

文章编号: 1002-1582(2025)05-0604-06

悬臂式高频像移补偿装置研制及摆扫系统对地成像验证

徐挺¹, 韩贵丞², 周潘伟^{2*}

(1. 上海电子信息职业技术学院, 上海 201411)

(2. 中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 针对摆扫面阵成像设备对地摆扫成像过程中产生的图像像移, 研制了一种悬臂式高频像移补偿装置, 通过补偿镜高频振动以补偿扫描像移。基于摆角音圈电机控制及结构简单的优点, 采用摆角音圈电机作为驱动, 进行了高频像移补偿装置设计及结构有限元仿真分析。高频像移补偿装置外形尺寸为87mm(长)×81mm(宽)×172mm(高), 质量约1kg, 实际光学补偿口径为53mm。设计了机载对地摆扫成像验证系统进行高频像移补偿成像验证。通过对地成像飞行实验验证了高频振动像移补偿性能, 成像像质清晰, 当高频像移补偿装置的补偿角度为1°时, 振动补偿频率可以达到50Hz, 补偿精度优于0.2%。通过像移补偿装置研制及对地成像系统设计验证为面阵探测器大视场对地成像系统提供了技术参考。

关 键 词: 像移补偿装置; 高频振动; 摆角音圈电机; 大视场对地成像

中图分类号: TH744

文献标识码: A

Development of a cantilever high-frequency image motion compensation device and verification of ground imaging by swing scanning system

XU Ting¹, HAN Guicheng², ZHOU Panwei^{2*}

(1. Shanghai Technical Institute of Electronics & Information, Shanghai 201411, China)

(2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: According to the image motion generated in the process of ground scanning imaging by swing scanning array imaging equipment, a cantilever high-frequency image motion compensation device has been designed. The high frequency vibration of the compensating mirror is used to compensate the image motion. Based on the advantages of simple control and structure, the high frequency image motion compensation device is designed by using the swing angle voice coil motor as the drive, and the finite element simulation analysis of the structure is carried out. The size of the high-frequency image motion compensation device is 87mm (length) × 81mm (width) × 172mm (height), the mass is about 1kg, and the actual optical compensation aperture is 53mm. The airborne swing scanning verification system of ground imaging is designed for high-frequency image motion compensation imaging verification. The performance of high-frequency vibration image motion compensation is verified by ground imaging flight experiment, and the image quality is clear. When the compensation angle of the high-frequency image motion compensation device is 1°, the vibration compensation frequency can reach 50Hz, and the compensation accuracy is better than 0.2%. The development of the image motion compensation device and the design verification of the ground imaging system provide a technical reference for the large field of view ground imaging system of the array detector.

Keywords: image motion compensation device; high-frequency vibration; swing voice coil motor; large field of view ground imaging

收稿日期: 2025-03-03; 收到修改稿日期: 2025-06-24

作者简介: 徐挺 (1984—), 男, 副教授, 硕士, 从事嵌入式系统开发、自动化装备控制研究。20150019@stiei.edu.cn
周潘伟 (1985—), 男, 副研究员, 博士, 从事红外光机一体化技术、红外成像运动机构研究。

* 通讯作者: zp-wei@163.com

0 引言

目前对地观测设备为了增加扫描视场,通常采用摆扫的方式连续成像。当摆扫面阵成像设备搭载在载体上对地面摆扫面阵成像时,摆扫运动在成像探测器成像积分时间内会引起成像光轴移动,从而产生图像像移。所以考虑上述情况的影响,为了消除高空间分辨率、大速高比、长积分时间条件下摆扫面阵成像像移对成像质量的影响,同时满足高速多画幅重叠成像,需要研制高频像移补偿装置,通过高频像移补偿装置驱动补偿镜高频振动,进行高精度高频响像移补偿^[1-3]。

