

文章编号 1004-924X(2018)05-1028-09

长波红外相机在轨扫描成像畸变消除控制策略

刘小勇^{1,2}, 张宗存^{1,2}, 曹开钦¹, 孙德新^{1,2,3}, 刘银年^{1,2,3*}

(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 南通 226200)

摘要:为消除长波红外相机在轨扫描成像的地面畸变,研究了变焦扫描成像畸变消除系统控制技术。针对变焦扫描控制的多电机位置同步要求,提出一种高精度多电机位置同步算法。依据设计的变焦扫描成像控制原理,设定每个扫描时刻点变焦组电机和补偿组电机的同步位置。变焦控制系统实现与扫描控制系统的同步计时,根据当前位置和下一时刻的同步位置,每隔 0.01 s 计算出电机的运行速度,实时对电机的速度进行控制。实验结果表明,变焦组和补偿组电机的位置同步偏差分别在 ± 0.003 mm、 ± 0.002 mm 以内;沿轨方向地面分辨率的最大偏差不超过 ± 0.047 m。长波红外相机在连续变焦扫描控制过程中成像清晰,达到消除畸变的效果,满足变焦扫描成像的要求。

关键词:长波红外相机;变焦扫描;消畸变;多电机位置同步

中图分类号:TP273;TH74 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182605.1028

Control strategy for distortion elimination of long-wave infrared camera on-orbit scanning imaging

LIU Xiao-yong^{1,2}, ZHANG Zong-cun^{1,2}, CAO Kai-qin¹, SUN De-xin^{1,2,3}, LIU Yin-nian^{1,2,3*}

(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, Nantong 226200, China)

* Corresponding author, E-mail: ynliau@mail.sitp.ac.cn

Abstract: The control technology of a distortion control system for zoom scanning imaging was investigated to eliminate ground distortion of a long wave infrared camera on-orbit scanning imaging. A high-precision multi motor position synchronization algorithm was proposed taking the multi motor position synchronization of zoom scanning control into consideration. The synchronous positions of the zoom group motor and the compensating group motor at each point of the scanning time were set according to the design principle of zoom scanning imaging control. In particular, the zoom control system was designed to realize synchronous timing with the scanning control system, calculate the

收稿日期:2017-10-10;修订日期:2017-12-06.

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(No. A0106/1112)

running velocity of the motor every 0.01 s according to the current position and the next moment synchronous position, and control the velocity of the motor in real time. The experimental results show that the position synchronization errors of the zoom group motor and the compensating group motor are within ± 0.003 mm and ± 0.002 mm, respectively, and the maximum ground sample resolution deviation in the track direction is within ± 0.047 m. The images obtained from the long wave infrared camera in the process of continuous zoom scanning control are quite clear, and the distortion has been significantly eliminated, thus realizing zoom scanning imaging.

Key words: long-wave infrared camera; zoom scanning; distortion elimination; multi-motor position synchronization

1 引言

受红外探测器、制冷机以及光学等技术的限制,相比于可见光成像系统,红外成像系统很难获取大视场、高分辨率的遥感影像。因此,红外波段的成像系统往往采取光机扫描成像方式以扩大成像系统的观测区域,如 45° 镜旋转扫描^[1]、双面镜旋转扫描、望远镜整体旋转扫描以及单面镜双向摆动扫描等^[2]。随着扫描角度的增大,光机扫描型成像系统的观测距离会被拉长,虽然成像系统的瞬时视场角不变,但是地面瞬时视场的线度将随之增加,地面分辨率将逐渐下降,即发生地面畸变^[3]。受地球曲率的影响,这种地面畸变表现得更为突出,学者们称之为 Bowtie 效应^[4-9]。

MODIS 和 VIIRS 是受 Bowtie 效应影响较为严重的两个典型载荷。MODIS 搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上,扫描幅宽 2 330 km,红外波段分辨率为 1 000 m。VIIRS 搭载在 Suomi NPP 卫星上,扫描幅宽 3 000 km,红外波段分辨率为 375 m、750 m。Bowtie 效应严重影响遥感数据的进一步分析及应用,为了消除其影响,国内外学者进行了很多相关研究。李振等^[4]通过推算重叠行,对重叠行进行裁切,并对重叠行进行重采样处理的方法去除 MODIS L1B 数据的 Bowtie 效应,该方法最大限度地保证了原始数据的真实性。宋莎莎等^[5]利用 MODIS Level 1B 产品自带的地理纬度数据确定重复行数,提出基于网函数插值的 MODIS 图像 Bowtie 效应修正方法,避免相关系数法计算重复行数的不稳定性问题。王汉禹等^[6]提出一种不基于传统星历表的 Bowtie 效应消除算法,采用相关系数法确定每个扫描带的重复行数,根据不同分辨率的 MODIS L1B 数据,使用相对应的重采样方法对图像进行重采样处理,该算

