

文章编号 1004-924X(2011)05-0998-07

基于速度信号的扰动观测器及在光电稳定平台的应用

李嘉全^{1*}, 丁 策^{1,2}, 孔德杰^{1,2}, 尹传历¹, 戴 明¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:在闭环控制系统中引入了扰动估计和补偿来改善光电稳定平台低速性能,并提高其扰动抑制能力。提出了基于速度信号的扰动观测器,并对其各项性能进行了研究。介绍了常规的基于加速度的扰动观测器的工作原理,指出了它在光电稳定平台应用中存在的问题;通过引入平台的标称模型,构建了基于平台速度信号的扰动观测器,给出了相应的闭环控制系统结构,分析了它的输入输出特性、扰动抑制能力和鲁棒性;最后,对本文方法进行了仿真和物理实验。实验结果表明:当平台按 0.5 Hz, 0.6(°)/s 做正弦运动时,引入本文提出的带扰动观测器的 PI 控制基本克服了常规 PI 控制存在的低速爬坡现象;对于 1 Hz, 6.3(°)/s 的载体正弦速度扰动,平台的扰动隔离度提高了约 14 dB,稳定精度从 0.03°(RMS)提高到了 0.0044°(RMS)。实验结果证明了本文方法的有效性。

关键词:光电稳定平台;速度信号;扰动观测器;低速性能;扰动抑制;稳定精度

中图分类号:TH824;TP273.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111905.0998

Velocity based disturbance observer and its application to photoelectric stabilized platform

LI Jia-quan^{1*}, DING Ce^{1,2}, KONG De-jie^{1,2}, YIN Chuan-li¹, DAI Ming¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

* *Corresponding author, Email: jqli@mail.ustc.edu.cn*

Abstract: The disturbance estimation and compensation was introduced into close loop control systems to improve the low speed performance and disturbance rejected ability of photoelectric stabilized platforms. An original Velocity based Disturbance Observer (VDOB) was proposed and its characteristics were studied. The working principle of regular Disturbance Observer (DOB) was introduced and its drawbacks in applications to stabilized platforms were pointed out. By introducing a nominal model of stabilized platforms, the VDOB was established based on velocity signals, the structure of closed loop control system with VDOB was given, and its transfer behavior, disturbance rejected ability and robustness were analyzed. Finally, some simulations and experiments were carried out. Experiment results show that the PI controller with VDOB can overcome the speed creeping problem existed in tra-

收稿日期:2010-06-23;修订日期:2010-07-31.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划重点资助项目(No. 2008AA121803)

ditional PI controllers when the platform does sinusoidal movement. Furthermore, the velocity disturbance isolation level of the platform after using PI controller with VDOB is increased by about 14 dB. Correspondingly, the stabilization precision of platform is increased from 0.03° (RMS) to 0.0044° (RMS) when the vehicle on platform is moved in sinusoidal manner at 1 Hz and $6.3^\circ/s$. In conclusion, the proposed VDOB is effective and valuable.

Key words: photoelectric stabilized platform; velocity signal; Disturbance Observer(DOB); low speed performance; disturbance rejection; stabilization precision

1 引言

稳定平台是现代光电侦察系统的重要组成部分,为了保证平台搭载的光学载荷能够高质量成像,对平台伺服系统的稳定精度有很高的要求^[1]。

影响稳定平台伺服性能的因素主要有 3 点:(1)摩擦力矩等力矩的扰动;(2)平台载体速度扰动;(3)传感器精度和噪声的影响^[2]。解决前两个影响因素的方法是从系统可测信息中估计出不可测的扰动,进而在控制算法中进行补偿。在稳定平台伺服控制中,由于加速度信息与力矩直接相关,因此多采用加速度来估计系统扰动。通常通过两种途径获得加速度,一是使用加速度计直接测量,二是使用扰动观测器(Disturbance Observer, DOB)^[1]获得。然而,前者增加了硬件成本,后者虽然因为结构简单而获得了广泛应用^[3-8],但因包含微分环节,存在噪声放大等问题,限制了伺服性能的提高。针对 DOB 存在的问题,有学者提出在微分环节后串入一个低通滤波器^[9-10],但结果仍然无法解决噪声抑制和伺服性能提高间的本质矛盾。

