

DOI:10.16136/j.joel.2022.06.0704

# 基于等效时钟法的干涉仪速度信息获取研究

秦玉胜<sup>1,2</sup>, 李相贤<sup>1\*</sup>, 韩 昕<sup>1</sup>, 童晶晶<sup>1</sup>, 李 妍<sup>1</sup>, 高闽光<sup>1</sup>

(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)

**摘要:** 为了提升傅里叶变换光谱仪 (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR) 的性能, 设计了一种基于等效时钟法的高精度速度信息获取系统。激光信号经过干涉仪形成干涉信号, 通过放大、滤波、整形, 成为数字电路识别的脉冲信号。基于速度信息获取的数学原理, 对基于 T 法测量获取速度信息的方法进行了误差分析, 并提出基于等效时钟法的速度信息获取方法。现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 读取脉冲信号后, 根据等效时钟法计算光程差速度值。仿真分析与实验结果表明, 当 He-Ne 激光干涉信号频率为 9 kHz 时, 基于等效时钟法的速度信息获取误差仅为 0.01%, 实现了高精度的光程差速度信息获取。对提高干涉仪系统的控制精度和光谱仪的信噪比具有重要意义。

**关键词:** 干涉仪; 速度信息; 等效时钟法; 现场可编程门阵列

**中图分类号:** TN214 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)06-0561-08

## Study on velocity information acquisition of the interferometer based on equivalent clock method

QIN Yusheng<sup>1,2</sup>, LI Xiangxian<sup>1\*</sup>, HAN Xin<sup>1</sup>, TONG Jingjing<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, GAO Minguang<sup>1</sup>

(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)

**Abstract:** To improve the performance of Fourier transform spectrometer, a high-precision velocity information acquisition scheme based on equivalent clock method is designed. The laser signal forms an interference signal through the interferometer, which is amplified, filtered and shaped into a pulse signal recognized by the digital circuit. Based on the mathematical principle of velocity information acquisition, the error of obtaining velocity information based on T method is analyzed, and the velocity information acquisition method based on equivalent clock method is proposed. After reading the pulse signal, field programmable gate array (FPGA) calculates the optical path difference velocity value according to the equivalent clock method. Simulation analysis and experimental results show that when the frequency of He-Ne laser interference signal is 9 kHz, the measurement error of velocity feedback based on equivalent clock method is only 0.01%, and high precision optical path difference velocity information acquisition is realized. This is of great significance to improve the control accuracy of the interferometer system and the signal-to-noise ratio of the spectrum.

**Key words:** interferometer; velocity information; equivalent clock method; field programmable gate array (FPGA)

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

收稿日期: 2021-10-11 修订日期: 2021-11-18

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

傅里叶变换红外光谱仪作为一种高精度测量科学仪器,随着其在大气环境监测、气象科学研究以及国防军事等领域的应用不断深入,对于其性能也提出了更高要求,干涉仪系统作为傅里叶变换红外光谱仪的核心子系统,其运动控制精度是影响傅里叶变换红外光谱仪的主要因素之一。目前常用的干涉仪控制方法主要有数字信号处理补偿法<sup>[1]</sup>、基于位置误差及误差变化率的比例积分微分(proportional integral-differential, PID)控制法<sup>[2]</sup>、基于速度环的先进控制法<sup>[3]</sup>等,其中基于光程差速度环的反馈控制策略具有设计简单、实时性强的优点,该方法的关键技术难点之一是如何获取速度反馈信息。

针对基于速度反馈干涉仪控制策略中的速度信息获取方法,清华大学任利兵<sup>[4]</sup>在傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR)仪速度反馈控制中,研究了音圈电机内置磁编码器方法,通过磁编码器来获取干涉仪速度信息。欧洲气象卫星组织在其主要载荷红外大气探测干涉仪<sup>[5]</sup>(infrared atmospheric sounding interferometer, IASI)中,通过光学直线编码器方法来获取干涉仪速度信息,该方法对光学编码器使用环境要求高,需要消除机械间隙带来的误差。日本相关学者<sup>[6,7]</sup>研究了基于分布式反馈激光二极管速度检测系统获取干涉仪速度信息的方法。中国科学院上海技术物理研究所<sup>[8]</sup>研究了基于激光干涉法的速度信息获取方法,利用两路正交干涉光信号进行速度判向和脉冲计数,从而获得干涉仪运动的速度大小和方向。