法具有较快的执行速度。贾益等^[7]针对现有 Bowtie 效应去除方法存在计算复杂和效率低的不足,提出一种基于路径追踪的 Bowtie 效应快速去除的几何纠正算法。钱海明等^[8]研究了 MODIS L1B 的数据存储结构,利用自带星下点 1 km 间隔维度数据解算扫描方向上的影像重叠度,通过重采样方式消除 Bowtie 效应,该方法减少了算法的复杂度,提高了计算效率,具有很强的适应性。VIIRS 载荷的研发人员采用在轨预处理的方法降低地面畸变,在轨成像时删除部分重叠像元,再对扫描方向上的像元分多级进行合并获得地面分辨率趋于一致的遥感影像^[9]。不难看出,以上各种 Bowtie 效应消除算法以及预处理方法都是基于后期图像处理,处理的数据类型单一,算法具有一定的局限性,同时会影响原始数据的准确性,不利于遥感数据的定量化应用。随着成像幅宽的增大以及地面分辨率的提高,获得的图像数据量变得非常庞大,消除算法将变得更加复杂,耗时也将增加。

在轨扫描成像畸变消除系统基于光学方法来消除地面畸变,无需经过后期图像修正,保证原始数据的准确性,同时还可以降低重叠率,减小数据冗余,提高数据传输效率,有利于超大幅宽、高分辨率红外遥感数据的定量化研究及应用。为了达到在轨消除畸变的效果,本文根据地面畸变的规律实现变焦扫描控制系统的多电机位置高精度同步控制,以保证连续变焦扫描过程中成像清晰。

2 在轨扫描成像畸变消除技术原理

如图 1 所示,红外成像系统以固定瞬时视场角在轨扫描成像时,不同成像角度下其观测距离不一样,因此探测器单个像元的覆盖区域不一致,即地面分辨率发生变化,导致地面发生几何畸变。同时由

于穿轨方向上地球曲率的影响大于沿轨方向,所以穿轨方向的地面畸变情况要比沿轨方向更严重。

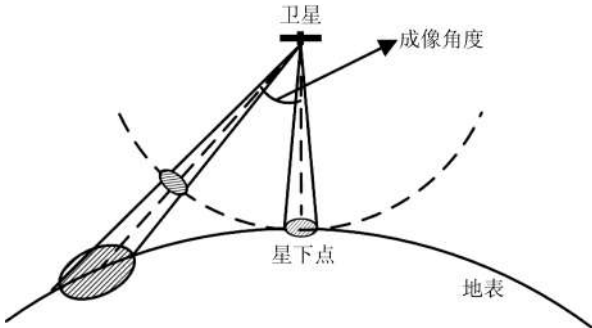


图 1 在轨扫描成像地面畸变示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ground distortion of on orbit scanning imaging

张宗存等^[10]研究了在轨畸变消除成像系统的光学设计方法并给出了设计实例,其基本原理是:(1)在光学成像系统中引入一个连续变焦光学系统,在扫描成像的过程中根据沿轨方向地面分辨率的变化规律连续改变成像系统的瞬时视场角,使沿轨方向上不同成像角度下的地面分辨率与星下点的保持一致,从而消除沿轨方向上的地面畸变。连续变焦光学系统设计的关键是要保证在变焦过程中光学系统的 F 数保持不变,以确保变焦过程中像面照度不变。(2)由于穿轨方向地面畸变比沿轨方向严重,在消除沿轨方向地面畸变后,穿轨方向仍然存在剩余畸变。通过在穿轨方向上引入连续可调狭缝光阑,根据剩余地面畸变的变化规律对光阑进行连续调节以消除穿轨方向上的剩余畸变。

3 变焦扫描控制

3.1 控制系统组成

如图 2 所示,变焦扫描控制系统由两部分组成:扫描镜的扫描控制系统以及红外连续变焦镜头的变焦控制系统。扫描控制系统主要对扫描镜进行控制,使它按照既定规律运动完成视场扫描,使视场内的地物辐射信息进入到成像光学系统。变焦控制系统主要对连续变焦镜头的变倍透镜组和补偿透镜组的位置进行控制,移动变倍透镜组完成光学系统的变焦功能,而移动补偿透镜组则是对变焦过程中的离焦量进行补偿,使变焦过程中成像始终保持清晰。

