

文章编号 1004-924X(2018)07-1758-08

## 大幅宽长波红外变帧频变焦成像

赵航斌<sup>1,2</sup>, 张宗存<sup>1,2</sup>, 柴孟阳<sup>1</sup>, 孙德新<sup>1,2,3</sup>, 刘银年<sup>1,2,3\*</sup>

1. 中国科学院 上海技术物理研究所 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院 上海技术物理研究所 启东光电遥感中心, 江苏 启东 226200)

**摘要:** 为了验证变焦扫描大幅宽成像时扫描方向边缘视场图像畸变的矫正效果, 并降低扫描镜控制难度。首先分析了变焦成像时扫描镜扫描速度与扫描视场角间非线性变化关系; 针对扫描镜变速扫描稳定性低且控制难度大的问题, 在结合探测器变帧频分析与实现的基础上, 提出采用扫描镜匀角速度扫描结合探测器变帧频变焦成像方法。推导了扫描镜匀角速度扫描时, 光学系统焦距、相机实时帧频与扫描成像视场角的关系式。最后基于课题组已有的可连续变焦长波红外光学系统, 搭建了一套基于扫描镜扫描成像的大幅宽长波红外变焦实验系统, 并利用该系统进行了成像验证。成像结果表明, 采用变帧频结合变焦成像方法, 可有效抑制大幅宽成像时扫描方向边缘视场图像畸变问题。变帧频成像方法降低了变焦扫描时扫描镜扫描复杂度, 证明了变焦扫描方法具备图像畸变矫正能力。

**关键词:** 变焦扫描成像; 大幅宽成像; 长波红外; 变帧频; 图像畸变矫正

**中图分类号:** TP722.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182607.1758

## Wide-swath and long-wave infrared zoom imaging method with variable frame rate

ZHAO Hang-bin<sup>1,2</sup>, ZHANG Zong-cun<sup>1,2</sup>, CHAI Meng-yang<sup>1</sup>, SUN De-xin<sup>1,2,3</sup>, LIU Yin-nian<sup>1,2,3\*</sup>

1. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technologies, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
  2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
  3. Qidong Optoelectronic Remote Sensing Center, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Qidong 226200, China)
- \* Corresponding author, E-mail: ynliu@mail.sitp.ac.cn

**Abstract:** This study aims to verify the effect of image-distortion correction on the edge-field-of-view scanning direction in the case of zoom-scanning wide-swath imaging and to simplify the scanning mirror control. First, the nonlinear relationship between the scanning speed of a scanning mirror and the imaging angle of view during zoom imaging is analyzed. With respect to the problem of low stability and the difficulty of realizing control of the variable-speed scanning of the mirror, uniform angular-velocity scanning with a scanning mirror combined with a variable-frame-rate zoom-imaging detector is proposed based on the analysis and realization of a variable-frame-rate detector. Based on

收稿日期: 2017-12-06; 修订日期: 2018-01-24.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2016YFB0500400); 国家高分辨率对地观测系统重大专项资助项目 (No. A0106/1112)

the experimental system, the relationship between the focal length of the optical system, the real-time frame rate of the camera, and the imaging field angles at the time of the uniform angular velocity scanning are determined in order to achieve variable-frame-rate zoom scanning imaging. Finally, a wide-swath long-wave infrared (IR) zoom experiment system based on mirror-scanning imaging is constructed using the pre-existing continuous zooming long-wave IR optical system, and the system is used for imaging verification. The results show that by employing a variable frame rate combined with zoom imaging, the image distortion of the edge-field-of-view can be effectively suppressed in the scan direction in wide-swath imaging. The variable frame rate imaging method simplifies the scan-mirror scanning in zoom scanning, and it is confirmed that the zoom-scanning method is able to eliminate the image distortion.

