

空间光通信粗瞄系统的扰动估计与补偿*

王岩, 崔宁, 于志亮

(哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:粗瞄系统以直流力矩电机驱动二维转台为执行机构,通过粗瞄控制器对其进行控制。对系统受到的扰动进行分析,应用了最速跟踪微分器提取速度信号;以二维转台的方位轴为控制对象,在其位置环、速度环采用级联线性自抗扰控制器,通过线性扩张状态观测器主动补偿扰动,达到内外环双重隔离扰动的目的,提高跟踪精度;之后进行了实验分析。分析结果表明:在加入同样的模拟扰动信号,输入 2 Hz, 5 Hz 和 8 Hz 的正弦信号时,与比例、微分、积分控制器相比,跟踪误差的标准差约降低 50%;验证了线性扩张状态观测器具有扰动补偿效果;在输入不同频率正弦信号时,自抗扰控制器对输入信号频率的变化不敏感,仍能保证较高的跟踪精度。

关键词:空间光通信;粗瞄系统;线性自抗扰;扰动补偿

中图分类号:TN929.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)05-178-07

Disturbance estimation and compensation of free space optical communication coarse tracking system

WANG Yan, CUI Ning, YU Zhiliang

(School of Aerospace, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Affected by the influence of the attitude variation and vibration of the satellite platform in the process of tracking and pointing, free space optical communication terminal will therefore reduce the tracking precision of the system. In order to improve the system's ability for the purpose of resisting disturbance, on the basis of coarse tracking system, the cascade linear active disturbance rejection controller was put forward. The coarse tracking system used direct current brushless torque motor driving two-dimensional turntable as the actuator, and was controlled by the coarse tracking controller. Analysis of the system disturbance is required, for which the tracking differentiator is applied to extract. With azimuth axis of the two-dimensional turntable as the object, the cascade linear active disturbance rejection controller was applied to position loop and speed loop for the sack of active disturbance compensation through linear extended state observer. Therefore, double isolation of internal and external loop disturbance can be achieved, and the tracking precision shall be improved. The experimental analysis, and a comparison with the proportion integral derivation controller were also included. The research results show that there is a 50% decrease of standard deviation referred to the tracking error, when inputting 2 Hz, 5 Hz and 8 Hz sinusoidal signals with the same disturbance signal simulation. At the same time, the observer's disturbance compensation effect in the circumstance of linear expansion was verified. A high tracking accuracy is still ensured when active disturbance rejection control is not sensitive to the frequency variation of inputted sinusoidal signal with changing frequency.

Key words: free space optical communication; coarse tracking system; linear active disturbance rejection; disturbance compensation

在空间光通信系统中,国内外普遍采用捕获、瞄准和跟踪(Acquisition, Pointing and Tracking, APT)复合控制技术^[1-2]。粗跟踪系统负责光通信系统开环捕获和粗跟踪,由于机械结构的限制,其带宽较低,跟踪精度受外界影响较大。星上光通信终端主要受到空间环境、星体姿态变化及振动、系统机械及传感器噪声等因素的干扰,这些扰动带来的非线性影响对链路保持非常不利^[3-4]。随着通信距离增加,这些干扰的影响更为明显。因此,提高系统跟踪精度,是提高远距离光通信链

路稳定性的关键。粗跟踪系统就是隔离、降低干扰的关键一环。

目前,国内外对于卫星平台的扰动抑制多采用被动隔离和主动补偿的方法。被动隔离需要在光通信终端与卫星平台间增加隔离装置,通过隔离装置自身的阻尼降低振动的能量,有效减少高频振动的影响,但对扰动的中低频成分抑制效果较差。来自卫星平台的扰动具有低频大振幅的特点,主动补偿方法可以对中低频的扰动进行抑制^[5-6]。因此,选择一种能够主动补偿扰动的控制方法尤其重要。自

* 收稿日期:2016-04-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10904026)

作者简介:王岩(1972—),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:yanw@hit.edu.cn

抗扰控制^[7]是 Han 提出的一种基于扩张状态观测器的非线性控制技术,其非线性性质可以带来更高的精度及反馈效率,但也给工程设计造成了较大问题,控制参数过多,难以确定稳定性边界。Gao 等对自抗扰控制器(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)进行了线性化实现,减少了控制器参数,易于工程应用^[8]。陈增强等给出了线性自抗扰控制器闭环稳定性的证明^[9]。袁东等提出了基于频带特性的线性自抗扰控制器的参数配置方法,使得自抗扰控制器更易于工程实现^[10]。张荣等提出了一种串联型的自抗扰控制器,用于解决高阶扩张状态观测器参数过多难于调整的问题,采用低阶扩张状态观测器串联的形式降低参数调整难度^[11]。自抗扰控制技术已在诸多领域获得了广泛应用^[12-14]。

