面反射后, 反射光电矢量的垂直分量和平行分量的偏振态(振幅、相位)发生变化, 根据反射光偏振态的变化规律和变化量来达到探测、识别的目的。偏振成像遥感技术不仅能够反映目标的纹理、结构、粗糙度、含水量、材料的理化特性、各向异性等, 还可以探测大气气溶胶、云的特性, 具有广泛的发展和应用前景^[1-8]。

目前, 最常用到的偏振成像系统是基于机械旋转的偏振片式类型, 包括 1996 年由日本 ADEOS 卫星携带进入空间轨道运行的第一个可以获得偏振光观测的星载对地探测器 POLDER^[9]、上世纪末美国发射的地球观测系统航天器上安装的地球观测扫描偏振计(EOSP)^[10]、2003 年美国亚利桑那州立大学光学研究中心研制的快速成像偏振仪^[11]、2005 年美国亨茨维尔市偏振传感器研究中心研制的红外成像偏振仪^[12]、2003 年中科院安徽光机所研制的在国内首次获得了航空光谱偏振图像的多波段偏振 CCD 相机系统等^[13]。该类型偏振成像系统具有较大的视场角, 但只能对线偏振光进行探测, 并且需要通过机械旋转装置来实现其偏振器件对入射光偏振态的调制, 要求相机和旋转器件具有同步性, 这种系统对入射光偏振态的调制精度不够高、帧频速度较低, 系统的可靠性不高, 并且体积较大。因此, 发展新的偏振成像遥

感设备就显得十分迫切。文中提出一种全偏振多谱段成像系统, 用电调谐的液晶相位可变延迟器 LCVR(liquid crystal variable retarder)代替机械偏振片转轮, 可快速实现光的全偏振态的精确调制, 相对于传统的偏振片, 体积功耗小、重量轻、工作波段宽, 能满足某些特定应用需求。

1 系统设计

1.1 系统结构

基于 LCVR 调谐的全偏振多谱段成像系统由光学镜头、LCVR、偏振片、滤波片和 CCD(charge coupled device)探测器组成。图 1 是系统结构图。系统的工作原理为, 地物反射的太阳光经过前置光学镜头, 在其焦平面上一次成像, 然后再经全偏振测量组件、滤波片后由后置镜头二次成像在 CCD 面阵探测器, 通过图像采集卡完成对 CCD 相机输出的目标图像数据采集、传输, 最后存储在硬盘上。其中全偏振测量组件由两片 LCVR 以及其后的偏振片组成, 采用 LCVR 是因为通过电压控制就能实现其对光的偏振态的调制、无需机械旋转装置、调谐精度高速度快、工作波段宽、透过率高、功耗低, 通过单焦面成像即可对地物实现高精度的偏振光谱成像探测^[14, 15]; 由电机控制的旋转滤光轮上的滤波片可以选择与被测对象相对应的六个可见光至近红外特征波段; 通过计算机控制 LCVR 的延迟值, 设置 4 组不同的相位延迟值, 采集相应的图像得到四个图像强度值, 构成一个线性方程

收稿日期: 2010-07-27, 修订日期: 2010-11-08

基金项目: 国家(863 计划)项目(2008AA121102), 长江学者和创新团队发展计划(IRT0705)资助

作者简介: 张颖, 女, 1979 年生, 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院光电工程系讲师 e-mail: yingzhang@buaa.edu.cn

©1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

组, 利用矩阵反演得到斯托克斯矢量的四个分量 I , Q , U , V 的值, 完成入射光的全偏振参量探测。

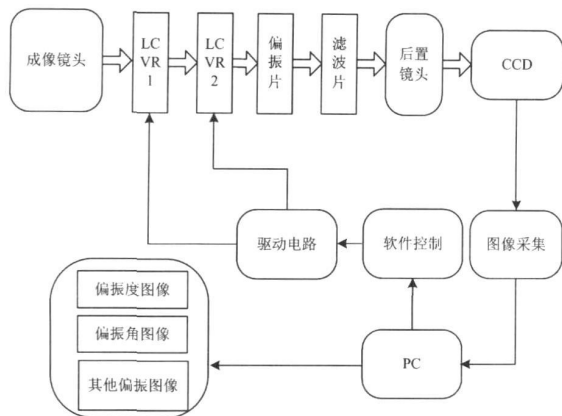


Fig 1 Diagram of the imaging system with LCVR

1.2 光学设计

全偏振多谱段成像探测系统要求光学系统具有高的成像质量和高的光能透过率, 同时偏振光学系统对大的入射角都非常敏感。对于 LCVR 器件, 根据其产生的相位延迟与入射角之间的关系, 设定 LCVR 上的入射角小于 5° 。本文采用了两次成像光路系统以满足 LCVR 对入射角的要求, 并在光学设计过程中, 通过偏振像差补偿技术、薄膜优化和光线入射角度优化相结合的方法来降低光学系统的偏振像差, 以保证系统的成像质量和全偏振探测的精度。光学系统结构示意图如

