

文章编号 1004-924X(2024)03-0401-21

应用于运动平台光电跟瞄系统的惯性参考单元 研究综述

李醒飞^{1,2}, 何梦洁¹, 拓卫晓^{1,2*}, 王天宇¹, 韩佳欣¹, 王信用¹

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

2. 深海技术科学太湖实验室, 江苏 无锡 214000)

摘要: 目标的变化和任务的拓展对光电跟瞄系统提出了快速机动的要求, 从地基平台到车载、船载、机载、星载等运动平台是光电跟瞄系统的重要发展趋势。基于惯性参考单元(Inertial Reference Unit, IRU)的视轴稳定方式是克服运动平台高频扰动, 实现光电跟瞄系统微弧度甚至亚微弧度级跟瞄的主要技术手段。针对运动平台光电跟瞄系统精确指向对载体基座扰动抑制的需求, 分析和对比了 IRU 的各种技术方案, 特别介绍了利用低噪声、宽频带惯性传感器敏感角扰动, 并通过反馈控制实现视轴惯性稳定的系统方案。从此类 IRU 系统的工作原理出发, 阐述了系统的两种工作模式及功能特点, 建立了系统数学模型。然后, 介绍了 IRU 的国内外研究进展及发展方向, 指出惯性传感、支承结构和控制系统是决定 IRU 稳定能力的关键因素, 梳理了三项关键技术的研究动态。最后, 总结了 IRU 的空间应用情况, 并结合目前的应用需求对其未来应用领域进行了探讨。

关键词: 惯性参考单元; 运动平台; 光电跟瞄系统; 视轴稳定; 扰动抑制

中图分类号: V19 **文献标识码:** A **doi:** 10. 37188/OPE. 20243203. 0401

Review on inertial reference unit applied to photoelectric tracking and pointing system of moving platform

LI Xingfei^{1,2}, HE Mengjie¹, TUO Weixiao^{1,2*}, WANG Tianyu¹, HAN Jiabin¹, WANG Xinyong¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University,
Tianjin 300072, China;

2. Taihu Laboratory of Deepsea Technological Science, Wuxi 214000, China)

* Corresponding author, E-mail: tuoweixiao@tju.edu.cn

Abstract: The evolution of objectives and the broadening of tasks have heightened the need for swift maneuverability in the photoelectric tracking and pointing system. Shifting from ground-based to diverse mobile platforms such as vehicles, ships, aircraft, and spacecraft marks a significant trend in the development of photoelectric tracking and pointing systems. The stabilization of the line of sight using an inertial reference unit (IRU) is essential to counteract the high-frequency disturbances encountered on these mobile platforms, enabling the system to achieve tracking accuracy at the micro-radian or even sub-micro-radian level.

收稿日期: 2023-06-30; **修订日期:** 2020-08-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62203322); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 2022M712372); 深海技术科学太湖实验室“揭榜挂帅”项目资助项目 (No. 2022JBGS03001)

This paper delves into various IRU implementation strategies to mitigate disturbances from the carriers, ensuring precise aiming of the photoelectric tracking and pointing system on moving platforms. It highlights a system design that employs low noise and wideband inertial sensors for angle disturbance detection and achieves line of sight stabilization via feedback control. The document details the system's operational modes, functional features, constructs its mathematical model, and reviews both domestic and international research advancements and future directions in IRU technology. It emphasizes that inertial sensing, support structures, and control systems are critical to IRU's stabilization performance, and it organizes the latest research trends in these three vital areas. Conclusively, the paper outlines the spaceborne applications of IRU and explores potential future application domains, considering current demands.

Key words: inertial reference unit; moving platform; photoelectric tracking and targeting system; line-of-sight stabilization; disturbance suppression

1 引言

在天文观测^[1]、激光通信^[2]和量子通信^[3]等领域,目标的变化和任务拓展对光电跟瞄系统提出了快速机动的要求,从地基平台到车载、船载、机载、星载等运动平台拓展是光电跟瞄系统的重要发展趋势。国家“十四五规划”中明确提出加速发展的量子通信、星际探测、探月工程等空天科技前沿领域均需要运动平台光电跟瞄系统的支撑。相比地基式光电跟瞄系统,运动平台的高机动性会引入极难克服的振动干扰,造成系统视轴晃动甚至抖动,影响跟瞄精度^[4]。不同载体的振动来源及频谱特征也不尽相同。车载振动的主要来源为路面趋势变化、履带拍打等,根据某军用车实测数据,振动频率为 2~10 Hz^[5]。船载振动的主要来源为轴系不平衡力和螺旋桨叶片扰动、风浪等,根据国军标舰船振动试验数据,振动的频率范围为 1~100 Hz^[6]。机载振动的主要来源为发动机噪声、气流扰动和螺旋桨影响等,法国 SA-315 直升机振动频率 < 106.6 Hz,我国直-8 直升机的振动频率为 20.7~82.4 Hz^[6]。星载振的主要来源为空间环境振动内部机械运作,OLYMPUS 卫星的振动频率为 1~200 Hz,ETS-VI 卫星的振动频率为 0.39~250 Hz^[7]。如何抑制载体振动造成的视轴抖动,是光电跟瞄领域需要解决的核心问题。

载体基座角扰动的隔离可以通过被动隔离或主动稳定两种方式实现。被动隔离采用物理隔离法,即在敏感载荷与载体之间安装适当强度

的弹簧,依靠弹簧阻尼消耗振动能量。被动隔离技术最典型的应用是空间观测望远镜,如詹姆斯韦布太空望远镜的塔式隔振结构和斯皮策太空望远镜的 APSI 隔振器。被动隔离可有效隔离载体的高频低幅振动,但会增加系统设计的复杂性,且隔离后的扰动仍可能影响系统视轴的稳定精度^[8]。另一种基座角扰动的隔离方法是主动稳定,通过稳定跟踪机架、稳定反射镜和引入惯性基准光 3 种方式可以实现光轴抖动的抑制^[9]。稳定跟踪机架是一种早期的惯性稳定方式,通过安装于机架上的惯性传感器将测量值反馈或前馈至控制器,实现视轴的稳定。但由于机架的摩擦、转动惯量、谐振频率以及传感器性能等因素的限制,该方案对高频扰动的抑制能力有限,一般仅能实现低频扰动的抑制,稳定精度只能达到亚毫弧度量级^[8-9]。反射镜稳定技术通过调整光路中快速反射镜(Fast Steering Mirror, FSM)的姿态改变光路的方向,实现视轴的稳定。该方案的控制对象为反射镜本身,有效减小了被控对象的体积和质量,可以获得较高的抑制带宽。但视轴转动角与反射镜框架转动角有 2:1 的比例关系,因此,无法通过直接使陀螺信号趋零的方式实现视轴稳定^[9-10]。目前,最常用的视轴主动稳定方法是利用 IRU 提供惯性基准光,穿过库德光路后注入主望远镜中,辅助 FSM 实现视轴的自准稳定。

根据惯性传感器的安装位置的不同,可将 IRU 分为平台式和捷联式。平台式 IRU 的惯性传感器直接敏感基准光源所受角扰动,在不需

匹配任何参数的情况下,将所有被控对象均置于闭环控制系统中,实现扰动的有效抑制。捷联式IRU的惯性传感器安装在基座上,测量并输出基座角扰动,该值乘以匹配的增益前馈到主光路系统的FSM上,通过旋转FSM消除载体扰动。Draper实验室通过实验证实,捷联式IRU对传感器的相位和增益等参数较为敏感,易受运动耦合误差的影响,在相同惯性传感器水平下,对载体扰动的抑制能力要比平台式IRU低一个数量级^[11]。

根据结构形式的不同,平台式IRU又可分为框架式和采用柔性支承的类快反镜式结构。框架式利用一个或多个万向架构成单轴或多轴转台。类快反镜式为二自由度旋转结构,主要包括基座、弹性支承、电机和平台等四部分^[5]。两种方式相比,框架式IRU具有较大的工作范围,但受限于转动惯量大和轴系摩擦等问题,扰动抑制带宽较低。而类快反镜式IRU具有无摩擦、阻尼小等优势,主动抑制带宽、稳定精度更高。高精度

IRU的未来发展趋势为采用柔性支撑结构而非框架式结构、实现平台式而非捷联式的惯性稳定。

本文将对基于柔性支承的平台式IRU的原理、特点及应用情况展开讨论,综述针对此类IRU的相关研究和应用现状,并针对国内外研发产品技术指标的差距,剖析国内研究所存在的问题,探讨技术未来的发展趋势。

2 IRU系统工作原理与数学模型

2.1 系统工作原理

IRU是一个可实现两个方向小角度偏转的惯性稳定平台,其上安装有低噪声、宽频带的惯性角速度传感器。在复合轴稳定系统中,IRU的主要作用是利用惯性传感器提供的信号反馈控制平台,提供一束不受基座角扰动影响的惯性参考光束,同时,它还能够调整光束的空间位置,实现初始位置校准。系统原理及控制框图如图1所示。

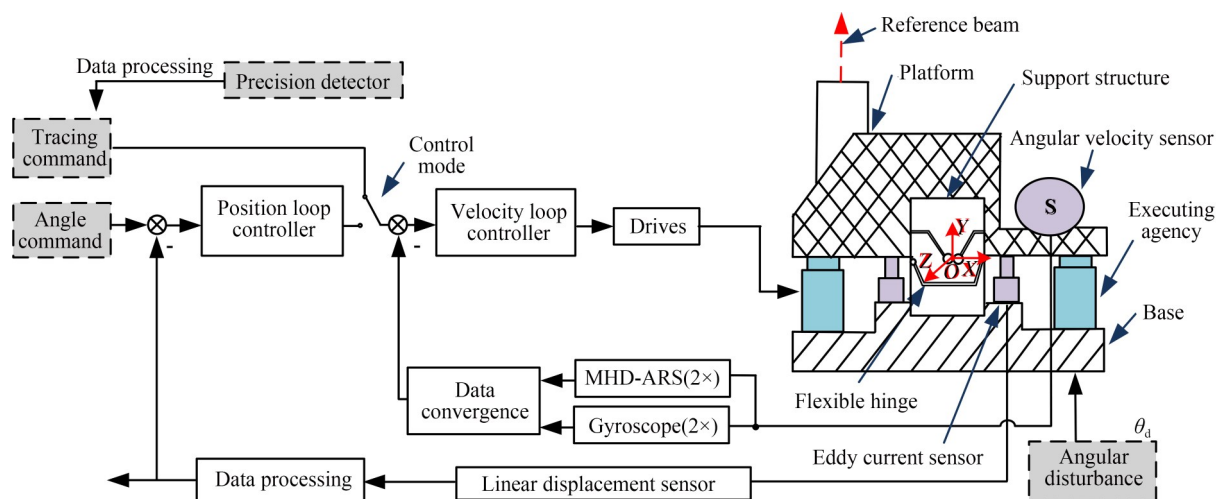


图1 IRU系统原理及控制框图

Fig. 1 Mechanical structure and functional schematic of the IRU's control system architecture

当存在基座角扰动 θ_d 时,安装在平台上的磁流体动力学角速度传感器(Magnetohydrodynamics Angular Rate Sensor, MHD-ARS)与低频陀螺仪,实时测量被控对象的振动状态,两种惯性传感器的输出信号,经数据融合后产生误差电压,作为反馈量输入至速度环控制器,控制驱动器通过执行机构产生反作用力矩驱动平台反方

向转动,衰减甚至归零惯性传感器的输出,实现平台的惯性稳定。此时,由平台上安装的激光源发射的激光束被稳定于惯性空间,为光电跟瞄系统提供视轴参考。抑制基座角扰动后,精探测器上目标的晃动便完全是由目标运动造成的,据此精探测器准确获取目标脱靶量后,主动给系统一个进给信号,实现目标的精跟踪。