高频像移补偿镜作为调整成像方向的精密光学仪器,需要响应速度快、精度高、分辨力高。2015年,袁刚等完成了由反射镜面、柔性铰链连杆及镜架、桥式位移放大机构、PCSA和球头垫片等组成的大角度压电式快速控制反射镜研制^[4]。2016年,宋盛等进行了位移放大的压电陶瓷驱动双面快速指向镜的设计^[5]。2018年,陈超帅进行了红外面阵搜索系统快速扫描成像像移补偿技术研究^[6]。2020年,陈国真采用由4个直线音圈电机作为驱动,完成了具有柔性机构的大行程快速反射镜的结构设计^[7]。2022年,陆英进行了一种用于激光雷达的电磁式激光微振镜扫描机构设计^[8]。相关技术成熟的国家如美国、德国等国高频像移补偿镜技术较已实现商业化生产。德国PI公司在高频像移补偿领域进行了长期的研究工作,具有多种规格、应用于不同环境的压电快反产品,产品大多采用压电陶瓷得形式,转角范围一般较小,约为 $0.6\sim 25\text{mrad}$ ^[9]。加拿大OIM(Optics In Motion)公司从事快速反射镜研制超过20年,近年来产品在军事领域、航空航天领域得到广泛应用,产品多采用直线音圈电机驱动,最大转角为 $\pm 1.5^\circ$ ^[10]。

本文基于摆角音圈电机结构及控制,采用摆角音圈电机驱动高频像移补偿镜进行一种创新性的悬臂式高频像移补偿装置研制,通过补偿镜高频振动补偿扫描像移进行对地摆扫面阵成像,验证悬臂式高频像移补偿装置性能,为面阵探测器大视场对地成像系统提供参考。

1 装置原理

在对地观测摆扫面阵成像中,高频像移补偿装置通过像移补偿镜高频振动来补偿设备转动扫描中带来的曝光时间内的物面的移动,保持图像清晰。悬臂式高频像移补偿装置原理框图如图1所示,支撑轴承对补偿镜运动进行支撑,驱动电机、补偿镜振动、位置反馈及电机控制组成像移补偿镜高频振动的闭环运动控制系统。

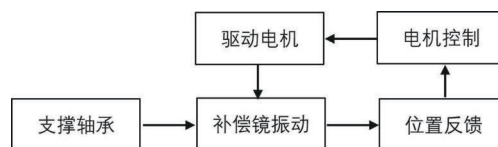


图1 高频像移补偿装置原理框图

高频像移补偿装置进行像移补偿的关键在于对高频像移补偿镜的运动控制,而其中驱动电机的设计选型决定了高频像移补偿镜运动控制的难易以及补偿效果^[11]。随着技术进步^[12-14],摆角音圈电机已经被成熟制造及使用。直线驱动电机、压电陶瓷电机、普通直流电机与传动机构组合、摆角音圈电机等不同类型的电机在高频像移补偿装置中使用的优缺点比较如表1^[15,16],直线驱动电机、压电陶瓷电机、普通直流电机需要柔性机构或传动机构,使得结构复杂,精度降低,且压电陶瓷驱动控制较为复杂^[17]。由于摆角音圈电机控制及结构简单的优点,所以采用摆角音圈电机作为像移补偿镜振动驱动,并使用高精度光栅编码器作为控制反馈^[18]。

表1 高频补偿机构驱动电机比较

电机类型	控制	结构	精度
直线驱动电机	需要控制换向,较为简单	由于需将直线运动转化为高频摆动,需加柔性机构,结构较复杂	直线运动转化为高频摆动,精度一般
压电陶瓷电机	需要控制电压,较为复杂	由于需将直线运动转化为高频摆动,需加柔性机构,结构较复杂	直线运动转化为高频摆动,精度一般
摆角音圈电机	需要控制换向,较为简单	简单	高
普通步进电机+传动机构	简单	复杂	经过传动机构传动,精度较差

