

引用格式:王雯,王日俊.无人飞行器机载光电平台的双速率环串级控制[J].电光与控制,2018,25(10):72-77. WANG W, WANG R J. Double speed-loop cascade control of airborne electro-optical platform for UAVs[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(10):72-77.

无人飞行器机载光电平台的双速率环串级控制

王雯¹, 王日俊²

(1. 太原工业学院, 太原 030008; 2. 中北大学机械工程学院, 太原 030051)

摘要: 为了提高无人飞行器机载光电平台的稳定控制精度, 针对单速率环控制的抗扰动性能不足, 设计一种基于双速率环的串级控制方法。提出采用以陀螺仪构成内环、以光电编码器微分构成外环的双速率环控制结构, 从其抑制扰动性能、鲁棒性能以及动态响应性能上与单速率环结构进行了理论对比分析, 最后进行了实验验证。结果表明, 该方法具有更好的抗扰动性、鲁棒性以及动态响应性能, 能有效地提高无人飞行器机载光电平台的稳定控制精度。

关键词: 无人飞行器; 机载光电平台; 双速率环; 扰动抑制

中图分类号: V279; TP273 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.10.015

Double Speed-Loop Cascade Control of Airborne Electro-Optical Platform for UAVs

WANG Wen¹, WANG Ri-jun²

(1. Taiyuan Industrial College, Taiyuan 030008, China;

2. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to improve the stability control accuracy of airborne electro-optical platform for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), a kind of cascade stability control method based on double speed-loop was designed in consideration of the low disturbance rejection performance of single speed-loop control. The double speed-loop structure was constructed by using the velocity gyroscope to form the inner loop, and the optoelectronic encoder to form the outer loop. Theoretic analysis and experiments were carried to the single/double-loop structures on their disturbance rejection performance, robustness and dynamic response performance. The results showed that the double speed-loop structure is more robust and has better performance on disturbance rejection and dynamic response. The method can effectively improve the stability control accuracy of the electro-optical platform mounted on UAVs.

Key words: unmanned aerial vehicle; airborne electro-optical platform; double speed-loop; disturbance rejection

0 引言

近年来,无人飞行器在军事及民用领域内应用广泛,搭载于无人飞行器上的机载光电平台系统是其得以应用的关键所在^[1-3]。但是,无人飞行器的姿态运动、气流扰动以及振动会对机载光电平台产生影响,引起机载光电平台的振动,机载设备获取信息的品质会大大降低^[4-6],所以,控制方案上首先必须考虑扰动对系统

的影响,对振动的扰动信号进行有效的抑制。无人飞行器机载光电平台的控制性能直接影响无人机系统的整体性能,因此,如何通过合理的设计方案使平台满足系统稳定控制性能指标的要求,已成为当前工程应用中最关心的问题之一,机载平台的稳定控制至关重要。

陀螺惯性平台系统是机载光电平台常用的一种控制结构,通常,陀螺惯性平台系统采用单速率环与位置环相结合或与电流环相结合的复合稳定控制方案^[7-10]。然而,这种控制结构有很大的局限性,对机载光电平台的内外部扰动抑制效果不佳^[11],很难克服机载光电平台非线性特性对系统的影响。随着对无人飞行器机载光电平台系统的稳定性能要求不断提高,系统稳定控制的性能指标已难以满足。因此,基于串级控制思想

收稿日期:2017-09-20

修回日期:2018-02-28

基金项目:国家自然科学基金(11602231);山西省留学回国人员科技活动项目(2013-68)

作者简介:王雯(1984—),女,山西临汾人,硕士,讲师,研究方向为智能控制理论及应用、故障诊断等。

的双速率环控制结构在稳定平台的应用中得到进一步的研究。文献[12]将基于双速率环的控制结构应用于舰载光电经纬仪的视轴稳定控制,实验表明在高海况下,其在提高抑制内部扰动能力的同时,能够有效隔离载体扰动;文献[13]中,为了获取高分辨率的遥感数据,利用双速率环控制结构提高系统的抑制扰动性能,并将其应用于三轴惯性平台的稳定控制,平台的稳态精度得以提高。

