

## 基于摆停模式的航空大视场面阵热成像技术

刘毓博<sup>1,2,3</sup>, 王义坤<sup>1,2</sup>, 韩贵丞<sup>1,2</sup>, 刘敏<sup>1,2</sup>, 姚波<sup>1,2</sup>,  
杨暄<sup>1,2,3</sup>, 舒嵘<sup>1,2</sup>, 蔡能斌<sup>4</sup>, 亓洪兴<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;

3. 中国科学院大学, 北京 100040;

4. 上海市现场物证重点实验室, 上海 200083)

**摘要:** 针对目前基于单元探测器和线列探测器的红外成像仪不能较好兼顾大视场、高空间分辨率、高温度灵敏度的问题, 研制了一套基于非制冷型面阵红外探测器的大视场热红外成像仪, 实现了 75° 大视场、0.4 mrad 空间分辨率和 50 mK ( $NE\Delta T$ ) 温度灵敏度指标. 建立了面阵摆扫图像畸变校正模型, 较好地解决了面阵摆扫图像定位精度低和图像拼接裂缝问题. 研究成果对大视场面阵摆扫红外成像技术的发展具有重要的参考价值.

**关键词:** 大视场; 高分辨率; 非制冷型面阵红外探测器; 几何畸变

**中图分类号:** TP722.5    **文献标识码:** A

## Aviation wide field thermal imaging technology based on array detector sweep-stop pattern

LIU Yu-Bo<sup>1,2,3</sup>, WANG Yi-Kun<sup>1,2</sup>, HAN Gui-Cheng<sup>1,2</sup>, LIU Min<sup>1,2</sup>, YAO Bo<sup>1,2</sup>,  
YANG Xuan<sup>1,2,3</sup>, SHU Rong<sup>1,2</sup>, CAI Neng-Bin<sup>4</sup>, QI Hong-Xing<sup>1,2\*</sup>

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100040, China;

4. Shanghai Key Lab. of Scene Evidence, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** The present infrared imager with unit or line detector cannot obtain wide field with high spatial resolution and high temperature sensitivity at the same time. To solve this problem, a set of wide field thermal infrared imager was developed based on uncooled array infrared detector. The system can realize the 75 ° large field of view, 0.4 mrad spatial resolution and 50 mk ( $NE\Delta T$ ) temperature sensitivity. Furthermore, a geometric distortion correction model of array sweeping images was established to solve the low location accuracy and image mosaic crack problems.

**Key words:** wide field, high resolution, uncooled infrared array detector, geometric distortion

**PACS:** 93.85.Pq

### 引言

大视场、高空间分辨率、高温度灵敏度是航空热红外成像仪器技术进步的重要标志和技术创新的追

求目标<sup>[1]</sup>. 视场越大, 作业效率越高; 空间分辨率越高, 几何尺度分辨越清晰; 温度灵敏度越高, 温度场层次分辨越分明. 然而, 由于长期受红外探测器技术水平和生产成本限制, 从上世纪五十年代红外航空

收稿日期: 2016-09-24, 修回日期: 2017-03-10

Received date: 2016-09-24, revised date: 2017-03-10

基金项目: 国家 863 计划课题(2012AA121102); 国家自然科学基金(41601353)

**Foundation items:** Supported by National High-Tech Research and Development Program of China(863 Program)(2012AA121102) and National Natural Science Foundation of China(41601353)

**作者简介 (Biography):** 刘毓博(1990-), 男, 河南洛阳人, 博士研究生. 研究方向为红外航空遥感技术. E-mail: liuyubolyb@126.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: qhx@mail.sitp.ac.cn

相机出现至今,视场、空间分辨率、温度灵敏度之间的矛盾都没能很好的解决,大视场红外成像主要还是依靠单元探测器或者线列探测器配合光机扫描实现,由于像元驻留时间的限制,无法满足日益提升的高空间分辨率和高温度灵敏度应用需求<sup>[2-3]</sup>。随着面阵红外探测器技术水平的提升和制造成本的降低,尤其是非制冷型红外探测器的出现,采用面阵红外探测器代替单元或者线列探测器实现大视场扫描成像成为未来航空热成像技术的发展方向和必由之路<sup>[4-6]</sup>。

