

## 航空多光谱相机三坐标无源定位技术

董浩 孙拓 杨玉良

### Three coordinate passive location technology for airborne multiple spectrum camera

Dong Hao, Sun Tuo, Yang Yuliang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20200498>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

##### 基于单目视觉和固定靶标的位姿测量系统

Position and orientation measurement system based on monocular vision and fixed target

红外与激光工程. 2017, 46(4): 427003–0427003(8) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0427003>

##### 基于正交柱面成像相机空间后方交会的三维坐标测量方法

3D coordinate measurement method based on space resection of the orthogonal cylindrical imaging camera

红外与激光工程. 2018, 47(3): 317001–0317001(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0317001>

##### 实现惯测坐标系正交同步的系统级标定技术

Systemic calibration technology in view of the orthogonal synchronization of the inertial measurement frame

红外与激光工程. 2018, 47(1): 117002–0117002(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0117002>

##### 激光跟踪绝对测长多边法三维坐标测量系统

3D coordinate measuring system based on laser tracking absolute length measurement multilateral method

红外与激光工程. 2018, 47(8): 806007–0806007(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0806007>

##### DEM和单相机的弹落点坐标测量方法

Coordinate measurement method of bomb falling point based on DEM and single camera

红外与激光工程. 2018, 47(9): 917005–0917005(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0917005>

##### 一种机载红外光谱相机的角位置误差补偿技术

An angular error compensation technology for airborne infrared spectral camera

红外与激光工程. 2019, 48(10): 1013007–1013007(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1013007>

## 航空多光谱相机三坐标无源定位技术

董浩, 孙拓, 杨玉良

(天津航技术物理研究所 光电测控研究室, 天津 300308)

**摘要:** 航空多光谱相机采用焦平面探测成像系统, 可在全天时、准全天候作业的条件下对机下进行大幅宽高分辨率成像探测。针对航空多光谱相机的三坐标无源定位问题, 简介了相机组成及无测距信息辅助情况下的三坐标无源定位原理, 梳理了航空多光谱相机的三坐标无源定位关键技术。通过载体的位置姿态精确测量, 测角电路设计、测角误差标定与补偿, 多传感器安装姿态标定, 时间同步设计四大关键技术保证相机的定位精度。飞行试验结果表明, 图像拼接精度优于 10", 验证了技术方法有效。

**关键词:** 航空遥感; 三坐标无源定位; 位姿动态测量; 测角; 外方位元素; 时钟同步

**中图分类号:** TP731      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20200498

## Three coordinate passive location technology for airborne multiple spectrum camera

Dong Hao, Sun Tuo, Yang Yuliang

(Optical Electronic Measurement and Control Department, Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

**Abstract:** A large FOV infrared multiple spectrum camera, which contains advance infrared focal plane, acquires large FOV & high resolution multiple spectrum image toward area below the flight vehicle. It takes images on a whole day and nearly a whole whether condition. The multiple spectrum camera system configuration was proposed. Its angular measurement, three coordinate passive location key technology and solution were described in detail. The angular measure electro-circuit & clock synchronization should be finely designed. When the system had been integrated, angular error calibration and compensation, multi-sensor installation attitude calibration were proposed to improve angular measure accuracy and location accuracy. Flight tests shows that image mosaicking accuracy is 10" which means the technic is effective.

**Key words:** airborne remote sensing; three coordinate passive location; position orientation dynamic measurement; angular measurement; elements of exterior orientation; clock synchronization

## 0 引言

航空相机是民用测绘、军事侦察的有效手段,可对任务区域进行大范围地图制备和侦察情报生成,既可单独形成系统,又可作为天基成像的有效补充。在拍摄图像的同时获取图像,同时叠加地理、水文、气象信息,并且准确捕获目标的形态、位置变化信息,这样才能形成有效情报,完成侦察或测绘任务。常见的功能有地理扫描、地理跟踪和地理定位<sup>[1]</sup>,可见特定坐标系下的三坐标定位精度直接影响情报准确度和可信度<sup>[2]</sup>。

