

# 偏振三维成像仪的相对偏振方向定标方法

张月<sup>1\*</sup>, 张学敏<sup>1</sup>, 柳祎<sup>1</sup>, 李轩<sup>2</sup>, 张肃<sup>3</sup>, 俞越<sup>1</sup>, 焦建超<sup>1</sup>, 苏云<sup>1</sup>

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100094;

2. 西安电子科技大学 光电工程学院, 陕西 西安 710071;

3. 长春理工大学 空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 在介绍偏振三维成像机理、四孔径偏振三维成像仪组成的基础上, 开展四孔径相对偏振方向对偏振三维成像精度影响分析, 确定四孔径相对偏振方向精度要求。制定了四孔径镜头偏振片相对偏振方向定标方法和四孔径偏振三维成像仪相对偏振方向定标方法, 搭建了定标装置, 在实验室内开展了相对偏振方向定标。四孔径镜头偏振片相对偏振方向定标误差为 $\pm 0.5^\circ$ , 四孔径偏振三维成像仪相对偏振方向误差为 $\pm 1^\circ$ , 从而可保证偏振三维反演的法向量误差为 $-5.47\% \sim 5.80\%$ , 为偏振三维成像仪高质量成像提供保障。

**关键词:** 偏振三维成像; 相对偏振方向; 四孔径; 定标方法

中图分类号: O436.3 文献标识码: A

## Calibration method of relative linear deviation angle of polarization three-dimensional imager

ZHANG Yue<sup>1\*</sup>, ZHANG Xue-Min<sup>1</sup>, LIU Yi<sup>1</sup>, LI Xuan<sup>2</sup>, ZHANG Su<sup>3</sup>,  
YU Yue<sup>1</sup>, JIAO Jian-Chao<sup>1</sup>, SU Yun<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;

2. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

3. National and Local Joint Engineering Research Center for Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Based on introduction about principle of polarization three-dimensional image and components of four apertures polarization three-dimensional imager, the influence of four apertures relative polarization direction on polarization three-dimensional imaging accuracy was analyzed, to determine the accuracy requirements for four apertures relative polarization directions. The calibration method of relative polarization direction of four linear polarizers in four aperture lenses and calibration method of relative polarization direction of four apertures polarization three-dimensional imager was developed. The calibration device was built, and the relative polarization direction calibration was carried out in the laboratory. The calibration error of relative polarization directions of four linear polarizers in four aperture lenses was  $\pm 0.5^\circ$ . The calibration error of relative polarization direction of four apertures polarization three-dimensional imager was  $\pm 1^\circ$ . Thus, the normal direction error of three-dimensional polarization inversion can be guaranteed to be  $-5.47\% \sim 5.80\%$ , that would ensure high-quality imaging of four apertures polarization three-dimensional imager.

**Key words:** polarization three-dimensional image, relative polarization direction, four apertures, calibration method

## 引言

目标表面三维重建技术<sup>[1-3]</sup>近年来在工业、医疗、计算机虚拟现实以及航天等领域得到了广泛的

应用。然而一些新的三维重建应用需求的出现给现有三维重建技术提出了全新的挑战。目前, 根据成像模式可将目标表面三维重建技术分为基于光源调制的主动三维成像和基于立体视觉的被动三

收稿日期: 2022-05-14, 修回日期: 2022-08-28

Received date: 2022-05-14, Revised date: 2022-08-28

作者简介(Biography): 张月(1984-), 女, 河北衡水人, 高级工程师, 硕士学位, 主要研究领域为新型光学遥感技术。E-mail: yue3723302@126.com  
\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: yue3723302@126.com

维成像两类<sup>[4]</sup>。基于光调制的主动三维成像包括时间飞行法<sup>[5]</sup>、激光雷达三维成像<sup>[6]</sup>和结构光三维成像<sup>[7]</sup>,由于需要主动光源照明抗环境光干扰能力差、需要多次扫描实时性差等,难以满足安防监控、防灾减灾等对高精度三维表面信息重建的需求。基于立体视觉的被动式三维成像主要包括双目三维成像<sup>[8]</sup>和基于光场相机的三维成像<sup>[9]</sup>,由于相机基线或微透镜阵列间距决定了三维表面重建精度,难以满足深空探测、目标精细感知对远距离高精度三维表面信息重建的需求。偏振三维成像技术<sup>[10]</sup>,采用被动、偏振成像方式,利用菲涅尔定律建立反射光偏振特性与目标表面法线方向的函数关系来实现目标表面三维重建,由于无需主动光源照明、不受基线长度限制,可以较好地满足安防监控、防灾减灾、深空探测、目标精细感知等对远距离、高精度目标表面信息获取的应用需求。

在偏振三维成像中,需要先获取目标表面反射光在 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 线偏振方向的偏振特性,再通过反射光偏振特性与目标表面法线方向的函数关系,求解目标表面三维信息。影响偏振三维重建精度的关键因素有光学系统的保偏能力、探测器的消光比、线偏振方向的定标精度等,其中,偏振方向的定标精度对三维重建质量的影响较大,因此本文重点开展四个线偏振方向的定标精确对高精度目标表面三维重建的影响分析。目前国内外研究多孔径偏振三维成像机理与关键技术问题的相关成果较多,但研究多孔径偏振三维成像仪及相关定标测试方法的成果较少。在国内,杨斌等<sup>[11]</sup>对 $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$ 的三通道偏振成像仪的偏振测量误差进行定标,然而并未具体描述定标偏振方向的过程。高分五号卫星多角度偏振成像仪<sup>[12-13]</sup>,利用旋转滤光轮的方式,在490 nm、670 nm、865 nm每个波段上实现三个偏振解析角度的解析与重建,暂未有文献提到三个偏振解析角度的相对精度对成像精度的具体影响。郭忠义等<sup>[14]</sup>,利用一种三维超透镜,实现了四个线偏振同时聚焦在空间对称位置上。国内相关研究仅涉及偏振成像,但暂未涉及偏振三维成像仪偏振方向定标精度的相关研究。国外研究团队,如Daisuke等<sup>[15]</sup>在研究偏振度与表面法线的对应关系中,讨论了偏振度与入射角(即不同偏振方向)的关系,并对偏振度关于入射角的函数进行求导,获得了入射角与表面法线求解之间的理论关系。Gary等<sup>[16]</sup>在基于漫反射的表面法线方向校正研究汇总,

