

弹光调制器的频率漂移特性及其傅里叶 变换光谱的稳定性研究

张敏娟^{1,2}, 刘文敬^{1,2}, 王志斌², 徐美芳^{1,2}, 张 瑞^{1,2}, 李春阳^{1,2}

(1. 中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;

2. 中北大学山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051)

摘要: 弹光调制器作为高 Q 值的谐振器件, 在高压谐振下, 其谐振频率将随着自身温度升高漂移, 影响了弹光调制干涉仪的稳定性和重建光谱的准确性。在建立弹光调制器振动模型和频率温漂模型的基础上, 提出了基于频率跟踪和幅值调节的弹光调制器双闭环自适应驱动控制方法。在该方法中, 采用数字锁相技术的频率自扫描方法实现驱动频率对弹光调制器谐振频率的跟踪; 基于检测参考激光干涉图的最大光程差的变化调节驱动信号的幅值, 以实现重建光谱的稳定控制, 同时基于参考激光的最大光程差参数实现重建光谱的定标。在实验中该驱动控制方法应用到弹光调制傅里叶变换光谱仪中, 实现了驱动频率对弹光调制器谐振频率的实时跟踪和高压功放电路的幅值调节, 使得干涉图的最大光程差稳定在 0.236 nm 左右, 其精密度为 3.3%; 重建光谱的最大相对误差为 2.5%。此实验验证了该方法能有效稳定弹光调制傅里叶变换光谱仪的光谱分辨率。

关键词: 弹光调制器; 频率温漂; 数字锁相技术; 最大光程差

中图分类号: TN219 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200019

Study on frequency-drifting characteristics of photo-elastic modulator and stability of Fourier transform spectra

Zhang Minjuan^{1,2}, Liu Wenjing^{1,2}, Wang Zhibin², Xu Meifang^{1,2}, Zhang Rui^{1,2}, Li Chunyang^{1,2}

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Engineering and Technology Research Center of Shanxi Province for Optical-Electric Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Photo-elastic modulator (PEM) is a high-Q resonant device. When driven by a high voltage resonant signal, its resonant frequency will drift with its temperature change, and the stability of the interferometer and the accuracy of the rebuilt spectrum are affected. The vibration model and frequency-drifting model of the photo-elastic modulator were first established, and a frequency-tracking and adjustable-amplitude double closed-loop driving control method was proposed. In the method the digital phase-locking technique was adopted to track the changing resonant frequency of the photo-elastic modulator. Based on the change of the maximum optical path difference for the reference laser interferometer, the amplitude of the driving signal was adjusted to realize the stable control of the rebuilt spectrum. At the same time, the calibration of the reconstructed spectra was realized based on the maximum optical path difference. In the experiment the double closed-loop adaptive drive control method was applied to the driving control system of the photo-elastic modulated Fourier transform spectrometer

收稿日期: 2020-01-20; 修订日期: 2020-02-29

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (61505180); 山西省自然科学基金 (201901D111163)

作者简介: 张敏娟 (1977-), 女, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光谱信息获取与处理方面的研究。Email: zmj7745@163.com

(PEM-FTs), which realized the real-time tracking of the driving-frequency to the resonant frequency for PEM and the amplitude adjustment of the high-voltage amplifier. The maximum optical path difference of the interference diagram was stable at about 0.236 nm, and its precision was 3.3%. The maximum relative error of the reconstructed spectra was 2.5%. The experiment shows that the method can effectively stabilize the spectral resolution of the PEM-FTs.

Key words: photo-elastic modulator (PEM); frequency drifting along with temperature; digital phase-locking technology; maximum optical path difference

0 引言

弹光调制器是由弹光晶体和电光晶体组成的谐振器件, 当其应用于傅里叶变换光谱仪时, 具有测量速度快、光谱范围宽、抗震性能好等优点, 可实现高速、瞬态光谱探测^[1]。弹光调制器作为干涉仪的核心器件, 其稳定性和调制深度将影响反演光谱的稳定性和光谱分辨率的准确度。目前, 弹光晶体多采用多块串接法^[2]、多次反射法^[3-5]等提高两束光的光程差, 以提高反演光谱的分辨率。但多块串接法一致性差, 很难做到同步; 多次反射法光能衰减明显, 且弹光晶体在工作时因自身振动温度变化, 引入自身谐振频率的漂移, 降低了系统稳定性。

