

扰动观测器在空间光通信 PAT 系统中的应用

顾健,艾勇,陈晶,单欣,胡国元

(武汉大学 电子信息学院,湖北 武汉 430079)

摘要: 为了提高空间光通信 PAT 系统的扰动抑制能力,提出了一种基于扰动观测器的控制方法。该方法首先对 PAT 系统进行分析,得到简化的控制模型,然后利用扰动观测器从电机转动位置和光斑位置中观测出扰动,最后将扰动等效补偿量加入到电流环前的综合点。精跟踪系统的仿真实验结果表明:相比常规的 PD 控制器,加入扰动观测器使扰动隔离度在电机电流饱和前的几乎所有频率处都得到了提升,最优情况可达到 28.2 dB;同时,该方法具有很强的鲁棒性,在系统物理参数变化 15% 时扰动隔离度依然比没有使用扰动观测器时提高了至少 1 倍。所述的控制方法显著提高了 PAT 系统的抗扰动性能,对大范围与高动态的精密光电跟踪系统有一定的参考价值。

关键词: 光通信; PAT; 扰动隔离度; 扰动观测器

中图分类号: TH929.1; TP273.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0122003

Application of disturbance observer for space optical communication PAT system

Gu Jian, Ai Yong, Chen Jing, Shan Xin, Hu Guoyuan

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In order to improve the disturbance isolation degree for space optical communication Pointing, Acquisition, and Tracking (PAT) system, a novel control method based on disturbance observer was proposed. Firstly, according to the structure analysis of PAT system, the simplified system model was gained and then the disturbance was observed from the position of the motor and the laser spot by disturbance observer. Finally, the equivalent amount of disturbance compensation was added to the integration points in front of the current loop. The simulation results of fine tracking system show that compared with the traditional PD controller, adding the disturbance observer can improve the disturbance isolation degree at almost all frequencies before the motor current saturates, and the optimal situation has reached 28.2 dB. Meanwhile, this method has strong robustness; the disturbance isolation degree still increases by at least 1 times than not using the disturbance observer when there are 15% changes for the system physical parameters. The proposed control method greatly improves the disturbance isolation degree for PAT system and is of certain reference value to the wide range and high dynamic precision photoelectric tracking system.

Key words: space optical communication; PAT; disturbance isolation degree; disturbance observer

收稿日期:2015-05-17; 修订日期:2015-06-20

基金项目:国家自然科学基金(11204220)

作者简介:顾健(1987-),男,博士生,主要从事空间光通信、跟踪技术和控制算法方面的研究。Email:gujian@whu.edu.cn

导师简介:艾勇(1958-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事激光通信和 FPI 方面的研究。Email:aiyong009@163.com

0 引言

空间光通信具有速率高、体积小、功耗低和保密性强等优点,在飞机、舰船、卫星等平台上进行过多次成功实验^[1-5],有非常广阔的应用前景。空间光通信的关键技术和难点之一是激光的瞄准、捕获和跟踪(Pointing, Acquisition, Tracking, PAT)技术。

由载体姿态扰动和平台间相对运动组成的外部扰动是引起 PAT 跟踪误差的主要因素,为消除这一扰动,几乎所有的 PAT 系统都由粗跟踪系统和精跟踪系统复合构成,粗跟踪系统能够大角度旋转,负责将激光束引入精跟踪视场,其带宽低、精度要求低;精跟踪系统负责对粗跟踪残余误差进一步抑制,其带宽高、精度要求高。尽管粗跟踪和精跟踪的组成结构大相径庭,但基本工作原理相似,本质上都是典型的闭环位置控制系统,最大的区别是执行机构的频域响应特性不同,即传递函数不同,所以控制方法是类似和相通的。

空间光通信 PAT 扰动的抑制方法主要有被动抑制和主动抑制两种。被动抑制通过增大回路增益来减小扰动响应,但所有的系统都存在稳定性限制,这种限制限制了回路增益可以取值的范围^[6],目前国内学者主要采用被动抑制方法:胡贞等^[7]使用了滑模控制跟踪方法;曹阳等^[8]使用了交互多模型粒子滤波跟踪算法;杨东等^[9]使用了模型参考自适应算法;佟首峰等^[10-11]使用了超前滞后补偿控制的方法,被动抑制方法为了权衡系统的稳定性、稳态误差与动态性能,具有一定的局限性。

