

文章编号 1004-924X(2007)10-1802-07

机载光电转台的谐振分析及自适应滤波器设计

王国富^{1,2}, 余法山¹, 汪旭东¹, 马彩文², 陈良益²

(1. 河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000;

2. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710068)

摘要: 在深入分析光电跟踪转台特性的基础上, 对光电转台进行了数学建模, 并利用转台的转角变化信息, 提出了一种基于角度信息的自适应前馈滤波算法。该算法在不改变机械结构和阻尼因素的条件下, 有效地抑制了光电转台的机械谐振。实验结果证明: 该算法在一个周期后, 系统自动跟踪的最大跟踪误差提高了 $3'$, 是一种易于实现, 设计操作简单, 实效性好的自适应滤波算法, 目前已成功运用到某机载光电对抗转台中, 效果良好。

关键词: 机载光电转台; 机械谐振; 伺服系统; 自适应滤波

中图分类号: TP273; V556.5 **文献标识码:** A

Analysis on resonance of air-borne opto-electronic tracking turntable and design of adaptive filter

WANG Guo-fu^{1,2}, YU Fa-shan¹, WANG Xu-dong¹, MA Cai-wen², CHEN Liang-yi²(1. *Department of Electronical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;*2. *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

Abstract: According to the characteristics of an air-borne opto-electronic tracking turntable and mathematics model of tracking turntable, a new adaptive filter based on angle changes of tracking turntable is presented to restrain the mechanical resonance of the opto-electronic tracking turntable under the conditions of mechanical structure and damp unchanged. The experiment results indicate that the maximum automatic tracking error improves $3'$. The proposed algorithm is a fast and stable algorithm, which can satisfy a real-time adaptive filter and restrain mechanical resonance perfectly. At present, this method has been applied to certain type of air-borne tracking turntable successfully.

Key words: air-borne opto-electronic tracking turntable; mechanical resonance; servo system; adaptive filtering

收稿日期: 2007-05-28; 修订日期: 2007-06-29.

基金项目: 国防重点实验室基金资助项目 (No. 51448030105ZK1801)

1 引言

转台是机载跟瞄系统中的关键设备之一,作为整个系统的基础,其性能的优劣,直接关系到整个系统性能的优劣^[1-4]。在转台伺服系统中,当被控制对象转动惯量较大、粘性摩擦较小、传动装置的刚性较差时,执行电机至被控对象之间的传动存在柔性传动^[5]。因此,在系统运动过程中,传动轴的弹性扭转变形将造成明显的滞后。传动装置在传递运动时含有储能元件,由于它速度阻尼小,传递函数将出现高的谐振峰,形成机械谐振^[6-7]。系统频带反映系统响应的快速性,提高带宽可加快响应速度,提高跟踪精度。当谐振频率在系统频带之外时,对系统动态品质影响较小;但当谐振频率接近系统频带时,对系统的动态性能产生较大影响,使系统不稳定,在某些频段下甚至会损坏精密的光电传感器及耦合轴系,解决此类问题的方法之一就是提高系统带宽,降低谐振对系统性能的影响^[8-9]。但在本文所述的系统中,系统重量有限,材料已定,很难大幅度提高系统带宽,为此,提出了一种针对转角信息的自适应滤波算法。

2 机械结构的数学模型和自适应滤波算法设计

当光电跟踪系统转动时,各轴的转动惯量相对地理坐标系的转动惯量是变化的,存在耦合。跟踪测量系统的方位轴(又称垂直轴)、俯仰轴(又称水平轴)、视轴三轴关系如图 1 所示。三轴之间在初始位置是完全正交的。俯仰轴和视轴绕垂直轴在水平面内旋转,视轴绕俯仰轴在垂直平面内旋转。

下面讨论光电转台处于非正交的情况下各轴的转动惯量。设方位轴坐标系绕其转动轴 $O-z_A$ 逆时针旋转一个角度 A ,俯仰轴(视轴)绕其转动轴 $O-x_s$ 逆时针旋转一个角度 E ,其坐标系如图 2 所示。并设此时各轴相对各自旋转轴的角速度分别为 \dot{A}, \dot{E} 。

