



·强激光物理与技术·

## 光电跟踪系统中的惯性稳定技术\*

杨开栋, 王德恩, 杨 英, 许党朋, 王 芳, 刘 昊

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 在侦查探测、激光通讯等领域, 光电跟踪系统的闭环精度是其重要技术指标之一。为了提高闭环精度, 一般可使用图像稳定技术, 惯性稳定技术或整体自稳定技术。惯性稳定技术因其良好的稳定效果, 已在光电跟踪系统中得到广泛应用。采用对比分析的方法对光电跟踪系统中的机架惯性稳定、反射镜惯性稳定以及惯性基准光稳定技术进行了原理分析, 优势比较以及发展展望, 总结出多种惯性稳定技术交叉使用的复合轴惯性稳定仍是未来一段时间的发展趋势。

**关键词:** 光电跟踪; 闭环精度; 机架惯性稳定; 反射镜惯性稳定; 惯性基准光稳定

中图分类号: TP273; TN29

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220065

## Inertial stabilization technology in optical-electric tracking system

Yang Kaidong, Wang De'en, Yang Ying, Xu Dangpeng, Wang Fang, Liu Hao

(Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The closed-loop accuracy of the optical-electric tracking system is one of the important technical index in the fields of reconnaissance and detection, laser communication, etc. Researchers usually use image stabilization techniques, inertial stabilization techniques, or overall self-stabilization techniques to improve the closed-loop accuracy. Inertial stabilization techniques has been widely used in photoelectric tracking system for its good stabilization effect. This paper adopts the method of comparative analysis to analyze the principle, compare the advantages and forecast the development prospect of the frame inertial stabilization, mirror inertial stabilization and inertial reference light stabilization techniques in the photoelectric tracking system. It is proposed that the composite axis inertial stabilization using multiple inertial stabilization techniques is still a development tendency in the near future.

**Key words:** optical-electric tracking, closed-loop accuracy, frame inertial stabilization, mirror inertial stabilization, inertial reference light stabilization

光电跟踪设备由最初的地基方式, 转变为如今的车载、舰载、机载和星载方式, 其载体平台的特性由静止转变为运动, 甚至是高速运动。运动平台与静平台相比, 势必会引入更多的扰动, 这些扰动都将引起光电跟踪系统的光轴抖动。光轴抖动会降低光电传感器的成像质量, 影响跟踪控制算法的跟踪效果。若跟踪控制回路的闭环带宽足够大, 能覆盖光轴抖动频率, 则光轴抖动对光电跟踪系统的影响可以忽略。但由载体运动引起的光轴抖动一般频谱较宽, 控制回路带宽有限, 对于中高频部分的扰动无法抑制或消除, 从而增大了系统的跟踪误差, 甚至会导致丢失目标。因此, 如何抑制或消除由载体运动带来的光轴抖动成为光电跟踪系统研究中的一个热点。光轴抖动抑制技术又称为视轴稳定技术, 从测量和处理抖动的方式不同, 可将其分为: 基于图像处理的视轴稳定技术、惯性稳定技术以及主/被动隔振平台自稳定技术。图像稳定技术受限于采集频率和处理速度之间的矛盾: 采集频率越高, 曝光时间越短, 图像特征越不明显, 处理时间越长, 其光轴抖动抑制带宽受限。平台自稳定技术通过稳定光电载荷跟踪机架的安装平台来达到消除光轴抖动的目的, 负载的体积质量较大, 中高频抖动的抑制效果不佳。惯性稳定技术作为一种应用范围最广, 稳定效果较佳的视轴稳定技术, 既可通过稳定跟踪机架的方式抑制低频的光轴抖动, 又可通过稳定反射镜的方式抑制中低频的光轴抖动, 还能通过引入惯性基准光和快速倾斜反射镜(Fast Steering Mirror, FSM)的方式抑制中高频的光轴抖动。因此, 本文对光电跟踪系统中的惯性稳定技术进行了分析和展望。

\* 收稿日期: 2022-03-10; 修订日期: 2022-04-28  
联系方式: 杨开栋, yangkaidong0730@qq.com。

## 1 跟踪机架稳定技术

稳定跟踪机架是一种早期的光电跟踪平台惯性稳定方式,它通过安装于机架或平台上的惯性测量器件的测量值,使用反馈或前馈的手段达到视轴稳定的目的。根据惯性测量器件安装位置的不同,可将其分为整体稳定式和捷联稳定式。

整体稳定式的惯性测量器件安装于转台转轴上,可感知方位框架和俯仰框架的角速度信息。其工作原理控制框图如图 1 所示,跟踪框架受到外来摩擦力扰动 $T_f$ 和力矩扰动 $T_d$ 的影响,产生扰动角速度 $\omega$ ,并被惯性陀螺感知,以此作为反馈量传递到速度稳定控制器,控制器计算得到控制信号经功率放大后驱动力矩电机,产生反方向的角速度以维持视轴在惯性空间中的稳定,其本质是反馈控制。整体稳定模式下,惯性传感器本身的振动幅值较小,因而同样的频率特性误差产生的测量误差较小<sup>[1]</sup>。同时,惯性传感器组件的测量值可直接作为误差反馈值,驱动方位或俯仰轴旋转,实现视轴稳定闭环控制。