获得了入射角与漫反射偏振度之间的理论关系。国外涉及了偏振三维成像的相关理论,但暂未涉及多孔径偏振三维成像仪的相对偏振方向的定标研究。

本文研究了四孔径偏振三维成像仪的相对偏振方向定标方法。在推导出四孔径相对偏振方向与偏振三维成像精度关联模型基础上,确定四孔径相对偏振方向精度要求。利用单色激光器、偏振态测量仪、高精度可调标准线偏振片等组成相对偏振方向定标系统,分别对四孔径镜头偏振片相对偏振方向和四孔径偏振三维成像仪相对偏振方向进行定标,对定标精度进行了分析与验证。研究结果对多孔径偏振三维成像仪的相对偏振方向定标具有较好的指导意义。

## 1 偏振三维成像机理

偏振三维成像主要利用目标表面法线与目标表面反射光线偏振度之间的关系,实现目标外形三维重建。根据光波的反射定律、折射定律可知,光波在目标表面的传播方向由光波入射方向和目标表面形状决定,而菲涅耳公式及偏振度定义给出了目标表面反射光偏振度与光波入射方向之间的关系,因此可以根据目标表面反射光偏振度获取光波的入射方向信息。如图1所示<sup>[16]</sup>,光束入射到待重建目标表面后发生反射。由光的反射定律可知,入射光的入射角与反射角相等,均等于图1中的 $\theta$ 角。反射光传播方向为 $z$ 轴,探测器所在平面为 $xoy$ 平面。光线入射处目标表面法线 $\vec{n}$ 在 $xoy$ 平面上的投影为 $\vec{n}'$ ,与 $x$ 轴的夹角为 $\varphi$ 。 $\theta_{\text{pol}}$ 为偏振片相对于参考方向旋转的角度, $\phi$ 为探测器接收到的光强曲线的相位角。 $\varphi$ 为出射面在像平面内投影与像平面内 $x$ 轴所成的法线方位角,根据光波偏振特性可知其为出射光偏振相位角 $\phi$ 。

为了更直观地表示待重建目标表面法线 $\vec{n}$ 与入射角 $\theta$ 以及入射方位角 $\varphi$ 之间的关系,用极坐标形

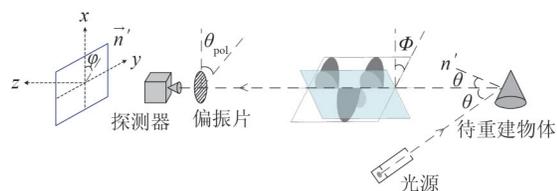


图1 目标表面法线测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of target surface normal measurement

式将图1中法线 $\vec{n}$ 表示为如图2的形式,其中入射角 $\theta$ 称为法线的天顶角,入射方位角 $\varphi$ 称为法线的方位角。

从图2中可知,天顶角和方位角共同决定了目标表面法线,其表达式为:

$$\vec{n} = -\frac{\partial}{\partial x} z(x,y)\hat{x} - \frac{\partial}{\partial y} z(x,y)\hat{y} + \hat{z} \quad , \quad (1)$$

$$\vec{n}_x = -\frac{\partial}{\partial x} z(x,y) = \tan \theta \cos \varphi \quad , \quad (2)$$

$$\vec{n}_y = -\frac{\partial}{\partial y} z(x,y) = \tan \theta \sin \varphi$$

其中 $\theta \in [0^\circ, 90^\circ]$ ,  $\varphi \in [0^\circ, 360^\circ]$ ,因此获取法线的天顶角和方位角后即可确定目标表面法线。

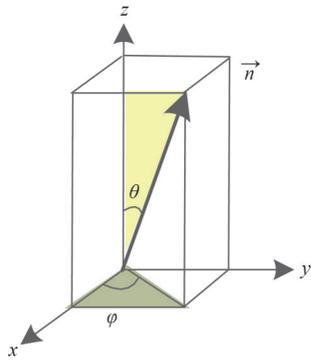


图2 目标表面法线极坐标表示

Fig. 2 Polar coordinates of the normal line in target surface

$z(x,y)$ 表示物体表面高度 $z$ 与直角坐标 $(x,y)$ 之间的关系,通过自然场景中物体表面漫反射偏振特性获取了微面元法线后获得。但由于目标表面通常存在不连续的轮廓结构,造成无法直接通过积分实现三维曲面的有效重建,因此建立基于Frankot-Chellappa算法的三维表面复原函数。其表面函数 $z(x,y)$ 可表示成一系列正交基函数 $\kappa(x',y',w)$ 的线性组合, $w=(w_x,w_y)=(u,v)$ 为二维形式。通过正交基函数的线性组合,其表面函数 $z(x,y)$ 可表示为式(3)所示形式,解决不连续表面的积分重建问题。

$$p_g(x,y) = \frac{\partial z(x,y)}{\partial x} = \sum_w \hat{C}_x(w) \kappa_x(x,y;w) q_g(x,y) = \frac{\partial z(x,y)}{\partial y} = \sum_w \hat{C}_y(w) \kappa_y(x,y;w) \quad , \quad (3)$$

$\hat{C}_x(w)$ 和 $\hat{C}_y(w)$ 为函数 $z(x,y)$ 的展开系数。为简化算法实现过程,选择具有完备正交基的傅里叶系数来进行展开,其基函数可表征为如下所示形式:

$$\kappa(x,y;w) = \exp\left(j2\pi\left(\frac{xu}{N} + \frac{yv}{M}\right)\right) \quad , \quad (4)$$

式中 $N$ 和 $M$ 分别表示二维图像的维度,此时通过对基函数进行傅里叶变换,结合式(3)可得表面函数的梯度场。其中, $u,v$ 为傅里叶变换后的坐标系。

$$p_g(w) = \left(\frac{2\pi u}{N}\right)^2 \quad q_g(w) = \left(\frac{2\pi v}{M}\right)^2 \quad , \quad (5)$$

由此可得物体表面函数 $z(x,y)$ 关于微面元点云梯度场 $(p_g, q_g)$ 的表示方式,如式(6)所示:

$$z(x,y) = F^{-1} \left\{ -\frac{j}{2\pi} \frac{\frac{u}{N} F\{p_g\} + \frac{v}{M} F\{q_g\}}{\left(\frac{u}{N}\right)^2 + \left(\frac{v}{M}\right)^2} \right\} \quad , \quad (6)$$