为了提高系统稳定性, 参考文献 [6] 在分析弹光调制器工作模型的基础上, 提出了温度补偿方法; 参考文献 [7-8] 提出了基于数字锁相的频率跟踪技术; 参考文献 [9] 提出了 PEM-ATC, 但是该方法仅降低了外界环境温度的影响, 并不能减小弹光调制器自身温度升高引起的频率漂移。参考文献 [10] 提出了双闭环多参数驱动控制技术以降低温度的影响。

为了更好地分析弹光调制傅里叶变换光谱仪的稳定性影响因素, 文中采用多次反射式弹光调制干涉仪、基于频率跟踪和幅度调制的驱动控制方法以及非线性的光谱重建方法搭建弹光调制傅里叶变换光谱仪。在分析弹光调制器热稳定因素的基础上, 从频率漂移、幅值调节、光程差变化以及重建光谱等方面分析系统的稳定性。

1 弹光调制器的频率温漂特性及系统稳定性影响因素分析

在傅里叶变换光谱中, 干涉图的最大光程差可反映重建光谱的分辨率。当入射光经弹光调制干涉仪产生干涉图的瞬态光程差为^[11]:

$$L = \Delta n \cdot d = dn_0^3(\lambda)(\pi_{12} - \pi_{11})\delta_0 \sin(\omega_0 t) \quad (1)$$

式中: d 为通光路径; λ 为入射光的波长; $n_0(\lambda)$ 为晶体在该波长下的折射率; δ_0 为最大调制应力; π_{12}, π_{11} 为不同通光方向的应力弹光系数张量。

由公式 (1) 可知, 在入射光波长一定时, 可采用多次反射提高通光路径 d , 或增加 Δn 提高最大光程差。多次反射提高通光路径使入射光衰减严重。因此, 在反射次数一定, 通光路径 d 一定时, 可通过增加 Δn 提高最大光程差。

增加 Δn , 则要求增加最大调制应力 δ_0 。为了产生大的调制应力 δ_0 , 要求施加在弹光调制器的压电晶体上的驱动信号幅值要尽可能的大, 同时使弹光调制器处于最佳谐振状态。当弹光调制器的谐振状态变差时, 在相同的驱动应力下, 产生的形变 Δn 减小。

设弹光调制器的谐振频率为 ω_r 。当驱动信号幅值不变、频率 $\omega = \omega_r$ 时, 弹光调制器将处于最佳谐振状态, 弹光调制干涉仪将产生最大的相位延迟量; 而当驱动信号频率偏离谐振频率 ω_r 时, 最大相位延迟量减小, 从而降低重建光谱的分辨率。

弹光调制器作为谐振器件, 其工作时的热损耗功率 P_{th} 较大, 且为:

$$P_{th} = VI \cos \phi = \frac{V^2}{R[1 + Q^2(\omega/\omega_r - \omega_r/\omega)^2]} \quad (2)$$

式中: V 为驱动电压幅值; R 为弹光调制器的等效阻抗; Q 为品质因数。

弹光调制器为低阻尼器件, 产生的热耗散一部分以热交换方式向周围环境扩散, 另一部分引起自身温度升高。弹光调制器的频率温度系数近似为:

$$\omega_r(T) = \omega_r' + a(T - T_{amb}) \quad (3)$$

式中: ω_r' 为弹光调制器初值固有频率; T_{amb} 为初始温度; a 为温度系数。将公式 (3) 与公式 (2) 联立, 得到弹光调制器的频率漂移模型为:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{a}{2cR} * \frac{V(\omega)^2}{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right)^2} - \frac{(\omega_r - \omega_r')}{\tau_{th}} \quad (4)$$

式中: $\tau_{th} = R_{th} \cdot c$ 为热时间常数, c 为比热容。

从公式 (4) 可知, 弹光调制器的频率漂移是与驱动电压、品质因数、谐振状态有关。且频率漂移率与驱动电压成正比、与品质因数呈反比关系。同时当 PEM 处于最佳谐振状态时, 热耗散引起的频率漂移更严重。