在 IRU 系统的基座和平台间还装有测量基座和平台间的相对角位置的电涡流位移传感器,测得的偏差信号经位置环控制器,输出控制力矩使平台指向标称位置,实现系统光路的初始对准。此外,当系统处于惯性稳定/惯性稳定跟踪模式时,电涡流位移传感器测得的相对角位置信息输出给 IRU 载体,防止系统转动角度超出允许的角行程范围。

2.2 系统数学模型

IRU 系统两个工作轴之间具有较低耦合度,可以简化为两个完全相同的单轴模型,本节以单轴为例进行分析。系统等效模型如图 2~图 3 所示,相关物理参数定义见表 1。

根据图 2,可以建立系统电压平衡方程:

$$U_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + k_b L \frac{d(\theta_a - \theta_d)}{dt}. \quad (1)$$

根据图 3,可以建立系统力矩平衡方程:

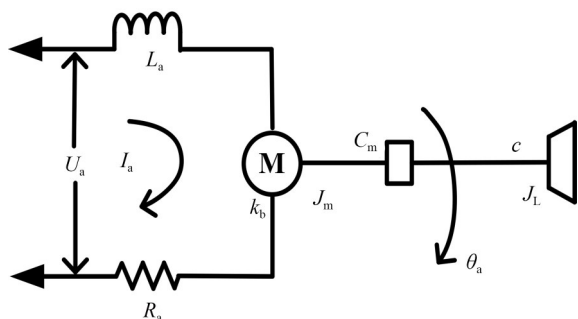


图 2 IRU 系统的电学模型

Fig. 2 Electrical model of IRU system

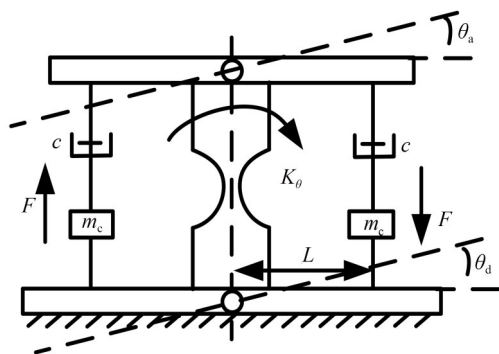


图 3 IRU 系统的质量-刚度-阻尼模型

Fig. 3 Mechanical model of IRU system

表 1 图中各变量的物理定义

Tab. 1 Definition of variables in Fig. 2 and Fig. 3

Definition	Parameter
Input voltage	U_a
Motor inductance	L_a
Current flowing through the motor	I_a
Motor resistance	R_a
Motor rotational inertia	J_b
The back electromotive force coefficient of the motor	K_b
Force coefficient of the motor	C_m
Elastic support stiffness coefficient	K
Moment of inertia of load	J_L
Mechanical damping coefficient	c
Angular disturbance on the base	θ_d
Platform deflection angle	θ_a
Output force of the motor	F
Distance from elastic support to motor center	L
Mass of motor coil section	m_c
Structural moment of inertia	J

$$2C_m I_a L = J \frac{d^2 \theta_a}{dt^2} + 2cL^2 \frac{d(\theta_a - \theta_d)}{dt} + 2K_\theta (\theta_a - \theta_d). \quad (2)$$

联立式(1)和式(2),并进行拉式变化,可以得到平台转动角度 θ_a 与输入电压 U_a 和基座扰动 θ_d 间的关系式如下:

$$\theta_a(s) = \frac{2C_m L U_a(s)}{(Js^2 + 2cL^2s + K_\theta)(L_as + R_a) + 2C_mk_bL^2s} + \frac{[(2cL^2s + K_\theta)(L_as + R_a) + 2C_mk_bL^2s] \theta_d(s)}{(Js^2 + 2cL^2s + K_\theta)(L_as + R_a) + 2C_mk_bL^2s}. \quad (3)$$

当基座角扰动 $\theta_d = 0$ 时,可得系统被控对象特性:

$$G_z(s) = \frac{\theta_a(s)}{U_a(s)} = \frac{2C_m L}{(Js^2 + 2cL^2s + K_\theta)(L_as + R_a) + 2C_mk_bL^2s} = \frac{1}{p_1s + 1} \cdot \frac{p_2}{p_3s^2 + p_4s + 1}. \quad (4)$$

当 $U_a = 0$ 时,系统的扰动传递特性为:

$$G_b(s) = \frac{\theta_a(s)}{\theta_d(s)} = \frac{(2cL^2s + K_\theta)(L_as + R_a) + 2C_mk_bL^2s}{(Js^2 + 2cL^2s + K_\theta)(L_as + R_a) + 2C_mk_bL^2s} \quad (5)$$

IRU 系统的扰动抑制能力由主动抑制能力(控制回路特性)与被动抑制能力(扰动传递特性)共同决定,如图4所示。IRU 系统稳定的目的便是在 $\theta_a \neq 0$ 条件下,通过结构优化和控制回路保证 θ_a 尽量接近于零。

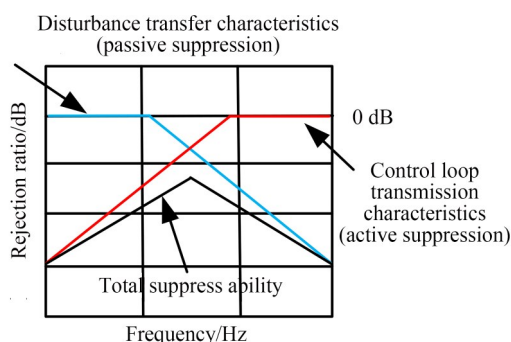
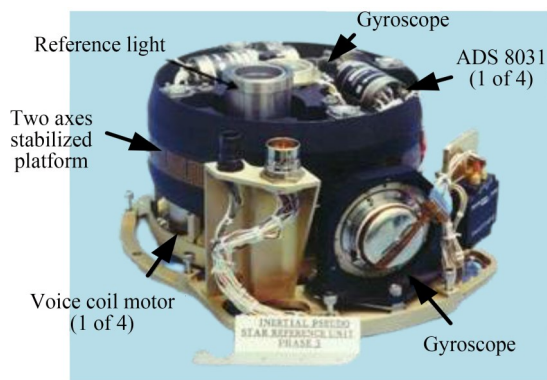


图4 IRU 系统扰动抑制特性

Fig.4 Disturbance suppression characteristics of IRU system



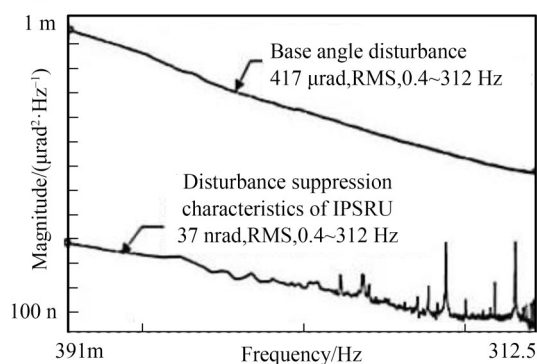
(a) 照片
(a) Physical drawing

3 IRU 国内外研究进展

3.1 IRU 国外研究进展

20 世纪 90 年代以来,美国 NASA、美国应用科技协会(ATA, 现已被 BLUEHALO 公司收购)、麻省理工学院(MIT)、波音和日本三菱电机等机构开始对用于视轴稳定系统中的 IRU 进行研究。

1994 年,在美国国防研究计划局(ARPA)和 BMDO 公司资助下,MIT 的 Draper 实验室开发完成了一种被称作惯性伪星参考单元(Inertial Pseudo Star Reference Unit, IPSRU)的 IRU 装置^[12],如图 5(a)所示。IPSRU 采用 ADS 8031 型角位移传感器(Angular Displacement Sensor, ADS)与 MOD IIE/S 型动力调谐陀螺仪组合测量,并使用四个对称排布的音圈电机以推挽的方式提供反馈补偿力矩。在交付给美国空军研究实验室进行高空气球试验前,Draper 实验室对 IPSRU 的性能进行了实验测试。测试结果如图 5(b)所示,表明 IPSRU 能够将 0.4~312 Hz 频带内 417 rad RMS 的基座扰动抑制到 37 rad RMS, 1~100 Hz 频带内扰动抑制比大于 55 dB, 1 Hz 处扰动抑制比为 93 dB。



(b) 扰动抑制特性
(b) Disturbance suppression characteristics

图5 Draper 实验室研制的 IPSRU 及系统扰动抑制特性

Fig.5 IPSRU developed by Draper Lab and it's system disturbance suppression characteristics

2000 年,BLUEHALO 公司首次将 MHD 角速度传感器引入 IRU 的设计中,并使用 MEMS 陀螺仪对所用 ARS-12 的低频误差进行补偿,成功研制了如图 6 所示的基于 MHD 角速度传感器

的 IRU(简称 MIRU)^[13]。与 Draper 实验室的 IPSRU 对比实验结果表明,MIRU 在全频带(0.1~1 000 Hz)内的扰动抑制残差为 0.844 μrad,对基座扰动的抑制能力要比 IPSRU 低 1 个数量级。

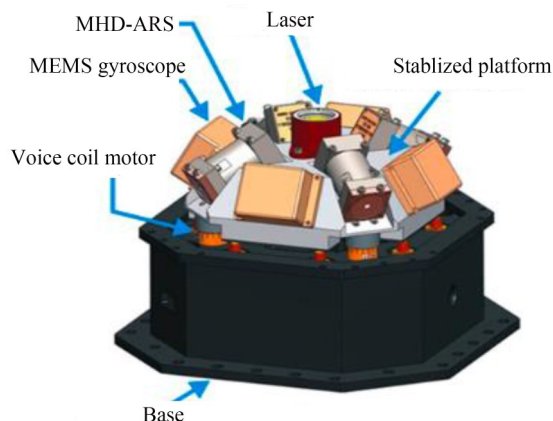


图 6 BLUEHALO 公司研制的 MIRU
Fig. 6 MIRU developed by BLUEHALO

2001 年,美国 NASA 喷气推进实验室 JPL 使用 Allied Signal 公司的 QA-3000 线加速度计测得角加速度,再通过二次积分得到角位移,辅助信标光进行深空光通信中视轴的稳定控制,以期获得亚微弧度量级的跟瞄精度以及几百赫兹的抑制带宽^[14]。使用图 7 所示的实验装置进行系统测试,结果表明,该方案对幅值 $90\ \mu\text{rad}$ (频率为 35, 45 Hz) 正弦信号的跟踪误差并未达到亚微弧度设计指标。

2002 年,美国 Draper 实验室提出高性能惯性伪星参考装置 (High Performance Inertial Pseudo Star Reference Unit, HP-IPSRU), 设想使用 BLUEHALO 公司的 ARS-12G 型传感器替代 IP-SRU 中的 ADS 8031,再与 0.1~100 Hz 频段内噪声 $\leq 2\ \text{nrad}$ 的第三代低噪声陀螺仪 LNTGG 融

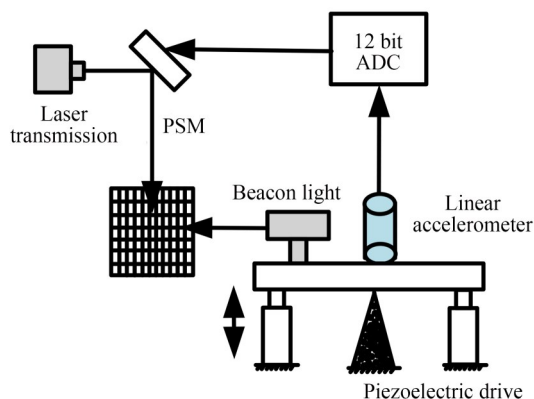


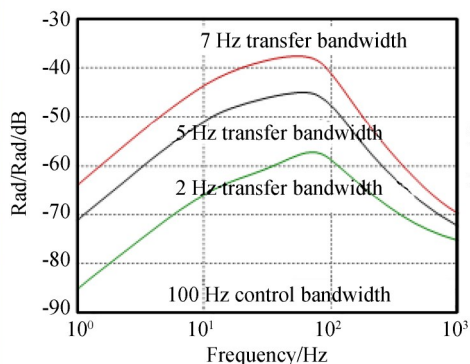
图 7 线加速度计辅助信标光实现视轴稳定系统实验装置
Fig. 7 Linear accelerometer assisted line-of-sight stabilization system

