

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

惯性稳定万向架中基于SBG惯导的捷联控制技术

王玉, 边启慧, 廖军, 徐田荣, 唐涛

引用本文:

王玉, 边启慧, 廖军, 等. 惯性稳定万向架中基于SBG惯导的捷联控制技术[J]. *光电工程*, 2023, **50**(5): 220238.

Wang Y, Bian Q H, Liao J, et al. Strapdown inertial stabilization technology based on SBG inertial navigation in inertial stabilization gimbal[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(5): 220238.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.220238>

收稿日期: 2022-09-28; 修改日期: 2023-01-05; 录用日期: 2023-01-06

相关论文

用于检测激光棒的变倾角马赫-曾德尔干涉仪

孔璐, 陈磊, 丁煜, 吴志飞, 郑东晖, 朱文华

光电工程 2020, **47**(2): 190254 doi: [10.12086/oe.2020.190254](https://doi.org/10.12086/oe.2020.190254)

量子光通信中位置修正单检测控制方法

李志俊, 毛耀, 亓波, 周翕, 刘琼, 周倩

光电工程 2022, **49**(3): 210311 doi: [10.12086/oe.2022.210311](https://doi.org/10.12086/oe.2022.210311)

光电跟踪系统中精密控制技术研究进展

唐涛, 马佳光, 陈洪斌, 付承毓, 杨虎, 任戈, 杨文淑, 亓波, 曹雷, 张孟伟, 包启亮, 谭毅, 黄永梅, 毛耀, 王强

光电工程 2020, **47**(10): 200315 doi: [10.12086/oe.2020.200315](https://doi.org/10.12086/oe.2020.200315)

A review on control methodologies of disturbance rejections in optical telescope

Tao Tang, Shuaixu Niu, Jiaguang Ma, Bo Qi, Ge Ren, Yongmei Huang

Opto-Electronic Advances 2019, **2**(10): 190011 doi: [10.29026/oea.2019.190011](https://doi.org/10.29026/oea.2019.190011)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



OE_Journal



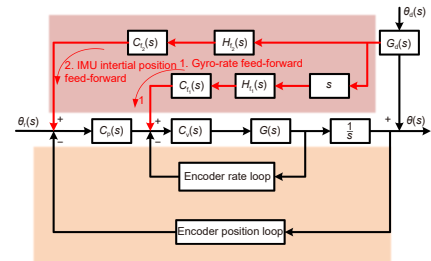
Website

DOI: 10.12086/oe.2023.220238

惯性稳定万向架中基于 SBG 惯导的捷联控制技术

王 玉^{1,2,3}, 边启慧^{1,2,3}, 廖 军⁴, 徐田荣^{1,2,3}, 唐 涛^{1,2,3*}¹中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209;²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;³中国科学院大学, 北京 100049;⁴航天系统部装备部军事代表局驻成都地区军事代表室, 四川 成都 610000

摘要: 轻小型 SBG 惯性导航系统具有体积小重量轻的特点, 可以用于光电跟踪系统的直接及捷联位置稳定。本文研究了万向架中基于轻小型 SBG 惯导的五种惯性稳定控制方法, 并进行了理论分析及实验验证。经典位置捷联稳定技术由于位置带宽的限制扰动抑制能力有限, 难以满足高精度稳定要求。本文提出了一种基于 SBG 的位置速度双扰动前馈的稳定方法, 并通过引入高通滤波器实现扰动前馈的解耦, 可以进一步提升系统扰动抑制带宽以及稳定能力。理论分析和实验结果表明: 在不考虑应用条件的限制时, 虽然受到带宽的限制, 基于 SBG 的陀螺直接稳定控制方法扰动抑制效果较好; 而在平台体积重量受到限制的情况下, 所提出的基于 SBG 的双扰动捷联稳定可以进一步提升系统扰动抑制能力, 获得更好的稳定精度。

关键词: 捷联惯性稳定; 扰动抑制; 惯性导航系统; 惯性稳定万向架**中图分类号:** TH824.3; TP273**文献标志码:** A

王玉, 边启慧, 廖军, 等. 惯性稳定万向架中基于 SBG 惯导的捷联控制技术 [J]. 光电工程, 2023, 50(5): 220238

Wang Y, Bian Q H, Liao J, et al. Strapdown inertial stabilization technology based on SBG inertial navigation in inertial stabilization gimbal[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(5): 220238

Strapdown inertial stabilization technology based on SBG inertial navigation in inertial stabilization gimbal

Wang Yu^{1,2,3}, Bian Qihui^{1,2,3}, Liao Jun⁴, Xu Tianrong^{1,2,3}, Tang Tao^{1,2,3*}¹Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;⁴The Military Representative Office of the Military Representative Bureau of the Equipment Department of the Aerospace System Department in Chengdu, Chengdu, Sichuan 610000, China

Abstract: The lightweight SBG inertial navigation system has the characteristics of being small and light, which can be used for the direct and strapdown stabilization of the electro-optical tracking system. In this paper, five inertial

收稿日期: 2022-09-28; 修回日期: 2023-01-05; 录用日期: 2023-01-06

基金项目: 四川省科技支撑计划项目 (2021JDJQ0028)

*通信作者: 唐涛, tangtao24@163.com。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

stabilization control methods based on the lightweight SBG navigation system in gimbals are studied, and theoretical analysis and experimental validation are performed. The classical position strapdown stabilization technique has limited disturbance suppression capability due to the limitation of position bandwidth, which makes it difficult to meet the requirement of high-precision stabilization. A SBG-based position-rate dual strapdown feedforward stabilization method is proposed, and the decoupling of the strapdown feedforward is achieved by introducing a high-pass filter, which can further improve the perturbation rejection bandwidth as well as the stabilization capability of the system. Theoretical analysis and experimental results show that the SBG-based gyro direct stabilization control method is better at disturbance suppression when the application conditions are not considered, although it is limited by the bandwidth. Under the limitations of platform volume and weight, the proposed SBG-based dual disturbance strapdown stabilization can further improve the system's disturbance rejection capability and obtain better stabilization accuracy.

