

飞秒光频梳基于鉴相信号处理实现速度测量

薛彬, 赵拓, 吴翰钟, 张凯, 王志洋, 游画

(天津大学海洋科学与技术学院, 天津 300072)

摘要: 以激光测速为基础, 引入飞秒光频梳, 通过鉴相信号处理, 研究出了一种高精度的测速方法, 理论测量下限低至 $\mu\text{m/s}$ 量级。文中详细分析了飞秒光频梳经运动目标反射后梳齿相位发生变化的原理, 建立了较为全面的数学模型并使用 MATLAB 软件进行了仿真。采用快速傅里叶变换方法对仿真测量信号相位信息进行提取并处理, 分别对 $\mu\text{m/s}$ 、 mm/s 和 m/s 量级速度值进行了测量, 理想情况下测量误差在 $1\ \mu\text{m/s}$ 以下。同时, 还对做任意运动的目标进行了测量仿真实验, 结果表明文中方法还可以还原目标的运动状态。最后搭建了实验装置对 mm/s 量级的速度进行测量, 测量相对误差均在 4% 以内, 验证了此方法的可行性。

关键词: 飞秒光频梳; 速度测量; 快速傅里叶变换

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0206002

Speed measurement using femtosecond optical frequency comb based on phase signal processing

Xue Bin, Zhao Tuo, Wu Hanzhong, Zhang Kai, Wang Zhiyang, You Hua

(School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Based on laser speed measurement, a method for high-accuracy speed measurement was developed by using femtosecond optical frequency comb based on the phase signal processing. The low speed measurement limit is $\mu\text{m/s}$ level theoretically. The principle of phase changing was analyzed in detail, and a comprehensive model was established and simulated with MATLAB. The phase information of simulated measurement signals were processed by fast Fourier transform, and the speeds of $\mu\text{m/s}$, mm/s and m/s were measured respectively. Ideally, the measurement error was below $1\ \mu\text{m/s}$. In addition, arbitrary movement targets can be measured through the model. The movement state of target was restored with this method. The experiment was conducted to measure the speed of mm/s , and the relative errors were all within 4%. The results show that high-accuracy speed measurement can be achieved by using this method.

Key words: femtosecond optical frequency comb; speed measurement; fast Fourier transform

收稿日期: 2017-08-11; 修订日期: 2017-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(61505140)

作者简介: 赵拓(1993-), 男, 硕士生, 主要从事飞秒激光流速传感方面的研究。Email: tzhao@tju.edu.cn

导师简介: 薛彬(1986-), 男, 讲师, 博士, 主要从事海洋光学传感与测量方面的研究。Email: xuebin@tju.edu.cn

0 引言

速度测量在工业应用和科学研究中都是一个重要课题。在航空航天、机械、能源、石油、动力、冶金、水利、化工、环保、计量、医学、轻工等领域^[1-2],速度测量有着不可忽视的作用。在腐蚀蠕变、焊缝收缩、边界流、生物工程及医学研究中更是会涉及到低速测量的问题。传统的测速技术,如皮托管测速、机械式流速传感器都属于接触式测速方法^[3],它们的测量探头不仅对目标产生干扰,而且还限制了测量的频率响应速度和空间分辨率。而激光多普勒测速技术以其非接触测量、高精度、大范围等优势倍受青睐^[4],目前其应用已遍布航空航天、机械、计量、医学等领域,用于测量固体表面的运动速度和流场(气流和水流)流速。

激光多普勒测速技术是基于运动粒子散射光的多普勒频移来获取速度信息的^[5],由于光频难以直接检测,大多研究都集中在如何完善相干检测的方法上^[6-8],即设计两束频率接近的相干光,利用光电探测器检测拍频信号,获取多普勒频移来计算速度^[9]。近年来,Zeyuan Kuang 等人^[10]设计了一种双偏振光纤光栅的激光多普勒测速仪,实现了 2~37 m/s 的测速范围。Yan Bai 等人^[11]采用锁模激光测量了几十 m/s 范围内运动目标的速度。Koichi Maru 等人^[12]采用空间编码的方式实现了 ± 512 mm/s 范围的速度测量。但以上方法均为通过测量多普勒频移信号来测量目标运动速度,以现有频率测量仪器的能力,难以实现 mHz 级别以下频率的探测,而 mm/s 及以下的低速引起的多普勒频移恰恰在 mHz 及更低的级别,因此采用探测频移的方法在低速测量领域难以保证精度。而目前低速测量方法多是采用码盘、霍尔传感器等进行测量,这些方法在高温、腐蚀等环境下难以胜任。

飞秒激光,在时域表现为周期性脉冲序列,在频域表现为等间隔的频率梳齿,又称飞秒光频梳,是一种特殊激光光源,近些年来在精密测量领域有着重要应用。基于此,文中提出一种利用运动目标引起飞秒光频梳的相位变化来探测目标运动速度的方法,详细分析了基于鉴相方式的飞秒光频梳测速原理,设计了测量光路采集参考光和测量光信号,采用快