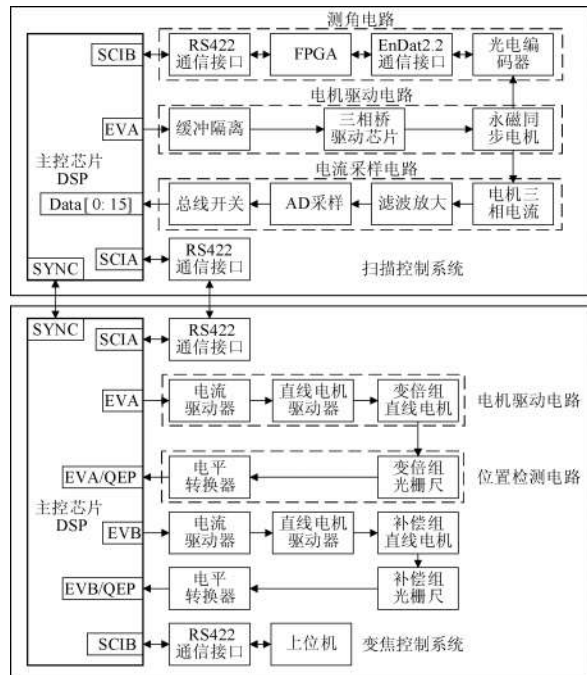


图 2 变焦扫描控制系统框图

Fig. 2 Block diagram of zoom scanning control system

3.2 扫描控制原理与组成

扫描控制系统主要由主控制器 DSP、测角电路、电流采样电路、电机驱动电路组成。扫描控制的基本原理是通过电流采样电路获取三相永磁同步电机各相电流作为电流闭环控制的反馈量,主控制器 DSP 通过测角电路获取扫描电机的高精度角度信息,并运用移动差分测速算法获取电机的高精度角速度作为速度闭环控制的反馈量,形成速度电流双闭环控制,实现扫描镜转动角速度的高精度控制。

永磁同步电机的控制采用 $i_d=0$ 的磁场定向控制策略^[11],定子绕组三相交流电流经过空间坐标变换转化为两个随转子同步旋转正交的直流分量,使用永磁同步电机获得直流电机同样的控制性能,节省功耗、提高效率。电机转子直接安装在扫描镜的转轴上,直接驱动负载,减少中间传动环节,提高扫描镜低速运行时的控制精度^[12]。一般固定瞬时视场角的成像系统均采用匀速扫描成像方法,而变焦扫描成像过程中,成像系统的瞬时视场角会连续变化,匀速扫描成像会出现漏扫情况。因此,扫描控制系统需依据地面畸变的规律对扫描镜实施变速扫描控制,以匹配连续变化的瞬时视场角^[13]。

3.3 变焦成像系统及驱动控制

根据星载长波红外相机的设计参数:卫星轨道高度为 786 km,扫描视场为 104°,成像幅宽为 2 250 km,星下点地面分辨率为 100 m,探测器像元尺寸为 30 μm,为消除沿轨方向的地面畸变,变焦光学系统的变倍比为 1:1.836,成像系统需具备 235.8~432.8 mm 的连续变焦功能。为了便于在地面验证畸变消除系统沿轨方向的畸变消除效果,研制了一套长波红外连续变焦成像系统,系统参数如表 1 所示。选取 84.2~154.6 mm 作为消畸变焦段,变倍比与星载情况一致,84.2 mm 的焦距对应星下点的地面分辨率为 280 m。根据地面分辨率与瞬时视场角、成像角度的关系^[13],固定焦距扫描和变焦扫描的地面分辨率变化曲线如图 3 所示,由于曲线对称,图中仅给出了正角度部分。从图可以看出在变焦距扫描成像时,沿轨方向的地面分辨率一致,而穿轨方向的地面分辨率比固定焦距扫描时有所提高,因此在采用连续变焦成像系统消除沿轨方向的地面畸变的同时可以降低穿轨方向的地面畸变。

表 1 长波红外连续变焦成像系统的主要参数指标

Tab. 1 Main parameters of long-wave infrared zoom imaging system

参数	值
分辨率	320×256
响应波段/μm	7.7~9.3
像元尺寸/μm	30×30
焦距/mm	40~180
F 数	2.0

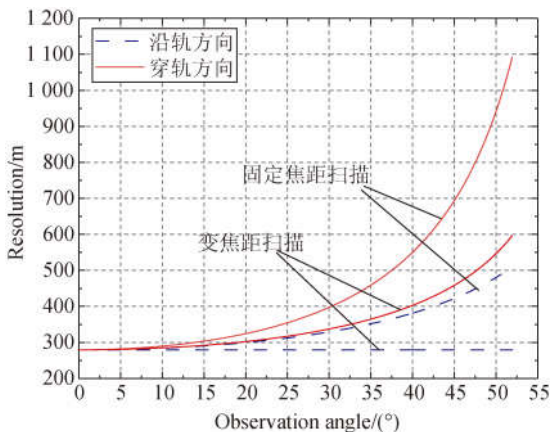


图 3 地面分辨率变化曲线

Fig. 3 Resolution variation of ground sample

变焦成像系统的内部结构如图 4 所示,变倍透镜组和补偿透镜组的镜框固定在两侧高精度滑轨的滑块上,以保证成像系统光轴具有较高的同轴度。电机选用步进电机与滚珠丝杠一体化设计的直线电机,具有体积小、开环运动精度高、推力大的特点,满足变焦控制的要求。光学系统的焦距与变倍透镜组和补偿透镜组的位置具有确定关系,因此采用两台 1 μm 分辨率的光栅尺获取两组移动透镜组的位置信息。由于变焦成像过程时间较短仅为 6.149 s,必须提高变焦控制的响应速度,所以对两组电机采取开环控制策略。