Keywords: strapdown inertial stabilization; disturbance suppression; inertial navigation; inertial stabilization gimbal

1 引言

运动平台上光电跟踪系统如何隔离干扰, 保持视轴稳定, 对实现高精度跟踪以及指向有着重要意义^[1-4]。惯性稳定万向架主要用于对光电跟踪系统进行稳定控制和跟踪目标, 其稳定和跟踪的性能直接影响到光电跟踪系统的性能。惯性传感器作为惯性稳定万向架的核心部件, 其性能对系统稳定精度起着关键作用, 传感器制造技术的不断进步也推动着惯性技术的发展^[5-7]。惯性稳定万向架系统常用的惯性传感器有陀螺仪、加速度计、惯性导航系统等, 都可以测量惯性空间的绝对量。根据惯性传感器的安装位置, 万向架系统的稳定方式主要可以分为两类。其一是直接稳定方法: 惯性传感器直接安装在平台上测量惯性信息并反馈到系统, 控制平台保持相对惯性空间的整体稳定, 其优点在于高带宽的惯性内环对参数敏感性低、鲁棒性强, 在传感器参数相同的条件下, 系统稳定精度较高。但其缺点也很明显: 线性控制系统的闭环能力与系统带宽成正比, 而闭环带宽又受到平台谐振频率、传感器带宽等限制难以提升, 系统扰动隔离能力有限。更为重要的是, 直接稳定采用的陀螺等惯性传感器通常需要较大的空间, 在一些结构紧凑、空间有限的平台上难以实现。另一种是捷联惯性稳定方法: 陀螺等惯性传感器安装在万向架系统的基座上测量扰动, 结合电机上的编码器实现带反向补偿的捷联稳定控制, 可以减小平台体积重量。捷联的本质就是前馈控制, 可以在不改变系统特性的前提下无静差地消除扰动, 突破闭环带宽的限制, 提升系统扰动抑制能力, 在各种工业控制中应用广泛^[8-10]。文献 [9,11-12] 将加速度前馈

与反馈结合起来提升系统对高频扰动的抑制能力, 文献 [13] 设计了一种兼具前馈控制和扰动观测器的综合控制方法来减少不平衡扰动, 提高惯性稳定平台的稳定精度。文献 [14] 在陀螺速率回路中加入加速度回路实现与陀螺速率前馈的结合。文献 [15-16] 中通过仿真实验对比了基于陀螺的直接稳定和间接稳定的优缺点, 得出了直接稳定方法具有更高的稳定性能的结论。以上文献研究的基础均建立在陀螺仪、加速度计等惯性传感器捷联安装的结构之上, 通过解算实现系统捷联稳定, 但是无法克服位姿漂移, 目标跟踪仍需结合位姿传感器进一步实现。SBG 公司生产的捷联惯性导航系统集成陀螺、加速度计和磁力计构成的惯性测量单元和相应的数据处理单元于一体, 能够连续地提供载体的位置、角速度和姿态角等参数, 具有体积小、重量轻的优点, 可以直接安装在平台上。基于惯性导航系统的直接及捷联稳定可实现平台相对惯性空间位姿稳定, 文献 [17] 通过捷联惯导结合激光测距仪等实现了无图像的目标跟踪。文献 [2,15-16,18] 中给出了直接稳定与捷联稳定的优缺点, 但都是基于陀螺速率稳定的对比, 缺少基于惯性导航系统的位置稳定对比分析, 且并未具体给出这两种方法在不同频率扰动下的性能及各自适用场景。

本文从惯性位置稳定的角度给出了万向架系统中基于 SBG 惯性导航系统的惯性稳定技术的理论分析和相关实验验证, 对比了五种不同控制结构的性能及其优缺点。在不考虑平台体积重量等限制条件的情况下, 直接稳定的稳定精度更高; 在平台体积重量受到一定限制的情况下, 捷联稳定技术可以较好地消除一部分扰动且可以突破系统闭环带宽的限制, 然而扰动

前馈传感器无法测量平台内部摩擦、形变等变化, 且额外增加的传感器会引入测量噪声, 降低系统性能, 处理起来也较为复杂。因此, 本文提出了一种基于 SBG 的位置速度双扰动前馈的稳定方法, 并通过引入高通滤波器实现扰动前馈的解耦, 进一步提升系统扰动抑制带宽以及稳定能力。

本文安排如下: 第二节介绍基于 SBG 惯导的直接稳定性分析; 第三节介绍捷联惯性稳定及前馈控制器设计; 第四节介绍实验平台及实验结果; 第五节总结了理论分析以及实验结果。

2 基于 SBG 的直接惯性稳定

2.1 系统模型分析

图 1 所示的惯性稳定平台包括一个一维扰动转台和一个两轴惯性稳定万向架, 惯性稳定万向架一般采用直流力矩电机作为驱动器。设基座扰动角速率为 ω_d , 稳定平台角速度为 ω_L 。设电机反电势比例系数为 K_b , 电机电力矩系数为 C_m , 电机与负载间摩擦系数为 f_m , 负载转动惯量为 J 。施加于力矩电机上的电压为 V , 电机电枢电阻为 R , 电感为 L 。

根据电机的电压平衡和力矩平衡:

$$V = iR + iL + K_b(\omega_L - \omega_d), \quad (1)$$

$$iC_m = J\dot{\omega}_L + f_m(\omega_L - \omega_d). \quad (2)$$

对式 (1)、式 (2) 进行拉氏变换可以得到系统稳定角速度与扰动角速度和控制电压的传递函数:

$$\omega_L(s) = \frac{C_m}{(Js + f_m)(R + Ls) + C_m K_b} V(s) + \frac{f_m(Ls + R) + C_m K_b}{(Js + f_m)(R + Ls) + C_m K_b} \omega_d(s), \quad (3)$$

则

$$G_m(s) = \frac{C_m}{(Js + f_m)(R + Ls) + C_m K_b} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\varepsilon\omega_n s + \omega_n^2}. \quad (4)$$

式 (4) 为不考虑机械谐振时惯性稳定平台传递函数, 可以看作一个二阶惯性环节:

$$G_d(s) = \frac{f_m(Ls + R) + C_m K_b}{(Js + f_m)(R + Ls) + C_m K_b}. \quad (5)$$

式 (5) 是基座扰动角速度到稳定平台角速度的传递函数, 平台扰动传递特性具有低通特性。

2.2 基于 SBG 的直接稳定分析

直接稳定即反馈闭环控制是工程应用中经典的控制方法, 通常将陀螺、加速度计和光栅尺等传感器直接安装在平台上构成反馈闭环, 保持平台在惯性空间中的稳定。本课题选取了轻小型 SBG 惯导用于惯性稳定万向架的直接及捷联稳定, 基于 SBG 惯导的直接稳定可以实现平台的惯性姿态控制, 无需解算, 可以有效减少测量及解算误差。

2.2.1 基于 SBG 位置直接稳定

图 2 为基于 SBG 位置直接稳定框图, $G_d(s)$ 为平台负载传递函数, $\theta_r(s)$ 给定输入角度, $\theta_d(s)$ 载体扰动角, $\theta(s)$ 平台输出角, $C_p(s)$ 为位置环控制器, $C_v(s)$ 是速率环控制器, 此处把电机及负载平台看作一个刚体, 省略了电机与负载之间机械谐振形成的振荡环节。控制器均设计为 PI 控制器, 其中 $G_d(s)$ 为平台扰动传递特性呈现低通特性。速度环为编码器测速构成的非惯性回路, 因此对扰动不具有抑制能力, 分析可得系统扰动抑制传递函数:

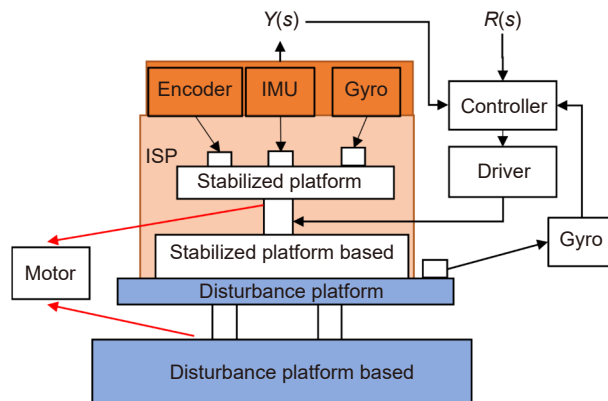


图 1 惯性稳定万向架组成结构示意图

Fig. 1 Inertial stabilization gimbal schematic

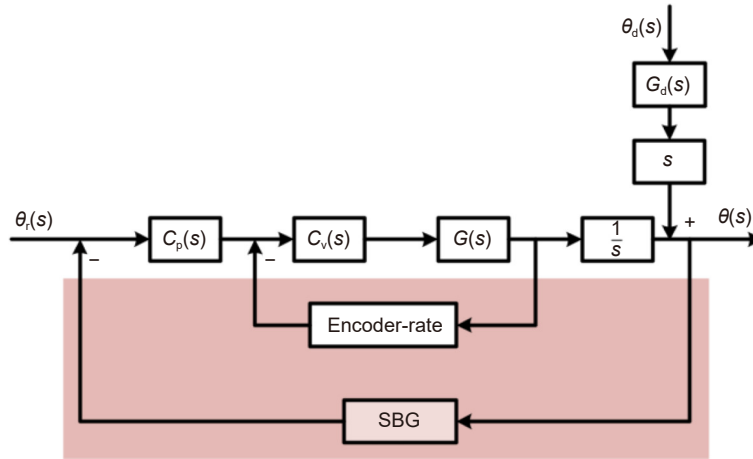


图 2 基于 SBG 位置直接稳定框图

Fig. 2 Direct position stabilization block diagram based on SBG

$$\begin{aligned} \frac{\theta(s)}{\theta_d(s)} &= \frac{1 + C_v G}{1 + C_v G + \frac{1}{s} C_p C_v G} \cdot G_d \\ &= \frac{1}{1 + \frac{\frac{1}{s} C_p C_v G}{1 + C_v G}} \cdot G_d \\ &= \frac{1}{1 + \frac{1}{s} C_p} \cdot G_d. \end{aligned} \quad (6)$$

系统扰动抑制传递函数为位置反馈扰动抑制比函数与平台扰动传递特性二者乘积。控制系统的主动抑制能力呈现高通特性，对抑制带宽内的扰动具有衰减能力，对抑制带宽外的扰动没有抑制作用，甚至有可能放大扰动。

2.2.2 基于 SBG 反馈的速率反馈稳定

陀螺主要对相对于惯性空间的速率进行检测，目前惯性稳定控制系统中多采用基于陀螺的速率闭环，如图 3 所示。与图 2 的不同之处在于惯性速率回路能够敏感到万向架内部的扰动，基于 SBG 反馈的速率反馈稳定扰动抑制能力如式 (7)：

$$\begin{aligned} \frac{\theta(s)}{\theta_d(s)} &= \frac{G_d}{1 + C_v G + C_p C_v G \frac{1}{s}} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{C_v G}{1 + C_v G} C_p \frac{1}{s}} \cdot \frac{1}{1 + C_v G} G_d. \end{aligned} \quad (7)$$

比较式 (6) 与式 (7)，速率以及位置双惯性稳定系统扰动抑制能力有所提高。但是速度带宽同样受平台

机械谐振、传感器带宽等因素制约难以提升，因此闭环控制系统的扰动抑制能力有限。同时在一定情况下受限于平台的空间及速率传感器的体积重量，直接稳定难以实现。

2.2.3 基于 SBG 的速率扰动前馈稳定

上述分析可知，基于 SBG 反馈的速率反馈稳定对扰动有更强的抑制能力，但是这种方法对传感器的体积重量要求较高，因此可以将陀螺前馈引入非惯性速率回路，实现惯性前馈与惯性反馈的结合，在有限的条件下实现更高的稳定精度。如图 4 所示，将光栅尺测速构成速度环，惯导作为位置环，陀螺作为前馈支路的测量元件。

通过控制框图，可以得到系统的扰动传递函数：

$$\begin{aligned} \frac{\theta}{\theta_d} &= \frac{1 + C_v G + C_f H_f C_v G}{1 + C_v G + C_p C_v G \frac{1}{s}} G_d(s) \\ &= \frac{1 + \frac{C_f H_f C_v G}{1 + C_v G}}{C_p C_v G \frac{1}{s} + 1 + C_v G} G_d(s). \end{aligned} \quad (8)$$

速度扰动前馈控制器设计应满足如下条件：

$$1 + C_f H_f \cdot \frac{C_v G}{1 + C_v G} = 0. \quad (9)$$

从式 (9) 可知，速度前馈控制器设计受到传感器特性及系统速度闭环带宽的限制，对比式 (6)、式 (8) 可知，速度扰动前馈可以提高系统扰动抑制能力，但是同样对惯性姿态传感器体积重量要求较高。

