

引用格式: LI Zhenyang, ZOU Peng, LIU Zhenhai, et al. Geolocation and Correction Method for Dual Polarization Instrument on Same Platform[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(2):0212003

李朕阳, 邹鹏, 刘振海, 等. 同平台双偏振仪器地理定位及校正方法[J]. 光子学报, 2021, 50(2):0212003

## 同平台双偏振仪器地理定位及校正方法

李朕阳<sup>1,2,3</sup>, 邹鹏<sup>1,3</sup>, 刘振海<sup>1,3</sup>, 朱双双<sup>1,2,3</sup>, 雷雪枫<sup>1,2,3</sup>, 洪津<sup>1,2,3</sup>

(1 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学, 合肥 230026)

(3 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 合肥 230031)

**摘要:**在同一平台利用两种或以上不同偏振载荷进行联合观测,通过融合反演实现优势互补,可获取更高精度和质量的数据产品。若要实现两偏振载荷的联合探测和交叉定标系数传递,两者的视场匹配是需要解决的关键问题之一,为此搭建了基于高精度偏振扫描仪和同时偏振相机的航空验证系统,并开展了飞行验证实验。根据双偏振仪器观测几何和空间响应特性,通过坐标变换分别建立了观测像元与地理空间位置的对应模型,通过全球数字高程模型和仪器偏心校正对定位结果进行修正,分析了影响地理定位精度的误差源,建立了基于蒙特卡洛法的误差统计模型并完成了仿真计算。将该方法应用于机载同时偏振相机和高精度偏振扫描仪地理定位,分析了视场匹配后两仪器辐亮度和偏振度测量结果的一致性。结果表明采用该方法完成地理空间位置匹配后,双偏振仪器获取的偏振度偏差小于2%,辐亮度偏差小于5%,证明了该地理定位及校正方法的可行性与有效性,为后续星载偏振交叉探测地理定位的处理提供了有效途径。

**关键词:**地理定位;偏振测量;辐射测量;观测几何建模;同时偏振相机;高精度偏振扫描仪

中图分类号: V19;P407.4

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20215002.0212003

## Geolocation and Correction Method for Dual Polarization Instrument on Same Platform

LI Zhenyang<sup>1,2,3</sup>, ZOU Peng<sup>1,3</sup>, LIU Zhenhai<sup>1,3</sup>, ZHU Shuangshuang<sup>1,2,3</sup>,  
LEI Xuefeng<sup>1,2,3</sup>, HONG Jin<sup>1,2,3</sup>

(1 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institute of Physical Science,  
Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

(2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(3 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization of Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

**Abstract:** On the same platform, two or more different polarization loads are used for joint observation, achieving complementary advantages by fusion inversion so as to obtain data products with higher precision and quality. To achieve the joint detection and cross calibration transmission of two polarization loads, the field of view matching between them is one of the key issues that need to be solved. For this purpose, an aviation verification system based on the Particulate Observing Scanning Polarimeter (POSP) and the Simultaneous Imaging Polarization Camera (SIPC) is built, then the flight experiment is completed. According to the sensing geometry and spatial response characteristics of two-polarization instrument, the

基金项目: 王宽诚率先人才计划“卢嘉锡国际合作团队项目”(No.GJTD-2018-15)

第一作者: 李朕阳(1991—),男,博士研究生,主要研究方向为偏振探测与光学遥感技术。Email: lizheny@mail.ustc.edu.cn

导师: 洪津(1969—)男,研究员,学士,主要研究方法为偏振光谱遥感探测技术。Email: hongjin@aiofm.ac.cn

通讯作者: 邹鹏(1983—),男,副研究员,博士,主要研究方向为光谱/偏振遥感技术、航空/航天遥感技术与仪器。Email: pzou@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2020-06-28; 录用日期: 2020-11-09

<http://www.photon.ac.cn>

corresponding models of observation pixel and geographical spatial position are established by coordinate transformation, meanwhile, the geolocation result is corrected by the digital elevation model and the instrument misalignment correction. The error sources that affect the accuracy of geolocation are analyzed. Based on this, an error statistical model based on Monte Carlo method is established for simulation calculation. This method is applied to airborne SIPC and POSP geolocation, and the consistency of the measurement results between the two instruments is analyzed. The results show that the polarization degree deviation of the two polarization instruments is less than 2% and the radiance deviation is less than 5% after the geospatial locations is matched, indicating the feasibility and validity of the geolocation and correction method. It provides an effective way for the subsequent geolocation of spaceborne polarized crossfire detection.

**Key words:** Geolocation; Polarization measurement; Radiation measurement; Sensing geometry modeling; Simultaneous imaging polarization camera; Particulate observing scanning polarimeter

**OCIS Codes:** 120.0280; 080.1753; 120.5410

## 0 引言

由于大气粒子散射强偏振和弱光强的特性,近年来偏振探测技术在气溶胶遥感领域得到了广泛应用<sup>[1-4]</sup>。利用多传感器协同观测可弥补单传感器能力的不足,发挥综合探测能力,获取高精度的综合探测参数,是未来大气气溶胶观测的发展趋势<sup>[5-6]</sup>。

遥感数据地理定位是后续数据处理、量化应用及复合分析的基础和关键,建立传感器像元与地面观测目标的精确对应关系是数据预处理阶段的重要内容。传感器地理定位方法可分为非参数法和参数法,传统非参数定位方法依赖于精确地面控制点的选取,难以适用于业务化运行的星载、机载传感器。参数法根据传感器姿态信息和观测几何建立观测像元与地理空间位置的对应关系,是目前大部分星载传感器,如中分辨率成像光谱仪<sup>[7]</sup>、多光谱扫描辐射计<sup>[8]</sup>和风云三号C星微波成像仪<sup>[9]</sup>等普遍采用的方法,主要区别在于不同传感器光学结构、空间响应特性和轨道计算方法等的差异。机载遥感是星载遥感技术互补验证的有效手段,国内外学者针对机载平台地理定位也开展了大量的研究工作。BARBER D B等<sup>[10]</sup>提出基于地球平面模型的定位算法,由于未考虑地球曲率的影响,只适用于近距离定位。STICH E J等<sup>[11]</sup>通过地球椭球模型实现对地面目标的定位,该方法不依赖于激光测距装置,但目标区域高程信息变化较大时定位精度较低。乔川等<sup>[12]</sup>基于WGS-84坐标系定义的椭球模型进行目标定位,分析了视轴指向和大地高程对定位结果的影响,有效提高了地理定位精度。但未考虑仪器偏心的影响且缺乏同平台仪器比对验证。目前对于同平台多仪器的地理定位方法、视场匹配、误差评估与修正的研究工作相对较少。在涉及多传感器数据融合的应用场合,对观测视场的一致性要求更加严苛。与单个仪器地理定位相比,同平台需保证时间系统的一致性,更需要明确各仪器之间的相对位置关系。本文旨在通过地理定位的方法解决两机载偏振仪器的视场匹配问题,为后续偏振数据反演应用提供输入。通过地理定位方法完成两仪器的视场匹配,可将高精度偏振扫描仪(Particulate Observing Scanning Polarimeter, POSP)<sup>[13-14]</sup>定标数据传递给同时偏振相机(Simultaneous Imaging Polarization Camera, SIPC),提高其偏振探测精度。此外SIPC不具备短波红外波段探测能力,POSP可提供近红外通道偏振观测数据,从而获取不受大气影响的地表偏振反射率等参数,将POSP短波红外观测数据传递给SIPC,可解决气溶胶综合参数反演中的地-气解耦合问题。本文在前人研究的基础上,结合双偏振仪器的特点提出一种同平台的面阵成像式和非成像扫描式偏振传感器协同观测模式下的地理定位方法。通过惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)获取仪器采样时刻的位置和姿态信息,根据两仪器观测几何和空间响应特性分别建立了观测像元与地理空间位置的对应模型,通过全球数字高程模型和仪器偏心校正对定位结果进行修正。采用基于蒙特卡洛的不确定性概率分析算法进行仿真验证,并将该地理定位及校正方法应用于机载测试数据的视场匹配,验证其可行性和有效性。

