

文章编号 1004-924X(2018)01-0208-10

空间超大幅宽低畸变红外成像扫描控制

刘小勇^{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 启东 226200)

摘要: 本文以空间超大幅宽低畸变红外变焦扫描成像系统为研究对象, 分析给出地面畸变与成像系统瞬时视场角的关系, 提出变速扫描成像并推导了扫描角速度公式。为解决匀速 360° 旋转扫描效率低和双向摆动扫描成像需安装扫描线矫正器所导致的系统复杂性高、可靠性低的缺点, 设计了一种正弦加速度快速回扫的方法。对变速扫描以及正弦加速度快速回扫方法进行了仿真及实验, 结果表明扫描控制系统慢速扫描与快速回扫之间状态切换稳定, 扫描起止角度误差仅为 1.44 角秒, 扫描速度稳定度为 $\pm 0.5\%$, 扫描成像过程时间误差为 83 μs , 回扫时间误差为 250 μs , 整个扫描周期时间偏差小于 1 倍像元积分时间 (355 μs), 扫描效率达 86%, 在提高了扫描效率的同时减小对扫描机构的冲击与振动, 满足成像要求。正弦加速度快速回扫方法对机载红外扫描成像系统快速回扫运动设计也具有一定指导意义。

关键词: 大幅宽; 低畸变; 变速扫描; 正弦加速度; 高扫描效率

中图分类号: TP273 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20182601.0208

Scanning control of spaceborne infrared imaging with super-swath and low distortion

LIU Xiao-yong^{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, Qidong 226200, China)

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

Abstract: The relation between ground distortion and instantaneous field of view of the imaging system was analyzed; variable-speed scanning imaging was proposed and angular scanning speed formula was derived with infrared zoom scanning imaging system of super-swath low distortion in space as research object in this paper. Meanwhile, a kind of rapid fly-back method of sine acceleration was designed to solve the shortcomings such as low scanning efficiency of uniform 360° rotation, scanning line appliance needed to be installed for two-way swing scanning imaging and high complexity and low reliability of the system. Simulation and experiments were conducted on variable-speed

收稿日期: 2017-06-13; 修订日期: 2017-08-09.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2016YFB0500400); 国家重大专项资助项目 (No. A0106/1112)

scanning and rapid fly-back method of sine acceleration in this paper and the result indicates that the state shift between slow scanning and rapid fly-back of scanning control system is stable and the start and stop angle error of scanning is just 1.44 arc-second; scanning speed stability is $\pm 0.5\%$; time error in scanning imaging process is $83 \mu\text{s}$ and fly-back time error is $250 \mu\text{s}$; time deviation of the whole scanning period is less than pixel integral time ($355 \mu\text{s}$) and scanning efficiency reaches 86% , thus scanning efficiency is improved and impact and vibration of scanning mechanism are reduced meanwhile to satisfy imaging requirements. Rapid fly-back method of sine acceleration will provide a reference for rapid fly-back motion design of airborne infrared scanning imaging system.

Key words: wide swath; low distortion; variable-speed scanning; sine acceleration; high scanning efficiency

1 引 言

超大幅宽、高分辨率是未来空间对地观测发展的一个重要方向,如空间长波红外相机被应用于全球植被监测,幅宽达 $2\,000 \text{ km}$ 以上,地面分辨率在 100 m 以内。大幅宽成像可以缩短卫星的重访周期,提高植被观测的时间分辨率,高分辨遥感图像可以提供更精细的植被信息。研究表明^[1],国内外典型大幅宽、高分辨率空间红外相机大都采用光机扫描的成像方式,形成扫描视场以扩大遥感仪器的观测区域,如美国陆地卫星系列上专题制图仪(TM、ETM+)、Terra 卫星上的中分辨率成像光谱仪(MODIS)、Suomi NPP 卫星上的可见光红外成像辐射仪(VIIRS),以及中国海洋卫星上的海洋水色水温扫描仪(COCTS)、环境减灾卫星上的红外多光谱扫描仪(IRMS)^[2]等。

对于光机扫描型遥感仪器,扫描效率作为其中一个重要技术指标,其高低直接影响到探测器的像元驻留时间,进而影响遥感仪器的信噪比^[1]。尤其对于大幅宽红外扫描成像,延长像元驻留时间有利于提高系统信噪比,而在扫描周期时间一定的情况下,要想获得较长的像元驻留时间,就必须提高遥感仪器的扫描效率。上述典型大幅宽、高分辨率空间红外相机大都采用扫描镜匀速 360° 旋转的扫描方式,如 45° 镜旋转扫描^[3]、双面镜旋转扫描^[2] 和望远镜整体旋转扫描^[4] 等,只有 TM、ETM+ 采用单面镜双向摆动的扫描方式。通常匀速 360° 旋转的扫描镜只利用其小范围角度来获取图像信息,整个扫描周期的其他大部分时间为无效扫描时间,因此扫描效率较低。单面镜双向摆动扫描在往返两个方向都进行成像,因

