

DOI:10.16136/j.joel.2022.05.0681

干涉仪速度波动对光谱信噪比的影响规律研究

秦玉胜^{1,2}, 李相贤^{1*}, 韩 昕¹, 童晶晶¹, 高闽光¹, 刘淑芬³

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026; 3. 山东省泰安生态环境监测中心, 山东 泰安 271000)

摘要:干涉仪速度波动是影响光谱信噪比的重要因素之一, 为了进一步提高光谱信噪比, 对干涉仪速度波动与光谱信噪比之间的关系进行了研究。文中从旋转角度、反馈速度测量、电路噪声等方面定量分析了倾斜式干涉仪光程差速度波动的成因, 在此基础上, 通过理论分析和实验验证了光程差速度不稳定性对光谱信噪比的影响规律。实验结果表明, 在同一波数区间, 光程差速度稳定性越高, 光谱信噪比越好, 速度稳定性提高 5% 时, 光谱信噪比提高约 14%—16%。当光程差速度恒定时, 低波数段的光谱信噪比明显优于高波数段, 2100~2200 cm⁻¹ 波段比 2500—2600 cm⁻¹ 波段的信噪比高约 20%。该研究成果为高信噪比光谱仪的设计提供了理论基础。

关键词:干涉仪; 速度波动; 光谱仪; 波数; 信噪比

中图分类号: TN214 文献标识码: A 文章编号: 1005-0086(2022)05-0449-09

Study on the influence of interferometers velocity fluctuation on the spectral signal-to-noise ratio

QIN Yusheng^{1,2}, LI Xiangxian^{1*}, HAN Xin¹, TONG Jingjing¹, GAO Minguang¹, LIU Shufen³

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China; 3. Taian Ecological Environment Monitoring Center of Shandong Province, Taian, Shandong 271000, China)

Abstract: The velocity fluctuation of the interferometer is one of the important factors affecting the spectral signal-to-noise ratio. To further improve the spectral signal-to-noise ratio, the relationship between the velocity fluctuation of the interferometer and the spectral signal-to-noise ratio is studied. In this paper, the causes of optical path difference velocity fluctuation of the tilt compensation interferometer are quantitatively analyzed from the aspects of rotation angle, velocity feedback testing, and circuit noise. On this basis, the influence law of optical path difference velocity instability on the spectral signal-to-noise ratio is verified through theoretical analysis and experiments. The experimental results show that in the same wavenumber range, the higher the velocity stability of optical path difference, the better the spectral signal-to-noise ratio. When the velocity stability is increased by 5%, the spectral signal-to-noise ratio is increased by about 14%—16%. When the optical path difference velocity is constant, the spectral signal-to-noise ratio in the low wavenumber band is significantly better than that in the high wavenumber band, and the signal-to-noise ratio in the 2100—2200 cm⁻¹ band is about 20% higher than that in the 2500—2600 cm⁻¹ band. The research results provide a theoretical basis for the design of a high signal-to-noise ratio spectrometer.

Key words: interferometer; velocity fluctuation; spectrometer; wavenumber; signal-to-noise ratio

* E-mail: lixx@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2021-09-26 修订日期: 2021-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(42075135)和安徽省重点研究与开发计划项目(202104a05020026)资助项目

1 引 言

傅里叶变换光谱仪(Fourier transform spectrometer, FTS)是一种精密的科学仪器,它具有多通道、高通量、高精度、宽波段等优点,在环境污染气体监测领域有广泛的应用,随着走航监测、外场监测等应用场合的出现,对仪器的稳定性要求越来越高。干涉仪系统作为傅里叶变换光谱仪的核心部件,是提高仪器稳定性的重要研究对象。

干涉仪系统的运动方式有直线式、倾斜补偿式(旋转式和摆动式)等。倾斜补偿式干涉仪利用转动平台代替传统直线运动结构,实现了倾斜补偿的作用,能够有效地解决直线式迈克尔逊干涉仪由于对系统倾斜、剪切敏感所导致的光程差漂移等问题^[1,2]。倾斜补偿式干涉仪由于结构设计、摩擦等原因,给运动速度带来一定的波动。YUTA等^[3]开发了用于低温引力波探测器(Kamioka gravitational wave detector, KAGRA)的干涉仪反射镜驱动设计噪声范围计算仿真模型,降低噪声对运动控制的影响,实现高精度控制。SVISHCH等^[4]研究了干涉仪运动速度对迈克尔逊干涉仪设计方案时的参数影响,为电路参数的设计提供借鉴。MA等^[5-9]针对旋转式干涉仪光程差速度的非均匀性,提出了一种基于光程差迭代算法和非均匀离散傅里叶变换的过采样软件触发干涉图方法,提高了光谱信噪比。GUO等^[10-13]为了满足速度稳定性要求,设计了不同的先进控制器来降低速度干扰。SHAO等^[14]基于MATLAB建立的模型,分析了速度波动以及电路噪声引起的光谱噪声。光程差速度波动会在干涉信号采样过程中引入位置误差,从而对傅里叶变换后的光谱信噪比产生影响。目前,对于倾斜补偿式干涉速度波动的研究,多集中于控制方法或软件采样等领域,从而减小对速度波动带来的影响。但是,关于速度波动的成因分析,以及速度波动对光谱信噪比影响的研究报道较少。

本文针对倾斜补偿式干涉仪的结构,从旋转角度、反馈速度测量、电路噪声等方面研究了速度波动的成因。在此基础上,通过理论分析和实验验证了光程差速度稳定性对光谱信噪比的影响规律,为高光谱信噪比光谱仪的设计提供了理论基础。