## 1 双偏振仪器系统构成及观测几何

### 1.1 系统构成及主要参数

中科院遥感所李正强等<sup>[3]</sup>于2015年首次提出星载传感器“偏振交火”的大气气溶胶参数探测方案,所谓“偏振交火”即在同一观测平台上利用具备不同特点的偏振传感器,通过视场、光谱和时间等观测要素的匹

配进行联合探测,同步获取多光谱、偏振及多角度信息,从而进行高精度的大气气溶胶综合参数反演。

星载偏振交火方案由 POSP 和多角度偏振成像仪<sup>[15-16]</sup>(Directional Polarization Camera, DPC)同平台协同观测,提供被动直接遥感近地面 PM2.5 的基础输入数据。由于 DPC 通过运动补偿实现像元配准,其设计针对特定的轨道高度不适用于机载实验,为此在机载偏振交火技术验证实验中采用了 SIPC 替代 DPC 获取多光谱偏振图像数据。该相机采用分振幅偏振探测方式,利用分光棱镜和三个线偏振片将目标场景投射到三个面阵探测器上,可同时在三个偏振方向上获取被探测目标的偏振强度图像。

POSP 沿轨扫描采用正常在轨工作模式,通过永磁同步电机驱动正交扫描镜转动,实现对地扫描探测。扫描镜转动一圈可依次采集暗背景、偏振定标器、对地观测、非偏振定标器和辐射定标器数据。SIPC 通过放置在镜头前端的滤光片转轮实现光谱波段切换调谐同时获取三个检偏方向的大气辐射偏振信息,采用硬触发模式由信号发生器产生一路数字信号同时触发三个通道的数据采集,保证三个通道成像时刻的一致性。POSP 和 SIPC 的主要技术指标见表 1。

表 1 POSP 和 SIPC 主要技术指标  
Table 1 Technical indexes of POSP and SIPC

Technical indexes	POSP	SIPC
Scanning mode	Along track scanning	Push broom scanning
Field of view	$-38^{\circ}\sim+38^{\circ}$	$10^{\circ}\times 7.4^{\circ}$
Nadir pixel spatial resolution	$\varphi 42\text{ m}@4\text{ km}$	$0.5\text{ m}@4\text{ km}$
Instantaneous field of view	$0.602^{\circ}$	—
Scanning mirror pointing accuracy	$<3'$	—
Resolution	—	$1392(\text{H})\times 1040(\text{V})$
Sampling interval	$0.52^{\circ}$	—
Sampling period	$1.43\text{ ms}/\text{frame}$	$500\text{ ms}/\text{frame}$
Radiation accuracy	$5\%$	$5\%$
Polarization accuracy	$<0.005(@P=0.2)$	$<0.02(@P=0.2)$

## 1.2 观测几何

POSP 扫描过程中由于积分时间内扫描镜沿飞行方向的旋转,存在扫描目标相对移动的现象,积分时间  $T$  为扫描镜转过半个采样间隔角度  $\theta_s$  的时间。瞬时视场中心  $S$  在积分时间内移动的距离为视场拖影的距离,即扫描镜转过  $0.26^{\circ}$  在地面的投影距离。POSP 瞬时视场拖拽效应示意图如图 1,实际扫描视场内对应的

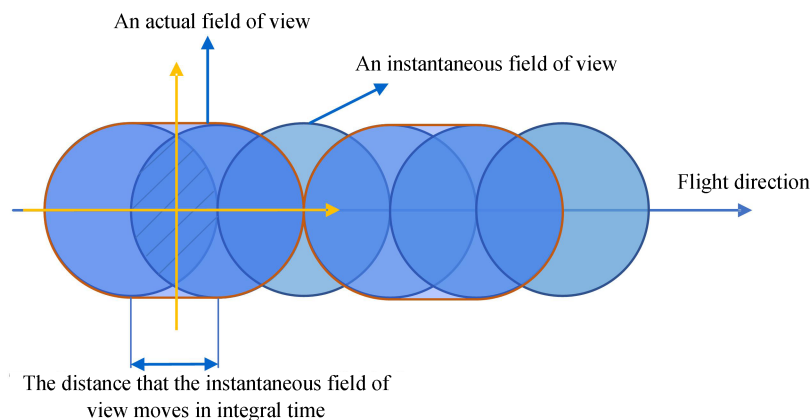


图 1 POSP 瞬时视场拖拽效应示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the transient field drag effect of POSP

目标由于在瞬时视场内的驻留时间不一致导致对信号的贡献权重差异。设瞬时视场角为  $\theta$ , 瞬时视场直径为  $D$ , 视场拖影沿飞行方向的地面投影距离为  $\Delta d$ , 飞行高度为  $H$  时, 根据几何关系可得

$$D = 2 \cdot H \cdot \tan \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

$$\Delta d = H \cdot \tan \frac{\theta_s}{2} \quad (2)$$

$$S' = S + \frac{\Delta d}{2} + \frac{T \cdot v_{\text{along}}}{2} \quad (3)$$

式中,  $S'$  为考虑拖拽影响实际的瞬时视场中心,  $v_{\text{along}}$  为飞机沿航向速度分量。

POSP星下点的扫描视场为圆, 随着扫描电机的转动, 边缘视场时地面轨迹变为椭圆。视场匹配为SIPC方形过采样像元与POSP扫描瞬时视场像元的匹配。POSP和SIPC视场匹配示意图如图2。

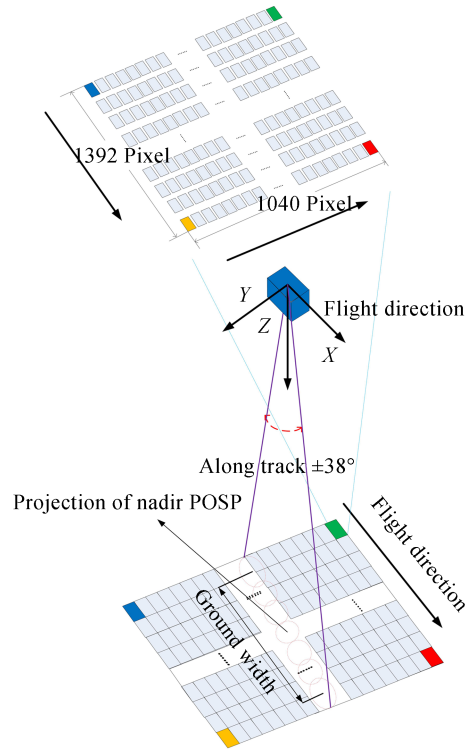


图2 POSP和SIPC视场匹配示意图

Fig.2 Field of view matching schematic diagram of POSP and SIPC

### 1.3 系统采样时间同步

POSP与SIPC两仪器的位置、姿态信息均通过惯性导航系统获取,与仪器采样时间具有较强的关联性,因此需要精确获取POSP与SIPC的采样时刻信息,建立仪器观测几何与时间的对应关系。