合,并通过结构优化将系统基座角扰动被动隔离度提高 3~4 倍^[15],以期满足空间激光通信系统对 0.1~300 Hz 频带内 5 nrad RMS 的光束指向精度要求。但该系统后续实验测试数据未见于公开发表的文献中。

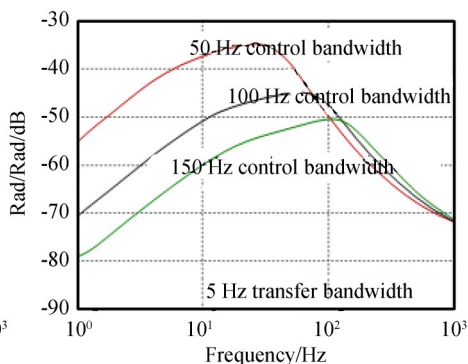
同年,美国波音 SVS 公司研制了原理与 IP-SRU 和 MIRU 类似的两轴惯性稳定测量系统 (Stabilized Inertial Measurement System, SIMS)^[16],如图 8(a)所示。SIMS 利用商用速率陀螺与 BLUEHALO 公司的 ARS-12 型传感器数据融合,实现了 0~1 000 Hz 频段内角扰动的高精度测量,最终实现了 1~500 Hz 内 $1\ \mu\text{rad}$ 的稳定精度。SIMS 系统的扰动抑制能力与扰动传递带宽 (被动抑制特性) 负相关,与扰动控制带宽 (主动抑制特性) 正相关,如图 8(b) 与 8(c) 所示。



(a) 照片
(a) Physical diagram



(b) 被动抑制特性
(b) Passive suppression characteristics



(c) 主动抑制特性
(c) Active suppression characteristics

图 8 波音 SVS 公司研制的 SIMS
Fig. 8 SIMS developed by Boeing SVS

为了进一步提升 IRU 的稳定性能, BLUEHALO 公司从 2007 年开始从硬件角度对研制的 MIRU 进行了优化, 采用基于 FPGA 的控制板卡, 研发了新一代光学惯性参考单元 (Optical Inertial Reference Units, OIRU)^[17], 如图 9 所示。BLUEHALO 公司于 2021 年发布的 OIRU-500 在工作带宽内的抖动抑制性能达到了 500 nrad^[18]。

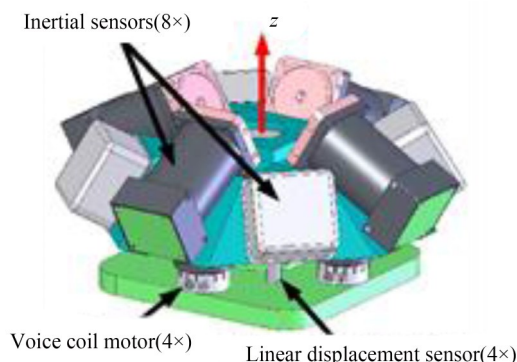


图9 光学惯性参考装置

Fig. 9 OIRU developed by BLUEHALO

2015年, 日本三菱电机先进技术 R&D 中心利用 MEMS 陀螺仪与 BLUEHALO 公司的 ARS-12 进行融合, 研制了基于电磁驱动器的小行程 MIRU (转角为 $\pm 250 \mu\text{rad}$)^[19], 如图 10 所示。受限于 MEMS 陀螺仪的精度, 仅在 ARS-12 单速率反馈下实现了 10~200 Hz 带宽内 1.4 μrad 的稳定精度。

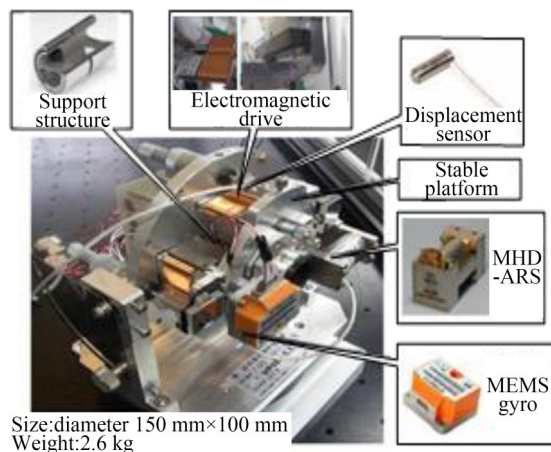


图10 日本三菱电机先进技术 R&D 中心设计的 MIRU

Fig. 10 MIRU developed by advanced technology R&D center

2017年, 为了满足 NASA 深空光通信项目对亚微弧度光束稳定精度的要求, BLUEHALO 公司采用 ARS-14 型传感器, 设计了新一代以 20 cm 口径光学镜组直接作为负载的小行程 ($\pm 5 \text{ mrad}$) MIRU^[20]。在模拟终端振动功率谱作用下, 实现了 0.2~30 Hz 内 -40 dB 的扰动抑制比和 500 nrad 的稳定精度。

近年来, 国外 IRU 系统相关研究成果对国内严格封锁, 未查阅到公开的技术和产品资料。

3.2 IRU 国内研究进展

相较于国外, 国内对 IRU 的研究开展相对较晚。

1997年, 西安应用光学研究所提出了在武装直升机上使用 FSM 进行制导系统瞄准线及图像稳定与跟踪的二级稳定概念^[21], 20 Hz 内定频扰动条件下实现了 14 mrad 的视轴稳定精度, 这是国内 IRU 技术的雏形。

2002年, 电子科技大学应用物理研究所设计了一个星间光通信跟踪子系统, 该系统采用复合轴控制结构, 由粗跟踪环和精跟踪环共同实现目标的跟瞄^[22]。系统在模拟 SILEX 振动功率谱作用下, 跟踪均方根误差约为 0.66 μrad , 在模拟 LANDSAT-4 的谐波扰动 (1 Hz, 100 μrad) 下, 跟踪误差小于 2 nrad。

2005年开始, 中国科学院光电技术研究所联合电子科技大学和国防科技大学开始对运动载体光电跟瞄系统的视轴稳定技术进行研究, 对视轴稳定系统关键部件——IRU 系统进行了理论分析和设计。

2005年, 翟伟采用 BLUEHALO 公司的 ARS-09 型传感器与重庆华渝电子仪器厂的 XT-3A 动力调谐陀螺仪组合测量, 设计了基于万向环架柔性机构的 IRU, 实现了无扰动条件下 100 Hz 的位置闭环带宽^[23]。然而, 由于系统基座刚度不够, 扰动条件下测试时, 10~100 Hz 频率内存在明显的幅值畸变, 35 Hz 处的幅值误差超过 -5 dB。

同年, 胡浩军采用线加速度计二次积分的方法辅助测量惯性姿态角, 设计了音圈电机驱动型 IRU^[4], 并采用图 11 所示实验装置对系统性能进行了测试。结果表明: 该系统可以获得 75 Hz 的扰动抑制带宽和优于 -50 dB 的扰动抑制比。然

而,受限于加速度计及扰动平台的频率特性,系统带宽和稳定性能有待进一步测试和提高。

2016年,田竞在基于虚拟陀螺的速度、位置双闭环结构的基础上加入MEMS加速度计构成

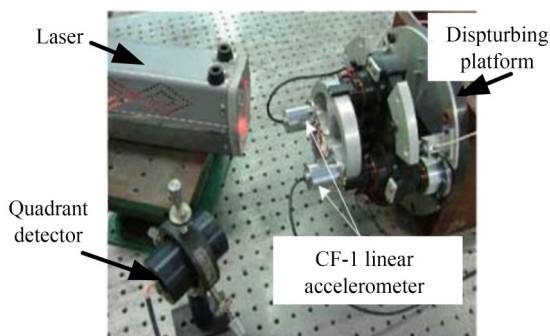


图 11 线加速度计辅助测量的音圈电机驱动型 IRU 实验系统

Fig. 11 Experimental system for voice coil motor-driven IRU

三闭环结构^[5]。通过实验验证发现,采用 MEMS 加速度计和虚拟陀螺的三闭环结构系统将 20 Hz 以下的低频段的扰动抑制能力提升了 15 dB,扰动抑制能力明显优于虚拟陀螺双闭环结构系统。

2019年,毛耀提出通过 MEMS 加速度计与 MEMS 陀螺仪信息融合扩展系统扰动测量带宽的方案^[24],并利用图 12 所示的实验系统进行了测

试。测试结果表明,该系统在单速度回路下实现了 172 Hz 的闭环稳定带宽,但文献中并未对系统稳定精度进行测试,且存在严重的相位滞后。

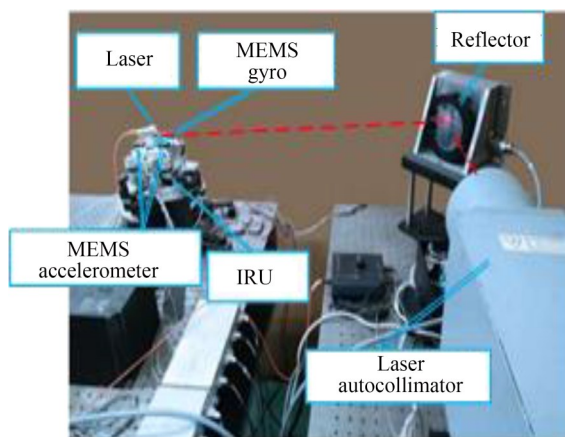


图 12 MEMS 加速度计与 MEMS 陀螺仪信息融合式 IRU 实验测试系统

Fig. 12 Experimental system for MEMS accelerometer and MEMS gyroscope fusion IRU

同年,毛耀针对单级 IRU 高频隔振能力不足的问题,提出了图 13 所示的复合式结构^[25],并对复合式 IRU 的结构特性及闭环传递特性进行了分析。与单级 IRU 相比,1 Hz 处的系统扰动抑制能力提高了 50.09 dB,10 Hz 处的系统扰动抑制能力提高了 26.85 dB。

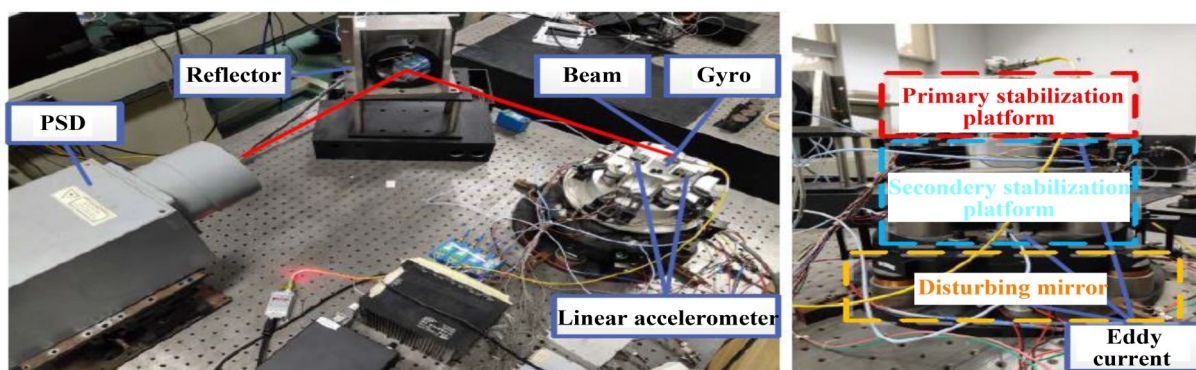


图 13 复合式 IRU 实验测试系统

Fig. 13 Composite IRU experimental test system

此外,天津大学和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所也对 IRU 系统展开了研究。截至目前,长光所已完成了基于柔性支承和框架式结构的 IRU 设计,通过实验对系统性能进行了对比分析。结果表明,两种 IRU 在动态频率特性