由于各种编码器的精度难以满足高精度红外光谱仪的设计要求,激光干涉法逐渐成为红外光谱仪速度信息获取的主流设计方法。目前关于基于激光干涉法的研究主要集中在光源稳定性,有关获取速度信息的干涉信号处理方法研究较为匮乏。基于此,本文首先研究光程差速度环的控制精度对仪器信噪比的影响规律,在设计高信噪比激光干涉信号处理电路的基础上,对速度信息获取方法进行数学建模,通过对传统 T 法获取速度信息的误差分析<sup>[9-13]</sup>,提出等效时钟法来改进速度信息获取方法,最后,通过实验验证等效时钟法的高精度特性。结果表明,基于等效时钟法的干涉仪速度信息获取方法,能够提高光程差速度反馈检测的精度,对提高干涉仪系统的控制精度和光谱仪的信噪比具有重要意义<sup>[14]</sup>。

## 2 光程差速度对信噪比的影响

等光程差采样对光谱重建质量具有重要影响,当采样信号不均匀时,等光程差采样会产生位置误差,根据光谱仪的光谱图与干涉图之间傅里叶变换关系可知,在干涉图重建光谱图的过程中增加了一项额外误差,额外误差项反映在光谱图上表现为光谱图的信噪比降低。假设在波数 $\tilde{\nu}$ 处,产生采样位置误差 $\Delta x$ ,则信噪比为:

$$SNR = \frac{1}{1 - \cos(\pi\tilde{\nu}\Delta x) + \sin(\pi\tilde{\nu}\Delta x)}, \quad (1)$$

式中, $SNR$ 为光谱图信噪比, $\tilde{\nu}$ 为波数, $\Delta x$ 为采样位置误差。

为了保证采样位置均匀,大多数光谱仪采用基于参考激光干涉脉冲触发的等光程差采样方法,但是,如果干涉仪系统不能保证光程差速度高度稳定,则会导致激光干涉脉冲信号频率波动,进而带来采样位置波动,因此无法严格实现等光程差采样。

根据傅里叶变换光谱仪的光程差速度稳定性要求<sup>[15]</sup>,即:

$$\nu_{\text{err}}/\nu \leq 1/SNR, \quad (2)$$

式中, $\nu_{\text{err}}$ 为速度误差, $\nu$ 为速度值。

由式(2)可知,要满足信噪比在 100 以上的要求,则干涉仪的光程差速度稳定性需控制在 99% 以上。因此,需要设计高精度的光程差速度信息获取系统,以确保干涉仪闭环控制系统能够满足光程差速度稳定性要求。

## 3 激光干涉信号处理

### 3.1 激光干涉信号检测与处理电路

光电信号检测与处理电路的主要作用就是把激光干涉信号转化为数字电路识别的脉冲信号,在设计电路时主要考虑电路噪声以及时钟抖动问题。整个设计流程与思路如图 1 所示。

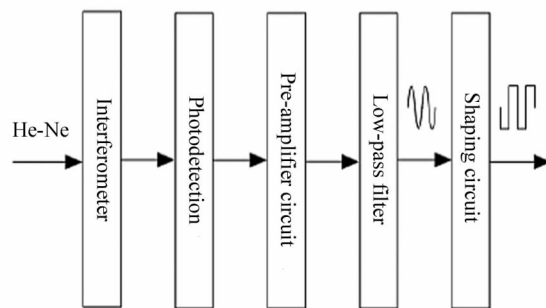


图 1 光电信号检测与处理电路流程图

Fig. 1 Flow chart of photoelectric signal detection and processing circuit

### 3.1.1 光电探测器与前置放大电路

在红外光谱仪激光干涉法的反馈系统中,参考光源选择 He-Ne 激光,波长 632.8 nm;光电探测器选择硅 PIN 光电二极管 S10784,响应中心波长为 650 nm,响应速度高达 300 MHz,暗电流最大值为 1 000 pA,灵敏度高达 0.45 A/W。

前置放大电路的作用是将硅 PIN 光电二极管探测器得到的微弱电流信号转换为后级电路所需要的电压信号。一般来说,单级运放增益过大会使放大器稳定性降低,产生非线性失真。因此,为了实现系统的高增益要求,将前置放大电路设计为多级放大的形式,第一级采用跨阻放大电路实现  $I-V$  转换,第二级采用  $T$  型反馈放大电路完成低噪声放大的需求。