为了解决 DOB 的上述问题,提高光电稳定平台的伺服控制精度,本文提出了基于速度信号的扰动观测器(Velocity DOB, VDOB)。VDOB 引入平台标称模型,结合平台速度信号估计系统扰动,不使用加速度计,也不需进行速度微分,即可有效克服了 DOB 存在的噪声放大等问题,为提高稳定平台的伺服性能提供了一个经济且实用的方案。

2 基于速度信号的扰动观测器设计

2.1 扰动观测器(DOB)简介

图 1 为 DOB 的原理框图,其中 $P(s)$ 为稳定

平台模型, $P_n^{-1}(s)$ 为平台的标称逆模型, $Q(s)$ 为低通滤波器。对于稳定平台, $P(s)$ 通常建立为一阶惯性环节或是纯积分环节,因此标称逆模型 $P_n^{-1}(s)$ 必然包含微分环节。由于陀螺等速度传感器不可避免地存在测量噪声,而微分会放大噪声,从而使伺服系统的鲁棒性受到影响。此外,对于数字控制系统,由速度微分获得的加速度信号的分辨率与采样率有关,对于高采样率系统,加速度分辨率较低,直接影响了伺服系统的控制精度。

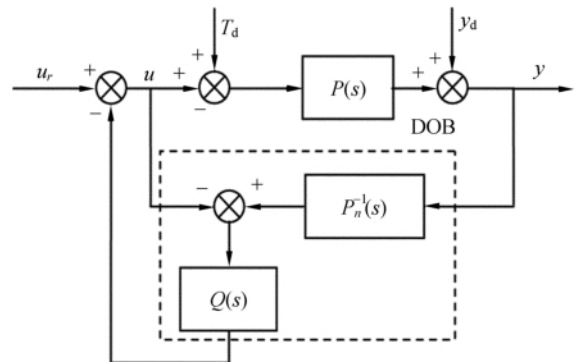


图 1 扰动观测器原理框图

Fig. 1 Block diagram of DOB

低通滤波器 $Q(s)$ 的引入可以缓解上述问题,但会造成平台扰动抑制能力的下降^[6],也就是说伺服系统的鲁棒性和扰动抑制能力是相互制约的, $Q(s)$ 的引入影响了 DOB 在光电稳定平台中的应用效果。

2.2 基于速度信号的扰动观测器(VDOB)

本文提出了基于速度信号的扰动观测器(VDOB)来解决 DOB 存在的问题。VDOB 及光电稳定平台控制系统原理框图如图 2 所示。其中, $P(s)$ 为平台真实模型, $P_1(s)$ 为平台标称模型, $C(s)$ 为控制器, $C_1(s)$ 为补偿器; r 为速度参考信号, y 为平台速度输出, T_d 为平台力矩扰动,包括摩擦力矩、线绕力矩、不平衡力矩等, y_d 是平台载体速度扰动, u 是 $C(s)$ 输出控制量, u_c 是扰动

估计量, u_t 是平台的实际驱动力矩。从图 2 可知, VDOB 的数学表达式为:

$$u_c(s) = [y(s) - u(s)P_1(s)]C_1(s), \quad (1)$$

其中, $u_c(s)$, $u(s)$, $y_c(s)$ 分别是 u_c , u , y_c 的频域形式。

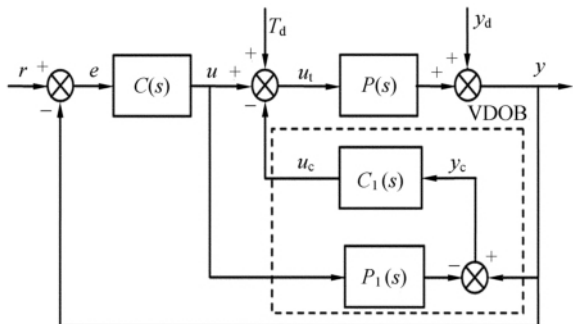


图 2 引入 VDOB 的稳定平台控制系统原理框图

Fig. 2 Block diagram of control system of stabilized platform involving VDOB

VDOB 的基本思想是:控制量 u 可知,通过平台的标称模型 $P_1(s)$ 可以计算出 u 激励出的平台速度响应部分,从平台的速度响应 y 中剔除掉这部分,就可以估计出由力矩扰动 T_d 和载体速度扰动 y_d 带来的平台速度响应部分 y_c 。将 y_c 通过补偿器 $C_1(s)$ 等效为补偿力矩 u_c , 叠加在控制量 u 中,从而补偿了扰动对平台伺服性能的影响。同时,由于 VDOB 仅使用了平台的标称模型 $P_1(s)$,而不是标称逆模型 $P_n^{-1}(s)$,因此避免了 DOB 中的微分放大噪声等问题。