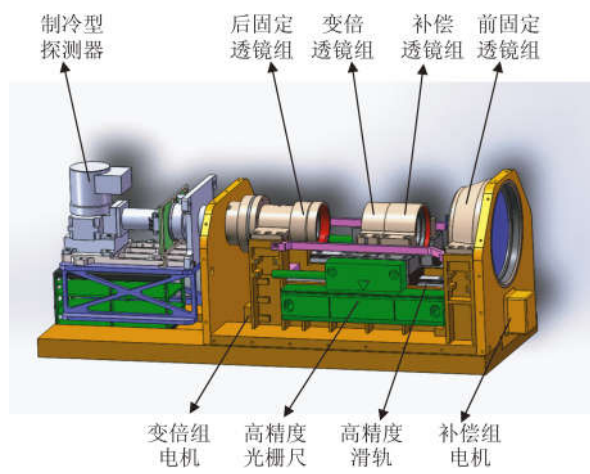


图 4 变焦成像系统的内部结构图

Fig. 4 Internal structure of zoom imaging system

4 多电机位置同步算法

4.1 位置同步要求

地面分辨率的变化与成像角度有关,因此在扫描成像过程中,光学系统的焦距必须与扫描镜的角度对应,才能达到消除沿轨方向地面畸变的效果。而光学系统的焦距取决于变倍透镜组和补偿透镜组的绝对位置,所以在扫描成像时,扫描镜电机与变倍透镜组电机、补偿透镜组电机在连续运动过程中的位置必须同步。成像角度与焦距的不同步将导致地面分辨率出现偏差,而变倍透镜组与补偿透镜组位置的不同步不仅会导致系统焦距出现偏差,而且会导致一定的离焦量,从而使光学系统的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 下降,成像模糊。为保证最终的消畸变效果,沿轨方向的地面分辨率偏差不能超过 ±1%,即 ±2.8 m,同时变倍透镜组与补偿透镜组的位置偏差不能超过 ±0.005 mm。

4.2 位置同步算法

根据沿轨方向消畸变控制原理仿真获得的位

置同步特性曲线以及电机运动特性曲线如图 5 和图 6 所示,可以看出变焦扫描控制系统的 3 个电机在扫描成像过程中做非线性运动。在多电机做非线性运动的情况下保证其位置同步是系统实现消畸变功能的关键所在。对于一般的线性运动系统,只需要保证其运动速度具有足够的稳定度就可以实现各个电机的位置同步。而对于非线性运动系统,则需要一定的控制算法实现多电机的位置同步。理论上变焦控制系统可以获取扫描镜的角度信息解算出当前成像角度的理论焦距值,然后变焦控制系统再根据这一焦距值解算出变倍透镜组和补偿透镜组的位置,最后控制两组直线电机运动到相应的位置。但是该方法会引入控制延时,造成较大的地面分辨率偏差。而且变焦光学系统设计仿真得到的焦距是离散点,焦距与变倍透镜组和补偿透镜组的位置值也并非线性关系,要想根据焦距解算出变倍透镜组和补偿透镜组的位置就必须对两组移动透镜组的位置与焦距进行曲线拟合。然而,曲线拟合精度也会影响到最终的消畸变效果,拟合精度越高,计算越复杂,这样将加大算法的复杂性,不利于工程化。

为实现变焦扫描控制系统的多电机位置同步,这里提出了一种位置同步精度较高、运算简单、有利于工程化实现的位置同步算法。每隔 0.01 s 记录扫描镜在扫描成像过程中的角度信息,根据角度信息解算出光学系统的焦距,再用光学设计软件 Zemax 仿真得到每个焦距对应的变倍透镜组和补偿透镜组的位置信息,这样就获得了扫描成像过程中每隔 0.01 s 两组移动透镜组的位置。算法的具体实现过程如图 7 所示,将这两组位置信息记录在主控制器(DSP)的寄存器数组中,变焦控制系统在接收到扫描控制系统的同步信号后开始同步计时,然后每隔 0.01 s 采用查表法读取下一时刻两组透镜组的同步位置,分别与当前位置进行比较计算出运动到下一个同步位置的速度,并对电机的运行速度进行更新。由图 5 可以看出在成像角度 0°附近,两组透镜组各自相邻的两个同步位置十分接近,在进行速度计算时,有可能当前位置已经超过了下一时刻的同步位置,这样将导致计算错误。这种情况下,即当检测到当前位置超过下一时刻的同步位置时,不对电机的运行速度进行更新而是保持当前的速度。由于相邻两个时刻同步位置之间的运动速度是恒定的,相当于在两个位置之间进行了线性运动插值,能够保证运动过程中成像清晰。