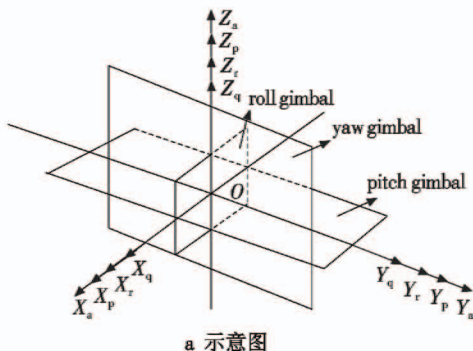
鉴于双速率环控制结构的优点,本文对双速率环控制结构在无人飞行器机载光电平台中的应用进行研究。采用 MEMS 陀螺仪进行数字测速并构成控制系统的内环,外环使用编码器微分结构,在隔离无人飞行器载体扰动的基础上,抑制影响机载光电平台稳定性能的力矩扰动,并通过理论分析、仿真和实验,结合机载光电平台的实际应用对该方法的有效性进行分析和验证。

1 机载光电平台简介

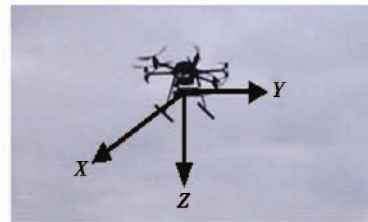
通常,无人飞行器的机载光电平台采用 3 自由度的稳定结构,搭载于无人飞行器底部,通过偏航、俯仰和滚转 3 个自由度的转动来实现对地面目标的监测与跟踪等。机载光电平台的结构如图 1 所示,它由内框架、中框架和外框架构成,分别完成俯仰方向、滚转方向和偏航方向 3 个自由度的运动。各框架坐标系定义如下: $O-X_a Y_a Z_a$ 为机体坐标系; $O-X_p Y_p Z_p$ 为俯仰坐标系; $O-X_q Y_q Z_q$ 为偏航坐标系; $O-X_r Y_r Z_r$ 为滚转坐标系。

外框架(偏航)通过轴 OZ_a 安装于无人飞行器上,内框架(俯仰)通过轴 OY_p 安装于外框架上,中框架(滚转)通过 OX_q 安装于内框架上。机载设备安装在俯仰框上,视轴沿 OX_p 方向。执行器(无刷直流电机)分别安装在轴 OZ_a, OX_q 和 OY_p 上。3 个陀螺仪,3 个加速度计和 3 个光电编码器,均采用直接法分别安装于平台的 3 个框架。

为了提高无人飞行器机载光电平台的稳定控制精度,设计一种基于双速率环的串级控制方法,该控制结构抑制干扰信号的能力更强,可以提高系统的鲁棒性能,被控对象特性、参数变化的影响得到了有效抑制。



a 示意图



b 实物图

图 1 机载光电平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of airborne electro-optical platform

2 双速率环控制结构分析

2.1 基于单速率环的控制结构

基于单速率环的机载光电平台的伺服控制结构及其数学模型如图 2 所示,它通过速率陀螺获取速度信息来构成测速反馈环节。当实际状态与期望状态出现偏差时,稳定控制器将根据这种偏差发出新的控制信号,驱动执行机构,以纠正偏差,抵消干扰的作用,在单速率环闭环控制中,稳定控制器能根据速度反馈信息对扰动产生的偏差信号进行抑制,从而实现机载光电平台的稳定控制。