2 高频像移补偿装置设计

2.1 电机及反馈计算选型

电机所需要回转力矩 M 分两部分,一部分为

驱动回转负载达到最大加速度所需要的转矩 M_1 ,一部分为在回转中轴承摩擦产生的力矩 M_2 。

(1) 负载加速度力矩 M_1

按照高频像移补偿装置设计指标补偿角度 1° ,

频率 50Hz, 最大加速度 $a_{\max}$ 为

$$a_{\max} = \frac{2S}{t(T-t)} \quad (1)$$

式中, S 为补偿中匀速阶段行程角度, 取 1° ; T 为补偿周期, 按照摆动正反向都进行补偿, 取 $10/\text{ms}$; t 为匀速时间, 取 4ms ; 根据式 (1) 可得 $a_{\max}$ 为 $1454/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})$ 。

有 M_1 为

$$M_1 = a_{\max} \times I_{\text{转}} = 0.04 \text{N} \cdot \text{m} \quad (2)$$

式中, $I_{\text{转}}$ 为高频像移补偿装置转动惯量, 根据三维设计取 $3 \times 10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

(2) 轴承摩擦力矩 M_2

$$M_2 = \frac{\mu \times F \times d_{\text{轴承}}}{2} \quad (3)$$

式中, μ 为轴承摩擦系数, 角接触轴承为 $0.0018 \sim 0.0025$, 由于运动机构采用润滑脂润滑, 摩擦系数增大, 同时考虑加工装配误差取 $\mu = 0.01$; F 为轴承载荷, 根据三维模型取 1kg ; $d_{\text{轴承}}$ 为轴承内径, $d_{\text{轴承}} = 0.01\text{m}$ 。

由式 (3) 可得, $M_2 = 5 \times 10^{-5} \text{N} \cdot \text{m}$, 与 M_1 相比, 可忽略, 所以回转力矩 $M = M_1 = 0.04 \text{N} \cdot \text{m}$ 。回转力矩取放大系数 5, 实际电机需要约 $0.2 \text{N} \cdot \text{m}$ 。

采用图 2 所示的摆角音圈电机作为驱动进行高频像移补偿装置设计及实验验证。摆角音圈电机峰值扭矩为 $0.22 \text{N} \cdot \text{m}$, 连续扭矩 $0.12 \text{N} \cdot \text{m}$, 转动角度为 8° , 质量 240g , 最大电压 15.5V , 最大电流 1.4A , 外形尺寸 $60\text{mm} \times 26\text{mm} \times 51.5\text{mm}$ 。摆角音圈电机定子通过底部螺纹固定, 转子与负载通过回转中心通孔连接并采用胶粘固定。位置反馈采用光栅尺读取旋转位置信息, 分辨率刻线数为 8192 线, 读数头细分 256 倍。细分后为 2097152 线, 细分分辨率为 $3\mu\text{rad}$, 最大转速折合为 $4944^\circ/\text{s}$ 。

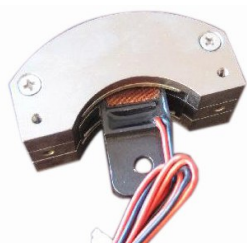


图 2 摆角音圈电机

2.2 装置详细设计

摆角音圈电机作为驱动, 选用光栅编码器作为摆动角度反馈, 并在补偿极限位置两端加装微动开关提供位置反馈。轴系使用角接触轴承作为回转支承, 悬臂式高频像移补偿装置结构如图 3 所

示, 外形尺寸 $87\text{mm} \times 81\text{mm} \times 172\text{mm}$, 质量约 1kg , 补偿口径 53mm 。

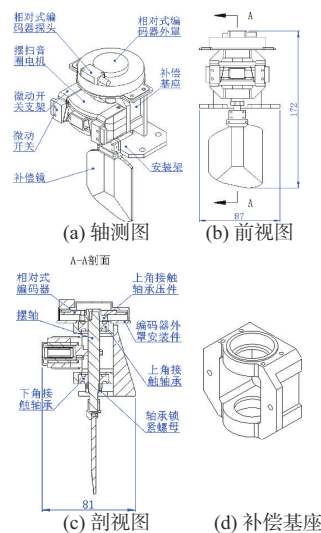


图 3 补偿装置结构

补偿装置主要基准结构件为补偿基座, 补偿基座为四方环形结构, 四边倒角, 上下两端中部位置各有一轴承安装圆孔, 圆孔里端为轴承外圈环形靠面, 安装圆孔与补偿基座中间方形空间连通; 补偿基座轴承安装圆孔上部左右两边为安装面, 安装面为左右两端伸出凸台结构的上表面。