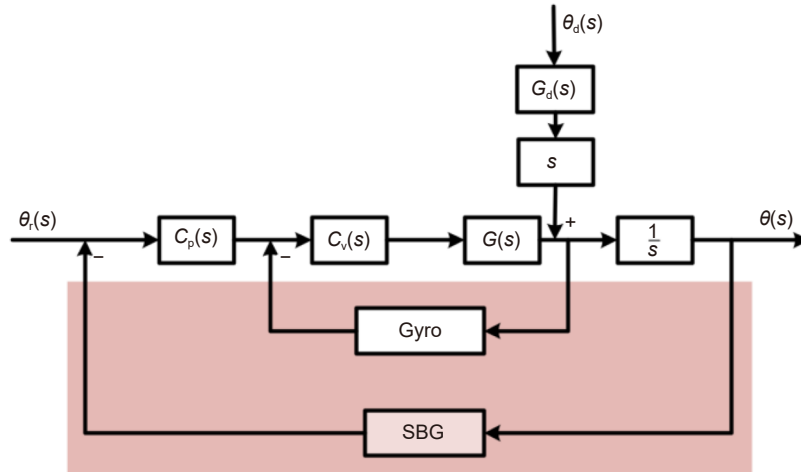


图 3 基于 SBG 反馈的速率反馈稳定

Fig. 3 The rate feedback based on SBG feedback

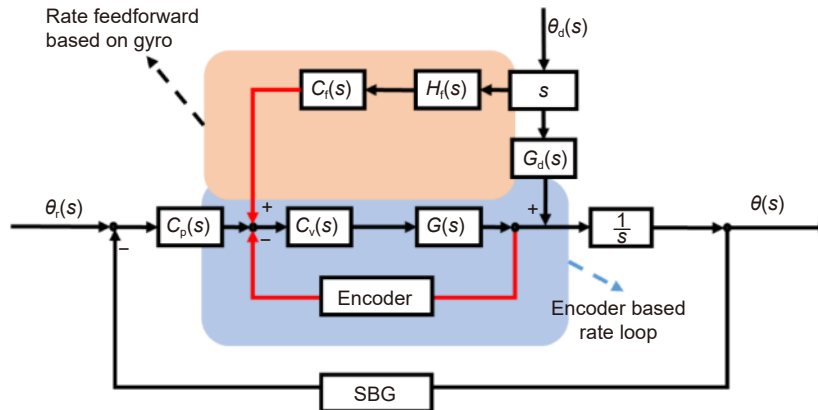


图 4 基于陀螺的角速率前馈框图

Fig. 4 Angular rate feedforward block diagram based on gyro

3 捷联惯性稳定技术

捷联惯性稳定可以减少平台的尺寸和重量，一般情况下可使用的传感器指标更高，理论上可以满足系统对稳定的需求，但是在传感器参数相同的条件下稳定精度较差。本章节对比了两种基于 SBG 的捷联稳定控制结构稳定视轴：第一种控制结构利用编码器及编码器差分测速构成速度位置双闭环，前馈支路采用惯性姿态传感器 SBG 提供位姿信号，引入编码器位置环节点，实时修正零点；第二种控制结构在第一种控制结构的基础上，利用陀螺测量扰动前馈到编码器速度回路节点，实现双扰动前馈。

3.1 基于 SBG 位置捷联稳定

图 5 为基于 SBG 位置捷联稳定框图，SBG 位置

捷联可以修正光栅闭环零点，实现平台相对惯性空间稳定，可得系统扰动传递函数：

$$\frac{\theta(s)}{\theta_d(s)} = \frac{1 + C_p C_v G \frac{1}{s} + C_v G + C_f H_f C_p C_v G \frac{1}{s}}{1 + C_v G + \frac{1}{s} C_p C_v G} \cdot G_d$$

$$= \left(1 + \frac{C_f H_f C_p C_v G \frac{1}{s}}{1 + C_v G + \frac{1}{s} C_p C_v G} \right) \cdot G_d \quad (10)$$

要想完全抵消扰动，需要满足：

$$C_f H_f \cdot \left(\frac{C_p C_v G \frac{1}{s}}{1 + C_v G + \frac{1}{s} C_p C_v G} \right) + 1 = 0 \quad (11)$$

如式 (11) 所示，位置捷联的扰动前馈控制器设计

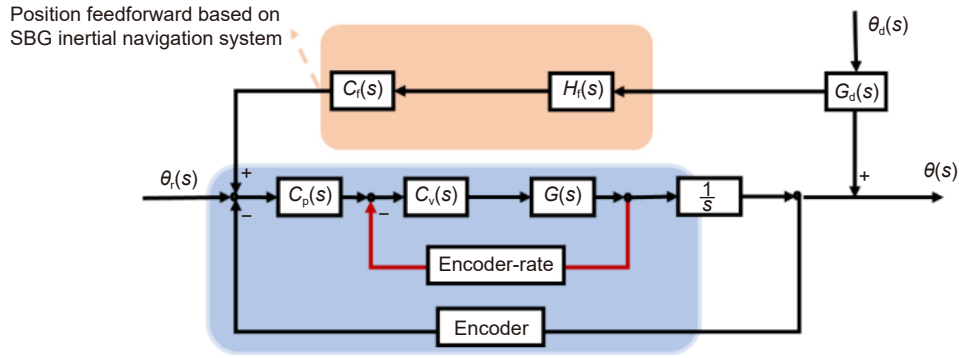


图 5 基于 SBG 位置捷联稳定框图

Fig. 5 Strapdown stabilization block diagram based on SBG position

受到传感器特性及系统位置闭环带宽的限制, 扰动抑制能力有限。

3.2 基于 SBG 的双扰动捷联稳定

为了进一步提升系统扰动抑制能力, 本文提出一种基于 SBG 的双扰动捷联稳定。图 6 展示了本文所提出的控制结构, 利用 SBG 惯导和陀螺分别测量基座姿态角和角速率前馈到位置与速率回路补偿。

根据系统控制框图可以得到此时系统的扰动传递函数:

$$\frac{\theta}{\theta_d} = \frac{1 + C_p C_v G \frac{1}{s} + C_v G + C_{f1} H_{f1} C_v G + C_{f2} H_{f2} C_p C_v G \frac{1}{s}}{1 + C_v G + C_p C_v G \frac{1}{s}}$$

$$= 1 + \frac{C_{f1} H_{f1} C_v G + C_{f2} H_{f2} C_p C_v G \frac{1}{s}}{1 + C_v G + C_p C_v G \frac{1}{s}} \quad (12)$$

前馈抵消扰动应满足如下条件:

$$1 + \frac{C_{f1} H_{f1} C_v G + C_{f2} H_{f2} C_p C_v G \frac{1}{s}}{1 + C_v G + C_p C_v G \frac{1}{s}} = 0,$$

$$1 + C_{f1} H_{f1} \cdot \frac{C_v G}{1 + C_v G + C_p C_v G \frac{1}{s}}$$

$$+ C_{f2} H_{f2} \cdot \frac{C_p C_v G \frac{1}{s}}{1 + C_v G + C_p C_v G \frac{1}{s}} = 0. \quad (13)$$

根据式 (13) 可推知, 双扰动前馈会产生耦合作用, 位置前馈可以补偿带宽内的低频扰动, 但是与速度前馈同时补偿会造成耦合从而放大误差。因此可以在速度前馈控制器前串联一个高通滤波器滤除低频分量, 速度前馈抑制中高频扰动, 位置前馈补偿低频扰动, 实现速度位置双前馈扰动抑制能力叠加。