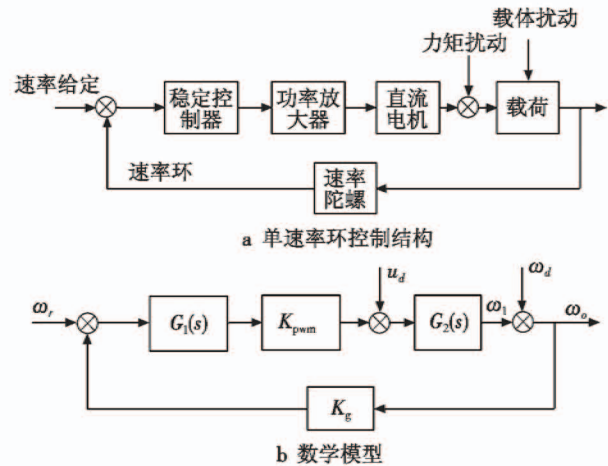


图 2 单速率环控制结构

Fig. 2 Structure diagram of single speed-loop control

图中: $G_1(s)$ 表示稳定控制器; $G_2(s)$ 表示电机及载体的传递函数; ω_r 表示速度的给定值; ω_d 表示干扰速度,它由载体的力矩扰动产生; ω_1 表示电机的实际速度; ω_o 表示载体的速度; u_d 表示系统内部干扰信号。

在上述控制结构中,假设把 u_d, ω_d 和 ω_r 均视为系统的输入,由图 2 可得,在单速率环控制结构中系统输出相对于系统输入 u_d, ω_d 以及 ω_r 的 Laplace 变换为

$$\omega_o = \frac{G_2(s)u_d + K_{pwm}G_1(s)G_2(s)\omega_r + \omega_d}{1 + K_{pwm}K_gG_1(s)G_2(s)} \quad (1)$$

在设计 $G_1(s)$ 时应满足

$$|K_{pwm}K_gG_1(s)G_2(s)| \gg 1 \quad (2)$$

则式(1)可以简化为

$$\omega_o = \frac{u_d}{K_{pwm} K_g G_1(s)} + \frac{\omega_d}{K_{pwm} K_g G_1(s) G_2(s)} + \frac{\omega_r}{K_g} \quad (3)$$

由式(3)可知:首先,内部干扰信号和载体力矩扰动对载荷输出的影响由稳定控制器 $G_1(s)$ 完成,并且多种扰动也互相影响,仅靠 $G_1(s)$ 无法协调控制;其次,抑制干扰速度 ω_d 与传递函数 $G_2(s)$ 也有关系,所以仅采用单速率环控制校正很难获得满意的效果。

2.2 基于双速率环的控制结构

根据上述分析,考虑到串级控制的特点,采用基于双速率环的控制结构,内环通过速率陀螺实现,外环由编码器微分后获取的电机转速信号构成。基于双速率环的机载光电平台的控制结构及其模型如图3所示。图中: $G_1(s)$ 表示速度调节器,速率陀螺内环可以有效地克服内部力矩干扰信号,非线性对系统的影响也能得到抑制;编码器微分外环用于消除外部载体扰动信号,使得机载光电平台的稳定性能得以提高。