2 光程差速度波动的影响因素

2.1 旋转角度

自行设计的一种倾斜补偿式干涉仪结构,如图1所示。该倾斜补偿式干涉仪是一种基于双平面镜动

镜结构的摆动式干涉仪,两个平面反射镜固定在同一旋转平台上,2个动镜围绕挠性轴承同时转动,分束器安装在固定平台上。45°入射光由分束器分为2束,反射光和透射光分别在2面平行镜表面进行反射后,沿着原有光路回到分束器,最后汇聚到探测器上。当2面动镜转动时,两束光在探测器上就会形成光程差,从而形成光干涉^[15]。干涉的光程差(optical path difference, OPD)大小表示为:

$$OPD = 2(AC + CH + HG + EF + BD - BF) = 2R \left[\frac{1 + \sin 2\alpha}{\sin(\theta + \alpha)} - \frac{1 - \sin 2\alpha}{\sin(\theta - \alpha)} \right], \quad (1)$$

$$\alpha = \omega \cdot t, \quad (2)$$

式中, α 为转角, ω 为动镜转动的角速度, R 为平行镜间距, t 为一个运动周期内的时间。

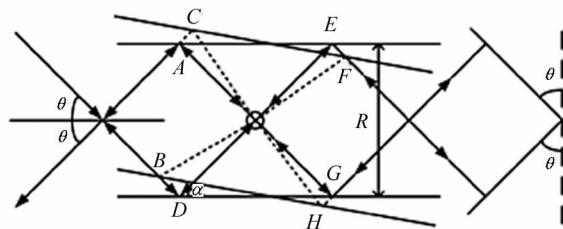


图1 倾斜补偿式干涉仪

Fig. 1 A tilt-compensated interferometer

实际光机结构中,入射角 θ 为45°, $R=8$ cm,设转动平台角速度为 $\omega=1$,则 $\alpha=t$ 。对时间 t 求导,即求得光程差速度(optical path difference velocity, OPDV)函数表示为:

$$OPDV = 0.16 \left(\frac{\cos 2t}{\sigma} - \frac{\cos 2t}{\beta} + \frac{\cos(t - 45^\circ) \cdot (\sin 2t - 1)}{\beta^2} - \frac{\cos(t + 45^\circ) \cdot (\sin 2t + 1)}{\sigma^2} \right), \quad (3)$$

式中, $\sigma = \sin(t - 45^\circ)$, $\beta = \sin(t + 45^\circ)$ 。

利用Origin2018绘制函数图像,光程差速度与旋转角度的函数关系如图2所示。

分辨率1个波数时对应的旋转角度是1.266°,由图2可知,此时的速度误差约为0.1%。随着仪器分辨率的增加,误差会随之增大,当仪器分辨率为0.125波数对应的旋转角度是10°,此时的速度误差约为1.5%,光程差速度具有非线性和时变性的特点在分辨率提升的同时降低了速度稳定性。

因此,倾斜补偿式干涉仪的光程差速度与音圈电机速度存在非线性和时变关系。要满足干涉仪系统等光程差采样需要的恒定光程差速度,则需要实

现一个时变的旋转角速度,音圈电机需要控制的角速度时变关系如图3所示。

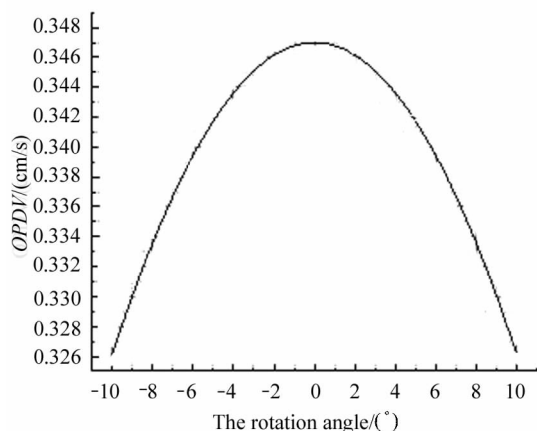


图2 光程差速度与旋转角度的函数关系

Fig. 2 OPDV as a function of the rotation angle

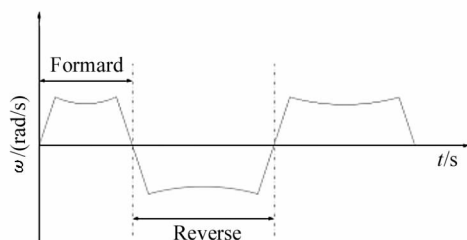


图3 时变音圈电机速度

Fig. 3 Time-varying voice coil motor velocity

2.2 反馈速度精度

反馈速度是干涉仪系统控制的重要参数,反馈速度测量环节引入的误差也会导致速度波动,经由控制算法处理后,会进一步对实际运动产生影响。

在傅里叶变换红外光谱仪中,光程差速度反馈是基于 He-Ne 激光干涉系统实现的。He-Ne 激光的单色性较好,在干涉仪扫描速度不变时,He-Ne 激光干涉图的波形为标准正弦波波形,且频率由 He-Ne 激光的波长决定。设光程差速度为恒定值 u_{op} , He-Ne 激光的波数为 ν_{hn} ,则光电探测器获取干涉图频率为:

$$f_{hn} = u_{op} \nu_{hn} \quad (4)$$

经过前置放大、滤波、整形电路等环节,将正弦干涉信号变为过零点脉冲信号,其频率等于干涉信号频率的 2 倍,即表示为:

$$f_0 = 2f_{hn} \quad (5)$$

由式(4)、(5)得到,速度反馈计算式为:

$$u_{op} = \frac{f_0}{2\nu_{hn}} \quad (6)$$

由式(6)可知,在不考虑探测器及电路噪声的影

响下,速度反馈的准确性依赖于过零点脉冲信号频率的测量。常见的脉冲信号测频方法有 M 法、T 法和 M/T 法。M 法是在一定测量时间内,直接对过零点脉冲信号进行计数来确定频率。其速度越快,在一个测量周期内过零点脉冲数越多,测频准确度就越高。T 法是对高频时钟计数,测量 2 个相邻过零点脉冲之间的时间间隔来确定频率。其速度越大,相邻过零点脉冲信号的时间间隔越小,测频精度就会越低。M/T 法是二者结合,在运动速度的不同阶段采用相应的方法,相当于高速时采用 M 法,低速时采用 T 法。

由于设计的倾斜补偿式干涉仪运动速度较低,适用于 T 法测频,动态测速误差低,动态响应速度高。T 法测频原理及误差如图 4 所示。

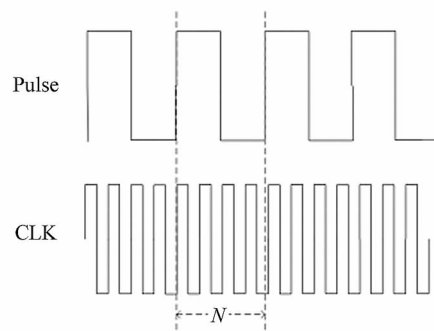


图4 T法测频原理及误差

Fig. 4 Principle and error of T-method frequency measurement

由图4可知,T法测得的过零点脉冲信号频率为:

$$f_0 = \frac{f_c}{N} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),计算光程差速度为:

$$u_{op} = \frac{f_c}{2N\nu_{hn}} \quad (8)$$

在检测过程中当被测脉冲信号上升沿到来时,计数器对高频时钟信号上升沿开始计数,当下一个被测脉冲信号上升沿到来时,计数器归零并且重新开始计数。由于高频时钟信号相对于待测脉冲信号是独立的,高频时钟信号的上升沿不可能正好落在待测脉冲信号的边缘,在计数时间内最多会存在一个时钟的误差,即有 $\Delta e \leq 1$,相对误差为 $1/N$,T 法测频误差即为反馈速度测量误差。

从相对误差公式可以得出,过零点脉冲信号频率固定时,高频时钟信号的频率越高,相对误差越小。因此,可以通过提高时钟信号频率来减小相对

误差。

2.3 电路噪声

干涉仪运动系统的电路噪声干扰主要来自光电信号检测电路和功率放大电路的噪声。下面分别研究 2 种电路噪声对光程差速度波动的影响。

2.3.1 光电检测电路噪声

光电检测电路的噪声主要有激光光源的不稳定性、光电探测器及前置放大器的噪声。这些噪声通过对脉冲信号边缘检测的影响,进而作用于速度反馈环节,对速度波动产生影响。

激光光源的功率不稳定会导致光电探测器接收的信号有纹波、光电探测器的散粒噪声和热噪声及前置放大器的噪声会叠加在干涉信号上,导致干涉信号的过零点位置提前或者滞后,从而引入测量误差。同时,干涉信号整形时在过零点附近的抖动,也会造成过零点误判,对脉冲信号的边缘检测产生影响。

研究发现,光电检测电路的噪声通过作用于反馈速度测量,主要影响速度稳定性。为了降低光电检测电路噪声的影响,提高反馈速度测量精度,干涉信号处理电路中需要增加低通滤波器和滞回电压电路。

2.3.2 功率放大器噪声

功率放大器的电路噪声直接叠加在控制器的输出信号上,会影响干涉仪运动速度的准确性。功率放大器的噪声与白噪声的特征相近,实验室中自研光谱仪所使用功率放大器的噪声幅值最大不超过 $60 \mu\text{V}$ 。

为了分析不同频率的功率放大器噪声对速度稳定性的影响,首先对干涉仪动镜转动平台进行建模,根据其运动特性建立系统的离散传递函数,再将幅值相同(均为 $60 \mu\text{V}$)、频率不同的正弦波信号作为系统的驱动信号。在 MATLAB/Simulink 中仿真干涉仪的运动速度情况,计算在驱动信号的作用下干涉仪运动的最大速度,与期望速度 (0.33 cm/s) 作比较,不同频率正弦波信号对光程差速度的影响如图 5 所示。

图 5 中横坐标代表正弦波信号频率,纵坐标代表干涉仪运动的最大光程差速度占期望光程差速度 (0.33 cm/s) 的百分比。由图 5 可以分析出,干涉仪运动系统对功率放大器的低频信号响应较大,尤其是 1 Hz 以下的信号,最大波动能达到 0.78% 。考虑到实际电路中频率混叠效应,实际低频噪声的波动影响可能更大。

因此,在功率放大器回路中需要增加高通滤波器,去除低频噪声干扰,减小功率放大器的噪声干扰。

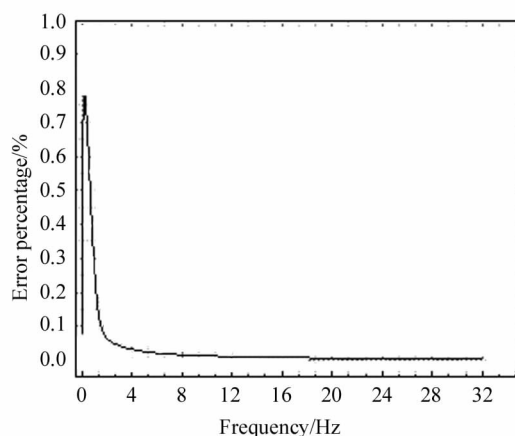


图 5 不同频率正弦波信号对光程差速度的影响

Fig. 5 Influence of sine wave signals with different frequencies on optical path difference velocity