加拿大 L-3WESCAM 公司的 EO/IR (Electronic optical/Infrared) 传感器“MX”有效载荷系列 (包含 MX-10、MX-15、MX-20 及 MX-25series) 可应用在机载、地基和海上环境等不同平台上,内置高精度 IMU,可精确获取目标的地理位置信息。美国雷神公司 MTS 系列光电转塔,在 MTS-B 型号上首次满足了美国国防部/国家地理空间情报局的目标定位误差要求,在提高精度的同时将目标坐标直接实时传输至武器系统,有效降低了打击反应时间。“全球鹰”光电侦察载荷是一种具有广域搜索侦察与目标精确定位能力的长焦距、双波段高精度机载光电载荷,在飞行高度 20 km 的条件下,定位精度可达 CEP (Circular probable error) 20 m。Goodrich ISR 系统公司研制的 CA-295 双波相机<sup>[3]</sup>、集成惯性导航定位 (INS/GPS) 组合组件实现了高精度地理引导、目标定位以及图像拼接。

我国航空相机三坐标定位技术历经三代发展:第一代产品从 2000 年~2010 年,利用机载导航设备的信息、相机运动信息进行三坐标定位计算,典型定位精度 CEP 50 m@10 km。第二代产品从 2010 年至今,相机内部集成惯组/POS (Position and orientation system, 位置姿态测量系统),典型定位精度为 CEP 20 m/10 km。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所某斜视成像航空相机,基座上集成高精度 POS,在飞行高度 17000 m、斜视 75°范围内,定位精度为 213 m (CEP)<sup>[4-5]</sup>。第三代产品采用内置惯性测量单元 (Inertial Measure Unit, IMU) 方案,自动定位定向,精度更高。

## 1 系统组成及三坐标无源定位原理

某航空多光谱相机由基座、扫描稳定平台、相机本体和 POS 组成。如图 1 所示,其扫描稳定平台外框

架为滚动框架,内框架为俯仰框架。扫描稳定平台内框架上安装多光谱相机、光纤陀螺等负载,框架间转角由感应同步器测量。扫描稳定平台俯仰框架相对惯性空间的运动角速度由光纤陀螺测量,基座通过减振器与载体固连,基座上安装 POS,提供载体位置和姿态信息基准。

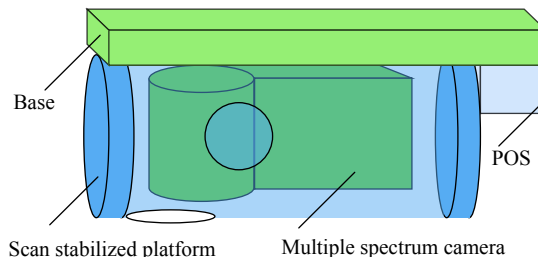


图 1 航空多光谱相机组成示意图

Fig.1 Schematic diagram of airborne multiple spectrum camera component

在无测距信息状态下,相机采用被动无源定位方法实现图像的三坐标定位,原理如图 2 所示。根据载体、目标在地面投影以及地心的三角形几何关系确定地理位置<sup>[6-7]</sup>,计算流程如图 3 所示。

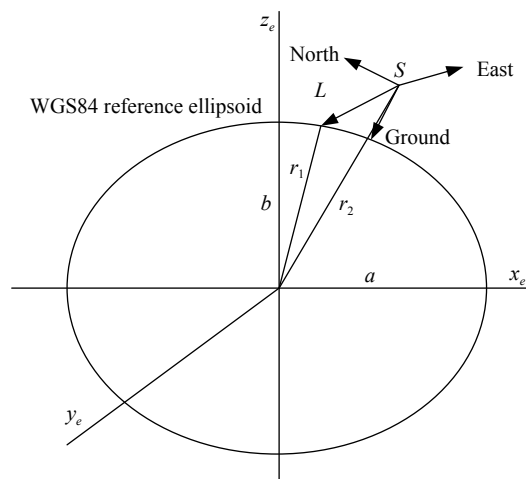


图 2 三坐标无源定位原理图

Fig.2 Principle diagram of three coordinate passive location

由图 2~3 可见,相机拍摄图像得到像空间坐标系下的坐标  $(x_s, y_s, z_s)$ , 经过归一化后得到单位矢量  $\vec{u}_c$ , 再经过数次坐标变换, 分别得到基座坐标系、地理坐标系以及大地直角坐标系下的单位矢量  $\vec{u}_b$ 、 $\vec{u}_N$ 、 $\vec{u}_E$ , 进一步向地球椭球投影, 计算可得投影坐标  $T_E$ , 换算得到经纬度坐标  $T(lat, lon, h)$ 。根据该计算流程可知, 变换过程中的稳定平台角度  $(\theta_r, \theta_p)$ 、载体姿态角  $(r, p,$