本文提出了一种级联线性自抗扰控制器,以光通信粗瞄系统为控制对象,在粗瞄系统方位轴位置环、速度环采用二阶线性自抗扰控制器,实现对扰动双重隔离的目的,在模拟的卫星平台扰动下跟踪不同频率输入信号,对跟踪精度及扰动估计的作用进行了详细分析。

1 粗瞄系统扰动分析

粗瞄系统由二维转台、方位轴电机和俯仰轴电机构成,采用光电编码器测量电机转动角度,其系统结构如图 1 所示。光斑探测器接收入射光信号,将获得的位置误差信息传递给粗瞄控制器作为期望输入信息,终端天线的转角位置由光电编码器返回给粗瞄控制器作为反馈信息。控制器驱动无刷直流力矩电机控制终端天线的转动,进而改变出射光的出射角度,由此构成粗瞄反馈系统。

粗瞄系统的扰动主要来自系统的内部和外部。内部扰动主要为平台轴系的摩擦力和装配误差。外部扰动有空间环境干扰和来自卫星平台的姿态变化及振动。空间环境干扰中只有微小陨石碰撞和空间温度变化的影响较大,后者可以看作是机械形变的一种,文献[15]中做了细致的分析,暂不考虑其影响。文中主要讨论来自卫星平台的姿态变化及振动对粗瞄系统影响。

欧洲航空局(European Space Agency, ESA)发射了 OLYMPUS 通信卫星对振动信号进行测试^[16]。从测量数据可知对光通信影响较大的振动频谱为 1 ~ 100 Hz,如图 2 所示。ESA 在设计光通信仿真系统 SILEX 的平台振动功率谱密度函数时采用如式(1)所示模型。

$$S(f) = 160 / (1 + f^2) \quad (1)$$

式中, $S(f)$ 单位为 $\mu\text{rad}^2/\text{Hz}$ 。

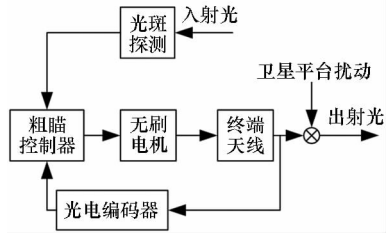


图 1 光通信粗瞄系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of free space optical communication coarse tracking system

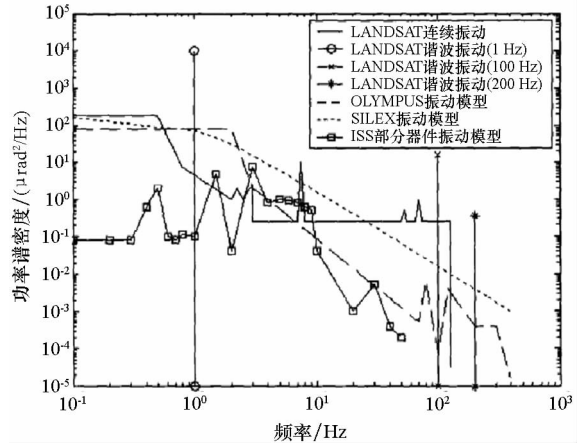


图 2 卫星振动功率谱密度图

Fig. 2 Power spectral density diagram of satellite vibration

根据 ESA 给出的功率谱密度函数,如图 2 所示,设计一个模拟星体振动的滤波器,输入为高斯白噪声,其传递函数为:

$$W(s) = \frac{100}{0.000\ 023s^3 + 0.005\ 3s^2 + 0.4s + 1} \quad (2)$$

已知卫星平台的姿态控制频率为 2 Hz,姿态调整的幅值约为 50 μrad ~ 200 μrad ,因此在振动信号上叠加频率为 2 Hz,幅值为 100 μrad 的正弦信号,模拟星体姿态变化扰动。最终模拟出卫星平台姿态变化及振动的信号,如图 3 所示。

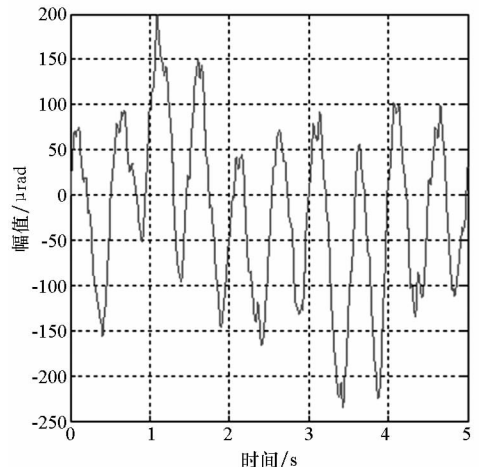


图 3 模拟卫星平台姿态变化及振动

Fig. 3 Satellite platform attitude changes and vibration simulation

2 速度信号的提取

在实际控制系统中,光电编码器输出的角位置信号通常不连续且伴有随机噪声,而速度信号是由位置信号的微分 $s/(Ts + 1)$ 近似提取,时间常数 T 越小,微分信号的跟踪精度就越高,但是其对噪声的放大也更为显著。所以合理提取速度信号对提高控制系统性能非常重要。