弹光调制器的品质因数可表示为:

$$Q = Q_1 \times Q_2 \times \beta \quad (5)$$

Q_1 和 Q_2 分别为弹光晶体和压电晶体的品质因数; β 为常数, 表征压电晶体与弹光晶体的传递效率。弹光晶体和压电晶体有不同方向的频率温度系数, 温度升高将会引起各自的谐振频率向不同方向发生变化, 使得 $\omega_r \neq \omega_{r1} \neq \omega_{r2}$ 。这将导致弹光晶体和压电晶体的品质因数降低, 从而减小光程差因子。

为保证弹光调制干涉仪工作于最佳谐振状态, 参考文献 [12] 研究了以数字锁相环为核心的驱动频率自跟踪调节方法, 同时, 结合重建光谱的分辨率含义和干涉图最大光程差检测理论, 研究了驱动频率自跟踪和幅值调节的双闭环驱动控制技术。在该技术中已知流过压电石英驱动器的电流信号与驱动电压信号的相位差 $\varphi(\omega)$ 为:

$$\varphi(\omega) = -\arctan \left(Q_1 \left(\frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right) \right) \quad (6)$$

通过检测相位差 $\varphi(\omega)$, 调节驱动信号的频率, 使其能跟踪弹光调制器谐振频率的变化。同时, 基于光谱分辨率的指标要求设定检测干涉图的最大光程差。将最大光程差的实际测量值与预定值进行比较, 调节高压驱动电路的驱动电压, 以维持干涉图最大光程差的稳定。建立的双闭环自适应驱动控制系统结构框图如图 1 所示。