定义各坐标系间的相互关系如下:

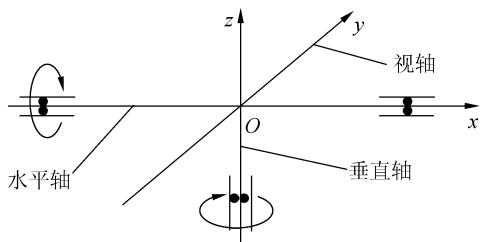


图 1 光电转台三轴关系示意图

Fig. 1 Relation of three axes of opto-electronic turntable

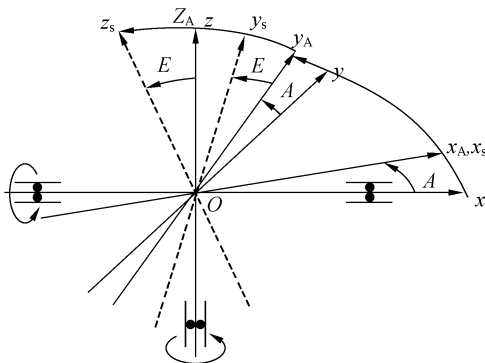


图 2 非正交情况下光电转台各轴关系示意图

Fig. 2 Relation of each axis of opto-electronic turntable under nonorthogonal condition

T_{As} 为俯仰轴(视轴)坐标系 $O-x_s y_s z_s$ 投影到方位轴坐标系 $O-x_A y_A z_A$ 的转移矩阵;

T_A, T_s 分别为方位轴坐标系 $O-x_A y_A z_A$ 和俯仰轴坐标系 $O-x_s y_s z_s$ 投影到地理坐标系 $O-x y z$ 的转移矩阵;

$$T_{As} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos E & \sin E \\ 0 & -\sin E & \cos E \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$T_A = \begin{bmatrix} \cos A & -\sin A & 0 \\ \sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$T_s = T_A T_{As} = \begin{bmatrix} \cos A & -\sin A \cos E & \sin A \sin E \\ \sin A & \cos A \cos E & -\cos A \sin E \\ 0 & \sin E & \cos E \end{bmatrix}. \quad (3)$$

定义 J_s, J_A 分别表示为俯仰轴和方位轴相对它们各自坐标系的转动惯量矩阵,于是可以推导出俯仰轴的转动惯量矩阵

$$J_s = \begin{bmatrix} J_{x_s} & 0 & 0 \\ 0 & J_{y_s} & 0 \\ 0 & 0 & J_{z_s} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

方位轴的转动惯量矩阵为：

$$J_A = \begin{bmatrix} J_{x_A} & ? & ? \\ ? & J_{y_A} & ? \\ ? & ? & J_{z_A} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式(5)中的“?”表示该参数的大小与所分析的问题无关。

定义俯仰轴转动部分对方位轴的转动惯量矩阵为 J_{As} , 经过简单的推导可以得出：

$$J_{As} = T_{As} J_s T_{As}^{-1} = \begin{bmatrix} J_{x_s} & 0 & 0 \\ 0 & J_{y_s} \cos^2 E + J_{z_s} \sin^2 E & (J_{y_s} - J_{z_s}) \cos E \sin E \\ 0 & (J_{y_s} - J_{z_s}) \cos E \sin E & J_{y_s} \sin^2 E + J_{z_s} \cos^2 E \end{bmatrix}, \quad (6)$$