主动抑制基于扰动的测量(或观测)和等效补偿,其优点是在不影响系统稳定性和不改变系统主要结构的前提下能大幅改善扰动响应,目前主要应用在动态性能相对差、体积相对笨重的光电陀螺稳定平台^[12-14]上,在空间光通信领域也有学者使用了加速度计来主动补偿外部扰动^[15-16],但加速度计的更新频率和测量精度并不高,这种限制限制了扰动抑制改善程度。

为此,文中提出了一种基于扰动观测器(Disturbance Observer, DOB)的扰动主动抑制方法,该方法使用扰动观测器从电机位置传感器和光斑位置传感器中观测外部扰动,在主回路 PD 控制器中快速、精确地等

效补偿,在本质上提高了 PAT 系统的抗干扰能力,通过对精跟踪系统的仿真实验,从时域、频域、鲁棒性角度对扰动观测器的效果进行了有效验证。

1 控制结构的分析与简化

文中仅讨论线性定常条件下使用电机驱动的 PAT 系统控制结构,不论是粗跟踪还是精跟踪,其基本原理相似并且是独立工作的,为使研究不失一般性,仅给出它们的基本控制框图(图 1)。

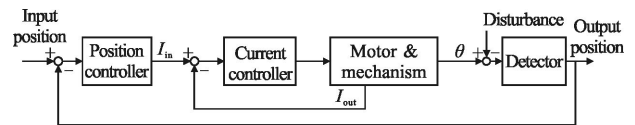


图 1 跟踪控制框图

Fig.1 Control structure of tracking system

控制结构为基本的位置-电流双闭环,位置环包括位置控制器、电流环、光斑位置检测机构;电流环包括电流控制器、电机与转动机构、电流检测机构;前者为光闭环,后者为电流闭环;电机与转动机构的机电理论模型推导已经非常完善^[17],文中仅使用其结论并给出等效控制系统模型图,如图 2 所示。

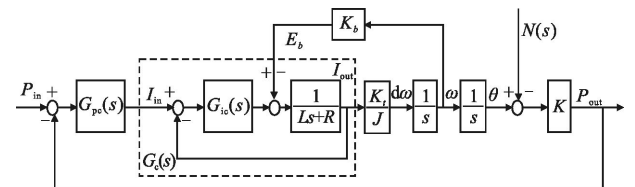


图 2 跟踪控制模型

Fig.2 Control model of tracking system

图中, P_{in} 为指令位置, P_{out} 为光斑位置, $N(s)$ 为光斑的扰动, θ 为电机转动角度, ω 为电机的角速度, $d\omega$ 为电机的加速度, K_t 为电机的转矩常数, J 为电机转子和转动机构的总转动惯量, L 为电枢电感, R 为电枢电阻, K_B 为反电动势常数, E_b 为反电动势, I_{out} 为电枢电流, I_{in} 为电流环给定, K 为单位弧度与光斑检测机构的角分辨率之比, $G_{pc}(s)$ 为位置环控制器传递函数, $G_{ic}(s)$ 为电流环控制器传递函数。

为强调位置环的响应速度,位置控制器采用 PD 控制律:

$$G_{pc}(s) = K_p(1 + K_d s)$$

式中: K_p 为位置比例控制系数; K_d 为位置微分控制

系数。单位位置环系统不能直接控制电机的电枢电流(即转矩),从而难以获得最佳的动态性能,通过增加电流环可以解决这一问题。电流环依据电流的负反馈来直接控制电枢电流 I_{out} , 获得最大的转动加速度,减少动态调节时间。