目前国外选用面阵探测器实现热红外探测功能的航空遥感系统主要有:美国研制的选用面阵探测器配以狭缝和分光器件实现的多元并扫型多光谱成像系统 MAKO<sup>[7]</sup>,以及采用面阵推扫实现的热红外成像系统 ATTIREOIS<sup>[8]</sup>。其中前者通过前置扫描镜转动,实现翼展视场 $90^\circ$ ,空间分辨率 $0.547\text{ mrad}$ 的多光谱成像,而后者通过将三个 $640 \times 512$ 的制冷型热红外面阵探测器拼接实现视场角 $15.6^\circ$ ,空间分辨率 $0.147\text{ mrad}$ 的热红外遥感图像获取。与此同时,法国和挪威还共同研制了空间分辨率 $0.25\text{ mrad}$ ,翼展视场角 $14.6^\circ$ 的高光谱成像系统 SYS-IPHE<sup>[9]</sup>,其同样选取了面阵探测器和分光器件,并通过推扫的方式实现遥感成像。

与单元或线列器件不同,面阵探测器摆扫过程中像元驻留时间较长,无论是飞行方向还是翼展摆扫方向都会产生像移,尤其对于热响应时间较长的非制冷型热红外器件像移问题更加突出;另外,面阵摆扫过程中,成像仪获取的每一幅图像都属于中心投影构像,当成像仪视轴随着摆扫过程发生角度转动时,面阵探测器对地投影会发生畸变,这种畸变会直接影响图像点地理坐标精度,甚至造成图像拼接失败<sup>[10-11]</sup>。

研制了一套基于非制冷型面阵探测器的大视场

热红外成像仪,阐述了仪器的成像原理和稳像关键技术,基于试验飞行获取的图像数据建立了图像畸变校正模型,较好的解决了面阵摆扫图像定位精度低和图像拼接裂缝问题。目前尚未见到与本文工作类似的相关报道,研究成果在一定程度上推进了大视场面阵摆扫红外成像技术的发展。

## 1 红外成像仪系统设计

红外面阵探测器是摆扫型红外成像仪的核心元件,目前在热红外( $8 \sim 14\ \mu\text{m}$ )谱段主要分为深制冷条件下工作的光子型红外探测器(比如碲镉汞探测器)和常温条件下工作的热敏型红外探测器(比如氧化钒探测器)。相比较而言,前者灵敏度高,但造价昂贵,并且制冷机使用寿命短;后者虽灵敏度略差,但造价低,并且不存在制冷机寿命问题<sup>[12]</sup>。从大范围民用推广角度出发,本文研制的红外成像仪选用非制冷型红外探测器,面阵规模为当前主流的 $640 \times 480$ 型,像元尺寸 $17\ \mu\text{m}$ ,热敏材料为氧化钒,镜头焦距 $42.5\text{ mm}$ ,F数为 $1.0$ ,系统空间分辨率达到 $0.4\text{ mrad}$ ,热灵敏度达到 $50\text{ mK}$ 。需要着重指出的是光子型红外探测器的热响应时间通常在百 $\mu\text{s}$ 量级,而非制冷热敏型红外探测器的热响应时间在 $20 \sim 30\text{ ms}$ 量级,这是由该类型探测器的工作原理决定的。如图1所示,非制冷热敏型红外探测器在热响应和数据逐行输出阶段均需要被测目标和相机相对位置保持不动,这段时间至少要维持 $30\text{ ms}$ ,在这种情况下,当采用面阵探测器摆扫实现大视场成像时,必须考虑飞行方向和翼展摆扫方向造成的像移问题。