根据式(5)、(6)可得到俯仰转动部分对俯仰轴 $O-x_s$ 的转动惯量为：

$$J_{Ox_s} = J_{x_s}, \quad (7)$$

俯仰轴对方位轴坐标系 $O-x_A y_A z_A$ 的转轴 $O-z_A$ 亦即垂直轴的转动惯量为：

$$J_{z_{As}} = J_{y_s} \sin^2 E + J_{z_s} \cos^2 E, \quad (8)$$

俯仰轴负载和方位轴转动部分对方位轴的转动惯量之和为：

$$J_{Oz_A} = J_{z_{As}} + J_{z_A} = J_{y_s} \sin^2 E + J_{z_s} \cos^2 E + J_{z_A}. \quad (9)$$

根据式(7)、(9)可以看出, 绕俯仰轴运动部分的载荷更换时, 不仅会造成绕俯仰轴的转动惯量发生变化, 而且会造成绕方位轴的转动惯量发生变化, 特别是 J_{y_s} 和 J_{z_s} 如果不相等, 且差别比较大的时候, 方位驱动部分的转动惯量会随着俯仰角的变化而变化, 成为一个时变系统。

光电跟踪测量系统的具体结构不同, 所表现出来的扭转谐振特性也是不同的。对频率响应特性的测量和分析表明, 转台机械谐振模型可表示为：

$$G(s) = \frac{s^2 + as + \omega_L^2}{s^2 + bs + \omega_P^2}, \quad (10)$$

其中 ω_L 、 ω_P 为分别是传递函数零点和极点的震荡圆频率, 它们对应机械谐振的峰、谷值频率。 a 、 b

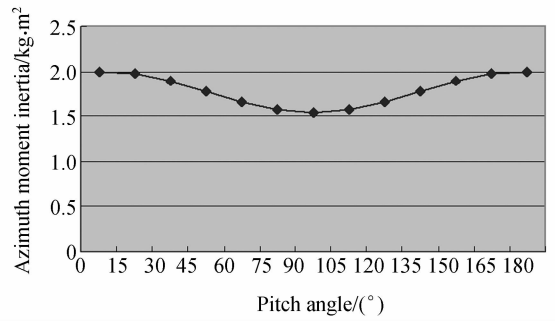


图 3 方位转动惯量的变化曲线

Fig. 3 Variety curve of azimuth moment inertia

为实系数, 且 $a > 0$ 、 $b > 0$ 。当 $a > b$ 时, 谐振为带通形式, 也称正谐振; 当 $a < b$ 时, 谐振为带阻形式, 也称负谐振, 正负谐振均可采用带阻滤波器, 如图 4, 一般文献仅考虑正谐振情形, 实际系统中的负谐振也对系统特性有影响。

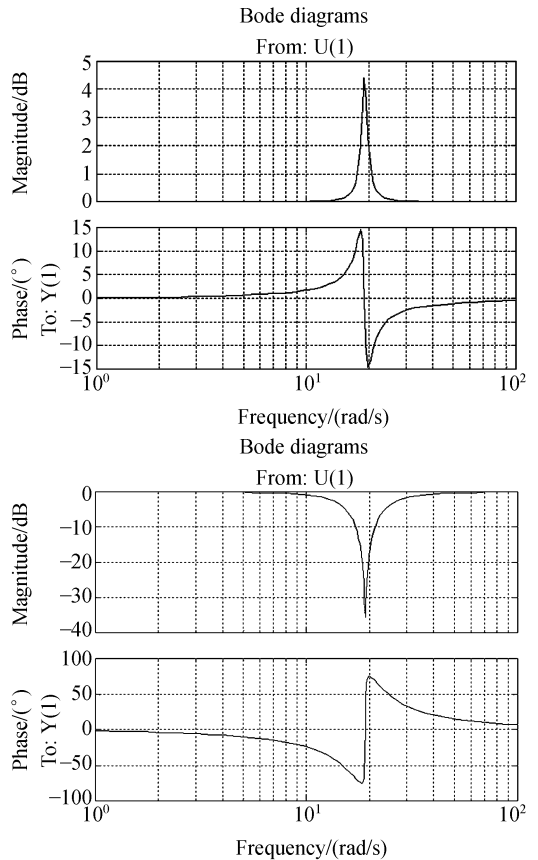


图 4 典型的带通和带阻式谐振特性

Fig. 4 Resonant characteristics of typical band pass and band stop

如果把转台简化为一个二阶的电机-弹簧-质

量系统^[6],则得出:

$$\omega_0 = \omega_n \sqrt{1 - 2\xi^2}, \quad (11)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{J}}, \quad (12)$$