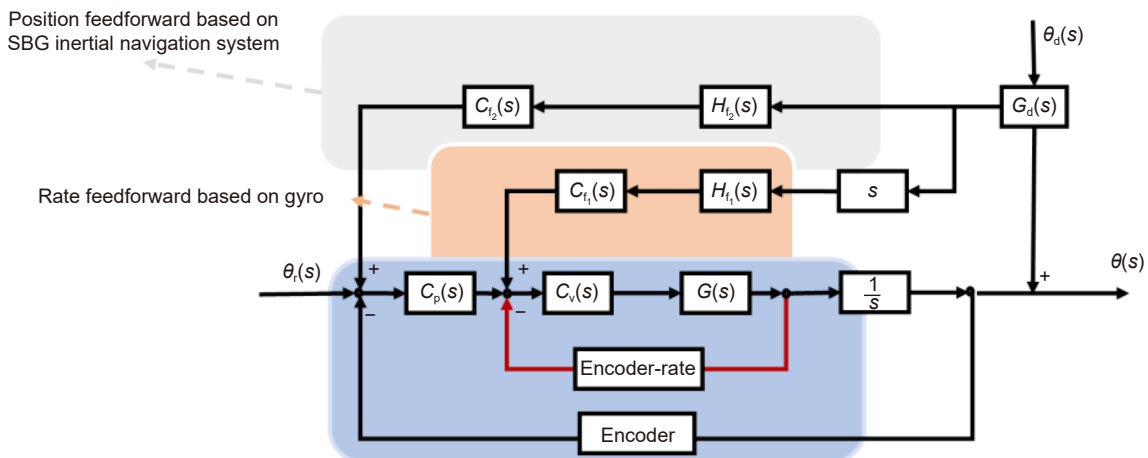


图 6 基于 SBG 双扰动捷联控制框图

Fig. 6 Dual disturbance strapdown control block diagram based on SBG

4 实验验证

图 7 是本课题搭建的实验平台, 主要包括两部分: 扰动平台和万向架平台。扰动平台提供不同频率的扰动作用于万向架系统, 模拟真实环境扰动。万向架上安装有光栅尺、陀螺和惯导等传感器。光栅尺的采样频率为 1 kHz; SBG 惯性导航系统采样频率为 200 Hz, 测量精度为 0.1°; 陀螺采样频率为 2 kHz; 系统中断频率为 1 kHz。实验中采用上述实验平台, 扰动平台提供幅值为 10, 频率不同的正弦信号, 即 $\theta_d = 10 \sin(2\pi ft)$; 惯性稳定万向架工作在稳定状态, 即 $\theta_e = 0$; 在搭建的万向架系统中, 分别验证五种控制方法的性能。

4.1 直接稳定对比

扰动平台分别提供频率为 1 Hz、3 Hz、5 Hz、10 Hz 的正弦扰动信号, 分别测得三种直接稳定方法的稳定误差如图 8 所示, 相对应的均方根误差对比如表 1。

如图 8 及表 1 所示, 在不考虑传感器体积重量的前提下, 基于 SBG 反馈的直接稳定精度相对较差, 扰动抑制效果并不理想; 基于 SBG 的速率扰动前馈稳定可以提高系统稳定精度; 基于 SBG 反馈的速率反馈稳定精度最高, 扰动抑制效果更好, 但是在平台体积重量有限的情况下无法实现。

扰动平台提供扰动, 惯性稳定万向架实现稳定控制的情况下, 采用动态信号分析仪进行扰动抑制频率

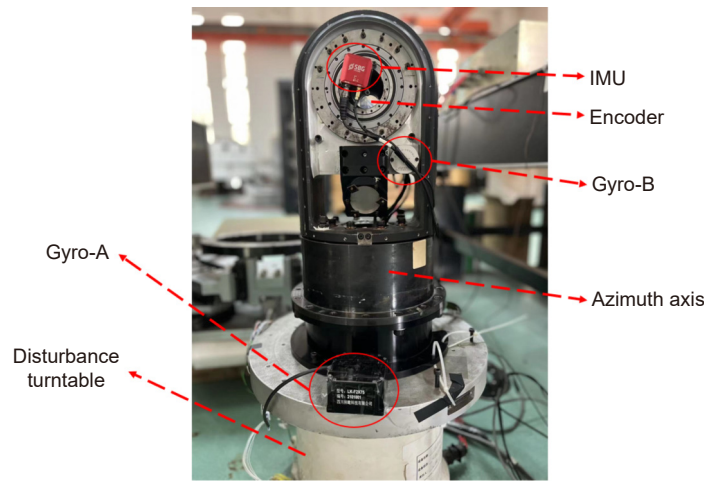


图 7 惯性稳定万向架实验平台示意图

Fig. 7 Inertial stabilization gimbal experimental platform diagram

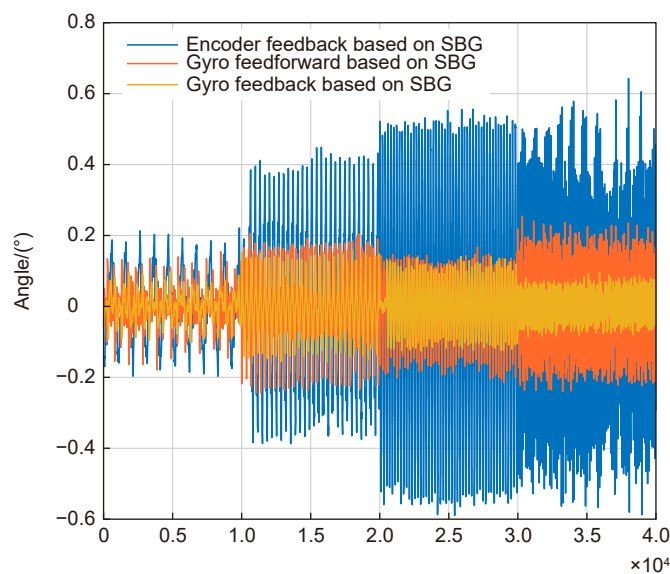


图 8 不同频率扰动下三种直接稳定方法的系统误差

Fig. 8 Stabilization errors under different disturbance frequencies

表 1 三种直接稳定方法的均方根误差对比
Table 1 RMS errors of three direct stabilization methods

扰动频率/Hz	1	3	5	10
SBG直接反馈	0.0932	0.2490	0.3708	0.2616
基于SBG的速率反馈	0.0378	0.0816	0.0760	0.0461
基于SBG的陀螺前馈	0.0555	0.1087	0.1048	0.1294

特性扫频测试, 得到上述三种控制方法系统扰动抑制能力如图 9 所示。

三种控制方法的扰动抑制频率响应曲线与实验结果基本相符。相较于 SBG 直接稳定, 基于 SBG 的速率扰动前馈具有更高的扰动抑制带宽, 基于 SBG 的速率反馈扰动抑制能力更强, 但是上述三种基于 SBG 惯导的直接稳定方法都对惯性姿态传感器体积、重量有一定要求。

