

傅里叶光谱仪平动式光程扫描控制系统设计

郭兰杰, 马文坡, 王 淳, 林 喆, 王 浩

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘 要: 为实现大气痕量气体的临边和天底超光谱探测, 利用时间调制型傅里叶变换光谱仪获取光谱信息, 其干涉仪控制系统中光程扫描速度稳定度 $\geq 99.5\%$ 。针对光程扫描行程长, 扫描速度稳定性要求高, 设计平动式光程扫描的干涉仪控制系统, 并给出扫描实现原理图。由于控制系统存在摩擦力、振动等干扰导致扫描速度波动, 理论分析其对干涉信号强度和反演光谱的影响。鉴于角镜扫描运动和扰动具有周期性特点, 提出插入式重复控制器来抑制周期性干扰, 改善动镜运动速度的匀速性。对控制策略进行 MATLAB 数值仿真和实验验证, 实验结果表明: 当角镜以 10.625 mm/s 运动时, 插入式重复控制器可逐周期地改善角镜运动稳定度, 最终位移误差为 $\pm 0.000\ 25$ mm, 速度误差为 $\pm 0.000\ 4$ mm/s; 满足速度稳定度 $\geq 99.5\%$ 的要求。

关键词: 干涉仪控制系统; 光程差; 插入式重复控制器; 速度稳定度

中图分类号: TM301.2; TH744.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA202049.0105002

Design of translating optical path scanning control system for Fourier spectrometer

Guo Lanjie, Ma Wenpo, Wang Chun, Lin Zhe, Wang Hao

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: To achieve the ultra-spectral detection of atmospheric trace gases in both nadir and limb, the time-modulated Fourier transform spectrometer was used to obtain the spectral information, and the optical path scanning speed stability satisfied greater or equal to 99.5%. In this paper, a control system of the translational scanning interferometer was investigated and the system principle diagram was presented. Considering the long-range optical path distance (OPD) and high scanning speed stability requirements, a interferometer control system of the translational optical path scanning was applied, and the schematic diagram of the scanning implementation was given. As the fluctuation of scanning speed caused by frictions, mechanical vibrations and other disturbances, its influence on the interference signal intensity and inversion spectrum was theoretically analyzed. The motion of OPD scanning and the interference have a characteristic of periodicity, this paper proposed a plug-in repetitive controller, which has an excellent in suppressing periodic disturbances, and implements uniform scanning. MATLAB numerical simulation and experimental verification were carried out for the control strategy, the results indicate that the plug-

收稿日期: 2019-11-05; 修订日期: 2019-12-15

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0500702)

作者简介: 郭兰杰(1989-), 女, 博士生, 主要从事傅里叶变换红外光谱仪干涉仪控制系统方面的研究。Email: lanjieguoedu@163.com

导师简介: 马文坡(1967-), 男, 研究员, 博士, 主要从事航天光学遥感技术方面的研究。Email: mawenpo@sina.com

in repetitive controller can improve the speed stability periodically. When the angular mirror moves at 10.625 mm/s, the final displacement error is about $\pm 0.000\ 25$ mm, and the velocity error is about $\pm 0.000\ 4$ mm/s, which meet the performance requirements.

Key words: interferometer control system; optical path difference; plug-in repetitive controller; speed stability

0 引言

近年来,随着电子技术、航天技术和计算机技术的快速发展,利用卫星进行大气成分检测已获得重大进展^[1];例如,加拿大的 ACE(Atmospheric Chemistry Experiment)载荷、风云三号高光谱温室气体检测仪、高分五号大气环境红外甚高光谱分辨率探测仪^[2-3]等。傅里叶变换红外光谱仪是在迈克尔逊干涉的基础上发展而来,可分为时间调制型和空间调制型;目前多用于环境保护、地质勘探、工业等^[4-5]。为获取大气痕量气体的高分辨率、高准确度精细光谱,研究高效率干涉成像技术;采用基于时间调制型 FTS 的干涉分光技术,设计大光程差,高平稳光程往复扫描调制的控制系统。干涉仪作为傅里叶变换光谱仪的核心部件,其动镜运动速度平稳性、抗扰动能力是在轨获取高质量干涉探测性能的必要条件。