**Key words:** zoom imaging; wide-swath imaging; long-wave infrared; variable frame rate; image distortion correction

## 1 引言

长波红外遥感可对物体实现全天时无接触温度测量与热状态分析。应用大幅宽长波红外成像探测技术可大幅度提高系统在森林火灾监测、城市热环境监测及资源探测等遥感领域<sup>[1]</sup>的成像效率,并降低遥感应用成本。然而,受长波红外探测器设计制作工艺<sup>[2]</sup>及光学背景杂散辐射抑制困难<sup>[3]</sup>等因素的限制,当前阶段利用面阵成像方法获取高分辨率、大幅宽遥感影像仍存在较大难度。采用扫描镜扫描成像是实现长波红外大幅宽成像需求的有效手段,并已在 OMIS<sup>[4]</sup>,MODIS<sup>[5]</sup>等载荷中得到了应用。但是,采用扫描方法实现大幅宽成像时,不可避免会受到 Bowtie 效应的影响,存在边缘视场图像畸变严重的问题<sup>[6-7]</sup>,极大限制了长波红外大幅宽扫描成像在高分辨率及定量化方面的应用。

本课题组设计了一套定 F 数可连续变焦光学系统<sup>[8]</sup>,通过理论分析,利用变焦成像方法可有效解决大幅宽扫描成像时,扫描方向地面图像畸变问题。大幅宽成像时,当扫描视场发生变化时,通过改变光学系统焦距来改变探测器像元所对应的瞬时视场角大小,抵消由视场角增大引入地物与相机距离变化<sup>[9]</sup>而产生的畸变。采用变焦扫描成像方法,可以实现无畸变成像,但为了满足扫描成像时较低的地物漏扫率和图像重叠率的要求,变焦扫描成像方法要求扫描镜扫描速度应匹配相机变焦状态而实时变化。在实际工程应用中,扫描镜的扫描速度与扫描加速度都将随扫描镜角度

非线性变化。扫描镜变速扫描过程中需同时考虑成像视场角变化、扫描加速度、惯性力、电机力矩承受力等众多因素影响,因此扫描镜变速扫描时存在控制难度大且扫描精度低等问题<sup>[10]</sup>。

为降低扫描镜变速扫描实现难度,提出采用扫描镜匀速扫描结合相机帧频实时变化的成像方法。在分析限制长波红外探测器帧频变化因素的基础上,设计了一套探测器帧频变化控制电路,可根据指令要求实现帧频高精度连续变化。基于课题组现有连续变焦长波红外光学系统<sup>[8]</sup>,搭建了一套扫描总视场达 120°,采用变帧频变焦扫描长波红外地面实验系统。基于该实验系统,当扫描镜按匀角速度扫描时,推导出光学系统焦距、相机实时帧频与成像视场角关系式。最后利用变帧频变焦扫描方法获取了大幅宽成像数据,降低扫描镜控制难度,并验证变帧频变焦扫描方法在扫描方向畸变消除效果。

## 2 大幅宽成像变焦扫描理论推导

### 2.1 大幅宽定焦扫描边缘视场畸变问题

图 1 为采用定焦扫描方法实现大幅宽成像时,不同扫描视场角所成地物信息。 $\alpha$  是像元角分辨率; $\theta$  是由扫描镜扫描所成的相机当前扫描视场角; $h$  是扫描视场角为  $\theta=0^\circ$  时,相机与对应地物之间的成像距离; $L$  是扫描视场角为  $\theta$  时,相机与对应地物之间的成像距离。当扫描视场角增大时,相机到该扫描视场角所对应地物的成像距离也产生了变化,成像距离满足  $L=h/\cos \theta$  关系。当探测器像元尺寸为  $d$  时,由像元角分辨率

关系式  $\alpha = d/f$  可知, 当成像系统焦距固定时, 像元分辨率  $\alpha$  恒定, 由扫描镜扫描引入的扫描视场角变化不会引起像元角分辨率变化。

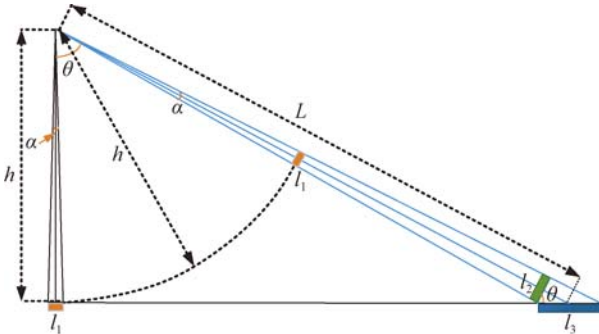


图 1 红外扫描成像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of infrared scanning imaging