最速跟踪微分器 (Tracking Differentiator, TD) 常被用于安排过渡过程和合理地获得微分信号,可以达到抑制噪声的目的。应用 TD 的这一特性,提取速度信号。其离散表达式为:

$$\begin{cases} y_1(k+1) = y_1(k) + hy_2(k) \\ y_2(k+1) = y_2(k) + h \cdot fhan[y_1(k) - y(k), y_2(k), r, h] \end{cases} \quad (3)$$

其中: y 为光电编码器输出的位置信号; y_1 为位置信号估计; y_2 为速度信号估计; r, h 为可调参数, $fhan$ 具体形式可以参考文献 [17]。通过合理选取参数 r, h 的值,可以使速度信号的噪声减小,又不会影响位置信号的精度和实时性。

对频率为 2 Hz,幅值为 1000 μrad 的正弦输入信号进行了滤波测试,在输入信号中叠加了幅值为 1.5 μrad 的随机噪声,得出两组速度信号的仿真结果,图 4 为位置信号微分得到的速度信号,图 5 为采用 TD 滤波后的速度信号,通过两图对比可以看出经过 TD 滤波后速度信号的噪声明显减小。图 6 所示为两种滤波方式速度信号误差对比,虚线为未采用 TD 滤波的速度信号误差,实线为采用 TD 滤波的速度信号误差。通过对比可以看出采用 TD 滤波后的速度信号精度提升了一倍以上。