从图 2 可以获得引入 VDOB 的稳定平台控制系统的输入输出关系:

$$y(s) = \frac{C(s)P(s)((1-C_1(s)P_1(s)))}{1-C_1(s)P(s)+C(s)P(s)(1-C_1(s)P_1(s))}r(s) + \frac{P(s)}{(1-C_1(s)P(s))+C(s)P(s)(1-C_1(s)P_1(s))}T_d(s) + \frac{1}{(1-C_1(s)P(s))+C(s)P(s)(1-C_1(s)P_1(s))}y_d(s), \quad (2)$$

若标称模型准确,即 $P_1(s) = P(s)$,则有

$$y(s) = \frac{C(s)P(s)}{1+C(s)P(s)}r(s) + \frac{P(s)}{(1+C(s)P(s))(1-C_1(s)P(s))}T_d(s) + \frac{1}{(1+C(s)P(s))(1-C_1(s)P(s))}y_d(s). \quad (3)$$

同样,可以推出未引入 VDOB 的控制系统输入输出关系:

$$y(s) = \frac{C(s)P(s)}{1+C(s)P(s)}r(s) + \frac{P(s)}{1+C(s)P(s)}T_d(s) + \frac{1}{1+C(s)P(s)}y_d(s). \quad (4)$$

比较式(3)和式(4),可得到 2 点结论:

(1) 若标称模型 $P_1(s)$ 与真实模型 $P(s)$ 完全相同,则基于速度信号的扰动观测器不改变系统速度输出与参考输入之间的传递关系。这说明在设计稳定平台控制系统时,控制器 $C(s)$ 和 VDOB 的设计是完全独立的。因此,可以先采用任何一种合适的控制器设计方法设计 $C(s)$,使闭环系统的带宽、稳定裕度、稳态误差等满足期望指标,然后再根据需要进行适合的 VDOB 补偿器 $C_1(s)$ 。

(2) 相同前提下,只要 $1-C_1(s)P(s)$ 引入的是稳定极点,且满足 $\|1-C_1(j\omega)P(j\omega)\| > 1, 0 \leq \omega \leq \omega_d$,则在稳定平台控制系统中引入 VDOB,可以提高系统对频率在 $0 \sim \omega_d$ 间扰动的抑制能力。

若标称模型 $P_1(s)$ 存在误差,假设模型误差的集合可以用乘积摄动来表示,即

$$P_1(s) = P(s)(1+\Delta(s)), \quad (5)$$

由鲁棒稳定性定理,VDOB 鲁棒稳定的充分条件是^[11]:

$$\|\Delta(s)C_1(s)\|_{\infty} \ll 1. \quad (6)$$

3 仿真研究

对不引入和引入 VDOB 的稳定平台控制系统进行仿真对比实验,如图 3 所示,其中,以名义模型为对象设计 PI 控制器,闭环带宽设计为 25 Hz。仿真参数如下。

平台: $P(s) = \frac{118}{s}(1+0.2)s^2 + 96.5s + 82300$; 控制器: $C(s) = 1 + \frac{50}{s}$; 名义模型: $P_1(s) = \frac{118}{s}$; 扰动补偿器: $C_1(s) = \frac{1}{0.005s+1}$, 满足鲁棒稳定性条件; 力矩扰动: $T_d = 0.2 + 0.1\sin(2\pi t) Nm$; 载体速度扰动: $y_d = 3\sin(2\pi t) (^{\circ})/s$; 速度测量噪声: 峰峰值为 $0.03 (^{\circ})/s$ 的随机噪声。