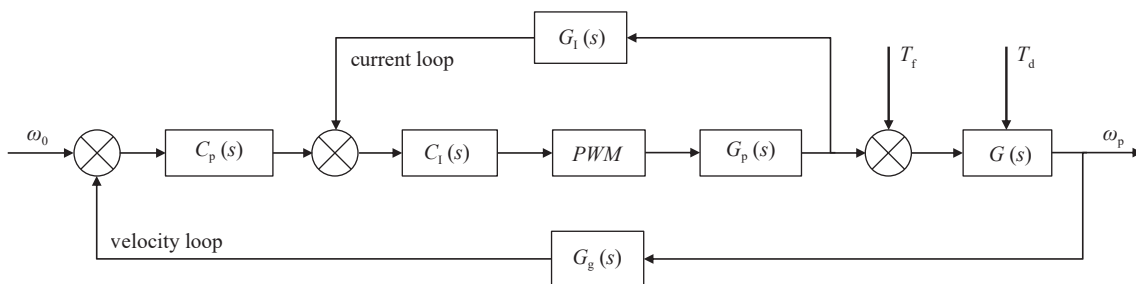


Fig. 1 Schematic diagram of the overall stabilization method

图 1 整体稳定式控制原理图

捷联稳定式的惯性测量器件安装于载体平台上,感知载体平台的抖动信息,通过空间坐标位置关系,将载体平台抖动信息折算为光轴抖动信息,并通过前馈方式抑制抖动,达到惯性稳定的目的。其控制原理如图 2 所示。图中 $\omega_0$ 为输入的角速度指令, $\omega_p$ 为视轴相对于惯性空间的角速度, $\omega_m$ 为载体扰动角速度, $\omega'_p$ 为角速度反馈信息, $T_d$ 为扰动力矩, $\xi$ 为测速噪声, $G_p(s)$ 为速度环控制器传递函数, $G_d(s)$ 为测速环节传递函数, $G_g(s)$ 为陀螺传递函数。其优点是跟踪框架的转动惯量不受惯性传感器组件的影响,可以使用光纤陀螺或激光陀螺这类高精度、高带宽但质量和体积较大的惯性测量组件。但前馈控制方式需要控制对象精确的数学模型,且测量误差和折算误差对系统影响较大。相较于捷联稳定,平台稳定式通过闭环反馈的方式实现视轴稳定控制,其对传感器噪声以及精度的敏感性小,控制系统的鲁棒性更好。

在框架结构上,两轴两框架形式是球形稳定平台早期采用的一种结构形式,该技术相对较为成熟,适用于低速、轻型、对稳定精度要求不高的稳定平台。但其存在两方面的缺陷:(1)由于台体直接暴露在外部环境中,风阻力直接作用存在较大干扰力矩,机载飞行时,稳定精度只能达到毫弧度级;(2)传感器光轴过顶时,方位轴功能丧失,只能实现俯仰单轴稳定,即存在自锁现象<sup>[2]</sup>。为了实现更高精度的惯性稳定,在两轴两框架的基础上发展出了两轴多框架光电跟踪系统,其中最常见的是两轴四框架光电跟踪系统<sup>[2]</sup>,如图 3 所示。这类光电跟踪系统在车载、舰载及机载等运动平台上,均能实现百  $\mu\text{rad}$  量级的跟踪精度<sup>[3]</sup>。

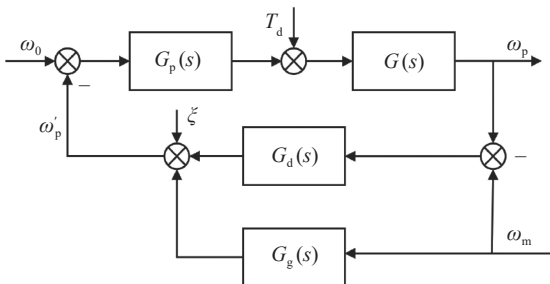


Fig. 2 Schematic diagram of the strap-down stabilization method

图 2 捷联稳定式控制原理图

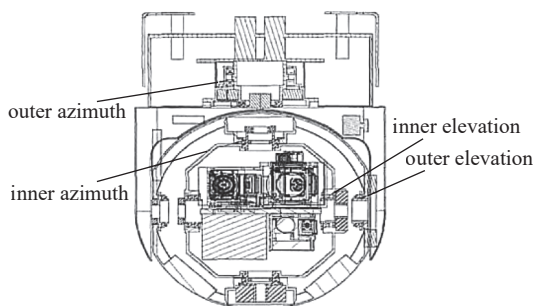


Fig. 3 Two-axis four-frame optical-electric tracking system<sup>[2]</sup>

图 3 两轴四框架光电跟踪系统<sup>[2]</sup>

国内对于两轴多框架或多轴多框架的研究虽起步较晚,但却取得了较多的成果。其中具有代表性的单位有中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院光电技术研究所、中国航空工业集团公司洛阳电光设备研