红外成像仪的摆扫角度不小于 $60^\circ$ ,适应速高比不小于 $0.056$ ,计算得到飞行方向像移达到5个像元,翼展摆扫像移达到28个像元,必须采取合适的像移补偿手段来保证 $0.4\text{ mrad}$ 的空间分辨

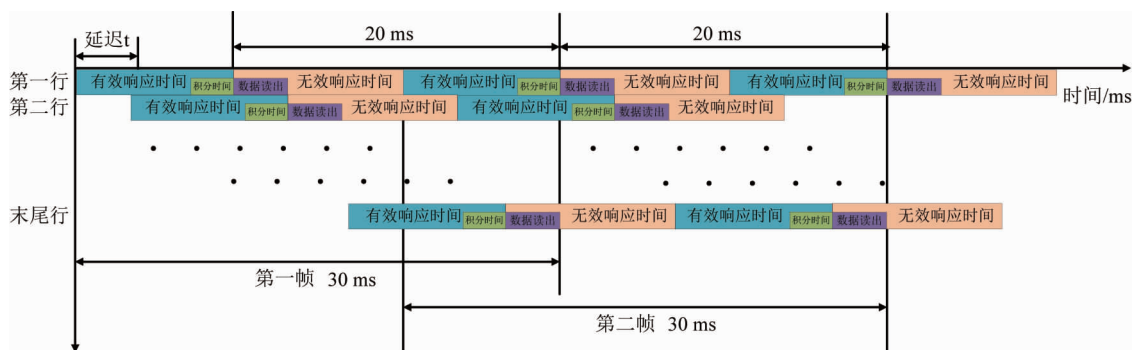


图1 非制冷面阵探测器成像时序图

Fig. 1 Uncooled array detector imaging sequence

率<sup>[13]</sup>. 这里, 飞行方向像移采用镜头前 45° 镜反向补偿方式实现; 翼展摆扫方向采用高精度摆停控制实现稳像. 根据本思路设计的系统成像原理和结构示意图如图 2 所示, 其中红外热像仪、前置 45° 镜及驱动电机组成横滚内环架, 由横滚电机驱动摆停旋转. 两个方向的控制时序、控制误差如图 3 所示, 图中横轴表示时间, 纵轴为运动位置, 1 阶段 45° 镜从初始位置开始匀速补偿飞机前向运动造成的飞行方向图像像移, 横滚电机则在初始位置保持稳定状态 50 ms, 保证相机在该阶段内获取单帧图像; 随后系统进入 2 阶段, 45° 镜始终匀速对前向像移进行补偿, 而横滚电机则重复进行多次摆停运动, 每次摆动前进距离为 12°, 停止时间为 50 ms, 相机则在每次横滚电机停止时间内完成单帧图像获取; 3 阶段, 由于翼展摆扫采用双程扫描方式, 相机完成单帧图像获取后, 横滚电机在该位置始终保持稳定, 待 45° 镜快速返回初始位置后, 开始下一周期的扫描成像运动. 图 3 右侧为红圈所标出的相机单帧图像获取阶段, 45° 镜像移补偿运动控制误差和横滚电机稳定误差曲线, 其误差值均小于 0.02° (0.35 mrad), 即一个像元以内.

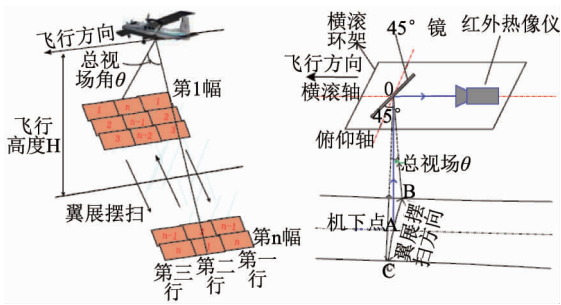


图 2 机载大视场高分辨率热红外成像系统成像原理及结构示意图  
Fig. 2 Principle and structure of airborne thermal infrared imaging system with large field of view and high resolution