图 4 为稳定平台的阶跃响应对比。从图中可

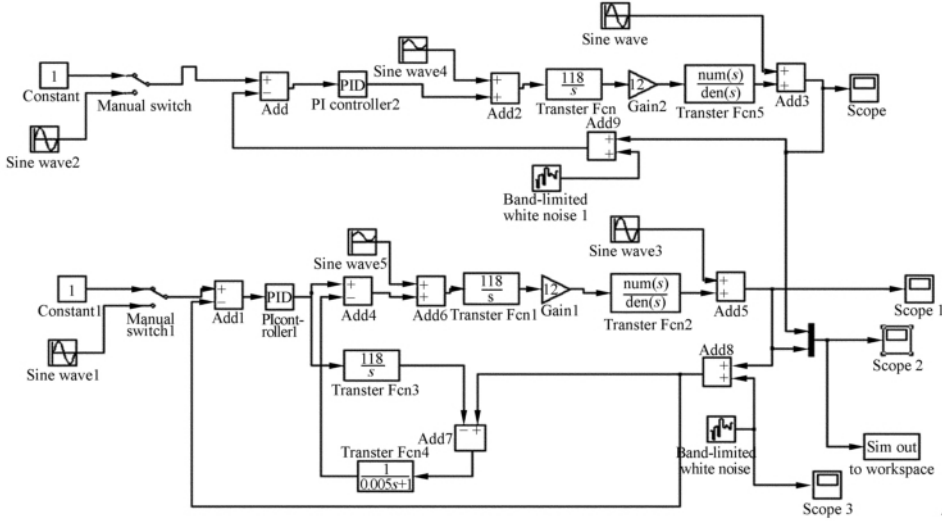


图 3 Simulink 仿真对比实验结构图

Fig. 3 Block diagram of contrast simulating experiment

见,引入 VDOB 后,由于实时估计并补偿了力矩扰动,避免了 PI 控制中积分环节带来的“过控制”问题,从而显著减小了阶跃响应的超调量,改善了平台的动态性能。

图 4 中,两条阶跃响应曲线均存在轻微畸变和短暂振荡,这是因为在设计 PI 控制器 $C(s)$ 时采用的是对象名义模型 $P_1(s)$,建模误差影响了控制性能。同时,由于在 VDOB 补偿器 $C_1(s)$ 的设计中考虑了对模型建模误差的鲁棒性要求,VDOB 并没有对系统稳定性产生影响。

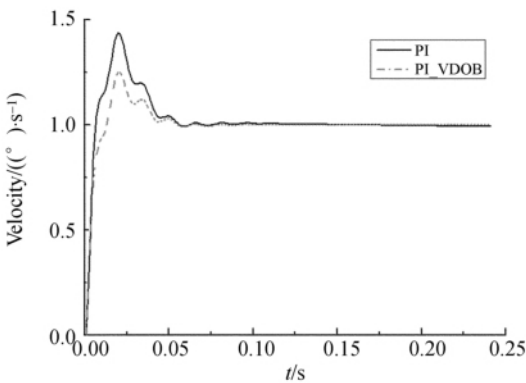


图 4 阶跃响应对比

Fig. 4 Comparison of step responses

图 5 为稳定平台对力矩扰动抑制能力的对比。引入 VDOB 后,由于估计并补偿了力矩扰动,平台的力矩扰动抑制能力明显提高,由力矩扰动引起的平台速度响应均方值从 $0.009(^{\circ})/s$ 下降到 $0.002(^{\circ})/s$ 。