在地面及机载成像应用中, 可忽略地球表面曲率的影响, 仅考虑由相机扫描视场变化时, 相机到所成地物之间因成像距离变化而引入的图像畸变问题。并由投影关系可得扫描视场角  $\theta$  与相机所成图像地面分辨率关系满足:

$$l = \frac{L \cdot \alpha}{\cos \theta} = \frac{dh}{f \cos^2 \theta} \quad (1)$$

由式(1)可知, 当探测器像元尺寸  $d = 30 \mu\text{m}$ ,  $h = 1\ 000 \text{ m}$ , 光学焦距  $f = 40 \text{ mm}$  时, 可得图 2 所示图像分辨率与视场角关系曲线。

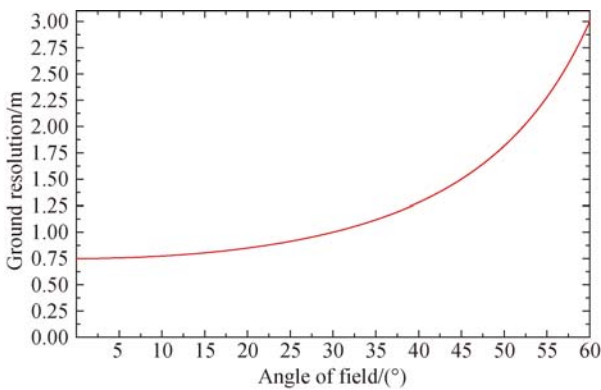


图 2 定焦扫描图像分辨率变化曲线

Fig. 2 Resolution change curve of fixed focus scanning image

定焦扫描大幅宽成像时, 随着扫描视场角增大, 图像分辨能力将大大降低。当扫描视场角为  $60^\circ$  时, 利用定焦扫描成像方法得到的图像分辨率是扫描视场角为  $0^\circ$  时图像分辨率的 4 倍, 边缘视场图像畸变十分严重。

## 2.2 变焦扫描消除图像畸变<sup>[8]</sup>

公式(1)中, 扫描成像时图像分辨率由探测器像元尺寸、 $0^\circ$  视场时成像距离、光学系统焦距和扫描视场角共同决定。扫描成像过程中, 当扫描成像视场角变化时, 通过实时改变相机焦距, 可实现地面分辨率恒定不变:

$$f = \frac{dh}{l \cos^2 \theta} \quad (2)$$

当  $l$  恒定时, 随着扫描视场角  $\theta$  变大, 焦距  $f$  将增大。设  $f_0$  为扫描视场角  $\theta = 0^\circ$  时的焦距, 当  $\theta = 0^\circ$  时, 图像分辨率满足  $l = dh/f_0$ , 代入公式(2)中。在扫描成像时, 若要求扫描方向图像无畸变时, 得到系统焦距与成像视场角应满足如下关系:

$$f = \frac{f_0}{\cos^2 \theta} \quad (3)$$

## 2.3 变焦扫描时扫描镜扫描速度分析

由公式(3)可知, 当扫描视场角变化时, 系统焦距也将改变, 继而影响像元角分辨率。将式(3)代入像元角分辨率关系式中, 得到在变焦扫描模式时, 当扫描成像视场角为  $\theta$  时, 探测器像元角分辨率与扫描成像视场角满足如下关系:

$$\alpha = \frac{d \cos^2 \theta}{f_0} \quad (4)$$

为了实现地物无漏扫、无重叠成像, 扫描镜运动速度应与探测器像元角分辨率相匹配。式(5)为扫描镜扫描运动速度与扫描成像视场角关系:

$$\omega = \frac{d \cos^2 \theta \cdot f/s}{f_0} \quad (5)$$

式中  $f/s$  为相机成像帧频。在传统遥感成像系统, 相机成像帧频设置为常量。由公式(5)可见, 采用定帧频变焦扫描成像方法, 当扫描视场发生变化时, 扫描镜扫描角速度也将变化, 且扫描镜扫描角速度变化与视场角是非线性关系。