3 光程差速度波动对光谱质量的影响

在时间调制型的傅里叶红外光谱仪中,大多数采样方法基于激光干涉信号的过零点信号作为红外信号采样的触发脉冲。以该红外信号采样方法为例,讨论光程差速度的稳定性对光谱图质量的影响。

干涉图位置误差示意图,如图 6 所示。在 T_1 、 T_2 、 T_3 时刻,参考激光干涉信号过零点,干涉仪分别位于光程差 X_1 、 X_2 、 X_3 处,分别对 X_1 、 X_2 、 X_3 处的红外干涉信号采集。由于 $f = v/\lambda$,因此在光程差速度没有波动的情况下,激光干涉信号频率也不会改变,即 $|X_3 X_2| = |X_2 X_1|$,实现等光程差采集。若当 $X_2 X_3$ 范围内光程差速度波动,激光干涉信号频率也会波动, X_3 位置变成 X'_3 。

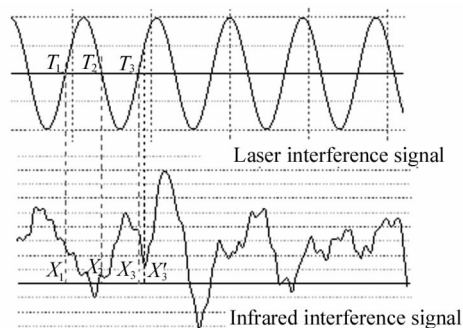


图 6 干涉图位置误差示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the interferogram position error

计算采样位置误差,其计算表达式为:

$$\Delta x = ||X'_3 X_2| - |X_2 X_1|| = K \Delta v, \quad (9)$$

式中, Δv 表示光程差速度波动, 用来表示光程差速度波动大小, Δx 表示干涉信号采样位置误差, K 表示比例系数, 即探测器的有效积分时间。

设入射光源光强 $B_0(\tilde{\nu})$, 干涉图函数为:

$$\begin{aligned} I(x) &= \int_{-\infty}^{+\infty} B_0(\tilde{\nu}) \cos(2\pi\tilde{\nu}x) d\tilde{\nu}, \\ &= \sum_{\tilde{\nu}_{\min}}^{\tilde{\nu}_{\max}} B_0(\tilde{\nu}) [\delta(\tilde{\nu}_1) + \delta(\tilde{\nu}_2) + \dots] \cdot \\ &\quad \cos(2\pi\tilde{\nu}x). \end{aligned} \quad (10)$$

光程差速度不稳定, 采样位置存在误差, 干涉图函数为:

$$\begin{aligned} I(x + \Delta x) &= \sum_{\tilde{\nu}_{\min}}^{\tilde{\nu}_{\max}} B_0(\tilde{\nu}) [\delta(\tilde{\nu}_1) + \delta(\tilde{\nu}_2) + \dots] \cdot \\ &\quad \cos(2\pi\tilde{\nu}(x + \Delta x)) = \\ &\quad \sum_{\tilde{\nu}_{\min}}^{\tilde{\nu}_{\max}} B_0(\tilde{\nu}) [\delta(\tilde{\nu}_1) + \delta(\tilde{\nu}_2) + \dots] \cdot \\ &\quad [\cos(2\pi\tilde{\nu}\Delta x) \cos(2\pi\tilde{\nu}x) - \sin(2\pi\tilde{\nu}x) \sin(2\pi\tilde{\nu}\Delta x)]. \end{aligned} \quad (11)$$

设波数 $\tilde{\nu} = \tilde{\nu}_1$, 则表达式为:

$$\begin{aligned} I(x + \Delta x) &= B_0(\tilde{\nu}_1) \cdot [\cos(2\pi\tilde{\nu}_1 x) \cos(2\pi\tilde{\nu}_1 \Delta x) - \\ &\quad \sin(2\pi\tilde{\nu}_1 x) \sin(2\pi\tilde{\nu}_1 \Delta x)] = \\ &\quad B_0(\tilde{\nu}_1) \cdot \cos(2\pi\tilde{\nu}_1 \Delta x). \end{aligned} \quad (12)$$

经过傅里叶逆变换得到光谱图为:

$$\begin{aligned} B(\tilde{\nu}_1) &= \int_{-\infty}^{+\infty} I(x + \Delta x) \cos(2\pi\tilde{\nu}_1 x) dx = \\ &\quad B_0(\tilde{\nu}_1) \cos(2\pi\tilde{\nu}_1 \Delta x). \end{aligned} \quad (13)$$

光程差速度波动与信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 的关系式为:

$$SNR = \frac{1}{1 - \cos(\pi\tilde{\nu}K\Delta v)}, \quad (14)$$

式中, 表示当速度波动导致等光程差采样存在位置误差时, 对单一波数的光谱图信噪比影响。因此, 当光谱波数产生变化时, Δv 对光谱图不同波数的信噪比影响程度也不同, 速度波动、不同波数对信噪比的关系如图 7 所示。