$F\{\}$ 和 $F^{-1}\{\}$ 分别代表离散傅里叶变换和逆变换。该模型通过傅里叶正交基的分解,将空域中分立的梯度场信息与表面函数信息在傅里叶域内建立联系以重建表面函数 $z(x,y)$ ,然后再求解目标表面高度信息。

## 2 仪器介绍

四孔径偏振三维成像仪由四个孔径通道组成,构型如图3所示。四个孔径通道和立方镜安装于一块基板上,基板与卫星平台连接。每个孔径通道的偏振镜头和电路盒组件相同,镜头为透射式系统。单个孔径通道按照光路方向从前向后主要包括遮光罩、透镜筒组件和电路盒组件等部分。

四孔径偏振三维成像仪的四个孔径通道由4台不同偏振方向 $(0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ)$ 的相机组成,每个孔径通道均采用透射式光学镜头、线偏振片结合面阵CMOS探测器实现偏振成像。每个孔径通道中线偏振片位于最后一块透镜和焦面前任意位置。偏振三维成像仪利用三个线偏振方向即可反演三维信息,为增强偏振信息获取能力,以有效保证偏振三维反演精度,四孔径偏振三维成像仪设置了四个线偏振方向。四个孔径通道光轴指向相同,视场相同且完全重叠,对远距离物体成像时,能够实现四个孔径通道实时获取相同物体的图像。

## 3 相对偏振方向对四孔径偏振三维成像精度的影响分析

### 3.1 数学模型

在实际应用中常使用斯托克斯参数所组成的斯托克斯矢量来表示光波的偏振状态。设 $I_0$ 为光束

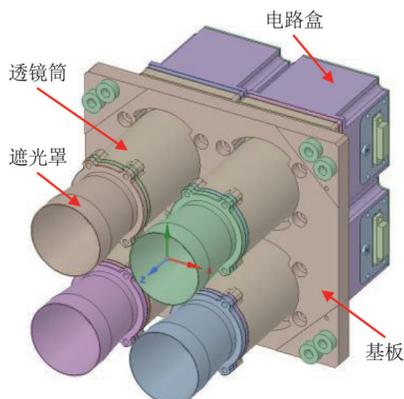


图3 四孔径偏振三维成像仪三维结构图

Fig. 3 3D structure of four apertures polarization 3D imager

中水平偏振部分强度,  $I_{90}$  为垂直偏振部分强度,  $I_{45}$  为  $45^\circ$  方向的偏振部分强度,  $I_{135}$  为  $135^\circ$  方向的偏振部分强度,  $I_R$  和  $I_L$  为右旋和左旋圆偏振部分强度, 则斯托克斯参数定义为:

$$\begin{aligned} S_0 &= I_0 + I_{90} & S_1 &= I_0 - I_{90} \\ S_2 &= I_{45} - I_{135} = 2I_{45} - (I_0 + I_{90}) & S_3 &= I_R - I_L \end{aligned} \quad (7)$$

根据偏振度定义, 偏振光的偏振度为

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (8)$$

$$P_{\Delta\theta_{pol}} = \frac{\sqrt{(I_{0+\Delta\theta_{pol}0} - I_{90+\Delta\theta_{pol}90})^2 + (2I_{45+\Delta\theta_{pol}45} - (I_{0+\Delta\theta_{pol}0} + I_{90+\Delta\theta_{pol}90}))^2}}{I_{0+\Delta\theta_{pol}0} + I_{90+\Delta\theta_{pol}90}} \quad (11)$$

由菲涅耳公式可知, 当完全非偏振光通过目标表面反射或折射时, 光波将发生起偏作用, 变为部分偏振光或者完全偏振光, 其中部分偏振光可以分为偏振光和完全非偏振光两部分。由马吕斯定律可知, 当旋转置于探测器前面的偏振片时, 在探测器上接收到的光强变化规律可表示为:

$$I = I_p \cdot \cos^2 \theta_{pol} \quad (12)$$

其中  $I$  表示透射光的光强,  $I_p$  表示反射光中的线偏振光光强, 有  $I_p = I_{\max} - I_{\min}$ , 其中  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$  分别表示在旋转偏振片过程中探测器能接收到的最大和最小光强,  $\theta_{pol}$  表示线偏振光振动方向与偏振片透光轴的夹角, 因此式(12)可以表示为:

$$I(\theta_{pol}) = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2} + \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2} \cos(2\theta_{pol} - 2\phi) \quad (13)$$

式(13)中  $\theta_{pol}$  即为偏振片相对于参考方向旋转的角度, 也就是四孔径镜头中偏振片的方向,  $\phi$  为所接收到光强曲线的相位角, 设定  $\phi=70^\circ$ 、 $I_{\max}=80$ 、 $I_{\min}=20$ 。利用式(13)可以求解  $I_{0+\Delta\theta_{pol}0}$ 、 $I_{45+\Delta\theta_{pol}45}$ 、 $I_{90+\Delta\theta_{pol}90}$ 。

其中,  $S_3$  与圆偏振有关, 在主要考虑线偏振光为完全偏振光的前提下可以忽略, 因此偏振度可以用斯托克斯参数表示为

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} = \frac{\sqrt{(I_0 - I_{90})^2 + (2I_{45} - (I_0 + I_{90}))^2}}{I_0 + I_{90}} \quad (9)$$

偏振光的偏振角为

$$\phi' = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right) \quad (10)$$

四孔径偏振三维成像仪的四个孔径视场重叠, 得到的是相同地物线偏振方向分别为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  的偏振图像。若线偏振方向准确, 可得到准确的  $I_0$ 、 $I_{45}$ 、 $I_{90}$ 、 $I_{135}$ , 进而得到准确的偏振度  $P$  值, 最终反演出准确的三维信息。设定  $\Delta\theta_{pol_0}$ 、 $\Delta\theta_{pol_45}$ 、 $\Delta\theta_{pol_90}$ 、 $\Delta\theta_{pol_135}$  分别为实测  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  偏振方向相对于标准方向的相对方向误差。线偏振方向不准确时, 得到的强度为  $I_{0+\Delta\theta_{pol_0}}$ 、 $I_{45+\Delta\theta_{pol_45}}$ 、 $I_{90+\Delta\theta_{pol_90}}$ 、 $I_{135+\Delta\theta_{pol_135}}$ , 得到的偏振度为  $P_{\Delta\theta_{pol}}$ 。可通过偏振度误差来分析反演三维信息的误差, 进而反推对相对线偏振方向定标精度的要求。由于  $I_{135+\Delta\theta_{pol_135}}$  可用其他三个线偏振方向的强度求取, 则  $P_{\Delta\theta_{pol}}$  为