4.2 SBG 位置前馈与 SBG 位置反馈

基于 SBG 的经典捷联稳定更易于实现, 首先我们对比较了基于 SBG 的直接稳定与捷联稳定的性能, 扰动平台分别提供频率为 1 Hz、3 Hz、5 Hz、10 Hz 的正弦扰动信号, 分别记录得到系统误差曲线如图 10 所示。

从图 10 可知, SBG 位置前馈会放大误差, 仅采用 SBG 捷联稳定会降低系统稳定精度。

4.3 基于 SBG 双扰动捷联稳定

为了弥补 SBG 捷联稳定的不足, 本课题提出了 SBG 和陀螺双前馈的控制结构。

图 11 展示了不同频率扰动下 SBG 捷联稳定与双扰动捷联稳定的实验结果, 可以看到, 在低频扰动 1 Hz, 两种控制结构稳定误差相差不大; 在 3 Hz~10 Hz, 双扰动前馈捷联稳定控制的稳定误差更小, 系统精度更高。

表 2 给出了两种捷联稳定方法的均方根误差, 同样验证了双前馈控制系统的扰动抑制性能。

图 12 为两种捷联稳定方法对应的扰动抑制频率响应曲线, 与实验结果基本相符。相较于 SBG 捷联稳定, 基于 SBG 的双扰动前馈具有更高的扰动抑制带宽, 但是位置与速度前馈同时补偿会造成耦合, 降低系统低频扰动抑制能力。本文通过在速度前馈控制器前串联一个高通滤波器滤除低频分量, 实现了速度位置双前馈扰动抑制能力叠加。

4.4 五种稳定控制方法总结

最后, 对上述五种控制方法进行对比总结如表 3 所示。

从表 3 可以看出, 基于 SBG 的经典捷联稳定更易于实现, 但是其扰动抑制带宽不足且无法测量到万

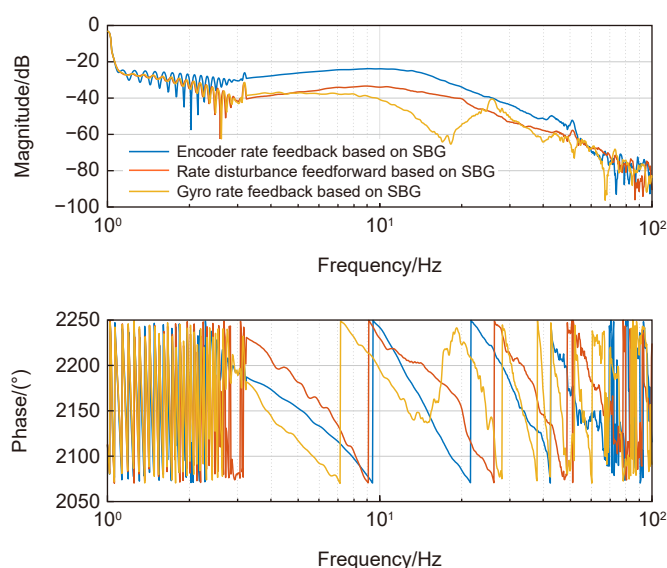


图 9 系统扰动抑制频率响应曲线

Fig. 9 Disturbance suppression frequency response curves

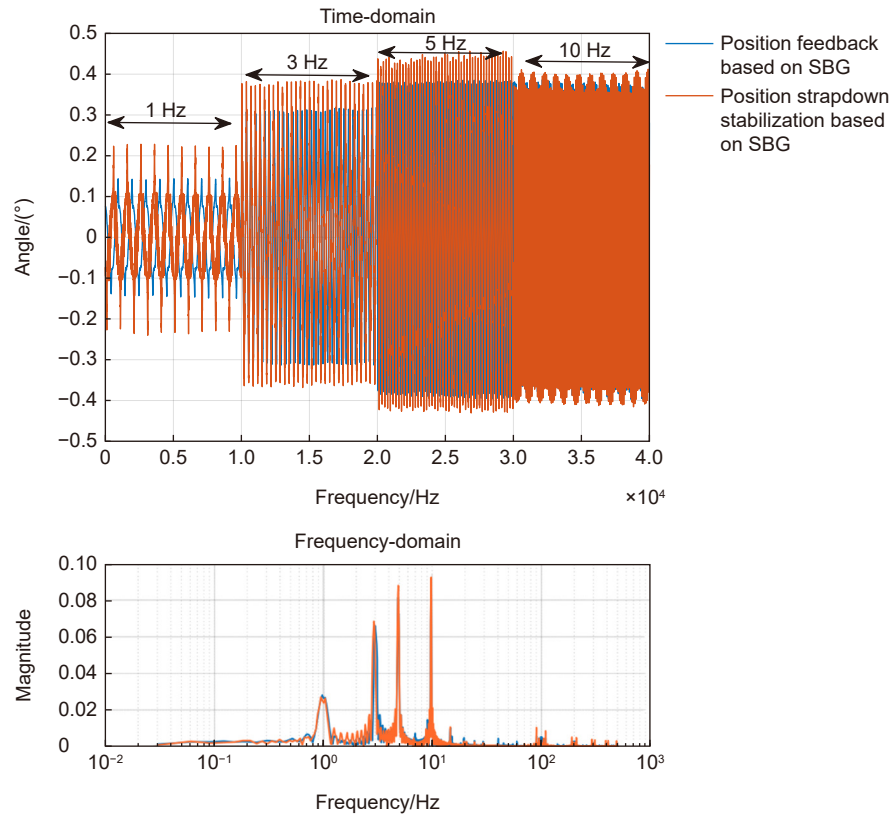


图 10 不同频率扰动下系统稳定误差及其傅里叶变换

Fig. 10 Stabilization errors and Fourier transform under under different frequency disturbance