式中 ω_0 为机械谐振频率, ω_n 为无阻尼固有频率, K 为弹性连接体扭转刚度, J 为负载惯量。在本系统中, 阻尼比 ξ 为定值。由式(11)、(12)可以看出, 机械谐振频率主要由机械结构刚度、弹性系数和转动惯量决定。机械谐振实际上是机电耦合作用的结果, 解决机械谐振问题需要从机械结构设计和伺服控制设计两方面共同考虑^[3]。在机械设计时着重提高指向器座架和驱动装置的刚度。本系统采用电机直接驱动负载框架, 无中间传动链,

减小了传动间隙和齿隙死区以及弹性形变, 增强了机械耦合刚度, 同时也显著减小了电机的折算惯量, 大大提高了扭转刚度; 在结构布局上尽量紧凑, 使质量大的零件靠近回转轴线以减小转动惯量。伺服控制设计的方法如下:

假设系统的扭转刚度在跟踪过程中不变, 将式(9)代入式(12)可得:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{J_{\alpha z_A}}} = \sqrt{\frac{K}{J_{y_s} \sin^2 E + J_{z_s} \cos^2 E + J_{z_A}}}. \quad (13)$$

可见, 系统的扭转谐振频率随俯仰角 E 的变化而变化。据此, 在光电跟踪系统的前向通道中添加了自适应前馈滤波器的方法, 以抑制机械谐振, 系统组成结构见图 5。

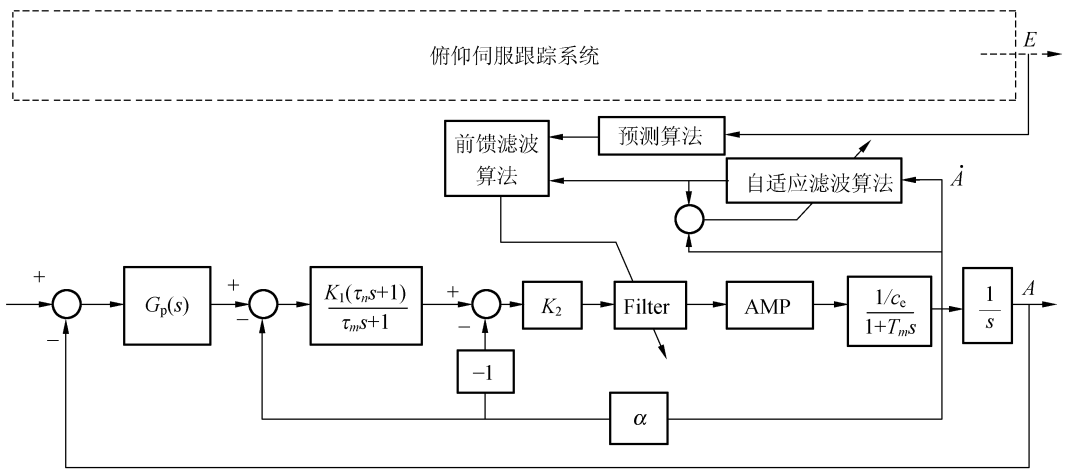


图 5 自适应滤波系统组成图

Fig. 5 Framework of adaptive filter

图 5 中, $G_p(s)$ 为位置环控制器, $\frac{K_1(\tau_n s + 1)}{\tau_m s + 1}$ 和 K_2 是设计的一种 PI-IP 无超调滤波算法的传递函数简略形式, 在这里可以理解为普通的调节器传递函数(超调量 $< 2\%$, 具体的设计, 作者将另文给出), T_m 是平台的机电时间常数, c_e 是电机的电磁时间常数。系统的工作原理如下:

由于系统的谐振频率随光电跟踪系统俯仰角的变化而变化, 而俯仰角是可测量的, 所以跟踪系统在某一时刻的谐振频率可由此时俯仰角的值计算得到; 然后再由计算所得谐振频率自适应调整前馈陷波滤波器参数, 滤除信号中引起机械谐振的频率成分, 使谐振不会发生。由于这一滤波网络属于开环系统, 因此系统的反应速度较快, 且可

以做到“事前控制”。

采用在前向通道中添加自适应跟踪数字带阻滤波器, 以便滤除信号中引起谐振的频率成份, 而其它频率的信号则不受影响。给定带阻滤波器的传递函数

$$H(s) = \frac{s^2 + \Omega_0^2}{s^2 + Bs + \Omega_0^2}, \quad (14)$$

式中, $\omega_n = \tan\left(\frac{\Omega_0}{2}\right)$ 为滤波器中心频率, B 为带宽。

通过双线性变换 $s = \frac{1-z}{1-z^{-1}}$, 并取 $\alpha = \frac{1 + \Omega_0^2 - B}{1 + \Omega_0^2 + B}$, $\beta = \frac{1 - \Omega_0^2}{1 + \Omega_0^2}$, 则式(14)变为

$$H(z) = \frac{1+\alpha}{2} \cdot \frac{1-2\beta \cdot z^{-1} + z^{-2}}{1-\beta \cdot (1+\alpha)z^{-1} + \alpha \cdot z^{-2}}, \quad (15)$$

对式(15)求导后再求零点可得滤波器的中心频率 ω_n :

$$\omega_n = \frac{\cos^{-1} \beta}{2\pi T}. \quad (16)$$

由滤波器的中心频率 ω_n 的反变换可得到滤波参数 $\beta(t)$:

$$\beta(t) = \cos(\omega_n(t)T), \quad (17)$$

式中, T 为采样频率。可见 β 为一随时间 t 变化的时变参数。

另外, 设滤波器 3 dB 截频分别为 Ω_1 和 Ω_2 , 且 $\omega_k = \tan(\Omega_k/2)$, $k=0, 1, 2$, 则滤波参数 α 与 3 dB 带宽 B_ω 存在下列关系, :

$$B_\omega = \omega_2 - \omega_1 = \tan \frac{\Omega_2}{2} - \tan \frac{\Omega_1}{2} = \cos^{-1} \frac{2\alpha}{1+\alpha^2}. \quad (18)$$

可见给定陷波带宽, 即可确定滤波参数 α 。由此数字陷波器的两个参数分别对应它的带宽和中心频率, 因此调节数字滤波器的中心频率或带宽时只要考虑一个参数, 而不必顾及另一个参数对性能的影响, 这就使得调节滤波器的中心频率或带宽变得很方便。

在设计滤波器的过程中, 带宽通常事先给定, 因此只需要调节决定滤波器中心频率的参数 $\beta(t)$ 即可。 $\beta(t)$ 是个随谐振频率变化的参数, 要靠跟踪系统当前时刻的俯仰角计算出的谐振频率来自动调整, 以便达到抑制控制信号中与谐振频率同频或接近的信号成分。

当前向通道计算的谐振中心频率偏离实际谐振频率较大时, 滤波器不能很好地滤除信号中的引起谐振的频率成分, 因此系统发生谐振。此时, 由测速机输出的速度信号, 经自适应滤波网络提取出谐振信号频率, 作为反馈送到前向通道调整滤波器参数 β , 及时抑制已经发生的机械谐振。