由于 E_b 的变化相对电流变化慢得多,电流环设计时可以不考虑 E_b 的影响。 $G_c(s)$ 采用 PI 控制律以保证实时、准确地跟踪电流环给定量,电流环带宽可以做到非常高,根据工程需要将设计好的电流闭环传递函数 $G_c(s)$ 近似等效为 1 进行后续处理。

$$G_c(s) = K_{ip}(1 + K_{ii}/s)$$

式中: K_{ip} 为电流比例控制系数; K_{ii} 为电流积分控制系数,简化后的控制模型如图 3 所示。

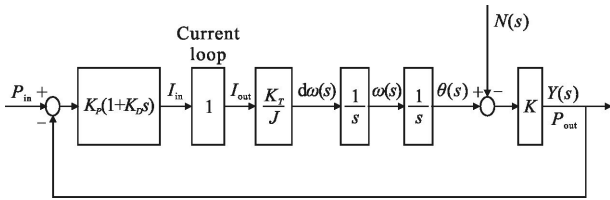


图 3 简化后的跟踪控制模型

Fig.3 Simplified control model of tracking system

2 扰动的作用与抑制原理

如图 3,光斑的位置 $Y(s)$ 取决于电机转动角度 $\theta(s)$ 与激光入射角度 $N(s)$ (等效为外部扰动)的相对位置。

$$Y(s) = (\theta(s) - N(s))K \quad (1)$$

定义系统输出角度与扰动输入角度的传递函数 $T_N(s)$ 为:

$$T_N(s) = \frac{Y(s)/K}{N(s)} = \frac{-1}{1 + KG_{pc}(s)G_c(s)G_p(s)} \approx \frac{-Js^2}{Js^2 + K_p K_d K K_s + K_p K K_t}$$

其中,定义 $G_p(s) \approx K_t/Js^2$, $G_c(s) \approx 1$,系统对扰动的响应可以在整个频率范围内由公式(2)~(4)近似。

在高频段

$$T_N(s) \approx \frac{-Js^2}{Js^2} = -1 \quad (2)$$

在中频段

$$T_N(s) \approx \frac{-Js^2}{K_p K_d K K_s} = \frac{-Js^2}{K_p K_d K K_t} \quad (3)$$

在低频段

$$T_N(s) \approx \frac{-Js^2}{K_p K K_t} \quad (4)$$

在低频段, K_p 对抑制扰动响应起主导作用;在中频段, $K_p K_d$ 对抑制扰动响应起主导作用;在高频段,各项参数设置对扰动抑制都不起作用。为了提高中低频抗扰动能力,在不加扰动观测器的情况下,只能提高前向通道的控制参数增益,而这势必会导致系统稳定裕度的下降,从而限制了控制参数可以取值的范围。

对于实际的物理系统,为保护电机不致过载而损坏,电流环给定量将受到限制。设钳位值为 I_{max} , $N(t) = A \sin \omega t$,假设扰动能被完全抑制,则 $Y(t) = 0$,根据公式(1)有:

$$\theta(t) = N(t) = A \sin \omega t$$

$$\omega(t) = \theta'(t) = A \omega \cos \omega t$$

电机的转动加速度:

$$\frac{Kt}{J} = d\omega(t) = \theta''(t) = -A \omega^2 \sin \omega t$$

在方程两侧都取最大值情况下有:

$$\frac{Kt}{J} I_{max} = A \omega^2 \quad (5)$$

公式(5)从理论上证明系统能够抑制的扰动最大角速度(频率)的平方和幅度的乘积为一定值,超出这一范围的扰动将导致电流受到钳位而使扰动抑制效果下降。

3 扰动观测器设计

扰动观测器(DOB)的基本思想是将外部扰动造成的振镜角度位置和光斑角度位置的差异等效到控制输入端,即观测干扰,并在控制中引入等量的补偿,以实现干扰的补偿。电流环是所有环路中响应最快,且能够直接影响被控对象转矩,所以文中设计的扰动观测器将扰动的补偿量加入到电流环前的综合点,带有扰动观测器的控制模型如图 4 所示,扰动观测器框图为虚框部分。