究所、长春理工大学等。

国外则以美国、以色列、加拿大、法国、俄罗斯等国家为代表,研制了各类车载、舰载、机载的多轴多框架光电跟踪系统。其在质量、体积和稳定精度上相较于国内,仍有一定的领先优势<sup>[4]</sup>。

表 1 和表 2 分别为国内、国外的多轴多框架光电转台研制情况,从表中我们可以看出,同为两轴两框架结构时,国内 618 所和长光所研制生产的光电转台稳定精度为均 100  $\mu\text{rad}$ ,而俄罗斯研制生产的 GS-2 光电转台,稳定精度小于 50  $\mu\text{rad}$ 。对于更常见的两轴四框架结构,国内外在稳定精度上差距不大,但在质量和载荷功能方面却略有欠缺。

表 1 国内多轴多框架光电转台研制情况  
Table 1 Development of domestic multi-axis and multi-frame photoelectric turntables

structure type	manufacturer	weight/kg	volume/mm×mm	load function	stabilization precision/ $\mu\text{rad}$
two-axis four-frame	CIOMP	80	490×650	visible light detection focal distance: 20~500 mm infrared detection FOV(8~12 $\mu\text{m}$ ) 14.40×10.80、2.40×1.80 laser ranging wavelength: 1154 $\mu\text{m}$ Distance: 20 km	25
two-axis four-frame	014	35	358×508	visible light detection focal distance: 15~300 mm infrared detection FOV(8~12 $\mu\text{m}$ ) 24×180、30×2.20	40
two-axis two-frame	618	25	280×455	visible light detection focal distance: 10~150 mm three modes: color, high resolution, low light	100
two-axis four-frame	CIOMP	200	600×850	visible light detection focal distance: 240~1000 mm infrared detection FOV(3~5 $\mu\text{m}$ ) 30×2.250	20
two-axis four-frame	CIOMP	10	260×420	visible light detection focal distance: 5.4~72 mm two modes: color, high resolution	100

## 2 反射镜稳定技术

将多轴多框架技术运用于机架惯性稳定技术中,使得视轴稳定精度大幅度提高。但其控制对象为整个机架,较大的转动惯量和机械谐振的限制使其闭环控制带宽难以进一步提升,视轴稳定精度在亚毫弧度量级。为了进一步提高视轴稳定精度,工程人员通过减小控制对象的体积和重量,提出了反射镜稳定技术。反射镜稳定技术通过调整光路中反射镜的姿态来改变光路方向,实现视轴稳定<sup>[5]</sup>。其控制对象仅为反射镜本身,体积小、质量小,可以获得较高的控制带宽。早期的反射镜惯性稳定技术将惯性测量单元安装于反射镜背面或控制反射镜转动的转轴上,如图 4 所示。图 4 中 Gyro1、Gyro2 为惯性测量单元,分别测量绕  $j$  轴和  $k$  轴的角速度  $\omega_j$  和  $\omega_k$ 。俯仰轴和方位轴的角速度信息通过控制回路传输至电机伺服系统,驱动俯仰轴和方位轴的电机反向旋转,抵消载体运动对光轴的影响,实现视轴稳定,其本质是一种整体稳定式。

这类反射镜稳定技术虽然减小了控制对象的转动惯量,但却存在缺陷:视轴转动角与反射镜框架转动角有 2:1 的比例关系,这使得无法通过直接使陀螺信号趋零的方式实现视轴稳定。针对此类问题,主要有两类解决办法:(1)机械半角稳定控制技术;(2)采用重构视轴的半捷联稳定方法。

机械半角机构将陀螺和反射镜分别置于两个平行的回转轴上,如图 5 所示,电机驱动陀螺所在轴,并通过一个传动比为 2 的连杆或钢带带动反射镜运动。机械半角机构的引入虽然可以克服视轴转动角与反射镜转动角存在 2:1 比例关系的问题,但也带来了弹性形变、机械谐振等问题,使得视轴稳定效果并不理想,同样在百  $\mu\text{rad}$  量级。这也限制了此类反射镜稳定技术在高精度控制场景下的应用。