速傅里叶变换的方法提取相位信息并解算速度,设计了仿真实验并进行数值模拟。模拟结果表明文中提出的方法理论上不仅可以实现高精度、宽量程速度测量,还可以还原任意运动目标的运动状态。最后搭建了实验装置,在 mm/s 量级选了 7 个速度值进行实验验证,测量结果相对误差均小于 4%。

1 测量原理

1.1 飞秒光频梳简介

2005 年,德国 MAX-Planck 研究所的 Hansch 和美国 JILA 研究所的 Hall 因在飞秒光学频率梳(简称“飞秒光频梳”或“光频梳”)方面的卓越贡献共同获得了诺贝尔物理学奖。飞秒光频梳是利用将频率溯源至微波频率基准的飞秒锁模激光产生一系列在频率域上稳定的激光光谱,其在时域为飞秒脉冲,在频域表现为等频率间隔的频率梳齿^[13]。由于其时域和频域的物理特性,它能将微波频率标准的频率稳定度转移到宽频谱范围内一个或多个光学频率上,输出一条拥有数十万个准单模谱线的光学频率链,这是其他光源无法比拟的^[14]。不仅如此,更为重要的是参考时间基准频率源对光学频率梳的重复频率(梳齿间距)进行高精度稳频控制后,其就具备了传递时间基准的能力。而 1983 年的第十七届国际度量衡大会规定国际单位制(SI)中,将基本长度单位“米”定义为“光在真空中 $1/299\,792\,458$ s 行进的距离”并将此定义沿用至今^[15],这就使得飞秒光频梳具有了链接时间基准和长度基准的特性。因此应用飞秒光频梳进行速度量的测量,不仅具有极高的测量精度,还具有直接将测量结果溯源国际基准的优势。

1.2 测速原理

图 1 为文中方法实验原理图,光梳发出一串连续的脉冲光,在分光镜 BS 处分为两束光,一束经反射和汇聚后进入光电探测器 PD1 作为参考光,用于记录光频梳的初始相位信息,另外一束测量光经过一个半波片后穿过偏振分光镜,再经过四分之一波片后入射到运动目标上,被反射回来后经偏振分光镜反射进入光电探测器 PD2,收集测量信号。两个光电探测器的输出信号同时输入相位检测单元,再经过数据处理后输出速度值。

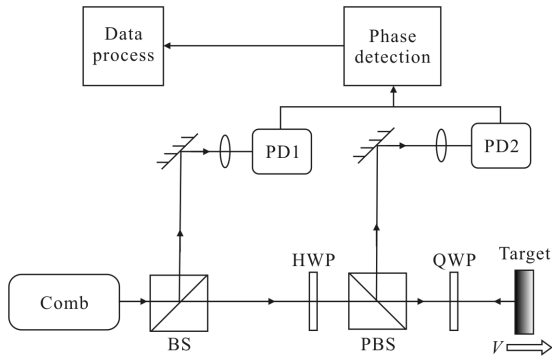


图 1 测量光路

Fig.1 Measured optical path

飞秒光频梳在频域上为一系列等间隔分布的谱线,各纵模频率为 $f=i f_{\text{rep}}+f_{\text{ceo}}$, i 为梳齿序数。设第 p 个纵模表达式为 $E_p=A \cos (2 \pi f_p t+\varphi_p)$; 设第 $p+1$ 个纵模表达式为 $E_{p+1}=A \cos (2 \pi f_{p+1} t+\varphi_{p+1})$, A 为电场强度, φ_p 、 φ_{p+1} 分别为第 p 和 $p+1$ 个纵模的相位。这里, 为计算方便, 假设第 p 个纵模与第 $p+1$ 个纵模的电场强度相等, 则第 p 和 $p+1$ 个纵模进行差拍后的表达式为:

$$E_f=E_p+E_{p+1}=2 A\left\{\cos \left[2 \pi\left(\frac{f_{p+1}-f_p}{2}\right) t+\frac{\varphi_{p+1}-\varphi_p}{2}\right] \times \cos \left[2 \pi\left(\frac{f_{p+1}+f_p}{2}\right) t+\frac{\varphi_{p+1}+\varphi_p}{2}\right]\right\}=2 A\left\{\cos \left[2 \pi\left(\frac{f_{\text{rep}}}{2}\right) t+\frac{\varphi_{p+1}-\varphi_p}{2}\right] \times \cos \left[2 \pi\left(\frac{f_{p+1}+f_p}{2}\right) t+\frac{\varphi_{p+1}+\varphi_p}{2}\right]\right\} \quad (1)$$

$$A_1=2 A \cos \left[2 \pi\left(\frac{f_{\text{rep}}}{2}\right) t+\frac{\varphi_{p+1}-\varphi_p}{2}\right] \quad (2)$$