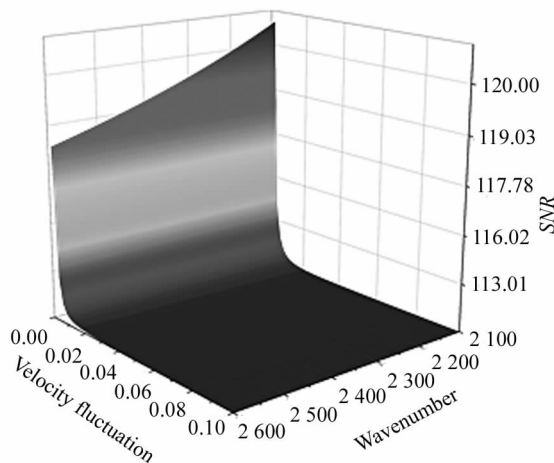


图 7 信噪比与波数变化、速度波动的关系

Fig. 7 The relationship between SNR and wavenumber and velocity fluctuation

图 7 中当探测器的积分时间为 $K = 10^{-7}$ 时, 可以得到如下关系: 当光谱波数一定时, 速度波动越大对其光谱图的信噪比越低。当速度波动一定时, 光谱波数越小, 其信噪比受速度波动影响就越小。

当光程差速度波动的方差由 Δv_1 增大为 Δv_2 时, 对同一波数的信噪比变化为:

$$\frac{SNR_1}{SNR_2} = \frac{1 - \cos(\pi\tilde{\nu}K\Delta v_2)}{1 - \cos(\pi\tilde{\nu}K\Delta v_1)}. \quad (15)$$

当光程差速度波动一定, 光谱波数由 $\tilde{\nu}_1$ 变为 $\tilde{\nu}_2$ 时, 其信噪比变化为:

$$\frac{SNR_1}{SNR_2} = \frac{1 - \cos(\pi\tilde{\nu}_2 K \Delta v)}{1 - \cos(\pi\tilde{\nu}_1 K \Delta v)}. \quad (16)$$

从式(15)和(16)可知, 速度波动越小, 光谱波数越小, 对应波数的信噪比越高。

4 实验与分析

4.1 实验平台介绍

搭建实验验证平台如图 8 所示, 来验证干涉仪运动光程差速度对光谱信噪比的实际影响, 设置速



图 8 干涉仪平台与光谱采集系统

Fig. 8 Interferometer platform and spectrum acquisition system

度为 0.33 cm/s , 一个扫描周期为 12.6 s 。通过测开环干扰的情况下速度稳定性与信噪比, 以及闭环控制下速度稳定性与信噪比, 来验证速度稳定性对光谱信噪比的影响规律。

4.2 开环扰动下的速度稳定性与光谱信噪比

4.2.1 开环扰动下的速度稳定性

干涉仪在开环扰动的条件下, 基于 He-Ne 激光的过零点脉冲触发采样, 通过采集 He-Ne 激光形成的干涉脉冲频率计算光程差输出速度曲线, 并计算速度稳定性。

开环扰动下, 光程差速度运动曲线如图 9 所示。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。计算得到标准差为 0.02575 , 比值为 0.078 , 稳定度为 92.2% 。

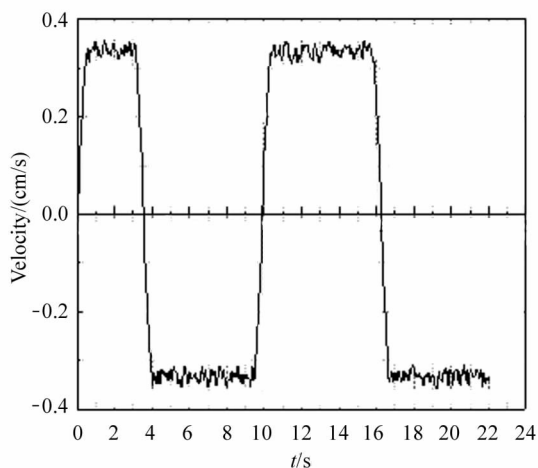


图 9 开环扰动下, 光程差速度运动曲线
Fig. 9 Optical path difference velocity curve under open loop disturbance

4.2.2 开环扰动下的光谱信噪比

为了测试光谱的信噪比, 在 1 cm^{-1} 的分辨率的条件下, 采用液氮制冷型 MCT 探测器。光谱信噪比的计算方法有: 透过率法和吸光度法, 本文采用透过率法。由于光谱区间 $2100\text{—}2200 \text{ cm}^{-1}$ 和 $2500\text{—}2600 \text{ cm}^{-1}$ 受水汽、 CO_2 等影响极小, 所以分别计算 2 个波数区间的透过率谱, 从而得到信噪比。

连续 16 次采集空气得到开环扰动下背景光谱图, 如图 10(a) 所示。

在空气背景下, 连续 16 次采集方式得到的相应波数区间 ($2100\text{—}2200 \text{ cm}^{-1}$ 和 $2500\text{—}2600 \text{ cm}^{-1}$) 的透过率光谱, 如图 10(b) 和 (c) 所示, 并计算对应波段的峰-峰值。依此作 10 次重复性测量, 得到 10 条