光程扫描方式有摆臂式扫描^[6-7]、旋转式扫描^[8]和平动式扫描^[9];摆臂式扫描是将两个角镜分别置于叉骨的两臂,通过叉骨上下摆动实现扫描。这种结构可保证两个镜子摆动的一致性,降低因两镜倾斜导致光谱图失真,但由于光程差与摆动角度成非线性关系,扫描速度很难达到均匀变化^[10]。旋转式扫描是通过光学介质旋转来获取不同的光程差,由于旋转体上安装了多个平行平板,而各个分平板安装不精确,导致平行平板与出射光线不垂直,降低了干涉的调制度。平动式扫描中角镜置于直线导轨上并做匀速往返运动,速度是定值,稳定性较高;因此,它适用于低速、速度稳定性要求高、光程扫描行程长的干涉仪控制系统。但也存在缺陷,直线电机带来摩擦力,由于运行速度低,干扰力矩介于滑动摩擦和静摩擦力之间切换,造成速度波动。参考文献[11]提出离线辨识 stribeck 摩擦模型,然后对摩擦力进行补偿,

改善了定位精度。参考文献[12]提出改进 stribeck 摩擦模型对系统进行补偿,降低干扰的影响。对于星载仪器,在轨工作环境特殊,地面辨识的摩擦力模型并不适用空间环境。因此,通过研究有效的控制算法提高系统自适应性和鲁棒性来抑制不确定扰动变得至关重要。

目前光程扫描控制方法主要针对摆臂式,如 PID^[13]、鲁棒 H_∞ 控制方法^[14]、极点配置方法、滑模变结构、模型参考自适应等,研究平动式扫描控制方法较少。此外,这些控制算法验证多通过仿真,不足以评价控制性能。文中针对高性能傅里叶变换光谱仪,首先分析当动镜速度波动时,探测器接收的干涉信号强度的变化和对反演光谱的影响,然后给出平动式扫描模型和工作原理。由于整个光程扫描是周期性的,提出插入式重复控制器^[15],能够有效跟踪周期性信号,且设计方法简单,易于实现。为保证重复控制稳定,文中根据带宽设计其低通滤波器,简化其动态补偿器。最后,通过仿真分析和实验验证该控制策略的有效性。

1 动镜运动不稳定对干涉信号的影响

当动镜匀速运动时,以单色光为例,检测器检测到干涉光的光强是为:

$$I(\delta) = 0.5I_0(\sigma)(1 + \cos 2\pi\sigma\delta) \quad (1)$$

式中: δ 表示光程差; σ 为单色光的波数; $I_0(\sigma)$ 表示单色光的光强。公式(1)由两部分组成,一部分是常数项 $0.5I_0(\sigma)$,另一部分是余弦调制项 $0.5I_0(\sigma)\cos 2\pi\sigma\delta$ 。在光谱探测中,余弦调制项的贡献是主要的。实际中干涉图不止与单色光有关,还有很多因素会影响检测器探测到的信号强度;例如不可能找到一种理想分束器,红外检测器并不是对所有的波数都能均匀地响应,仪器设备中存在滤波器的频率响应问题以

及计量信号、探测信号的延迟失配问题等。因此,公式(1)乘一个与调制频率 f 和波数有关的式子 $H(f, \sigma)$, 得到:

$$I(\delta)=0.5I_0(\sigma)H(f, \sigma)(1+\cos 2\pi\sigma\delta)=B(\sigma)(1+\cos 2\pi\sigma\delta) \quad (2)$$

式中: $B(\sigma)=0.5I_0(\sigma)H(f, \sigma)$ 。当光源是连续的, 仅考虑余弦调制项, 得到干涉图表达式:

$$I(\delta)=\int_{-\infty}^{\infty} B(\sigma)\cos 2\pi\sigma\delta d\sigma \quad (3)$$

得到干涉光的光谱分布函数为:

$$B(\sigma)=\int_{-\infty}^{\infty} I(\delta)\cos 2\pi\sigma\delta d\delta \quad (4)$$