## 2 面阵摆扫图像几何校正模型

### 2.1 图像畸变分析

面阵摆扫过程中, 获取的每一幅图像都属于中心投影构像, 当成像仪视轴随着摆扫过程发生角度转动时, 面阵探测器对地投影会发生畸变, 这种畸变会直接影响图像点地理坐标精度, 甚至造成图像拼接失败, 因此需要对面阵摆扫图像进行校正. 成像仪视轴转动的主要原因包括飞机俯仰角  $\alpha$ 、摆扫角  $\varphi$  和 45° 镜转动角  $\omega/2$ . 根据图 4 所示的图像畸变示意图, 分析可以得到

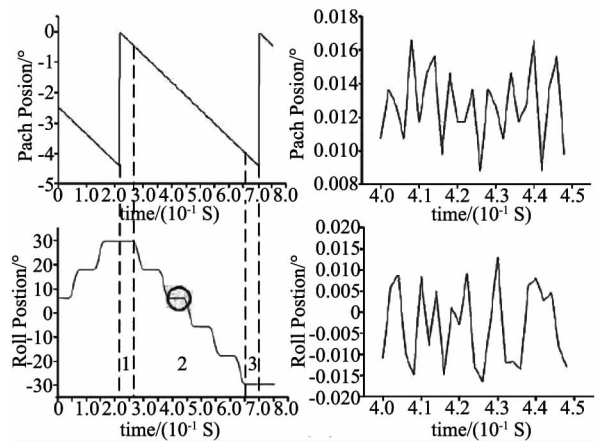


图 3 系统控制时序和控制误差  
Fig. 3 The system control timing and control error

$$\begin{aligned}
 L_2 &= L1 \times \sin\sigma \\
 L3 &= L2 \times \tan\varphi = L1 \times \sin\sigma \times \tan\varphi \\
 \angle\gamma &= \arctan(\sin\sigma \times \tan\varphi)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

其中,  $\sigma$  为视轴飞行方向转动角,  $\varphi$  为视轴摆扫转动角,  $\gamma$  为成像面地面投影旋转角,  $L4$  为  $S2$  面内的地面垂直线,  $S3$  为  $S2$  与地面的共同垂面,  $L3$  为  $S3$  与地面交线,  $L6$  为  $S1$  与  $S2$  的交线,  $L2$  为过  $L3$  的  $L6$  垂面与  $S2$  的交线.

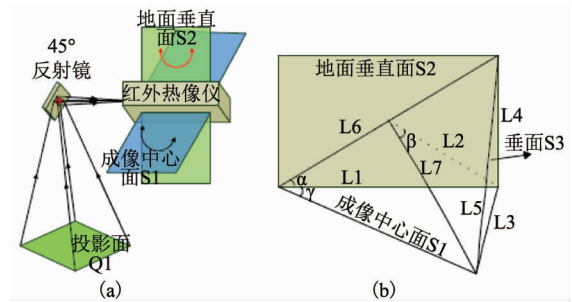


图 4 图像畸变现象示意图 (a) 相机成像视轴对地角变化示意图, (b) 探测器地面投影旋转角几何关系  
Fig. 4 Schematic diagram of image geometric distortion (a) Angle change of camera imaging optical axis, (b) geometry relationship of detector ground projection rotation angle

### 2.2 几何校正模型建立

根据中心投影原理, 如图 5 所示, 将探测器所成图像  $Q2$  以物镜中心  $S$  为中心点作几何对称, 得到正成像平面  $Q3$ . 建立大地坐标系  $P-X_p Y_p Z_p$ , 其  $X_p$  轴与翼展方向平行,  $Y_p$  轴正向与飞机飞行方向相同. 以  $S$  为原点做系统空间直角坐标系  $S-X_s Y_s Z_s$ , 以正成像平面中心点  $O$  为原点, 做正成像平面直角坐