表 2 国外多轴多框架光电转台研制情况

Table 2 Development of foreign multi-axis and multi-frame photoelectric turntables

structure type	manufacturer	weight/kg	volume/mm×mm	load function	stabilization precision/μrad
two-axis four-frame	USA Westing house	32	384×596	visible light detection focal distance: 20~280 mm infrared detection FOV: 7.50×9.70、2.250×2.90 laser ranging distance: 10 km	25
two-axis four-frame	Israel TOPLITE	53	406×662	visible light detection focal distance: 20~240 mm infrared detection FOV (8~120 μm, 3~5 μm) 18×240、3.90×5.10 1.30×1.70 laser Ranging wave length: 1.54 μm distance: 20 km	25
two-axis four-frame	Italy Astro	30	380×596	infrared detection FOV(8~12 μm) 40×2.70、16×10.70 visible light detection: 10 times zoom	25
three-axis stabilization	Canada mescam	30	356×548	visible light detection focal distance: 16~160 mm infrared detection FOV: 230×170、2.30×1.70 laser ranging distance: 10 km	35
two-axis four-frame	France Scarnoff	35	356×548	visible light detection FOV: 24×16、50×3.30 infrared detection FOV: 24×180、30×2.20 laser ranging distance: 10 km	35
two-axis four-frame	Russia GS-2	57.5	340×552	visible light detection infrared detection laser ranging laser irradiation	50

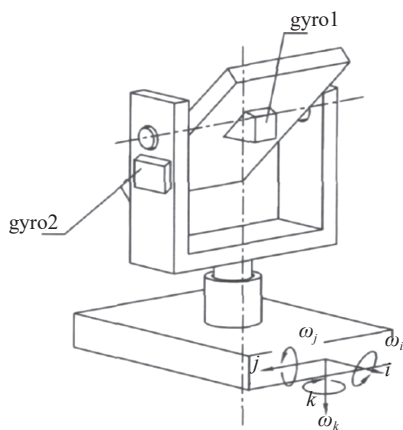


Fig. 4 Mirrors in mirror stabilization technology<sup>[6]</sup>

图 4 反射镜稳定技术中的反射镜<sup>[6]</sup>

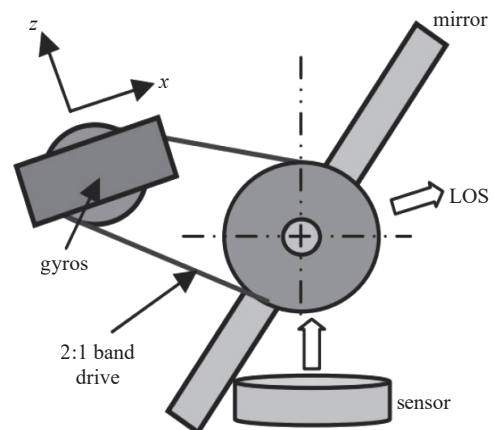


Fig. 5 Structure diagram of mirror stabilization system with half-angle mechanism<sup>[7]</sup>

图 5 含半角机构的反射镜稳定系统结构图<sup>[7]</sup>

重构视轴的半捷联稳定控制通过建立反射镜视轴运动学关系, 重构视轴空间惯性角速度, 实现视轴稳定控制<sup>[8]</sup>。宋江鹏<sup>[9]</sup>针对不同类型反射镜平台视轴运动多样性的特点, 从基本的反射镜视轴运动学关系出发, 采用视轴重构方法, 对反射镜平台视轴角速度进行数学重建, 验证了基于捷联式反射镜视轴稳定控制的可行性。但半捷联的惯性稳定方式无法直接测量光轴角速度, 需要利用三轴陀螺和测角元件进行光轴解算, 且解算过程中存在测角误

差。因此在实际的工程应用中应结合成本、空间、稳定精度要求等多方面因素,选取合适的反射镜稳定方案。

随着视轴稳定精度需求的提高,快反镜(FSM)以其高带宽、高精度的特性逐渐取代早期普通反射镜,运用于惯性稳定技术中。通过分离转台的惯性角速率信号与振动信号,利用前馈控制 FSM 的方式,消除角振动对视轴的影响,提高了视轴稳定精度<sup>[10]</sup>,其原理如图 6 所示。