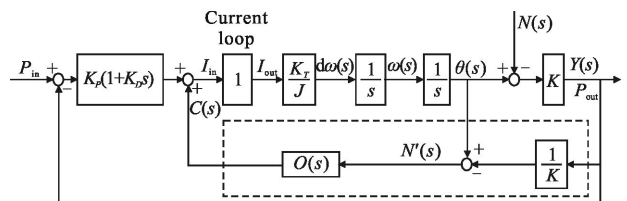


图 4 带扰动观测器的控制框图

Fig.4 Control model with disturbance observer

根据图4:

$$\theta(s) = -Y(s)G_{pc}(s)G_p(s) + N^*(s)O(s)G_c(s)G_p(s) \quad (6)$$

式中： $O(s)$ 为扰动观测量的补偿函数。根据公式(1)、(6)有：

$$Y(s)=(1+KG_{pc}(s)G_c(s)G_p(s))=(N^*(s)O(s)G_c(s)G_p(s)-N(s))K$$

如果满足：(1) 能够完全估计 $N^*(s)$ ；(2) $O(s)G_c(s)G_p(s)=1$ ，此时扰动传递函数

$$T_N(s)=\frac{Y(s)/K}{N(s)}=\frac{0}{1+KG_{pc}(s)G_c(s)G_p(s)}=0$$

可见，在理想条件下扰动将被完全解耦，系统输出不受到任何外部扰动的影响。为了使扰动观测器尽量满足上述两个条件，先考虑 $N(s)$ 的估计，得益于高精度的双位置传感器，即电机转子位置传感器和光斑位置传感器，对 $N(s)$ 的估计相对简单，精度也很高(具体取决于传感器的精度)。考虑到噪声的影响，增加了低通滤波器 $Q(s)$ ，其带宽为 2 000 Hz，因此有：

$$N^*(s)=(\theta(s)-Y(s)/K)Q(s) \quad (7)$$

$$Q(s)=1/(\tau s+1)$$

$$\tau=1/(2\,000\times 2\pi) \quad (8)$$

然后考虑 $O(s)$ 的设计，在理想情况下可以推导出 $O(s)=G_c^{-1}(s)G_p^{-1}(s)$ 。

但是 $G_c(s)$ 和 $G_p(s)$ 的精确模型无法得到，并且自身物理参数也随着外部条件的变化而变动，在扰动补偿函数中只能用近似之后的名义模型 1 和 $Q_m(s)$ 分别代替，这些近似不可避免地带来一定的解耦误差，因此

$$O(s)\approx G_{cn}^{-1}(s)G_{pm}^{-1}(s)=s^2J/K_T \quad (9)$$

最终，在电流环前综合点的扰动补偿量为：

$$C(s)=N^*(s)O(s)=s^2JQ(s)(\theta(s)-Y(s)/K)/K_T \quad (10)$$

以上讨论了扰动观测器的传递函数实现方式，为了采用数字控制器实现扰动观测器，给出公式(7)~(10)对应的脉冲传递函数如下：

$$N^*(z)=(\theta(z)-Y(z)/K)Q(z) \quad (11)$$

$$Q(z)=0.118\,1/(1-0.001\,9z^{-1}) \quad (12)$$

$$O(z)=J(z-1)^2/T_s^2K_Tz^2 \quad (13)$$

$$C(z)=\frac{0.118\,1(\theta(z)-Y(z)/K)(z-1)^2J}{(1-0.001\,9z^{-1})T_s^2z^2K_T} \quad (14)$$

式中： T_s 为采样时间。此外还需指出：(1) 只有当扰动引起输出发生偏移之后才能被检测出来；(2) 在数字系统中，使用欧拉积分的逆运算得到微分值引入了两拍的延迟；(3) 采样存在一定的量化误差、延时和噪声；(4) 未建模的非线性因素。考虑到这些因素，扰动的解耦精度将会进一步下降，扰动不能被完全抑制。