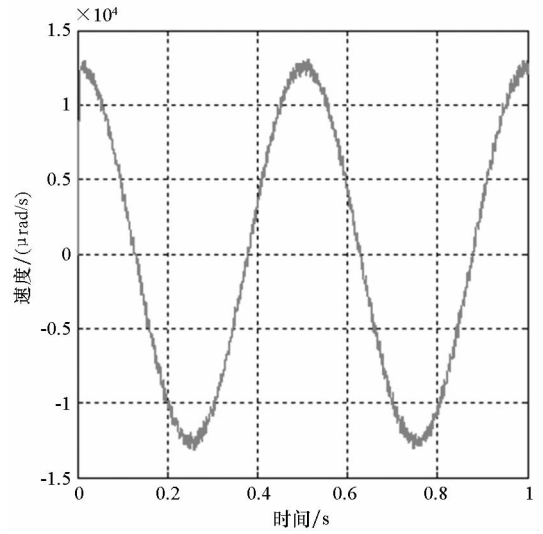


图 5 采用 TD 滤波的速度信号

Fig. 5 Speed signal with TD filtration

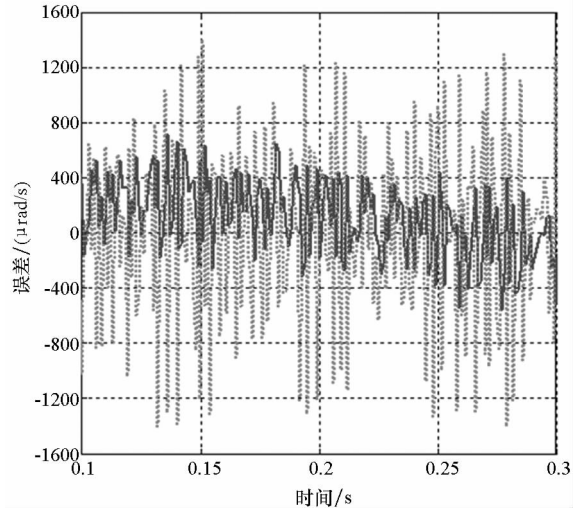


图 6 两种滤波方式的速度信号误差

Fig. 6 Speed signal error with two filtering methods

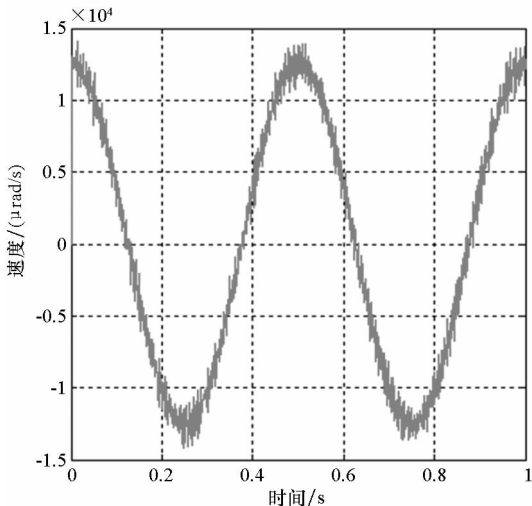


图 4 未采用 TD 滤波的速度信号

Fig. 4 Speed signal with no TD filtration

3 级联线性自抗扰控制器设计

光通信粗跟踪系统属于位置伺服控制系统,通常采用三闭环控制方法,电流环为比例控制器,将电流环及电机负载作为被控对象。位置环和速度环采用级联二阶线性自抗扰控制器。线性自抗扰控制器将系统模型的不确定性及外界扰动归纳为总和扰动,通过线性扩张状态观测器对其估计补偿。这种主动抗扰补偿的方式降低了带宽及机械谐振对系统的限制,提高了系统位置环、速度环的扰动抑制能力,进一步降低终端的跟踪误差,达到了双重隔离扰动的目的。粗瞄系统接连线性自抗扰控制器结构如图 7 所示。

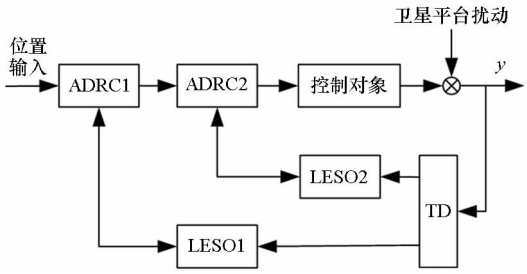


图7 级联线性自抗扰控制器结构图
Fig.7 Structure diagram of cascade linear active disturbance rejection controller

图8为线性自抗扰控制器的结构图,速度环和位置环采用三阶线性扩张状态观测器,其表达式可以描述为:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_{i1} \\ \dot{z}_{i2} \\ \dot{z}_{i3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\beta_1 & 1 & 0 \\ -\beta_2 & 0 & 1 \\ -\beta_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{i1} \\ z_{i2} \\ z_{i3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \beta_1 \\ 1 & \beta_2 \\ 0 & \beta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_i u_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: u_i 为控制器输入; y_i 为控制器输出; z_{i1}, z_{i2} 和 z_{i3} 为观测器输出; β_1, β_2 和 β_3 为输出误差权重因子; b_i 为补偿系数; i 为1时表示位置环, i 为2时表示速度环。

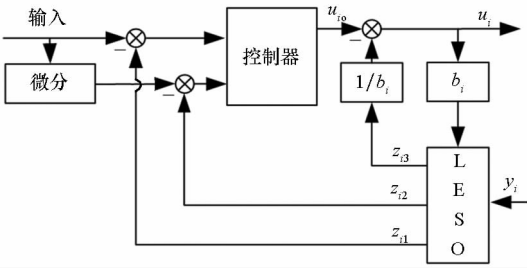


图8 线性自抗扰控制器结构图
Fig.8 Structure diagram of linear active disturbance rejection controller

将线性扩张状态观测器采用Z变换法离散化,式(6)为位置环离散化的结果,式(7)为速度环离散化的结果,其中观测器的参数采用带宽参数化法选取:

$$\begin{cases} \beta_{i1} = 3\omega_{i0} \\ \beta_{i2} = 3\omega_{i0}^2 \\ \beta_{i3} = \omega_{i0}^3 \end{cases} \quad (5)$$

其中, ω_{i0} 为观测器带宽,这里 $\omega_{10} = 240 \text{ rad}$, $\omega_{20} = 300 \text{ rad}$ 。

$$\begin{bmatrix} z_{11}(k+1) \\ z_{12}(k+1) \\ z_{13}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4317 & 0.0007 & 0 \\ -125 & 0.9301 & 0.001 \\ -9596 & -5.437 & 0.9981 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{11}(k) \\ z_{12}(k) \\ z_{13}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0.5683 \\ 0.08 & 125 \\ -0.152 & 9569 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 u_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} z_{21}(k+1) \\ z_{22}(k+1) \\ z_{23}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3297 & 0.0006 & 0 \\ -180 & 0.8964 & 0.001 \\ -17002 & -10 & 0.9964 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{21}(k) \\ z_{22}(k) \\ z_{23}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0.6703 \\ 0.03 & 180 \\ -0.117 & 17002 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_2 u_2 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