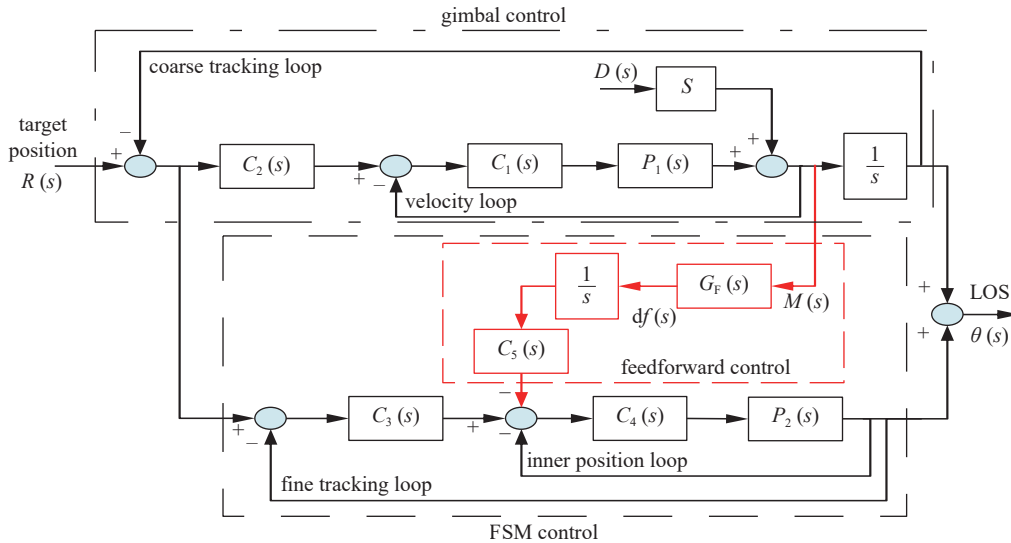


Fig. 6 Line-of-sight stabilization technology based on feed-forward control and FSM<sup>[10]</sup>

图 6 基于前馈控制的 FSM 视轴稳定技术<sup>[10]</sup>

### 3 惯性基准光稳定技术

基于基准光的惯性稳定技术可以彻底解决反射镜稳定中 2:1 的转角关系问题,并能进一步提升控制带宽和视轴稳定精度。其最早见于美国的高空气球实验(HABE)<sup>[11-13]</sup>,视轴稳定精度在 0.4~312 Hz(幅值为 417  $\mu\text{rad}$ )的扰动频带内可达 0.04  $\mu\text{rad}$ 。基本原理如图 7 所示,在跟踪望远镜的镜筒外侧安装一个光学惯性基准单元(OIRU),用于产生稳定于惯性空间的基准光。视轴基准光经扩展角锥棱镜(ECC)反射后进入望远镜。基准光与目标光同光路,经 FSM 反射后到达四象限位置探测器(PSD)前的分光镜。基准光透射进入 PSD,目标光反射进入精探测器。PSD 的输出值反馈控制 FSM,使基准光始终位于 PSD 中心,实现视轴稳定。精探测器上的目标角偏差用于驱动基准光在惯性空间中的稳定方向,使目标位于精探测器中心,实现跟踪功能<sup>[1]</sup>。

此类惯性稳定技术的关键是高稳定精度基准光的获取,即惯性基准单元(OIRU)的设计。在高空气球实验中,此基准单元又称为惯性伪星参考装置(IPSURU),它由基座,两轴柔性支撑结构,音圈电机,平台以及平台上搭载的

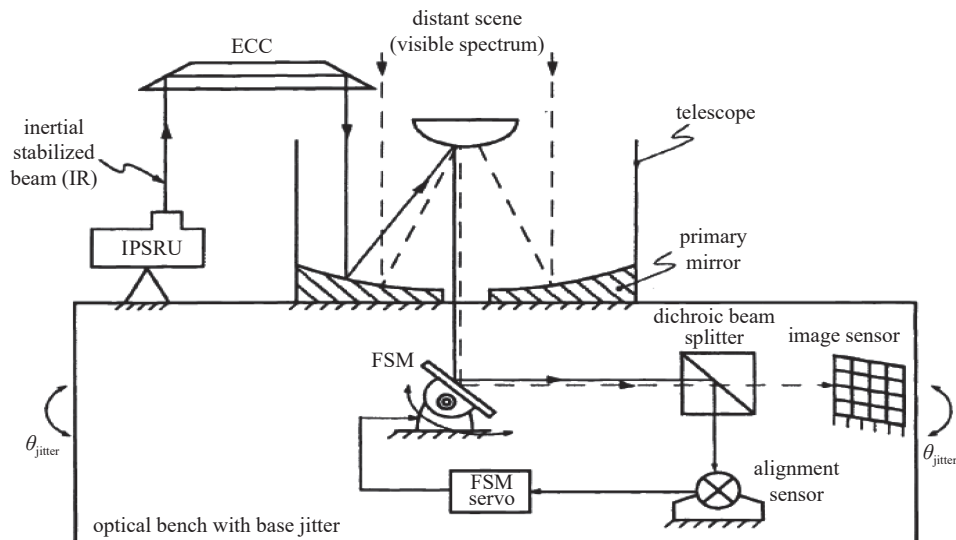


Fig. 7 Schematic diagram of line-of-sight stabilization based on optical inertial reference unit<sup>[12]</sup>

图 7 基于光学惯性基准单元的视轴稳定原理图<sup>[12]</sup>

光源、动力调谐陀螺仪(DTG)和角位移传感器(ADS)构成,如图8所示。Draper 实验室将 DTG 与 ADS 进行数据融合,获得了高带宽、低噪声的角速率测量数据,从而使得此惯性基准光的稳定精度达到 40 nrad。为了满足空天激光器(SBL)的稳定需求,获得更高精度的惯性基准光,Draper 实验室又于 2002 年设计了一款高性能惯性伪星参考装置(HP-IPSRU)。此装置通过将低噪声陀螺和高带宽的角速率传感器(ARS)数据融合,理论上可获得稳定精度 5 nrad 的惯性基准光。但由于传感器技术的限制,此设计最终未能得到验证<sup>[14]</sup>。