装置各结构件内部之间的连接关系如下: 摆扫音圈电机固定安装在补偿基座轴承安装圆孔上部的左右两边, 在摆扫音圈电机左右两侧分别各连接一个微动开关支架, 微动开关支架上安装微动开关; 上角接触轴承与下角接触轴承选用了高精度的 B7000SU 轴承型号, 上角接触轴承外圈套装在补偿基座上端轴承安装圆孔内, 外圈下端面贴靠在补偿基座上端轴承外圈环形靠面上, 下角接触轴承外圈套装在补偿基座下端轴承安装圆孔内, 外圈上端面贴靠在补偿基座下端轴承外圈环形靠面上, 上角接触轴承与下角接触轴承组成了一对可靠的背靠背安装角接触轴承; 摆轴上下两端分别套装在上角接触轴承与下角接触轴承内圈内, 上角接触轴承压件与摆轴上侧套装进行连接, 相对式编码器与上角接触轴承压件通过中心定位孔高精度定位; 编码器外罩安装件与补偿基座上端面通过中心定位孔高精度定位, 相对式编码器外罩与相对式编码器外罩安装件进行固定连接, 相对式编码器探头固定安装在相对式编码器外罩上端面, 从而对相对式编码器进行转动位置检测; 通过两个轴承锁紧螺母对摆轴轴向位置进行锁紧定位并消除轴系间隙误差; 摆扫音圈电机输出摆轴与摆轴中部套装连接, 补偿镜后端套装在摆轴下端; 为了实现可靠的固定形式, 安装架为 L 形支撑结构, 装置整体

通过安装架下端安装在摆扫成像设备上。

悬臂式高频像移补偿装置轴系采取双支点各单向固定的设计,采用两个反向安装的角接触轴承,两个轴承各限制一个方向的轴向移动。安装时,通过调整轴承内圈的轴向位置,可使轴承达到所要求的预紧程度。轴系主要保证两转轴同心度,且采用轴承锁紧螺母施加预紧的方式,消除轴向串动。转轴在轴承配合处与轴承为0.005mm以内小间隙配合,轴承外圈与轴承座配合间隙为0.005mm以内小间隙配合,防止轴承串动。

2.3 补偿装置工作流程

工作流程为:将悬臂式高频像移补偿装置安装架下端通过螺钉固定安装在摆扫成像系统相移补偿位置,安装成补偿镜镜面与摆扫成像光路像移补偿处重合状态,搭载在运输机等高空载体上对地面摆扫成像时,启动摆扫音圈电机,驱动摆轴向左正向摆动或者向右反向摆动,由左右两个微动开关中的一个检测摆轴到达初始位置;然后控制摆扫音圈电机输出摆轴驱动摆轴、补偿镜及相对式编码器组成的整体转轴围绕转动中间位置正反向高频往复旋转摆动,由相对式编码器探头

检测高频摆动相对位置并反馈相对位置信号,实现对地摆扫成像的高频振动像移补偿。

3 有限元仿真分析与控制验证

对悬臂式高频像移补偿装置进行结构有限元仿真分析。在复杂结构基础上为了可以进行有效分析,装置模型进行了简化处理。对设计模型零件赋予材料参数并添加配合关系,在摆轴上施加0.22N·m的电机峰值扭矩,考虑到振动工作环境的影响,模型整体施加2.5g的垂直加速度。根据装置安装设计在安装架底部施加固定约束。对轴系进行网格划分,网格共有单元22688个,节点45575个,如图4所示。对像移补偿装置进行应力仿真分析如图5所示,最大应力为2.12MPa,发生在补偿基座与安装架的安装面底部位置。最大应力较小,不会对装置性能产生影响。