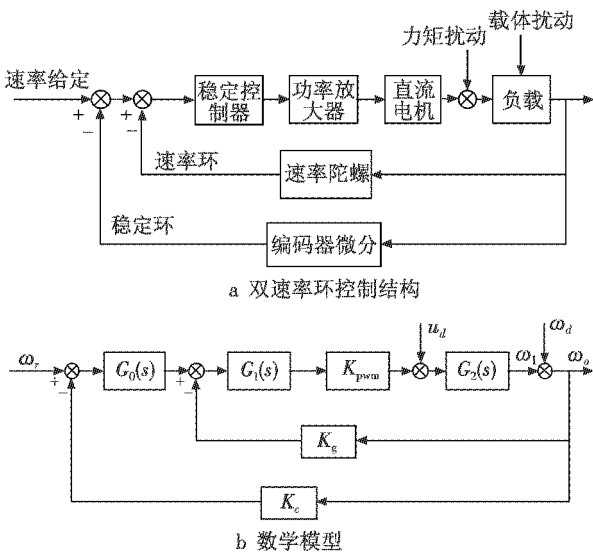


图3 双速率环控制结构

Fig. 3 Structure diagram of double speed-loop control

2.3 双速率环控制特点分析

2.3.1 控制系统的抗干扰性

在如图3所示的控制结构中,假设 u_d , ω_d 和 ω_r 均为系统的输入,依据图3可以得到双速率环控制结构输出对于系统的输入和干扰的传递函数为

$$\omega_o = \frac{G_2(s)u_d + [1 + K_{pwm} K_g G_1(s) G_2(s)]\omega_d + K_{pwm} G_0(s) G_1(s) G_2(s)\omega_r}{1 + K_{pwm} G_1(s) G_2(s) [K_g + K_c G_0(s)]} \quad (4)$$

在设计 $G_1(s)$ 和 $G_0(s)$ 时应满足

$$|K_g K_{pwm} G_1(s) G_2(s)| \gg 1 \quad (5)$$

$$|K_{pwm} G_1(s) G_2(s) [K_g + K_c G_0(s)]| \gg 1 \quad (6)$$

则式(4)可以简化为

$$\omega_o = \frac{u_d}{K_{pwm} G_1(s) [K_g + K_c G_0(s)]} + \frac{K_g \omega_d}{K_g + K_c G_0(s)} + \frac{G_0(s)\omega_r}{K_g + K_c G_0(s)} \quad (7)$$

由式(7)可知,在基于双速率环的控制结构中, $G_1(s)$ 有对外界力矩干扰 u_d 的抑制作用,稳定控制器 $G_0(s)$ 起辅助调节的作用,并且调节器 $G_1(s)$ 不受系统参数变化的影响。

通常,信噪比可用于衡量系统的抗干扰性能,控制系统的信噪比 D 可表示为

$$D = \frac{y/r}{y/d} \quad (8)$$

式中: y 为输出; r 为控制系统的某一个给定值; d 为扰动。如果 y/r 趋近于一个常数,则 y/d 接近于0,增大系统对扰动信号的抑制^[14-15]。

采用单环控制时,对于 u_d 与 ω_d 的信噪比分别为

$$D_{1u} = \frac{\omega_o/\omega_r}{\omega_o/u_d} = K_{pwm} G_1(s) \quad (9)$$

$$D_{1\omega} = \frac{\omega_o/\omega_r}{\omega_o/\omega_d} = K_{pwm} G_1(s) G_2(s) \quad (10)$$

在双速率环控制结构中,对于 u_d 和 ω_d 的信噪比分别为

$$D_{2u} = \frac{\omega_o/\omega_r}{\omega_o/u_d} = K_{pwm} G_0(s) G_1(s) \quad (11)$$

$$D_{2\omega} = \frac{\omega_o/\omega_r}{\omega_o/\omega_d} = \frac{K_{pwm} G_0(s) G_1(s) G_2(s)}{1 + K_{pwm} G_1(s) G_2(s)} \quad (12)$$

在双速率环控制系统结构中,调节器 $G_1(s)$ 的增益值往往较高。对比式(9)和式(11),当系统使用PID控制时, $|D_{2u}| > |D_{1u}|$,使系统的抗干扰性能得到很大改善,控制系统抑制干扰力矩 u_d 的能力增强;而对于外部载体干扰 ω_d ,双速率环控制结构中的内环能有效改善机载光电平台的动态特性,相位裕量增大,相比之下,双速率环控制结构抑制干扰信号的能力更强。

2.3.2 控制系统的鲁棒性

相对于单速率环控制结构,引入的速率内环会使得系统的灵敏度产生变化,进而影响其鲁棒性。下面通过速率内环引入前后系统灵敏度的求解,对比分析单速率环与双速率环控制系统的鲁棒性能。假设通过分析 and 测试得到,速率内环引入前后对象特性传递函数分别是 $Q_m(s)$ 和 $Q'_m(s)$ 。假设由图2和图3得到速率内环引入前后,单速率环结构的开环传递函数分别是 $P_1(s)$ 和 $P'_1(s)$,双速率环结构的开环传递函数分别是 $P_2(s)$ 和 $P'_2(s)$ 。