位置环和速度环都采用比例、微分(Proportion Derivative, PD)控制律,表达式为:

$$u_{i0} = k_{pi}(r_i - z_{i1}) + k_{di}(\dot{r}_i - \dot{z}_{i2}) \quad (8)$$

其中, r_i 为输入信号, \dot{r}_i 为输入信号的微分, k_{pi} 为比例系数, k_{di} 为微分系数, u_{i0} 为PD控制器输出。最终的控制量输出还要加入扰动估计补偿量,如式(9)所示。

$$u_i = u_{i0} - z_{i3}/b_i \quad (9)$$

4 实验结果及分析

为了验证级联线性自抗扰控制器对卫星平台扰动的抑制能力,以光通信粗瞄系统方位轴进行实验验证。控制系统采用TMS320F2812作为处理器,控制频率为1 kHz;22位光电编码器作为角位置传感器,最小分辨率为 $1.5 \mu\text{rad}$ 。通过软件编程方式模拟产生卫星平台扰动信号,如图3所示,叠加到位置反馈通道中。

为了评价级联线性自抗扰控制对扰动的抑制能力,与位置、速度环均为比例、积分、微分(Proportion Integral Derivative, PID)控制的方法进行对比。通过实测得到两种算法的闭环带宽,调整控制器参数使二者相近。图9为两种方法的闭环幅相频图。

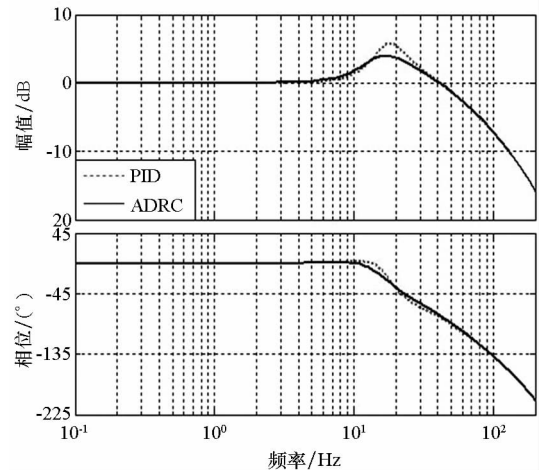


图9 系统闭环幅相频图
Fig.9 Amplitude-phase frequency diagram of closed-loop system

为了检验系统对运动目标的动态跟踪性能,分别对输入频率为 2 Hz, 5 Hz 和 8 Hz, 输入幅值为 1000 μrad 的正弦信号进行跟踪, 并对比 PID 控制器的结果。实验参数与实测带宽相同, 线性自抗扰控制器的参数见表 1, T_0 为控制系统采样周期。

表 1 控制器参数配置表

Tab. 1 Controller parameter configuration table

参数	取值
k_{pi}	800
k_{di}	1.5
ω_{i0}	240 rad/s
b_i	80
k_{pi}	400
k_{di}	40
ω_{i0}	300 rad/s
b_i	30
r	35 000
h	0.001 5
T_0	0.001 s

在输入信号频率为 2 Hz 时, 图 10 所示为 ADRC 控制器与 PID 控制器的跟踪误差曲线。由图 10 可以看出, PID 控制器误差范围在 $-35 \mu\text{rad} \sim 28 \mu\text{rad}$, ADRC 控制器误差范围在 $-12 \mu\text{rad} \sim 12 \mu\text{rad}$ 。

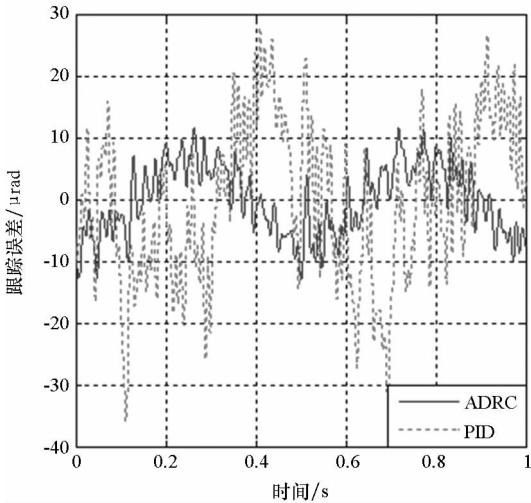


图 10 输入信号为 2 Hz 时跟踪误差

Fig. 10 Tracking error with 2 Hz input signal

在输入信号频率为 5 Hz 时, 图 11 所示为 ADRC 控制器与 PID 控制器的跟踪误差曲线。由图 11 可以看出, PID 控制器误差范围在 $-42 \mu\text{rad} \sim 38 \mu\text{rad}$, ADRC 控制器误差范围在 $-17 \mu\text{rad} \sim 21 \mu\text{rad}$ 。

在输入信号频率为 8 Hz 时, 图 12 所示为 ADRC

控制器与 PID 控制器的跟踪误差曲线。由图 12 可以看出, PID 控制器误差范围在 $-58 \mu\text{rad} \sim 56 \mu\text{rad}$, ADRC 控制器误差范围在 $-25 \mu\text{rad} \sim 24 \mu\text{rad}$ 。