对像移补偿装置进行位移仿真分析如图6所示,最大位移为 1.77×10^{-3} mm,发生在补偿镜底部。光学设计中对补偿镜变形要求为小于0.01mm,可知位移不会对光学补偿性能产生影响。结构有限元仿真分析得出光机设计合理可靠。

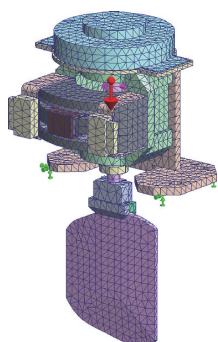


图4 补偿装置网格划分

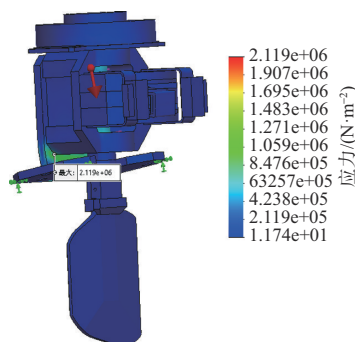


图5 补偿装置应力

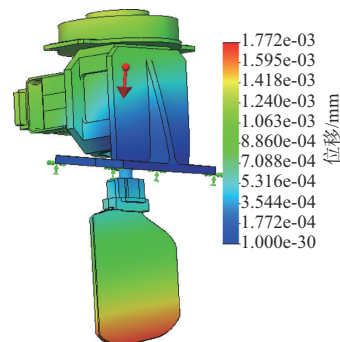


图6 补偿装置位移

装置控制验证如图7与图8所示。在补偿控制效果图7中,补偿角度为0~4ms时间内的总位移,为1°;补偿周期为0.1ms,即频率为50Hz。

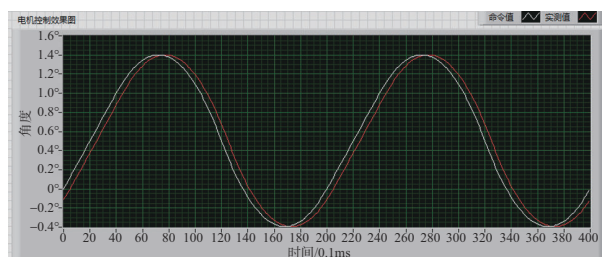


图7 补偿控制效果图

从补偿控制误差图8可中的控制误差曲线可以计算出,满足补偿速度 $250^\circ/\text{s}$,匀速补偿时间内,计算误差曲线中顶部的均方根值为 $75(\mu\text{rad}\cdot\text{s}^{-2})$,即 $0.0043^\circ/\text{s}^2$,探测器像元数为 1024×1024 像元,3ms积分补偿时间内控制误差较小,满足小于1个像元的要求。

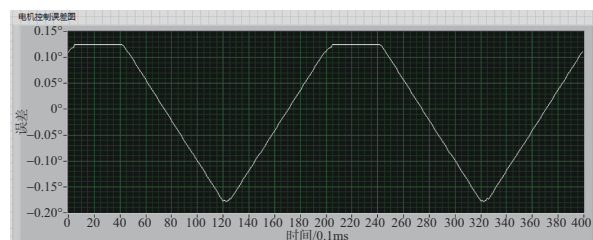


图8 补偿控制误差图

4 机载对地摆扫成像验证系统设计

为了对悬臂式高频像移补偿装置的高频像移补偿性能进行对地成像实验验证,设计机载对地摆扫成像验证系统,如图9所示。摆扫电机安装在系统外环框架上,外环框架通过四个减震支撑角与装机底板连接,装机底板与实验验证的小型飞机通过地脚螺钉进行固定连接,减震支撑角上装有航空减震