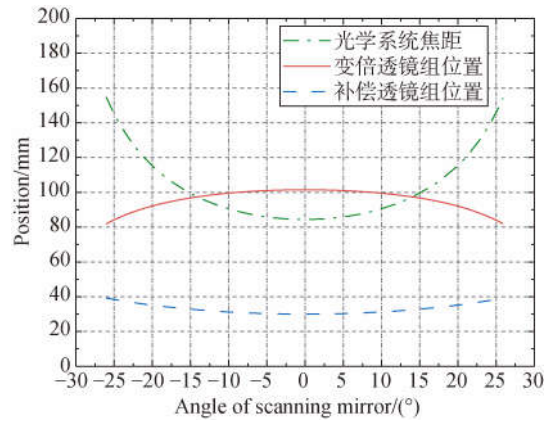


图 5 位置同步特性曲线

Fig. 5 Characteristic curve of position synchronization

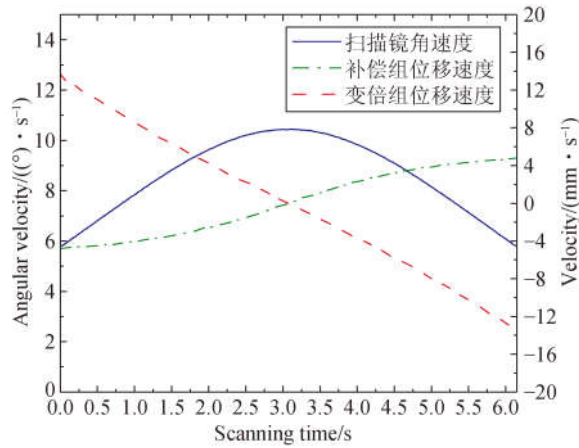


图 6 电机运动特性曲线

Fig. 6 Characteristic curve of motor motion

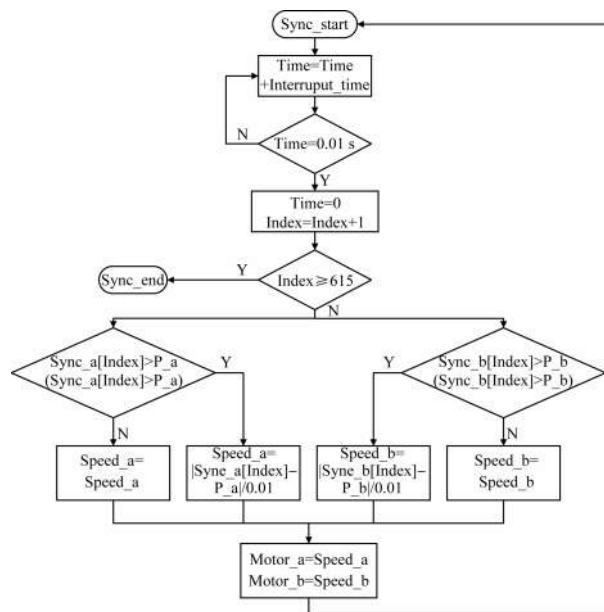


图 7 位置同步算法流程图

Fig. 7 Flowchart of position synchronization algorithm

4.3 算法分析

算法实现的前提是根据事先每隔 0.01 s 采集扫描镜在成像过程的角度信息仿真获得相对应的电机同步位置信息,但实际上每次扫描过程中,同一个时刻的角度位置不是绝对相同的,会存在一定的角度偏差,如图 8 所示。

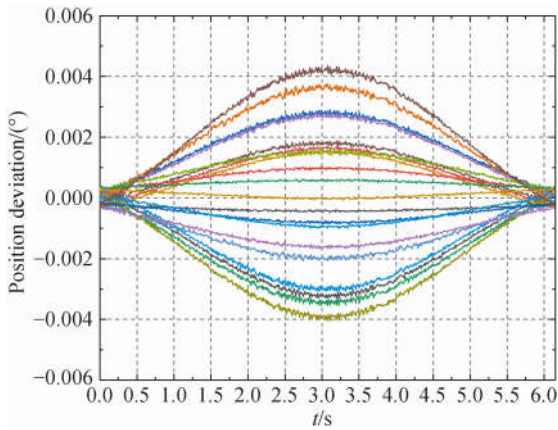


图 8 角度位置偏差
Fig. 8 Angular position deviation

图 8 中采集了 20 次扫描成像过程中每隔 0.01 s 的角度位置偏差,由图可以看出角度位置偏差在 $-0.004^{\circ} \sim 0.004^{\circ}$ 之间,中间时刻偏差值最大,这是因为中间时刻扫描镜指向星下点位置,其扫描速度最大。取其中角度位置偏差最大的曲线分析偏差对沿轨方向地面分辨率的影响,结果如图 9 所示。由图可以看出,相对于沿轨方向的地面分辨率 280 m,地面分辨率偏差不超过 ± 0.017 m。理论计算表明,所提出的多电机位置同步算法满足成像要求。