速率内环引入前,

$$P_1(s) = K_{pwm} G_1(s) Q_m(s) \quad (13)$$

$$P_2(s) = \frac{K_{pwm} G_1(s) G_0(s) Q_m(s)}{1 + K_{pwm} G_1(s) Q_m(s)} \quad (14)$$

速率内环引入后,

$$P'_1(s) = K_{pwm} G_1(s) Q'_m(s) \quad (15)$$

$$P'_2(s) = \frac{K_{pwm} G_1(s) G_0(s) Q'_m(s)}{1 + K_{pwm} G_1(s) Q'_m(s)} \quad (16)$$

由霍洛维茨定义的灵敏度函数为^[16]

$$S_k^e = \frac{d\varphi(s)/\varphi(s)}{dk/k} \quad (17)$$

得到单速率环和双速率环控制结构的灵敏度分别为

$$S_{Q_1}^{P_1} = \frac{\Delta P_1(s)/P_1(s)}{\Delta Q_m(s)/Q_m(s)} = \frac{[P_1(s) - P'_1(s)]/P_1(s)}{[Q_m(s) - Q'_m(s)]/Q_m(s)} = 1 \quad (18)$$

$$S_{Q_2}^{P_2} = \frac{\Delta P_2(s)/P_2(s)}{\Delta Q_m(s)/Q_m(s)} = \frac{[P_2(s) - P'_2(s)]/P_2(s)}{[Q_m(s) - Q'_m(s)]/Q_m(s)} = \frac{1}{1 + K_{pwm} G_1(s) Q'_m(s)} < 1 \quad (19)$$

由式(18)和式(19)可以看出,采用双速率环控制系统时,速率内环的引入提高了系统的鲁棒性能,被控对象特性、参数变化的影响也得到了有效抑制。

2.3.3 动态响应分析

假设直流电机的反电动势系数、电磁时间常数、输出扭矩分别为 T_e, K_e 与 T_m , 则得到控制对象传递函数为

$$G_2(s) = \frac{1/K_e}{(T_e s + 1)(T_m s + 1)} \quad (20)$$

$$G'_2(s) = \frac{G_1(s) G_2(s)}{1 + k_c G_1(s) G_2(s)} \quad (21)$$

令 $k_1 = K_{pwm}/K_e$, 并考虑 K_{pwm} 与 $G_2(s)$, 则式(21)可表示为

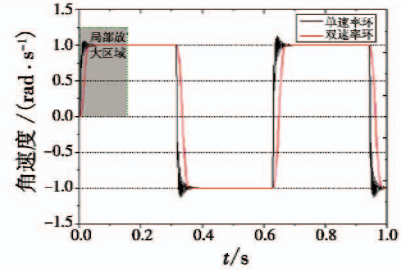
$$G'_2(s) = \frac{k_1 G_1(s)}{(T_e s + 1)(T_m s + 1) + k_1 k_c G_1(s)} = \frac{k_1 G_1(s)}{1 + k_1 k_c G_1(s)} \frac{T_e T_m}{1 + k_1 k_c G_1(s) s^2 + \frac{T_e + T_m}{1 + k_1 k_c G_1(s)} s + 1} \quad (22)$$

由式(22)可知,在双速率环控制结构中,被控对象的等效时间常数 t 减小为原先的 $1/(1 + k_1 k_c G_1(s))$ 。因此在把光电编码器微分测速反馈作为速度内环引入后,整个被控对象的阶次降低,时间常数 t 减小,系统的响应时间缩短,控制系统的动态响应性能得以提高。