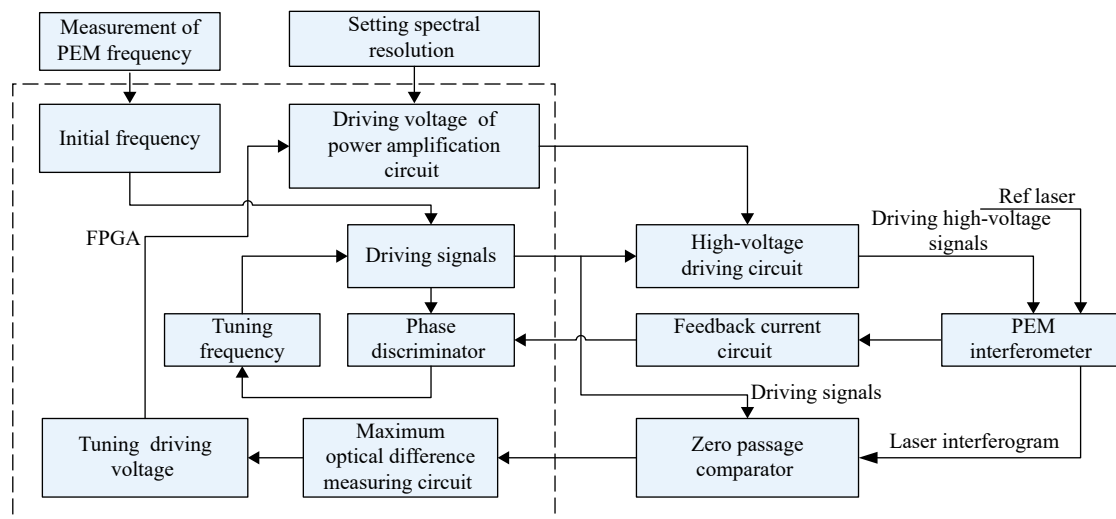


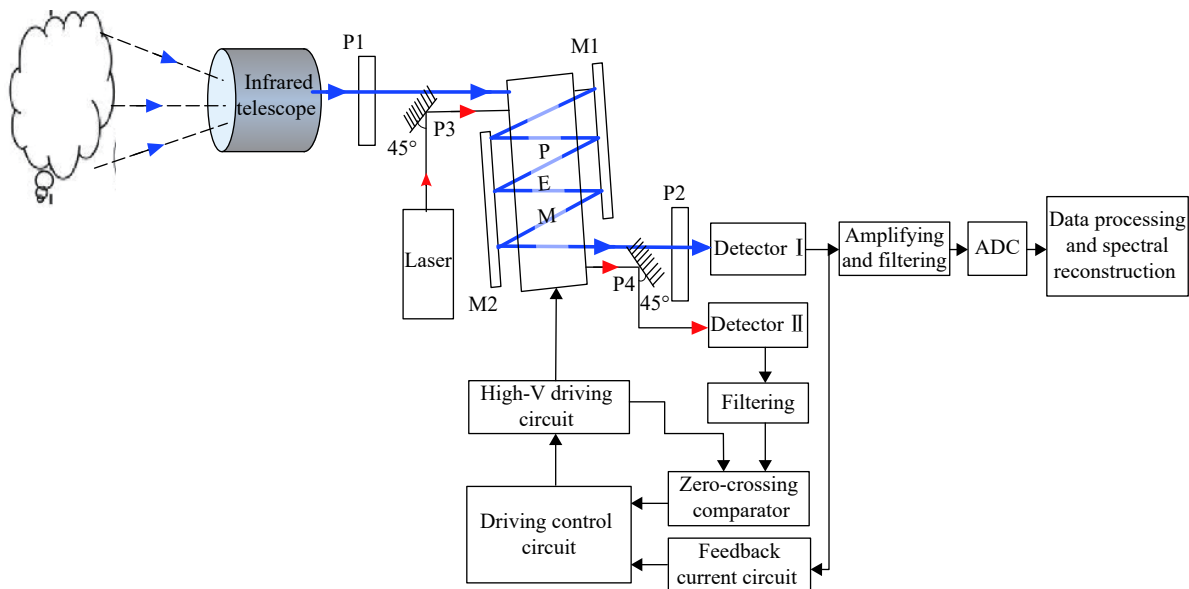
图 1 双闭环自适应驱动控制系统结构图

Fig.1 Chart of the double closed loop adaptive driving control system

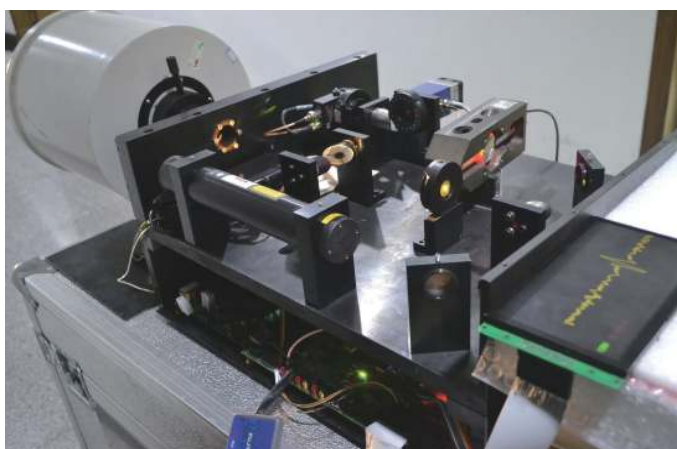
由公式 (1) 可知, 弹光调制干涉信号是非正弦变化, 在采用等时间方式采样干涉信号时, 采集的干涉信号不满足快速傅里叶变换算法的条件。因此, 笔者所在课题组采用了非均匀快速傅里叶变换算法对干涉图进行光谱重建。已知离散傅里叶变换算法的频率分辨率 Δf 与时域中干涉图的最大光程差呈反比。为了标定重建光谱, 需实时检测干涉图的最大光程差, 同时应尽可能维持此参数稳定。

2 仿真与实验

为了分析弹光调制器的频率温漂对系统稳定性的影响, 以及验证双闭环自适应驱动控制技术的有效性, 文中基于课题组研制的多次反射式弹光调制器、驱动控制电路、高压功放电路、数据处理系统等, 搭建了弹光调制傅里叶变换光谱仪测试平台, 如图 2 所示。在该平台中, 弹光调制器采用 ZnSe 晶体的谐振频率为 50.448 kHz, 参考激光为 632.8 nm 的激光器。