跨阻放大电路如图 2 中左半图所示。放大器选择 MAX4488 运算放大器,具有低失真 (0.000 2 %

THD+N),低输入电压噪声密度 ( $e_{n1} = 4.5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ) 和低输入电流噪声密度 ( $i_{n1} = 0.5 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ) 等特点。MAX4488 的输入失调电压仅为  $70 \mu\text{V}$ ,输入偏置电流仅为 1 pA,具有出色的稳定性,能够满足电路精度要求。硅 PIN 光电二极管探测器作用是将激光干涉信号转化为电信号,输出微安量级的交流电流信号。将硅 PIN 光电二极管设置在零偏置光伏模式下工作,线性度较高,没有暗电流产生,因此探测器的输出信噪比较高。

$T$  型反馈放大电路如图 2 中右半图所示。用  $T$  型反馈放大电路既可以解决传统运放电路温度漂移问题,又可以解决高增益需要高反馈而带来的电阻热噪声问题。放大器选择低噪声、精密、高速运算放大器 OP37。OP37 具有低偏移 ( $25 \mu\text{V}$ ) 和低漂移 ( $0.2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ) 的特性,输入电压噪声密度仅为  $e_{n2} = 3 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,输入电流噪声密度仅为  $e_{i2} = 3 \text{ nA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

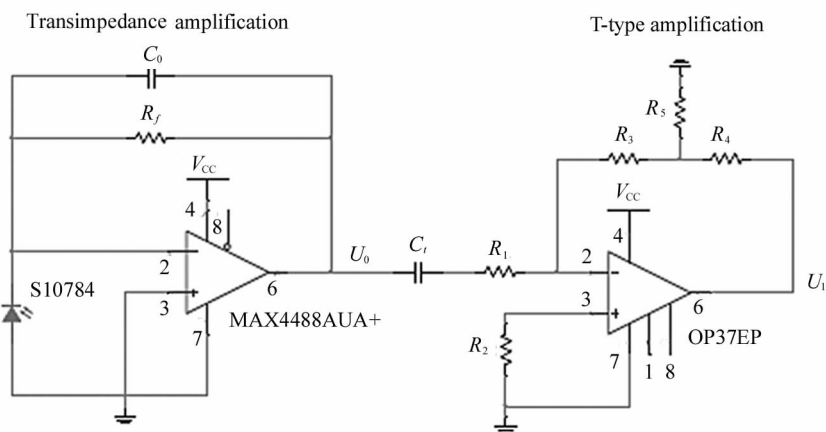


图 2 前置放大电路

Fig. 2 Pre-amplifier circuit

$\sqrt{\text{Hz}}$ ,很好地满足了二级放大电路的要求。

### 3.1.2 低通滤波电路

由于前置放大电路的两级放大作用,电路输出端会出现高频噪声干扰激光干涉信号,为了提高激光干涉信号的信噪比,需要根据系统特性设计低通滤波器降低高频噪声干扰。常见的滤波器类型主要有巴特沃斯型、贝塞尔型、切比雪夫型、椭圆型等。其中,巴特沃斯滤波器设计简单,性能优秀,具有良好的线性相位和平坦的通带。系统要求带宽电压的幅频响应平坦,设计采用二阶巴特沃斯低通滤波器。

根据基尔霍夫电流定理可求出,二阶巴特沃斯低通滤波器的传递函数为:

$$H(s) =$$

$$\frac{-R_7/R_6}{s^2 R_7 R_8 C_1 C_2 + s R_7 R_8 C_1 \left( \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_8} \right) + 1}, \quad (3)$$

根据傅里叶变换红外光谱仪的设计要求,光程差扫描速度为  $u = 0.33 \text{ cm/s}$ ,He-Ne 激光波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 。由式  $f = u/\lambda$  得到参考激光干涉信号的调制频率约为 5 kHz。设计二阶巴特沃斯低通滤波器截至频率为  $f_0 = 25 \text{ kHz}$ ,通带增益  $K_1 = -1$ ,电容  $C_1 = 1 \text{ nF}$ ,等效品质因素  $Q = 0.707$ 。计算电路各参数分别为  $R_6 = 5600 \Omega$ ,  $R_7 = 5600 \Omega$ ,  $R_8 = 2820 \Omega$ ,  $C_2 = 4 \text{ nF}$ 。其中放大器选择 OP37 运算放大器,  $R_8$  和  $C_1$  构成滤波器的积分环节,  $R_6$  和  $C_2$  构成滤波器的低通级,两级电路同时表现出低通特性。二阶巴特