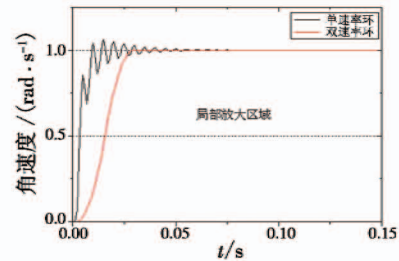
3 仿真与实验

通过在 Matlab/Simulink 中构建系统的仿真模型来对比分析单速率环与双速率环的控制效果。根据图 2 和图 3 设计伺服控制系统,取某机载光电平台的传递函数 $G_2(s) = 1600/s(s + 50)$, 采样周期为 0.001 s, 双速率环均采用 PID 控制算法,其中, $k_p = 10, k_i = 0.01, k_d = 0.05$ 。当速度给定 $\omega_r = 0^\circ$ 时,即平台保持在惯性空间内稳定,引入周期为 1 s、幅值为 1 N·m 的方波力矩干扰,对比仿真实验的结果如图 4 所示。

由图 4a 可以看出,单速率环与双速率环控制结构均能跟踪方波力矩扰动信号。当采用单速率环时,在给定切换点处存在一定的跟踪误差。将给定切换点处放大后,如图 4b 所示,在速度给定切换点处存在较大的振荡现象。当采用双速率环时,在给定切换点处存在的误差明显减小,且基本不存在振荡现象。



a 仿真原图

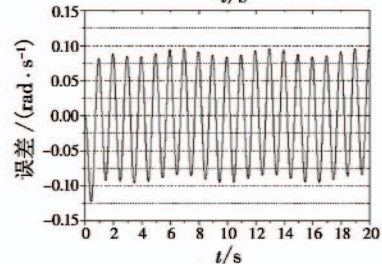
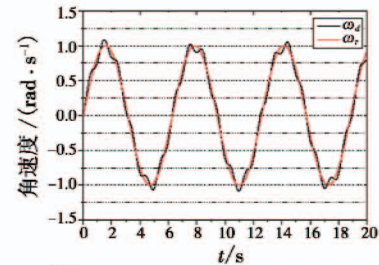


b 局部放大图

图 4 力矩扰动对比仿真实验

Fig. 4 Simulation experiment of torque disturbance contrast

假设机载光电平台搭载于无人飞行器上,当速度给定 $\omega_r = \sin t$ 时,分别进行在采用单、双速率环时控制系统对速度信号的跟踪性能对比实验,实验结果如图 5 所示。其中:图 5a 为采用单速率环时,系统对给定速度的跟踪曲线,其跟踪的误差值小于 0.1 rad/s,难以实现精确的跟踪;图 5b 为采用双速率环时,系统对给定速度的跟踪曲线,此时,跟踪的误差值小于 0.075 rad/s,且跟踪误差有界。显然,后者跟踪结果更为精确。



a 单速率环

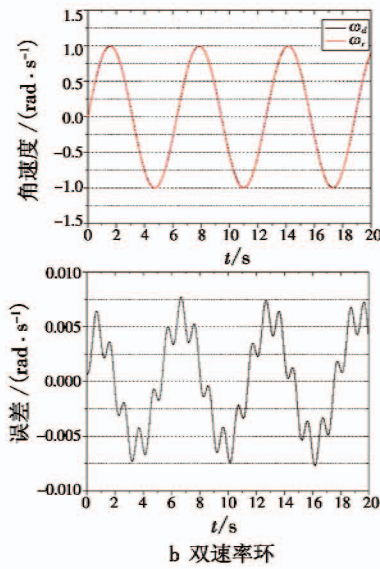


图5 速度跟踪性能对比仿真实验

Fig.5 Simulation experiment of speed tracking performance contrast

通过系统的阶跃响应对比实验来分析采用单、双速率环时控制系统的动态响应性能。当速度给定 $\omega_r = 10 \text{ rad/s}$ 时,系统的对比结果如图6所示。从图中可以看出,采用单速率环时,系统的超调量约为 10.5%,过渡过程耗时约 50 ms;采用双速率环时,系统的超调量约为 5.3%,过渡过程耗时约 25 ms。可见,双速率环的设计提高了系统的稳定性,超调降低,同时系统的响应时间缩短,响应速度较快。