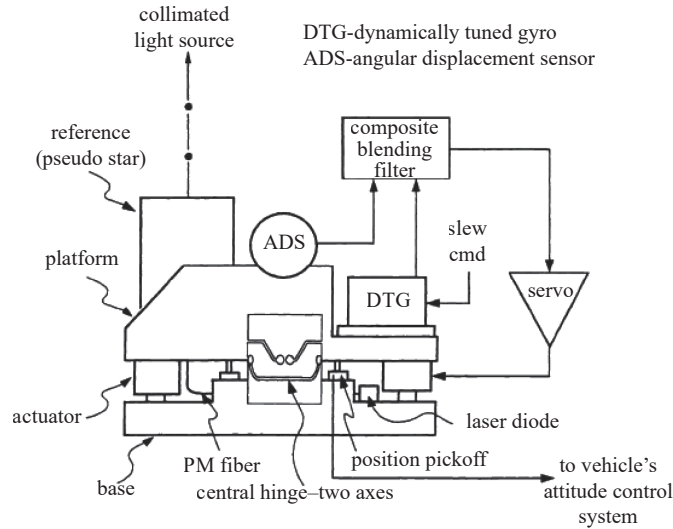


Fig. 8 Schematic of inertial pseudo-star reference unit (IPSRU)<sup>[12]</sup>

图 8 惯性伪星参考装置原理图<sup>[12]</sup>

为了将惯性基准光这一设计用于商品化,波音公司于 2002 年开发了 SIMS 系统,如图 9 所示。其原理与 IPSRU 基本一致,通过将低成本的惯性陀螺数据与角速率传感器(ARS-12)数据融合,可实现  $\mu\text{rad}$  量级的惯性参考光输出<sup>[15]</sup>。

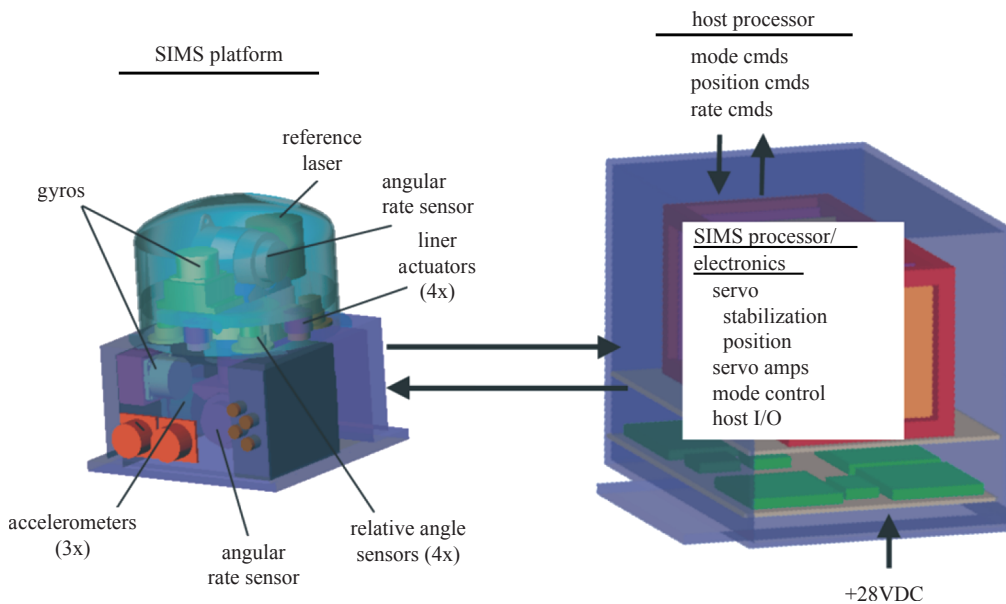


Fig. 9 The structure diagram of Boeing's stabilized inertial measurement system (SIMS)<sup>[15]</sup>

图 9 波音公司 SIMS 结构图<sup>[15]</sup>

除此之外,美国 ATA 公司也推出了光学惯性参考装置 OIRU-100 系列,如图 10 所示。其抖动角速率测量采用 MEMS 陀螺与角速度传感器 ARS-16 数据融合的方式,在工作带宽 1-1000 Hz 的频带上,抖动抑制性能可达 100 nrad<sup>[16]</sup>。相较于波音公司的 SIMS,其重量和体积均有大幅度减小,商业化应用更加成熟。ATA 公司的三类 OIRU 性能参数如表 3 所示。