(a) 弹光调制傅里叶变换光谱仪系统结构框图
 (a) Structure diagram of PEM-FTs



(b) 弹光调制傅里叶变换光谱仪实物图
 (b) Product photo of PEM-FTs

图 2 弹光调制傅里叶变换光谱仪测试平台

Fig.2 PEM-FTs test platform

2.1 弹光调制器驱动频率测试

在实验室环境温度约为 21 °C, 连续 3 h, 每间隔 10 min, 通过测振仪对弹光调制器的谐振频率进行测量并采集。得到的谐振频率如图 3 所示。弹光调制器的初始调制频率为 50.448 kHz。随着工作时间加长, PEM 温度升高, 谐振频率有衰减趋势, 如图 4 所示。因此, 为了使弹光调制器工作于最佳谐振状态, 需要驱动信号的频率跟随弹光调制器谐振频率的变化进行调节。

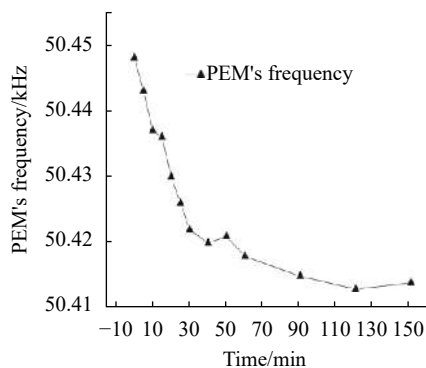
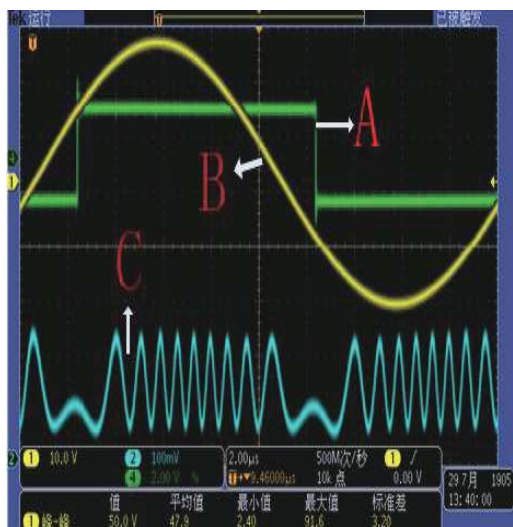
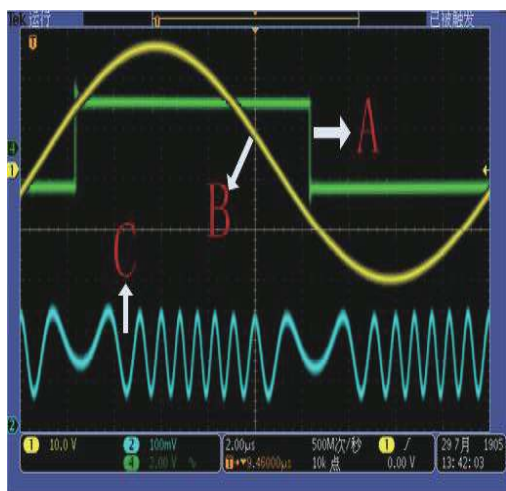


图 3 弹光调制器的谐振频率变化曲线

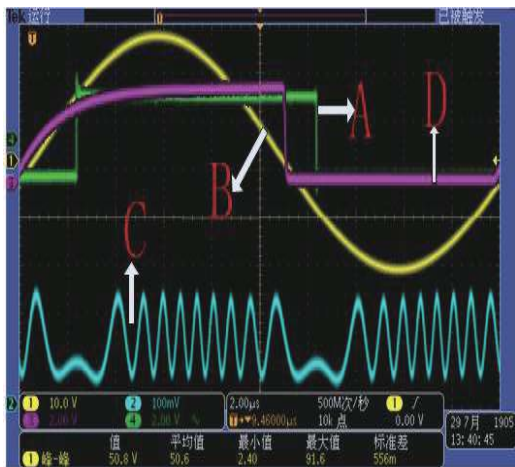
Fig.3 PEM resonant frequency drifting curve



(a) 初始激光干涉图
(a) Initial laser interferogram



(b) 10 min 后固定频率的激光干涉图
(b) Laser interferogram with steady frequency after 10 min