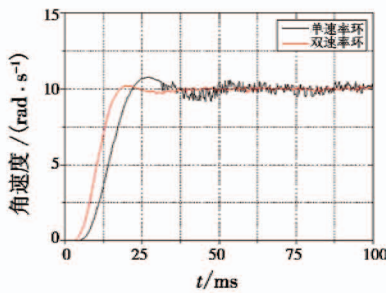


图6 动态性能对比仿真实验

Fig.6 Simulation experiment of dynamic performance comparison

在飞行过程中,通过视轴的稳定性实验来对比分析采用单、双速率环时系统的扰动抑制性能。当位置给定 $\theta_r = 0^\circ$ 时,即机载光电平台相对飞行器保持静止,实验结果如图7所示。其中:图7a为采用单速率环时的稳定误差曲线,其稳定误差在 $\pm 0.08^\circ$ 之间,稳定的精度约为 1.04 mrad;图7b为采用双速率环时的稳定误差曲线,稳定误差可以控制在 $\pm 0.02^\circ$ 之内。由此可见,后者稳定的精度和运动平稳性均优于前者,表明双速率环控制结构具有更好的扰动抑制性能。

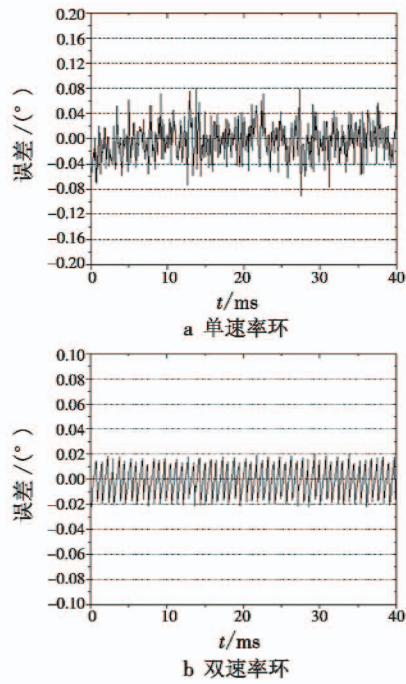


图7 视轴稳定误差曲线

Fig.7 Curve of LOS stabilization error

4 结论

本文对无人飞行器机载光电平台的双速率环稳定控制结构进行了研究,在对其抑制扰动能力、动态响应性能以及鲁棒性进行理论分析的基础上,进行了仿真与实验对比,对速度信号的跟踪误差值小于 0.075 rad/s ,系统动态性能的超调量约为 5.3%,过渡过程耗时约 25 ms,当位置给定 $\theta_r = 0^\circ$ 时,即机载光电平台相对飞行器保持静止,视轴稳定误差在 $\pm 0.02^\circ$ 之间,稳定的精度约为 0.26 mrad。数据表明,双速率环控制结构可以有效地抑制力矩扰动,提升机载光电平台隔离载体扰动的能力,能够满足无人飞行器机载光电平台的稳定控制要求。

参考文献

[1] LIU C, LIU J, SONG Y, et al. A novel system for correction of relative angular displacement between airborne platform and UAV in target localization[J]. Sensors, 2017, 17(3):510.

[2] HONKAVAARA E, ESKELINEN M A, PÖLÖNEN I, et al. Remote sensing of 3-D geometry and surface moisture of a peat production area using hyperspectral frame cameras in visible to short-wave infrared spectral ranges on-board a small Unmanned Airborne Vehicle (UAV)[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2016, 54(9):5440-5454.