和两轴运动解耦方面均表现良好,它们在 0.5~100 Hz 带宽激励下的动态光束稳定精度分别达到 $7.934 \mu\text{rad}$ 和 $5.762 \mu\text{rad}$ ^[26]。

2017年,天津大学李醒飞教授课题组基于自行研制的 MHD 角速度传感器,开始对 IRU 的结

构设计、谐振抑制、控制策略等进行研究。目前,天津大学已完成 IRU 系统的结构设计,实现了基于电涡流线位移传感器的 IRU 位置闭环控制,带宽达到 120 Hz^[27],转角为±5 mrad,角分辨率优于 1 μrad^[28];实现了基于速度-位置双闭环的稳定控制,带宽达到 60 Hz。但受限于所用 MHD 角速度传感器的精度,仅实现了 20 μrad 的稳定精度^[29]。目前,该研究团队已成功研发带宽 2~

1 000 Hz,等效噪声角为 25 nrad RMS 的 MHD 角速度传感器,正在研发基于该款传感器的 IRU,有望实现优于 1 μrad 的稳定精度。

IRU 的国内外研究情况对比如表 2 所示。可以看出,我国研制的 IRU 系统扰动抑制带宽与国外相比低将近 1 个数量级,稳定精度也与国外存在 1 个数量级的差距,IRU 的研发水平远低于国外。

表 2 国内外 IRU 研究现状
Tab. 2 Research status of IRU at home and abroad

Research institutions	Research status	Main indicators
BLUEHALO ^[18]	Existing products	Disturbance suppression bandwidth: 1—1 000 Hz stabilized accuracy: 0. 5 μrad(OIRU—500)
Mitsubishi Electric Corporation of Japan ^[19]	Experimental study	Disturbance suppression bandwidth: 10—200 Hz stabilized accuracy: 1. 4 μrad
Institute of Optoelectronics, Chinese Academy of Sciences	Experimental study	Disturbance suppression bandwidth: 172 Hz ^[24] stabilized accuracy: —
Changchun Institute of Optics and Mechanics ^[26]	Experimental study	Disturbance suppression bandwidth: 0. 5—100 Hz stabilized accuracy: 7. 934 μrad frame-type 5. 762 μrad flexible support
Tianjin University	Experimental study	Disturbance suppression bandwidth: 50 Hz Position closed-loop bandwidth: 120 Hz ^[27] Stabilized accuracy: 20 μrad ^[29]

4 IRU 系统关键技术及研究现状

IRU 系统的简化控制框图如图 14 所示,其中, $H_a(s)$ 表示传感器频响特性, $\dot{\theta}_n(s)$ 为传感器

误差。当 IRU 工作在惯性稳定模式时,输入 $R(s)$ 为零,则有:

$$\theta_a(s)=\frac{G_D}{1+CGH_a}\theta_d(s)\frac{1}{s}+\frac{CG}{1+CGH_a}\dot{\theta}_n(s)\frac{1}{s}.$$

(6)

由式(6)可以看出,IRU 系统的稳定精度由平台结构、惯性传感器和控制器共同决定。

4.1 平台支承结构

IRU 系统普遍采用图 15 所示的两自由度柔性支承提供两个旋转自由度。受限于国外相关理论和技术的严格封锁,麻省理工 Draper 实验室和 BLUEHALO 公司仅在已有专利和文献[15]、文献[17]及文献[20]中给出了 IRU 系统柔性支承的设计目标(工作方向上具有较低刚度,非工作方向具有较高刚度),但未见其设计过程及设

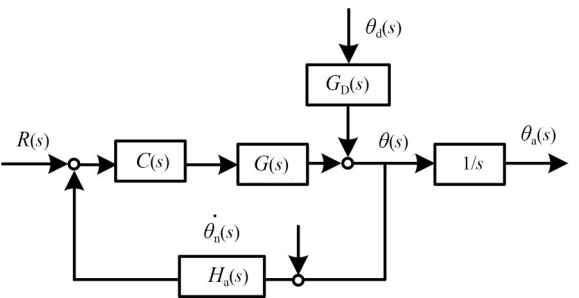


图 14 基于惯性传感器组的 IRU 闭环控制结构
Fig. 14 IRU closed-loop control structure based on inertial sensor group

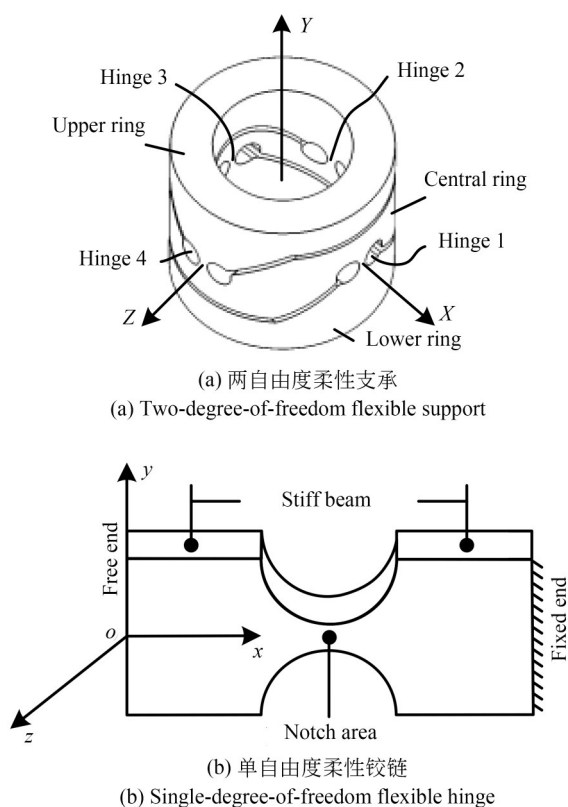


图 15 柔性铰链结构示意图

Fig. 15 Schematic diagram of flexible hinge structure

计方法的详细分析。国内对于 IRU 的研究开展相对较晚,关于其柔性支承结构的研究成果更是寥寥无几。文献[25]仿真分析了结构各向刚度系数的提高对系统稳定带宽设计产生的限制。文献[30]分析了支承结构固有频率与工作带宽间的关系,并根据需要的工作带宽对支承结构各阶固有频率和各向刚度提出了要求。文献[31]建立了结构转动刚度的解析计算式,给出了转动惯量近似定值条件下低阶固有频率的解析表达式,并根据工作带宽对各阶固有频率的要求,得出了结构设计的关键参数。上述研究主要集中于对 IRU 支承结构刚度及固有频率的分析,并根据固有频率计算公式得出各方向上结构刚度的设计范围。

两自由度柔性支承的刚度模型是实现其参数化设计的基础。针对这一问题,国内外学者普遍采用的思路是从单自由度柔性铰链的刚度模型出发,建立单自由度柔性铰链与两自由度柔性支承间的等效关系,进而得到支承体的柔度模型,实现参数化设计^[32]。因此,单自由度柔性铰

链的刚度精准建模成为 IRU 系统柔性支承设计的关键。目前,单自由度柔性铰链的刚度建模方法主要分为四类,主要包括 Paros 和 Weisbord^[33]、吴鹰飞^[34]、陈贵敏^[35]等采用的基于梁的近似微分方程及其积分理论的方法、Lobontiu^[36]采用的基于卡氏第二定理的方法和 Tseytlin^[37]采用的逆保角映射法。针对应力集中引起的刚度计算误差问题,文献[38]、文献[39]采用有限元分析的方法量化了应力集中对直圆型柔性铰链和倒圆角型柔性铰链刚度计算的影响。在此基础上,文献[30]推导了考虑应力集中的直圆形柔性铰链各方向刚度计算解析计算式,并进行了仿真验证。上述刚度计算模型为 IRU 系统柔性支承的参数化设计提供了有力支撑。但现有研究未考虑降低柔性支承工作方向刚度和提高其非工作方向刚度间的矛盾,无法实现结构应力、运动精度、几何尺寸等多约束条件下柔性支承的优化设计。多约束条件下的优化设计将成为 IRU 系统支承结构研究的主要方向。

4.2 基于数据融合的宽频角速度测量

高带宽、低噪声、漂移小的惯性角速度传感器是 IRU 实现宽频带扰动抑制的测量基础。但仅靠单一的角速度传感器难以同时满足 kHz 带宽、亚微弧度级噪声等性能指标。采用具有不同频带特性的传感器进行数据融合,是解决上述问题的有效途径。目前,互补滤波、闭环控制滤波等基于频率特性进行融合滤波器设计的方法以及维纳滤波、卡尔曼滤波、自适应平方根滤波等基于时域的融合算法是通过数据融合方式实现宽频角速度测量的有效手段。

基于频域的数据融合方法一般通过设计融合滤波器,抑制两个传感器直接叠加造成的重合频段幅值凸起。文献[40]提出了一种互补滤波方法,如图 16(a)所示,将动力调谐陀螺仪和角位移传感器进行融合,实现了带宽为 0.1~300 Hz,最大幅度失真为 0.3 dB,最大相位失真为 1.9° 的融合效果。但互补滤波法十分依赖于待融合传感器传递函数建模精度,且设计的互补滤波器可能存在传递函数中零点个数大于极点个数的情况,导致其无法硬件实现。文献[41]提出了一种闭环控制滤波的融合方法,如图 16(b)所示,并利用此方法完成了低带宽 IRU 和高带宽角位移传

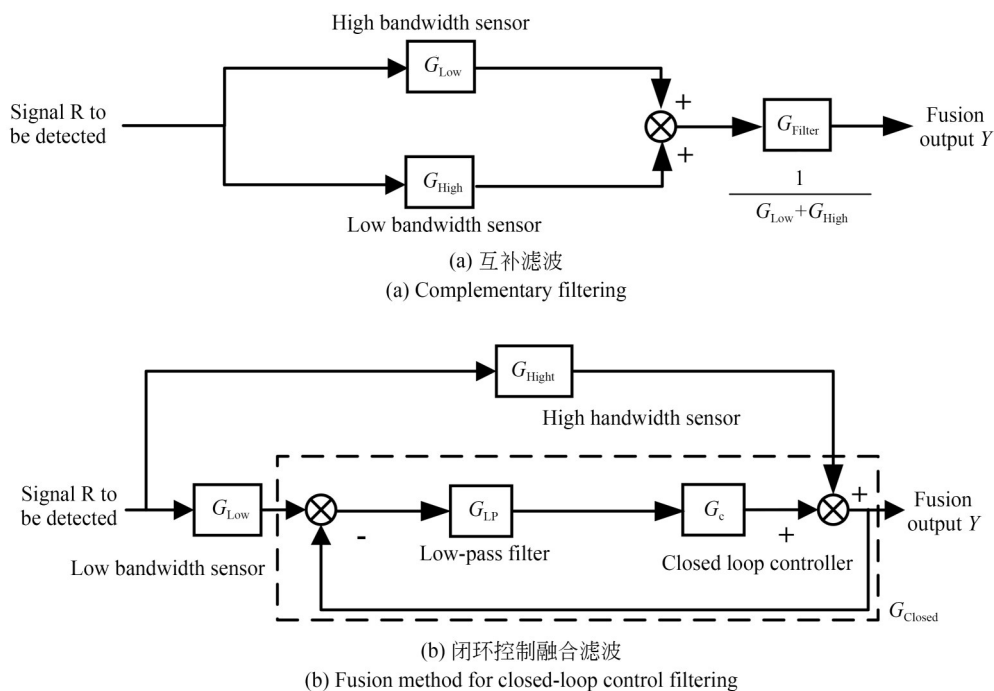


图16 融合滤波原理图

Fig. 16 Fusion filtering schematic

传感器的数据融合,实现了0~100 Hz的测量带宽。但传统的闭环控制滤波方法中滤波器设计方法不明晰,无法实现参数化设计。针对该问题,文献[42]利用“相位补偿”高通滤波器将MHD角速度传感器的低频极点向高频移动,再与MEMS陀螺仪直接叠加,实现了0~40 Hz内幅值波动 $\leq 1\%$,相位波动 $\leq \pm 1^\circ$ 的融合效果,但受限于转台频率特性,算法融合效果有待进一步测试和验证。此外,文献[24]给出了闭环控制滤波的最优校正方法,通过反向设计控制器的方式简化了该算法的参数整定过程,并对MEMS陀螺仪和MEMS加速度计进行融合,最终实现了最大幅值误差 -2.1 dB,最大相位误差 17° 的融合效果。