机载实验平台各单元模块采用统一的时间基准,均以惯性导航系统中GPS为统一时钟基准源。POSP与SIPC以“GPS整秒+整秒内计时”组合的方式表征时间信息。GPS模块以1s为周期输出秒脉冲信号,并同步输出“GPS整秒”时间码。系统主控接收该秒脉冲信号并记录整秒时间码信息。在两次秒脉冲间隔内系统主控以 $1\mu\text{s}$ 分辨率进行计时即“整秒内计时”,两者组合后作为采样时间码。POSP采样帧同步信号和SIPC采样脉冲同步发送至系统主控,主控根据该同步信号记录下采样瞬时的时间码信息,据此时刻信息可获取惯导系统对应的位置及姿态信息。IMU采样数据的时间同样统一到GPS时间系统,利用秒脉冲信号产生系统内部基准时标,通过系统内部计时器生成IMU测量数据相对时标,结合GPS广播中的GPS绝对时间,形成IMU的数字时间标签,并添加至其每一组测量数据中,在数字时间标签处理过程中进一步应用插值估算法,提高时间分辨率,降低时间同步误差。

采用上述处理方案,可以保证POSP、SIPC与惯性导航单元实现严格的时间同步。经测试,双偏振仪器采样绝对时间偏差小于 $10\mu\text{s}$ ,满足系统同步观测需求。

## 2 同平台双偏振仪地理定位及校正方法

### 2.1 坐标系及其转换

在建立地面观测像元与地理空间位置对应关系的过程中涉及到若干坐标系。分别为像空间坐标系(i)、传

传感器本体坐标系(b)、IMU坐标系(I)、导航坐标系(n)、地心地固坐标系(E)<sup>[17]</sup>。所用坐标系的定义如表2。

表2 坐标系定义  
Table 2 Coordinate system definitions

Coordinate system	Origin	X-axis direction
Image space coordinate	Projection center	Parallel to the image plane coordinate system x-axis
Instrument coordinate	Projection center	Point to the right side of the vector
IMU body coordinate	Instrument center of mass	Point to the right side of the vector
Navigation coordinate	Carrier center	Consistent with geography heading east
Earth-centered, Earth-fixed(ECEF)	Geocentric	Point to the intersection of the zero meridian plane and the protocol

惯性导航系统获取的传感器空间位置及姿态信息是基于惯性测量坐标系下的,惯导数据输出的是IMU在导航坐标系中的偏航、俯仰和侧滚角以及GPS天线相位中心在地心地固坐标系中的空间位置,并不等同于所需的仪器透视中心在物方坐标系中的空间位置。通过旋转矩阵实现不同坐标系间的转换,图3为各坐标系之间的转换关系<sup>[17]</sup>。

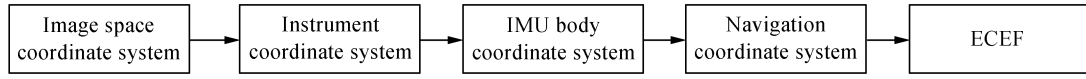


图3 各坐标系之间转换关系

Fig.3 Transformation between coordinate systems

## 2.2 地理定位及校正方法

SIPC采样时刻,某地面点A经摄影中心S得到对应像点a,设在地面辅助坐标系(m)中地面点A和摄影中心S的空间位置为 $(X_A, Y_A, Z_A)$ 和 $(X_S, Y_S, Z_S)$ ,像点a在像空间坐标系中的坐标为 $(x - x_0, y - y_0, -f)$ 。根据采样时刻的共线条件方程可得<sup>[17]</sup>

$$\begin{bmatrix} X_A - X_S \\ Y_A - Y_S \\ Z_A - Z_S \end{bmatrix} = \lambda C_i^m(\varphi, \omega, \kappa) \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $\lambda$ 为比例因子, $C_i^m$ 为像空间坐标系(i)与地面辅助坐标系(m)之间的变换矩阵, $(\varphi, \omega, \kappa)$ 为SIPC曝光时刻的3个外方位角元素, $(x_0, y_0)$ 为主点与图像中心的偏差。 $C_i^j$ 表示i系至j系变换矩阵。

通过惯性测量单元输出的姿态信息 $(\psi, \theta, \phi)$ ,其中 $\psi$ 为偏航角(yaw), $\theta$ 为俯仰角(pitch), $\phi$ 为侧滚角(roll),获取地面辅助坐标系与像空间坐标系之间的几何关系。考虑惯性测量单元与SIPC的安装偏差,变换矩阵的具体形式为<sup>[18]</sup>

$$C_i^m(\varphi, \omega, \kappa) = C_E^m \cdot C_n^E \cdot C_l^n(\psi, \theta, \phi) \cdot C_b^l \cdot C_i^b \quad (5)$$

式中, $C_E^m$ 为地心地固坐标系到地面辅助坐标系的变换矩阵; $C_n^E$ 是导航坐标系与地心地固坐标系之间的变换矩阵; $C_l^n$ 为IMU坐标系与导航坐标系之间的变换矩阵; $C_b^l$ 为相机机体坐标系与IMU坐标系之间的变换矩阵; $C_i^b$ 为像空间坐标系与相机机体坐标系间的变换矩阵。

建立与IMU坐标系三轴平行,坐标原点位于GPS相位中心的GPS坐标系,若SIPC摄影中心S在此坐标系中的坐标为 $(x_l, y_l, z_l)$ 则采样时刻S在地理辅助坐标系中的坐标 $(X_S, Y_S, Z_S)$ 可通过式(6)计算

$$\begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} = C_E^m \begin{bmatrix} X_{IMU} \\ Y_{IMU} \\ Z_{IMU} \end{bmatrix} + C_n^E C_l^n(\psi, \theta, \phi) \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{bmatrix} \quad (6)$$

设载机的飞行高度为 $H'$ ,则 $Z_S - Z_A = H'$ ,可由惯性测量单元输出的高度信息减去地面高程求得,结合式(4)和(5)并展开可得

$$\begin{cases} X_A = X_s - H' \frac{C_{11}(x-x_0) + C_{12}(y-y_0) - C_{13}f}{C_{31}(x-x_0) + C_{32}(y-y_0) - C_{33}f} \\ Y_A = Y_s - H' \frac{C_{21}(x-x_0) + C_{22}(y-y_0) - C_{23}f}{C_{31}(x-x_0) + C_{32}(y-y_0) - C_{33}f} \\ Z_A = Z_s - H' \end{cases} \quad (7)$$