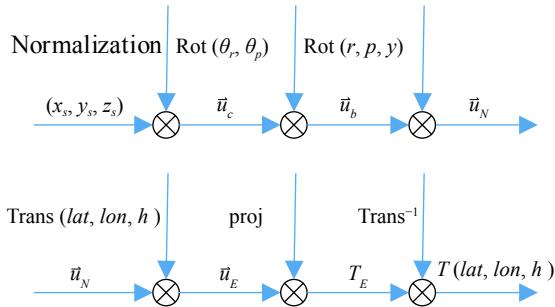


图 3 三坐标无源定位计算流程图

Fig.3 Three coordinate passive location calculation process

$y$ ) 以及经纬高位置  $(lat, lon, h)$  精度决定了目标的三坐标定位精度。

由于是远距离成像, 角度误差引起的位置误差远远大于位置测量误差, 角位置精度对定位精度起决定性作用。因此相机中与角度测量的相关技术, 如高精度位姿动态测量技术、扫描稳定平台测角信号处理及辨识补偿、扫描型相机多维外方位元素标定技术以及异构多源传感时钟同步技术是机载相机的三坐标无源定位关键技术, 如表 1 所示。

表 1 误差项与关键技术

Tab.1 Error factor and key technology

| Error factor                      | Detail  | Key technology  |
|-----------------------------------|---|---|
| Base position orientation error   | Position error  | High precision position orientation measure technology                  |
|                                   | Orientation error   |   |
| Stabilized platform angular error | Angular rotation error  | Stabilized angular measurement process, identification and compensation |
|                                   | Angular sensor tilt   |   |
|                                   | Circuit electrical error  |   |
| Mounting error                    | POS and stabilized platform mounting error                      | Exterior orientation elements of multiple spectrum scanner              |
|                                   | Stabilized platform and multiple spectrum camera mounting error |   |
| Clock error                       | Sensor measure delay  | Multisource clock synchronization of heterogeneous sensors              |
|                                   | Circuit delay   |   |
|                                   | Software acquire storage delay                                  |   |

## 2 高精度载体位姿动态测量

位置姿态测量系统是航空遥感的重要组成部分, 用来敏感光学载荷基座的位置姿态信息<sup>[8]</sup>。

### 2.1 惯性信息闭环误差的控制

将闭环误差控制引入 Kalman 滤波器, 将滤波估计出位置、速度误差, 通过控制器实时反馈到输入端, 抑制姿态角的误差振荡幅值, 可有效提高系统姿态误

差模型的准确度<sup>[9]</sup>。

### 2.2 动杆臂补偿

POS 系统中, 卫星天线安装于飞行载体上, 不随陀螺稳定平台而运动。IMU 通常安装于载荷内部或载荷基座上, 前者 IMU 会随陀螺稳定稳台运动, 后者 IMU 随减振器运动而运动, 二者均导致 IMU 与卫星天线间的杆臂参数实时变化。采集组合导航信息的同时, 利用陀螺稳定平台的转动角度信息对杆臂进行重投影, 实现动杆臂的补偿<sup>[10]</sup>。

## 3 稳定平台测角信号处理及辨识补偿

### 3.1 微伏级测角信号放大解算

选用角秒级感应同步器, 并基于感应同步器  $\mu\text{V}$  级弱信号的放大解算设计高精度测角电路。在动态测角方案中, 采用高保真正弦波激磁电源, 减小电路时间常数, 提高长期稳定性。由于感应电压信号弱, 采用“一级放大+二级放大+滤波”的方式提高输出信号的信噪比, 并对二路正余弦信号进行相位正交校正, 提高测角解算精度。