由式(1)和式(2)可知, 目标表面法线方向由法线的天顶角和方位角确定, 而直接从四孔径偏振三维成像仪图像中得到的是四个线偏振方向的强度和偏振度信息, 以下通过分析天顶角和方位角与四个线偏振方向的强度和偏振度的关系, 建立相对线偏振方向定标精度对反演三维信息精度的影响模型。

#### (1) 天顶角的计算方法

物体表面反射光可分为镜面反射光和漫反射光, 在偏振三维成像研究初期, 研究人员大多利用镜面反射的偏振特性来进行物体的表面恢复, 但是镜面反射具有很强的方向性, 镜面反射的偏振度与入射角存在多值关系, 造成三维成像结果的不确定性<sup>[17]</sup>。Gary A Atkinson 等人<sup>[15]</sup>提出了利用漫反射光的偏振度来获得入射角, 漫反射光很大一部分是进入到物体表面然后经过物体内部传输而进入到空气中的光, 它不仅具有偏振特性, 而且偏振度与入射角还满足一一对应关系。入射光照射到物体表面会出现一次反射、多次反射、漫反射和衍射等情

况,其中对于漫反射情况,入射光为非偏光,在物体表面发生起偏效应,进入物体内部表层后,由于与内部微粒作用,发生退偏效应,变为无偏光,再经过物体表面出射到空气中时,又发生起偏效应变为偏振光。根据 Hancock 等人<sup>[18]</sup>对漫反射光进入物体表面内部再出射的传输过程分析,经过物体表面出射的漫反射光近似等同于折射光,如图4所示。

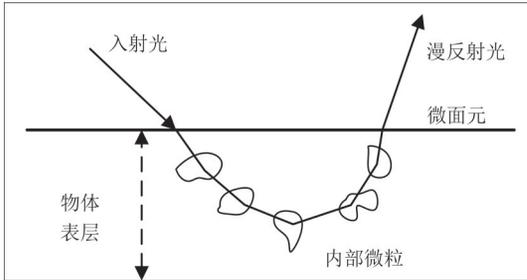


图4 漫反射光在物体表层内部传输过程  
Fig. 4 Transmission process of diffuse light inside an object

对于非均匀介质目标来说,其表面漫反射光主要是由入射光进入目标内部发生多次折射后再折射回到空气中的折射光组成,因此漫反射光的偏振度可以表示为折射光的偏振度。光波折射现象如图5所示,其中光线从目标内部出射时,出射光的入射角为 $\theta_i$ ,出射光的折射角为 $\theta$ (与从空气进入物体表面的入射光的入射角 $\theta$ 相同)即为法线的天顶角。

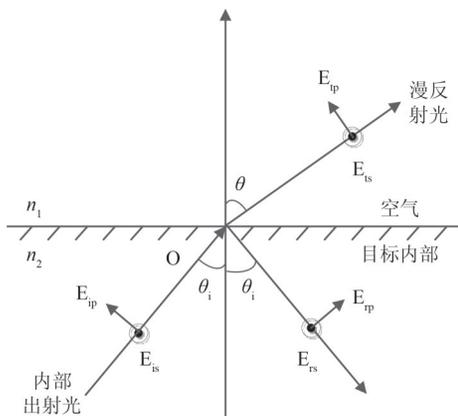


图5 光从目标内部折射到空气示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of light refracted from inside of the target to the air

根据偏振度的定义,即在光波的总强度中完全偏振光所占的比例,偏振度 $P$ 可以表示为:

$$P = \frac{I_1}{I_t} = \frac{I_M - I_m}{I_M + I_m} \quad (14)$$

其中, $I_1$ 表示部分偏振光中完全偏振光的总强度, $I_t$

表示光波的总强度; $I_M$ 和 $I_m$ 分别表示在两个正交方向上的最大和最小光强。

如图5所示,将光波分解成在垂直于入射平面上振动的 $s$ 分量和在平行于入射平面上振动的 $p$ 分量。光波 $s$ 分量和光波 $p$ 分量的折射率分别为:

$$T_s = \frac{\sin 2\theta_i \sin 2\theta}{\sin^2(\theta_i + \theta)}$$

$$T_p = \frac{\sin 2\theta_i \sin 2\theta}{\sin^2(\theta_i + \theta) \cos^2(\theta_i + \theta)} \quad (15)$$

根据式(14)和式(15)可得到折射光的偏振度 $P_t$ 与目标表面折射率 $n$ 和出射光入射角 $\theta_i$ 之间关系为:

$$P_t = \left| \frac{I_{tp} - I_{ts}}{I_{tp} + I_{ts}} \right| = \left| \frac{T_p - T_s}{T_p + T_s} \right| = \frac{T_p \left( \frac{1}{n}, \theta_i \right) - T_s \left( \frac{1}{n}, \theta_i \right)}{T_p \left( \frac{1}{n}, \theta_i \right) + T_s \left( \frac{1}{n}, \theta_i \right)} \quad (16)$$

利用折射定律将出射光入射角 $\theta_i$ 和出射光折射角 $\theta$ 进行转换,再根据菲涅耳定律可以得到目标表面漫反射光的偏振度为<sup>[19]</sup>:

$$P_t = \frac{(n - 1/n)^2 \sin 2\theta}{2 + 2n^2 - (n - 1/n)^2 \sin 2\theta + 4 \cos \theta \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \quad (17)$$

进而可得到出射光折射角 $\theta$ 即法线天顶角与漫反射光的偏振度和目标表面折射率的变化关系<sup>[20]</sup>。

$$\cos(\theta) = \sqrt{\frac{n^4(1 - P_t^2) + 2n^2(2P_t^2 + P_t - 1) + P_t^2 + 2P_t - 4n^3P_t\sqrt{1 - P_t^2} + 1}{(P_t + 1)^2(n^2 + 1) + 2n^2(3P_t^2 + 2P_t - 1)}} \quad (18)$$