基于时域的数据融合方法一般采用维纳滤波、卡尔曼滤波等算法实现含噪信号的最优估计。文献[43]采用维纳滤波和卡尔曼滤波两种方法将低频精密姿态确定系统和高频ADS进行融合。最终,维纳滤波的估计误差为 $0.075''$,卡尔曼滤波的估计误差为 $0.117''$,但仅对0~10 Hz内的融合效果进行了实验测试,且融合输出在有限长数据段的首尾部分发生了较大畸变。文献[44]提出了一种基于Allan方差的解耦自适应卡

尔曼滤波算法,采用Allan方差值代替传统卡尔曼滤波中不变的量测噪声值,在每一次滤波迭代计算中同时递推估计信号的量测噪声,从而贴近当前噪声的实际情况,但并未直观评估融合信号的频响和噪声特性。在实际工程运用中,由于舍入误差的影响,卡尔曼滤波中的协方差矩阵不再保持原本的正定性,易使滤波发散。针对该问题,文献[45]提出了一种自适应平方根滤波算法,该算法利用其协方差矩阵的平方根进行传递,从而保证协方差矩阵的正定性,最终完成0~60 Hz频段内最大标度因数抖动小于 2.5% ,非线性误差小于 1% 的角速度测量。

上述研究从频域和时域两个方面实现了惯性传感器的全频带数据融合。互补滤波、闭环控制滤波等频域融合算法对传感器的频域输出特性进行处理,其融合目的主要是获得幅频响应平滑、相频响应不失真的融合信号,其原理简单、易实时实现,但无法兼顾噪声、漂移等指标。维纳滤波、卡尔曼滤波等时域融合算法通过在时域上进行迭代来预测下一时刻的最优估计值从而完成信号的融合,能有效地对融合信号的噪声进行抑制,但由于存在噪声参数耦合、算法更新迭代

中协方差矩阵易失去正定性等问题,容易导致滤波发散。单一的时域或频域融合方法均无法兼顾噪声、频响、漂移等指标。为了实现多指标的优化,可以采用多种不同的数据融合算法实现频段融合。

4.3 稳定控制技术

IRU 系统的稳定控制面临以下三个方面的问题:一是柔性支承引入的带宽内机械谐振;二是单速度控制回路面临的控制饱和问题;三是传感器噪声、驱动器噪声、模型不确定性等内部扰动和基座扰动等外部扰动对系统稳定性的影响。

针对带宽内机械谐振的抑制问题,学者们常采用加入速度反馈、陷波器两种方式。速度反馈方面,常见的方法为设计速度环控制器。加入控制器虽然能使谐振得到一定的抑制,但难以兼顾控制效果和谐振抑制效果。为解决该问题,陷波器被应用于系统中。文献[46]中利用改进的双 T 型陷波器,实现了 IRU 系统带宽内机械谐振的抑制。针对陷波器经验法调参存在的方向不明确问题,文献[47]提出了一种陷波器参数优化设计方法,通过与未加陷波器的方法对比,发现未加陷波器系统仅靠反馈控制无法完整抑制谐振峰,闭环带宽仅为 7.96 Hz。而加入陷波器后系统闭环带宽可达到 110 Hz,带宽得到了极大的扩展,证明了陷波器对谐振抑制的有效性。上述文献中使用的陷波器均是对称的,而实际系统中的陷波器是不对称的。针对这一问题,文献[48]提出采用非对称陷波器来抑制系统谐振的方法,使用适应度函数来表示谐振抑制的效果,并用粒子群算法来搜索函数的最优解,得到非对称陷波器的参数。实验结果表明与补偿前的 28.7 dB 相比,谐振峰值被抑制了 97.88%。传统的陷波器都是针对固定频率的,而随着安装位置的变化,谐振频率可能发生变化,为了快速获取准确的谐振频率,自适应滤波器被提出。常见的方法有快速傅里叶变换(FFT)算法^[49]、滑动离散傅里叶变换(DFT)算法^[50]谐波检测与陷波器相结合等方法,但这些该方法在谐振频率检测中存在计算延时等问题,目前学者们多通过优化谐振频率检测算法的方法提高实时性。文献[51]提出了一种基于自适应陷波滤波器的机械谐振频率估计算法,使用该方法得到的结果作为中心频率设计了

陷波器应用于伺服系统中,有效抑制了电机转速振荡,转速误差最终保持在 7 r/min 之内,衰减比例达到 91.2%。综上,改善滤波器结构和改善谐振频率检测算法都是提高 IRU 系统谐振抑制能力的有效手段。

针对单速度控制回路的控制饱和问题,学者提出了双闭环(DFC)、多闭环控制(MFC)结构。多闭环结构系统的扰动抑制能力由各环路扰动抑制能力共同决定,对扰动的抑制能力优于单闭环、双闭环结构,其结构图如图 17 所示。在惯性稳定平台上,常安装光纤陀螺和 MEMS 加速度计以测量平台的惯性空间速度和加速度。而光纤陀螺体积、质量大,在载体平台上额外安装光纤陀螺测量扰动时,会增加系统的硬件成本,也会引入新的硬件不可靠性^[52]。为解决该问题,不少学者利用 MEMS 线加速度计估计平台的角速度信号,通过积分得到速度信息,替代陀螺传感器,并以此实现系统的三闭环控制。文献[5]在基于虚拟陀螺的双闭环结构的基础上加入 MEMS 加速度计构成三闭环结构,将 20 Hz 以下的低频段的扰动抑制能力提升了 15 dB。文献[53]基于 CCD、虚拟速度和线加速度计信号实现三闭环控制,与基于 CCD 和线加速度计构成的双闭环结构相比,位置闭环带宽增加了 1 Hz,并且在低频 1~5 Hz 内系统的扰动抑制能力得到了明显提升。各环常用的控制方法有加入陷波器、PID 控制器、扰动观测器(DOB)、误差观测器(EOB)和扩张状态观测器(ESO)等。

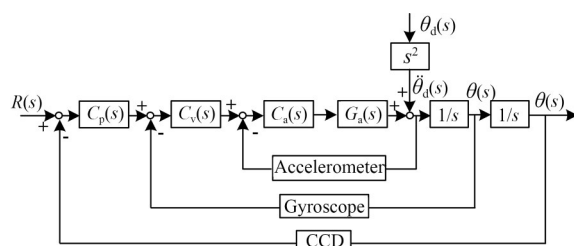


图 17 速度-位置-加速度三闭环控制结构

Fig. 17 Speed-position-acceleration triple closed-loop control structure

传感器噪声、驱动器噪声、模型不确定性等内部扰动和基座扰动等外部扰动问题可通过 DOB,EOB,ESO 来解决。DOB 方面,文献[54]采用位置-速度-加速度三闭环结构并在加速度环

加入了DOB来控制FSM系统,实验发现DOB的引入能很好地提升系统中频扰动抑制能力,而在低频则基本无效果。为提高系统低频扰动抑制能力,学者在DOB结构上进行了改进。文献[55]采用位置-加速度双闭环结构并在加速度环加入了改进的DOB(EDOB)来控制快反镜系统,有效改善了系统低频扰动抑制能力。当系统存在非最小相位特性时,传统DOB方法会牺牲大量的扰动抑制能力来保证系统的稳定性,针对该问题,文献[56]设计了一种基于双补偿器扰动观测器(DC-DOB)应用在多闭环反馈控制系统中的加速度回路。文献[57]将速度-位置-加速度三闭环控制结构应用于非最小相位远距离激光指向系统,其中的加速度环加入了补偿扰动观测器(CDOB)。两者与传统DOB相比均有效地抑制了更多的扰动。此外,学者还采用DOB与PID控制器、EOB相结合的方法提升系统的扰动抑制能力。文献[58]提出了位置环基于CCD的EOB与速度环基于光纤陀螺的DOB相结合的结构来提高系统的抗干扰能力。文献[27]提出了不完全微分PID-噪声抑制DOB复合型控制结构,有效抑制了传感器测量噪声及电机驱动器噪声,使系统闭环带宽大幅提高,最终实现了110 Hz的位置闭环带宽。文献[59]通过改进Q滤波器设计了改进噪声抑制DOB,实验验证发现该方法

对扰动的抑制率为88.60%。ESO方面,文献[60]设计了一种频域融合虚拟陀螺仪并将其应用于扰动前馈与位置、速度、加速度三闭环相结合的控制结构中,该方法能够充分发挥扰动前馈控制的作用,有效提高了系统在1-100 Hz频带范围内的扰动抑制能力。文献[61]将一种带模型构造线性扩张状态观测器的虚拟双闭环反馈控制应用于快速倾斜反射镜平台,有效提高了在中低频段的扰动抑制能力。综上,目前的研究围绕控制结构的优化展开,如采用电流-速度-位置、加速度-速度-位置等多闭环控制结构,并对各控制回路中的DOB,EOB,ESO等进行优化设计。

5 应用现状与展望

IRU能够提供一束不受基座角扰动影响的惯性参考光束,同时能够调整光束的空间位置,起到跟踪的作用。基于IRU的视轴稳定方案如图18所示,参考光束和目标光束经过相同的光路,经FSM反射后,到达准直探测器前端的分光镜上。初始系统对准后,准直探测器上的某个标称位置便代表了仪器视轴的成像点。当存在基座角扰动时,参考光轴偏离惯性稳定轴,惯性传感器测量两者间的角偏差 α ,反馈至IRU的控制器,驱动平台执行机构产生反作用力矩,使得惯

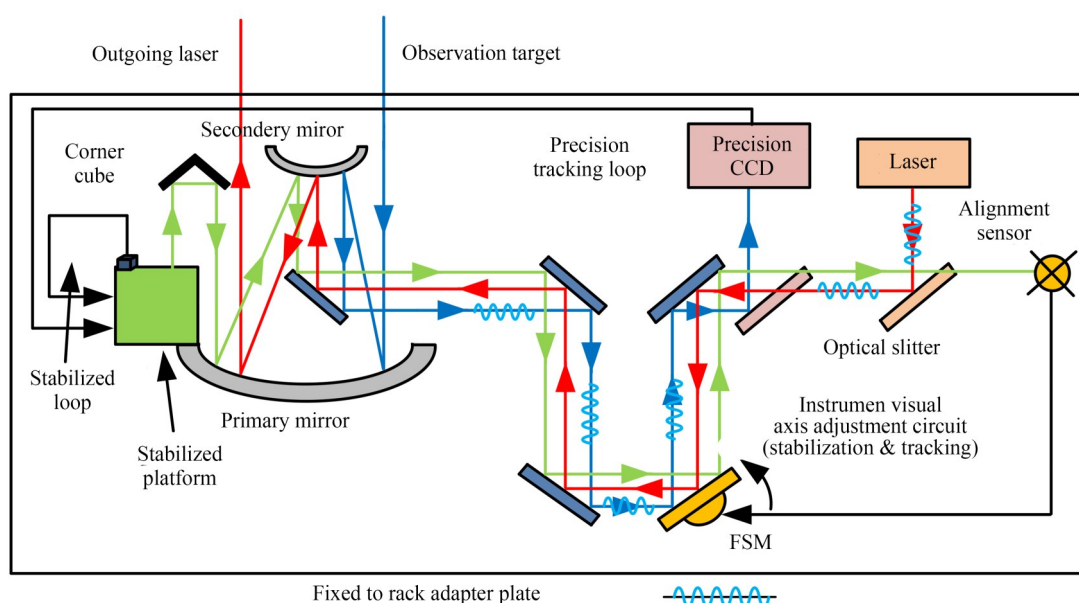


图18 IRU辅助FSM实现精稳定/跟踪系统示意图

Fig. 18 Schematic diagram of precision stabilization/tracking system with IRU assisting FSM