沃斯低通滤波器在 Multisim14 电路软件中如图 3 所示。

为了验证设计的二阶巴特沃斯低通滤波器性能,在 Multisim14 电路软件中进行交流分析,得到二阶巴特沃斯低通滤波器的幅频特性曲线如图 4 所示,相频特性曲线如图 5 所示。

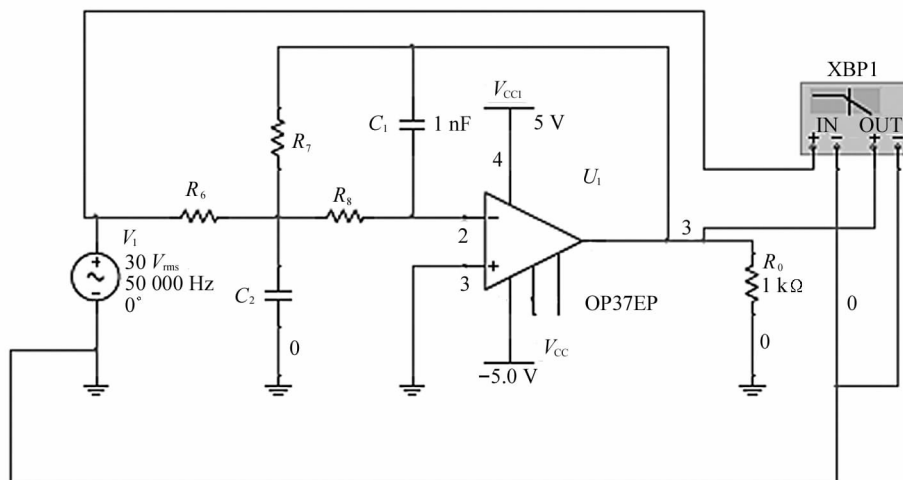


图 3 二阶巴特沃斯低通滤波器

Fig. 3 The second-order Butterworth low-pass filter

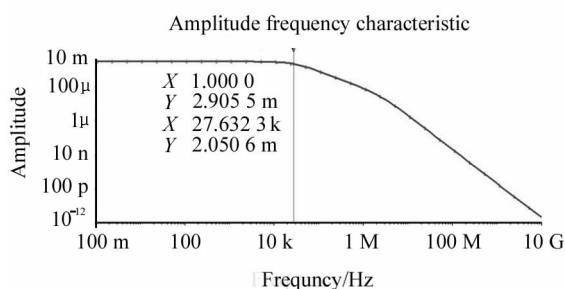


图 4 二阶巴特沃斯低通滤波器幅频特性曲线

Fig. 4 Amplitude-frequency characteristic curve of the second-order Butterworth low-pass filter

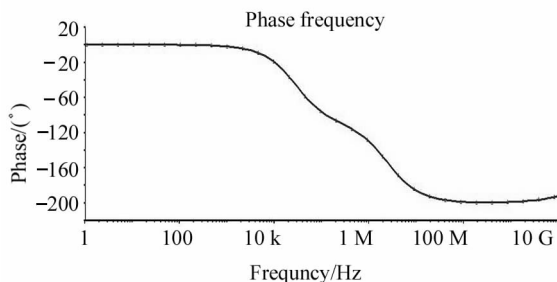


图 5 二阶巴特沃斯低通滤波器相频特性曲线

Fig. 5 Phase-frequency characteristic curve of the second-order Butterworth low-pass filter

由图 4 幅频特性曲线实验结果可知,当输出信号幅度值下降到输出信号幅度峰值的 0.707 倍时,输出信号的频率值为 27.6 kHz,与设计的滤波器截至频率 25 kHz 相近,满足设计的基本要求。由图 5 相频特性曲线实验结果可知,输出信号频率在系统宽带内基本保持稳定,符合设计要求。

### 3.1.3 整形电路

经过前置放大电路和低通滤波电路后的激光干涉信号不能够被后续数字电路识别,因此需要将激光干涉信号整形为系统需要的脉冲信号。激光干涉信号整形电路设计为过零点检测电路和脉冲整形电路两部分。