4 仿真验证

为了验证所设计的扰动观测器的效果，在相同前向通道 PD 控制器条件下，对带有扰动观测器和不带有扰动观测器的精跟踪系统使用 Matlab/Simulink 进行了仿真，仿真框图如图 5 所示。仿真实验研究了扰动的时域响应、频域响应和扰动观测器的鲁棒性。为了使对比尽量客观，先通过多次调试，使数字 PD 控制器具有很好的动静态性能和适当的稳定裕度，再进行比较。仿真中各环节用到的参数如下： $T_s=1\times 10^{-5}$ s, $K_p=0.007$, $K_d=0.001\,2$, $K=5\times 10^{-5}$, $K_{ip}=30$, $K_{ii}=3\,000$ ，电机位置编码器为 20 位，光斑位置传感器角分辨率为 2 μ rad。电机的参数^[18]如下： $L=310\ \mu$ H, $R=0.85\ \Omega$, $K_T=0.024\ \text{N}\cdot\text{m}/\text{A}$, $J=3.1\times 10^{-6}\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$ ，电流

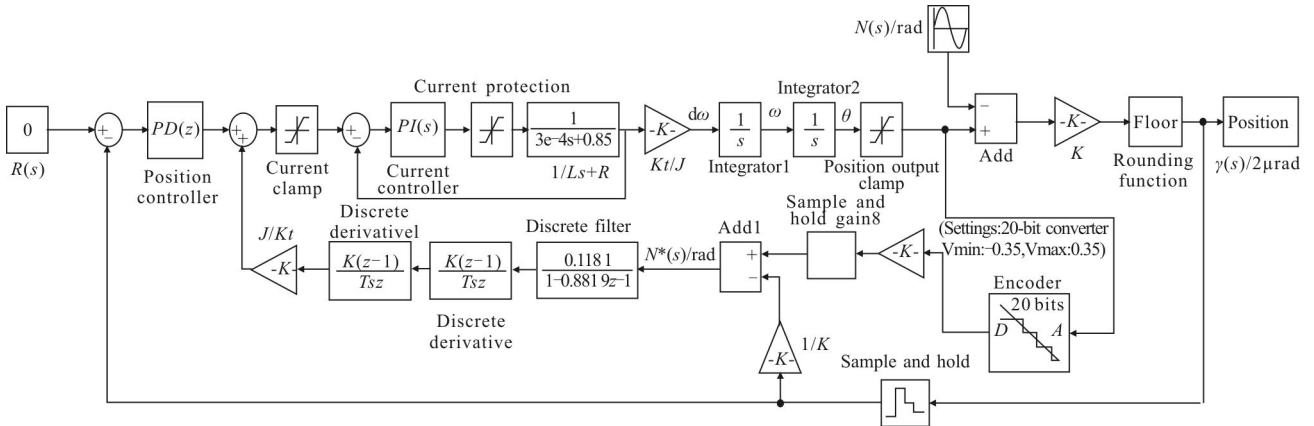


图 5 基于扰动观测器的仿真框图

Fig.5 Simulation structure based on disturbance observer

环控制量钳位为 ± 15 A。实验中将跟踪中心坐标设为 0, 首先施加 15° 、10 Hz 的正弦外部扰动, 起初仅使用 PD 控制器, 在 1.05 s 后加入扰动观测器, 其位置响应曲线如图 6 所示; 然后施加 1° 、100 Hz 的正弦外部扰动, 重复上述实验步骤, 其位置响应曲线如图 7 所示。从图 6 和图 7 中可以明显看出, 加入扰动观测器后, 扰动的响应幅度大大降低。对 15° 、10 Hz 的扰动, 跟踪最大误差为 $\pm 4 \mu\text{rad}$, 相比无扰动观测器时误差减少了 90.0%, 扰动的隔离度提高了 20.0 dB。