3 仿真试验

为验证本文所提出的自适应前馈滤波技术抑制机械谐振的应用实效, 对控制信号中产生谐振的某一频段范围的信号进行了滤波效果的仿真

实验。

假设速度调节器的输出电压信号为: $x(t) = S(t) + r(t)$, 其中 $S(t) = 5 \times \sin(2\pi \times 0.5t)$ 为有用频段信号(图 6), 幅值为速度环调节器的输出电压, 频率是根据最大跟踪加速度和最大的跟踪误差估算出来的; $r(t) = 3 \sin(2\pi(20 + 0.5t) \times t)$ 为谐振频段信号, 幅值是扫频仪输出显示, 大约为输入信号幅值的 1/2, 这里取 3 V, 谐振信号的频率是根据 E 角在 $(0 \sim 180^\circ)$ 变化估算出来的, 谐振信号频率变化范围大约为 $20 \sim 27$ Hz(图 7)。实际跟踪效果见图 8、9。可以看出, 即使信号发生变化, 自适应前馈跟踪数字带阻滤波器也能够较快地跟踪变化后的频率并滤除。

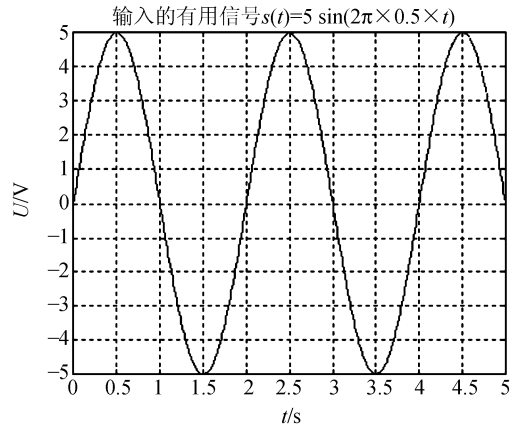


图 6 有用信号波形图

Fig. 6 Useful signal waveform

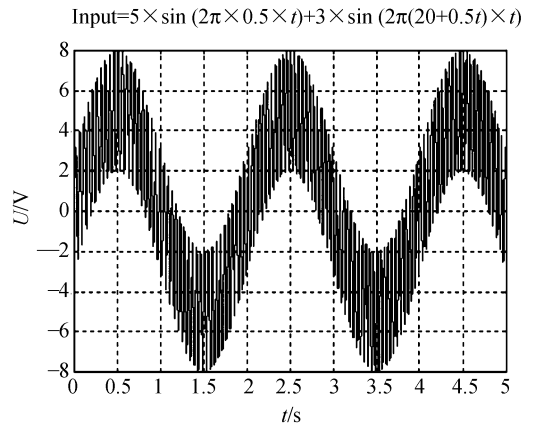


图 7 混合输入信号

Fig. 7 Mixed signal waveform

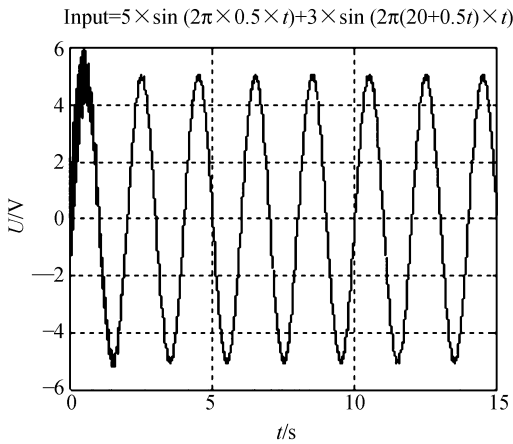


图 8 BW=3 Hz 滤波情况

Fig. 8 Signal waveform after BW=3 Hz filter

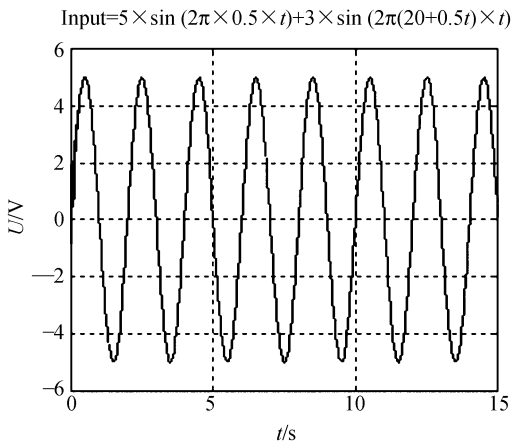


图 9 BW=20 Hz 滤波情况

Fig. 9 Signal waveform after BW=20 Hz filter

表 1 带宽不同的情况下的仿真实验结果

Tab. 1 Simulation results under different bandwidths

试验序号	滤波器参数 B	滤波器宽度 (Hz)	滤波响应时间 (s)	滤波深度 (dB)
1	3	3	1.5	-274
2	5	5	0.75	-278
3	10	10	0.66	-288
4	20	20	0.183	-291

从上图及表中可以看出,采用自适应前馈滤波器在不同带宽时滤波效果不同,滤波器带宽窄时,滤波初期有明显的谐振,滤波响应时间长,曲线不够平滑,如图 8 所示;滤波器带宽宽时,初期滤波效果很明显,滤波响应时间快,如图 9 所示。所以滤波响应时间及滤波器带宽是一对矛盾,滤波器带宽宽,则响应时间非常短;滤波器带宽窄,则响应时间相应加长。为了达到预期的目标,需要在两者之中进行折衷。但不论是那种情况,系统自动跟踪的最大跟踪误差在一个周期以后提高了大约 3'。

4 结 论

为抑制机载光电跟踪系统具有时变特性的机械谐振,在不改变机械结构和阻尼因素的条件下,本文提出了一种易于实现、设计操作简便、实效性好的自适应前馈滤波方法。通过仿真试验,证明该自适应前馈滤波器能自动跟踪缓变信号的频率,并利用该频率设计相应的滤波器去除信号中引起的谐振频率信号,从而有效抑制机载光电跟踪系统的机械谐振,不论滤波器带宽窄或者是相当宽,系统的自动跟踪在一个周期后最大的跟踪误差提高了大约 3'。目前,该算法已成功运用到我国某机载光电跟踪系统中,效果良好。

参考文献:

[1] GEORGE B. Relation between structural compliance and allowable friction in a servomechanism[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1965, 10: 59-61.