由公式(4)可知, 光谱图即光谱信息主要受光程差 δ 的影响, $d\delta$ 的稳定性决定了反演精度, 而 $d\delta$ 的稳定性与扫描速度稳定性有直接关系。

摩擦力等干扰导致电机力矩发生变化, 影响扫描速度波动, 使得干涉仪控制系统的调制频率发生变化, 进而影响对探测器获取的光强。公式(2)还可写成如下形式:

$$I(\delta)=B_0(\sigma)H_0(f)\cos 2\pi\sigma\delta \quad (5)$$

式中: $H_0(f)$ 为调制频率 f 下的滤波器幅频响应(忽略信号经过滤波器后的相位变化), 调制频率 f 满足 $f=\sigma v$, 其中 v 为光程差速度, 即 $H_0(f)=H_0(\sigma v)$ 。假如扫描过程中 v 为定值, 那么对于一定波数的入射光, $H_0(\sigma v)$ 为定值。此时, 光程差过零点 t 秒后有 $\delta=2vt$, 光强为 $I(\delta)=B_0(\sigma)H_0(f)(1+\cos 2\pi\sigma 2vt)$ 。当扫描速度不均匀时, $H_0(\sigma v)$ 随 v 的变化而改变。光程差 δ 和速度 v 的关系可表示为:

$$\delta=\int_0^t v(t)dt \quad (6)$$

速度 v 是一个关于时间 t 变化的函数, 可以根据 v 和 t 之间的关系得出 v 和光程差 δ 之间的关系, 设为 $v(\delta)$ 。取整个扫描过程中 $v(\delta)$ 的平均值为 v_0 , $\Delta v(\delta)=v(\delta)-v_0$, 一般情况下 $\Delta v(x)/v_0 \ll 1$, 忽略二阶小量, 有:

$$I(\delta)=B_0(\sigma)G(\sigma v_0)\cos 2\pi\sigma\delta \cdot \left[1+\frac{G'(\sigma v_0)}{G(\sigma v_0)}\sigma\Delta v(\delta) \right] \quad (7)$$

由公式(7)可知, 对于一定波数的入射光, 干涉信号主要受光程差速度变化的影响。速度的波动还会引起电信号频率波动, 导致调制信噪比变化, 使得干涉图出现误差。

针对开展红外宽谱段的傅里叶变换超光谱探测技术, 为实现干涉图到光谱图的等效转换, 经分析干

涉仪控制系统中角镜的行程为 ± 25.5 cm, 扫描速度为 10.625 mm/s, 速度稳定度 $\geq 99.5\%$ 。

2 平动光程扫描系统分析及建模

干涉仪平动式光程扫描原理如图 1 所示, 计量激光器发出激光光束, 进入傅里叶变换光谱仪光学系统后分为两路, 分别为 P 光和 S 光, 激光探测器接收两路光并进行光电转换。当角镜沿导轨运动时, 在两路探测器上分别生成正交的干涉信号, 记作 A 脉冲和 B 脉冲。 A 、 B 脉冲送入干涉仪控制器中的 FPGA, 由 FPGA 进行解算计数形成角镜的位置增量信息, 作为位置反馈送入 DSP; DSP 根据位置反馈及预设位置指令, 构成闭环控制系统, 生成直线电机的驱动电压送给 FPGA, 然后转换为 PWM 信号送入三相电机驱动电路。电压驱动永磁同步直线电机, 由其带动角镜在 2 个屋脊镜之间往返运动, 从而形成光程差, 最终实现角镜的直线往返运动。

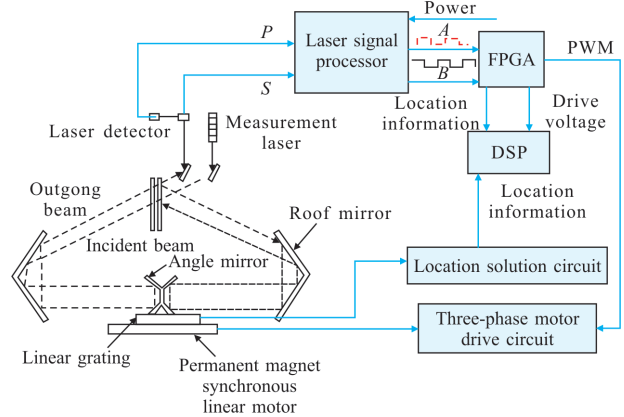


图 1 平动式干涉仪控制系统组成与光路图

Fig.1 Translating interferometer control system composition and optical path diagram