此扫描效率高达 85% 。但由于卫星平台的飞行运动,单面镜双向摆动扫描获得的图像成“Z”字形,需要安装扫描线矫正器加之矫正,这样不仅增加了系统的复杂性,而且降低了可靠性^[5]。另外这些空间红外相机的瞬时视场角是固定的,在进行大幅宽扫描成像时,受地表曲率的影响,容易形成地面畸变,且会随着幅宽的增大、分辨率的提高而越来越严重。为消除这种地面畸变,国内外学者进行了大量的研究,虽然提出的消畸变方法在一定程度上取得较好的效果,但是这些方法大都基于后期图像处理,无法避免遥感图像原始信息的丢失,且算法计算量大,处理数据类型单一,实时性差^[6-7]。为了实现更大幅宽、更高分辨率成像,消除地面畸变显得尤为重要,因此本课题组研究了一套在轨畸变消除系统,在理论上验证了其可行性,并给出了相应的光学系统设计方法以及设计实例,通过引入连续变焦光学系统以及可变光阑分别消除沿轨方向和穿轨方向的地面畸变^[8]。由于引入了连续变焦光学系统,瞬时视场角会连续变化,因此在扫描成像的过程中,扫描镜角速度需要与瞬时视场角进行匹配,否则易导致漏扫或重叠率过大,最终会影响遥感图像质量。

本文以幅宽 $2\,250 \text{ km}$ 、地面分辨率 100 m 的空间低畸变长波红外变焦扫描成像控制系统为研究对象,提出变速扫描成像,正弦加速度快速回扫的控制方法。正向实施变速扫描以匹配变化的瞬时视场角,满足降低扫描成像地面畸变的要求,反向实施正弦加速度快速回扫,此过程不采集图像。采用回扫正弦加速度控制,提高扫描效率的同时可有效降低扫描运动对扫描机构的冲击与振动,提高了系统的可靠性。在分析地面畸变与相机瞬

时视场角关系的基础上,推导出了满足低畸变要求的扫描镜角速度曲线公式,并设计了正弦加速快速回扫的角速度曲线;然后对扫描控制系统进行仿真以验证控制方法的可行性;最后搭建扫描控制系统实验平台,测试了扫描控制方法的性能。

2 扫描成像地面畸变与瞬时视场角的关系

图 1 为红外扫描成像示意图,如图所示当扫描至星下点左侧某一点时,根据光学系统成像理论^[9],沿轨方向地面分辨率与瞬时视场角的关系为:

$$GSD_V = \frac{\sqrt{R^2 + (R+H)^2 - 2R \cdot (R+H) \cdot \cos \beta} \cdot IFOV}{1} \quad (1)$$

式中: GSD_V 为沿轨方向地面分辨率; R 为地球半径; H 为卫星轨道高度; β 为地心张角; $IFOV$ 为瞬时视场角。考虑地表曲率的影响,穿轨方向地面分辨率与瞬时视场的关系为:

$$GSD_H = R \cdot \left[\arcsin \left(\frac{R+H}{R} \cdot \sin \alpha_M \right) - \arcsin \left(\frac{R+H}{R} \cdot \sin \alpha_N \right) - IFOV \right] \quad (2)$$

式中: GSD_H 为穿轨方向地面分辨率, α 为成像角度, $\alpha_M = \alpha + IFOV/2$, $\alpha_N = \alpha - IFOV/2$ 。