在过零点检测电路中,由于激光干涉信号为正弦信号,利用电压比较器可以将激光干涉信号转换为频率一致的方波信号。但是普通的电压比较器抗干扰能力差,在零点附近容易产生抖动现象,造成多次过零误判,导致电压比较器的输出值不稳定,因此只能应用于对输出值跳变不敏感的场所。为了克服容易抖动误判的问题,利用迟滞比较器的滞后功能,设计同相滞回电压比较器,滞回电压大小为  $\Delta V = V_{cc} R_{11}/R_9$ 。电路原理图如图 6 左图所示,在 Multisim14 电路软件中仿真得到方波信号如图 7 所示。

He-Ne 激光的在干涉仪内光程差发生变化,产生相应的干涉条纹。由 Nyquist 采样定理可知,干涉条纹的采样频率至少是干涉图最高频率的 2 倍以上。由于采样触发脉冲即为 He-Ne 激光干涉信号整形得到的脉冲信号,因此需要设计脉冲整形电路,将

过零点检测电路中的方波信号整形为过零点脉冲信号。具体实现方法为:将输入的方波信号分成两路信号,其中一路信号加入 RC 延时电路(延时的时长应该要小于输入方波周期的一半),在每次上下沿跳变时产生延时,将延时之后的信号与原有的信号进

行“异或”,实现在方波的每次跳变时输出一个短暂的脉冲,有效地减小过零误判的概率。而脉冲的宽度由 RC 延时电路和后面的施密特触发电平决定。电路原理图如图 5 右图所示,在 Multisim 中仿真得到过零点脉冲信号如图 8 所示。

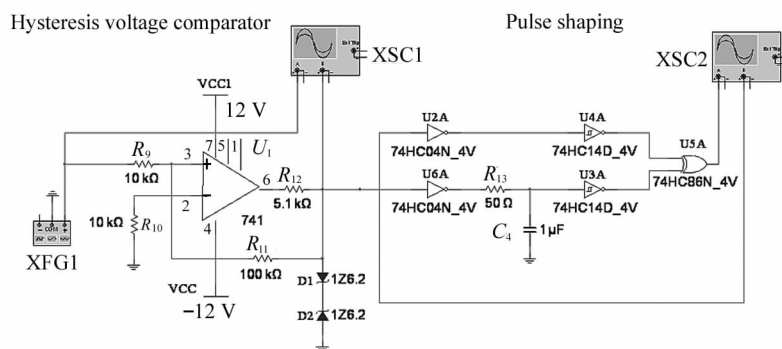


图 6 整形电路

**Fig. 6** A shaping circuit

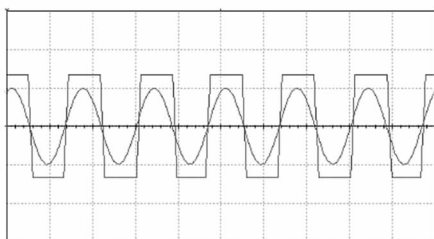


图 7 方波整形仿真结果

**Fig. 7** Simulation results of square wave shaping

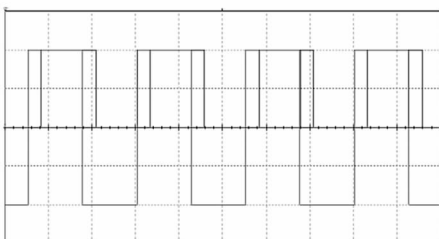


图 8 过零点脉冲整形仿真结果

**Fig. 8** Simulation results of zero-crossing pulse shaping

### 3.2 电路噪声分析

整个光电检测与处理电路的噪声计算主要考虑光电探测器噪声和前置放大电路噪声。光电探测器噪声有散粒噪声和热噪声,电路噪声有电阻热噪声、电流噪声以及电压噪声。

跨阻放大电路在输出  $U_o$  端噪声电压:

$$V_{nl} = \sqrt{V_{nb}^2 + V_{nd}^2 + V_{ne1}^2 + V_{ni1}^2 + V_{nr1}^2}, \quad (4)$$

$$V_{np} = \sqrt{2qI_p R_f^2 \Delta f} \text{ ,}$$

$$V_{nd} = \sqrt{4KT\Delta f R_f^2 / R_d},$$

$$V_{ne1} = e_{n1} R_f / R_d \sqrt{\Delta f},$$

$$V_{m1} = i_{n1} R_f \sqrt{\Delta f} \text{ ,}$$

$$V_{nr1} = \sqrt{4KT\Delta f R_f^3 / R_d^2} \quad (5)$$

T 型反馈放大电路在输出  $U_1$  端噪声电压:

$$V_{n^2} = \sqrt{V_{ne^2}^2 + V_{mi^2}^2 + V_{mr^2}^2}, \quad (6)$$

$$V_{n2} = \sqrt{(e_{n2}(\frac{R_4 + R_3 // R_5}{R_1} + 1))^2 \Delta f},$$

$$V_{ni2} = \sqrt{(e_{i2}(R_4 + R_3 // R_5))^2 \Delta f},$$

$$V_{wr2} =$$

$$\sqrt{4KT\Delta f(\frac{(R_4 + R_3//R_5)^2}{R_1} + R_4 + R_3//R_5))}。(7)$$

利用星三角变换原理,T型反馈电阻网络运放电路增益为:

$$A = \frac{U_1}{U_0} = \frac{R_3 + R_4}{R_1} (1 + \frac{R_3 // R_4}{R_5})。 \quad (8)$$

由于第二级 T 型反馈放大电路的放大作用, 第一级跨阻放大电路  $U_o$  端产生的噪声电压会在第二级输出  $U_1$  端被放大为  $V'_{n1} = AV_{n1}$ 。

前置放大电路总输出噪声电压为:  $V_n = \sqrt{V_{n1}^2 + V_{ni}^2}$ 。

式中,硅 PIN 光电二极管的内阻为  $R_d$ ,自由电子电荷量为  $q$ ,产生的光电流大小为  $I_p$ ,玻尔兹曼常数为  $K$ ,跨阻放大电路反馈电阻为  $R_f$ ,绝对温度为  $T$ ,系统带宽为  $\Delta f = 30 \text{ kHz}$ ,光电二极管探测器得到的微弱电流  $1 \mu\text{A}$ 。带入公式计算得到总噪声电压为  $V_n = 2.62 \text{ mV}$ ,输出端电压为  $V_s = 2.2 \text{ V}$ ,前置放大电路在输出端的信噪比为:

$$\text{SNR} = 20 \log \frac{V_s}{V_n} = 58.74 \text{ dB}. \quad (9)$$

该前置放大电路的设计实现了低噪声放大的要求,并且获得了较高的信噪比。

## 4 速度信息获取算法

### 4.1 速度获取的数学建模

在傅里叶变换红外光谱仪中,利用 He-Ne 激光构成参考干涉系统。因为 He-Ne 激光的单色性较好,在干涉仪扫描速度一定时,He-Ne 激光干涉图波形为标准正弦波波形,且频率由 He-Ne 激光的波长决定。设光程差扫描速度为  $u_{op}$ ,则 He-Ne 激光(波数为  $\nu_{hm}$ )干涉图的正弦波频率为:

$$f_{hm} = u_{op} \nu_{hm}. \quad (10)$$

通过 He-Ne 激光的光电检测与信号处理电路,激光干涉信号变成了过零点脉冲信号,其频率等于 He-Ne 激光干涉信号频率的 2 倍,即:

$$f_0 = 2f_{hm}. \quad (11)$$

根据传统 T 法计数,在过零点脉冲的一个周期内,对高速时钟信号进行计数,设高速时钟信号频率为  $f_c$ ,在过零点脉冲一个周期内计数个数为  $M$ ,则过零点脉冲频率为:

$$f_0 = \frac{f_c}{M}. \quad (12)$$

利用上述式(10)~(12),计算光程差速度为:

$$u_{op} = \frac{f_c}{2M\nu_{hm}}. \quad (13)$$

由式(13)可知光程差速度的测量关键在于计数个数  $M$  的准确性。

### 4.2 速度获取的误差分析

T 法对脉冲计数的时序图 9 所示。

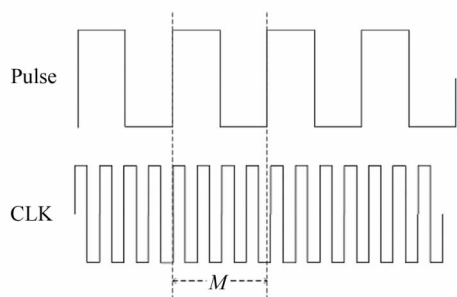


图 9 T 法计数原理时序图

Fig. 9 Sequence diagram of T method counting principle

通过图 9 的 T 法计数原理时序图可以看出,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  $1/M$ 。