涉仪运动系统采用永磁同步直线电机驱动。直线电机不同于旋转电机, 其运动形式是直线, 不需要螺纹传动装置。直线电机的开环传递函数为:

$$G(s)=\frac{K_t}{mLs^3+mRs^2+K_eK_s} \quad (8)$$

式中: m 为运动部件的质量; K_t 为推力常数; R 为电机电阻; L 为电机电感; K_e 为反电势常数; $s=j\omega$ 为拉普拉斯算子, ω 为角频率。角镜的速度稳定性直接决定了干涉效果, 因此设计有效的控制策略降低速度波动。

3 控制策略

由于角镜扫描是往复运动,具有周期性,提出采用重复控制算法来抑制周期性干扰。插入式重复控制不必对原控制系统中的控制器进行任何修改,只需加入一个相加环节,便可将重复控制器“插入”到系统中。它具有重复控制器的特点,可以有效抑制重复性误差,从而提高系统的稳态精度。对被控对象设计速度反馈环和 PI 控制器的位置环,最后将重复控制器插入到稳定的控制系统中来提高控制精度。

3.1 插入式重复控制

插入式重复控制系统如图 2 所示,图中 $R(s)$ 为参考输入; $Y(s)$ 为输出; G_p 为广义被控对象;包含了控制对象 $C(s)$ 与补偿器 $P(s)$; $D(s)$ 为干扰; T_1 为参考信号的周期; $e^{-T_1 s}$ 表示信号延时了周期 T_1 ; $F(s)$ 为低通滤波器; $W(s)$ 为动态补偿器;重复控制器传递函数为 $G_r(s) = \frac{F(s)e^{-T_1 s}}{1-F(s)e^{-T_1 s}} W(s)$ 。

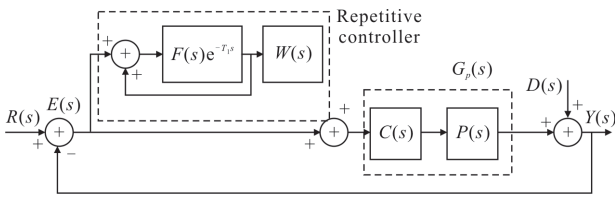


图 2 插入式重复控制系统

Fig.2 Plug-in repetitive control system

对于图 2 所示的重复控制系统,其指数渐进稳定稳定性条件是:(1) $C(s)P(s)$ 为正则的传递函数,且在右半平面无零极点对消;(2) 闭环传递函数 $G_c(s) = \frac{G_p(s)}{1-G_p(s)}$ 是稳定的有理函数;(3) $|F(j\omega)[1-W(j\omega) \cdot G_c(j\omega)]|_\infty < 1$ 。插入式重复控制的控制效果一方面取决于被控对象的周期性,另一方面取决于低通滤波器 $F(s)$ 和动态补偿器 $W(s)$ 的选择。

由图 2 得到系统的误差由跟踪误差 E_1 和扰动引起的误差 E_2 组成,

$$E(s) = E_1 + E_2 = \frac{1-F(s)e^{-T_1 s}}{1-[1-W(s)G_c(s)]F(s)e^{-T_1 s}} \cdot \left\{ [R(s)-D(s)] \frac{1}{G_p(s)} \right\} \quad (9)$$

由公式(9)可知,在重复频率 $\omega_k = k \frac{2\pi}{T_1}, k=0,1,2, \dots$

处,有 $|e^{j\omega_k T_1}| = 1$ 。在带宽内,设计 $F(j\omega)$ 接近于 $(1, j0)$, $|W(j\omega_k)G_c(j\omega_k)|$ 大一些,系统误差 $E(s)$ 有很大程度的改善。一般地,取 $F(s)$ 为小于 1 的常数。由重复控制传递函数可知, $|F(j\omega)|$ 越接近 1, $\left| \frac{F(j\omega)}{1-F(j\omega)} \right|$ 值越大。这相当于在回路中增加了一个增益,低频时可以提高系统响应速度,但高频时降低系统的抗干扰性能。随着重复控制器作用多个周期,周期性干扰修正到最小值,此时大的增益会导致系统震荡,造成系统不稳定。文中根据系统带宽设计 $F(s)$ 为幅值小于 1 的低通滤波器。