电磁兼容性方面采用双绞屏蔽线传输, 弱信号就近前置放大。电路设计上, 数字地/模拟地信号地分开走线, 单点连接。电源入口采用 EMI 滤波器抑制干扰, 绘制印制电路时强信号、弱信号分开走线, 保持较远距离, 尽量扩大地的面积<sup>[11]</sup>。

### 3.2 测角误差谐波系数分离与误差补偿

感应同步器精度优于  $1''$ , 制造误差可以忽略, 测角误差主要影响因素为轴系回转误差、安装误差以及测角电路电气误差。

根据测角误差呈现周期性特点, 利用谐波分析法对测角误差进行分析可知, 一次谐波与二次谐波是测角误差的主要误差源, 因此辨识一次谐波与二次谐波系数, 利用分段线性化方法或谐波补偿方法对测角误差进行补偿, 提高测角精度<sup>[12]</sup>。

补偿完成后反复通过环境试验验证测角指标稳定性、分阶段定期复测来验证测角指标的长期稳定性<sup>[13]</sup>。

## 4 扫描型相机多维外方位元素标定

相机的外方位元素需要进行标定与补偿, 由于是扫描型多光谱相机, 存在多维外方位元素参数, 需逐一在扫描稳定平台零位条件下进行标定。引入立方

镜<sup>[14]</sup>, 分别在相机基座、POS、相机附近安装立方镜, 首先将各个传感器的坐标轴标定至立方镜上, 然后在系统集成后对立方镜的安装姿态进行标定。逐级标定方式建立多光谱相机外方位元素, 可有效降低对系统标定设备条件的要求。

根据安装关系, 多光谱相机的外方位元素标定步骤为: (1) 基准立方镜的安装标定; (2) 相机与相机立方镜的标定; (3) POS 与基准立方镜的标定; (4) POS 立方镜与基准立方镜的标定; (5) 相机立方镜与基准立方镜的标定。基准立方镜在装配过程中与稳定平台轴系水平, 其标定方法见专利 CN106323342B。立方镜间的标定方法采用多台经纬仪互瞄建站的方法, 其测量方法见参考文献 [15-16]。文中主要介绍步骤 (2)、(3)。

#### 4.1 POS 立方镜坐标系与 POS 输出坐标系的标定

标定 POS 立方镜与 POS 输出坐标系关系利用 0.5" 经纬仪、陀螺经纬仪及精密三轴转台组合测量来实现。标定方法如图 4 所示。

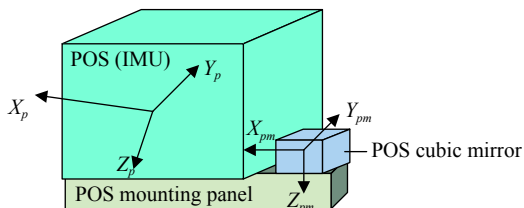


图 4 POS 输出坐标系与 POS 立方镜坐标系

Fig.4 POS output coordinate and POS cubic mirror coordinate

将 POS 及安装板整体安装在三轴转台上, 调节三轴转台角度使 POS 输出水平值为零, 航向输出为北向零; 采用 0.5" 电子经纬仪对 POS 立方镜水平轴向进行准直测量, 记录电子经纬仪水平读数  $\alpha_p$ 、 $\beta_p$ 。采用 0.5" 陀螺经纬仪对 POS 立方镜的 X 方向进行准直测量, 记录陀螺经纬仪方位读数  $\gamma_p$ 。根据标定值, 可得出 POS 立方镜坐标系与 POS 输出坐标系的旋转矩阵。

#### 4.2 相机立方镜坐标系与相机坐标系的标定

##### 4.2.1 测试系统与被标定谱段坐标系的对准

利用大口径多光谱平行光管与精密二维转台标定相机立方镜与相机的坐标系关系, 调节转台的方位轴铅垂向下, 俯仰轴位于水平状态。此时, 转台轴系与平行光管轴系垂直。标定方案如下:

首先, 安装多光谱相机至转台上, 以当前被标定的谱段输出图像为准, 分别调节相机的沿转台方位、

俯仰轴系的安装姿态, 使得靶标位于图像中心处;

其次, 分别转动转台的方位、俯仰, 调节相机的沿其光轴的安装姿态, 使得靶标移动过程中始终位于图像的中心线上。

以上两步完成测试系统与被标定谱段的坐标系的对准。

##### 4.2.2 立方镜姿态角测量

利用大口径多光谱平行光管对立方镜  $X_{cm}$  面进行准直测量, 记录水平方向的角度  $\gamma_{M1}$ 、垂直角度  $\beta_{M1}$ ; 驱动二维转台俯仰轴转动  $90^\circ$ , 对立方镜的  $Y_{cm}$  面进行准直测量, 记录水平角度  $\alpha_{M1}$ , 如图 5 所示。

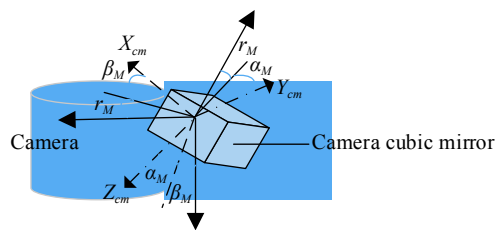


图 5 相机坐标系与相机立方镜坐标系

Fig.5 Camera coordinate and camera cubic mirror coordinate

由于是多个谱段, 需对每一个谱段的坐标系进行标定、记录相机立方镜与相应谱段坐标系的姿态角 ( $\alpha_{Mi}$ 、 $\beta_{Mi}$ 、 $\gamma_{Mi}$ ),  $i=1 \dots N$ 。根据标定获得的姿态角可建立多光谱相机的坐标系基准。

#### 4.3 安装姿态角补偿

建立各个传感器与立方镜、立方镜的相互姿态关系后, 可建立安装姿态旋转矩阵, 采用基准逐级传递的方法实现内框架、外框架以及 POS 对准。通过 POS、测角传感器以及多光谱相机的安装姿态角补偿可提高图像的定位精度。

### 5 异构多源传感时钟同步

多光谱相机传感器种类多、含多光谱图像、POS、感应同步器、光纤陀螺及内部电路等, 异构多源时钟同步问题是影响相机几何精度的主要因素之一。受传感器输出延迟、传输延迟等因素的影响, 图像数据与外方位元素数据存在同步误差, 影响图像几何精度、形成观测误差<sup>[17]</sup>。

##### 5.1 传感器输出延迟分析

如图 6 所示, POS 采集延迟为  $t_{11}$ , 多光谱图像数据输出延迟时间分别为  $t_{12}^1$ 、 $t_{12}^2$ 、 $\dots$ 、 $t_{12}^N$ 。

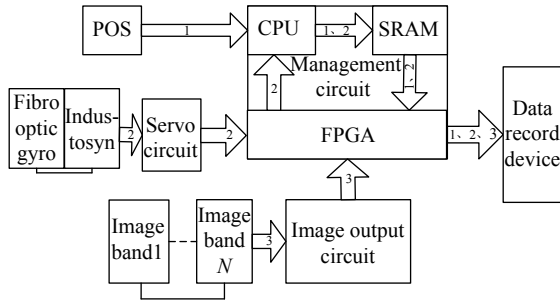


图 6 数据传输链路

Fig.6 Data transfer chain

电路传输延迟: 管控电路接收到 POS 数据存在传输延迟时间  $t_{21}$ , 图像输出控制电路、伺服控制电路接收到管控转发的 POS 数据存在传输延迟  $t_{22}$ , 所有数据均发送至图像数据记录设备, 发送至图像记录时刻存在传输延迟时间  $t_{23}$ 。

软件采集数据延迟: 采集 POS 数据及时钟存在延迟时间  $t_{31}$ ; 采集多光谱图像输出数据, 存在延迟时间  $t_{32}$ ; 采集稳定平台运动数据, 存在延迟时间  $t_{33}$ 。