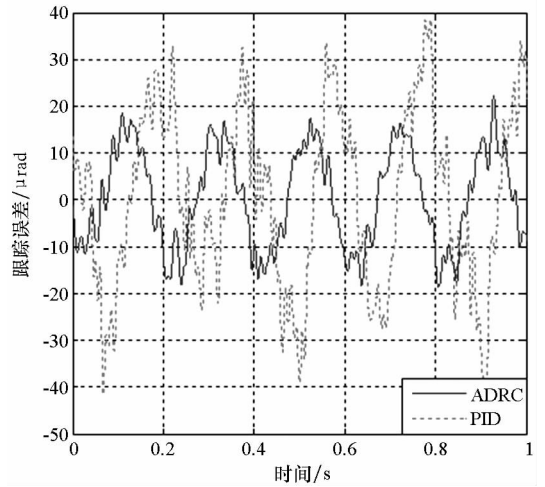


图 11 输入信号为 5 Hz 时跟踪误差

Fig. 11 Tracking error with 5 Hz input signal

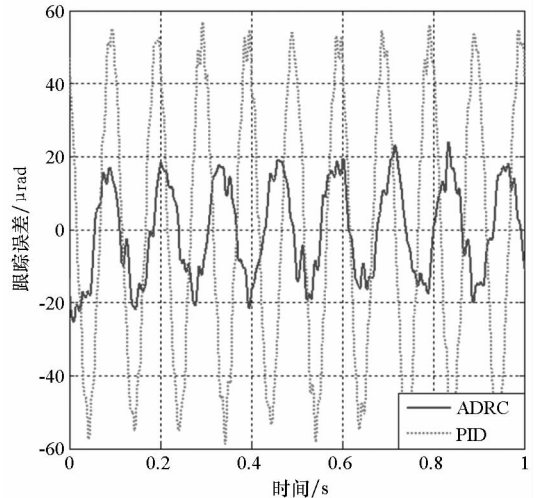


图 12 输入信号为 8 Hz 时跟踪误差

Fig. 12 Tracking error with 8 Hz input signal

表 2 为 PID 和 ADRC 算法误差分析。其中, err 为误差的均值, $stderr$ 为误差的标准差, $abserr$ 为误差的绝对值, $stdabs$ 为误差绝对值的标准差。

表 2 PID 和 ADRC 算法误差分析

Tab. 2 Error analysis of PID algorithm and ADRC algorithm

	频率/Hz	err	stderr	abserr	stdabs
PID	2	0.35	12	9.75	7
ADRC	2	-0.23	5.66	4.8	3.02
PID	5	0.36	20.47	17.21	11.07
ADRC	5	0.15	11.25	9.81	5.5
PID	8	0.38	30.15	28.24	19.8
ADRC	8	0.19	16.78	14.19	9.05

由表2可以看出,在跟踪过程中,ADRC控制器的误差标准差及误差绝对值的标准差比PID控制器的约减小50%。这是由于扩张状态观测器可以对系统的扰动进行估计,并直接补偿在前向通道中,使得ADRC控制器有更好的抗扰及跟踪性能。

为了验证扩张状态观测器对扰动估计的作用,系统记录了输入信号为5 Hz时位置环和速度环的控制量及扰动估计补偿量,如图13、图14所示。图13中虚线表示位置环输出的控制量,由位置控制律的输出和扰动估计补偿量(实线部分)共同构成;图14中虚线表示速度环输出的控制量,由速度控制律的输出和扰动估计补偿量(实线部分)共同构成。由图13、图14可以看出,控制量中的一部分是由扰动估计补偿量产生,说明扩张状态观测器发挥了扰动估计的作用。并且对比两图的扰动估计补偿量的频率,位置环对低频扰动做出了估计,速度环对较高频的扰动做出了估计,内外两环的线性自抗扰控制器起到了双重隔离扰动的目的,为精瞄系统提供了更加稳定的视场。

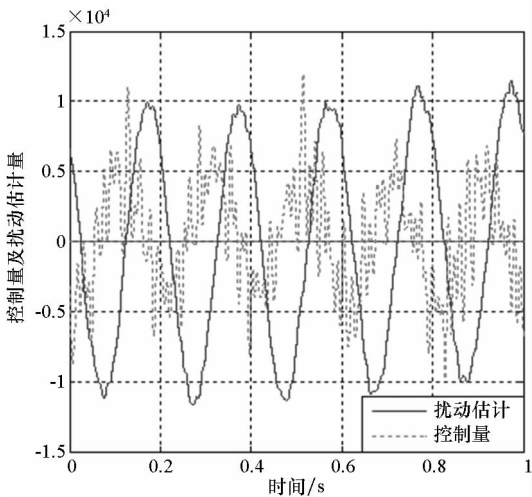


图13 5 Hz时位置环控制量及扰动估计

Fig. 13 Controlled variable and disturbance estimation of position loop with 5 Hz input signal