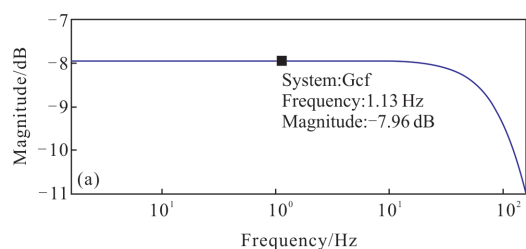
3.2 控制器参数确定

通过扫频的方式得到直线电机的传递函数为:

$$G(s) = \frac{7.104}{0.012s^3 + 20s^2 + 328.55s} \quad (10)$$

设计速度反馈环 $G_v = K_v s$ 提高系统阻尼比,取速度环增益 $K_v = 600$,此时,系统阻尼比 $\zeta = 0.83$ 。由工程经验,带宽设计为 1~2 Hz 可满足跟踪要求。位置反馈环采用 PI 控制器,根据带宽调整比例和积分的增益提高系统响应速度和稳定性。经过调试 $G_{PI} = 4500 + \frac{100}{s}$,控制系统的开环传递函数为 $G_p = \frac{31970s + 710.4}{0.012s^4 + 20s^3 + 4591s^2}$,系统带宽为 1.1 Hz。

通过上述设计和分析,选择的 PI 补偿器满足插入式重复控制稳定性条件(1);闭环传递函数 $G_p = \frac{31970s + 710.4}{0.012s^4 + 20s^3 + 4591s^2 + 31970s + 710.4}$ 满足稳定性条件(2)。考虑到星载仪器系统的可靠性与可实现性,设置 $W(s) = 1$ 。调试低通滤波器的增益,当 $F(s) = \frac{0.4}{0.01s + 1}$ 时,由图 3 所示的 Bode 图可知,在带宽范围内 $20\lg|F(j\omega)| = -7.96$,得 $|F(j\omega)| = 0.3999$,相位延迟 0.401° ,且 $|F(j\omega)[1-W(j\omega)G_c(j\omega)]|_\infty < 1$,满足稳定性条件(3)。



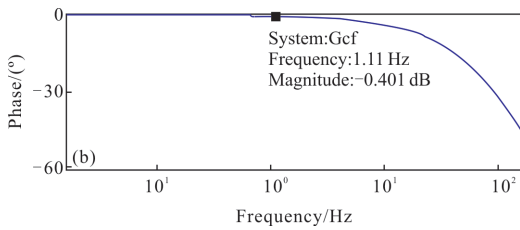


图 3 低通滤波器 $F(s)$ 的 Bode 图

Fig.3 Bode diagram of low-pass filterer $F(s)$

干涉仪角镜扫描是有规律的往复运动，规划一个周期内角镜平移运动曲线如图 4 所示。角镜选用正弦换向，匀速运动的速度为 $0.010\ 625\ \text{m/s}^2$ ，整个周期为 $11.6\ \text{s}$ 。