$$M_{LCVR} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\phi + \sin^2 2\phi \cos \delta & \sin 2\phi \cos \delta & 0 \\ 0 & \sin 2\phi \cos \delta (1 - \cos \delta) & \sin^2 2\phi + \cos^2 2\phi \cos \delta & \cos 2\phi \sin \delta \\ 0 & \sin 2\phi \sin \delta & -\cos 2\phi \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix}$$

则

$$S_{out} = M_{lens_behind} \times M_{LP} \times M_{LCVR2} \times M_{LCVR1} \times M_{filter} \times M_{lens_front} \times S_{in} = M \times S_{in} \quad (4)$$

式中, S_{out} 是出射光 Stokes 参量, M_{lens_behind} , M_{lens_front} 和 M_{filter} 分别表示前置镜头穆勒矩阵、后置镜头穆勒矩阵和滤光片的穆勒矩阵, 这几个矩阵都近似于单位矩阵。 M_{LP} , M_{LCVR2} 和 M_{LCVR1} 分别表示偏振片、LCVR2 和 LCVR1 的穆勒矩阵。 M 是整个系统的穆勒矩阵, 是一个与系统中各个器件参数的选取有关的矩阵。改变两个 LCVR 的电压值, 得到四组 LCVR 的相位延迟, 每组对应一个系统的穆勒矩阵 M 和一个可探测到的光强 I , 共有四个 M 和四个 I 。对于每个 M , 有关系式如下

$$\begin{pmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{pmatrix} = M \times \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_1 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \end{pmatrix} \quad (5)$$

图 2 所示。



Fig 2 Optical schematic diagram of the system

1.3 系统定标

为了根据偏振光谱成像探测系统的输出数据能准确得到目标反射光的光谱偏振特性, 必须对系统进行定标, 主要包括三个部分: 光谱定标、辐射定标和偏振定标。对于全偏振多谱段成像系统, 其光谱定标和辐射定标的原理和步骤与一般原理的光谱仪相同, 本文不再赘述。偏振定标需要定标的是系统的仪器矩阵, 即通过建立成像光谱偏振探测系统每个探测单元的输出信号与该单元对应的实际地物偏振信息之间的定量关系^[16], 从而建立每一个像元的辐射响应度公式和偏振响应度的仪器矩阵。

设入射光的 STOKES 偏振态为

$$S_{in} = (S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3)^T \quad (1)$$

理想偏振器穆勒矩阵为

$$M_{LP} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

LCVR 的相位延迟为 δ , 方向角为 ϕ (快轴方向与水平方向的夹角) 穆勒矩阵为

$$M_{LCVR} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\phi + \sin^2 2\phi \cos \delta & \sin 2\phi \cos \delta & 0 \\ 0 & \sin 2\phi \cos \delta (1 - \cos \delta) & \sin^2 2\phi + \cos^2 2\phi \cos \delta & \cos 2\phi \sin \delta \\ 0 & \sin 2\phi \sin \delta & -\cos 2\phi \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \quad (3)$$

CCD 能够探测到的是光强 I_1 , 即 Stokes 参量中的第一个分量 S'_0 。 I_1 是矩阵 M 的第一行与 $(S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3)^T$ 乘积的结果, 因此在计算时矩阵 M 中有用的只是第一行分量。将四个 M 的第一行分别提取出来, 组成一个新的 4×4 矩阵, 这个新的 4×4 矩阵就是仪器矩阵 $M_{INSTRUMENT}$, 表示为

$$M_{INSTRUMENT} = \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \quad (6)$$

有关系式

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (7)$$

其中 I_1 , I_2 , I_3 和 I_4 为探测到的四个光强。利用四组已知偏振态的入射光进入系统, 测出相对应的光强, 就可以计算出仪器矩阵中的全部 16 个参数。

基于上述定标原理, 结合本系统的实际情况, 本文提出了适合本系统的定标方法, 建立了如图 3 所示的偏振定标系统, 由积分球、平行光管、光阑、偏振态发生器、扩散器、准