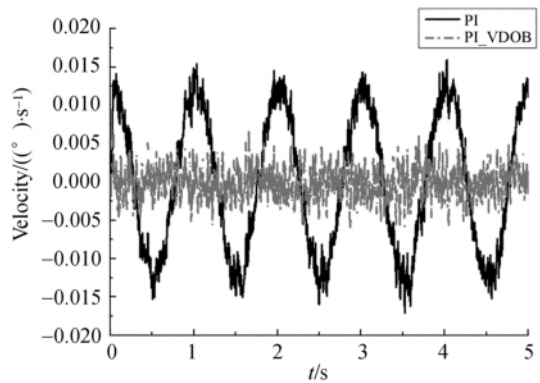


图 5 力矩扰动抑制能力对比

Fig. 5 Comparison of torque disturbance rejected abilities

图 6 为稳定平台对载体速度扰动抑制能力的对比。引入 VDOB 后,平台对载体速度扰动的抑

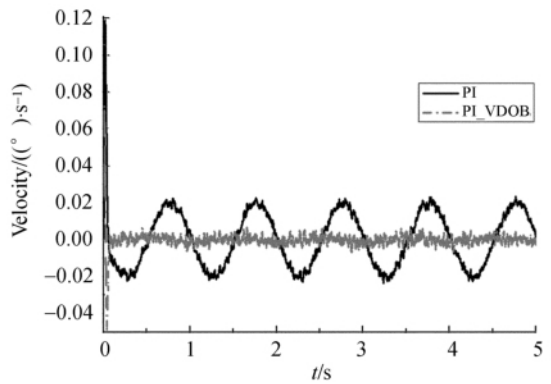


图 6 载体速度扰动抑制能力对比

Fig. 6 Comparison of rejection abilities on vehicle velocity disturbance

制能力明显提高,由速度扰动引起的平台速度响应均方值从 $0.016(^{\circ})/s$ 下降到 $0.0048(^{\circ})/s$ 。

事实上,从图 5 和图 6 可以看出,引入 VDOB 后,稳定平台速度响应曲线的主要部分是速度测量噪声,力矩扰动和载体速度扰动对平台速度的干扰几乎被完全抑制。

4 实验研究

以单自由度光电稳定平台为实验对象,在摇摆台上进行控制实验。平台采用速度环、电流环双环控制结构,实测开环模型为 $P_1(s) = \frac{30}{s}$,速度环采用 PI 控制器 $C(s) = 4 + \frac{200}{s}$,补偿器 $C_1(s) = \frac{1}{0.005s+1}$,采样率为 800 Hz,陀螺测量噪声峰峰值为 $0.15(^{\circ})/s$,进行了以下两组实验。

4.1 平台低速性能对比实验

摇摆台静止,期望平台以 $0.5 \text{ Hz}, 0.6(^{\circ})/s$ 做正弦运动,对引入和未引入 VDOB 的两个闭环控制系统进行对比实验。提取陀螺信号来考察两种控制方法下平台的低速性能,实验结果如图 7 所示。可以看出,未引入 VDOB 的闭环系统,由于静摩擦力矩的存在,平台转速在过零时会出现明显的爬坡现象;而在引入 VDOB 后,由于实时估计和补偿了摩擦力矩,减小了摩擦力矩的影响,有效克服了转速过零时的爬坡现象,显著改善了平台的低速性能。

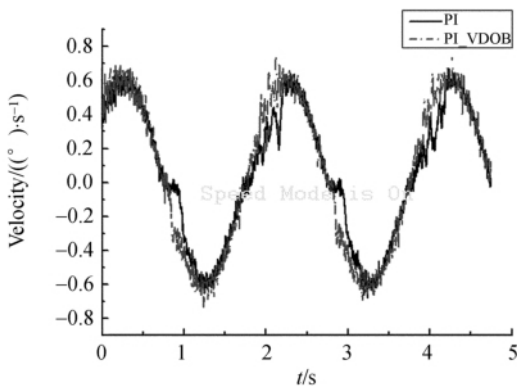


图 7 稳定平台低速运行曲线

Fig. 7 Low speed performance curve of stabilized platform

4.2 平台稳定精度对比实验

摇摆台的方位框架按 $1 \text{ Hz}, 6.3(^{\circ})/s$ 速度做正弦运动,稳定平台的期望转速为 0,对引入和未引入 VDOB 的两个闭环控制系统进行对比实验。提取陀螺信号,比较平台的速度响应,实验结果如图 8 所示。可以看出,两条曲线中均存在尖峰,这是由于摇摆台在换向时,稳定平台因受摩擦力矩的影响而无法及时响应换向,从而造成速度残差的突然增大。但是,从图中也可看出引入 VDOB 后,平台速度尖峰的幅值和持续时间均显著减小,这说明了 VDOB 对估计和克服摩擦力矩干扰具有明显的效果。