已知目标表面折射率 $n$ 时,便可以根据式(18)求出相对偏振方向变化时的法线天顶角。

(2)方位角的计算方法

Stokes 矢量和偏振椭圆都可以用来描述偏振光,二者之间也可以相互转化,对比Stokes 矢量与光矢量末端轨迹偏振椭圆方程,可以用Stokes 矢量来描述该椭圆的几何参数,如式(19):

$$\tan 2\varphi' = \frac{S_2}{S_1} \quad (19)$$

由图6中Stokes 矢量与偏振椭圆之间的关系可以看出,偏振椭圆的偏振角 $\varphi'$ 即为反射光的偏振角 $\varphi$ (入射方位角)。所以方位角 $\varphi$ <sup>[21]</sup>为:

$$\varphi = \frac{1}{2} \begin{cases} \arctan(S_2/S_1) + 90^\circ, & S_1 \leq 0 \\ \arctan(S_2/S_1) + 180^\circ, & S_1 > 0 \quad S_2 < S_1, \\ \arctan(S_2/S_1) + 0^\circ, & S_1 > 0 \quad S_2 \geq S_1 \end{cases} \quad (20)$$

则入射方位角与相对线偏振方向的关系为:

$$\varphi_{\Delta\theta_{\text{pol}}} = \frac{1}{2} \begin{cases} \arctan\left(\frac{2I_{45+\Delta\theta_{\text{pol}_45}} - (I_0 + \Delta\theta_{\text{pol}_0} + I_{90+\Delta\theta_{\text{pol}_90})}{I_0 + \Delta\theta_{\text{pol}_0} - I_{90+\Delta\theta_{\text{pol}_90}}}\right) + 90^\circ, S_{1+\Delta\theta_{\text{pol}}} \leq 0 \\ \arctan\left(\frac{2I_{45+\Delta\theta_{\text{pol}_45}} - (I_0 + \Delta\theta_{\text{pol}_0} + I_{90+\Delta\theta_{\text{pol}_90})}{I_0 + \Delta\theta_{\text{pol}_0} - I_{90+\Delta\theta_{\text{pol}_90}}}\right) + 180^\circ, S_{1+\Delta\theta_{\text{pol}}} > 0 \quad S_{2+\Delta\theta_{\text{pol}}} < S_{1+\Delta\theta_{\text{pol}}} \\ \arctan\left(\frac{2I_{45+\Delta\theta_{\text{pol}_45}} - (I_0 + \Delta\theta_{\text{pol}_0} + I_{90+\Delta\theta_{\text{pol}_90})}{I_0 + \Delta\theta_{\text{pol}_0} - I_{90+\Delta\theta_{\text{pol}_90}}}\right) + 0^\circ, S_{1+\Delta\theta_{\text{pol}}} > 0 \quad S_{2+\Delta\theta_{\text{pol}}} \geq S_{1+\Delta\theta_{\text{pol}}} \end{cases}, \quad (21)$$

利用式(21)可求出相对偏振方向变化时的法线方位角。

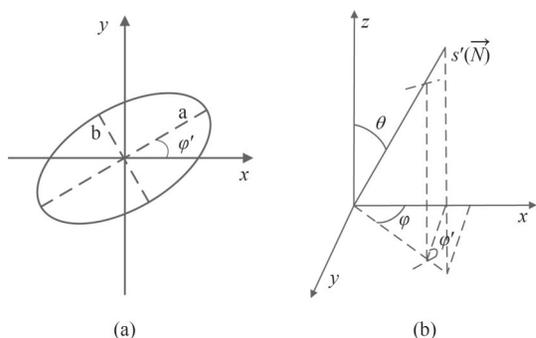


图6 (a)偏振椭圆示意图,(b)物体表面法线与偏振椭圆的几何关系示意图

Fig. 6 (a) Schematic diagram of polarization ellipse, (b) Schematic diagram of geometric relationship between normal line of object surface and polarization ellipse

### 3.2 影响分析

#### 3.2.1 相对偏振方向精度对天顶角的影响分析

设定四孔偏振三维成像仪四镜头中实测45°线偏振片与标准45°线偏振片的相对偏振方向误差为-1°至+1°,实测90°线偏振片与标准90°线偏振片的相对偏振方向误差为-1°至+1°。则实测90°线偏振方向与实测45°线偏振方向的相对方向误差为45°-2°至45°+2°。

对于大部分物质表面的电解质,折射率一般为1.4~1.6。利用式(18)计算天顶角 $\theta$ 随相对线偏振方向的变化曲线,如图7所示。以0°线偏振方向为基准方向,不同颜色曲线代表实测45°线偏振方向与标准45°线偏振方向的相对方向,横坐标为实测90°线偏振方向与实测45°线偏振方向的相对方向。图7中为横坐标数值表示清晰,横坐标数值中省去了45°,横坐标所示相对方向数值为45°与横坐标所示数值的和,即-2°表示的是45°-2°。在图7所示不同相对偏振方向下,天顶角 $\theta$ 变化范围为78.56°~79.76°。

#### 3.2.2 相对偏振方向精度对方位角的影响分析

利用式(21)计算方位角 $\varphi$ 随相对偏振方向的变

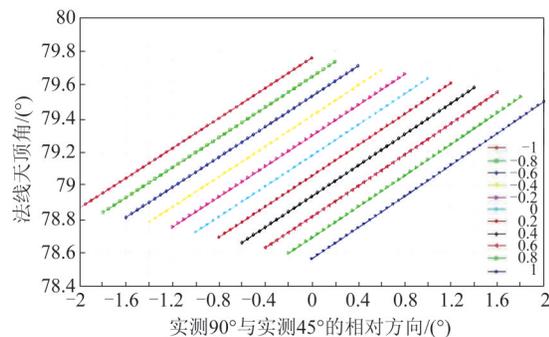


图7 天顶角 $\theta$ 随相对线偏振方向的变化曲线

Fig. 7 Variation curve of zenith angle  $\theta$  with relative polarization direction

化曲线,如图8所示。以0°线偏振方向为基准方向,不同颜色曲线代表实测45°线偏振方向与标准45°线偏振方向的相对方向,横坐标为实测90°线偏振方向与实测45°线偏振方向的相对方向,横坐标所示相对方向数值为45°与横坐标所示数值的和,即-1°表示的是45°-1°。在图8所示不同相对偏振方向下,方位角 $\varphi$ 变化范围为48°-52.2°。