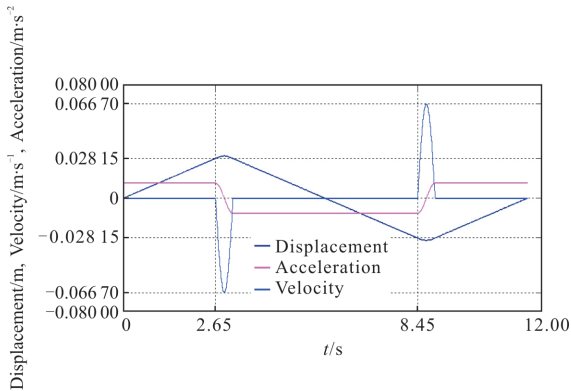


图 4 角镜运动曲线

Fig.4 Corner mirror motion curves

由已经规划好的位置、速度和加速度曲线设计前馈补偿回路。综上，得到整个系统的控制策略实现形式如图 5 所示。

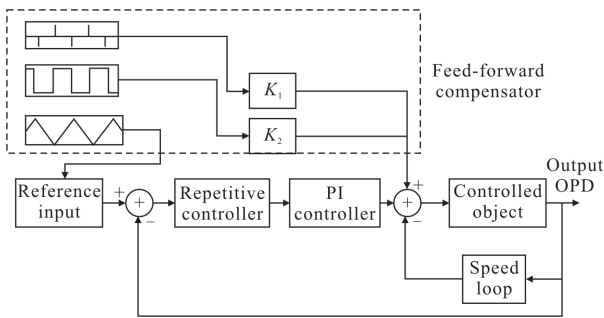


图 5 控制策略实现框图

Fig.5 Schematic diagram of the control strategy

4 仿真分析与实验验证

4.1 仿真分析

借助于 MATLAB 分析控制策略的性能，通过

Simulink 搭如图 5 所示的控制系统框图，并在系统中加入功率谱密度为 10 的白噪声干扰，得到系统稳定时位置和速度输出曲线如图 6 所示；速度误差曲线如图 7 所示。

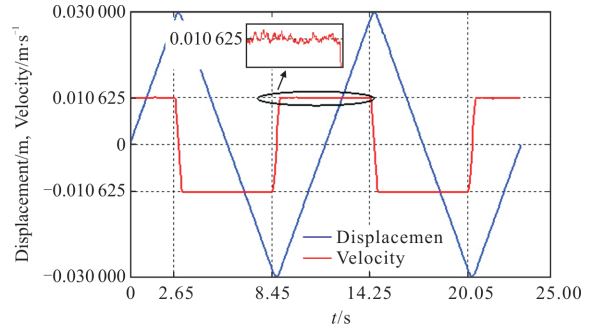


图 6 位置和速度输出曲线

Fig.6 Output curves of the system displacement and velocity

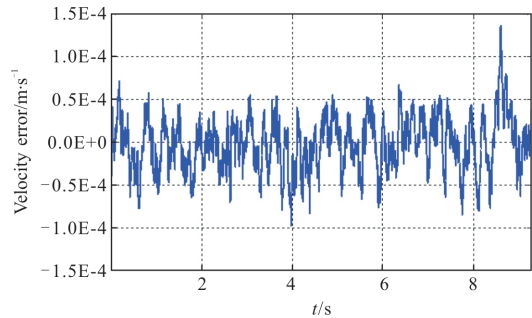


图 7 速度误差曲线

Fig.7 Velocity error curve of the system

仿真结果表明经过多个周期调整，速度在预设值 $0.010\ 625\ \text{m/s}$ 的小范围内波动，速度误差稳定在 $\pm 1.5 \times 10^{-4}$ 范围内。截取稳定后匀速段的光程扫描速度数据，计算：速度的标准差/平均值，来衡量光程差速度稳定度，得到比值为 $0.002\ 195$ ，稳定度为 99.78% 。这说明了控制策略是可行的，提高了平动式扫描系统光程扫描精度。

4.2 实验验证

搭建实验验证平台如图 8 所示，来验证控制策略对干涉仪角镜运动的实际控制精度，角镜两侧有效位移为 $\pm 25.5\ \text{cm}$ ，速度为 $10.625\ \text{mm/s}$ ，两侧调头时间 $1\ \text{s}$ ，整个周期为 $11.6\ \text{s}$ 。直线电机的电压信号作为控制信号，选用宇航级数字信号处理器 SMV320C6701 作为控制器，C6701 是控制器中最为核心的器件，其控制着整个管理控制器的工作及流程。控制命令通过 FPGA 产生 PWM 信号，该信号通过功率放大电路