从相对误差公式可以看出,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。

### 4.3 等效时钟法

T 法计数精度依赖于时钟信号频率的高低,时钟信号频率越高,测量误差越小。但是时钟信号频率越高,对计数器芯片的性能要求也越高,而且会给电路板的选择、电路的布线以及加工带来一系列问题。为了进一步提高计数精度,减小 T 法计数带来的误差。本文提出了一种使用现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)高频时钟源等相差相移的计数方法,如图 10 所示是等效的高频计数时钟产生原理。

Clock\_1 为 FPGA 具有原始相位的晶振时钟源, Clock\_2 一直到 Clock\_N 为经过等相差移相后的同频计数时钟,从 Clock\_1 到 Clock\_N 每个计数时钟都同时驱动单独的计数器, Clock\_Eq 代表等效高频计数时钟。当 FPGA 的晶振时钟源频率为  $f_1$  时,经过等相差移相后的时钟相位分别为  $0, \frac{2\pi}{N}, \frac{4\pi}{N}, \frac{6\pi}{N}, \dots, \frac{2\pi(N-1)}{N}$ 。在一个脉冲信号周期内,当时钟信号上升沿到时,每路时钟都驱动计数器进行计数。对每路计数结果相加,就等效为 T 法计数器被倍频  $N$  倍的时钟信号驱动计数。

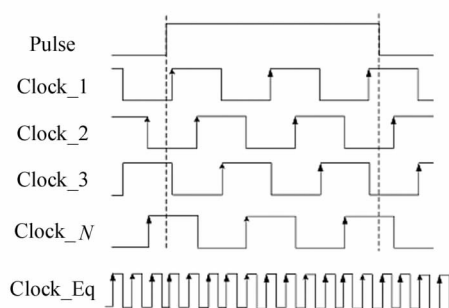


图 10 等效时钟法示意图

Fig. 10 Schematic diagram of equivalent clock method

从图 10 时序图分析可以看出,这种等效时钟法计数实际中相当于将原始时钟信号频率扩大  $N$  倍,即以  $f_c = Nf$  的高频时钟对过零点脉冲信号进行计

数测量,在忽略移相时钟信号间的相对延迟时间误差的情况下,其最大测量误差将变为原来的  $1/N$ 。同时,移相的方法避免了时钟频率提高带来的一系列芯片性能问题,在没有提高计数芯片工作频率的情况下,提高了系统的工作频率,减小了测量误差。

基于 FPGA 实现等效时钟法计数,同时保证系统精度和稳定性,本系统采用 Intel 公司的 cyclone IV E 系列 FPGA 来实现,内部有晶振频率 50 MHz 的高频时钟源。晶振产生原始计数时钟信号 CLK\_1,通过锁相环实现原始时钟等相差移相(分别是  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ ),产生四路( $N=4$ )计数时钟信号,来驱动 4 个相同计数器计数,最后经过求和算出计数总数。

He-Ne 激光干涉信号最高频率为 9 kHz 的情况下,Modelsim 仿真实现波形如图 11 所示。对仿真结果进行分析,等效时钟法脉冲测量计数的相对误差仅为 0.01%。

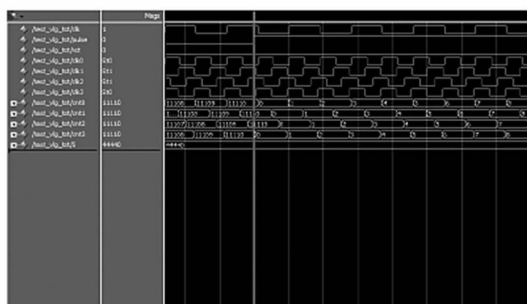


图 11 等效时钟法 Modelsim 仿真图

Fig. 11 Modelsim simulation diagram of equivalent clock method

## 5 结 论

为了满足高精密红外光谱仪的光程差速度信息获取精度的需求,进一步提升仪器的性能,本文设计一种基于等效时钟法的高精度速度信息获取系统。首先设计了激光干涉信号检测电路,并进行了噪声分析,得到了较高信噪比的光电信号处理电路;然后基于干涉脉冲实现光程差速度反馈测量,并分析了速度信息获取误差;最后针对速度信息获取误差,提出了等效时钟法进一步减小速度信息获取误差。仿真结果表明,该设计具体良好的性能,在 He-Ne 激光干涉信号频率为 9 kHz 时,基于等效时钟法的光程差速度信息获取误差仅为 0.01%。因此,所提出的设计方法对系统控制精度的提高具有重要意义,为具有类似特性的光电反馈控制系统的设计提供借鉴。