性稳定轴与参考光轴重合,即 $\alpha=0$ 。此时,准直探测器测得仪器视轴与参考光轴间的角偏差为 β ,利用其输出控制FSM,使参考光束的成像点与仪器视轴的成像点重合,此时仪器视轴与参考光轴平行,基座角扰动引起的视轴抖动也得到了抑制。当目标位置发生变化时,目标的位置由精探测器(图中的精CCD)敏感,这一角偏差驱动IRU转动指定角度,使参考光轴与目标视轴重合,即 $\gamma=0$,进而实现目标的稳定跟踪。目前,基于IRU的视轴稳定方案已成功应用于空间尺度激光通信、遥感成像等领域。

5.1 应用现状

5.1.1 空间尺度激光通信

空间尺度激光通信是星地及星间等远距离激光通信概念的总称,通信激光束的宽度(束散角)在 $10\ \mu\text{rad}$ 左右^[62],要求光束稳定精度优于 $1.7\ \mu\text{rad}$ 。目前,基于IRU的视轴稳定方式已成功应用于美国的月球激光通信演示验证(Lunar Laser Communication Demonstration, LLCD)试验,曾被计划用于小行星撞击任务(Asteroid impact mission, AIM)和火星激光通信验证(MARS Laser Communication Demonstration, MLCD)项目。未来,可将基于IRU的视轴稳定方式应用于更多的空间通信技术中。

5.1.1.1 月球激光通信演示验证(LLCD)试验

为了验证基于IRU的视轴稳定方式在远距离激光通信领域应用的可行性,美国NASA开展了LLCD项目,并于2005年委托麻省理工学院(MIT)林肯实验室开始进行LLCD系统的研发。LLCD系统由月球激光通信空间终端(Lunar Laser Communication Space Terminal, LLST)和月球激光通信地面终端(Lunar Laser Communication Ground Terminal, LLGT)组成。其中,LLST继承了MLCD任务的设计,使用BLUE-HALO公司研制的小行程($\pm 1\ \text{mrad}$)MIRU作为两轴机架系统(稳定精度 $350\ \mu\text{rad}$)的负载,如图19所示^[63]。LLCD进行演示时,MIRU能测量和补偿LADEE飞船上的振动来保持惯性稳定,最终实现了近半球的光束调整范围和 $4\sim 300\ \text{Hz}$ 带宽内 $2.5\ \mu\text{rad}$ 的光束稳定精度。NASA开展的LLCD试验创造了历史,以破纪录的下载速度——高达 $622\ \text{Mbit/s}$,利用脉冲激光束完成地

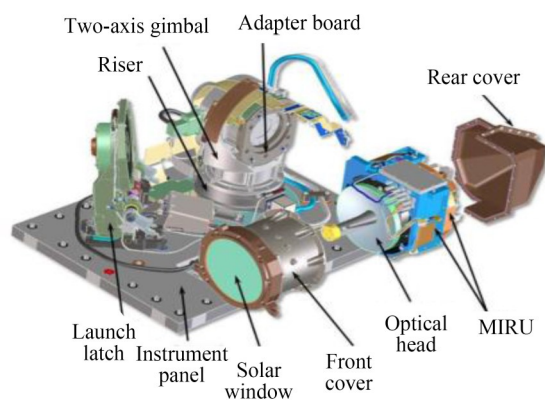


图19 月球激光通信终端光学模块

Fig. 19 Lunar Laser Communication Space Terminal (LLST)

月(相距38.44万千米)之间的数据传输^[64]。

5.1.1.2 小行星撞击任务中的深空激光通信终端

2015年,NASA与欧洲航天局(ESA)合作开展“行星撞击与偏转评估(AIDA)”项目,其中包含2个子项目,分别为NASA负责的“双星重定向试验”(DART)撞击器任务和ESA负责的AIM环绕器任务。其中,DART航天器的任务是撞击Dimorphos行星,AIM环绕器则负责对撞击过程以及撞击后的行星表面进行观测和评估。在AIM中,ESA将LLCD试验中的光通信终端进行改造,设计了AIM环绕器的通信终端——OPTEL-D,如图20所示^[65]。但由于德国2016年的撤资,ESA取消了AIM计划。

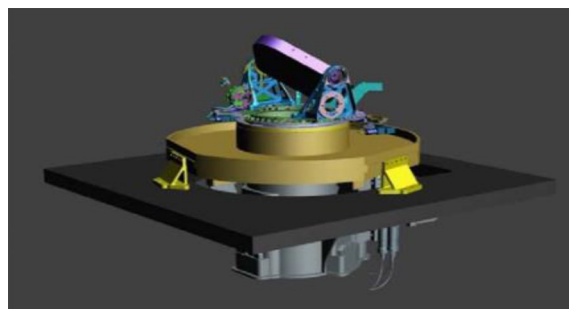


图20 OPTEL-D示意图

Fig. 20 Schematic of OPTEL-D

5.1.1.3 火星激光通信验证

NASA于2003年开始执行MLCD项目,目的是提供深空光学链路的早期经验。该项目由NASA/戈达德航天飞行中心(GSFC)管理,其星

上子系统由MIT林肯实验室研制,如图21所示。地面子系统则由JPL和MIT林肯实验室共同研制,将在400万公里的超长链路距离条件下实现1~10 Mb/s通信速率^[66]。2004年10月MLCD项目成功完成了系统要求评审,又于2005年3至5月完成了星上终端与地面终端的初步设计评审。星上终端计划在火星通信轨道器(MTO)上进行飞行试验,原定于2009年10月发射。后来由于NASA内部的计划变更,终止了MLCD项目。其中,MLCD的激光通信终端使用BLUE-HALO研制的IRU提供参考光束,以抑制MLT望远镜光学模块中的机械抖动。

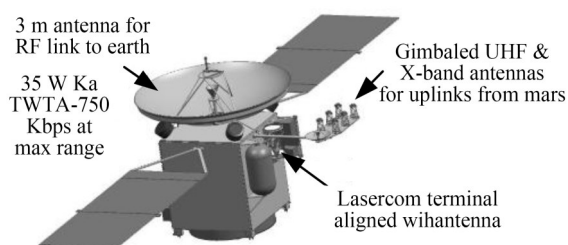


图21 MLCD星上终端

Fig. 21 MLCD on-board terminal

5.1.2 遥感稳像

随着研究和应用领域的不断拓展,对于高分辨、宽幅遥感图像需求与日俱增,这需要光学遥感卫星观测距离更远、分辨率更高,也导致对平台稳定性要求越来越严格。对地观测卫星平台

(数百千米)的指向精度要求小于 $10\ \mu\text{rad}$,光学与微波等遥感系统(数百~数万千米)指向精度一般小于 $1\ \mu\text{rad}$,甚至要求小于 $0.05\ \mu\text{rad}$ 。国外稳像技术发展比较早,从最早的单一稳像技术到现在的综合稳像技术,已逐步应用在空间光学遥感器上,取得了较好的效果,但对我国实行严格的技术封锁。国内在基于IRU的图像稳定方面的研究起步比较晚,仅有中国科学技术研究院遥感卫星研究所、长春光机所等单位进行了初步的实验研究^[67],但还未实现应用。

2021年,中国科学技术研究院遥感卫星研究所的岳荣刚等人利用IRU实现图像像移测量,并实现了振动干扰下的图像复原^[68]。该文献并未提及使用的IRU技术指标,利用IRU测量信息与哈特曼传感器测量信息的对比,验证了基于IRU的像移测量精度,实现了退化图像的恢复。结果表明,基于IRU的像移测量方法具有较高的精度,误差均方根值小于0.12像素。当图像像移小于3.5像素时,基于IRU像移测量信息的图像复原方法能够将图像的调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)提升至退化图像的1.61~1.88倍。

2022年,长春光机所的王昱棠等基于自研的IRU,实现了大口径光电成像系统的稳定^[26],系统原理如图22所示。实验发现,无IRU的系统像质迅速恶化,空间频率为 $20\ \text{lp/mm}$ 时对应的

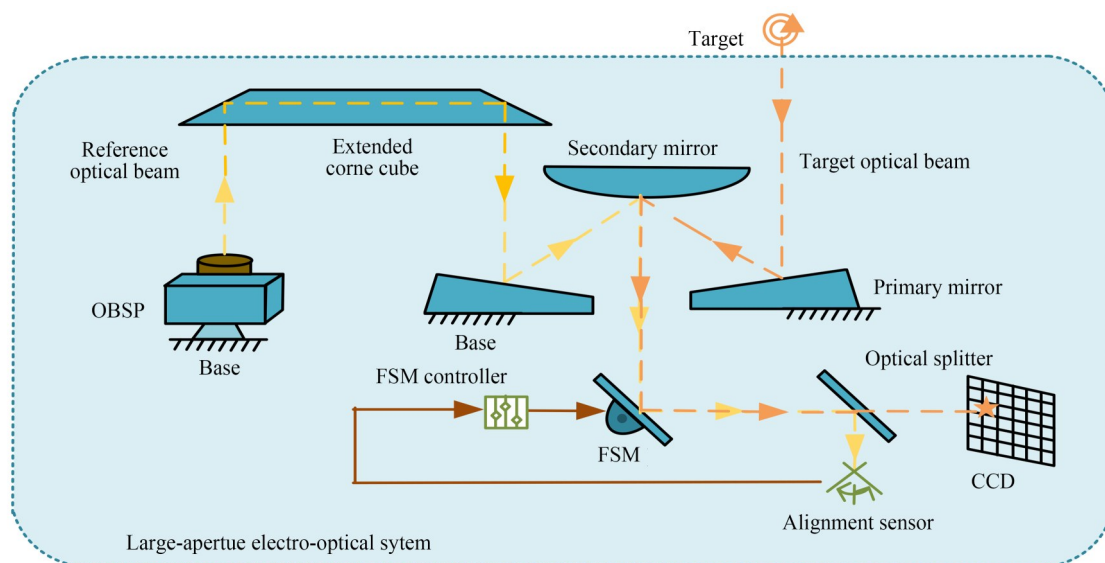


图22 带光束稳定平台的大口径电子光学系统示意图

Fig. 22 Schematic diagram of large-aperture electro-optical system with Optical-beam Stabilization Platform (OBSP)

MTF 下降到 0.2 以下,而配有 IRU 的系统的 MTF 高于 0.65。空间频率为 30 lp/mm 时未配有 IRU 的系统的 MTF 趋近于 0,而配有 IRU 的系统的 MTF 保持在 0.4 以上,配备 IRU 的光学系统与未配备 IRU 的光学系统相比表现出更好的成像性能。