控制角镜往复运动。

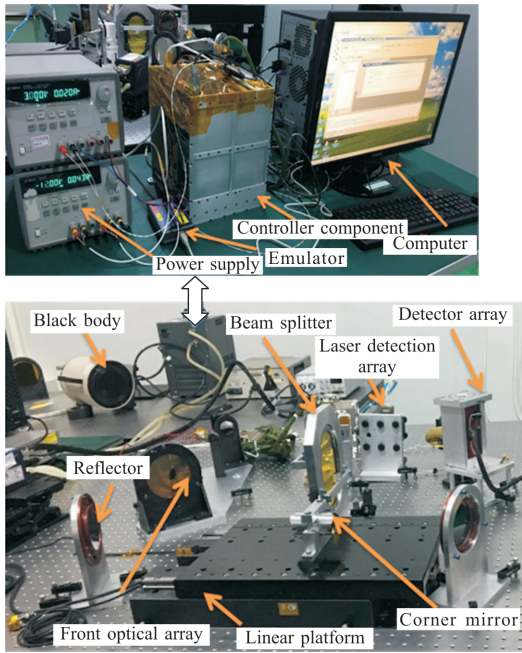


图 8 平动式光程扫描系统实验平台

Fig.8 Experimental platform of translating optical path scanning system

通过编程的方式将控制策略发送到驱动器,经由控制器控制角镜运动,实测电机的运行结果。由于直线电机反馈的信息为位移信息,测得 16 个周期的位移误差如图 9 所示;以 11.6s 为周期,将多个周期的位移误差叠放在一起,效果如图 10 所示;运行多个周期后匀速段速度误差情况如图 11 所示。

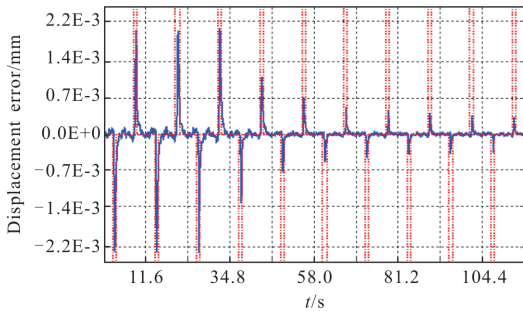


图 9 位移误差曲线

Fig.9 Curve of displacement errors

从图 9~图 11 和表 1 可以得到如下结论:

(1) 由图 9 可知,在重复控制器的作用下,从第 2 个周期开始,延时环节将上个周期的误差与本周误差叠加来逐周期调节控制量,实现高精度扫描控制,使得误差逐渐减小;说明了重复控制的有效性

与可行性。

(2) 由图 10 可知,控制策略使得匀速段位移误差减小,由于调头段是非线性运行,在调头处产生较大的位置误差,控制器对这段的控制效果较明显(红色虚线内),由最初超过 1s 的调头时间经过几个周期后得到了明显的改善。角镜运动几个周期后的匀速段位移误差最大值下降至开始时约 1/3。

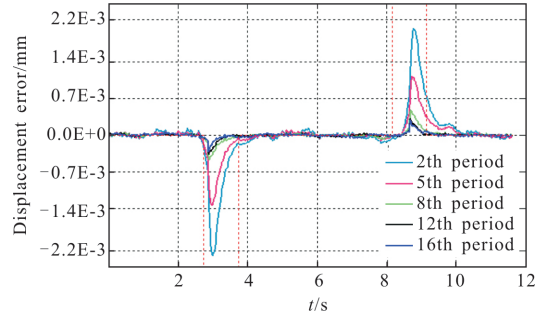


图 10 多个周期位移误差叠加曲线

Fig.10 Curves of multiple periods displacement errors

(3) 由表 1 可知,随着控制周期增加,匀速段位移误差的方差逐渐降低,说明了角镜运动越来越稳定,速度误差越小。将第 2 个周期与第 16 个周期匀速段的速度误差进行比较如图 11 所示,误差由开始时 $-0.001 \sim 0.0023 \text{ mm/s}$ 降至约 $\pm 0.0004 \text{ mm/s}$ 。

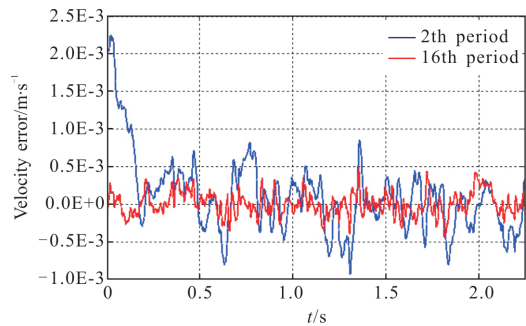


图 11 不同周期的速度误差曲线

Fig.11 Velocity error curves of different periods

表 1 不同周期匀速段位移误差的方差

Tab.1 Variances of displacement errors in different periods of uniform velocity section