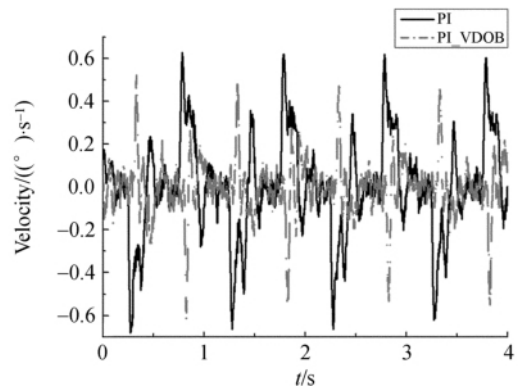


图 8 稳定平台速度曲线

Fig. 8 Velocity curve of stabilized platform

为了更清楚地比较稳定平台对 1 Hz 速度扰动的隔离能力,对图 8 的数据进行了频谱分析,结果如图 9 所示。其中,图(a)为 PI 控制下平台速度响应的频谱图,图(b)为引入 VDOB 后 PI 控制下的平台速度频谱图。比较可知,引入 VDOB 后平台的 1 Hz 速度响应分量仅为引入前的 $1/5$,即 1 Hz 的速度扰动隔离度提高了约 14 dB ;对于由摩擦、不平衡力矩等非线性因素引起的倍频速度响应分量,引入 VDOB 的闭环系统也具有较好的抑制作用。

以光电载荷的视轴脱靶量来考核光电平台的稳定精度,其中一个脱靶量对应 0.0023° 。在 $1 \text{ Hz}, 6.3(^{\circ})/s$ 的摇摆台速度扰动下,平台的视轴指向误差曲线如图 10 所示。可见,引入 VDOB 后,显著减小了视轴的晃动,经计算可知,平台的稳定精度从 0.03° (RMS) 提高到 0.0044° (RMS)。

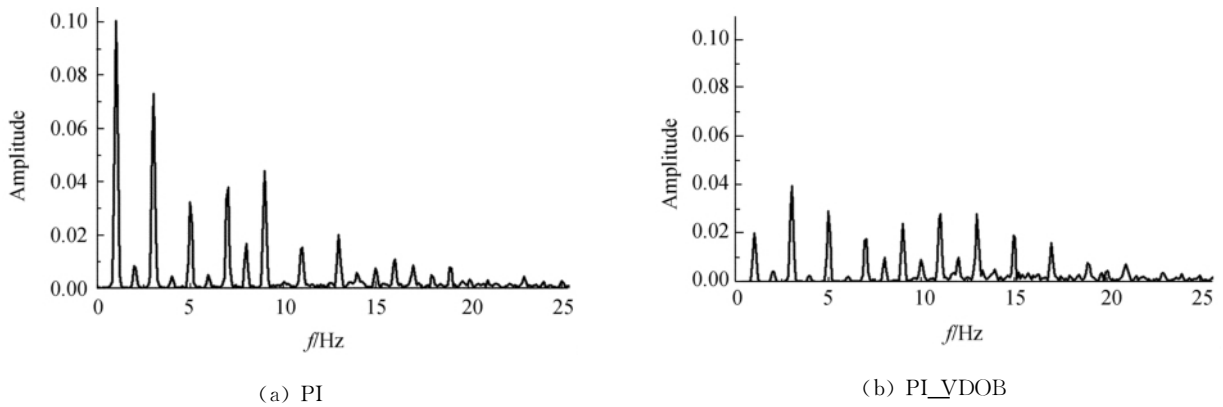


图 9 稳定平台速度响应频谱分析

Fig. 9 FFTs of velocity curves of stabilized platform

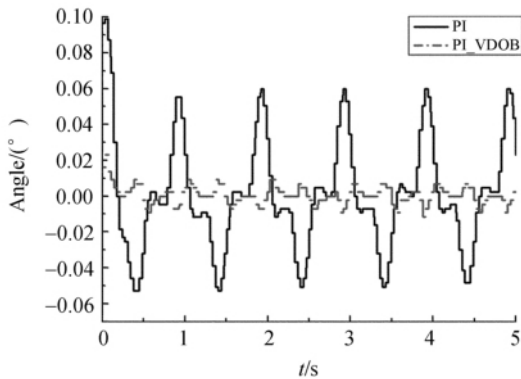


图 10 稳定平台视轴指向误差曲线

Fig. 10 LOS error curves of stabilized platform

5 结 论

为改善光电稳定平台低速性能,提高平台的

参考文献:

- [1] 李英,葛文奇,王绍彬,等. 稳定平台的自适应逆控制[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2744-2748.
LI Y, GE W Q, W SH B, *et al.*. Adaptive inverse control of stable platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2744-2748. (in Chinese)
- [2] 邱晓波, 窦丽华, 单东升, 等. 光电跟踪系统自抗扰伺服控制器的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 220-226.
QIU X B, DOU L H, SHAN D SH, *et al.*. Design of active disturbance rejected controller for electro-optical tracking servo system [J]. *Opt. Precision*