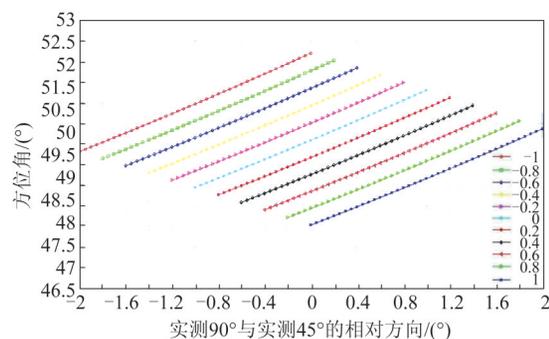


图8 方位角 $\varphi$ 随相对线偏振方向的变化曲线

Fig. 8 Variation curve of azimuth  $\varphi$  with relative polarization direction

#### 3.2.3 相对偏振方向精度对法向量的影响分析

利用式(1)以及图7天顶角 $\theta$ 随相对线偏振方向的变化曲线、图8方位角 $\varphi$ 随相对线偏振方向的变化曲线,计算偏振三维反演的法向量误差随相对线偏振方向的变化曲线,如图9所示。不同颜色曲线代表实测45°线偏振方向与标准45°线偏振方向

的相对方向,横坐标为实测 $90^\circ$ 线偏振方向与实测 $45^\circ$ 线偏振方向的相对方向,横坐标所示相对方向数值为 $45^\circ$ 与横坐标所示数值的和,即 $+0.5^\circ$ 表示的是 $45^\circ+0.5^\circ$ 。

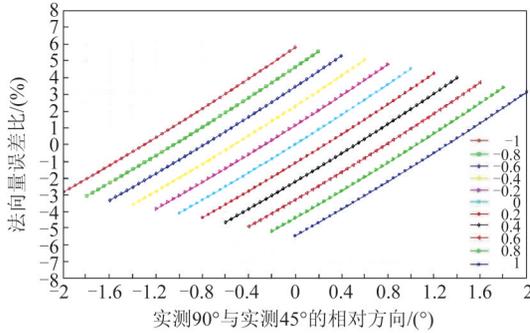


图9 偏振三维反演的法向量误差随相对偏振方向的变化曲线

Fig. 9 Variation curve of normal vector error of 3D polarization inversion with relative polarization direction

通过图9分析可知,以 $0^\circ$ 线偏振方向为基准方向,实测 $45^\circ$ 线偏振方向与标准 $45^\circ$ 线偏振方向的相对误差、实测 $90^\circ$ 线偏振方向与实测 $45^\circ$ 线偏振方向的相对误差,对偏振三维反演精度的影响分析结果为:偏振三维反演的法向量误差 $-5.47\% \sim 5.80\%$ 时,偏振三维反演精度在有效范围内,此时相对偏振方向需要不大于 $\pm 1^\circ$ 。所以相对线偏振方向的定标精度要求为不大于 $\pm 1^\circ$ 。

## 4 相对线偏振方向定标方法与实验结果

### 4.1 相对线偏振方向定标方法

相对线偏振方向的定标,主要包括标准线偏振片的定标、四孔径镜头偏振片相对线偏振方向定标,以及四孔径偏振三维成像仪相对线偏振方向的定标。

#### 4.1.1 标准线偏振片的定标方法

标准线偏振片的定标方法如图10所示,采用偏振态测量仪Thorlabs PAX5710对标准线偏振片进行定标,以偏振态测量仪为基准,确定初始 $0^\circ$ 、相对 $45^\circ$ 、相对 $90^\circ$ 和相对 $135^\circ$ 时,标准线偏振片的准确位置。采用的激光器型号分别为MGL-FN-532-50mW、MRL-FN-671-50mW,采用的标准线偏振片型号是25.4 mm的Thorlabs LPVISC100,偏振片旋转安装基座型号是Thorlabs CRM1P/M,标准线偏振片调节精度为 $0.04^\circ$ 。

标准线偏振片定标的具体方法为:按照图10搭建定标装置,保证光轴方向一致。利用532 nm激光

器照射标准线偏振片形成标准线偏振光,进入偏振态测量仪。调整标准线偏振片使得偏振态测量仪示数分别为 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ ,分别记录此时标准线偏振片的准确位置。更换671 nm激光器,重复操作,记录此时标准线偏振片的准确位置。

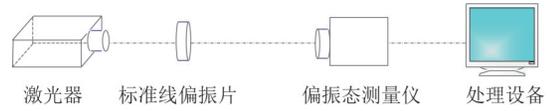


图10 标准线偏振片的定标方法

Fig. 10 Calibration method of standard linear polarizer

### 4.1.2 四孔径镜头偏振片相对偏振方向定标方法

四孔径镜头偏振片相对线偏振方向定标方法如图11所示,激光器与标准线偏振片位于升降台上,四孔径镜头位于水平平移台上。四孔径镜头分别编号为镜头1、镜头2、镜头3、镜头4,镜头里面分别安装了线偏振片。激光器出射光经标准线偏振片后,变为标准线偏振光,再经过镜头1内线偏振片后,进入偏振态测量仪。保证激光器出光方向、标准线偏振片垂面方向、镜头1中心视场光轴、偏振态测量仪光轴对齐。

选用532 nm激光器,将偏振态测量仪中谱段设置为532 nm。根据标准线偏振片定标结果,预设标准线偏振片位置,使其与四孔径偏振片方向均不消光。调整镜头1中线偏振片方向,直至偏振态测量仪示数为 $0^\circ$ ,固定镜头1线偏振片位置,暂不锁死。水平移动镜头1,对中心视场两侧各两个点(即左二点、左一点、右一点、右二点)进行测量,保证偏振态测量仪示数同为 $0^\circ$ ,将镜头1线偏片位置固定。分别对镜头2、镜头3、镜头4采用同样的方式进行定标,分别旋转镜头2、镜头3、镜头4偏振片位置,使偏振态测量仪示数分别为 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 和 $135^\circ$ 。

若无偏振态测量仪,可在背景光干扰小的暗室内,用光功率计替换偏振态测量仪,预设标准偏振片位置,旋转四孔径镜头偏振片,记录光功率计最小示数时标准线偏振片的位置,则对应孔径镜头偏振片方向即为与标准线偏振片垂直的方向。将标准线偏振片旋转 $45^\circ$ ,重复上述步骤,即可标定四孔径镜头偏振片。