## 3 变帧频扫描模式分析

### 3.1 变帧频模式分析

非线性变化的角速度对扫描镜电机控制精确度提出了更严格的要求。当扫描镜扫描角速度需要实时变化时, 对扫描镜速度控制一般通过引入 PID 反馈方法实现<sup>[11]</sup>。采用 PID 反馈控制方法时, 主要包括测量、比较和执行 3 个要素, 对当前时刻扫描镜角速度和扫描视场角的测量是变速扫描镜 PID 控制的基础。但系统工作环境中各种

因素均会对当前角速度和扫描视场角的测量精度造成较大影响,继而影响扫描镜扫描控制精度。特别在机载成像应用中,不可避免存在飞机抖动的问题,持续变化扫描速度的扫描镜更容易受到飞机抖动的影响,引入较大扫描精度误差,导致获取地面图像由于扫描镜自身控制精度不足而产生额外畸变。在具体工程实现中,扫描镜以匀角速度扫描受到外界环境变化影响小,实现难度低且控制精度更高。因此,本文提出采用扫描镜匀角速度扫描结合相机实时变帧频的方法,降低扫描镜变角速度扫描实现难度,提高系统成像精度。

### 3.2 变帧频模式必要条件

在扫描成像过程中,像元驻留时间短,一般采用像元响应速度极快的制冷型碲镉汞材料作为长波红外探测器感光材料。碲镉汞长波红外探测器一般采用先积分后读出的工作模式。探测器帧频由探测器积分时间、读出电路读出时间、积分电容清零时间和系统等待时间所决定。这4个决定帧频快慢的参数中,探测器积分时间由目标辐射通量大小决定,目标辐射越强,积分时间越短。长波红外探测器积分电容容量较小(1~2 pF量级),在探测常温物体时,探测器积分时间约200  $\mu$ s;读出电路读出时间受探测器像元数量及读出电路允许最高时钟决定,目前长波红外线列探测器最大约1 000元,探测器允许最高时钟可达数兆赫兹,在线列探测器应用时,读出电路读出时间很短;积分电容清零时间是完成一帧图像后,为了确保上一帧成像数据不影响下一帧成像结果,而额外增加的清零时间,该部分时间与积分电容容量有关,花费的时间很少,约5  $\mu$ s;系统等待时间是探测器驱动电路在成像过程中专门加入的一个参数,系统等待时间由驱动电路决定。长波红外线列探测器中,系统等待时间的长短是影响探测器帧频快慢最重要的因素,通过控制系统等待时间长短,在保持积分时间不变的前提下,帧频可实现从0.001~1 000 Hz连续变化。此外探测器采用很高的基准时间脉冲,获取帧频也具备很高的精确性,且帧频变化不易受环境因素的影响,可提高扫描成像系统精度。

在变帧频成像过程中,探测器接收扫描镜实时位置信息,并将位置信息转换成系统等待时间,以此控制相机帧频变化。

## 4 地面成像变帧频关系推导

### 4.1 成像系统概述

基于课题组现有可连续变焦长波红外光学系统<sup>[7]</sup>,搭建了一套地面变帧频变焦验证系统,降低扫描镜控制难度,验证变帧频变焦扫描方法在大幅宽成像时扫描方向畸变抑制效果。系统采用Sofradir公司生产的320×256长波红外焦平面探测器替代线列探测器实现扫描成像,该长波红外相机系统在F/2的光学镜头、300 K环境温度下,NE $\Delta$ T可达50 mK;相机通过扫描镜匀角速度扫描实现120°视场成像。表1为实验系统主要参数指标。

表1 实验系统主要参数  
Tab. 1 Main parameters of experimental system

项目	指标
面阵大小	320×256
像元尺寸/ $\mu$ m	30
成像谱段/ $\mu$ m	7.7~9.5
光学结构	折反式
扫描视场/(°)	120
焦距/mm	40~180
变倍比	4.5
F/#	2.0