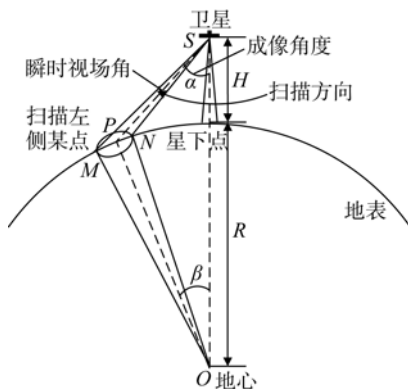


图 1 红外扫描成像示意图

Fig. 1 Infrared scanning imaging schematic diagram

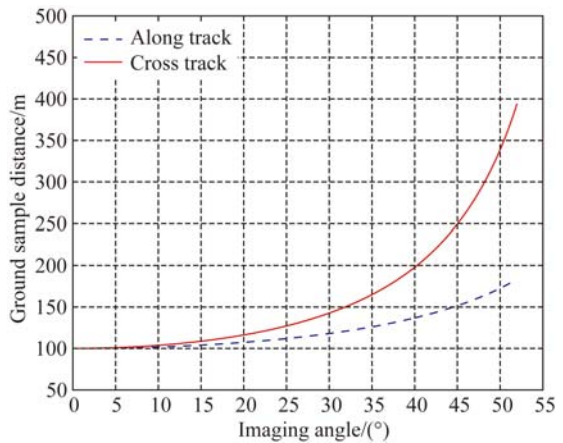


图 2 固定瞬时视场角的地面分辨率变化曲线

Fig. 2 Change of ground sample distance with fixed IFOV

根据系统参数:扫描视场 $\pm 52^\circ$, 轨道高度 786 km, 扫描幅宽 2 250 km, 星下点分辨率 100 m, 对地面分辨率变化情况进行仿真。图 2 为固定瞬时视场角下两个方向地面分辨率随成像角度的变化, 图中仅画出正成像角度部分。由图可以看出, 两个方向上的地面分辨率均随着成像角度的增大而降低, 同时穿轨方向地面分辨率的变化大于沿轨方向, 地面畸变表现为两方向地面分辨率的下降。由于两个方向上的地面分辨率变化趋势不一致, 在变视场角扫描下只能保证一个方向上的地面分辨率一致。如果用以消除穿轨方向的畸变, 沿轨方向的地面分辨率变化曲线会向下弯曲, 在保证前后两个扫描条带幅宽边缘不发生漏扫的情况下会导致星下点附近重叠率过大, 因此选择变视场角扫描先消除沿轨方向的畸变。图 3 为变瞬时视场角下两个方向地面分辨率随成像角度的变化, 如图所示在保持沿轨方向上地面分辨率一致的情况下, 穿轨方向地面分辨率比固定瞬时视场时有所提高, 因而可以降低地面畸变。要保持沿轨方向地面分辨的一致, 瞬时视场角的变化规律必须满足以下关系:

$$IFOV = \frac{GSD_0}{\sqrt{R^2 + (R+H)^2 - 2R \cdot (R+H) \cdot \cos \beta}} \quad (3)$$

式中 GSD_0 为星下点地面分辨率。

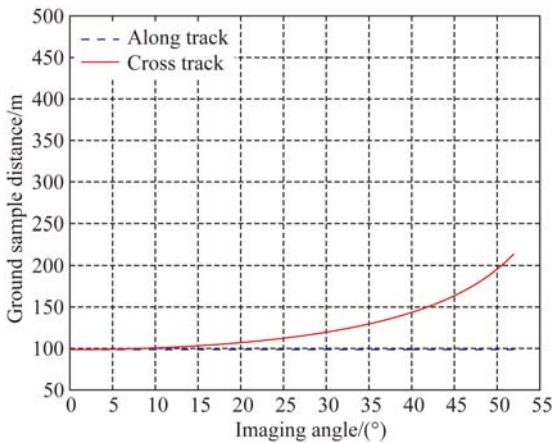


图 3 变化瞬时视场角的地面分辨率变化曲线

Fig. 3 Change of ground sample distance with varied IFOV

3 扫描运动角速度曲线分析

3.1 慢速扫描角速度曲线的推导

探测器获取信息的帧周期时间可以看作积分时间 t_i 与读出时间 t_r 之和,即 $t_t = t_i + t_r$ 。当 $t_r \neq 0$ 时对应探测器先积分后读出工作模式,当 $t_r = 0$ 时对应探测器边积分边读出工作模式。假设 t 时刻为上一帧积分结束时刻扫描至 P 点,而 $t' = t + t_r$ 时刻为下一帧积分开始时刻扫描至 P' 点,则:

$$\begin{cases} \alpha_M = \alpha_P + IFOV/2 \\ \alpha_N = \alpha_P - IFOV/2 \\ \alpha_{M'} = \alpha_{P'} + IFOV/2, \\ \alpha_{N'} = \alpha_{P'} - IFOV/2 \\ \alpha_{P'} = \alpha_P + 2\omega_s \cdot t_r \end{cases} \quad (4)$$

式中: ω_s 为扫描镜角速度。为确保不发生漏扫,必须满足 $\alpha_M \geq \alpha_{N'}$,即 $2\omega_s \cdot t_r \leq IFOV$ 。对于边积分边读出工作模式,不会发生漏扫情况。

根据式(4)可以求出穿轨方向的重叠率为:

$$\eta = \frac{IFOV - 2\omega_s \cdot t_r}{IFOV + 2\omega_s \cdot t_i} \times 100\% \quad (5)$$

扫描成像时,积分时间、扫描角速度需与空间分辨率匹配。在积分时间内,光学系统的光轴扫描过的角度应等于瞬时视场角,即扫描镜角速度为:

$$\omega_s = IFOV/2t_i \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可以看出,对于固定瞬时视场角的光机扫描系统,其扫描角速度不变,扫描重叠率也是恒定的。在变瞬时视场角扫描下继续采

用匀速扫描的方法,对于先积分后读出的工作模式,在瞬时视场角连续变化的过程中,如果 $IFOV < 2\omega_s \cdot t_r$,将导致漏扫;而对于边积分边读出模式,则整个扫描成像过程中,重叠率是变化的。因此必须采用变速扫描的方法,其扫描镜角速度可以根据式(3)和积分时间求出:

$$\omega_s = \frac{GSD_0}{2t_i \cdot \sqrt{R^2 + (R+H)^2 - 2R \cdot (R+H) \cdot \cos \beta}} \quad (7)$$

将式(7)和式(3)代入式(5)可以看出,穿轨方向的重叠率恒定。另外为保证成像质量, ω_s 必须具有较高的瞬时速度稳定度,一般要求其稳定度要优于 $\pm 1\%$ 。

3.2 快速回扫角速度曲线的设计

为了实现扫描系统的快速回扫,提高扫描效率,必须提高扫描镜返回时的角速度。一般加速度不连续会对扫描机构造成冲击,如专题制图仪(TM/ETM+) [10] 以及文献 [11] 的扫描控制系统都是在扫描结束的时候给定反向扫描角速度,角速度存在突变,理论上加速度无穷大,对扫描机构不利。为保证运动过程的稳定性,同时减小对扫描机构的冲击和振动,快速返回过程的运动规律规划十分重要。合理运动规律的选择可以提高扫描系统的控制精度,减少驱动功耗,常用的运动规律可以参考文献 [12]。