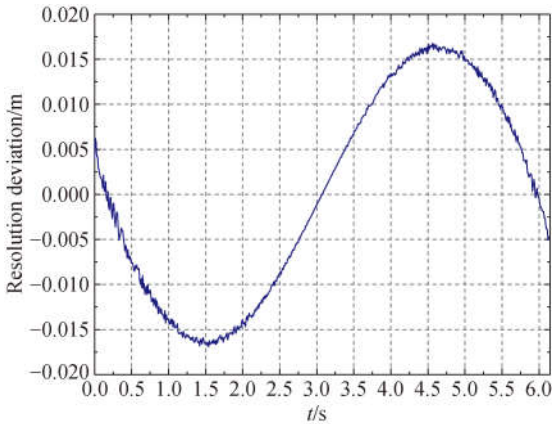
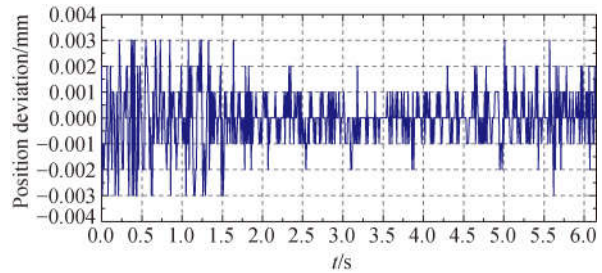


图 9 地面分辨率偏差
Fig. 9 Calculated ground sample resolution deviation

5 实验结果与分析

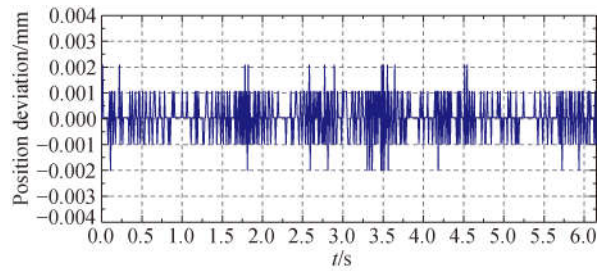
5.1 电机位置同步性能测试

变焦成像系统在连续变焦控制过程中是否能保持成像清晰与变倍组电机和补偿组电机的位置同步精度直接相关,实验首先对变焦成像系统的电机位置同步性能进行测试,以验证多电机位置同步算法的实际控制效果。测试方法是:用变焦控制电路驱动变焦成像系统进行连续变焦运动,控制系统根据电机位置同步算法,在 6.149 s 的时间内对两组电机进行同步控制;在每隔 0.01 s 的同步时刻,控制系统采集两组透镜组的位置值信息发送到上位机;将采集到的实际位置与理论上相同时刻的同步位置进行比较,获得电机的位置同步偏差。



(a) 变倍组

(a) Zoom group



(b) 补偿组

(b) Compensating group

图 10 电机的位置同步偏差

Fig. 10 Position synchronism deviation of motor

测试结果如图 10 所示,变倍组电机与补偿组电机的位置同步偏差分别在 ± 0.003 mm、 ± 0.002 mm 以内。虽然电机位置同步精度满足光学设计要求的 ± 0.005 mm,但是电机位置同步偏差会造成光学系统的焦距出现偏差,从而导致消畸变扫描成像过程中沿轨方向地面分辨率出现偏差,影响畸变消除效果,因此还需要分析地面分辨率偏差是否

满足要求。根据采集的两组电机位置信息,通过光学设计软件获得成像系统实际的焦距信息。依据实际焦距信息计算出相对应同步时刻点的地面分辨率,再与理论地面分辨率 280 m 做差可获得地面分辨率偏差,结果如图 11 所示。地面分辨率偏差在±0.03 m 以内,结合图 9 可知,地面分辨率最大偏差不超过±0.047 m,由此表明多电机位置同步算法满足变焦成像要求。

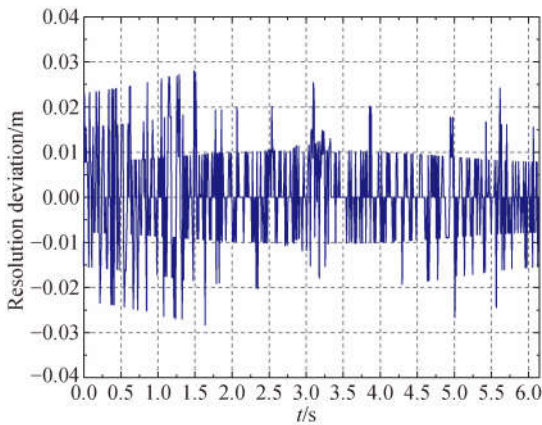


图 11 地面分辨率偏差

Fig. 11 Measured ground sample resolution deviation

5.2 外景成像实验结果分析

如图 12 所示,外景成像实验平台包括:长波红外变焦成像系统、图像采集系统、变焦扫描测控系统、稳压电源、变焦控制电路、扫描控制电路和扫描转台。进行外景成像实验的目的有两个:一是验证多电机位置同步算法在实际连续变焦成像过程中能否保证图像清晰;二是在地面验证变焦扫描成像是否能达到在轨扫描成像地面畸变消除的效果。