当光学焦距与成像视场角满足公式(3)时,扫描方向可消除图像畸变。本光学系统最小焦距 $f_{\min}=40$  mm,最大焦距 $f_{\max}=180$  mm,光学变倍比4.5,扫描方向最大无畸变成像视场角 $\theta\approx 63.78^\circ$ ,本光学系统变倍比满足在 $\pm 60^\circ$ 扫描视场范围内,扫描方向无畸变成像。

### 4.2 帧频变化推导

成像过程中,以扫描镜从 $-60^\circ$ 视场位置运动到 $60^\circ$ 视场位置,并快速返回 $-60^\circ$ 视场位置作为一个扫描成像周期。推导在一个扫描成像周期内帧频变化与时间及扫描成像视场角关系。

$t=0$ 时刻,扫描镜从扫描视场角为 $-60^\circ$ 位置处开始以角速度 $\omega$ 开始匀角速度扫描; $t$ 时刻,扫描镜运动所成的相机扫描视场角 $\theta$ 满足:

$$\theta = 2\omega t - \frac{\pi}{3} \left[ 0 \leq t \leq \frac{1}{3} \frac{\pi}{\omega} \right]. \quad (6)$$

相机扫描视场角为  $\theta$  时, 设当前视场角下像元角分辨率为  $\alpha'$ , 在扫描图像分辨率不变时满足以下关系:

$$\frac{\alpha' \cdot h}{\cos^2 \theta} = \frac{dh}{f_0}. \quad (7)$$

扫描成像视场为  $\theta$  时, 扫描镜扫描  $\alpha'$  角度时间:

$$t_{\text{帧}} = \frac{\alpha'}{2\omega} = \frac{\frac{d \cos^2 \theta}{f_0}}{2\omega} = \frac{d \cos^2 \theta}{2\omega f_0}. \quad (8)$$

则相机帧频与视场角  $\theta$  满足:

$$f/s = \frac{1}{t_{\text{帧}}} = \frac{2\omega f_0}{d \cos^2 \theta}. \quad (9)$$

实验系统采用面阵系统替代线列探测器, 面阵探测器帧频相对较慢, 本系统最高帧频约 200 Hz。实验中扫描镜以  $\omega = 15 \text{ mrad/s}$  做匀角速度扫描时, 得到相机光学系统焦距、相机帧频与扫描视场角之间满足图 3 曲线。实际成像实验时, 系统光学焦距、相机实时帧频按照图 3 曲线变化, 实现地物无畸变、无漏扫成像。