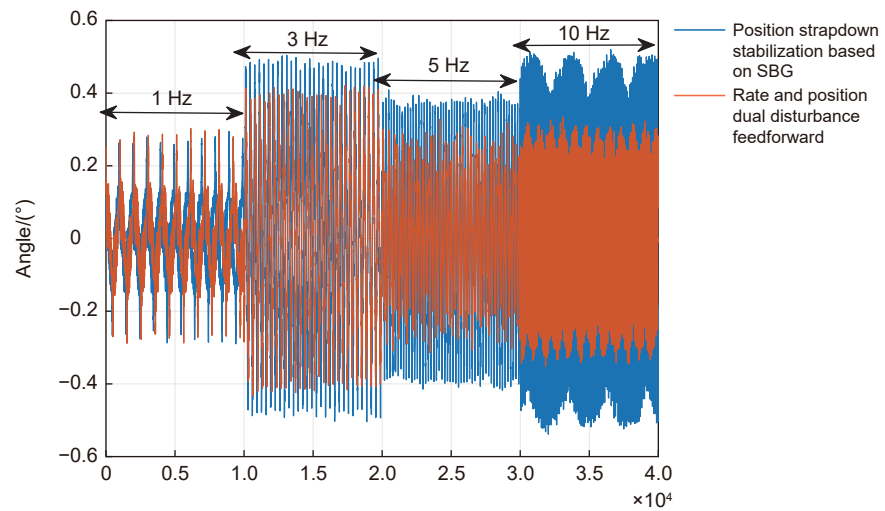


图 11 不同频率下系统稳定误差

Fig. 11 System errors at different disturbance frequencies

表 2 两种捷联稳定方法的均方根误差对比

Table 2 RMS errors of three direct stabilization methods

扰动频率/Hz	1	3	5	10
SBG捷联稳定	0.1074	0.2542	0.2335	0.3094
基于SBG双扰动捷联稳定	0.1024	0.2162	0.1758	0.1661

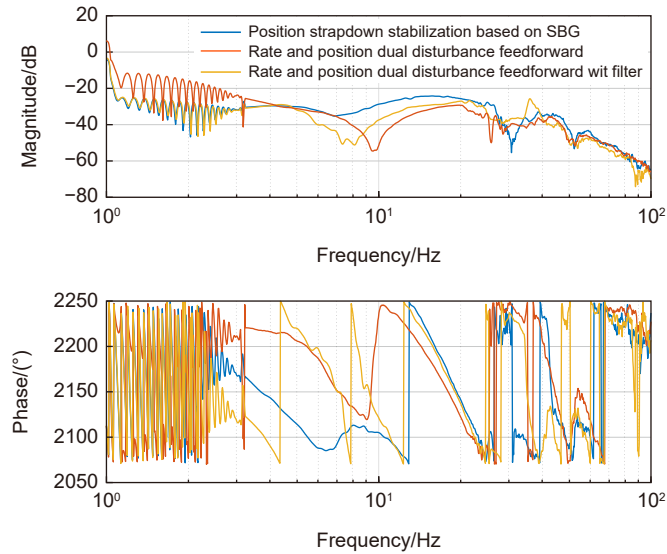


图 12 系统扰动抑制频率响应曲线

Fig. 12 Disturbance suppression frequency response curves

表 3 五种控制方法总结

Table 3 Summary of 5 control methods

方法	扰动抑制能力	3 Hz	5 Hz	优缺点	适用场景
1	SBG直接稳定	-30 dB	-26 dB	1)扰动抑制能力低, 稳定精度差; 2)无需解算, 可实现直接稳定	对惯性姿态传感器体积、重量有要求
2	基于SBG反馈的速率反馈稳定	-42 dB	-36 dB	1)扰动抑制能力较高, 并且低频性能高; 2)陀螺安装在万向架; 3)可测量所有传递到万向架的扰动	1)同方法1; 2)对陀螺体积、重量有要求
3	基于SBG反馈的速率前馈稳定	-42 dB	-36 dB	1)扰动抑制能力较高; 2)利用平台速率信息, 但无法测量万向架内部扰动	1)同方法1; 2)平台需要提供速率信息
4	基于SBG的位置捷联稳定	-32 dB	-30 dB	1)扰动抑制带宽低, 稳定精度较差; 2)无法测量万向架的扰动	经典捷联稳定
5	基于SBG双扰动捷联稳定	-34 dB	-32 dB	1)扰动抑制带宽高, 稳定精度高; 2)需要扰动解耦; 3)无法测量万向架的扰动	经典捷联稳定以及速率前馈

向架的扰动; 基于 SBG 的双扰动捷联稳定可以提升系统扰动抑制带宽, 但是需要进行扰动的解耦, 且同样无法测量万向架内部的扰动。在不考虑传感器及平台体积重量的前提下, 基于 SBG 反馈的速率反馈稳定精度最高, 扰动抑制效果更好, 但是可能受到系统闭环带宽的限制。

5 结论

相比传统的基于光纤陀螺的姿态测量系统, SBG 是一种基于微机械原理的惯性姿态传感器, 由于轻小型、低功耗等优点, 可以用于光电跟踪系统的直接及捷联稳定。在本文中比较和分析了惯性稳定万

向架中基于 SBG 直接和捷联稳定的五种控制结构的稳定性能, 理论分析和实验验证了五种不同稳定方法的性能及优缺点并得出相应的结论。在不考虑传感器体积重量的前提下, 基于 SBG 反馈的速率反馈稳定精度最高, 扰动抑制效果更好; 基于 SBG 的经典捷联稳定更易于实现, 但是扰动抑制带宽不足且无法测量到万向架的扰动; 本文提出基于 SBG 的双扰动捷联稳定可以通过对扰动的解耦, 实现扰动抑制能力的叠加, 提升系统扰动抑制带宽。

参考文献

[1] Yu Z Y, Yang T, Ruan Y, et al. A rate-difference disturbance observer control for a timing-belt servo system[J]. *IEEE Trans*