扰动抑制能力,本文提出了基于速度信号的扰动观测器(VDOB),并引入平台闭环控制系统中。与常规扰动观测器(DOB)相比,由于不包含微分环节,VDOB克服了DOB存在的噪声放大等问题,解决了闭环系统鲁棒性和扰动抑制能力之间的矛盾。理论分析、数字仿真和物理实验均证明了本文方法的有效性。其中,在单自由度摇摆台上的稳定平台控制实验结果表明:引入VDOB的闭环控制系统有效克服了速度过零时的爬坡现象,改善了平台低速运动性能;在1 Hz, 6.3(°)/s的载体扰动下,引入VDOB后的平台稳定精度为0.0044°(RMS),明显高于没有VDOB时的平台稳定精度0.03°(RMS)。

Eng., 2010, 18(1): 220-226. (in Chinese)

- [3] TESFAYE A, LEE H S, TOMIZUKA M. A sensitivity optimization approach to design a disturbance observer in digital motion control systems [J]. *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, 2000, 5(1): 32-38.
- [4] KIM B K, CHUNG W K. Advanced disturbance observer design for mechanical positioning systems [J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 2003, 30(6): 1207-1216.
- [5] 方强,姚郁. 电动负载模拟器扰动观测器系统化设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(3): 349-353.

- FANG Q, YAO Y. A systemic disturbance observer design for EALS [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 39(3): 349-353. (in Chinese)
- [6] 方强, 马杰, 毕运波, 等. 基于扰动观测器的电动负载模拟器控制系统设计[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2009, 43(11): 1958-1964.
- FANG Q, MA J, BI Y B, *et al.*. Disturbance observer based controller design for electric dynamic load simulator [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2009, 43(11): 1958-1964. (in Chinese)
- [7] 马晓军, 袁东, 魏曙光, 等. 高性能坦克炮控系统自适应控制研究[J]. *电气传动*, 2008, 38(5): 43-45.
- MA X J, YUAN D, WEI SH G, *et al.*. Research on self-tuning control of high capability tank gun control system [J]. *Electric Drive*, 2008, 38(5): 43-45. (in Chinese)
- [8] 刘晶红, 朱志强, 沈宏海, 等. 加速度在控制系统扰动补偿中的应用[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(9): 2191-2197.
- LIU J H, ZH ZH Q, SH H H, *et al.*. Application of control system based on acceleration to disturbance compensation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2191-2197. (in Chinese)
- [9] OHNISHI K, SHIBATA M, MURAKAMI T. Motion control for advanced mechatronics [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1996, 1(1): 56-67.
- [10] KEMPF C J, KOBAYASHI S. Disturbance observer and feedforward design for a high speed direct drive positioning table [J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 1999, 7(1): 513-526.
- [11] 史忠科, 吴方向, 王蓓, 等. 鲁棒控制理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- SH ZH K, W F X, W B, *et al.*. *Robust Control Theory* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003. (in Chinese)

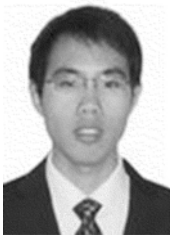
作者简介:



李嘉全(1981—),男,安徽合肥人,工学博士,助理研究员,2003年、2008年于中国科学技术大学分别获得学士、博士学位,主要从事机载光电平台伺服控制、振动主动控制等方面的研究。E-mail: jqli@mail.ustc.edu.cn



尹传历(1979—),男,吉林白山人,工学博士,助理研究员,2008年于中科院院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事航空数字图像处理与嵌入式系统的研究。E-mail: yinchuanli_1979@163.com



丁策(1983—),男,河北石家庄人,博士研究生,2006年、2008年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事机载光电平台伺服控制等方面的研究。E-mail: dingce1983@gmail.com



戴明(1965—),男,湖北人,研究员,博士生导师,现任中科院院长春光学精密机械与物理研究所航测部主任,主要从事对地实时观测系统信号获取、图像处理及控制工程的研究。E-mail: daiming@ciomp.ac.cn



孔德杰(1978—),男,山东莱芜人,博士研究生,2002年、2005年于山东大学分别获得学士、硕士学位,主要从事电力电子与电力拖动等方面的研究。E-mail: kongdejie@mail.sdu.edu.cn