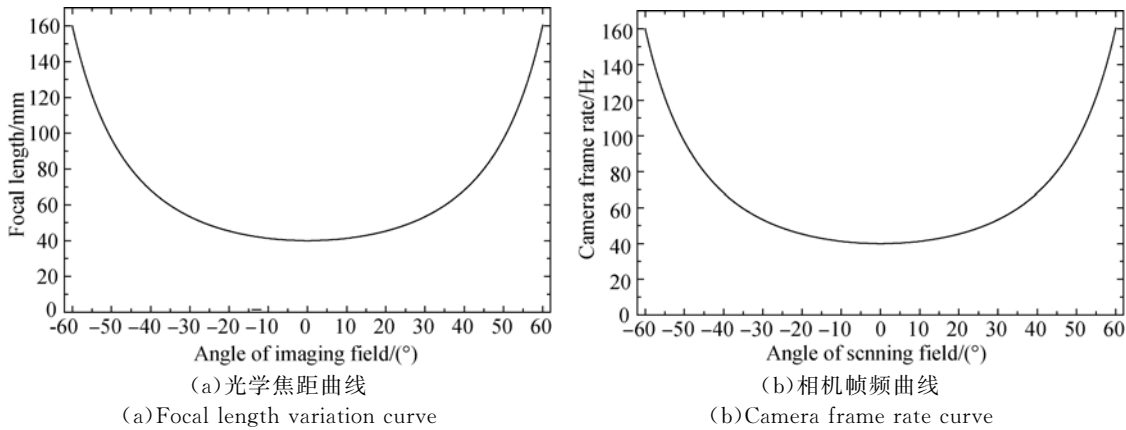


图 3 扫描成像参数曲线

Fig. 3 Scanning imaging parameter curve

### 5 地面变帧频变焦成像实验

图 4 为扫描成像实验光学系统工作示意图。

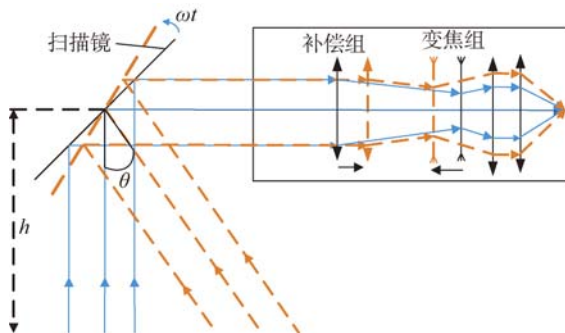


图 4 光学系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of optical system diagram

光学系统由扫描镜与可变焦光学系统组成。实验成像时, 光学系统置于稳定平台, 通过扫描镜

的匀速运动将不同扫描角度对应视场内的目标反射进入可变焦光学系统。扫描镜匀速扫描运动总角度为  $60^\circ$ , 对应  $120^\circ$  的扫描成像角。可变焦光学系统根据扫描镜所成扫描角度, 调整补偿组镜片与变焦组镜片的相对位置, 实现变焦功能。

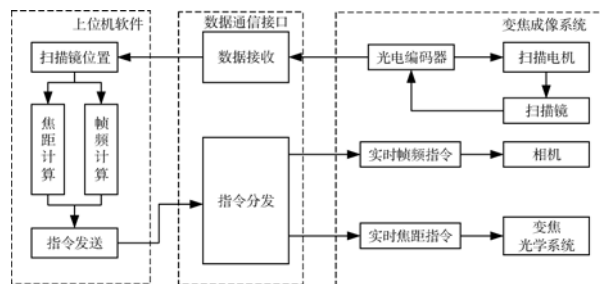


图 5 变帧频变焦成像控制原理图

Fig. 5 Variable frame zoom imaging control schematic diagram

图 5 为变帧频变焦成像电路控制原理图。控制系统由上位机软件、数据通信接口和变焦成像

系统组成。上位机接收扫描镜扫描位置,解析出当前扫描视场角对应相机实时帧频参数和实时焦距参数。数据通信接口采用 RS422 连接,完成向上位机发送扫描镜位置信息,并将上位机软件计算得到的实时焦距及实时帧频指令转发给变焦成像系统。变焦成像系统主要包括长波红外相机、可连续变焦光学系统和扫描镜控制系统。相机成像系统依据接收到的实时帧频指令,改变实时成像帧频;光学变焦系统则依据接收到的实时焦距指令,改变光学系统焦距。扫描镜控制系统由扫描镜控制电机及光电编码器组成。扫描镜转动角度由光电编码器采样获取,光电编码器获取到的实时位置信息一方面提供给电机驱动电路,控制电机保持匀速扫描;同时也反馈给上位机软件,通过闭环控制,以达到变帧频变焦成像需求。

成像实验在中科院上海技术物理研究所 22 号楼屋顶进行,0°视场方向与曲阳路相垂直,0°视场成像距离 524 m,扫描镜按照恒定角速度  $\omega=15 \text{ mrad/s}$  进行扫描,光学焦距按图 3(a)曲线变

化,相机帧频按图 3(b)曲线连续变化。成像位置及成像区域如图 6 所示。为了验证大幅宽长波红外扫描成像时,边缘视场畸变矫正能力,实验中重点对图 6 中蓝色区域约 11.47°的视场范围进行成像验证。