成像扫描控制系统属于精密运动控制系统,为减小对扫描机构的冲击,提高在轨运行寿命,应当选择无冲击的运动规律,如正弦加速度运动规律、五次多项式运动规律,或者前两者与等速运动规律、等加速等减速运动规律相结合的运动规律。五次多项式运动规律如下:

$$y = At^5 + Bt^4 + Ct^3 + Dt^2 + Et + F \quad (8)$$

式中: y 为位置值, t 为时间, A, B, C, D, E, F 为待解参数。五次多项式运动规律的待解参数过多,给快速回扫角速度曲线设计带来难度。正弦加速度运动规律和等速运动规律相结合的曲线如图 4 所示,由图可以看出正弦加速度运动规律和等速运动规律的结合与直接正弦加速度运动规律相比,在相同回扫时间里对加速度的要求更大,会增加系统功耗,因此本文采用正弦加速度运动规律进行换向快速回扫。

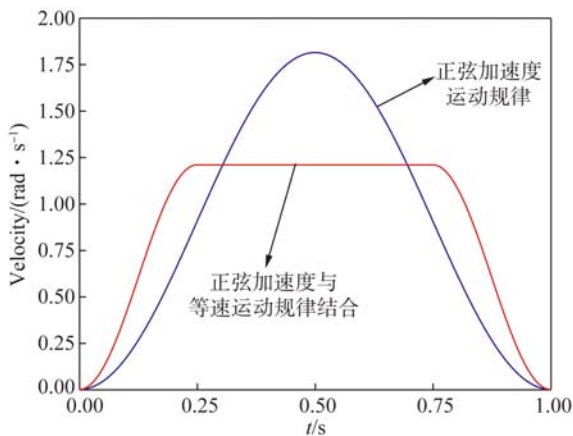


图 4 运动规律的比较

Fig. 4 Comparison between laws of motion

在扫描运动过程中,为实现慢速扫描过程与快速回扫过程的稳定切换,必须保证扫描成像起止速度与快速回扫起止速度的连续过渡以及加速度的连续。根据正弦加速度运动规律,对快速回扫运动过程做如下设计:

$$\begin{cases} a_s = A \cdot \sin\left[\frac{2\pi}{T} \cdot t\right] \\ \omega_s = -\frac{A \cdot T}{2\pi} \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{T} \cdot t\right] + B \\ \theta_s = -\frac{A \cdot T^2}{4\pi^2} \cdot \sin\left[\frac{2\pi}{T} \cdot t\right] + B \cdot t + C \end{cases}, (9)$$

式中: a_s 、 ω_s 、 θ_s 分别为扫描镜的角加速度、角速度、角度, A 、 B 、 C 为待解参数, T 为快速回扫过程总时间。假定扫描成像的起始角度为 $-\theta_m$, 终止角度为 θ_m , 起止角速度为 ω_0 , 由 $\theta_s(t=0) = \theta_m$, $\theta_s(t=T) = -\theta_m$, $\omega_s(t=0) = \omega_0$ 可以解算出参数 A 、 B 、 C 如下:

$$\begin{cases} A = -2\pi \cdot \left[\frac{2\theta_m}{T^2} + \frac{\omega_0}{T}\right] \\ B = -\frac{2\theta_m}{T} \\ C = \theta_m \end{cases},$$

由此,快速回扫的角速度曲线为:

$$\omega_s = \left[\frac{2\theta_m}{T} + \omega_0\right] \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{T} \cdot t\right] - \frac{2\theta_m}{T}, (10)$$

采用式(10)作为快速回扫的角速度控制曲线,扫描过程角速度和角加速度连续无突变,对扫描机构无冲击。

4 扫描控制系统仿真

扫描控制系统要保证成像的质量,在扫描成像过程中速度波动就要尽可能小,还要快速回扫提高扫描效率,同时减小对扫描机构的冲击。在控制方案上,为实现对速度的连续控制,保证系统的动态响应能力,采取速度电流双闭环控制方法^[13]。图 5 为扫描控制系统框图,图 6 为扫描控制系统 Simulink 仿真模型,永磁同步电机的控制采用 $i_d=0$ 的磁场定向控制方法^[14]。仿真模型中的速度指令模块采用 S-Function 函数编写,其主要功能如下:在扫描成像阶段,获取扫描镜角度位置解算出该位置点的扫描角速度,当扫描至成像结束角度时切换到快速回扫状态;在快速回扫阶段,根据回扫时刻解算出该时刻的扫描角速度,当扫描至成像起始角度时切换到慢速扫描成像状态。这样能保证扫描成像起止角度的精度。