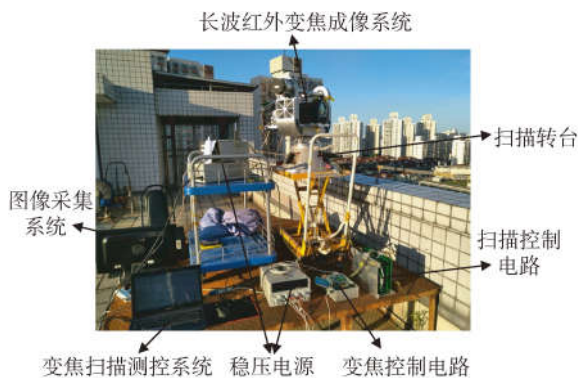


图 12 长波红外变焦成像系统外景实验平台

Fig. 12 Exterior experiment platform of long-wave infrared zoom imaging system

图 13 为长波红外相机对准同一场景,采集连续变焦过程中不同焦距的面阵图像。由图可以看出在连续变焦过程中,随着焦距的增大和空间分辨率的提高,建筑物的细节更加清晰,表明多电机位置同步算法在实际成像中能保证图像清晰。

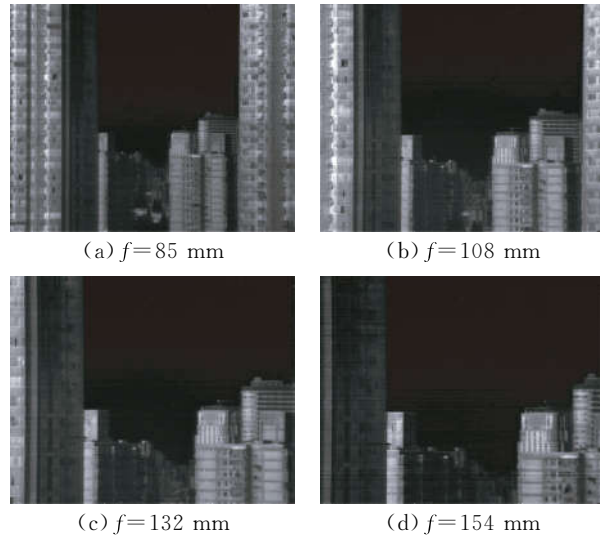
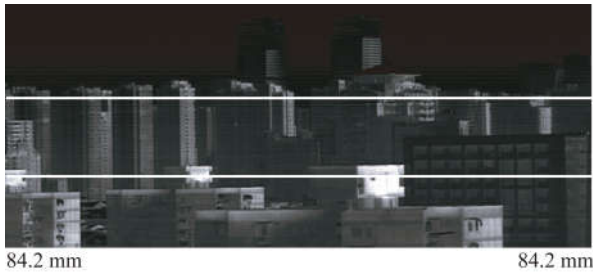


图 13 变焦成像实验图像

Fig. 13 Experimental images of zoom imaging

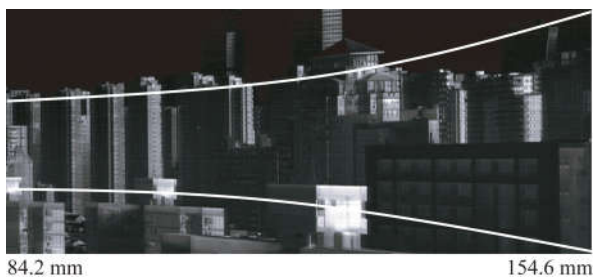
地面验证实验与实际在轨扫描成像的畸变消除技术原理是一致的,均采用变焦扫描控制技术,区别在于:(1)在轨扫描成像光学系统的焦距更长,采用扫描镜完成视场扫描;地面验证实验的变焦成像系统焦距短,但是其变焦比与在轨情况一致,同时变焦成像系统是一个独立的成像系统,在前端没有设计扫描镜,因此采用扫描转台取代扫描镜来完成视场扫描。(2)在轨扫描成像时,卫星的轨道高度要远远大于地物自身高度,因此地面可以近似看成规则的球面,地面畸变较大且有规律,可以根据该规律来设计相应的变焦曲线;地面验证实验时,成像距离有限,地面畸变很小,且在扫描视场内建筑物的距离远近也不尽相同,畸变大小也不一样,很难设定一条合适的变焦曲线进行消畸变扫描成像。鉴于第 2 点区别,地面验证实验方案设计如下:采用面阵探测器的单列像元进行扫描成像(在轨扫描成像用的是线列探测器),首先采用 84.2 mm 固定焦距进行扫描成像,然后再采用 84.2~154.6 mm 的焦距,根据在轨消畸变的变焦曲线进行变焦扫描成像,然后对两幅图像进行比较,考察变焦扫描成像获得的图像能否

在提高沿轨方向和穿轨方向的空间分辨率的同时,保证成像清晰且不发生漏扫。



(a) 定焦扫描图像

(a) Scanning image with fixed focus



(b) 变焦扫描图像

(b) Zoom scanning image

图 14 扫描成像实验图像

Fig. 14 Experimental images of scanning imaging

实验图像如图 14 所示,对比两图可以看出,定焦扫描图像中的建筑物高度基本处于同一水平高度上,而变焦扫描图像中建筑物从左到右的细

节也更加清晰,高度也不在同一水平上。变焦扫描图像在水平方向和竖直方向上逐渐被拉伸,这正是两个方向的空间分辨率都逐渐提高的结果。根据在轨扫描成像的地面畸变规律,地面畸变是由于两个方向上的地面分辨率逐渐降低导致的。地面实验结果表明,变焦扫描成像可以根据规律提高两个方向上的空间分辨率,达到消除畸变的效果。