(c) 10 min 后频率跟踪下的激光干涉图
(c) Laser interferogram with tracking frequency after 10 min

图 4 带频率自动跟踪与固定频率实验效果图

Fig.4 Experimental figures of the auto tracking frequency method and fixed frequency method

2.2 基于数字锁相技术的驱动频率调节测试

基于公式 (6), 通过检测高压驱动电压 $V(\omega)$ 与流过弹光调制器的电流 $I(\omega)$ 的相位差可判断弹光调制器的谐振状态。实验采用 FPGA 产生的驱动信号与 PEM 反馈电流信号测量相位差, 以实现频率跟踪。

图 4 是在环境温度为 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 采集的驱动电压、电流波形图以及激光干涉图。图 4 中的曲线 A 为 FPGA 输出的驱动信号波形; 曲线 B 为高压驱动电压; 曲线 C 为小光程差时的激光干涉图; 曲线 D 为电流反馈曲线。图 4(a) 是初始时刻测量的波形图和激光干涉图, 此时产生的最大光程差为 $5.695\text{ }\mu\text{m}$, 图 4(b) 是不带频率调节驱动控制器, 经 10 min 后输出的激光干涉图, 从图中可以看出此时的光程差已经减小为 $5.462\text{ }\mu\text{m}$; 图 4(c) 是驱动电路采用了锁相技术, 对驱动频率进行调节后经过 10 min 后输出的激光干涉图。此时干涉图的最大光程差与初始时刻相比较略有减小, 为 $5.615\text{ }\mu\text{m}$ 。

2.3 驱动信号幅值和最大光程差稳定性测试

当驱动信号的频率跟随弹光调制器的谐振频率调节时, 将使弹光调制器处于较好的谐振状态。但是由参考文献 [13] 可知, 弹光调制器的高压功放电路采用 RLC 电路, 其谐振频率与驱动信号的谐振频率基本一致。但在驱动信号频率变化时将导致高压功放电路, 在相同的驱动信号下产生的输出信号的幅值衰减, 使弹光调制器的调制深度降低。因此, 为了弥补高压功放输出电压的衰减, 该设计以参考激光干涉图单周期过零计数的方式检测最大光程差^[14-15], 基于最大光程差的变化对高压驱动电压进行调节, 实现干涉图最大光程差的稳定控制。图 5 是基于最大光程差调节的功放输出电压变化图。从图 5 可知, 高压功放输出信号的幅值由 1.75 kV 增加到 1.82 kV 左右, 并趋于稳定; 为了验证系统的稳定性, 对不同时刻的最大光程差参数进行检测, 如图 6 和表 1 所示。图 6 中, 曲线 a 为双闭环驱动控制时最大光程差变化曲线; 曲线 b 为频率调节控制下的最大光程差变化曲线。

在图 6 中, 曲线 a 表示仅采用频率跟踪技术时, 最大光程差随着时间的变化曲线; 曲线 b 表示采用双闭环驱动控制时, 最大光程差随时间的变化曲线; 根据曲线的变化趋势可以看出, 采用双闭环驱动控制方法, 很好地稳定了系统的最大光程差。