其中传输时间延迟  $t_{21}$ 、 $t_{22}$ 、 $t_{23}$  受波特率、数据量

大小制约, 由于民用测绘关注事后处理, 传输延迟时间  $t_{23}$  对数据时钟同步并不影响。实测采集延迟时间  $t_{31}$  为几十  $\mu\text{s}$  量级, 图像输出电路采集延迟时间  $t_{32}$  为 ns 量级, 伺服控制电路采集命令延迟  $t_{33}$  为 ms 量级。可见系统的数据之间存在较大时延, 约 1 ms。

在  $30\text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$  扫描速度下, 产生的定位误差  $s=30/57.3\times 1=0.5\text{ mrad}$ , 约为 10 个像元, 因此需要进行时钟同步设计。

### 5.2 时钟流设计

为实现数据对准, 读取每一传感器数据时均同时读取本地时钟信息, 因此只要实现各个传感器本地时钟信号的对准, 即时钟同步, 便可解决数据采集延迟问题, 实现在后处理时的数据对准。采用各个本地时钟信号后, 图像数据输出延迟  $t_{11}$ 、 $t_{12}^1$ 、 $t_{12}^2 \dots t_{12}^N$  和采集延迟  $t_{31}$ 、 $t_{32}$ 、 $t_{33}$  问题已经解决, 进一步解决传输延迟  $t_{21}$ 、 $t_{22}$ 、 $t_{23}$  的问题。

采用 POS 输出的 PPS 秒脉冲信号时周期进行时钟同步, 如图 7 所示。为了维持秒内时间的连续性,

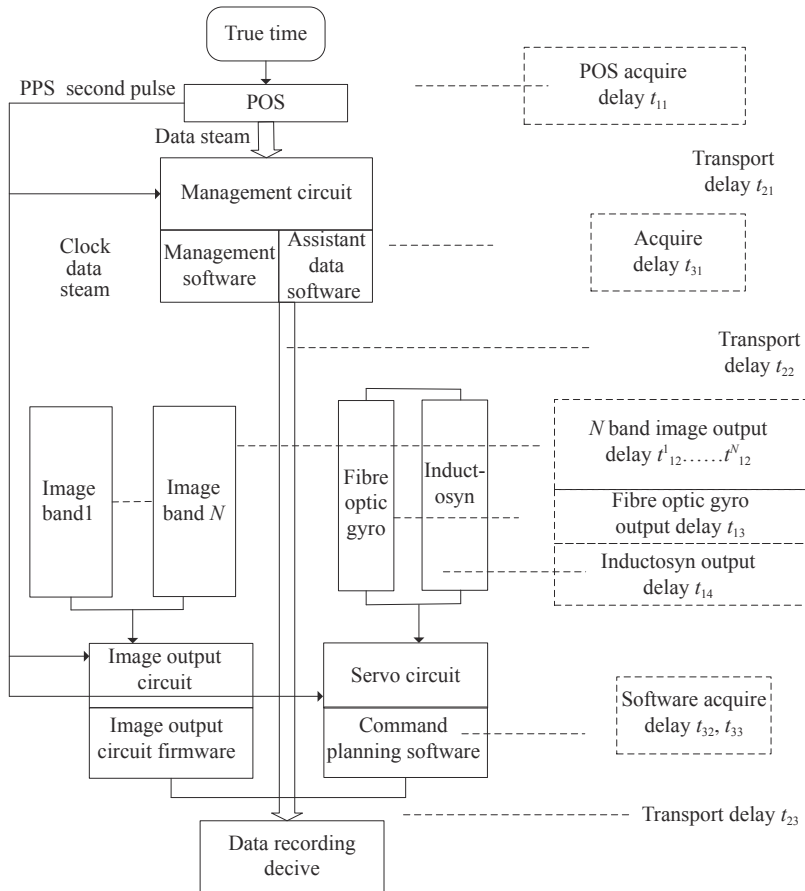


图 7 含时钟同步的数据传输链路

Fig.7 Data transfer path with clock synchronization

管控电路、图像输出电路及伺服控制电路根据各自晶振产生时间分辨率为 ns 级的时间计数值,当纳秒时间计数值等于整秒时,向秒计数值进位,计数器清零,秒计数值和纳秒计数值组合起来就是相机本地时间系统输出的完整时间值。