器，对载机的震动进行减震处理，装机底板上设计有成像光学窗口。俯仰镜机构上安装有光学反射的俯仰镜，俯仰镜机构、光学反射镜、悬臂式高频像移补偿装置、面阵成像相机安装在内环框架上，俯仰镜机构的俯仰镜、光学反射镜、悬臂式高频像移补偿装置的补偿镜、面阵成像相机形成了航空飞行时的对地成像光路，俯仰镜将成像光路向下90°转折对地成像。在载机飞行系统成像时，俯仰镜机构驱动俯仰镜在飞行方向俯仰运动补偿载机前进方向的像移；摆扫电机在垂直飞行方向的翼展方向驱动内环框架及成像光路大角度摆扫，增大成像视场，悬臂式高频像移补偿装置驱动补偿镜高频振动补偿大角度摆扫时成像积分时间内的像移。

俯仰镜机构如图10，俯仰电机也为摆角音圈电机，俯仰电机驱动俯仰镜在俯仰方向往复转动。俯仰编码器提供俯仰转动的位置反馈，偏心补偿装置通过安装阻尼器及不规则形状的结构件对俯仰转动零部件距离回转中心的偏心量进行调节。

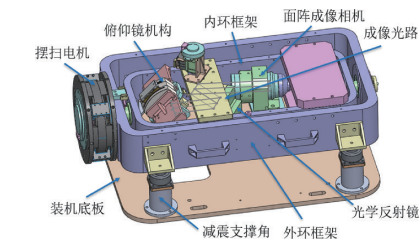


图9 机载对地摆扫成像验证系统模型

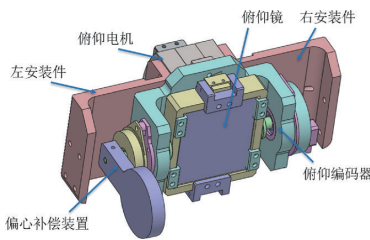


图10 俯仰镜机构模型

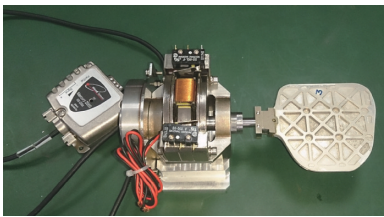


图11 高频像移补偿装置

将装调后的机载对地摆扫成像验证系统对外场楼房分别进行凝视成像、摆扫未补偿成像、摆扫补偿成像对比，如图12。此表明，连续扫描凝

机载对地摆扫成像验证系统工作流程：将系统安装在运输机等高空飞行载体遥感窗口上方，安装成装机底板成像光学窗口与飞行载体遥感窗口重合状态；地面物像由俯仰镜进行90°角折转，经过光学反射镜及悬臂式高频像移补偿装置的补偿镜反射，进入面阵成像相机形成系统光路对地面成像；启动摆扫电机驱动内环框架左右摆动，实现系统在飞机翼展方向的大视场扫描成像；启动俯仰电机驱动俯仰镜往复俯仰摆动，实现系统对载机飞行方向图像像移的高精度像移补偿；启动悬臂式高频像移补偿装置驱动补偿镜进行高频像移补偿，实现了系统对载机翼展方向图像像移的高精度像移补偿；成像过程中四个航空减震器降低载机飞行震动对成像质量带来的影响。