Period	2	5	8	12	16
Variance (E-04 mm ²)	1.145 583	1.133 286	1.130 557	1.130 240	1.130 119

5 结束语

角镜扫描速度不稳定造成光强的调制信噪比变化,使得探测器获取的干涉信号和反演得到的光谱图产生误差。为提高傅里叶变换光谱仪的调制效率,提出平动式干涉仪光程扫描系统。首先建立以永磁同步直线电机为被控对象的控制系统,设计速度反馈和 PI 控制提高系统稳定性和快速性;然后将重复控制器插入到控制系统中降低周期性误差。通过 MATLAB 仿真来验证控制策略可行性,搭建半物理实验平台进行测试。实验结果表明前两个周期时角镜位置误差为 $2.0\text{e}-3\text{ mm}$,第三个周期重复控制器开始起作用,第四个周期后误差降到 $0.7\text{e}-3\text{ mm}$,减小了一个数量级;速度误差最终稳定于 $\pm 0.0004\text{ mm/s}$,稳定后匀速段速度稳定性大于 99.5%。因此,所提出的控制器设计方法实现了角镜高平稳扫描,为具有类似特性的星载扫描系统的设计提供借鉴。

参考文献:

- [1] Kasuya M, Nakajima M, Hamazaki T. Greenhouse gases observing satellite (GOSAT) program overview and its development status[J]. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical & Spaceences Aerospace Technology Japan*, 2009, 7(7): 5-10.
- [2] Fan Bin, Chen Xu, Li Bicen, et al. Technical innovation of optical remote sensing payloads on GF-5 satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46 (1): 0102002. (in Chinese)
- [3] Xiong Wei. Greenhouse gases Monitoring Instrument (GMI) on GF-5 satellite[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(3): 0303002. (in Chinese)
- [4] Mei Fenghua, Li Chao, Zhang Yuxin. Application of spectral imaging technology in maritime target detection [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(6): 708-718. (in Chinese)
- [5] Liu Qianqian, Zheng Yuguan. Development of spectral calibration technologies with ultra-high resolutions [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6): 566-577. (in Chinese)
- [6] Nian Wei, Liu Zhaojun, Lin Zhe, et al. Optical path scanning control system design of the Fourier spectrometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (8): 2085-2091. (in Chinese)
- [7] Wei Wei, Chen Jie, Zhang Ruolan, et al. Design of mirror control system in dual mode imaging device with long line FPA detector[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(1): 67-71. (in Chinese)
- [8] Zhu Yongkai, Zhao Hong, Wang Zhao, et al. Rotary scanning method applied to optical coherence tomography system [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2004(9): 913-915. (in Chinese)
- [9] Beer R. TES on the aura mission: scientific objectives, measurements, and analysis overview[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44 (5): 1102-1105.
- [10] Xie Yuntao, Zhang Yuyun. OPD scanning model of the swing arm interferometer and its simulation [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(07): 821-824. (in Chinese)
- [11] Ma Li, Wang Jingping, Li Fengtian, et al. Friction modeling and compensation of precision position system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(1): 121-128. (in Chinese)
- [12] Jiang Zhenhai, Xu Sichen, Gu Dongwei, et al. Research on friction compensation based on interval analysis theory [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(6): 1519-1525. (in Chinese)
- [13] Liu R, Liu M. Digital control strategy for scanning of moving mirror in fourier transform spectrometer [J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(24): 12003-12009.
- [14] Nian Wei, Liu Zhaojun, Lin Zhe. Optical path scanning design based on robust H_∞ control for the Fourier spectrometer [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, 39(06): 55-63. (in Chinese)
- [15] Shahsavari B, Keikha E, Zhang F, et al. Adaptive repetitive control design with online secondary path modeling and application to bit-patterned media recording [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, 51(4): 1-8.