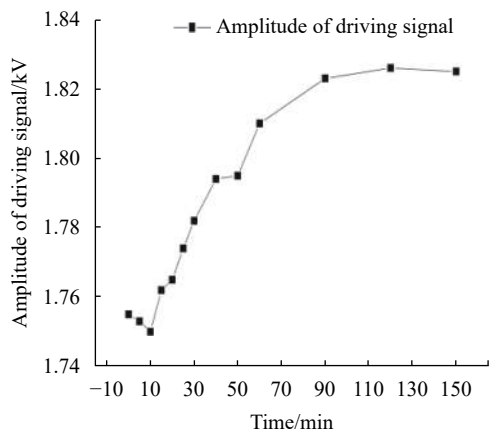


图 5 高压功放的输出信号

Fig.5 Output signal of high-voltage amplifier

从表 1 可知,当采用双闭环驱动控制系统时,其驱动频率能跟踪谐振频率漂移进行调节,干涉图的最

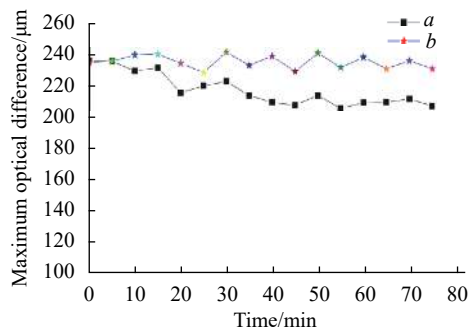


图 6 不同驱动方法的最大光程差对比

Fig.6 L_{MOPD} comparison for different driving methods

大光程差基本稳定在 0.236 mm 左右,最大光程差的精密度为 3.3%;而仅采用频率调节驱动弹光调制器时,因谐振频率漂移,高压功放电路谐振状态改变,导致最大光程差有减小的趋势。

表 1 不同驱动方法、不同时间间隔的最大光程差对比

Tab.1 Contrast of the maximum optical path difference with different driving methods and different intervals

Interval/min	Double closed-loop driving controll		Tuned frequency driv controlling	
	Number of peak of laser interferogram	Maximum optical path difference/ μm	Number of peak of laser interferogram	Maximum optical path difference/ μm
0	372	235.4	374	236.67
5	373	236.03	373	236.03
10	365	239.97	364	230.33
15	380	240.46	367	232.23
20	371	234.76	343	217.05
25	362	229.07	349	220.85
30	382	241.73	353	223.37
35	369	233.50	340	215.15
40	378	239.20	333	210.72
45	363	229.71	330	208.82
50	381	241.10	339	214.52
55	367	232.24	327	206.92
60	377	238.57	332	210.09
65	368	232.87	333	210.72
70	374	236.67	336	212.62
75	366	231.60	330	208.82

2.4 重建光谱的准确性分析

为了验证 PEM-FTs 的重建光谱的准确性,在实验中将不同波长的光汇聚后作为输入光,经光调制干涉仪产生干涉图。在系统中以 808 nm 激光作为参考激光,通过激光干涉图测量最大光程差参数。由参考文献 [11] 可知,离散傅里叶变换的横坐标各个频率

点,应以该频率的静态折射率差为参数测量最大光程差,而不是以 808 nm 的参考波长的静态折射率,计算最大光程差。因此,需要对影响最大光程差参数的静态折射率进行校正。校正前后的光谱图如图 7 和表 2 所示。从表中可以看出,未校正重建光谱的误差比较大,当入射光为 $15\ 000\ \text{cm}^{-1}$ 时,相对误差为 6.2%,

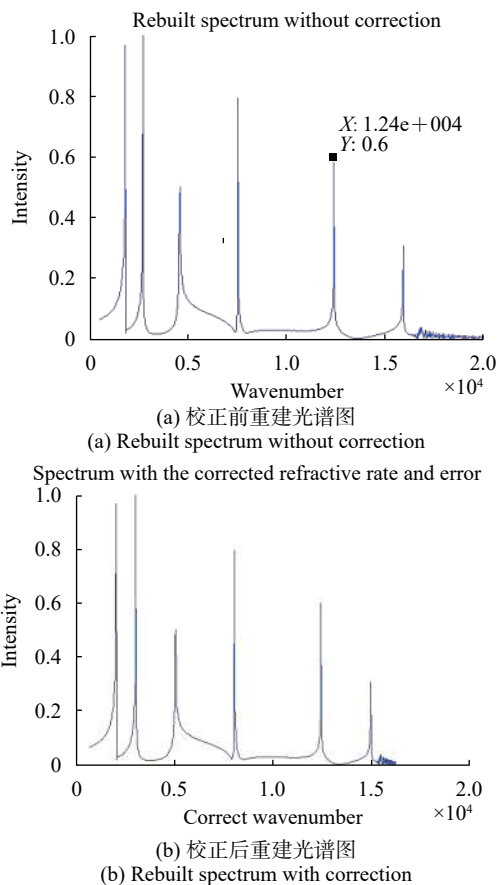


图 7 校正前后重建光谱图

Fig.7 Rebuilt spectrum before and after correction

表 2 不同波数的窄带光重建后的波数值

Tab.2 Reconstructed wavenumber for narrowband lights with different wavenumbers

Wavenumber of the incident light	Rebuilt spectrum without correction	Rebuilt spectrum with correction
2 020	1 825	2 019
3 000	2 725	3 003
5 000	4 600	5 029
8 000	7 525	8 045
12 376	12 400	12 380
15 000	15 930	14 620