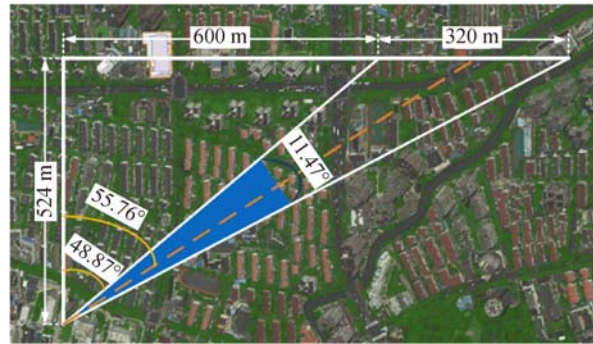


图 6 成像位置与成像区域示意图

Fig. 6 Schematic diagram of imaging position and imaging area



图 7 定焦扫描图像,焦距  $f=40 \text{ mm}$ ,图像显示比例为 100%

Fig. 7 Fixed focus scanning image, focal length is 40 mm, the ratio of image display is 100%



图 8 变焦扫描图像,等效焦距 40 mm,图像显示比例为 100%,

Fig. 8 Zoom scanning image, equivalent focal length is 40 mm, the ratio of image display is 100%

图 7 和图 8 是在相邻时间内通过扫描方法获取的长波红外成像图像,扫描视场角均覆盖从  $48.87^{\circ}\sim 60.34^{\circ}$  范围。图 7 为定焦  $f=40\text{ mm}$  所成图像,图 8 为变帧频变焦扫描成像图像。图 8 中图像分辨率与焦距  $f=40\text{ mm}$ ,视场角为  $0^{\circ}$  时所得到的图像具有相同的图像分辨率。

图 7 为定焦扫描成像拼接图。由图 5 中通过卫星地图实际测量可知,在该成像角度范围内,实际距离约  $320\text{ m}$ ,图 7 所成图像由 330 帧条带图像拼接而成。在定焦扫描时,该视场范围内地面平均分辨率约为  $0.97\text{ m}$ ,与  $0^{\circ}$  视场时  $0.393\text{ m}$  的图像分辨率相差较大。定焦扫描在大幅宽成像时边缘视场畸变严重。

扫描视场角从  $48.87^{\circ}\sim 60.34^{\circ}$  变化过程中,与图 7 由 300 帧条带图像拼接相比较,图 8 由 800 帧条带图像拼接而成。计算得到在当前视场范围内,图像平均分辨率约  $0.4\text{ m}$ 。若考虑地图测量距离存在部分误差,利用变帧频变焦扫描方法获取的图像地面分辨率与  $0^{\circ}$  视场时  $0.393\text{ m}$  的地面分辨率非常接近。与图 7 相比,图 8 大幅宽成像条件下,扫描方向图像分辨率基本不变,证明变焦扫描具备消除扫描方向图像畸变能力。

## 参考文献:

- [1] 田国良,柳钦火,陈良富,等. 热红外遥感(第 2 版) [M]. 北京: 电子工业出版社,2014.  
TANG G L, LIU Q H, CHEN L F, *et al.*. *Thermal Remote Sensing, 2th Edition* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014. (in Chinese)
- [2] BECKER LATIKE. Current and future trends in infrared focal plane array technology[J]. SPIE, 2005, 5881:doi:10.1117/12.625464.
- [3] 王建宇,徐卫明,袁立银,等. 热红外高光谱成像系统的背景抑制和性能优化[J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(6): 419-423.  
WANG J Y, XU W M, YUAN L Y, *et al.*. Background radiation suppression of a thermal infrared hyperspectral imaging system[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2010, 29(6): 419-423. (in Chinese)
- [4] 刘银年,薛永祺,王建宇,等. 实用型模块化成像光谱仪[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(1): 9-14.  
LIU Y N, XIU Y Q, WANG J Y, *et al.*. Opera-