5 实验验证

悬臂式高频像移补偿装置经过总装调试后如图11所示，实际光学补偿口径为53mm。

视补偿方式能够很好实现对快速面阵扫描成像的像移补偿功能，像移残差小于1/3个像元，从而实现红外面阵搜索系统的高质量像移补偿。

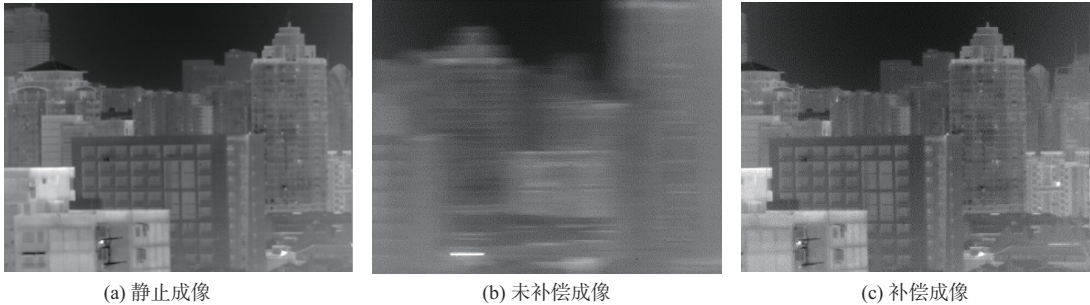


图12 静止成像、未补偿成像及补偿成像对比验证

高频像移补偿装置安装在机载对地摆扫成像验证系统上对地成像飞行实验如图13，成像光路通过摆扫电机的摆扫在飞行中对地大视场成像观测，悬臂式高频像移补偿装置安装在摆扫电机及面阵成像相机中间位置，对成像光路进行摆扫中的高频像移补偿。在成像验证系统上安装惯导实时反馈载机的姿态信息，显控装置对机载对地摆扫成像验证系统进行控制及成像显示。

悬臂式高频像移补偿装置飞行实验像移补偿

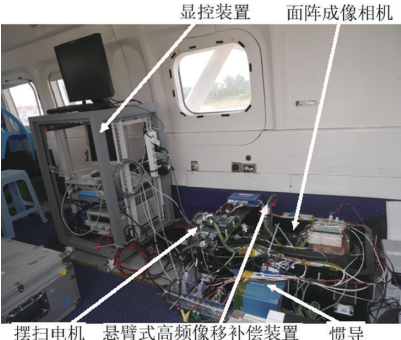


图13 高频像移补偿装置对地成像飞行实验

成像图如图14所示,成像积分时间为3ms,大视场摆扫成像在积分时间内经过高频像移补偿后成像的像质清晰,补偿角度约 1° ,频率50Hz。



图14 高频像移补偿装置像移补偿成像图

6 结 论

本文据此需求进行了一种悬臂式高频像移补偿装置研制,进行了高频像移补偿装置设计及结构有限元仿真分析。设计了机载对地摆扫成像验证系统进行高频像移补偿成像验证,经过对地成像飞行实验验证高频像移补偿装置满足使用需求,同时为面阵探测器大视场对地成像系统提供了技术参考。

高频像移补偿装置外形尺寸为87mm(长)×81mm(宽)×172mm(高),质量约1kg,实际光学补偿口径为53mm。论文研制的高频像移补偿装置使用时需要在系统像移补偿上方预留一定的安装空间,目前研究中最高达到补偿角度 1° 、补偿频率50Hz的技术指标。进一步研究中将采用高强度复合材料设计补偿镜降低负载,同时优化驱动电机性能,提高补偿频率及补偿口径。

参考文献:

- [1] 刘玉环,周军,盛忠,等.周扫像移补偿大面阵红外光学系统[J].电光与控制,2022,29(08):84—87.
Liu Yuhuan, Zhou Jun, Sheng Zhong, et al. Circle-scanning image motion compensation for large area array infrared optical system[J]. Electronic Optic & Control, 2022, 29(08):84—87.
- [2] 闫得杰,孙兴国,刘海秋,等.基于火星大椭圆轨道像移补偿计算方法[J].光学精密工程,2022,30(02):153—159.
Yan Dejie, Sun Xingguo, Liu Haiqiu, et al. Image motion compensation method based on large elliptical orbit[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(02):153—159.
- [3] 周潘伟,韩贵丞,亓洪兴,等.机载面阵成像仪变阻尼高频振动像移补偿装置[P].中国专利:ZL201510028918.1,2015-04—29.
Zhou Panwei, Han Guicheng, Qi Hongxing, et al. Image motion compensation device of airborne array imaging instrument with variable damping high-frequency vibration[P]. China patent: ZL201510028918.1, 2015-04—29.
- [4] 袁刚,王代华,李世栋.大角度压电式快速控制反射镜[J].光学精密工程,2015,23(8):2258—2264.
Yuan Gang, Wang Ddaihua, Li Shidong. Piezoelectric fast steering mirror with large excursion angle[J]. Opt. Precision Eng., 2015, 23(8):2258—2264.
- [5] 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 Sheng, Liu Chongfei, Yuan Ziyong, et al. Design of double-sided fast steering mirror based on piezoelectric actua-