- [3] 王日俊,白越,续志军,等. 基于扰动观测器的机载云台模糊自适应跟踪控制[J]. 浙江大学学报:工学版, 2015, 49(10):2005-2012.
- [4] MAN H L, PARK H G, LEE W B, et al. On the design of a disturbance observer for moving target tracking of an autonomous surveillance robot[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2012, 10(1):117-125.
- [5] ARAAR O, AOUF N, VITANOV I. Vision based autonomous landing of multicopter UAV on moving platform[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2016, 85(2):369-384.
- [6] MILLER R, MOOTY C, HILKERT J M. Gimbal system configurations and line-of-sight control techniques for small UAV applications[C]//The International Society for Optical Engineering, 2013. doi:10.1117/12.2015777.
- [7] 姬伟,李奇. 陀螺稳定平台视轴稳定系统自适应模糊PID控制[J]. 航空学报, 2007, 28(1):191-195.
- [8] 阴蕊,房建成,钟麦英. 航空遥感用三轴惯性稳定平台动力学建模与仿真[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(6):676-680.
- [9] 王巾,王凯. 高精度陀螺稳定平台稳定回路设计[J]. 光电技术应用, 2012, 27(3):26-29.
- [10] ZHANG Y S, WANG Y Y. Research of backlash nonlinearity on three-axis inertial stabilized platform[C]//The 3rd International Conference on Computer and Automation Engineering, 2011:21-23.
- [11] 王日俊. 多旋翼无人飞行器载荷稳像技术研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2015.
- [12] 郑天涯,高慧斌. 舰载光电经纬仪视轴稳定双速度环串级控制[J]. 计算机仿真, 2017, 34(3):25-28.
- [13] 周向阳,赵强. 航空遥感三轴惯性稳定平台双速度环控制[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(4):439-445.
- [14] ZHOU H R, KUMAR K S P. A "current" statistical model and adaptive algorithm for estimating maneuvering target[J]. *AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1984, 7(5):596-602.
- [15] 黄永梅,马佳光,傅承毓. 预测滤波技术在光电经纬仪中的应用仿真[J]. 光电工程, 2002, 29(4):5-9.
- [16] 卢广山,姜长生,张宏. 机载光电跟踪系统模糊控制的优化设计与仿真[J]. 航空学报, 2001, 23(1):85-87.

(上接第71页)

- [22] 王涛,蔡金燕,孟亚峰. 一种基于LUT和二模冗余的胚胎数字电路故障检测方法[J]. 微电子学与计算机, 2016, 33(7):102-105.
- [23] 于云华,石寅. 数字集成电路故障测试策略和技术的研究进展[J]. 电路与系统学报, 2004, 9(3):83-91.
- [24] 成立,王振宇,高平,等. VLSI电路可测性设计技术及其应用综述[J]. 半导体技术, 2004, 29(5):20-24, 34.
- [25] BRADLEY D W, TYRRELL A M. Immunotronics - novel finite-state-machine architectures with built-in self-test using self-nonsel self differentiation[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(3):227-238.
- [26] CANHAM R, TYRRELL A M. A hardware artificial immune system and embryonic array for fault tolerant systems[J]. *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 2003, 4(4):359-382.
- [27] 李丹阳,蔡金燕,孟亚峰,等. 基因循环存储模块的SEU自检[J]. 半导体技术, 2016, 41(4):312-318.
- [28] ZHANG Y, WANG Y, YANG S S, et al. Design of a cell in embryonic systems with improved efficiency and fault-tolerance[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2007, 4684(1):129-139.
- [29] PRODAN L, UDRESCU M, VLADUTIU M. Self-repairing embryonic memory arrays[C]//Proceedings of NASA/DoD Conference on Evolvable Hardware, 2004:130-137.
- [30] 俞洋,王鹤潼,滕跃. 仿生自修复电路中基本逻辑单元设计[J]. 电子测量技术, 2016, 39(11):11-15, 25.