直透镜、参考光强探测器和偏振态探测器组成, 实现了利用较小面积的偏振源对成像偏振光谱系统进行定标。

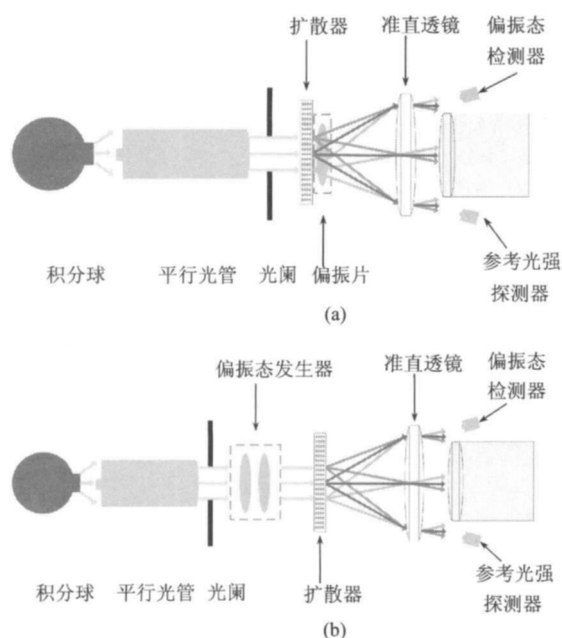


Fig 3 Schematic diagram of the calibrating system

定标过程分为两个部分: 利用线偏振态定标仪器矩阵前3列, 如图3(a)所示; 利用圆偏振态定标仪器矩阵第4列, 如图3(b)所示。具体偏振定标流程为: 首先按照图3(a)所示的原理框图搭建系统, 通过偏振态发生器产生四种线偏振态, 每种偏振态重复利用5次, 采集图像, 记录CCD上探测到的光强; 按照图3(b)所示再次搭建系统, 利用偏振态发生器产生两种圆偏振态, 同样每种偏振态重复利用5次, 采集图像, 记录CCD上探测到的光强; 根据数据记录结果得到Stokes系数矩阵和光强矩阵, 利用不等精度最小二乘法数据处理原理计算得到仪器矩阵。通过利用若干组不同于定标时采用的偏振态, 验证了该偏振成像系统的线偏振定标精度为2%, 圆偏振定标精度为10%。

2 试验及数据处理

2010年6月利用高度30 m的高楼平台, 安装该装置在配有180°旋转云台的三角架上, 倾斜观测被测物, 进行了试验并获取了全偏振多谱段图像数据, 试验中一组数据共6个波长。这里的数据处理是数据的初步处理, 所生成的全偏振多谱段图像可用于偏振光谱分析、目标识别、分类等。

进行室外拍摄时, 选取的目标是北医三院大楼, 楼表面以水泥、瓷砖和玻璃窗为主, 图4和图5为568和670 nm的局部图像数据, 包括光谱强度图和偏振度图, 并可以得到以下的分析结论: (1) 表面光滑的玻璃偏振度较大, 表面粗糙的墙体偏振度较小, 这是由于反射光的偏振态与目标材料的粗糙度有关; (2) 大角度观测下的“北医三院”字样偏振度较大, 小角度观测下的“医三院”字样偏振度较小, 这是由于正

对目标观测时偏振效应很小, 倾斜观测时偏振效应较为明显; (3) 不同波段的偏振效果是存在差异的。在568 nm波段, 大楼的玻璃表面和“北医三院”字样偏振效果明显, 在670 nm时其偏振效果减弱; (4) 在偏振度图像中, 边缘的信息较为明显, 能够较为明显的区分开来, 比如窗户的轮廓, 这是因为物体边缘的弯曲程度非常明显, 反射光的偏振态突变, 使得边缘灰度值产生突变。