通过在光路中引入惯性基准光, Yue R 等人在处理图像抖动问题时,实现了 0.12 像素的抖动测量精度,并大幅

提高了处理后的图像质量<sup>[17]</sup>。

基于参考光的惯性稳定技术,需要具有高带宽、高精度的惯性测量仪器来对平台抖动信息进行测量,也需要高带宽、高精度的快反镜来作为其执行器,对光路进行校正。在控制算法上,简单的PID控制已不能满足控制需求,改进的PID算法、自适应控制算法、自抗扰控制算法、扰动观测器控制算法等的引入,也是提高视轴稳定精度的必要手段。

#### 4 结 语

跟踪机架稳定技术是光电跟踪系统在亚毫弧度量级的一种惯性稳定技术,其稳定残差达上百微弧度。为进一步提升光电跟踪系统的稳定精度,在机架稳定技术的基础上,可引入反射镜惯性稳定技术,构成粗精复合稳定控制系统。将载体扰动在频率上解耦,快反镜对跟踪机架稳定系统的中高频稳定残差进行开环或闭环校正,从而使稳定精度提升至数十微弧度。在更高稳定精度要求的场合,除了使用反射镜惯性稳定技术外,还可以在光路中引入惯性参考光。通过高带宽的位置探测器(PSD)感知载体更高频率的惯性扰动,并使用高带宽、高精度的快反镜对PSD上的光斑位置偏差进行闭环校正,可使稳定精度进一步提升至微弧度甚至亚微弧度量级。由此可见,多种惯性稳定技术的交叉使用,构成复合惯性稳定技术,是未来一段时间的主流研究方向。

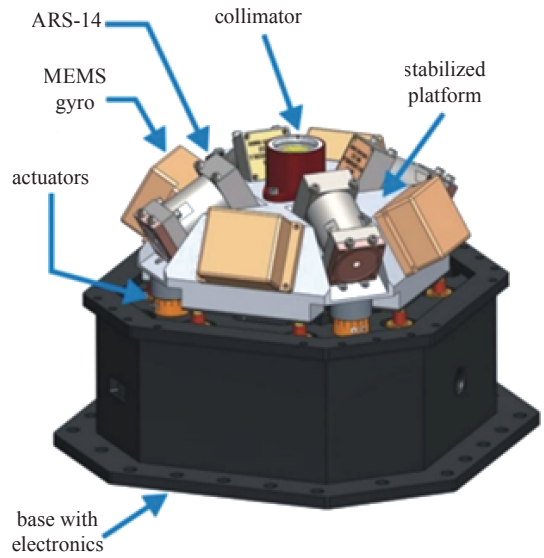


Fig. 10 The structure diagram of ATA's optical inertial reference unit (OIRU)<sup>[16]</sup>

图 10 ATA 公司 OIRU 结构图<sup>[16]</sup>

表 3 ATA 公司的 OIRU-xxx 系列性能参数<sup>[16]</sup>

Table 3 Performance parameters of ATA's OIRU-xxx series<sup>[16]</sup>

	OIRU-100	OIRU-500	OIRU-1000
jitter performance (1-1000 Hz)	100 nrad	500 nrad	2 μrad
IKA performance	1.2 mrad at 20 min	2.2 mrad at 20 min	6 mrad at 20 min
mechanism size	9.5" dia. × 5.5" high	7" dia. × 5" high	3.1" dia. × 3.5" high
mechanism mass	18 lbs	10 lbs	3 lbs
electronics mass	2 lbs	2 lbs	2 lbs
power	45 W	30 W	18 W
gyro	(3) Emcore 1.3k FOG	(3) KVH DSP-1750D FOG	(1) 2-Axis NG G2000 DTG
ARS	(3) ARS-16	(3) ARS-16	(3) ARS-15
acceleration	2 rad/s <sup>2</sup>	2 rad/s <sup>2</sup>	10 rad/s <sup>2</sup>
bandwidth (open-loop crossover)	>100 Hz	>100 Hz	>150 Hz
position resolution	<1 μrad	<1 μrad	<1 μrad
controller type	digital (FPGA)	digital (FPGA)	digital (FPGA)

对于光电跟踪系统中的这三类惯性稳定技术,其技术发展主要受惯性测量器件、执行器件以及稳定控制算法的约束。在惯性测量器件方面,现阶段主要使用光学陀螺或微机械(MEMS)陀螺测量光电跟踪系统的惯性扰动。但光学陀螺的测量精度与其体积重量成正比,这一矛盾的存在使得对惯性扰动的测量精度难以进一步提升。MEMS陀螺虽体积小,但其现阶段的测量精度还远不及光学陀螺。在执行器件方面,快反镜作为反射镜稳定技术和基于参考光的惯性稳定技术的执行器件,音圈式快反镜以其大行程,高线性度的优势,可作为反射镜稳定技术的执行器件;压电陶瓷式快反镜以其高带宽、高精度的特性,可作为参考光惯性稳定技术的执行器件。音圈快反