## 6 结 论

应用大幅宽成像探测技术可大幅提高成像效率,但大幅宽成像时边缘视场图像畸变严重的缺陷限制了大幅宽成像技术的进一步发展与应用。在课题组对变焦扫描方法消除图像畸变的理论研究基础上,针对变焦扫描成像时,扫描镜变角速度扫描控制难度大且精度低的问题,提出采用扫描镜匀角速度扫描结合相机变帧频成像的方法,有效降低成像过程中扫描镜变角速度扫描稳定性和可实现性的难题,并推导出相机帧频大小与扫描视场角间关系。基于变帧频扫描方法,利用已有可连续变焦光学系统,结合相机驱动及控制电路,搭建了一套变帧频变焦扫描长波红外实验载荷,获取了大幅宽成像数据,发现利用变帧频结合变焦扫描成像方法,可有效抑制大幅宽成像时扫描方向图像畸变问题。此外,该方法降低了光机扫描复杂度,验证了变焦扫描可实现对扫描方向畸变矫正。本文实验载荷,通过适应性改造后,可搭载在机载系统实现长波红外大幅宽遥感成像。

- tional modular imaging spectrometer[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2002, 21(1): 9-14. (in Chinese)
- [5] WILLIAM L BARNES, THOMAS S PAGANO, VINCENT V. Prelaunch Characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 1998, 29(4): 1088-1100.
- [6] MASH NISHIHAMA, ROBERT WOLFE, DAVID SOLOMON. MODIS Level 1A Earth Location: Algorithm Theoretical Basis Document Version 3.0 [EB/OL]. [1997-08-26] [ftp://ftp.ccrs.nrcan.gc.ca/ad/EMS/kkhlopen/ATDB\\_mod28\\_v3.pdf](ftp://ftp.ccrs.nrcan.gc.ca/ad/EMS/kkhlopen/ATDB_mod28_v3.pdf).
- [7] 贾益,王盛,安居白,等. 中低分辨率卫星影像 Bowtie 效应的快速去除[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(4): 83-87.  
JIA Y, WANG SH, AN J B, *et al.*. Algorithm of Bowtie Effect Removing for low and medium resolution satellite images[J]. *Remote Sensing for land & Resources*, 2016, 28(4): 83-87. (in Chinese)
- [8] 张宗存,丁学专,杨波,等. 超大幅宽低畸变成像系统设

- 计与分析[J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(1): 690-696.  
ZHANG Z C, DING X ZH, YANG B, *et al.*. Design and analysis of super large width and low distortion imaging system[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, 36(1): 690-696. (in Chinese)
- [9] 周前飞, 刘晶红, 王宣, 等. 航空变焦距斜视成像几何畸变的自动校正[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 2927-2940.  
ZHOU Q F, LIU J H, WANG X, *et al.*. Automatic correction of geometric distortion in aerial zoom squint imaging [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 2927-2940. (in Chinese)
- [10] 刘小勇, 曹开钦, 孙德新, 等. 空间超大幅宽低畸变红外成像扫描控制方法[J]. 光学精密工程, 2018, 26(1): 208-217.  
LIU X Y, CAO K Q, SUN D X, *et al.*. Scanning control method of spaceborne infrared imaging with wide swath and low distortion[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(1): 208-217. (in Chinese)
- [11] 宋盛, 刘重飞, 苑自勇, 等. 压电驱动双面快速指向镜的设计[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2777-2782.  
SONG SH, LIU CH F, YUAN Z Y, *et al.*. Design of double-sided fast steering mirror based on piezoelectric actuating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(11): 2777-2782. (in Chinese)

#### 作者简介:



赵航斌(1991—),男,浙江义乌人,博士研究生,2013年于浙江理工大学获得学士学位,主要从事长波红外及成像光谱仪电子学技术的研究。E-mail: sitpzhb@163.com



刘银年(1971—),男,甘肃武威人,研究员,博士生导师,1994年于西北师范大学获得学士学位,1997年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得硕士学位,2005年于中科院上海技术物理研究所获得博士学位,主要从事高光谱遥感成像技术方面的研究。E-mail: ynliu@mail. sitp. ac. cn

#### 导师简介:



孙德新(1972—),男,山东泰安人,研究员,博士生导师,1996年于山东师范大学获得学士学位,2000年、2003年于中科院上海技术物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事红外高光谱光电遥感技术研究方面的研究。E-mail: sundexin@mail. sitp. ac. cn