6 结 论

大幅宽红外扫描成像的地面畸变限制了遥感影像的应用,而在轨扫描成像消畸变系统可以在轨消除地面畸变,获取畸变率非常低的原始图像数据,有利于超大幅宽、高分辨率遥感影像的量化研究及应用。本文研究了变焦扫描成像畸变消除系统的控制技术,针对变焦扫描控制的多电机位置同步要求,提出一种高精度多电机位置同步算法。实验结果表明,该算法得到的沿轨方向的地面分辨率最大偏差不超过 ± 0.047 m,满足成像要求。外景成像实验结果显示,连续变焦过程中成像清晰,能够达到在轨扫描成像畸变消除的效果。理论上变焦扫描成像只能消除沿轨方向的地面畸变,而穿轨方向的剩余地面畸变需要结合连续可调光阑加以消除,连续可调光阑控制技术有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 刘银年. 45°镜多元探测器并扫成像特性和扫描轨迹分析 [J]. 光学精密工程, 2002, 10(1): 110-115.
LIU Y N. Analysis of the imaging characteristics and scanning traces of the 45° rotating scanning mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(1): 110-115. (in Chinese)
- [2] 吕婀娜. 高分辨率宽幅红外相机扫描控制技术研究 [D]. 北京: 中国科学院, 2012.
LÜ X N. *Research of Scanning Control Technology in High Resolution and Wide Swath Infrared Camera* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [3] 周世椿. 高级红外光电工程导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 110-112.
- [4] ZHOU SH CH. *Introduction to Advanced Infrared Opto Electronics Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2014: 110-112. (in Chinese)
- [4] 李振, 黄海军. Matlab 环境下去除 MODIS L1B 数据的“蝴蝶结”效应 [J]. 海洋科学集刊, 2010, (50): 50-56.
LI ZH, HUANG H J. Using Matlab to remove the bowtie effect of MODIS L1B data [J]. *Studia Marina Sinica*, 2010, (50): 50-56. (in Chinese)
- [5] 宋莎莎, 张杰, 孟俊敏. 基于网函数插值的 MODIS Level 1B 图像 Bowtie 效应修正 [J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(4): 552-559.
SONG SH SH, ZHANG J, MENG J M. Bowtie effect correction based on net function interpolation in MODIS level 1B images [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(4): 552-559. (in Chinese)

- [6] 王汉禹, 郭浩, 安居白, 等. MODIS 数据 Bowtie 效应消除算法 [J]. 计算机工程, 2014, 40(6): 234-237.
WANG H Y, GUO H, AN J B, *et al.*. Algorithm of bowtie effect removing for MODIS data [J]. *Computer Engineering*, 2014, 40(6): 234-237. (in Chinese)
- [7] 贾益, 王盛, 江万寿. 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, JIANG W SH. Algorithm of Bowtie effect rapid removing for low and medium resolution satellite images [J]. *Remote Sensing for Land & Resource*, 2016, 28(4): 83-87. (in Chinese)
- [8] 钱海明, 王春林, 孙金彦. MODIS 影像的几何处理算法研究 [C]. 第十九届华东六省一市测绘学会学术交流暨 2017 年海峡两岸测绘技术交流与学术研讨会论文集, 山东省测绘地理信息学会, 2017: 5.
QIAN H M, WANG CH L, SUN J Y. A study of algorithm of geometric processing for MODIS image [C]. *Shandong Provincial Society for Surveying, Mapping and Geoinformation*, Shandong Institute of Surveying and Mapping Geographic Information, 2017: 5. (in Chinese)
- [9] NOAA. Visible infrared imaging radiometer suite (VIIRS): Imagery environmental data record (EDR) User's guide [R]. Washington, D. C.: U. S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration, 2015: 4.
- [10] 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(6): 732-738.
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(6): 732-738. (in Chinese)
- [11] 刘京, 李洪文, 邓永停. 基于扰动观测器的永磁同步电机电流环自适应滑模控制 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1229-1241.
LIU J, LI H W, DENG Y T. Current adaptive sliding mode control based on disturbance observer for permanent magnet synchronous motor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(5): 1229-1241. (in Chinese)
- [12] 翟少雄, 王长胜, 谭立, 等. 空间高精度扫描伺服系统的驱动控制 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 1104-1111.
ZHAI SH X, WANG CH SH, TAN L, *et al.*. Driving and controlling of high accuracy scanning servo-system in space [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 1104-1111. (in Chinese)
- [13] 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 [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 super-swath and low distortion [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(1): 208-217. (in Chinese)

作者简介:



刘小勇(1987—),男,广西桂林人,博士研究生,2011年于广西大学获得学士学位,主要从事红外成像光机扫描控制系统方面的研究。E-mail: lxyung@foxmail.com

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方面的研究。E-mail: sundexin@mail.sitp.ac.cn

通讯作者:



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