式(7)即 SIPC 观测像元与地理空间位置的对应定位模型,最终可得定位点的纬度、经度和高度  $(B, L, H)$ 。

由定位模型可知地形因素会影响地理定位的精度,通过全球数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)进行校正。估算定位区域的地理位置,获取该目标区域数字高程信息,提取目标区域大地高的最大值  $Z_i = Z_{\max}$ ;将  $Z_i$  带入定位模型计算,得到相应地面点定位结果  $(B_i, L_i, H_i)$ ,由 DEM 得到与之对应的高程值  $h_i$ ;若  $H_i - h_i > 0$ ,取  $Z_{i+1} = H_i - \varepsilon$  继续迭代直至  $H_n - h_n < 0$ ,输出地理定位结果  $(B_n, L_n, H_n)$ 。保证地理定位结果输出高程值与 DEM 高程值之间的偏差小于设定值  $\varepsilon$ 。POSP 地理定位需获取惯性测量单元、扫描电机对应采样点指向角度和仪器的安装矩阵等数据,由此可以确定地心地固坐标系下扫描点对应的地面位置信息。导航系中 POSP 电机指向矢量可由两个角度表示,即电机指向矢量与  $Z$  轴之间的夹角  $\varphi$  和电机指向矢量在  $X Y$  平面上的投影与  $Y$  轴的夹角  $\theta$ ,则电机指向矢量  $l$  可表示为式(8),图 4 为 POSP 观测矢量示意图。

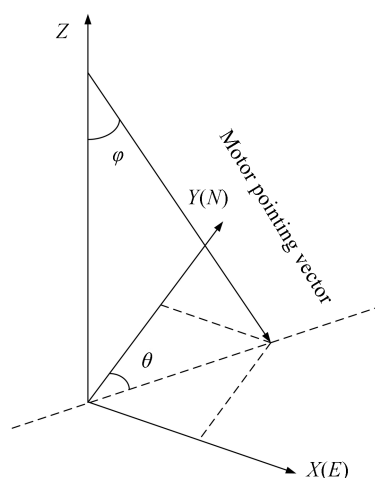


图 4 POSP 观测矢量示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of POSP observation vector

$$l = \begin{bmatrix} \sin\varphi \sin\theta \\ \sin\varphi \cos\theta \\ \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (8)$$

POSP 电机指向矢量绕  $Z$  轴扫摆,指向星下点时  $\varphi=0$ ,由一圈内帧同步信号计数确定每一采样帧的扫描角度。在统一的时间基准下,通过时间对惯导数据进行插值,实现惯导数据与仪器采样点的对应,惯性测量单元的采样频率为 20 Hz。

惯性测量单元输出 GPS 天线相位中心在地心地固坐标系(E)中的位置矢量  $N_1$ ,POSP 视轴与 GPS 相位中心相对位置关系确定后,设 POSP 在 GPS 坐标系中的坐标矢量为  $P_1$ ,则扫描采样时刻 POSP 在地心地固坐标系中的矢量位置为

$$P_E = N_1 + C_n^E \cdot C_1^n(\psi, \theta, \phi) P_1 \quad (9)$$

将电机指向矢量  $l_n$  转换到地心地固坐标系中

$$l_E = C_n^E l_n \quad (10)$$

$l_E$  与 WGS-84 参考椭球体的在地心地固坐标系中的交点  $G_E$  通过式(11)计算

$$G_E = P_E + d \cdot l_E \quad (11)$$

式中,  $d$  为斜距,由地球椭圆模型重新缩放的电机指向矢量和 POSP 位置矢量构成

$$d = \frac{-(l' \cdot p') - \sqrt{(l' \cdot p')^2 - |l'|^2 (|p'|^2 - 1)}}{|l'|^2} \quad (12)$$

式中,  $l'$  和  $p'$  为电机指向矢量和 POSP 位置矢量根据地球椭球模型长短轴的重新缩放。  $a$  和  $b$  分别为椭球体的长短半轴。此外,由于载机平台的移动,需将沿航向速度和垂直航向速度补偿到 POSP 连续采样点的地理定位计算中。

$$l' = \begin{bmatrix} l_{E1}/a \\ l_{E2}/a \\ l_{E3}/b \end{bmatrix} \quad p' = \begin{bmatrix} P_{E1}/a \\ P_{E2}/a \\ P_{E3}/b \end{bmatrix} \quad (13)$$

分别计算出SIPC和POSP观测像元地理经纬度并通过DEM对定位结果进行修正,由于POSP采样时刻与SIPC成像时刻存在时间差 $\Delta t$ ,通过惯性导航系统提供的北向速度 $v_{north}$ 、东向速度 $v_{east}$ 、航向角 $\theta_d$ 以及 $v_{north}$ 和 $v_{east}$ 合速度矢量相对正北方向的夹角 $\theta_v$ 与航向角 $\theta_d$ 之间的夹角 $\theta_y$ ,将飞机的合速度分解为沿航向速度分量 $v_{along}$ 和垂直航向的偏航速度分量 $v_{yaw}$ 。校正两仪器间时间差 $\Delta t$ 内航向和垂直航向位移偏差。

$$v_{along} = \cos\theta_y \cdot \sqrt{v_{north}^2 + v_{east}^2} \quad (14)$$

$$v_{yaw} = \sin\theta_y \cdot \sqrt{v_{north}^2 + v_{east}^2} \quad (15)$$

理想情况下,传感器本体坐标系与IMU坐标系互相平行,但由于安装偏差、运输和仪器的使用导致二者并不能严格平行(存在偏心角)。仪器与IMU之间的位置关系可以通过类似姿态角的3个角度进行描述,俯仰、侧滚和偏航方向的偏差分别会导致地面投影前后、左右和旋转偏移。将SIPC地理定位计算的地面投影位置与Google Earth对应位置进行比对,统计像元偏移量,通过式(16)计算偏移角,修正地理定位结果。

$$\begin{cases} \phi = \Delta n_x \cdot \omega_{IPOV} \\ \theta = \Delta n_y \cdot \omega_{IPOV} \\ \psi = \arctan(\Delta n_z/L) \end{cases} \quad (16)$$

式中, $L$ 为SIPC图像行数, $\Delta n_x$ 为图像中心区域前后方向偏移量, $\Delta n_y$ 为左右方向偏移量, $\Delta n_z$ 为图像边缘像元转动偏差,SIPC探测器的瞬时视场角 $\omega_{IPOV}$ 为 $0.0071^\circ$ 。同理利用POSP与SIPC的相对位置关系,可近似计算POSP偏心角并完成修正。同平台双偏振载荷地理定位方法流程如图5。