- Ind Electron*, 2022, **69**(1): 11458–11467.
- [2] Hurák Z, Rezac M. Image-based pointing and tracking for inertially stabilized airborne camera platform[J]. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 2012, **20**(5): 1146–1159.
- [3] Ruan Y, Xu T R, Liu Y, et al. Error-based observation control of an image-based control loop for disturbance suppression in segmented lightweight large-scaled diffractive telescope (SLLDT)[J]. *Opt Lasers Eng*, 2022, **156**: 107105.
- [4] Tang T, Ma J G, Chen H B, et al. A review on precision control methodologies for optical-electric tracking control system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(10): 200315.
唐涛, 马佳光, 陈洪斌, 等. 光电跟踪系统中精密控制技术的研究进展[J]. *光电工程*, 2020, **47**(10): 200315.
- [5] Li Z J, Mao Y, Qi B, et al. Research on control technology of single detection based on position correction in quantum optical communication[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(3): 210311.
李志俊, 毛耀, 亓波, 等. 量子光通信中位置修正单检测控制方法[J]. *光电工程*, 2022, **49**(3): 210311.
- [6] Hilkert J M. Inertially stabilized platform technology concepts and principles[J]. *IEEE Control Syst Mag*, 2008, **28**(1): 26–46.
- [7] Zhang L Z, Yang T, Wu Y, et al. Image measurement-based two-stage control of Stewart platform[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(8): 220019.
张良总, 杨涛, 吴云, 等. 基于图像测量的Stewart平台双阶控制技术[J]. *光电工程*, 2022, **49**(8): 220019.
- [8] Tian J. Research on multiple sensors control technology of inertial stabilized-platforms[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
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.
- [9] Glück M, Pott J U, Sawodny O. Investigations of an accelerometer-based disturbance feedforward control for vibration suppression in adaptive optics of large telescopes[J]. *Publ Astron Soc Pac*, 2017, **129**(976): 065001.
- [10] El-Sheimy N, Youssef A. Inertial sensors technologies for navigation applications: state of the art and future trends[J]. *Satell Navig*, 2020, **1**(1): 2.
- [11] Xia W Q, He Q N, Duan Q W, et al. Equivalent acceleration feedforward based on sensor optimization and robust prediction[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(11): 210153.
夏文强, 何秋农, 段倩文, 等. 基于传感器优化与鲁棒预测的等效加速度前馈[J]. *光电工程*, 2021, **48**(11): 210153.
- [12] Řezáč M, Hurák Z. Vibration rejection for inertially stabilized double gimbal platform using acceleration feedforward[C]// *2011 IEEE International Conference on Control Applications*, 2011: 363–368. <https://doi.org/10.1109/CCA.2011.6044442>.
- [13] Li M, Li J, Zhang R Q. Unbalance disturbance restraining for inertial stabilized platform[C]// *2016 Chinese Control and Decision Conference*, 2016: 2723–2728. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2016.7531444>.
- [14] Xia Y Z, Bao Q L, Liu Z D. A new disturbance feedforward control method for electro-optical tracking system line-of-sight stabilization on moving platform[J]. *Sensors*, 2018, **18**(12): 4350.
- [15] Kennedy P J, Kennedy R L. Direct versus indirect line of sight (LOS) stabilization[J]. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 2003, **11**(1): 3–15.
- [16] Sisu S, Şuvak Ö. Comparison of direct and indirect stabilization methods for gyro stabilized gimbal systems[C]// *2020 12th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 2020: 251–255.
- [17] Chen Y, Xue Y Y, Zhang X J, et al. Target tracking system based on inertial stabilized platform[J]. *Appl Mech Mater*, 2012, **271–272**: 1669–1674.
- [18] Zubov A V. Stabilization of program motion and kinematic trajectories in dynamic systems in case of systems of direct and indirect control[J]. *Autom Remote Control*, 2007, **68**(3): 386–398.

作者简介



王玉 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向为惯性稳定平台伺服控制。

E-mail: wangyu_1231117@163.com



徐田荣 (1994-), 女, 助理研究员, 研究方向为运动平台快反镜扰动抑制。

E-mail: 1160255376@qq.com



边启慧 (1998-), 女, 博士研究生, 研究方向为惯性稳定平台跟踪与扰动控制。

E-mail: bianqihui20@mails.ucas.ac.cn



【通信作者】唐涛 (1980-), 男, 研究员, 博士, 中科院青年创新促进会。主要研究工作是光电跟踪控制。

E-mail: tangtao24@163.com



廖军 (1989-), 男, 工程师, 研究方向为光电技术。

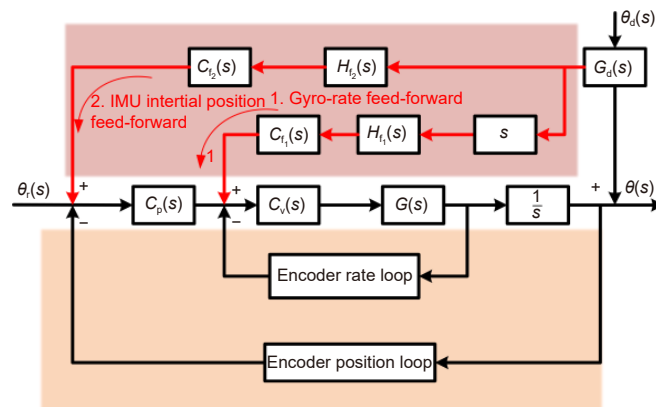
E-mail: liaojun1989@163.com



扫描二维码, 获取PDF全文

Strapdown inertial stabilization technology based on SBG inertial navigation in inertial stabilization gimbal

Wang Yu^{1,2,3}, Bian Qihui^{1,2,3}, Liao Jun⁴, Xu Tianrong^{1,2,3}, Tang Tao^{1,2,3*}



Dual disturbance strapdown control block diagram based on SBG

Overview: Inertial sensors are often used to maintain inertial stabilization and compensate disturbance in moving platform gimbal systems, which are widely used in engineering applications such as vehicles, satellites, ground-based equipment, and other moving platforms. Maintaining the line of sight (LOS) toward a target is challenging when the gimbal systems work in an environment with severe disturbance or when the target is highly dynamic. According to the installation methods of the sensors, the control methods can be divided into two types: direct stabilization and strapdown inertial stabilization. In direct stabilization method, the inertial sensors are directly mounted on the LOS axes to compensate the disturbance, which is simple to achieve but the disturbance suppression capability is limited by the closed-loop bandwidth of the system. However, the closed-loop bandwidth of the system is limited by the resonant frequency of the platform, which is difficult to improve, resulting in limited system disturbance suppression capability. The lightweight SBG inertial navigation system, produced by SBG Systems company, has the characteristics of being small and lightweight, which can be used for the direct and strapdown stabilization of the electro-optical tracking system. In this paper, five inertial stabilization control methods based on lightweight SBG navigation system in gimbals are studied, and theoretical analysis and experimental validation are performed. The classical position strapdown stabilization technique has limited disturbance suppression capability due to the limitation of position bandwidth, which makes it difficult to meet the requirement of high-precision stabilization. A SBG-based position-rate dual strapdown feedforward stabilization method is proposed, and the decoupling of the strapdown feedforward is achieved by introducing a high-pass filter, which can further improve the perturbation rejection bandwidth as well as the stabilization capability of the system. Theoretical analysis and experimental results show that the SBG-based gyro direct stabilization control method is better at disturbance suppression when the application conditions are not considered, although it is limited by the bandwidth. Under the limitations of platform volume and weight, the proposed SBG-based dual disturbance strapdown stabilization can further improve the system's disturbance rejection capability and obtain better stabilization accuracy.

Wang Y, Bian Q H, Liao J, et al. Strapdown inertial stabilization technology based on SBG inertial navigation in inertial stabilization gimbal[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(5): 220238; DOI: 10.12086/oe.2023.220238

Foundation item: Sichuan Province Science and Technology Support Program (2021JDJQ0028)

¹Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; ²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; ³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ⁴The Military Representative Office of the Military Representative Bureau of the Equipment Department of the Aerospace System Department in Chengdu, Chengdu, Sichuan 610000, China

* E-mail: tangtao24@163.com