透过率谱, 各光谱的峰-峰值 N 的具体计算结果如表 1 和表 2 所示。

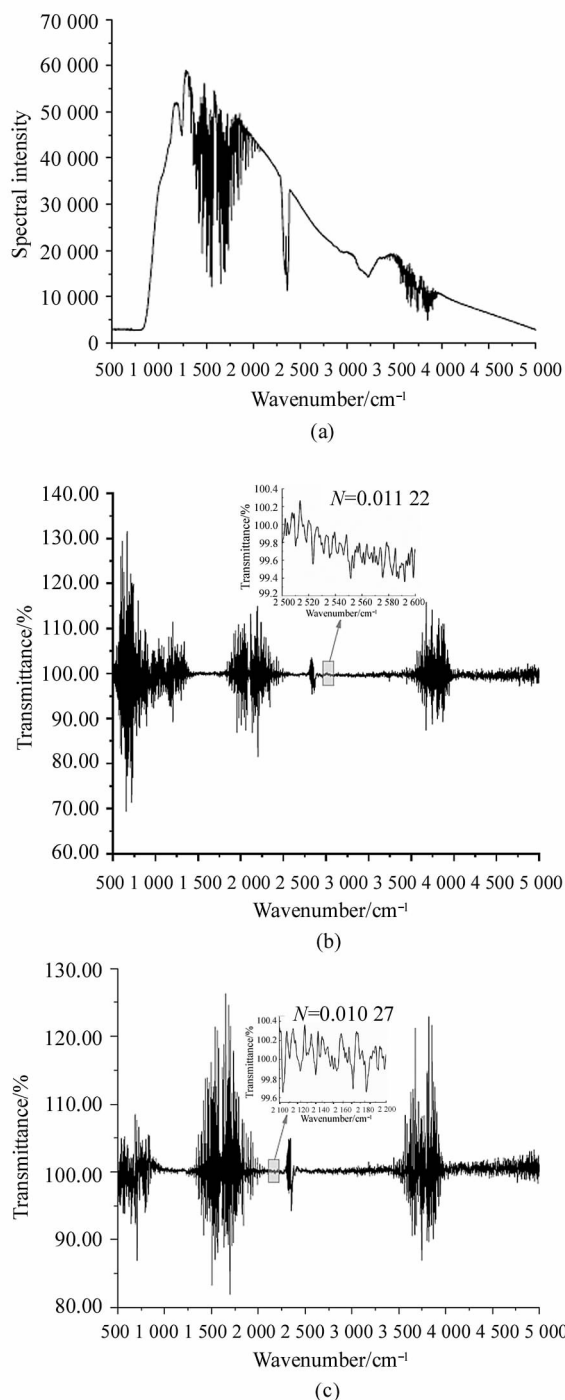


图 10 开环扰动下, 背景光谱与透过率谱:

(a) 背景光谱; (b) $2500\text{—}2600 \text{ cm}^{-1}$ 透过率谱;
(c) $2100\text{—}2200 \text{ cm}^{-1}$ 透过率谱

Fig. 10 Under the open-loop disturbance, background spectrum and transmittance spectrum: (a) Background spectrum; (b) $2500\text{—}2600 \text{ cm}^{-1}$ transmittance spectrum; (c) $2100\text{—}2200 \text{ cm}^{-1}$ transmittance spectrum

表 1 开环扰动下,2 100—2 200 cm⁻¹ 区间透过率谱峰-峰值
Tab. 1 Under open-loop disturbance, the transmittance spectrum
peak to peak in the range of 2 100—2 200 cm⁻¹

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average value
N	0.010 27	0.008 60	0.009 21	0.012 16	0.010 70	0.008 95	0.008 78	0.008 93	0.009 50	0.007 89	0.009 499

表 2 开环扰动下,2 500—2 600 cm⁻¹ 区间透过率谱峰-峰值
Tab. 2 Under open-loop disturbance, the transmittance spectrum
peak to peak in the range of 2 500—2 600 cm⁻¹

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average value
N	0.011 22	0.010 64	0.012 08	0.012 40	0.010 98	0.011 62	0.012 23	0.011 96	0.012 03	0.012 44	0.011 76

取 10 次测量得到的透过率谱的峰-峰值的均值作为光谱仪的噪声,其值为 0.009 499。由透过率法的信噪比计算公式($SNR=100/N$)可得:2 100—2 200 cm⁻¹ 区间光谱信噪比约为 10 527 : 1。

取 10 次测量得到的透过率谱的峰-峰值的均值作为光谱仪的噪声,其值为 0.011 76。由透过率法的信噪比计算式可得:2 500—2 600 cm⁻¹ 区间光谱信噪比约为 8 503 : 1。

4.3 闭环控制下的速度稳定性与光谱信噪比

4.3.1 闭环控制下的速度稳定性

干涉仪在闭环控制的条件下,基于 He-Ne 激光的过零点脉冲触发采样,通过采集 He-Ne 激光形成的干涉脉冲频率计算光程差输出速度曲线,并计算速度稳定性。

闭环控制下,光程差速度运动曲线如图 11 所示。截取稳定后匀速段的光程扫描速度数据,计算

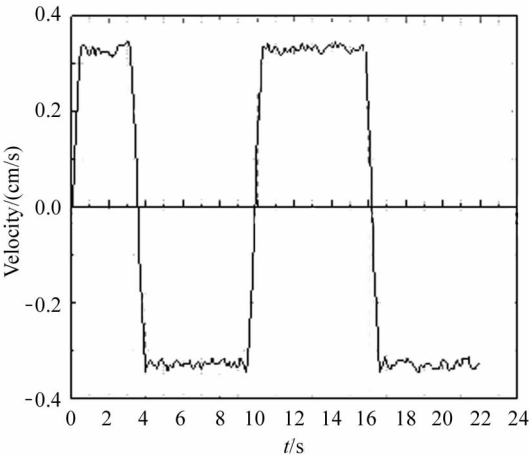


图 11 闭环控制下,光程差速度运动曲线
Fig. 11 Under closed-loop control, optical
path difference velocity curve