## 参考文献:

- [1] MANNING C J, COMBS R J. FT-IR interferogram signal processing for uniform-time sampling[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4577: 127-134.
- [2] WU Y H, HEANEY J B, KHAMME E T, et al. A panchromatic imaging Fourier transform spectrometer for the NASA geostationary coastal and air pollution events mission[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8150: 81500O.
- [3] LI B, HOU L, XU P. Key performance simulation and analysis of space borne Fourier transform infrared spectrometer[C]//3rd International Symposium of Space Optical Instruments and Applications, June 26-29th, 2016, Beijing, China. Berlin, Heidelberg: Springer Nature, 2017, 192: 447-457.
- [4] REN L B, YANG H L, WEI H Y. Development of multicomponent gas analyzer based on FTIR principle[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(12): 3175-3179.  
任利兵, 杨宏雷, 尉昊赞. 采用 FTIR 原理的多组分气体分析仪研制[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(12): 3175-3179.
- [5] YANG T H, HU X Q, XU H L, et al. Radiation calibration accuracy assessment of FY-3D hyperspectral infrared atmospheric sounder based on intercomparison[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1130003.  
杨天杭, 胡秀清, 徐寒列, 等. 基于交叉比对的风云三号 D 星红外高光谱大气探测仪辐射定标性能评估[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1130003.
- [6] XU G, HE C C, ZHANG L N, et al. Research on positioning technology of Mach Zehnder interferometer[J]. Laser Technology, 2019, 43(2): 195-200.  
徐果, 贺成成, 张伦宁, 等. 马赫-曾德尔干涉仪的定位技术研究[J]. 激光技术, 2019, 43(2): 195-200.
- [7] JIN X Q. Research on reference laser frequency stabilization technology of spatial Fourier spectrometer[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2011.  
金小强. 空间傅立叶光谱仪参考激光稳频技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
- [8] JIAN W, LIU Z J, LIN Z, et al. Design of optical path scanning control system for Fourier spectrometer[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(8): 2085-2091.  
粘伟, 刘兆军, 林喆, 等. 傅里叶光谱仪的光程扫描控制系统设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2085-2091.
- [9] TIAN M, HE Z P, CHEN K, et al. Light pointing mechanism based on ultrasonic motor and its pointing error analysis[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(7):

2200-2200.

田咪,何志平,陈凯,等.基于超声电机的轻型指向机构及其指向误差分析[J].红外与激光工程,2015,44(7):2200-2200.

- [10] HUANG M S, LIU X C, MA P. Periodic error compensation in pulsed time of flight laser ranging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0317004.

黄民双,刘晓晨,马鹏.脉冲飞行时间激光测距系统中周期误差补偿[J].红外与激光工程,2018,47(3):0317004.

- [11] YAO X F, SUN C, YANG J, et al. Development and error compensation of high precision angular displacement platform[J]. *Journal of Instrumentation*, 2016, 37(5): 961-967.

姚雪峰,孙慈,杨晋,等.高精度角位移平台的研制及误差补偿[J].仪器仪表学报,2016,37(5):961-967.

- [12] LANGRAF S, BUNKOV D, ODNOKOPYLOV I, et al. The electric drive control system of corner reflectors of the spacecraft interferometer[J]. *MATEC Web of Conferences*, 2017, 102: 01026.

- [13] LIU C J, SUN Q, DENG Y Q, et al. Study on improving the measurement speed of terahertz time domain spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35

(12): 3330-3333.

刘传军,孙青,邓玉强,等.提高太赫兹时域光谱仪测量速度研究[J].光谱学与光谱分析,2015,35(12):3330-3333.

- [14] DONG X, XU P M, HOU L Z. Design and implementation of infrared very hyperspectral resolution detector for atmospheric environment[J]. *Aerospace Return and Remote Sensing*, 2018, 39(3): 29-37.

董欣,徐彭梅,侯立周.大气环境红外甚高光谱分辨率探测仪设计与实现[J].航天返回与遥感,2018,39(3):29-37.

- [15] 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.

#### 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。