而校正后的相对误差为 2.5%; 且重建光谱随着波数的增加, 误差也从 0.05% 增加到 2.5%。

3 结论

文中在研究弹光调制器谐振频率温漂模型的基础上, 分析了弹光调制器谐振频率温漂特性, 在采用弹光调制器驱动频率自调节的基础上; 针对高压功放

电路 RLC 谐振程度降低, 输出电压幅值降低的问题, 提出了基于参考激光干涉图最大光程差变化的驱动电压幅值调节方法, 以实现弹光调制干涉信号的稳定控制和光谱重建。实验验证, 在采用该双闭环驱动控制方法时, 产生干涉图的最大光程差基本稳定在 0.236 mm 左右, 最大光程差的精密度为 3.3%; 定标后的重建光谱的最大相对误差为 2.5%, 满足项目需求。

参考文献:

- [1] Wang B, Jennifer L. Basic optical properties of the photoelastic modulator: Part I. Useful aperture and acceptance angle[C]// Polarization Science and Remote Sensing II, SPIE, 2005, 5888: 1-8
- [2] Buican T N. Multivariate PEM/FT spectrometry: intrinsic data fusion and applications for Ied and CB defense[C]//Proceedings for the Army Science Conference(26th), 2006: ADA481200.
- [3] Buican T N. High retardation-amplitude photoelastic modulator: US 7764415B2[P]. 2010-07-27.
- [4] Zhang Rui, Li Kewu, Chen Yuanyuan, et al. Ultra-high-speed spectro polarimeter based on photoelastic modulator [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(30): 8426-8432.
- [5] Hu C G, Sun L D, Li Y N, et al. Retardation correction for photoelastic modulator-based multi-channel reflectance difference spectroscopy [J]. *Opt Soc*, 2008, 25(6): 1240-1245.
- [6] Wang Baoliang, Wolf Jacob, Lakanen Bob. Basic optical properties of the photoelastic modulator part III: Thermal properties[C]//Current Developments in Lens Design and Optical Engineering X III, SPIE, 2012, 8486: 1-9.
- [7] Wang Yanchao, Wang Zhibin, Zhang Jilong, et al. Temperature compensation strategy and implementation for photoelectric modulation interferometer with large optical path difference [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(5): 1429-1432. (in Chinese)
- [8] Chen Guangwei, An Yongquan, Wang Zhibin, et al. Self-tracking technology of photoelastic modulation frequency [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(10): 21-26. (in Chinese)
- [9] Hirschy L, Wang B L, Wolf J, et al. Basic optical properties of the photo-elastic modulator part III: Thermal properties[C]// SPIE, 2012, 8486: 848619.
- [10] Zhang M J, Jing N, Li K W, et al. Thermal stability control system of photo-elastic interferometer in the PEM -FTs [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89: 013105.
- [11] Hao Qian, Zhang Minjuan, Li Jinhua, et al. A calibration method

- for the photoelastic modulation Fourier transform spectrometer: China, ZL201710572176.8[P]. 2018-08-31. (in chinese)
- [12] Buican T N. Birefringence interferometers for ultra-high-speed FT spectrometry and hyperspectral imaging: I. Dynamic model of the resonant photo-elastic modulator [J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2006, 42: 51-58.
- [13] Zhang Minjuan, Wang Yanchao, Chen Youhua, et al. The drive circuit of the invert-phase serial photoelastic modulation interferometer: China, ZL201310211162.5[P]. 2016-01-20. (in Chinese)
- [14] Zhang Minjuan, Wang Zhibin, Li Xiao, et al. The stability and measuring technology of the maximum optical path difference of photo-elastic modulator interferograms [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(5): 1436-1439. (in Chinese)
- [15] Wang Nan, Wang Yanchao, Zhang Minjuan, et al. A stability control method of photo-elastic modulator based on voltage compensation [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(4): 419-424. (in Chinese)