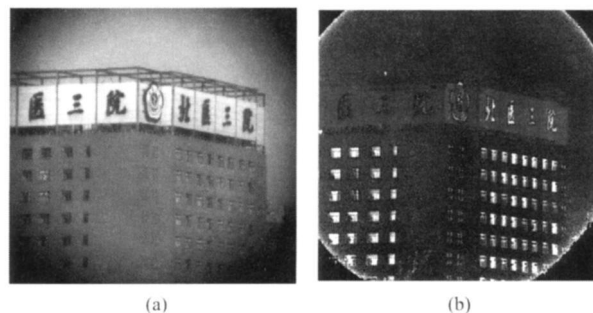


Fig. 4 568 nm polarization detecting images

(a): Image of spectral intensity;
(b): Image of polarization degree

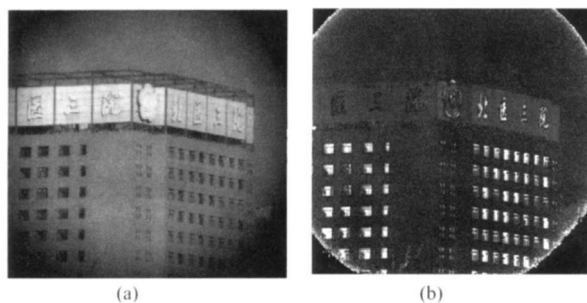


Fig. 5 670 nm polarization detecting images

(a): Image of spectral intensity;
(b): Image of polarization degree

3 结论

本文完成了由光学镜头、LCVR、偏振器、滤波片和CCD面阵探测器组成的全偏振多谱段成像系统的研制, 并提出了适合本系统的定标方法, 建立了偏振定标系统, 实现了利用较小面积的偏振源对全偏振多谱段成像系统进行定标, 线偏振探测精度为2%, 圆偏振探测精度为10%; 将该成像系统搭载在配有180°旋转云台的三角架上, 进行了室外试验, 可以获取地物反射的太阳光并成像, 获取了可见光400~700 nm带宽为20 nm的六个波长图像数据, 成像质量良好, 经初步的数据处理生成可用于偏振光谱分析等偏振光谱标准遥感图像数据。利用该成像系统来获取全偏振多谱段遥感数据是一种新的尝试, 结果表明偏振图像挖掘出了强度图像中许多隐藏的信息, 偏振度与物体材料属性、表面粗糙度、观测角、波段等依赖关系较强, 可更有效地应用于目标识别、目标分类等方面的分析。

References

- [1] GONG Jie-qiong, ZHAN Hai-gang, LIU Da-zhao(弓洁琼, 詹海刚, 刘大召). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2010, 30(4): 1088.
- [2] LIU Bi-liu, SHI Jia-ming, ZHAO Da-peng, et al(刘必鋈, 时家明, 赵大鹏, 等). Infrared(红外), 2008, 29(5): 5.
- [3] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D, et al. Applied Optics, 2006, 45(22): 5453.
- [4] Deuzé J L, Herman M, Goloub P, et al. Geophysical Research Letters, 1999, 26(10): 1421.
- [5] Deuzé J L, Goloub P, Herman M, et al. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(D12): 15329.
- [6] SUN Xian-ming, HA Heng-xu(孙贤明, 哈恒旭). Acta Physica Sinica(物理学报), 2008, 57(9): 5565.
- [7] CHENG Tian-hai, GU Xing-fa, CHEN Liang-fu, et al(程天海, 顾行发, 陈良富, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2008, 57(8): 5323.
- [8] Priest R G, Meier S R. Opt. Eng., 2002, 41(5): 988.
- [9] André Y, Laherrère J M, Bré-Dibat T, et al. Proceedings of SPIE, 1995, 2572: 79.
- [10] Travis Larry D. Proceedings of SPIE, 1992, 1747: 154.
- [11] Wolfe J, Chipman R A. Proceedings of SPIE, 2003, 5158: 24.
- [12] Harchanko J S, Chenault D B, Farlow C F, et al. Proceedings of SPIE, 2005, 5780: 399.
- [13] Sun Xiaobing, Hong Jin, Qiao Yanli. Proceedings of SPIE, 2005, 5832: 219.
- [14] Pust N J, Shaw J A. Proceedings of SPIE, 2005, 5888: 121.
- [15] DING Hai-bing, PANG Wen-ning, LIU Yi-bao, et al(丁海兵, 庞文宁, 刘义保, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2005, 54(9): 4097.
- [16] Rainer M E. Proceedings of SPIE, 2005, 5888: 0X1.

Design of Full-Polarized and Multi-Spectral Imaging System Based on LCVR

ZHANG Ying, ZHAO Hu-jie, CHENG Xuan, XIONG Sheng-jun

Key Laboratory of Precision Optomechanics Technology, Ministry of Education, School of Instrumentation Science & Optoelectronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China

Abstract A new full-polarized multi-spectral imaging system is described, which uses electronically controlled LCVR (liquid crystal variable retarder) to modulate the full-polarized state of light in the visible to IR range. The system consisted of optical lenses, LCVRs, filters and CCD. Firstly, the system structure, working theory and optical design are introduced in the present paper. A polarization calibration method is provided and the calibration system was set up, which realized high-precision polarization calibration using a small polarized source. Then, a field experiment with the imaging system was carried out. Polarized spectral images with higher spectral and spatial resolution were collected. Finally, the data acquired were rough processed to get polarization degree image of the targets. It is concluded that the experiment has proved that the imaging system is effective in obtaining full-polarized and multi-spectral data. The image captured by the system can be applied to object identification and object classification.

Keywords Optical system design; Liquid crystal variable retarder; Polarization calibration; Polarization spectral remote sensing

(Received Jul. 27, 2010; accepted Nov. 8, 2010)