标系  $O-X_0Y_0Z_0$ , 当成像仪视轴对地垂直时,  $X_S$  轴、 $X_0$  轴与  $X_P$  轴平行,  $Y_S$  轴、 $Y_0$  轴与  $Y_P$  轴平行, 则  $O$ 、 $S$  连线为相机成像光轴。当飞机俯仰角为  $\alpha$  时,  $S-X_SY_SZ_S$  坐标系和  $O-X_0Y_0Z_0$  坐标系同时绕  $X_P$  轴正方向顺时针旋转  $\alpha$ ; 当系统摆扫角为  $\varphi$ ,  $45^\circ$  反射镜转向角为  $\omega/2$  时, 正成像平面坐标系  $O-X_0Y_0Z_0$  分别绕  $Y_S$  轴正方向逆时针旋转  $\varphi$ , 绕  $X_S$  轴正方向顺时针旋转  $\omega$ 。

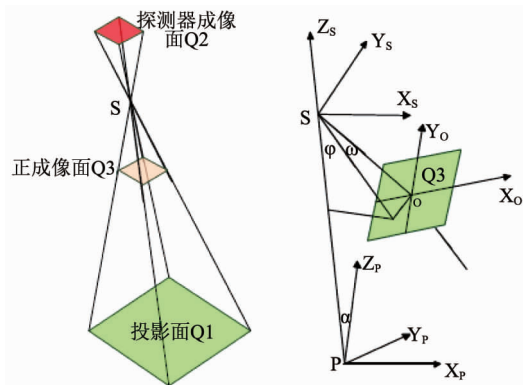


图5 三坐标系构建及坐标系转动示意图

Fig. 5 The construction of the three coordinates system and the rotation of the coordinate system

假设摆停凝视成像时刻  $S$  点与  $P$  点连线垂直地面, 可以推得坐标系之间夹角关系如表 1 和表 2 所示:

表 1 大地坐标与系统坐标轴系之间夹角关系

Table 1 Angle relationship between ground coordinate and system coordinate

| cos   | $X_S$ | $Y_S$        | $Z_S$         |
|-------|-------|--------------|---------------|
| $X_P$ | 1     | 0            | 0             |
| $Y_P$ | 0     | $\cos\alpha$ | $-\sin\alpha$ |
| $Z_P$ | 0     | $\sin\alpha$ | $\cos\alpha$  |

表 2 系统坐标与正成像平面坐标轴系之间夹角关系

Table 2 Angle relationship between system coordinate and positive image plane coordinate

| cos   | $X_0$         | $Y_0$                    | $Z_0$                    |
|-------|---------------|--------------------------|--------------------------|
| $X_S$ | $\cos\varphi$ | $-\sin\varphi\sin\omega$ | $-\sin\varphi\cos\omega$ |
| $Y_S$ | 0             | $\cos\omega$             | $-\sin\omega$            |
| $Z_S$ | $\sin\varphi$ | $\cos\varphi\sin\omega$  | $\cos\varphi\cos\omega$  |

假设在  $P-X_PY_PZ_P$  坐标系中地面点  $A$  坐标为  $(X, Y, Z)$ , 则可用  $A$  点在  $S-X_SY_SZ_S$  坐标系内的坐标  $(X_A, Y_A, Z_A)$  表示为:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix} \quad (2)$$

相应地, 假设地面点  $A$  的像点  $a$  在  $O-X_0Y_0Z_0$  坐标系内的坐标为  $(x, y, -f)$  ( $f$  为相机焦距), 则像点  $a$  在  $S-X_SY_SZ_S$  坐标系内的坐标  $(X_a, Y_a, Z_a)$  可表示为:

$$\begin{pmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi\sin\omega & -\sin\varphi\cos\omega \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ \sin\varphi & \cos\varphi\sin\omega & \cos\varphi\cos\omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ -f \end{pmatrix} \quad (3)$$