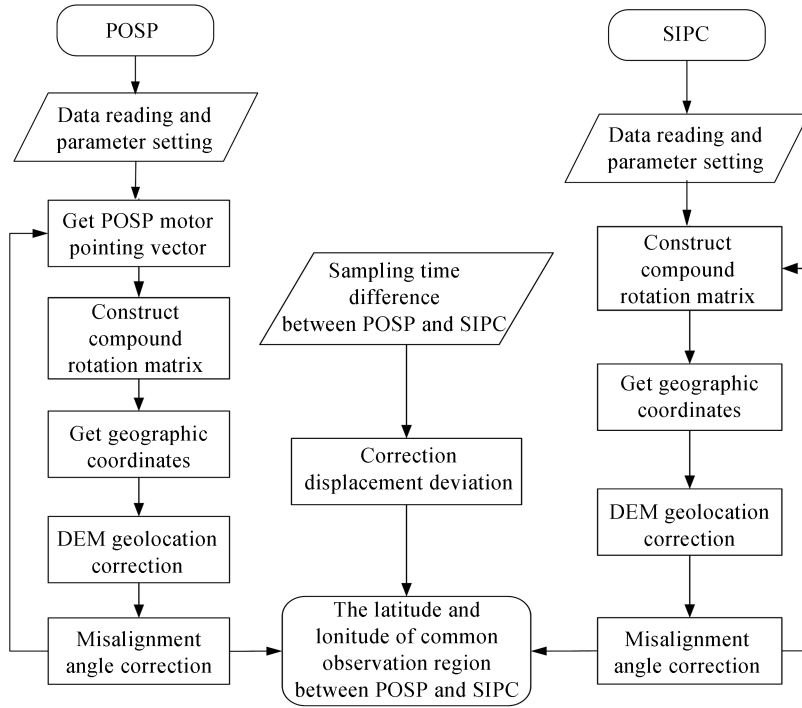


图5 同平台双偏振载荷台地理定位及校正方法流程

Fig.5 The process of geolocation and correction method for dual polarization instrument on same platform

### 3 地理定位误差仿真分析

SIPC地理定位的误差源主要有地面高程误差、相机内方位元素标定偏差和外方位元素测量偏差,其中内方位元素标定误差可分为焦距误差和主点误差与SIPC几何定标精度有关,外方位元素测量误差包括外方位线元素和角元素误差,主要由惯性导航系统的测量误差引起。POSP扫描电机指向偏差、位置和姿态测

量偏差是影响其地理定位结果的主要误差源。

蒙特卡罗法(Monte Carlo)是基于概率的随机数据模拟方法,可以准确描述事物的客观特征,通过产生满足条件的随机数替代难以获取的数据进而解决现实问题。采用蒙特卡罗法计算分析双偏振仪器地理定位误差,误差传递模型为

$$\Delta M = G(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n) - G(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (17)$$

式中,  $x_i$  为地理定位过程中各参数的测量值;  $\Delta x_i$  为各参数的测量误差值;  $G$  为地理定位坐标解算过程。则地理定位误差模型可以表示为

$$[\Delta B, \Delta L, \Delta H] = G(X + \Delta X) - G(X) \quad (18)$$

式中,  $(B, L, H)$  为地理定位结果的大地坐标值;  $(\Delta B, \Delta L, \Delta H)$  为地理定位误差;  $G$  为地理定位坐标解算过程;  $X$  和  $\Delta X$  为坐标转换过程中的各参数及测量误差。

根据惯性测量单元、SIPC 和 POSP 参数误差分布特点,确定仿真验证中所涉及的各项参数见表 3。

表 3 地理定位仿真验证所采用的数据  
Table 3 Geolocation simulation verifies the data used

Name	Symbols	Nominal value	Error
Instrument geodetic longitude	$B$	120°	0.000 1°
Instrumental geodetic latitude	$L$	40°	0.000 1°
Instrument geodetic height	$H$	5 000 m	5 m
Pitch angle	$\theta$	0°	0.008°
Roll angle	$\phi$	45°	0.008°
Yaw angle	$\psi$	0°	0.07°
SIPC principal point	$x_0$	2.98 pix	1 pix
SIPC principal point	$y_0$	2.74 pix	1 pix
SIPC focal length	$f$	51.70 mm	5 pix
Position elevation	$h$	200 m	5 m
Installation error angle (pitch)	$\Delta\theta$	0°	0.1°
Installation error angle (roll)	$\Delta\phi$	0°	0.1°
Installation error angle (Yaw)	$\Delta\psi$	0°	0.1°
POSP scan angle	$\varphi$	-38°~+38°	0.05°

将表 3 参数带入蒙特卡罗误差模型进行统计分析。仿真计算 10 000 次,结果如图 6。

由图 6 可知,两仪器地理定位结果呈中心分布,即中心点相对集中,外围点较为稀疏。由数理统计理论

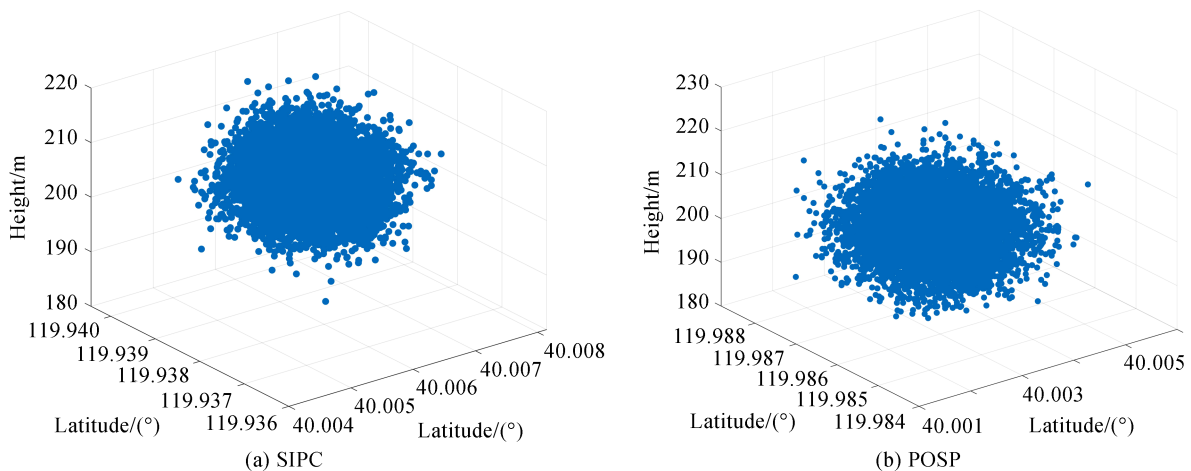


图 6 地理定位空间分布  
Fig. 6 Spatial distribution of geolocation



可得,中心点越密集区域出现地理定位真实坐标点的可能性越大,越靠近边缘越稀疏,概率越小。统计10 000次计算的标准差,将地理定位结果换算为空间位置误差 $R$ ,结果见表4。其中 $R_x$ 、 $R_y$ 和 $R_z$ 分别为定位结果转换为空间位置后经度、纬度和大地高程误差。结果表明飞行高度5 000 m时SIPC和POSP定位精度为25 m左右。

表4 SIPC和POSP地理定位结果  
Table 4 Geolocation results of SIPC and POSP

Result of geolocation results	Nominal value	SIPC		POSP	
		Calculated value	Error(standard deviation)	Calculated value	Error(standard deviation)
Longitude	120°	119.938 0°	0.000 206°	119.986 6°	0.000 196°
Latitude	40°	40.006 2°	0.000 104°	40.003 4°	0.000 211°
Height	5 000 m	200.021 0 m	4.627 1 m	200.213 7 m	5.432 3 m
Geolocation error		$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2} = 24.1195 \text{ m}$		$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2} = 25.3950 \text{ m}$	