[2] POLITES M E. Technology of automated rendezvous and capture in space[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1999, 36(2): 280-291.

- [3] 卢铨. 改善光电跟踪测量系统机械谐振频率方法探讨[J]. 光学 精密工程, 1994, 2(2): 47-52.
LU E. Talking about how to improve the resonance frequency of OE tracking&measuring system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1994, 2(2): 47-52. (in Chinese)
- [4] HODGSON D J. How power-supply selection can improve laser-diode performance[J]. *Laser Focus World*, 1994, 30(1): 129-132.
- [5] MEASURES R M. Fiber optic structural monitoring of bridges[J]. *IEEE*, 1997, 8(1): 600-602.
- [6] 张卫国, 曹永刚. 用数字滤波器改善光电经纬仪机械谐振频率的方法[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(2): 77-82.
ZHANG W G, CAO Y G. Digital filter approach to improving the resonance frequency of photoelectric theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(2): 77-82. (in Chinese)
- [7] CYBERKO G. Approximation by superpositions of a sigmoid function[J]. *Math Control, Signals and Systems*, 1989, 2(4): 201-205.
- [8] MOLINAC M F. Object tracking for content-based functionalities[J]. *SPIE*, 1997, 3024: 190-199.
- [9] 李岷, 马军. 机载光电稳定平台检测技术的研究[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(5): 847-852.
LI M, MA J. Study of measurement technique on airborne photoelectric stabilized platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 847-852. (in Chinese)

作者简介: 王国富(1977—), 男, 河南人, 中国科学院西安光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事精密伺服系统控制的研究工作。E-mail: wanghust11@163.com

陈良益(1941—), 男, 浙江人, 中国科学院西安光学精密机械研究所教授, 博士生导师, 研究员, 专家委员会委员, 主要从事光电系统设计方面的研究工作。E-mail: chenly@opt.ac.cn

(本栏目编辑 黄廉卿)