由于  $S, a, A$  三点共线, 所以有:

$$\begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中  $\lambda$  为比例系数. 将式 (3)、(4) 代入式 (2) 中, 可得到:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi\sin\omega & -\sin\varphi\cos\omega \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ \sin\varphi & \cos\varphi\sin\omega & \cos\varphi\cos\omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ -f \end{pmatrix} \quad (5)$$

因此大地坐标系内景物点坐标可表为:

$$\begin{aligned} X &= -H \frac{x\cos\varphi - y\sin\varphi\sin\omega + f\sin\varphi\cos\omega}{x\sin\varphi\cos\alpha + y(\cos\varphi\cos\alpha\sin\omega + \cos\omega\sin\alpha) - f(\cos\varphi\cos\omega\cos\alpha - \sin\omega\sin\alpha)} \\ Y &= -H \frac{-x\sin\varphi\sin\alpha + y(\cos\omega\cos\alpha - \cos\varphi\sin\omega\sin\alpha) + f(\cos\omega\cos\varphi\sin\alpha + \sin\omega\cos\alpha)}{x\sin\varphi\cos\alpha + y(\cos\varphi\cos\alpha\sin\omega + \cos\omega\sin\alpha) - f(\cos\varphi\cos\omega\cos\alpha - \sin\omega\sin\alpha)} \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $H$  为飞机飞行高度. 通过式 (6), 可使用地面景物在图像中的像点坐标计算得到对应的地面点坐标, 即畸变校正后的实际位置坐标, 利用该坐标即可重构生成无几何畸变的遥感图像。

### 3 几何校正模型验证

选取 2015 年在横店影视城获取的外场飞行数据验证上一节提出的几何校正模型, 其中外场飞行试验测区为影视城明清宫苑建筑群及其周边景物。

首先分别选取与飞行方向垂直和平行的两堵城墙作为评价目标, 如图 6 所示, 通过对根据像点坐标和利用式 (6) 校正后地面点坐标算得的城墙长度与城墙实际长度间的对比, 验证了上文所建几何校正模型的有效性, 其中城墙实际长度通过谷歌地图的测距功能得出. 图像在成像时的外方位姿态数据见表 3。

分别获取图 6 中两幅试验图像所标出的城墙起点和终点位置的像点坐标, 并利用式 (7) 计算得到由像点计算的城墙长度:

$$L_{\text{像点}} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \times \varepsilon H \quad (7)$$

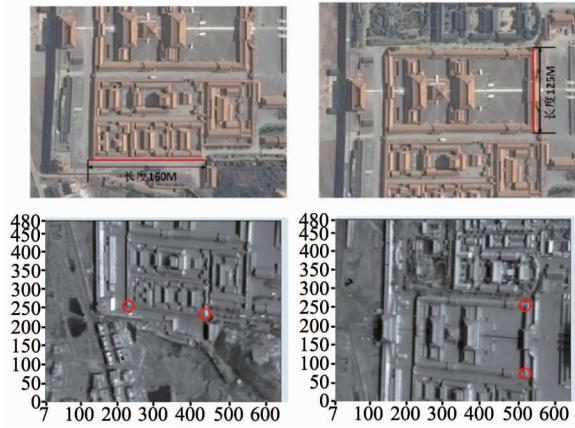


图6 城墙实际长度及对应起止像点坐标选取  
Fig. 6 Actual length of the wall and pixel coordinates of end-point selected

表3 试验图像外方位姿态数据  
Table 3 Outer orientation attitude data of the test image

| 遥感图像  | 飞机俯仰角 $\alpha$ | 翼展摆角 $\varphi$ | 2倍反射镜运动角 $\omega$ | 飞行高度       |
|-------|----------------|----------------|-------------------|------------|
| 图6左下图 | 4.687°         | -29.582°       | -13.176°          | 1 446.20 m |
| 图6右下图 | 4.824°         | -29.629°       | -5.596°           | 1 446.11 m |

式中  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  为城墙起点和终点的像点坐标差,  $\varepsilon$  为瞬时视场角,  $H$  为飞行高度。