#### 4 航空实验及方法应用验证

航空实验场地选择山海关机场附近空域,飞行区域在北纬38.92°~41.12°,东经119°~121°之间。POSP光机头部与SIPC安装在同一基板上放置在飞机左侧吊舱中,其余仪器安装于机舱内。考虑不同下垫面的地表特性以及实验天气气象条件,飞行线路上包含了海洋、城市、平原、山地等不同区域环境,覆盖了晴天、多云和轻度污染天气状况。

选取30组成像清晰且有明显地物特征的SIPC航空图像,估算图像中心区域和边缘目标点与Google Earth对应位置的像元偏差,30组图像比对结果取平均。统计结果为图像中心区域前后方向偏移约30.16像元,左右方向偏移约25.08像元,图像边缘像元转动约8.33像元。通过式(16)计算各方向偏移角,可得 $\phi = 0.214 1^\circ$ 、 $\theta = 0.178 1^\circ$ 、 $\psi = 0.343 2^\circ$ 。根据两仪器相对安装关系,将计算结果带入复合旋转矩阵近似修正SIPC和POSP地理定位结果。

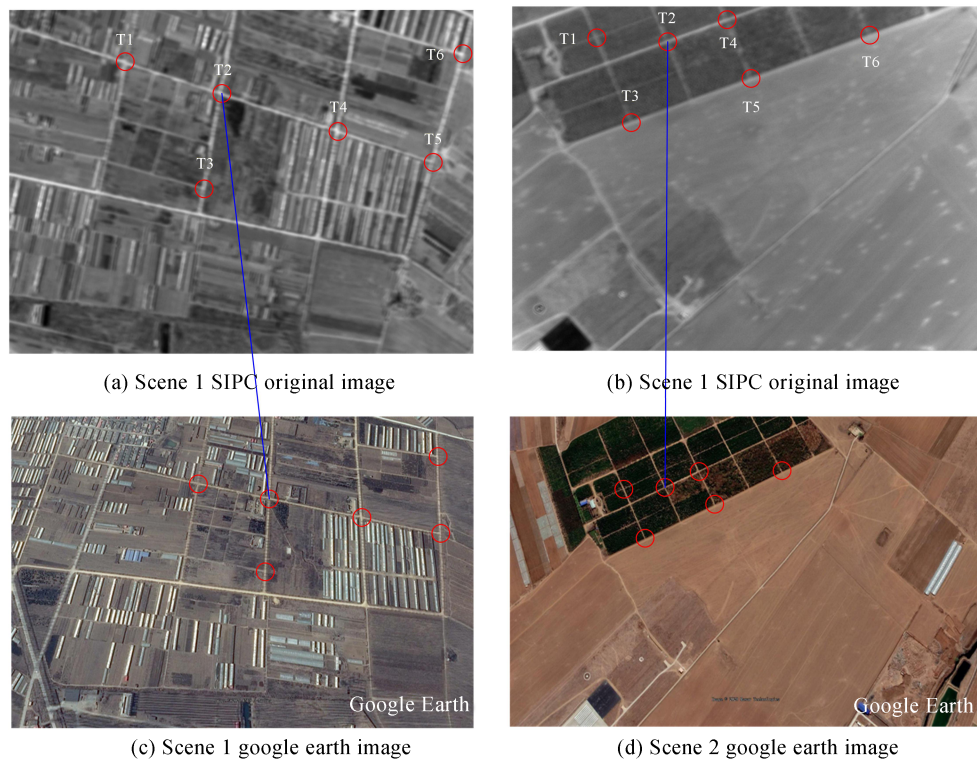


图7 实验场景及目标点

Fig. 7 Scene used in experiment and target points

为了验证地理定位方法和仪器偏心修正的有效性,选取两组 SIPC 航拍图像。图 7 为 SIPC 在两个场景中拍摄的原始图像和 Google Earth 获取的相同区域的光学图像,两场景均位于农田地区,地势较为平坦,平均高程分别约 15 m 和 10 m。每幅图像选取 6 个易于辨认的点作为目标点 T1~T6,通过本文地理定位方法计算目标点地理位置信息并将定位结果与 Google Earth 中目标点的对应位置比对(Google Earth 的平均精度约为 5~15 m),结果如表 5,单位为 m。仪器偏心修正后,SIPC 平均定位精度为 25 m 左右,并且修正后的定位结果标准差较小,表明了 IMU 视轴偏心角修正的有效性。

表 5 SIPC 航空实验定位结果  
Table 5 Location results of SIPC aviation test

	Target						Average	Standard deciation
	T1	T2	T3	T4	T5	T6		
Scene 1	25.07	26.26	28.56	25.52	30.19	27.35	27.16	4.36
Scene 1 improved	23.92	24.62	25.18	21.73	24.13	25.24	24.14	2.89
Scene 2	27.63	23.50	24.05	24.82	26.81	28.29	25.85	4.46
Scene 2 improved	23.71	20.35	22.05	23.65	24.54	22.68	22.83	3.33

某日航线上 11:09:11~11:09:14 一秒间隔 POSP 地理定位计算结果如图 8。地面扫描点的间隔随扫描角的增大而增大,由于载机俯仰、偏航和侧滚等姿态变化,观测扫描周期内的地面轨迹与下一个观测扫描周期存在偏差,并不完全呈直线分布。

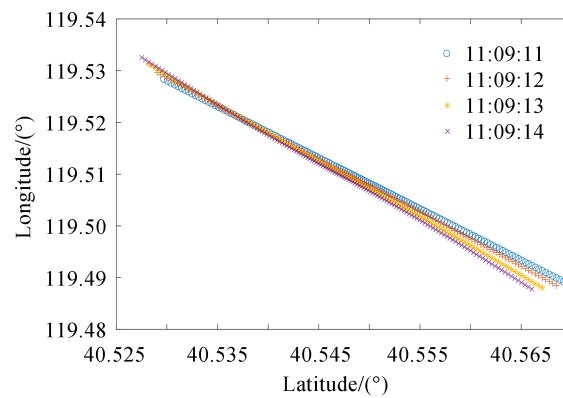


图 8 POSP 地理定位结果  
Fig. 8 POSP geolocation results

由于 POSP 为非成像探测,为评估其地理定位方法的准确性,采用以 SIPC 为基准的相对评估方法。计算 200 组 POSP 星下点指向的地理位置,经过时间差校正后与相近时刻采样的 SIPC 每个像元地理位置进行