虽然行程大、线性度好,但其闭环带宽较低;压电快反虽然精度高、带宽高,但压电材料存在迟滞现象,且线性度较差。在稳定控制算法方面,现阶段主要还是使用PID控制算法,但简单的PID控制算法难以满足高精度的控制需求。由上述三方面的分析可知,若想进一步提升光电跟踪系统的惯性稳定精度,还需在惯性测量器件,执行器件以及稳定控制算法上进行完善改进。

#### 参考文献:

- [1] 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: 12-15. (Hu Haojun. Line-of-sight stabilization of acquisition, tracking and pointing system on moving bed[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005: 12-15)
- [2] Satyarthi S. Optical line-of-sight steering using gimbale mirrors[C]//Proceedings of the SPIE 9076, Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications XI. 2014: 90760E.
- [3] 吕宏宇, 金刚石, 高旭辉. 两轴四框架机载光电平台稳定原理分析[J]. *激光与红外*, 2015, 45(2): 194-198. (Lü Hongyu, Jin Gangshi, Gao Xuhui. Stabilization analysis of airborne electro-optical platform with two-axis and four-gimbal[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(2): 194-198)
- [4] 唐涛, 马佳光, 陈洪斌, 等. 光电跟踪系统中精密控制技术研究进展[J]. *光电工程*, 2020, 47: 200315. (Tang Tao, Ma Jiaguang, Chen Hongbin, et al. A review on precision control methodologies for optical-electric tracking control system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47: 200315)
- [5] 侯瑞博, 魏涛, 宋景. 航空光电侦察平台关键技术及其发展[J]. *电子元器件与信息技术*, 2019(3): 51-53, 57. (Hou Ruibo, Wei Tao, Song Jing. Key technologies and its development of aeronautical photoelectric reconnaissance platform[J]. *Electronic Component and Information Technology*, 2019(3): 51-53, 57)
- [6] 洪华杰, 王学武, 翁干飞. 光电侦察装备中的反射镜稳定技术[J]. *应用光学*, 2011, 32(4): 591-597. (Hong Huajie, Wang Xuewu, Weng Ganfei. Mirror stabilization in electro-optical reconnaissance system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(4): 591-597)
- [7] Hilkert J M, Cohen S. Development of mirror stabilization line-of-sight rate equations for an unconventional sensor-to-gimbal orientation[C]//Proceedings of the SPIE 7338, Acquisition, Tracking, Pointing, and Laser Systems Technologies XXIII. 2009: 733803.
- [8] 王琦, 孙广利, 黎纯宁, 等. 基于半捷联方式的反射镜视轴稳定技术[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(10): 3070-3075. (Wang Qi, Sun Guangli, Li Chunning, et al. Inertial line-of-sight stabilization technique of semi-strapdown control using mirrors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 3070-3075)
- [9] 宋江鹏, 孙广利, 周菽, 等. 反射镜光电平台视轴稳定技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(6): 1904-1911. (Song Jiangpeng, Sun Guangli, Zhou Di, et al. Line-of-sight stabilization techniques for mirror electro-optical platform[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1904-1911)
- [10] Xia Yunxia, Bao Qiliang, Liu Zidong. A new disturbance feedforward control method for electro-optical tracking system line-of-sight stabilization on moving platform[J]. *Sensors*, 2018, 18: 4350.
- [11] Schneeberger T J, Barker K W. High-altitude balloon experiment: a testbed for acquisition, tracking, and pointing technologies[C]//Proceedings of the SPIE 1950 Acquisition, Tracking, and Pointing VII. 1993: 2-15.
- [12] Luniewicz M F, Murphy J, O'Neil E, et al. Testing the inertial pseudo-star reference unit[C]//Proceedings of the SPIE 2221, Acquisition, Tracking, and Pointing VIII. 1994: 638-649.
- [13] Eckelkamp-Baker D, Sebesta H R. Optical inertial reference unit for kilohertz bandwidth submicroradian optical pointing and jitter control: U. S. Patent 7227, 111 [P]. 2007-06-05.
- [14] Gilmore J P, Luniewicz M F, Sargent D. Enhanced precision pointing jitter suppression system[C]//Proceedings of the SPIE 4632, Laser and Beam Control Technologies. 2002: 38-49.
- [15] Walter R E, Danny H, Donaldson J. Stabilized inertial measurement system (SIMS)[C]//Proceedings of the SPIE 4724, Laser Weapons Technology III. 2002: 57-68.
- [16] ATA(Applied Technology Associate). Optical inertial reference unit[EB/OL]. (2019-01-01)[2021-10-14]. <https://bluehalo.com/product/optical-inertial-reference-unit-oiru/>.
- [17] Yue Ronggang, Wang Humei, Jin Ting, et al. Image motion measurement and image restoration system based on an inertial reference laser[J]. *Sensors*, 2021, 21: 3309.