速度的标准差/平均值,来衡量光程差速度稳定度。计算得到标准差为 0.009 29,比值为 0.028,稳定度为 97.2%。

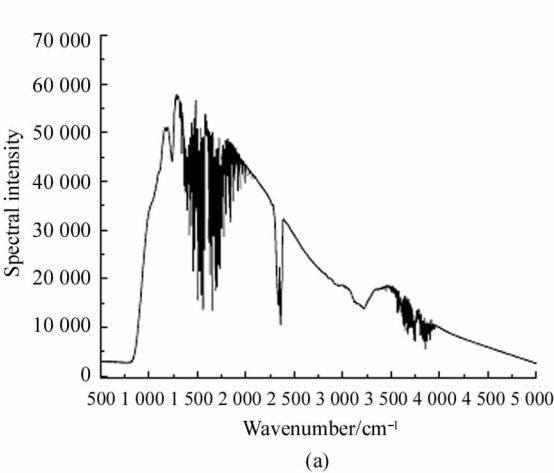
4.3.2 闭环控制下的光谱信噪比

相同的条件下,连续 16 次采集空气得到背景光谱图,如图 12(a)所示。

在空气背景下,连续 16 次采集方式得到的相应波数区间(2 100—2 200 cm⁻¹ 和 2 500—2 600 cm⁻¹) 的透过率谱,如图 12(b)和(c)所示,并计算对应波段的峰-峰值。依此作 10 次重复性测量,得到 10 条透过率谱,各光谱的峰-峰值 N 的具体计算结果如表 3 和表 4 所示。

取 10 次测量得到的透过率谱的峰-峰值的均值作为光谱仪的噪声,其值为 0.008 161。由透过率法信噪比计算公式可得:2 100—2 200 cm⁻¹ 区间光谱信噪比约为 12 253 : 1。

取 10 次测量得到的透过率谱的峰-峰值的均值作为光谱仪的噪声,其值为 0.010 285。由透过率



(a)

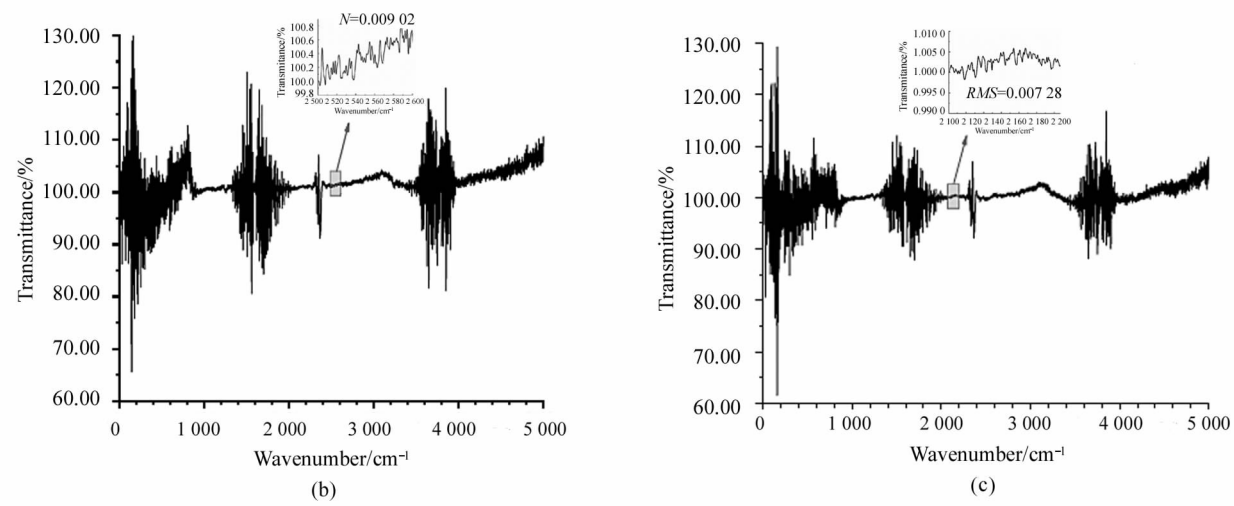


图 12 闭环控制下,背景光谱与透过率谱:(a) 背景光谱;(b) 2500—2600 cm⁻¹透过率谱;(c) 2100—200 cm⁻¹透过率谱
Fig. 12 Under closed-loop control,background spectrum and transmittance spectrum:(a) Background spectrum;
(b) 2500—2600 cm⁻¹ transmittance spectrum;(c) 2100—200 cm⁻¹ transmittance spectrum

表 3 闭环控制下 2100—2200 cm⁻¹ 区间透过率谱峰-峰值

Tab. 3 Under closed-loop control,the transmittance spectrum peak to peak in the range of 2100—2200 cm ⁻¹											
Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average value
N	0.007 28	0.008 80	0.009 81	0.007 05	0.008 59	0.008 43	0.008 83	0.006 54	0.008 53	0.007 75	0.008 161

表 4 2500—2600 cm⁻¹ 区间透过率光谱峰-峰值

Tab. 4 Under closed-loop control,the transmittance spectrum peak to peak in the range of 2500—2600 cm ⁻¹											
Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average value
N	0.009 02	0.008 53	0.010 43	0.011 86	0.011 13	0.011 20	0.010 21	0.008 55	0.011 51	0.010 41	0.010 285