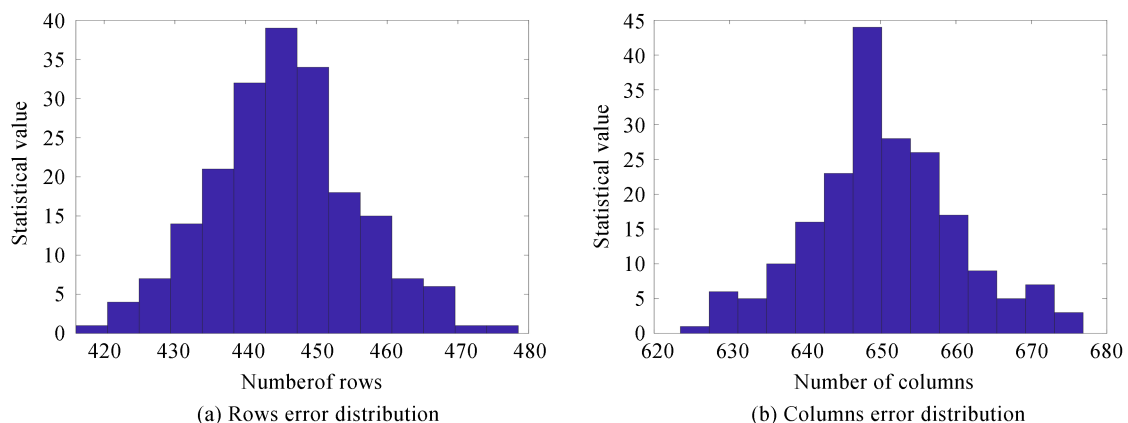


图 9 定位偏差概率分布  
Fig. 9 Probability distribution of location error

比较,空间位置偏差最小的点集中在 SIPC420~480 行,620~680 列的区域。图 9 为两仪器定位偏差概率分布直方图,偏差最小的点在 445 行、650 列附近的概率最大。此结果与基于图像配准的 SIPC 和 POSP 视场匹配结果基本吻合<sup>[19]</sup>,验证了地理定位方法的有效性。基于图像配准的两仪器视场匹配方法通过 POSP 拖影权重模板将 SIPC 数据重采样至二者相同空间分辨率,计算不同位置 SIPC 重采样数据与 POSP 星下点附近数据的相关性,相关性最强区域为视场匹配位置,如图 10 所示。选取一幅 SIPC 海陆交界区域拍摄的图像,使用 POSP 星下点附近 11 个采样点用于视场匹配,图 10 所示的匹配结果中,颜色深浅代表该像素点位置根据拖影模板提取的 SIPC 匹配点与实际的 POSP 第一个采样点间的欧式距离,距离越小匹配程度越高。计算选取的 POSP 第一个采样点到星下点间的距离差,即可找到与 POSP 星下点视场匹配的 SIPC 像元位置,完成视场匹配。从图中可以看出,两仪器匹配程度与地表实际地物变化基本一致。统计 135 组不同位置的 POSP 数据与 SIPC 图像的匹配结果,最终匹配像元位置平均中心点在 SIPC 像元 425 行,630 列附近,即 SIPC 与 POSP 星下点匹配位置。200 组 POSP 星下点地理位置与 SIPC 匹配位置(425 行,630 列)经纬度进行比较,绝对误差的平均值作为 POSP 地理定位误差,结果为 26.0279 m。

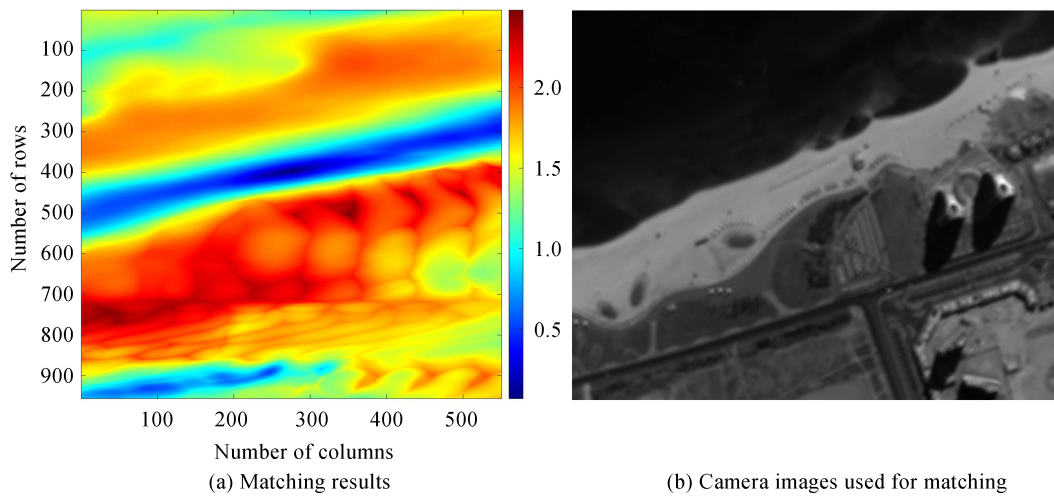


图 10 海陆交界区域匹配结果  
Fig.10 Matching results between sea and land edges

选取图 11 所示航线拼接区域 POSP 670 nm 波段采样 100 圈星下点的偏振辐射数据,通过同平台地理定位方法使其与 SIPC 具有相同的观测几何,完成两者的视场匹配。飞行实验前通过实验室定标得到 POSP 辐射测量精度优于 5%,偏振测量精度优于 0.5%;SIPC 辐射测量精度优于 5%,偏振测量精度优于 2%。二者之间的辐亮度偏差用  $\Delta L$  表示,即  $\Delta L = 100 \times (L_{\text{SIPC}} - L_{\text{POSP}}) / L_{\text{POSP}}$ ,偏振度偏差用  $\Delta P$  表示,即  $\Delta P = P_{\text{SIPC}} - P_{\text{POSP}}$ 。由图 12 可得,机载 POSP 和 SIPC 670 nm 通道辐亮度差异在 5% 之内,偏振度差异在 2% 以内。进一步将 POSP 与 SIPC 偏振辐射数据相关联,评估二者的一致性。数据的一致性由均方根(Root Mean Square, RMS)表示, $\Delta L$  的均方根为 4.525 9%, $\Delta P$  的均方根为 0.017 5 均满足仪器性能指标,验证了同平台双偏振仪器地理定位方法的准确性。