5.2 展 望

5.2.1 量子通信——“墨子号”卫星

量子通信是指通过量子纠缠效应实现信息传输的一类通信技术,具有超强安全性、超大信道容量、超高通信速率、超高隐蔽性等特点,是当今最具挑战性的科技之一^[69]。为推进量子通信技术的发展,2016 年 8 月 16 日,我国于酒泉卫星发射中心成功发射了全球第一颗设计用于进行量子科学实验的卫星——“墨子号”卫星。该卫星的 ATP 有效载荷系统如图 23 所示,包括信标激光器、粗跟踪相机、精跟踪相机、两轴反射镜、FSM 等,跟瞄精度达到 $0.4 \mu\text{rad}$ ^[70]。2022 年,中国科学技术大学潘建伟院士团队利用“墨子号”卫星首次实现地球上相距 1200 公里的两个地面站之间的量子态远程传输,向构建全球化量子信息处理和量子通信网络迈出了重要一步^[71]。未来,可考虑使用更高性能的 IRU 替代信标激光器应用于“墨子号”卫星的光电跟瞄系统中,以进一步提高其跟瞄精度。

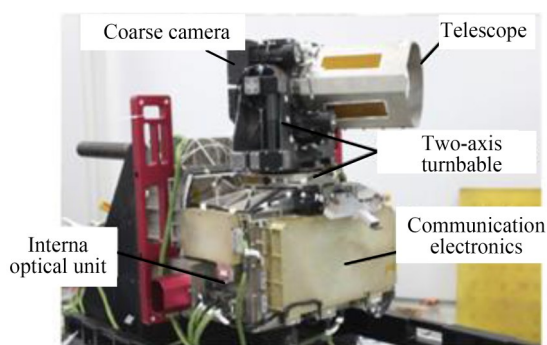


图 23 “墨子号”卫星的 ATP 有效载荷
Fig. 23 ATP payload of Micius satellite

5.2.2 低轨卫星通信遥感融合

低轨卫星系统是获取空间信息和破解宽带数字鸿沟的重要基础设施之一,通信与遥感融合是解决现有遥感和通信分治、卫星重置、应急业务响应不及时等问题的有效途径^[72]。为推动我

国低轨卫星通信遥感一体化技术发展,2022 年 3 月 5 日,我国在西昌卫星发射中心用长征二号丙运载火箭,成功将我国首次批量研制的银河航天 02 批批产卫星(包括“北邮-银河号”卫星在内的六颗低轨宽带通信卫星和一颗遥感卫星)送入预定轨道^[73]。2023 年 7 月 12 日,中国航天科工集团宣布正式启动超低轨通遥一体卫星星座建设,计划于 2030 年完成 300 颗星组网运行,提供可见光、合成孔径雷达、高光谱、红外多类型全时向遥感服务体系,形成全球 15 分钟响应能力^[74]。低轨卫通信遥感融合技术是世界各国未来的研究重点之一,IRU 作为视轴稳定系统的核心部件,必将在低轨卫星通信遥感融合建设中发挥重要作用。

5.2.3 机载、车载、船载

除了上述提及的应用于星载平台,IRU 也可应用于机载、车载、船载平台。例如,利用 IRU 进行惯性稳定可将高能激光束精准投送到远距离目标上、配有红外望远镜的飞机可在 IRU 协助下完成观测工作等等。未来可将 IRU 越来越多地应用在机载、车载、船载平台。

6 结 论

运动平台光电跟瞄系统中,IRU 的主要作用是为光电跟瞄系统提供一束不受扰动影响的惯性参考光束。本文对 IRU 及其应用情况进行综述。首先,从视轴稳定系统的原理出发,介绍了利用 IRU 辅助 FSM 实现视轴自准稳定的技术方案,指出平台式 IRU 相较捷联式 IRU 的优势。之后,从基于柔性支承的平台式 IRU 工作原理出发,阐述了系统惯性稳定/惯性稳定跟踪两种工作模式,建立了系统数学模型。其次,综述国内外 IRU 产品的研究进展,指出我国在 IRU 研发上与国外先进水平存在的差距:扰动抑制带宽与稳定精度与国外相比低大约 1 个数量级,分析支承结构、惯性传感、控制系统三项关键技术 in 提高 IRU 扰动抑制能力方面的作用,梳理三项关键技术研究现状的基础上,指出三项关键技术的未来研究方向。最后,总结了 IRU 的空间应用情况,指出 IRU 在我国空间尺度激光通信、遥感稳像等

领域的应用潜力。研究结果有助于致力于视轴稳定技术研究的学者们快速全面地了解 IRU 的

研究现状和发展趋势,为进一步提升 IRU 系统的综合性能提供有益借鉴。

参考文献:

- [1] 马佳光. 捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J]. 光学工程, 1989, 16(3): 1-42.
MA J G. The basic technologies of the acquisition, tracking and pointing systems[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1989, 16(3): 1-42. (in Chinese)
- [2] ROBINSON B S, BOROSON D M, BURIANEK D A, *et al.* The lunar laser communications demonstration [C]. 2011 *International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*. May 11-13, 2011. Santa Monica, CA, USA. IEEE, 2011: 54-57.
- [3] 元波. 量子通信光学地面站 ATP 关键技术研究[D]. 成都: 中国科学院研究生院(光电技术研究所), 2014.
QI B. *Study on Acquisition, Tracking and Pointing Key Technology of Optical Ground Station for Quantum Communication* [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [4] 胡浩军. 运动平台捕获、跟踪与瞄准系统视轴稳定技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
HU H J. *Line-of-sight Stabilization of Acquisition, Tracking and Pointing System on Moving bed* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
- [5] 田竞. 惯性稳定平台中的多传感器控制技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
TIAN J. *Research on Multiple Sensors Control Technology of Inertial Stabled-Platforms* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)
- [6] 毛耀. 运动平台光电系统的视轴稳定技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
MAO Y. *Research on Line-of-sight Stabilization Technology of Photoelectric System of Moving Platform* [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [7] HEMMATI H. *Deep Space Optical Communications* [M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2006.
- [8] 邓超. 运动平台预测跟踪技术研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2018.
DENG C. *Research on Prediction Tracking Control on Moving Bed* [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [9] 杨开栋, 王德恩, 杨英, 等. 光电跟踪系统中的惯性稳定技术[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(8): 220065.
YANG K D, WANG D E, YANG Y, *et al.* Inertial stabilization technology in optical-electric tracking system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34(8): 220065. (in Chinese)
- [10] 唐涛, 马佳光, 陈洪斌, 等. 光电跟踪系统中精密控制技术进展[J]. 光电工程, 2020, 47(10): 200315.
TANG T, MA J G, CHEN H B, *et al.* A review on precision control methodologies for optical-electric tracking control system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(10): 200315. (in Chinese)
- [11] LUNIEWICZ M F, GILMORE J P, CHIEN T T, *et al.* Comparison of wideband inertial line-of-sight stabilization reference mechanizations [C]. *Aerospace Sensing. Proc SPIE 1697, Acquisition, Tracking, and Pointing VI, Orlando, FL, USA*. 1992, 1697: 378-398.
- [12] LUNIEWICZ M F, MURPHY J, O'NEIL E, *et al.* Testing the inertial pseudo-star reference unit [C]. *SPIE's International Symposium on Optical Engineering and Photonics in Aerospace Sensing. Proc SPIE 2221, Acquisition, Tracking, and Pointing VIII, Orlando, FL, USA*. 1994, 2221: 638-649.
- [13] ECKELKAMP-BAKER D, SEBESTA H R, BURKHARD K. Magnetohydrodynamic inertial reference system [C]. *AeroSense 2000. Proc SPIE 4025, Acquisition, Tracking, and Pointing XIV, Orlando, FL, USA*. 2000, 4025: 99-110.
- [14] LEE S, ORTIZ G G, ALEXANDER J W, *et al.* Accelerometer-assisted tracking and pointing for deep space optical communications [C]. 2001 *IEEE Aerospace Conference Proceedings (Cat. No. 01TH8542)*. Big Sky, MT, USA. IEEE, 2001: 3-1559.

- [15] GILMORE J P, LUNIEWICZ M F, SARGENT D. Enhanced precision pointing jitter suppression system [C]. *High-Power Lasers and Applications. Proc SPIE 4632, Laser and Beam Control Technologies, San Jose, California, USA*. 2002, 4632: 38-49.
- [16] WALTER R E, DANNY H, DONALDSON J. Stabilized inertial measurement system (SIMS) [C]. *AeroSense 2002. Proc SPIE 4724, Laser Weapons Technology III, Orlando, FL, USA*. 2002, 4724: 57-68.
- [17] WASSON S, MORGAN F, ECKELKAMP-BAKER D. Embedded FPGA platform for fast steering mirror and optical inertial reference unit applications[C]. *SPIE Defense, Security, and Sensing. Proc SPIE 8052, Acquisition, Tracking, Pointing, and Laser Systems Technologies XXV, Orlando, Florida, USA*. 2011, 8052: 190-199.
- [18] BLUEHALO. Optical Inertial Reference Unit (OIRU) -BLUEHALO [EB/OL]. (2021-08-23) [2023-8-14]. <https://bluehalo.com/product/optical-inertial-reference-unit-oiru/>.
- [19] HARUNA M, KODEKI K, SHIMIZU S, *et al.* Evaluation of developing inertial stabilization unit [C]. *SPIE Proceedings, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVII. San Francisco, California, USA*. SPIE, 2015: 184-193.
- [20] JACKA N, WALTER R, LAUGHLIN D, *et al.* Design of stabilized platforms for deep space optical communications (DSOC) [C]. *SPIE Proceedings, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXIX. San Francisco, California, USA*. SPIE, 2017: 171-178.
- [21] 纪明. 武装直升机瞄准线粗/精组合二级稳定技术[J]. *航空学报*, 1997, 18(3): 289-293.
- JI M. Secondary stability technology of coarse/fine combination of aiming line of armed helicopter[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1997, 18(3): 289-293. (in Chinese)
- [22] 罗彤, 李贤, 胡渝. 星间光通信中振动抑制的研究[J]. *宇航学报*, 2002, 23(3): 77-80, 88.
- LUO T, LI X, HU Y. Vibration suppression in optical inter-satellite communications [J]. *Journal of Astronautics*, 2002, 23(3): 77-80, 88. (in Chinese)
- [23] 翟伟. 惯性稳定平台设计及实验研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2005.
- ZHAI W. *Design and Experimental Study of Inertial Stabilization Platform* [D]. Chengdu: Institute of Optoelectronics Technology, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
- [24] MAO Y, REN W, LUO Y, *et al.* Optimal design based on closed-loop fusion for velocity bandwidth expansion of optical target tracking system[J]. *Sensors*, 2019, 19(1): 133.
- [25] MAO Y, REN W, YU W, *et al.* Characteristic analysis and robust control design of double-stage precision stabilized platform[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 300: 111636.
- [26] WANG Y T, JIA P, WANG Z S, *et al.* Performance evaluation of optical-beam stabilization platforms with different supports used in large-aperture electro-optical system [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(2): 3161449.
- [27] 郑安琪. 惯性基准的不完全微分PID—扰动观测器复合位置控制[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- ZHENG A Q. *Incomplete Differential PID-disturbance Observer Compound Position Control for Inertial Reference Unit* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020. (in Chinese)
- [28] 拓卫晓. 基于MHD-ARS的惯性参考单元关键问题研究[D]. 天津: 天津大学, 2022.
- TUO W X. *Key issues of MHD-ARS Based Inertial Reference Unit* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2022. (in Chinese)
- [29] 王凡. 基于扩张状态观测器的惯性参考单元稳定控制技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2022.
- Wang F. *Research on Stability Control Technology of Inertial Reference Unit Based on Dilated State Observer* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2022. (in Chinese)
- [30] TUO W X, LI X F, JI Y, *et al.* Analytical compliance model for right circle flexure hinge considering the stress concentration effect[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2020, 21(5): 895-904.
- [31] TUO W X, LI X F, JI Y, *et al.* Mechanical design and determination of bandwidth for a two-axis inertial reference unit[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 172: 108962.
- [32] GUO Z, TIAN Y, ZHANG D, *et al.* A novel stick-slip based linear actuator using bi-directional motion of micropositioner[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 128: 37-49.