由表 2 可见,采用秒脉冲信号作为时钟同步信号后,传输延迟时间  $t_{21}$ 、 $t_{22}$  影响消除。由于是后处理,  $t_{23}$  不影响同步性能。此时时钟同步精度受制于 1 s 内晶振的稳定性以及各传感器输出延迟本身,多源传感器时钟同步精度优于  $\mu\text{s}$  级。

表 2 系统时钟及数据统计

Tab.2 System clock and data index

| Clock signal         | Data                                  | Clock signal accuracy |
|----------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| PPS signal           | UTC time;<br>POS data                 | <100 ns               |
| Management clock     | POS data and stabilized platform data | <100 ns               |
| Servo circuit clock  | Fibro optic gyro                      | <500 ns               |
|                      | Industosyn                            |                       |
| Image output circuit | Clock 1 Band 1                        | <10 ns                |
|                      | .....                                 |                       |
|                      | Clock N Band N                        |                       |

## 6 飞行试验验证

利用飞行试验的某谱段拼接影像对扫描仪三坐标定位精度进行验证,见参考文献 [13],相邻条带影像相对定位精度优于 1 个像元 ( $10''$ ),有效验证了三坐标无源定位技术的有效性。

## 7 结论

综上,采用如下措施解决航空多光谱相机的三坐标无源定位问题:

(1) 航空相机基座的高精度位姿动态测量。将闭环误差控制引入 Kalman 滤波器,提高系统姿态误差模型的准确度;利用稳定平台的转动角度信息实现动杆臂的补偿,提高定位精度;

(2) 稳定平台测角信号处理及辨识补偿。优选高性能感应同步器,采用隔离、差分放大等措施降低电气噪声,并维持测角稳定性;深入分析测角误差特点,对测角误差分别进行补偿,提高测角精度;

(3) 扫描型相机多维外方位元素标定。建立以立方镜为核心的航空多光谱相机外方位元素标定方法,采用基准逐级传递的方法实现多光谱相机、稳定平台以及 POS 对准;

(4) 异构多源传感时钟同步。对多光谱相机的时钟流进行设计,利用 PPS 作为相机时钟同步信号,用 PPS 对相机运动控制时钟、多光谱相机时钟进行触发,利用事后处理解决数据传输延迟,实现 POS 数据、相机运动姿态数据和多光谱图像数据的精确对准。

随着研究成果的工程化应用,将有助于完善我国对地观测技术的总体布局。

## 参考文献:

- [1] Li Mingsuo. Application of inertial technology in electro-optical detection technology [J]. *Navigation and Control*, 2020, 19(4): 179-188. (in Chinese)  
李明锁. 惯性技术在光电探测技术中的应用[J]. *导航与控制*, 2020, 19(4): 179-188.
- [2] Muncaster J, Collins G, Waltman J. Real-time automated detection, tracking, classification, and geolocation of dismounts using EO and IR FMV [C]//Geospatial Informatics, Fusion, and Motion Video Analytics, Proc of SPIE, 2015, 9473: 1-20.
- [3] Wang Yue, Li Shuangxi, Wang Lei. Study on infrared aerial camera technology [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(12): 1468-1472. (in Chinese)  
王岳, 李双喜, 王磊. 红外航空相机技术研究[J]. *激光与红外*, 2017, 47(12): 1468-1472.
- [4] Qiao Chuan, Ding Yalin, Xu Yongsun, et al. Ground target geolocation using imageing aerial camera with large inclined angles [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(7): 1714-1726. (in Chinese)  
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.
- [5] Du Yanlu, Ding Yalin, Xu Yongsun, et al. Geo-location algorithm for TDI-CCD aerial panoramic camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0328003. (in Chinese)  
杜言鲁, 丁亚林, 许永森, 等. TDI-CCD 全景式航空相机对地目标定位的算法[J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0328003.
- [6] Held K J, Robinson B H. TIER II airborne EO sensor LOS control and image geolocation [C]//IEEL Citation Aerospace Conference, IEEE Proceedings, 1997, 2: 377-405.
- [7] Wu Y A. EO target geolocation determination [C]//Proceedings