图 11 部分 SIPC 航拍数据拼接图  
Fig. 11 Mosaic of SIPC aerial data

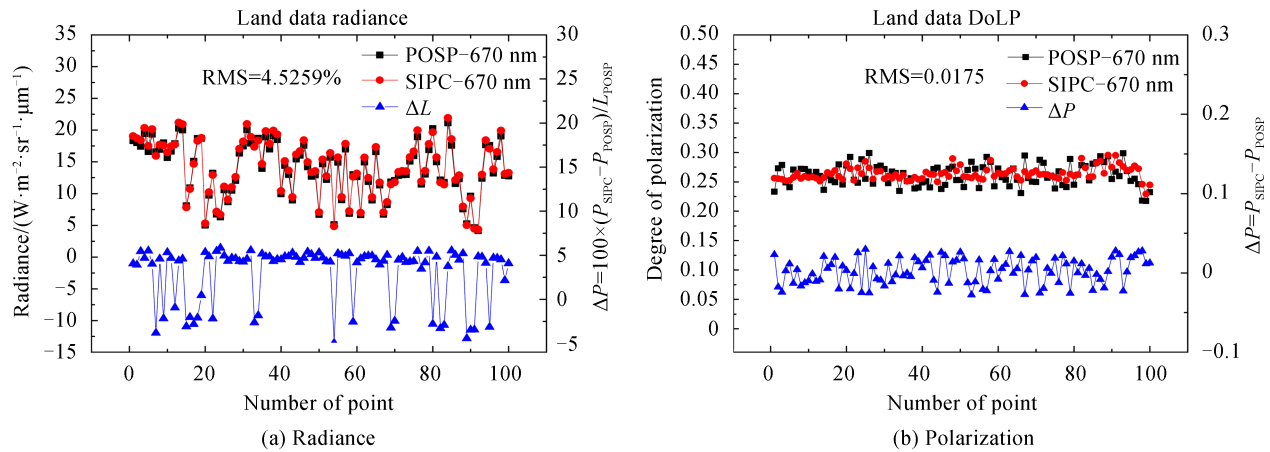


图 12 POSP 与 SIPC 数据对比结果  
Fig. 12 Data comparison of POSP and SIPC

## 5 结论

本文结合双偏振仪器的特点提出一种同平台双偏振仪器协同观测模式下的地理定位方法,通过惯性测量单元获取采样时刻的仪器姿态,利用坐标变换结合全球数字高程模型和仪器偏心校正技术,完成两仪器的地面采样点的空间位置匹配。采用蒙特卡洛法分别对 SIPC 和 POSP 地理定位误差进行仿真分析,结果表明飞行高度 5 000 m 时 SIPC 和 POSP 定位精度约为 25 m。通过地理定位空间位置匹配后,SIPC 和 POSP 获取的数据偏振度偏差小于 2%,辐亮度偏差小于 5%,二者获取的偏振度和辐亮度数据具有较好的一致性,证明了该方法的有效性且具有较高精度,可以满足工程需求,为后续星载偏振交火探测地理定位的处理提供了有效途径。理论上本文所研究的地理定位方法不仅限于偏振遥感器,其他光学遥感器同样适用,但本文研究对象的特殊性在于同时涉及不同分辨率、不同成像方式(非成像扫描方式和面阵成像方式)的两种光学遥感器搭载在相同平台上进行地理定位匹配方案验证,可为后续仪器交叉定标和联合观测地理定位方法提供参考,为同类型遥感器地理定位精度评估提供思路。

### 参考文献

- [1] YIN Dekui. Multi-angle polarization detection technology[J]. *Infrared*, 2019, 40(1): 1-6.  
殷德奎. 多角度偏振探测技术[J]. *红外*, 2019, 40(1): 1-6.
- [2] WAN Han, YANG Leiku, DOU Weibin, et al. Inversion of aerosol optical depth over land surface from airborne polarimetric measurements[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(4): 1019-1024.  
王涵, 杨磊库, 都伟冰, 等. 航空偏振遥感数据反演陆地上空气溶胶光学厚度[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(4): 1019-1024.
- [3] DUBOVIK O, LI Z Q, MISHCHENKO M I, et al. Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: Instruments, methodologies, results, and perspectives[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 224: 474-511.
- [4] VAN H G, DINER D J, DAUGHERTY B J S, et al. Calibration and validation of airborne multiangle spectropolarimetric imager (AirMSPI) polarization measurements[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(16): 4499-4513.
- [5] MCCORKEL J, CAIRNS B, WASILEWSKI A. Imager-to-radiometer in-flight cross calibration: RSP radiometric comparison with airborne and satellite sensors[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(3): 955-962.
- [6] MILINEVSKY G, OBEREMOK Y, SYNIAVSKIY I, et al. Calibration model of polarimeters on board the Aerosol-UA space mission[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 229: 92-105.
- [7] WOLFE R E, NISHIHAMA M, FLEIG A J, et al. Achieving sub-pixel geolocation accuracy in support of MODIS land science[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1): 31-49.
- [8] KHLOPENKOV K V, TRISHCHENKO A P, LUO Y, et al. Achieving subpixel georeferencing accuracy in the Canadian AVHRR processing system[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2150-2161.
- [9] TANG F, ZOU X, YANG H, et al. Estimation and correction of geolocation errors in FengYun-3C microwave radiation imager data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(1): 407-420.
- [10] BARBER D B, REDDING J D, MCLAIN T W, et al. Vision-based target geo-location using a fixed-wing miniature air

- vehicle[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2006, 47(4): 361-382.
- [11] STICH E J. Geo-pointing and threat location techniques for airborne border surveillance [C]. IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security(HST), 12-14 Nov.2013, Waltham, MA, USA, 2013:136-140.
- [12] QIAO Chuan, DING Yalin, XU Yongsan, et al. Ground target geo-location using imaging aerial camera with large inclined angles[J].Optics and Precision Engineering, 2017, 25(7): 1714-1726.  
乔川,丁亚林,许永森,等.大角度倾斜成像航空相机对地目标定位[J].光学精密工程,2017,25(7):1714-1726.
- [13] ZHU Shuangshuang, YANG Hongchun, LI Zhengyang, et al. Polarization detection test and result analysis of scanning polarimeter[J].Acta Optica Sinica, 2019, 39(11):183-189.  
朱双双,杨洪春,李朕阳,等.偏振扫描仪偏振探测实验与结果分析[J].光学学报,2019,39(11):183-189.
- [14] YANG Hongchun, HONG Jin, ZOU peng, et al. Onboard polarization calibrators of spaceborne particulate observing scanning polarimeter[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 205-213.  
杨洪春,洪津,邹鹏,等.星载偏振扫描仪星上偏振定标器[J].光学学报,2019,39(9):205-213.
- [15] YANG Weifeng, HONG Jin, QIAO Yanli. Optical design of spaceborne directional polarization camera[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 285-292.  
杨伟锋,洪津,乔延利.星载多角度偏振成像仪光学系统设计[J].光学学报,2015,35(8):285-292.
- [16] QIAN Honghu, MENG Binhuan, YUAN Yinlin, et al. Full field of view polarization effect measurement and error analysis of non-polarized channels of spaceborne directional polarimetric camera[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(10): 43-52.  
钱鸿鹄,孟炳寰,袁银麟,等.星载多角度偏振成像仪非偏通道全视场偏振效应测量及误差分析[J].物理学报,2017,66(10):43-52.
- [17] ZUO Jianzhang, GUAN Yanlin, LI Junjie. Integration and realization of high-precise and light-small aerial remote sensing system[M].Beijing: Publishing House of Surveying and Mapping,2014.  
左建章,关艳玲,李军杰.高精度轻小型航空遥感系统集成与实现[M].北京:测绘出版社,2014.
- [18] YUAN Xiuxiao, ZHANG Xuepin, FU Jianhong. Transformation of angular elements obtained via a position and orientation system in Gauss-kruger projection coordinate system[J]. Acta Geodaeticaet Cartographica Sinica , 2011, 40(3): 338-344.  
袁修孝,张雪萍,付建红.高斯-克吕格投影坐标系下POS角元素的转换方法[J].测绘学报,2011,40(3):338-344.
- [19] LEI Xuefeng, ZHU Shuangshuang, LIU Zhenhai, et al. Field of view matching method analysis of two polarization instruments on the same aviation platform[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(13): 102-109.  
雷雪枫,朱双双,刘振海,等.同航空平台双偏振仪器间的视场匹配方法研究[J].光学学报,2020,40(13):102-109.