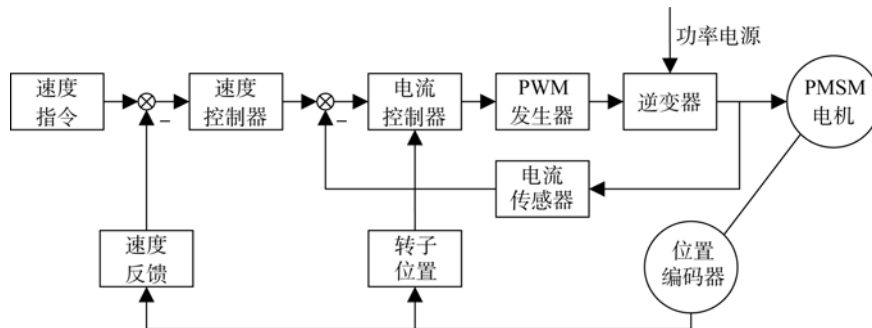


图 5 扫描控制系统框图

Fig. 5 Block diagram of scanning control system

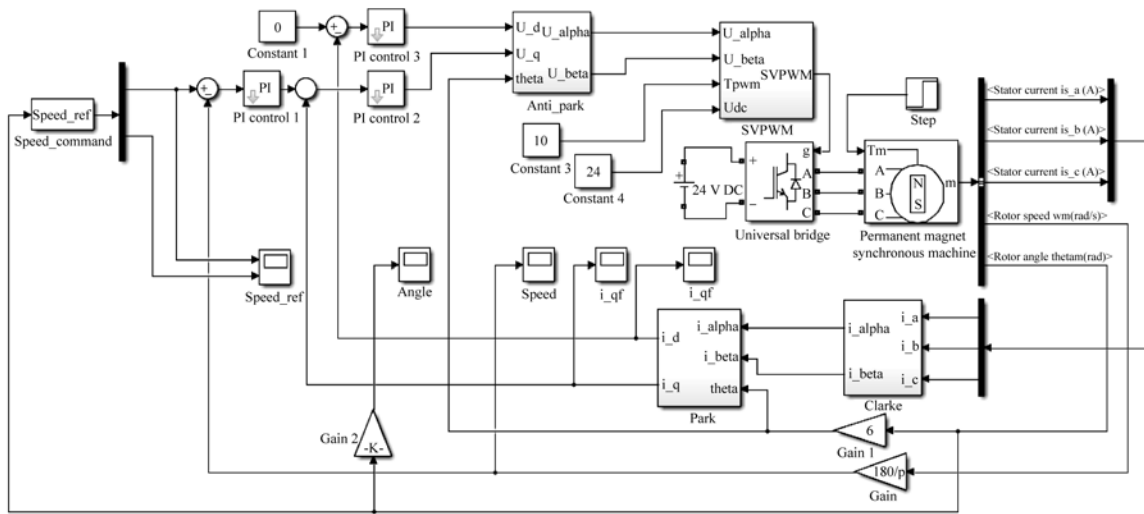


图 6 扫描控制系统 Simulink 仿真模型

Fig. 6 Simulation model of scanning control system

扫描仿真参数设置如下:扫描镜扫描幅度 $\pm 26^\circ$,卫星轨道高度 786 km,星下点分辨率 100 m,根据成像系统要求,像元积分时间 $355 \mu\text{s}$,扫描成像时间 6.149 s,快速回扫时间 1 s,扫描周期时间 7.149 s,永磁同步电机线电阻 8.05Ω ,电感 10 mH,转矩系数 0.39 Nm/A ,直流母线电压 24 V,扫描机构惯量 $0.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。图 7 为扫描运动角速度及角度仿真曲线,图 8 为扫描运动角加速度仿真曲线。仿真结果显示,慢速扫描过程向快速回扫过程过渡时速度连续,慢速扫描时角速度变化缓慢,角加速度近似为 0,快速回扫角速度为一个周期余弦曲线,角加速度为一个周期正弦曲线,角加速度在整个扫描过程中无突变,对扫描机构无冲击,验证了正弦加速快速回扫方法的有效性。