- ing[J]. Opt. Precision Eng., 2016, 24(11):2777—2782.
- [6] 陈超帅.红外面阵搜索系统快速扫描成像像移补偿技术与实现[D].上海:中国科学院上海技术物理研究所,2018.
Chen Chaoshuai. Technical research and implementation on image motion compensation of infrared array search system by fast scan imaging[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [7] 陈国真,徐斯强,刘品宽,等.大行程快速反射镜的结构设计及带宽特性[J].光学精密工程,2020,28(1):90—101.
Chen Guozhen, Xu Siqiang, Liu Pinkuan, et al. Structural design and bandwidth characteristic of a fast steering mirror with large travel range[J]. Opt. Precision Eng., 2018, 28(1):90—101.
- [8] 陆英.一种用于激光雷达的微振镜设计[J].激光与红外,2022,52(06):900—904.
Lu Ying. A design of micro scanning mirror based on laser radar system[J]. Laser & Infrared, 2022, 30(02):153—159.
- [9] Ulander. Two-axis beam steering mirror control system for precision pointing and tracking applications[D]. San Luis Obispo: California Polytechnic State University, 2006.
- [10] Austin Russell. Standard mirrors(USA)[J/OL]. (2019-06) / [2025-03]. <https://opticsinmotion.org/standardmirrors/>.
- [11] 夏永泉,贾建军.用于航空遥感的二维像移补偿镜的设计[J].红外,2008,29(8):17—19.
Xia Yongquan, Jia Jianjun. Design of 2D image motion compensation mirror for aerial remote sensing[J]. Infrared, 2008, 29(8):17—19.
- [12] Spanoudakis, Zago. Extremely high resolution tip-tilt-piston mirror mechanism for the VLT-NAOS field selector[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2009, 96(1):4007—4048.
- [13] 胡逸凡,章海军,倪凯佳.三角放大型压电陶瓷微纳米驱动机构[J].光学精密工程,2022,30(17):2094—2099.
Hu Yifan, Zhang Haijun, Ni Kaijia. Mini-piezo-element drive microactuator based on triangular amplification[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(17):2094—2099.
- [14] M Warner, S Heathcote, G Schumacher. Upgrading the controller of the fast tip-tilt tertiary mirror for the SOAR Telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7739(2):327—330.
- [15] 梁宇飞,石上瑶,张栋,等.基于FPGA和ARM的音圈电机式振镜驱动器设计[J].微特电机,2021,49(12):40—44.
Liang Yufei, Shi Shangyao, Zhang Dong, et al. Design of a voice coil motor galvanometer driver based on FPGA and ARM[J]. Small & Special Electrical Machines, 2021, 49(12):40—44.
- [16] 徐新行,韩旭东,王兵,等.机载刚性支撑式快速控制反射镜设计[J].光学精密工程,2016,24(1):126—133.
Xu Xinhang, Han Xudong, Wang Bing, et al. Design of fast steering mirror with rigid support structure for airborne platform[J]. Opt. Precision Eng., 2016, 24(1):126—133.
- [17] 赵磊,纪明,王明歆,等.快速反射镜驱动形式对伺服带宽的影响[J].光学精密工程,2019,27(2):393—401.
Zhao Lei, Ji Ming, Wang Mingxin, et al. Influence of driving forms on servo bandwidth in fast steering mirror[J]. Opt. Precision Eng., 2019, 27(2):393—401.
- [18] 周潘伟,李范鸣.一种基于凸轮机构的面阵成像仪高频像移补偿装置[P].中国专利:ZL201610893685.6,2019—01—01.
Zhou Panwei, Li Fanming. Area array imager high-frequency image motion compensating device based on cam mechanism[P]. China Patent: ZL201610893685.6.1, 2019—01—01.