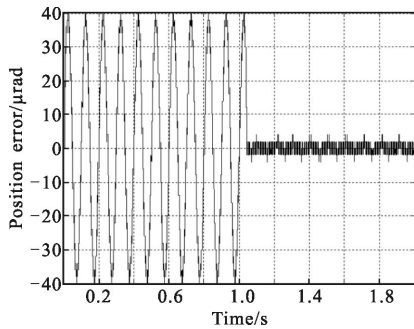


图 6 15° 、10 Hz 扰动的响应

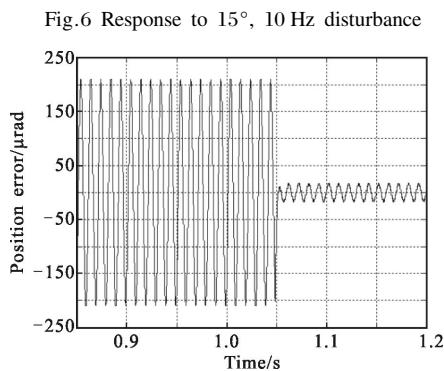


图 7 1° 、100 Hz 扰动的响应

Fig.7 Response to 1° , 100 Hz disturbance

对 1° 、100 Hz 的扰动, 跟踪最大误差为 $\pm 18 \mu\text{rad}$, 相比无扰动观测器时误差减少了 91.4%, 扰动的隔离度提高了 21.3 dB。由此可见扰动观测器的效果令人十分满意。

为了更全面地比较扰动观测器对扰动的抑制能力, 对扰动响应进行频域测试及分析。图 8 和图 9 分别是 15° 和 1° 扰动幅值下, 带扰动观测器和不带扰动状态观测器的扰动传递函数的 Bode 图。从图中不难看出, 每条响应曲线从斜率上看大体分为三部分, 即斜率为 0 dB/sec 部分、斜率两次转折间部分、斜率第二次转折后部分。斜率为 0 dB/sec 说明扰动响应的幅值(跟踪误差)没有跟随频率变化, 此时跟踪精

度最高; 斜率第一次转折意味着跟踪误差已经不能维持在最小值, 随扰动频率增加而增加, 但扰动抑制效果仍然相对明显; 斜率第二次转折意味着电枢电流已经达到保护钳位值, 电机性能已经被最大利用, 对扰动已经没有抑制效果。

带有扰动观测器与不带有扰动观测器的两组曲线经比较有如下特点: (1) 前者斜率为 0 dB/sec 的频率范围远大于后者, 说明前者可以在更大范围内保证跟踪精度为精跟踪光学系统所能决定的最小分辨率 $2 \mu\text{rad}$; (2) 前者在斜率两次转折间的各个频率处对扰动的抑制能力都明显优于后者, 扰动隔离度提升一般都在 20 dB 以上, 即扰动抑制效果提升了 10 倍以上(如果将 PD 控制器增益增加 10 倍以上会使系统变得不稳定和振荡); (3) 两者斜率第二次转折的频率在同一点附近, 在 15° 时为 100 Hz, 在 1° 时为 350 Hz, 频率的平方与幅度的乘积近似为同一常数, 这验证了公式(5)的结论。

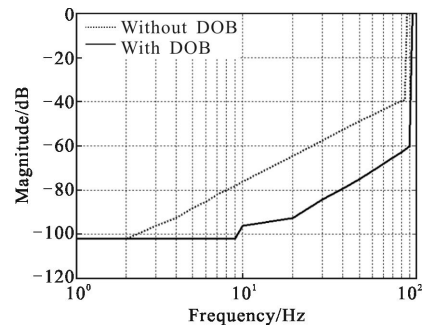


图 8 15° 扰动响应的 Bode 图

Fig.8 Bode diagram of disturbance response to 15° disturbance

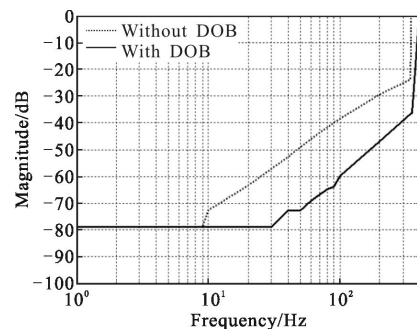


图 9 1° 扰动响应的 Bode 图

Fig.9 Bode diagram of disturbance response to 1° disturbance

受到诸如视在转动惯量变动、温度、磁路饱和、摩擦力、机械谐振等因素的影响, 系统的物理参数不可避免地处于变化中, 工程上一般认为物理参数在 $\pm 10\%$

以内变动,这对扰动观测器的鲁棒性提出了要求。在上一实验基础上,人为给被控对象参数分别加入 $\pm 15\%$ 的变动,扰动观测器的各参数保持不变。表 1 为 15° 扰动下的实验结果,表 2 为 1° 扰动下的实验结果。