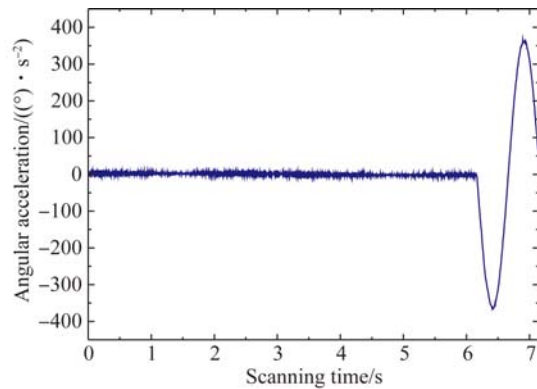


图 8 角加速度仿真曲线

Fig. 8 Simulating curve of angular acceleration

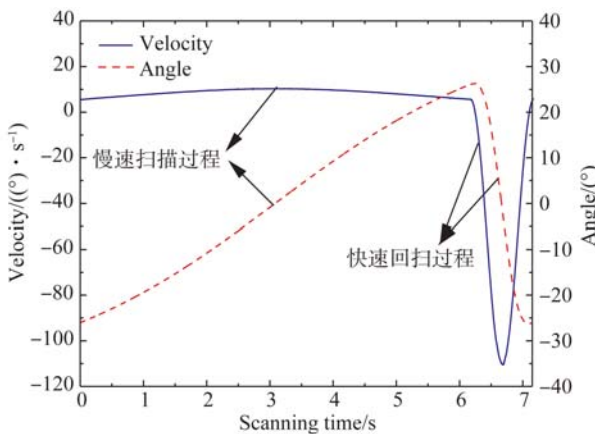


图 7 角速度及角度仿真曲线

Fig. 7 Simulating curve of angular velocity and angle

5 实验测试与分析

5.1 实验方案

扫描控制系统硬件系统方案如图 9 所示,主要由 3 大模块组成:测角模块、电机驱动模块和电流采样模块。测角模块采用 24 位绝对式光电编码器作为角度位置反馈,由于光电编码器采用 EnDat2.2 接口,对时序有严格要求,因此采用 1 片 FPGA 控制角度位置采样时序,然后将采集到的角度信息通过 RS422 发送给 DSP 控制器。DSP 控制器产生 6 路 SVPWM 波,驱动 MSK4300 集成电机驱动芯片,对永磁同步电机进行控制。电机相电流的采样则是通过串联小电阻将电流信号转换为电压信号,经过前置放大以及低通滤波后,再由 AD976 将模拟信号转为数字信号。由于没有采用速度传感器,因此通过角度位

置的移动差分获取速度反馈^[15]。扫描机构采用铝镜模拟光学成像系统的扫描镜,转动惯量为

0.05 kg·m²。采用永磁同步电机直接驱动扫描机构,以提高扫描成像时的低速控制精度^[16]。

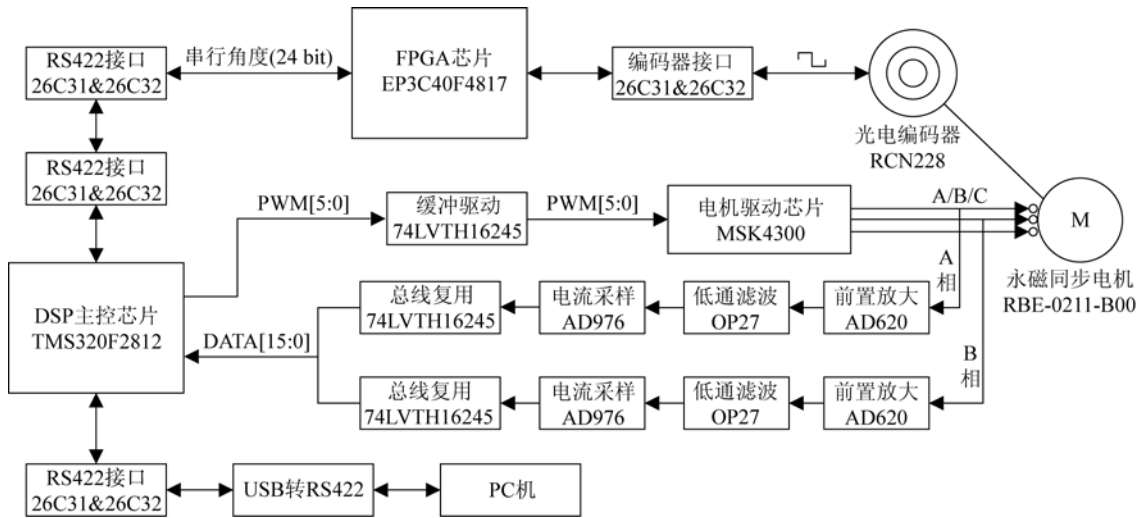


图 9 扫描控制系统硬件方案

Fig. 9 Hardware scheme of scanning control system

5.2 实验测试结果

对于光机扫描成像系统来说,扫描镜的速度稳定度直接影响到成像质量,因此实验首先测试了在一个扫描周期过程中,慢速扫描过程以及快速回扫过程的速度稳定性,实验结果如图 10 所示。图 10(a)为扫描成像过程的角速度误差,误

差在±0.04 (°)/s 以内,图 10(b)为扫描成像过程的角速度稳定度,可以看出稳定度在±0.5%以内,满足光学成像系统要求,图 10(c)为快速回扫过程的角速度误差,由于采用了正弦加速度运动规律进行快速换向回扫,角速度出现正弦跟踪误差,而且误差具有一定的偏移量。