### 4.1.3 四孔径偏振三维成像仪相对偏振方向定标方法

定标好四孔径镜头偏振片方向后安装探测器,

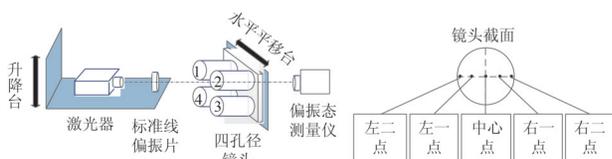


图11 四孔径偏振片相对线偏角度的定标方法原理图

Fig. 11 Calibration method of relative linear polarization angle of four apertures polarizer

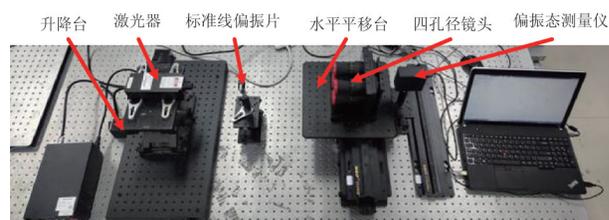


图12 四孔径偏振片相对线偏角度的定标方法实物图

Fig. 12 Physical diagram of calibration method of relative linear polarization angle of four apertures polarizer

进行同视场光轴校准、振动试验等,这些操作可能会造成镜头偏振片移动,需对四孔径镜头偏振片进行再次定标。由于整个四孔径偏振三维成像仪已经装调完成,四孔径镜头偏振片的位置无法调整、探测器无法拆卸,所以再次定标方法与上一节定标方法不同。

四孔径偏振三维成像仪相对线偏振方向定标方法如图13所示,四孔径偏振三维成像仪位于200 mm口径的积分球出光口中心位置,标准线偏振片位于两者之间。积分球出光面与标准线偏振片入光面平行,标准线偏振片出光面与四孔径偏振三维成像仪光轴垂直。由于积分球出射光的谱段较宽,四孔径偏振三维成像仪工作谱段相对较窄,为降低非工作谱段光线的影响,在待测试镜头前面加遮光罩,在标准线偏振片与积分球之间加带通滤光片。

利用平移台将标准线偏振片移动到覆盖镜头1全视场的位置,粗调标准线偏振片,找到使镜头1图像DN较小的位置,再精调标准线偏振片,使得镜头1图像DN值为最小时,记录标准线偏振片的位置。再利用平台将标准线偏振片移动到覆盖镜头2、镜头3、镜头4全视场的位置,重复上述操作,即可得到四孔径偏振三维成像仪相对线偏振方向定标结果。

为了抑制探测器响应非均匀性对线偏振方向定标精度的影响,将标准线偏振片移出光路,打开积分球,利用处理设备得到偏振三维成像仪四个孔径图像,用于非均匀性校正。为了降低四孔径偏振三维成像仪暗电流对定标精度的影响,在暗室内,

关闭所有光源,使四孔径偏振三维成像仪成像,获取暗电流信息。

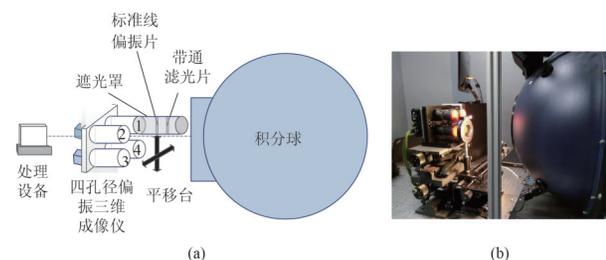


图13 四孔径偏振片相对线偏角度的定标方法(a)原理图,(b)实物图

Fig. 13 Calibration method of relative linear polarization angle of four apertures polarize (a) schematic diagram, (b) physical diagram

## 4.2 定标结果与分析

### 4.2.1 四孔径镜头偏振片的相对偏振方向定标结果与分析

利用图11和图12所示装置,入射光为532 nm、671 nm时,四孔径镜头偏振片相对偏振方向定标结果,如图14所示。

从四孔径镜头偏振片相对偏振方向定标结果可知,相对线偏振方向为 $-0.181^{\circ} \sim 0.499^{\circ}$ ,满足偏振三维反演精度对相对线偏振方向的要求。

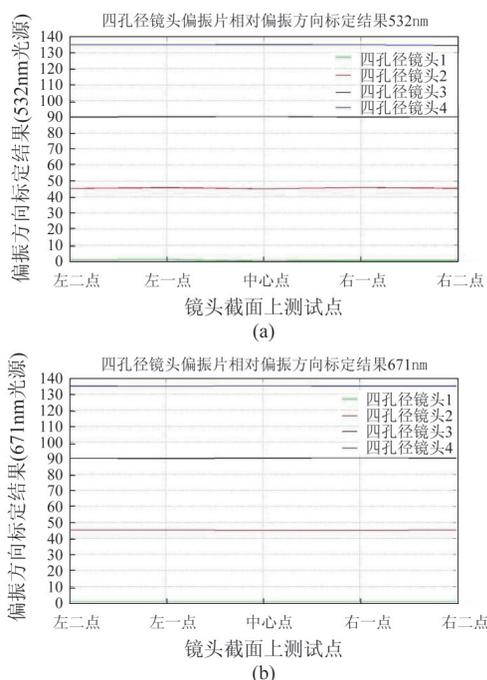


图14 四孔径偏振片相对偏振方向定标结果(a)532 nm光源,(b)671 nm光源

Fig. 14 Calibration result of relative linear polarization angle of four apertures polarizer (a) 532 nm laser, (b) 671 nm laser

#### 4.2.2 四孔径偏振三维成像仪的相对偏振方向定标结果与分析

利用图12所示装置,四孔径偏振三维成像仪相对偏振方向定标结果,如下表所示。

表1 四孔径偏振三维成像仪相对偏振方向定标结果(单位°)

Table 1 Calibration results of relative linear polarization angle of four apertures polarizer

	四孔径偏 振三维 成像仪通 道1	四孔径偏 振三维 成像仪通 道2	四孔径偏 振三维 成像仪通 道3	四孔径偏 振三维 成像仪通 道4
偏振方向	1.02	45.55	90.69	135.67
相对偏振 方向	1.02	0.55	0.69	0.67

从四孔径偏振三维成像仪定标结果可知,相对线偏振方向为 $0.55^\circ \sim 1.02^\circ$ 。经过整机振动等试验后,四孔径相对偏振方向误差增大,仍满足偏振三维反演精度对相对线偏振方向的要求。