表 1 15° 扰动下参数变化 15% 时的扰动隔离度提高程度和跟踪误差

Tab.1 Improvement of disturbance isolation degree and tracking error when parameters changes in 15% under 15° disturbance

Frequency/Hz	15%/dB · μrad^{-1}	-15%/dB · μrad^{-1}
5	8.0/ ± 4	9.5/ ± 4
10	15.1/ ± 6	13.3/ ± 10
20	16.5/ ± 20	15.1/ ± 32
50	17.8/ ± 102	15.0/ ± 192
90	17.5/ ± 306	13.1/ ± 592

表 2 1° 扰动下参数变化 15% 时的扰动隔离度提高程度和跟踪误差

Tab.2 Improvement of disturbance isolation degree and tracking error when parameters changes in 15% under 1° disturbance

Frequency/Hz	15%/dB · μrad^{-1}	-15%/dB · μrad^{-1}
5	6.0/ ± 2	6.0/ ± 2
10	6.0/ ± 2	6.0/ ± 2
50	16.6/ ± 8	14.2/ ± 14
100	16.9/ ± 26	14.3/ ± 48
200	15.0/ ± 90	13.4/ ± 148
300	12.9/ ± 190	11.8/ ± 294

由表可见,在系统物理参数变化 15% 时扰动隔离度有所降低,但依然比没有使用扰动观测器时提高了至少 1 倍,随着扰动频率大于 10 Hz,扰动隔离度的提高更为明显,最优的情况已经达到 17.8 dB。因为 $\pm 15\%$ 的参数变化范围已经很好地满足实际工程需要,所以基于扰动观测器的系统具有很好的鲁棒性和工程适应性。

5 结 论

文中围绕如何提高空间光通信 PAT 系统的抗扰动能力这一问题展开研究,首先对 PAT 系统进行

分析和合理简化,阐述了扰动的作用与抑制原理,然后提出一种带扰动观测器的控制方法。通过对精跟踪系统的大量仿真,从不同角度对其效果进行了验证,得出以下结论:

(1) 该方法避免了单纯提高前向通道增益来增加抗干扰能力所导致的系统稳定性问题。

(2) 该方法极大提高了系统的抗干扰能力,与普通 PD 控制方法相比,对 15° 、10 Hz 的扰动,扰动隔离度提高了 20.0 dB;对 1° 、100 Hz 的扰动,扰动隔离度提高了 21.3 dB。

(3) 该方法具有很强的鲁棒性,在系统物理参数变化 15% 时扰动隔离度依然比没有使用扰动观测器时提高了至少 6 dB;在系统参数变化时,扰动隔离度的降低也说明在线辨识系统模型对提高扰动观测器性能有重要的作用,这方面内容将在后续文章中进一步阐述。

(4) 该方法具有结构相对简单、原理清晰、易于实现等优点,对大范围与高动态的精密光电跟踪系统有一定的借鉴价值。

参考文献:

[1] Moll F, Mitzkus W, Horwath J, et al. Demonstration of high-rate laser communications from fast airborne platform: flight campaign and results[C]//Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks X, SPIE, 2014, 9248: 1-6.

[2] Rabinovich W S, Moore C I, Burris H R, et al. Free space optical communications research at the U.S. Naval Research Laboratory[C]//Free-Space Laser Communication Technologies XXII, SPIE, 2010, 7587: 1-15.

[3] Ortiz G G, Lee S, Monacos S P, et al. Design and development of a robust ATP subsystem for the Altair UAV-to-ground lasercomm 2.5 -Gbps demonstration [C]//Free-Space Laser Communication Technologies XV, SPIE, 2003, 4975: 103-114.

[4] Zhao Xin, Song Yansong, Tong Shoufeng, et al. Dynamic demonstration experiment of acquisition, pointing and tracking system in space laser communications [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(3): 131-136. (in Chinese)

赵馨, 宋延嵩, 佟首峰, 等. 空间激光通信捕获、对准、跟踪系统动态演示实验[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 131-136.