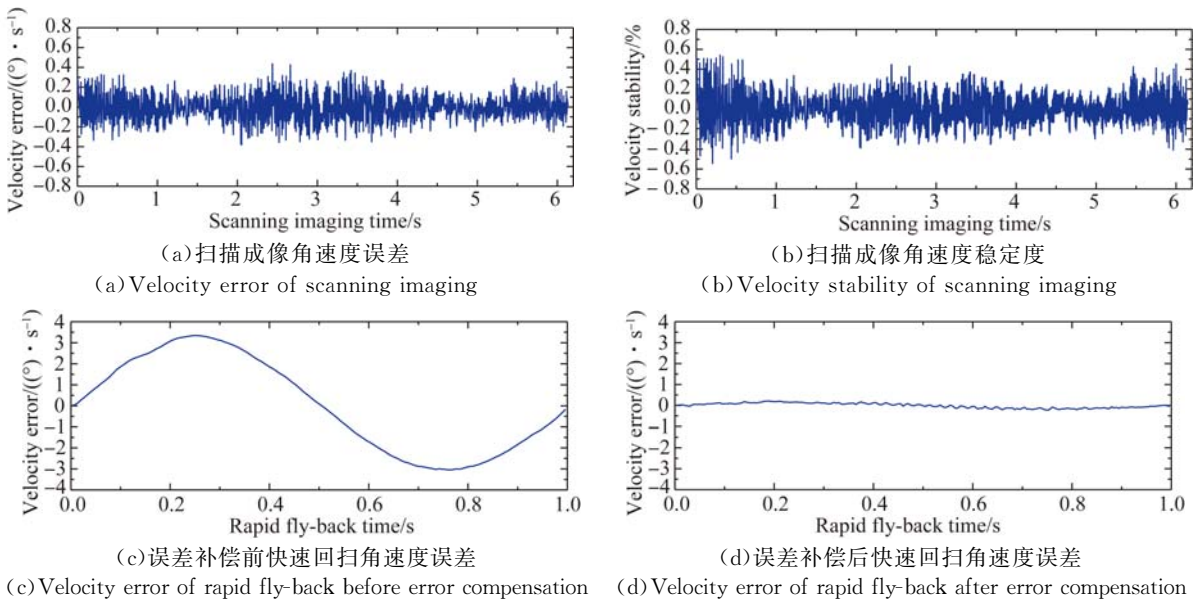


图 10 扫描速度稳定性测试

Fig. 10 Measurement of scanning speed stability

虽然快速回扫过程不采集图像,但是在向慢速扫描过程切换时,较大的回扫角速度误差会造成状态切换不稳定,引起扫描机构振动,同时会影响扫描成像时间以及扫描周期时间的稳定性。慢速扫描时间误差会导致前后两个扫描条带的像元数量的差异,扫描周期时间误差会导致前后两个扫描条带重叠率发生变化,因此过大的时间误差会加大扫描图像后期处理的难度。成像系统一般要求扫描运动时间偏差控制在 2 倍像元积分时间以内。

为进一步提高扫描状态切换的稳定性,同时减小扫描时间误差,有必要提高快速回扫过程角速度的稳定度。在速度环上,采用了误差补偿的方法减小正弦跟踪误差,补偿原理如图 11 所示。将第 1 个扫描周期快速回扫过程中每个速度控制点的速度误差记录在寄存器数组中,从第 2 个扫描周期开始,在快速回扫过程中原来的参考速度基础上叠加实际测量的速度误差形成新的参考速度,以新的参考速度作为速度环输入达到减小误差的目的。经过误差补偿后,快速回扫过程的角速度误差如图 10(d)所示,误差明显减小。

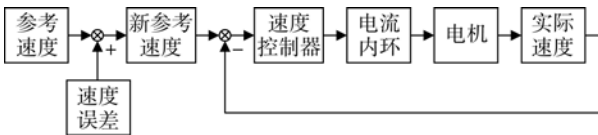


图 11 速度误差补偿原理图

Fig. 11 Schematic diagram of velocity error compensation

为了验证慢速扫描与快速回扫切换的稳定性,进行连续扫描实验并采集了 20 组扫描周期状态切换时刻的实验数据,见表 1。实验结果显示,扫描成像起止角度误差为 1.44 角秒,误差仅为瞬时视场角的 5.5%;扫描状态切换时角速度要求为 5.593 2 (°)/s,起始角速度稳定度为 0.4%,结束角速度稳定度为 0.5%,状态切换稳定;慢速扫描成像时间误差峰峰值为 83 μs,为像元积分时间的 23.5%,保证了相邻两个扫描条带的像元总数量一致;快速回扫时间误差峰峰值为 250 μs,因此周期时间误差峰峰值为 333 μs,而美国陆地卫星系列专题制图仪(TM)的扫描周期时间误差为 415 μs^[5];结合扫描成像时间与扫描周期时间,可计算出本文系统扫描效率为 86%。表 2 为本扫描系统与典型的空红外相机扫描系统在主要性能指标上的比较。

表 1 状态切换时刻实验数据

Tab. 1 Experimental data at the moment of state switch

扫描次数	起始	起始速度	结束	结束速度	慢扫	快回
	角度/(°)	/((°)·s ⁻¹)	角度/(°)	/((°)·s ⁻¹)	时间/s	时间/s
1	-25.999 9	5.613 3	26.000 3	5.596 2	6.1489 71	1.000 065
2	-25.999 8	5.609 0	26.000 1	5.574 7	6.1489 71	1.000 065
3	-25.999 9	5.604 7	26.000 1	5.596 2	6.1489 71	0.999 981
4	-25.999 6	5.617 6	26.000 3	5.596 2	6.1490 54	1.000 065
5	-26.000 0	5.609 0	26.000 2	5.596 2	6.1489 71	1.000 065
6	-25.999 8	5.613 3	26.000 3	5.604 7	6.1489 71	0.999 981
7	-25.999 6	5.613 3	26.000 2	5.591 9	6.1490 54	1.000 065
8	-25.999 6	5.609 0	26.000 4	5.596 2	6.1490 54	0.999 898
9	-26.000 0	5.617 6	26.000 2	5.587 6	6.1490 54	0.999 898
10	-25.999 9	5.617 6	26.000 0	5.596 2	6.1489 71	0.999 898
11	-25.999 9	5.613 3	26.000 4	5.591 9	6.1490 54	0.999 898
12	-25.999 6	5.600 5	26.000 0	5.596 2	6.1489 71	0.999 981
13	-25.999 8	5.609 0	26.000 2	5.600 5	6.1490 54	0.999 981
14	-25.999 9	5.609 0	26.000 1	5.600 5	6.1490 54	0.999 981
15	-25.999 7	5.600 5	26.000 0	5.591 9	6.1490 54	1.000 065
16	-25.999 6	5.617 6	26.000 2	5.596 2	6.1489 71	0.999 981
17	-25.999 8	5.596 2	26.000 0	5.596 2	6.1489 71	1.000 148
18	-25.999 6	5.609 0	26.000 0	5.591 9	6.1490 54	1.000 065
19	-25.999 6	5.604 7	26.000 2	5.591 9	6.1489 71	1.000 065
20	-25.999 9	5.613 3	26.000 3	5.587 6	6.1490 54	1.000 065