## 5 结论

偏振三维成像仪四个孔径间线偏振方向的相对误差,会给偏振三维反演精度带来影响,通过对相对线偏振方向的定标,可以对偏振图像中偏振三维反演精度进行有效控制。本文建立了相对线偏振方向与偏振三维反演的数学模型,通过对相对线偏振方向对三维反演的精度影响分析,提出了对相对线偏振方向的定标误差范围的要求。建立了基于单色激光的四孔径镜头相对线偏振方向定标方法和基于积分球的四孔径偏振三维成像仪的相对线偏振方向定标方法,并在实验室条件下对四孔径偏振三维成像仪进行了定标,偏振三维成像仪的相对线偏振方向定标精度为 $0.55^\circ \sim 1.02^\circ$ ,此时偏振三维反演的法向量误差 $-5.47\% \sim 5.80\%$ ,偏振三维反演精度在有效范围内。通过定标实验可知,在定标过程中标准线偏振片的初始定标较为关键,会对此为基准进行相对线偏振方向定标造成初始误差,后续可考虑更为精准的标准线偏振片;积分球出射的是宽谱段光,而四孔径偏振三维成像仪采用的线偏振片对某一窄谱段消光效应最明显,选取适宜的带通滤光片,位于积分球出口处,以及抑制进入偏振三维成像仪各通道的杂散光,使得四孔径偏振三维成像仪线偏振片的完全消光位置获取的较准确,较

为关键。在后续的研究工作中,通过进一步优化定标方法,能够提升相对偏振方向的定标精度,从而实现更高精度的偏振三维反演。

## References

- [1] Nex F, Remondino F. UAV for 3D mapping application: a review [J]. *Applied Geomatics*, 2014, **6**(1):1-15.
- [2] Chen J, Bautembach D, Izadi S. Scalable real-time volumetric surface reconstruction [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2013, **32**(4):113.
- [3] LI Xuan, LIU Fei, SHAO Xiao-Peng. Research progress on polarization 3D imaging technology [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李轩, 刘飞, 邵晓鹏. 偏振三维成像技术的原理和研究进展. *红外与毫米波学报*), 2021, **40**(2):248-262.
- [4] Chen F, Brown G M, Song M. Overview of 3-D shape measurement using optical methods [J]. *Optical Engineering*, 2000, **39**(1):10-22.
- [5] WEI Jia-Li, QU Hui-Dong, WANG Yong-Xian, et al. Research review of 3D cameras based on time-of-flight method [J]. *Infrared Technology* (魏加立, 曲慧东, 王永宪, 等. 基于时间飞行法的3D相机研究综述. *红外技术*), 2021, **43**(1):60-67.
- [6] YUE Juan: Research on key technologies of laser 3D imaging [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences (岳娟. 激光三维成像关键技术研究. 上海:中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所)), 2017: 10-20.
- [7] SU Xian-Yu, ZHANG Qi-Can, CHEN Wen-Jing. Three-Dimensional Imaging Based on Structured Illumination [J]. *Chinese Journal Lasers* (苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术. *中国激光*), 2014, **41**(2): 1-10.
- [8] HAO Li-Ting, YANG Xing-Yu, WANG He-Long, et al. Real-time 3D point cloud imaging technology for long-distance target based on binocular stereo vision [J]. *Laser Journal* (郝丽婷, 杨兴雨, 王贺龙, 等. 基于双目立体视觉的远距离目标实时三维点云成像技术. *激光杂志*), 2019, **40**(12):14-18.
- [9] YIN Yong-Kai, YU Kai, YU Chun-Zhan, et al. 3D Imaging Using Geometric Light Field: A Review [J]. *Chinese Journal Lasers* (殷永凯, 于锴, 于春展, 等. 几何光场三维成像综述. *中国激光*), 2021, **48**(12):1-20.
- [10] Wolff L B. Surface orientation from polarization images [J]. *SPIE Optics, Illumination, and Image Sensing for Machine Vision II*, 1987, **850**:110-121.
- [11] YANG Bin, YAN Chang-Xiang, ZHANG Jun-Qiang, et al. Polarimetric calibration of multi-channel polarimetric imager [J]. *Optics and Precision Engineering* (杨斌, 颜昌翔, 张军强, 等. 多通道型偏振成像仪的偏振定标. *光学精密工程*), 2017, **25**(5):1126-1134.
- [12] CHEN Xing-Feng, Liu Li, GE Shu-Le, et al. Research progress for in-flight calibration of the large view polarized multispectral camera [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (陈兴峰, 刘李, 葛曙乐, 等. 大视场偏振光谱相机的在轨辐射定标研究进展. *光谱学与光谱分析*), 2020, **40**(2):343-349.

- [13] ZHENG Feng-Xun, HOU Wei-Zhen, LI Zheng-Qiang. Optimal estimation retrieval for directional polarimetric camera onboard Chinese Gaofen-5 satellite: an analysis on multi-angle dependence and a posteriori error [J]. *Acta Phys. Sin.* (郑逢勋, 侯伟真, 李正强. 高分五号卫星多角度偏振相机最优化估计反演: 角度依赖与后验误差分析. *物理学报*), 2019, **68**(4):1-16.
- [14] Guo Z Y, Xu H S, Guo K, *et al.* High-efficiency visible transmitting polarizations devices based on the GaN metasurface [J]. *Nanomaterials*, 2018, **333**(8):1-10.
- [15] Miyazaki D, Kagesawa M, Ikeuchi K. Transparent surface modeling from a pair of polarization images [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, **26**(1):73-82.
- [16] Atkinson G A, Hancock E R. Recovery of surface orientation from diffuse polarization [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(6):1653-1664.
- [17] Christophe S, Mathias F, Fabrice M. Shape from polarization: a method for solving zenithal angle ambiguity [J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(20):4218-4220.
- [18] Wolff L B, Boult T E. Constraining object features using a polarization reflectance model [J]. *IEEE transaction on pattern analysis and machine intelligence*, 1991, **13**(7):635-657.
- [19] Li X, Liu F, Han P L, *et al.* Near-infrared monocular 3D computational polarization imaging of surfaces exhibiting nonuniform reflectance [J]. *Optics Express*, 2021, **29**(10):15616-15630.
- [20] Smith A P W, Ramamoorthi R, Tozza S. Height-from-polarisation with unknown lighting or albedo [J]. *IEEE transaction on pattern analysis and machine intelligence*, 2018, **13**(7):1-13.
- [21] Wolff L B. Polarization vision: a new sensory approach to image understanding [J]. *Image and Vision computing*, 1997, **15**(2):81-93.