[5] Lin Yixiang, Ai Yong, Shan Xin, et al. Experiment of ship-shore free-space optical communication [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, 25(3): 478-484. (in Chinese)

- 林貽翔, 艾勇, 单欣, 等. 船-岸无线激光通信实验 [J]. 光电子·激光, 2014, 25(3): 478-484.
- [6] George Eliis. Control System Design Guide [M]. 4th ed. California: Elsevier Academics Preess, 2012.
- [7] Hu Zhen, Jiang Huilin, Tong Shoufeng. Improvement of ATP system tracking performance of laser communication using sliding mode control [J]. *Transaction of Beijing Institute of Technology*, 2012, 32(5): 522-525. (in Chinese)
- 胡贞, 姜会林, 佟首峰. 滑模控制对激光通信 ATP 系统跟踪性能的改善[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(5): 522-525.
- [8] Cao Yang, Zhao Mingfu, Luo Binbin, et al. Airborne platform' s tracking algorithm for free space optical communication based on IMMPF methods [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 3065-3068. (in Chinese)
- 曹阳, 赵明富, 罗彬彬, 等. 机载空间光通信平台的交互多模型粒子滤波跟踪算法 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 3065-3068.
- [9] Zhang Liang, Wang Jianyu, Jia Jianjun, et al. Design and performance of fine tracking system based on CMOS for quantum communication [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(2): 175-179. (in Chinese)
- 张亮, 王建宇, 贾建军, 等. 基于 CMOS 的量子通信精跟踪系统设计及检验[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 175-179.
- [10] Tong Shoufeng, Jiang Huilin, Liu Yunqing, et al. Optimum design of bandwidth for the APT coarse tracking assembly in free space laser communication [J]. *Opto -Electronic Engineering*, 2007, 34(9): 16-20. (in Chinese)
- 佟首峰, 姜会林, 刘云清, 等. 自由空间激光通信系统 APT 粗跟踪伺服带宽优化设计[J]. 光电工程, 2007, 34(9): 16-20.
- [11] Jiang Huilin, Tong Shoufeng, Zhang Lizhong. The Technologies and System of Space Laser Communication [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010. (in Chinese)
- 姜会林, 佟首峰, 张立中. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [12] Li Xiantao, Zhang Bao, Sun Jinghui, et al. ADRC based on disturbance frequency adaptive of aerial photoelectrical stabilized platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1574-1581. (in Chinese)
- 李贤涛, 张葆, 孙敬辉, 等. 航空光电稳定平台扰动频率自适应的自抗扰控制 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1574-1581.
- [13] Li Jiaquan, Ding Ce, Kong Dejie, et al. Velocity based disturbance observer and its application to photoelectric stabilized platform [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(5): 998-1004. (in Chinese)
- 李嘉全, 丁策, 孔德杰, 等. 基于速度信号的扰动观测器及在光电稳定平台的应用 [J]. 光学 精密工程, 2011, 19(5): 998-1004.
- [14] Fu Jinbao, Ding Yalin, Zhong Chongliang, et al. Compensation controller with disturbance observer for forward image motion of aerial camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 1456-1463. (in Chinese)
- 付金宝, 丁亚林, 仲崇亮, 等. 带干扰观测器的航空相机前向像移补偿控制器[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(6): 1456-1463.
- [15] Lee S, Ortiz G G, Alexander J W, et al. Accelerometer-assisted tracking and pointing for deep space optical communications [C]/IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2001, 3: 3-1559.
- [16] Tan Taog, Huang Yongmei, Fu Chengyu, et al. Acceleration feedback of a CCD-based tracking loop for fast steering mirror[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(1): 13001-13006.
- [17] Chen Boshi, Ruan Yi, Chen Weijun. Electric Drive Automatic Control System-Motion Control System [M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2010. (in Chinese)
- 陈伯时, 阮毅, 陈维钧. 电力拖动自动控制系统-运动控制系统[M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2010.