表 2 主要性能指标比较

Tab. 2 Comparison of main performance indexes

参数	本系统	MODIS	ETM+	VIIRS
		/Terra	/Landsat-7	/Suomi NPP
扫描方式	单向摆扫	双面镜旋转	双向摆扫	望远镜旋转
扫描视场/(°)	104	110	15	112
扫描幅宽/km	2 250	2 330	186	3 000
地面分辨率/m	100	1 000	60	800
扫描周期/s	7.149	2.956	0.143	1.667
扫描效率/%	86	30.5	85	31.1
是否有冲击	无	无	有	无

6 结 论

针对空间大幅宽低畸变红外变焦扫描成像系统,本文提出变速扫描的方法匹配连续变化的瞬时视场角,推导设计了相应角速度扫描曲线;同时设计了一种正弦加速度快速回扫的方法,提高扫描效率的同时减小对扫描机构的冲击与振动,解决了匀速 360°旋转扫描效率低,单面镜双向摆动扫描成像系统复杂性高,可靠性低的缺点。仿真

及实验结果表明,采用速度电流双闭环控制,并对快速回扫过程进行误差补偿,慢速扫描与快速回扫状态切换速度偏差在 0.5%以内,状态切换稳定,扫描起止角度误差仅 1.44",扫描成像速度稳定度在±0.5%以内,扫描成像时间误差峰峰值为 83 μs,扫描周期时间误差峰峰为 333 μs,扫描效率达 86%,满足成像要求。本文提出的正弦加速度快速回扫的控制方法不仅适用于星载扫描控制系统中,对机载红外扫描成像系统也具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 吕嫻娜. 高分辨率宽幅红外相机扫描控制技术研究 [D]. 上海: 中国科学院研究生院, 2012.
LV X N. *Research of Scanning Control Technology in High Resolution and Wide Swath Infrared Camera* [D]. Shanghai: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [2] 刘银年, 王建宇, 薛永祺. 环境减灾-1B 卫星红外相机的研制 [J]. *航天器工程*, 2009, 18(6): 50-56.
LIU Y N, WANG J Y, XUE Y Q. Infrared scanner of HJ-1B satellite [J]. *Spacecraft Engineering*, 2009, 18(6): 50-56. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] WOLFE R E, LIN G Q, NISHIHAMA M, et al.. Suomi NPP VIIRS prelaunch and on-orbit geometric calibration and characterization [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(20): 11508-11521.
- [5] BLANCHARD L E, WEINSTEIN O. Design challenges of the thematic mapper [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1980, GE-18(2): 146-160.
- [6] 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*
- & *Resources*, 2016, 28(4): 83-87. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 张宗存, 丁学专, 刘银年, 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, LIU Y N, 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)
- [9] 周世椿. 高级红外光电工程导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 110-112.
ZHOU SH CH. *Introduction to Advanced Infrared Opto Electronics Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2014: 110-112. (in Chinese)
- [10] MIKA A M. Three decades of Landsat instruments [C]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1997, 63(7): 839-852.
- [11] 姜博, 肖功海, 王义坤, 等. 高分辨率大视场红外图像获取的改进与优化方法 [J]. *红外与毫米波学报*, 2014, 33(3): 283-288.
JIANG B, XIAO G H, WANG Y K, et al.. Ameliorated and optimized method of acquiring wide-view infrared images with high resolution [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2014, 33(3): 283-288. (in Chinese)
- [12] 王兴松. 精密机械运动控制系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 77-80.
WANG X S. *Precision Mechanism Motion Control System* [M]. Beijing, Science Press, 2009: 77-80. (in Chinese)

- [13] 解小刚, 陈进. 采用 $i_d=0$ 的永磁同步电机矢量控制系统 MAT-LAB/Simulink 仿真 [J]. 新型工业化, 2016, 6(5): 47-54.
XIE X G, CHEN J. Vector control with $i_d=0$ simulation of PMSM based on Matlab/Simulink [J]. *The Journal of New Industrialization*, 2016, 6(5): 47-54. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 符玉襄. 空间高精度二维伺服系统控制技术研究 [D]. 上海: 中国科学院研究生院(上海技术物理研究所), 2015.
FU Y X. *Research on Control Technology of Spatial Two-dimensional High-precision Servo System* [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [16] 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)

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



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