法信噪比计算公式可得:2500—2600 cm⁻¹ 区间光谱信噪比约为 9723 : 1。

4.4 实验分析
将上述不同实验条件下的光谱信噪比结果统计,并进行对比分析,实验结果对比如表 5 所示。

表 5 实验结果对比
Tab. 5 Comparison of experimental results

Optical path difference velocity stability	92.2%	97.2%	Increase percentage in SNR
2100—2200cm ⁻¹ band SNR	10 527 : 1	12 253 : 1	16.39%
2500—2600cm ⁻¹ band SNR	8 503 : 1	9 723 : 1	14.35%
Reduction percentage in SNR	19.23%	20.65%	

实验结果表明,光程差速度稳定性会影响到光谱信噪比,具体表现为如下 2 个方面:

1) 当波数区间一定时,速度稳定性越高,光谱图

的信噪比越高。
2) 当速度稳定性一定时,光谱图的波数越小,信噪比受速度波动的影响越小。

5 结 论

由于干涉仪旋转角度、反馈速度测量、电路噪声等因素的影响,导致了干涉仪光程差速度的不稳定性,进而影响了光谱图的信噪比。结合对倾斜式干涉仪光程差速度影响因素的定量分析及解决方案探索,首先,从理论上研究了光程差速度波动对不同波数光谱信噪比的影响规律。在此基础上,通过开环扰动和闭环控制获取不同光程差速度稳定性,进一步实验验证了光程差速度不稳定性对光谱信噪比的影响规律。结果表明,在同一波数区间,光程差速度稳定性越高,光谱信噪比越好,当光程差速度恒定时,低波数段的光谱信噪比明显优于高波数段。该研究成果为高信噪比光谱仪的设计提供了理论基础。

参考文献:

- [1] QING H Y, LI X L, PEI L. Principle of a two-output-difference interferometer for removing the most important interference distortions[J]. *Journal of Modern Optics*, 2018, 65(19): 1-9.
- [2] LOU Y, YAN L, CHEN B. A phase modulating homodyne interferometer with tilting error compensation by use of an integrated four-photodetector [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(2): 025111.
- [3] YUTA M, TOMOFUMI S. Mirror actuation design for the interferometer control of the KAGRA gravitational wave telescope[J]. *Classical & Quantum Gravity*, 2017, 34(22): 225001.
- [4] SVISHCH V M. About the informative parameters of Michelson interferometers with the division of amplitude and the wave front[J]. *East European Journal of Physics*, 2018, 5(3): 24-31.
- [5] MA X, SUN J, HAN Y, et al. An oversampling for infrared Fourier-transform spectrometers[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021(16): 103805.
- [6] XIE Y T, ZHANG Y J, CHENG Y B. Spectral inversion of nonlinear interference signal of large swing angle swing arm interferometer[J]. *Laser and Infrared*, 2015, 45(10): 1235-1238.
谢运涛, 张玉钧, 程玉宝. 大摆角摆臂式干涉仪非线性干涉信号光谱反演[J]. *激光与红外*, 2015, 45(10): 1235-1238.
- [7] HU D X, HAN S L, ZHANG Z H. Nonlinear analysis of optical path difference of rotating mirror transmission Fourier spectrometer[J]. *Infrared*, 2018, 39(4): 39-42.
- 胡德信, 韩顺利, 张志辉. 转镜透射式傅里叶光谱仪光程差的非线性分析[J]. *红外*, 2018, 39(4): 39-42.
- [8] QU L G, XU L, LIU J G, et al. Numerical simulation analysis of portable high-speed FTIR rotary interferometer[J]. *Journal of Optics*, 2021, 41(9): 36-43.
曲立国, 徐亮, 刘建国, 等. 便携式高速 FTIR 旋转式干涉仪数值模拟仿真分析[J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 36-43.
- [9] XUE Y, HE S Y. A tilt compensation system for translation micro mirror [J]. *Advances In Mechanical Engineering*, 2018, 10(8): 1-8.
- [10] GUO L J, MA W P, WANG C, et al. Design of translational optical path scanning control system for Fourier spectrometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 148-154.
郭兰杰, 马文坡, 王淳, 等. 傅里叶光谱仪平动式光程扫描控制系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(1): 148-154.
- [11] NIAN W, LIU Z J, LIN Z. Robust H_{∞} control design for optical path scanning of Fourier spectrometer [J]. *Aerospace Return and Remote Sensing*, 2018, 39(6): 55-63.
粘伟, 刘兆军, 林喆. 傅里叶光谱仪光程扫描的鲁棒 H_{∞} 控制设计[J]. *航天返回与遥感*, 2018, 39(6): 55-63.
- [12] LIANG X W, SHI L. Design of a portable interferometer moving mirror system[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(10): 3255-3259.
梁效文, 石磊. 一种便携式干涉仪动镜系统的设计[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(10): 3255-3259.
- [13] XIE Y T, ZHANG Y J. Optical path difference scanning model and simulation of swing arm interferometer[J]. *Laser and Infrared*, 2015, 45(7): 821-824.
谢运涛, 张玉钧. 摆臂式干涉仪光程差扫描模型及其仿真[J]. *激光与红外*, 2015, 45(7): 821-824.
- [14] SHAO C Y, GU M J. Noise analysis of moving mirror speed and sampling jitter of FTIR spectrometer[J]. *Laser and Infrared*, 2016, 46(8): 967-970.
邵春沅, 顾明剑. FTIR 光谱仪动镜速度和采样抖动的噪声分析[J]. *激光与红外*, 2016, 46(8): 967-970.
- [15] BONILLA G, BETANCOURT R, MORALES S, et al. Low-finesse Fabry-Perot interferometers applied in the study of the relation between the optical path difference and poles location[J]. *Sensors*, 2020, 20(2): 453.

作者简介:

李相贤 (1983—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事环境光学仪器方面的研究。