为了进一步验证级联线性自抗扰控制器的性能,输入一组频率变化的正弦信号进行跟踪测试。输入信号幅值为1000 μrad ,频率为2~8 Hz,如图15所示。图16为两种算法在不同周期输入信号下的跟踪误差,PID控制方法的跟踪误差随着输入频率的增高而增加,误差范围从-20 μrad ~20 μrad 增加到-60 μrad ~60 μrad 附近;ADRC控制器的误差范围从-10 μrad ~10 μrad 增加到-20 μrad ~20 μrad 附近,并且输入频率由2 Hz变化到8 Hz的过程中,误差基本都保持在-20 μrad ~20 μrad 之内。

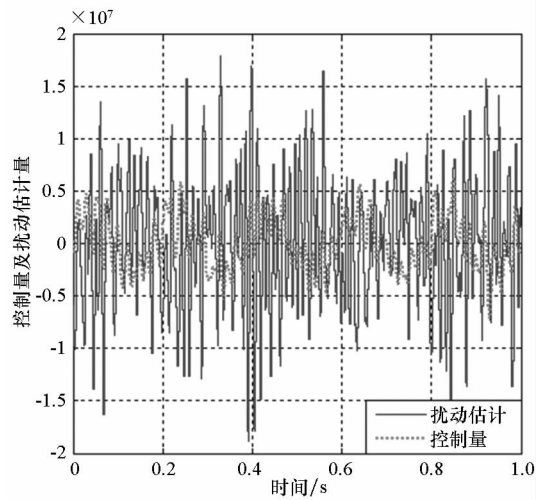


图14 5 Hz时速度环控制量及扰动估计

Fig. 14 Controlled variable and disturbance estimation of speed loop with 5 Hz input signal

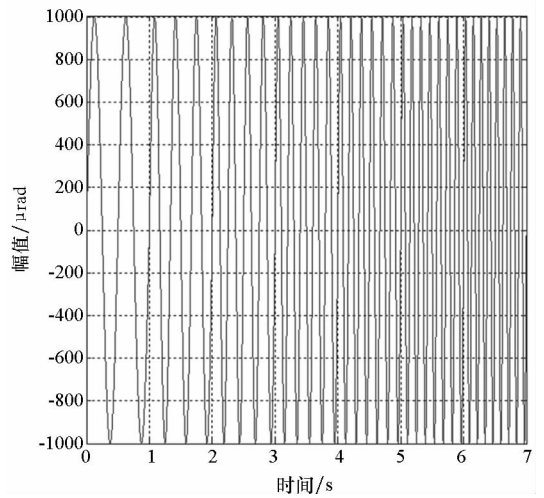


图15 不同周期输入信号

Fig. 15 Different frequency period input signal

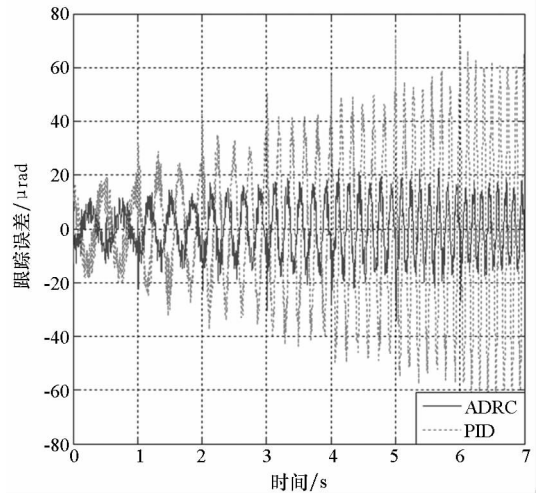


图16 不同周期输入信号时的跟踪误差

Fig. 16 Tracking error with different frequency period input signal

5 结论

为了提高空间光通信粗瞄系统对卫星平台姿态变化及振动的扰动抑制性能,设计了一种级联线性自抗扰控制器,通过实验验证了该控制器的有效性。得到了以下结论:采用最速跟踪微分器可以有效降低速度反馈信号的噪声;在位置环、速度环应用线性扩张状态观测器可以对不同频率成分的扰动信号进行主动扰动补偿,从而形成了内外环对系统扰动的双重隔离;ADRC 控制方法比 PID 控制方法在相近的带宽情况下,有更好的扰动抑制能力。通过 2 Hz, 5 Hz 和 8 Hz 输入信号跟踪性能的实验,采用级联线性自抗扰器的跟踪误差标准差和跟踪误差绝对值的标准差约减小 50%;并对一组频率由 2 ~ 8 Hz 变化的正弦信号进行了跟踪实验,ADRC 控制器相比于 PID 控制器对于输入信号频率的变化有更好的抑制性能。