通过式(6)计算两城墙端点的地面点坐标,再利用式(8)计算得到由地面点坐标计算的城墙长度:

$$L_{\text{地面点}} = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} \quad (8)$$

式中  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$  为城墙起点和终点的地面点坐标差。

参照谷歌地图的实际测量长度,左侧城墙实长 160 m,右侧城墙实长 125 m,如图6上方两图所示。表4给出了两坐标系坐标计算数据,并与实际长度(参照谷歌地图)进行比较,其中利用像点计算出的城墙长度因受畸变影响,与实际长度误差在 10 m 以上,而利用地面点坐标计算的城墙长度与实际数据误差在 1.3 m 以内,即6式的几何校正模型可有效消除因面阵成像视轴对地角变化产生的几何畸变问题。

其次,选取了相邻扫描行中4幅处于相邻位置

表4 城墙两坐标系坐标计算长度与实际长度对比  
Table 4 Comparing the calculated wall length in two coordinates system with the actual data

| 左图城墙   | 像点坐标                               | 地面坐标                                     | 右图城墙   | 像点坐标                                 | 地面坐标                                       |
|--------|------------------------------------|--|--------|--------------------------------------|--|
| 起点     | $x:435 \quad y:228$                | $X: -719.536 \quad Y: -262.996$          | 起点     | $x:530 \quad y:59$                   | $X: -659.182 \quad Y: -147.917$            |
| 终点     | $x:225 \quad y:255$                | $X: -880.832 \quad Y: -263.026$          | 终点     | $x:540 \quad y:257$                  | $X: -658.256 \quad Y: -22.107$             |
| 坐标差    | $\Delta x:210 \quad \Delta y: -27$ | $\Delta X:161.296 \quad \Delta Y: -0.03$ | 坐标差    | $\Delta x: -10 \quad \Delta y: -198$ | $\Delta X: -0.926 \quad \Delta Y: -125.81$ |
| 计算城墙长度 | 122.464 m                          | 161.296 m                                | 计算城墙长度 | 114.669 m                            | 125.813 m                                  |
| 与实测误差  | 37.536 m                           | 1.296 m                                  | 与实测误差  | 10.331 m                             | 0.813 m                                    |

的遥感图像进行拼接验证,如图7所示,上侧图像是没有经过几何校正进行拼接的结果,重叠部分的景物在各图中发生了不同形状的畸变,导致4幅图像进行拼接时无法完全重合,拼接位置出现裂缝(2处红色圆圈内);下侧图像是通过6式进行几何校正后的图像拼接结果,可以看到校正后的图像重叠部分景物恢复到原有的坐标位置,上侧图像的拼接裂缝得以消除。

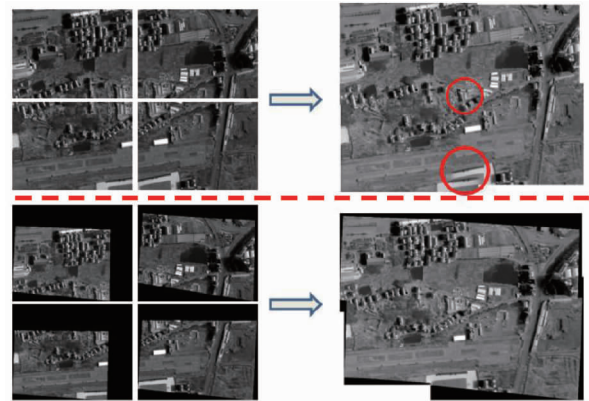


图7 几何校正前后拼接图像对比  
Fig. 7 Image contrast before and after geometric correction

### 4 结论

针对目前基于单元探测器和线列探测器的红外成像仪不能较好兼顾大视场、高空间分辨率、高温度灵敏度的问题,研制了一套基于非制冷型面阵红外探测器的大视场热红外成像仪,通过镜头前45°镜反向补偿飞行方向像移,以及翼展方向摆停凝视实现大视场成像,解决了非制冷型面阵探测器由于长响应时间导致的严重像移问题,在降低系统复杂度和制造成本的同时,实现了75°大视场、0.4 mrad空间分辨率和50 mK(NE $\Delta T$ )温度灵敏度指标。针对所设计的摆扫成像系统视轴转动导致图像畸变问题进行分析,建立了几何校正模型。通过试验数据验证了该模型对还原遥感图像原地物位置关系的有效性,并依此较好的解决了