- [33] PAROS J M, WEISBORD L. How to design flexure hinges[J]. *Machine Design*, 1965, 37(27): 151-156.
- [34] 吴鹰飞, 周兆英. 柔性铰链的计算和分析[J]. *机械设计与研究*, 2002, 18(3): 29-30, 8.
WU Y F, ZHOU ZH Y. Design calculation and analysis of flexure hinge[J]. *Machine Design and Research*, 2002, 18(3): 29-30, 8. (in Chinese)
- [35] CHEN G M, LIU X Y, GAO H W, *et al.* A generalized model for conic flexure hinges[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2009, 80(5): 055106.
- [36] LOBONTIU N, PAINE J S N, O'MALLEY E, *et al.* Parabolic and hyperbolic flexure hinges: flexibility, motion precision and stress characterization based on compliance closed-form equations[J]. *Precision Engineering*, 2002, 26(2): 183-192.
- [37] LI L J, ZHANG D, GUO S, *et al.* Design, modeling, and analysis of hybrid flexure hinges[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 131: 300-316.
- [38] LI T M, ZHANG J L, JIANG Y. Derivation of empirical compliance equations for circular flexure hinge considering the effect of stress concentration[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2015, 16(8): 1735-1743.
- [39] DU Y S, LI T M. Empirical compliance equations for conventional single-axis flexure hinges[J]. *SN Applied Sciences*, 2019, 1(11): 1463.
- [40] ALGRAIN M C, WOHRER M K. Determination of attitude jitter in small satellites[C]. *Aerospace/Defense Sensing and Controls. Proc SPIE 2739, Acquisition, Tracking, and Pointing X, Orlando, FL, USA*. 1996, 2739: 215-228.
- [41] 李醒飞, 周新力, 吴腾飞, 等. 一种MHD角速度传感器与MEMS陀螺仪组合测量系统信号融合的方法[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2018, 51(2): 159-166.
LI X F, ZHOU X L, WU T F, *et al.* A method of signal fusion for combination measurement system of MHD angular rate sensor and MEMS gyro[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2018, 51(2): 159-166. (in Chinese)
- [42] IWATA T, KAWAHARA T, MURANAKA N, *et al.* High-bandwidth attitude determination using jitter measurements and optimal filtering[C]. *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Chicago, Illinois. Reston, Virginia: AIAA*, 2009: AIAA2009-6311.
- [43] 李醒飞, 韩佳辰, 刘帆. 基于Allan方差解耦自适应滤波的MHD/MEMS信号融合方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2020, 28(2): 237-241.
LI X F, HAN J C, LIU F. Signal fusion method of MHD-MEMS based on Allan variance decoupling adaptive filter[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2020, 28(2): 237-241. (in Chinese)
- [44] 蒋恺, 李醒飞, 刘帆, 等. 基于自适应平方根滤波的MHD/MEMS信号融合方法[J]. *传感技术学报*, 2022, 35(9): 1203-1209.
JIANG K, LI X F, LIU F, *et al.* Signal fusion method of MHD-MEMS base on adaptive square-root filtering[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2022, 35(9): 1203-1209. (in Chinese)
- [45] 李栋. 基于MHD的宽频惯性稳定平台的开环传递函数研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
LI D. *Study on the Open-loop Transformation of Wide Bandwidth Inertial Reference Stabilization Platform Based on MHD Sensor* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)
- [46] 李醒飞, 郑安琪, 拓卫晓, 等. 宽频惯性基准谐振抑制陷波器参数优化方法[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2021, 54(8): 852-860.
LI X F, ZHENG A Q, TUO W X, *et al.* Optimization method of Notch filter parameters in resonant suppression of high-bandwidth inertial reference unit[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2021, 54(8): 852-860. (in Chinese)
- [47] ZHOU Z, LI X F, TUO W X, *et al.* A resonance suppression method in platform style inertial reference unit via particle swarm optimization Notch filter[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(5): 053708.
- [48] 杨明, 郝亮, 徐殿国. 基于自适应陷波滤波器的在线机械谐振抑制[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2014, 46(4): 63-69.
YANG M, HAO L, XU D G. Online suppression of mechanical resonance based on adapting Notch filter[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 46(4): 63-69. (in Chinese)
- [49] 康逸儒, 沈汉林, 罗欣. 基于SDFT和自适应三参数陷波器的快速机械谐振抑制[J]. *微电机*, 2018, 51(5): 25-30.
KANG Y R, SHEN H L, LUO X. Fast suppression

- sion of mechanical resonance based on SDFT and adapting three parameters Notch filter[J]. *Micro-motors*, 2018, 51(5): 25-30. (in Chinese)
- [50] 龚文全, 罗炳章. 基于自适应陷波滤波器的伺服系统谐振频率估计及抑制[J]. *电机与控制应用*, 2019, 46(11): 37-42, 93.
- GONG W Q, LUO B Z. Resonance frequency estimation and suppression of servo system based on adaptive Notch filter[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2019, 46(11): 37-42, 93. (in Chinese)
- [51] 邓久强. 光电跟踪系统中的扰动观测器方法研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2022.
- DENG J Q. *Research on Disturbance Observer Based Control Methods in Photoelectric Tracking System*[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)
- [52] 任维. 运动平台下光电跟踪系统的抗扰控制技术研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2020.
- REN W. *Research on Anti-interference Control Technology of Optoelectronic Tracking System Under Moving Platform*[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [53] DENG C, MAO Y, REN G. MEMS inertial sensors-based multi-loop control enhanced by disturbance observation and compensation for fast steering mirror system[J]. *Sensors*, 2016, 16(11): 1920.
- [54] DENG C, TANG T, MAO Y, *et al.* Enhanced disturbance observer based on acceleration measurement for fast steering mirror systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 2695484.
- [55] DENG J Q, XUE W C, ZHOU X, *et al.* On disturbance rejection control for inertial stabilization of long-distance laser positioning with movable platform[J]. *Measurement and Control*, 2020, 53(7-8): 1203-1217.
- [56] DENG J Q, ZHOU X, MAO Y. On vibration rejection of nonminimum-phase long-distance laser pointing system with compensatory disturbance observer[J]. *Mechatronics*, 2021, 74: 102490.
- [57] LUO Y, REN W, HUANG Y M, *et al.* Feedforward control based on error and disturbance observation for the CCD and fiber-optic gyroscope-based mobile optoelectronic tracking system[J]. *Electronics*, 2018, 7(10): 223.
- [58] ZHOU Z, LI X F, TUO W X. Design of disturbance suppression controller for optical inertial reference unit[C]. 2021 *International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Systems*. April 8-10, 2022. Online Only, China. SPIE, 2022: 178-186.
- [59] MAO Y, DENG J Q, ZHOU X, *et al.* The frequency-domain fusion virtual multi-loop feedback control system with measured disturbance feedforward method in telescopes[J]. *Electronics*, 2019, 8(10): 1103.
- [60] NIE K, REN W, ZHOU X, *et al.* Virtual dual-loop feedback control with model-construction linear extended state observer for free space optical communication[J]. *Sensors*, 2019, 19(18): 3846.
- [61] 董瑶海. 航天器微振动: 理论与实践[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2015.
- DONG Y H. *Micro-Vibration of Spacecraft: Theory and Practice*[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2015. (in Chinese)
- [62] 宋婷婷, 马晶, 谭立英, 等. 美国月球激光通信演示验证: 实验设计和后续发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(4): 040004.
- SONG T T, MA J, TAN L Y, *et al.* Experiment design and development of the lunar laser communication demonstration in USA[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(4): 040004. (in Chinese)
- [63] WEATHERWAX M S, DOYLE K B. Vibration analysis and testing for the LLST optical module[C]. *SPIE Proceedings, Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XV*. San Diego, California, USA. SPIE, 2014: 142-148.
- [64] HEESE C, SODNIK Z, CARNELLI I. Design of the optical communication system for the asteroid impact mission[C]. *Proc SPIE 10562, International Conference on Space Optics-ICSO 2016*, 2017, 10562: 842-849.
- [65] BOROSON D M, BISWAS A, EDWARDS B L. MLCD: overview of NASA's Mars laser communications demonstration system[C]. *Lasers and Applications in Science and Engineering. Proc SPIE 5338, Free-Space Laser Communication*

- Technologies XVI, San Jose, Ca, USA*. 2004, 5338: 16-28.
- [66] 李浩洋, 刘兆军, 徐彭梅. 浅谈空间光学遥感器稳像技术[J]. *航天返回与遥感*, 2010, 31(6): 52-57.
- LI H Y, LIU Z J, XU P M. An overview on image stabilization method of space-born remote sensing systems [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 31(6): 52-57. (in Chinese)
- [67] YUE R G, WANG H M, JIN T, *et al.* Image motion measurement and image restoration system based on an inertial reference laser [J]. *Sensors*, 2021, 21(10): 3309.
- [68] 李赓. 量子通信技术研究现状[J]. *电子元器件与信息技术*, 2022, 6(3): 111-113.
- LI G. Research status of quantum communication technology [J]. *Electronic Components and Information Technology*, 2022, 6(3): 111-113. (in Chinese)
- [69] LU C Y, CAO Y, PENG C Z, *et al.* Micius quantum experiments in space [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2022, 94(3): 035001.
- [70] 中国“墨子号”实现1200公里地表量子态传输新纪录[J]. *信息网络安全*, 2022, 22(6): 95.
- China's "Mozi" achieves a new record of 1200 km surface quantum state transmission [J]. *Information Network Security*, 2022, 22(6): 95. (in Chinese)
- [71] 彭木根, 张世杰, 许宏涛, 等. 低轨卫星通信遥感融合: 架构、技术与试验[J]. *电信科学*, 2022, 38(1): 13-24.
- PENG M G, ZHANG SH J, XU H T, *et al.* Communication and remote sensing integrated LEO satellites: architecture, technologies and experiment [J]. *Telecommunications Science*, 2022, 38(1): 13-24. (in Chinese)
- [72] 北京邮电大学党委宣传部. “北邮-银河号”卫星成功发射 低轨宽带卫星星座组网及通信-遥感融合在轨试验阶段正式开启 [EB/OL]. (2022-03-07) [2023-8-15]. <https://www.bupt.edu.cn/info/1079/84957.htm>.
- Propaganda Department of Party Committee, Beijing University of Posts and Telecommunications. "BUP-Yinhe" satellite successfully launched low-orbit broadband satellite constellation Networking and in-orbit test phase of Communication-Remote sensing fusion officially started [EB/OL]. (2022-03-07) [2023-8-15]. <https://www.bupt.edu.cn/info/1079/84957.htm>. (in Chinese)
- [73] 新华每日电讯. 2030年, 300颗星组网运行 [EB/OL]. (2023-07-13) [2023-8-15]. http://www.news.cn/mrdx/2023-07/13/c_1310732376.htm.
- Xinhua daily telegraph. 2030, 300 star network run [EB/OL]. (2023-07-13) [2023-8-15]. [HTTP://http://www.news.cn/mrdx/2023-07/13/c_1310732376.htm](http://http://www.news.cn/mrdx/2023-07/13/c_1310732376.htm). (in Chinese)

作者简介:



李醒飞(1966—),男,湖北天门人,教授,博士生导师,1994年于东南大学获得硕士学位,2000年于天津大学获得博士学位,现为天津市智能化精密测量技术工程中心主任,主要从事新型传感器、检测与智能化、海洋观测与探测方面的研究。E-mail: lixfju@hotmail.com

通讯作者:



拓卫晓(1993—),女,河南洛阳人,助理研究员,硕士生导师,2021年于天津大学精密仪器与光电子工程学院仪器科学与技术专业获得工学博士学位(硕博连读),现为天津大学博士后,主要从事微角振动测量与抑制技术的研究。E-mail: tuoweixiao@tju.edu.cn