- of the 34th IEEE Conference on Decision and Control, 1995, 3: 2766-2771.
- [8] Xue Wu, Zhang Yongsheng, Wang Tao. High precision positioning of unmanned helicopter with area array images [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(2): 246-253. (in Chinese)  
薛武, 张永生, 王涛. 无人直升机面阵影像高精度对地定位[J]. 武汉大学学报, 2019, 44(2): 246-253.
- [9] Zhou Dongling, Lin Han, Hu Guangfeng. Varying arm compensation in MMS based on gyro-stabilized platform [J]. *Navigation Positioning & Timing*, 2016, 3(3): 32-36. (in Chinese)  
周东灵, 林翰, 扈光锋. 基于陀螺稳定座架的移动成图系统活动杆臂补偿技术[J]. 导航定位与授时, 2016, 3(3): 32-36.
- [10] Qiu Hongbo, Zhou Dongling, Li Wenyao. High precision POS post-processing algorithm based on closed-loop error controller [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2010, 18(6): 691-695. (in Chinese)  
邱宏波, 周东灵, 李文耀, 等. 基于闭环误差控制器的高精度 POS 后处理算法[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(6): 691-695.
- [11] Xie Weicheng, Yu Xiaoyang. Amplitude discrimination type dynamic angular displacement measuring system with high precision [J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2004, 9(4): 5-8. (in Chinese)  
谢伟成, 于晓洋. 鉴幅型高准确度动态测角系统设计[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2004, 9(4): 5-8.
- [12] Pan Wengui, Fu Jing, Zhu Yu, et al. Circuit design and software compensation of inductosyn angle measuring system [J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(22): 5484-5488. (in Chinese)  
潘文贵, 付晶, 朱钰, 等. 感应同步器测角系统的电路设计与软件补偿[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(22): 5484-5488.
- [13] Dong Hao, Sun Tuo, Wu Lina. An angular error compensation technology for airborne infrared spectral camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(10): 1013007. (in Chinese)  
董浩, 孙拓, 吴丽娜. 一种机载红外光谱相机的角位置误差补偿技术[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(10): 1013007.
- [14] Jia Xin, Fan Longfei, Miao Yang, et al. Modeling analysis of axis angle for nine-spectrum off-axis large-aperture assay camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0417007. (in Chinese)  
贾馨, 范龙飞, 苗洋, 等. 九谱段离轴长焦线阵相机视轴建模分析[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(4): 0417007.
- [15] Huang Guiping, Qin Guiqin, Ma Kaifeng. Attitude calibration on three-line array CCD camera of space stereo mapping [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2013, 33(4): 17-20. (in Chinese)  
黄桂平, 钦桂勤, 马开锋. 星载立体测绘相机立方镜间姿态标定[J]. 宇航计测技术, 2013, 33(4): 17-20.
- [16] Xing Hui, Jiao Wenchun, Wang Jun. Method to elicit the boresight of infrared cryogenic camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 01120008. (in Chinese)  
邢辉, 焦文春, 王昀. 红外低温相机视轴引出方法[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 01120008.
- [17] Li Sen, Wang Li, Li Guangyun, et al. Time synchronization of laser scanner [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2014, 39(9): 138-140. (in Chinese)  
李森, 王力, 李广云, 等. 激光扫描仪时间同步的实现研究[J]. 测绘科学, 2014, 39(9): 138-140.



**第一作者简介:** 董浩 (1980-), 男, 高级工程师, 博士。2004 年于哈尔滨工业大学获得测控技术与仪器专业学士学位; 2011 年于哈尔滨工业大学获得控制科学与工程学科工学博士学位; 2012 年至今在天津津航技术物理研究所工作。研究方向包括航空光电稳定平台、光机扫描技术、航空相机集成标定技术、激光通信跟瞄技术、非线性控制技术、伺服控制技术等。参与国家重大专项、预研基金等多个项目研发。2015 年至今, 发表论文 5 篇, 专利授权 9 篇。《红外与激光工程》青年编委。