面阵摆扫成像仪定位精度低和图像拼接裂缝问题. 本文的研究成果对大视场面阵摆扫红外成像技术的发展起到了一定的推进作用.

## References

- [1] Cochrane D M, Manning P A, Wyllie T A. Uncooled thermal imaging sensor for UAV applications[C]. *Infrared Technology and Applications XXVII. Proc. SPIE*, 2001, **4369**:168-177.
- [2] XUE Yong-Qi. The technical development of airborne scan imaging systems[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (薛永祺. 机载扫描成像系统的技术发展. *红外与毫米波学报*), 1992, **11**(3):169-180.
- [3] WANG Jian-Yu, XUE Yong-Qi. 64-band airborne imaging spectrometer[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (王建宇, 薛永祺. 64 波段机载成像光谱仪. *红外与毫米波学报*), 1992, **11**(3):181-188.
- [4] YUAN Ji-Jun. Review of infrared detector development[J]. *Laser&Infrared* (袁继俊. 红外探测器发展评述. *激光与红外*), 2006, **36**(12):1099-1102.
- [5] Lohrmann D, Littleton R, Reese C, et al. Uncooled long-wave infrared small pixel focal plane array and system challenges[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(6):061305.
- [6] CHEN Chang-Shui, LIU Rong-Ting, LIU Song-Hao. New development of infrared detector[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics* (陈长水, 刘荣挺, 刘颂豪. 红外探测器的最新进展. *大气与环境光学学报*), 2013, **8**(1):1-10.
- [7] Warren D W, Boucher R H, Gutierrez D J, et al. MAKO: A high-performance, airborne imaging spectrometer for the long-wave infrared[J]. *Imaging Spectrometry XV, Proc. SPIE*, 2010, **7812**:78120N-1-10.
- [8] Sun X H, Shu P. An Airborne Thematic Thermal Infrared and Electro-Optical Imaging System[J]. *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011: Advances in Infrared Imaging and Applications, Proc. SPIE*, 2011, **8193**:81934P-1-7.
- [9] Laurent Rousset-Rouviere, Christophe Coudrain, Sophie Fabre, et al. SYSIPHE system: a state of the art airborne hyperspectral imaging system. Initial results from the first airborne campaign[J]. *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XI, Proc. SPIE*, 2014, **9249**:92490W-1-16.
- [10] TANG Jing-Huang, NIE Zhi-Long. Geometric correction of remote sensing image[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology* (汤竞煌, 聂智龙. 遥感图像的几何校正. *测绘与空间地理信息*), 2007, **30**(2):100-102, 106.
- [11] WANG Xue-Ping. Geometric rectification and effect analysis of remote sensing image[J]. *Computer Application and Software* (王学平. 遥感图像几何校正原理及效果分析. *计算机应用与软件*), 2008, **25**(9):102-105.
- [12] FENG Tao, JIN Wei-Qi, SI Jun-Jie. Uncooled infrared FPA-A review and forecast[J]. *Infrared Technology* (冯涛, 金伟其, 司俊杰. 非制冷红外焦平面探测器及其技术发展动态. *红外技术*), 2015, **37**(3):177-184.
- [13] WANG Yi-Kun, HAN Gui-Cheng, QI Hong-Xing, et al. Investigation of image motion compensation technique based on real-time LOS tracking[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王义坤, 韩贵丞, 齐洪兴等. 基于实时视轴跟踪的像移补偿技术研究. *红外与毫米波学报*), 2015, **34**(6):757-762.