实验结果表明:相比于 PID 控制器,在闭环带宽受限的情况下,级联线性自抗扰控制器对系统的扰动抑制性能有较大的提高,可以实现空间光通信终端的高精度粗跟踪,为精瞄系统提供更加稳定的视场。

参考文献 (References)

- [1] Toni T N. Pointing, acquisition and tracking system for the free space laser communication system SILEX [J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2381: 194 - 205.
- [2] Guzman M, Kogan A, Kazarian A, et al. Acquisition and pointing control for intersatellite laser communication [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(4): 1239 - 1248.
- [3] Amon S, Kopeika N S. Laser satellite communication network-vibration effect and possible solutions [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(10): 1646 - 1661.
- [4] Ma J, Li X, Yu S Y, et al. Influence of satellite vibration on optical communication performance for intersatellite laser links[J]. Optical Review, 2012, 19(1): 25 - 28.
- [5] Lu W, Liu L R, Sun J F, et al. Analysis of complex axis control loop in satellite laser communications [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2012, 123(5): 458 - 461.
- [6] Orzechowski P K, Chen N, Gibson S, et al. Adaptive control of jitter in a laser beam pointing system [C]//Proceedings of American Control Conference, 2006: 1597 - 1602.
- [7] Han J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009, 56(3): 900 - 906.
- [8] Gao Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based on controller tuning [C]//Proceedings of the American Control Conference, 2003: 4989 - 4999.
- [9] 陈增强, 孙明伟, 杨瑞光. 线性自抗扰控制器的稳定性研究 [J]. 自动化学报, 2013, 39(5): 574 - 580.
CHEN Zengqiang, SUN Mingwei, YANG Ruiguang. On the stability of linear active disturbance rejection control [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(5): 574 - 580. (in Chinese)
- [10] 袁东, 马晓军, 曾庆含, 等. 二阶系统线性自抗扰控制器频带特性与参数配置研究 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1630 - 1640.
YUAN Dong, MA Xiaojun, ZENG Qinghan, et al. Research on frequency-band characteristics and parameters configuration of linear active disturbance rejection control for second-order systems [J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(12): 1630 - 1640. (in Chinese)
- [11] 张荣, 韩京清. 串联型扩张状态观测器构成的自抗扰控制器 [J]. 控制与决策, 2000, 15(1): 122 - 124.
ZHANG Rong, HAN Jingqing. Auto-disturbances rejection controller constructed by cascade extended state observer [J]. Control and Decision, 2000, 15(1): 122 - 124. (in Chinese)
- [12] 李毅, 陈增强, 刘忠信. 自抗扰技术在四旋翼飞行姿态控制中的应用 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(3): 115 - 118, 123.
LI Yi, CHEN Zengqiang, LIU Zhongxin. Attitude control of a quad-rotor robot based on ADRC [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(3): 115 - 118, 123. (in Chinese)
- [13] 黄浦, 葛文奇, 李友一, 等. 航空相机前向像移补偿的线性自抗扰控制 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 812 - 819.
HUANG Pu, GE Wenqi, LI Youyi, et al. Linear auto disturbance rejection control of forward image motion compensation in aerial cameras [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(4): 812 - 819. (in Chinese)
- [14] 张伟, 陈宇中, 胡永明. 遥控武器站的自抗扰控制 [J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(1): 44 - 46.
ZHANG Wei, CHEN Yuzhong, HU Yongming. Active disturbance rejection control of remotely operated weapon station [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(1): 44 - 46. (in Chinese)
- [15] 马晶, 韩琦琦, 于思源, 等. 卫星平台振动对星间激光链路的影响和解决方案 [J]. 激光技术, 2005, 29(3): 228 - 232.
MA Jing, HAN Qiqi, YU Siyuan, et al. The effect of vibration on intersatellite optical communication and the resolving project [J]. Laser Technology, 2005, 29(3): 228 - 232. (in Chinese)
- [16] Wittig M, van Holtz L, Tunbridge D E L, et al. In-orbit measurements of microaccelerations of ESA's communication satellite OLYMPUS [C]//Proceedings of SPIE, 1990: 205 - 214.
- [17] 韩京清. 自抗扰控制技术 [J]. 前沿科学, 2007, 1(1): 24 - 31.
HAN Jingqing. Auto disturbances rejection control technique [J]. Frontier Science, 2007, 1(1): 24 - 31. (in Chinese)