则合成波可以看作是一个频率为 $(f_p+f_{p+1})/2$, 而幅度受到调制的波, 其振幅随时间在 $-2 A \sim 2 A$ 之间周期性变化。光电检测器检测到变化的光强信号可以表达为:

$$I=A_1^2=4 A^2 \cos ^2\left(\pi f_{\text{rep}} t+\frac{\varphi_{p+1}-\varphi_p}{2}\right)=2 A^2 \cos (2 \pi f_{\text{rep}} t+\varphi_{p+1}-\varphi_p) 2 A^2 \quad (3)$$

公式(3)为相邻两纵模间差拍所得的信号, 而总信号可以表示为(以建立模型采用的 100 个纵模信号为例):

$$I_0=\sum_{i=1}^{100} \sum_{j=2}^{100} 2 A_{ij}^2 \cos (2 \pi(j-i) f_{\text{rep}} t+\varphi_j-\varphi_i)+2 A_{ij}^2(j>i ; i, j \text{ 为飞秒激光任意两不同纵模序数}) \quad (4)$$

在目标位置发生变化后, 测量光相对参考光的相位会发生变化, 光波每变化 2π 相位, 第 j 个纵模

对应的光程发生波长 $\lambda=c / n \cdot(j \cdot f_{\text{rep}}+f_{\text{ceo}})$ 的变化, 因此相位差与目标运动距离 L 成线性关系, 具体可表示为:

$$\frac{\Delta \varphi}{2 \pi}=\frac{2 L}{c / n \cdot(j \cdot f_{\text{rep}}+f_{\text{ceo}})} \quad (5)$$

式中: $\Delta \varphi$ 为相位差; L 为目标运动距离; c 为光速; n 为空气折射率。

因此, 测量信号表达式为:

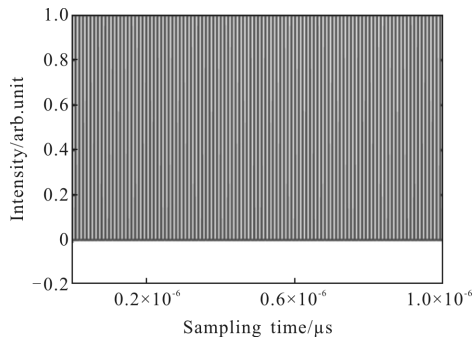
$$I_{\text{mea}}=2 A_{ij}^2+\sum_{i=1}^{100} \sum_{j=2}^{100} 2 A_{ij}^2 \cos [2 \pi(j-i) f_{\text{rep}} t+\left(\varphi_j+\frac{2 L \cdot 2 \pi}{c / n \cdot(j \cdot f_{\text{rep}}+f_{\text{ceo}})}\right)-\left(\varphi_i+\frac{2 L \cdot 2 \pi}{c / n \cdot(i \cdot f_{\text{rep}}+f_{\text{ceo}})}\right)]=2 A_{ij}^2+\sum_{i=1}^{100} \sum_{j=2}^{100} 2 A_{ij}^2 \cos [2 \pi(j-i) f_{\text{rep}} t+\varphi_j-\varphi_i+\frac{2 L \cdot 2 \pi}{c / n \cdot(j-i) \cdot f_{\text{rep}}}] \quad (6)$$

比较公式(4)和公式(6)可以看出, 只需提取其各模间拍频对应的相位变化信息, 即可解算出目标位置变化信息, 从而解算出目标相邻两次采样间隔内的平均运动速度。当 $j-i$ 值不同, 即拍频不同时, 对应测量精度和测量范围也会发生变化, 拍频越高, 对应合成波长越短, 测量分辨率越高。

由于相位差的 2π 周期性, 运动目标位移超过 $1 / 2$ 波长时会引起测量相位的模糊性。在此, 可采取双合成波并行测量的方式, 在测量时, 先采用 $f=f_{\text{rep}}$ 的基频合成波进行粗测, 确定其相位变化周期数, 然后换用 $f=m f_{\text{rep}}(m$ 为正整数) 的高频模间拍频进行精测, 以实现宽量程和高精度的测量。基频和低频信号处理可采用 FPGA 做并行处理, 以实现实时速度的反馈。

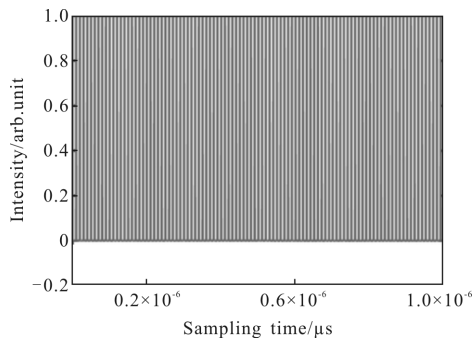
2 速度测量数值模拟

对飞秒光频梳参考信号和测量信号进行了仿真模拟。模拟中, 飞秒光频梳中心波长为 1 040 nm, 光谱宽度为 20 nm。重复频率为 100 MHz, 光速为 299 792 458 m/s, 温度为 20 °C, 大气压为 101.325 kPa, 相对湿度为 50%, CO₂ 浓度为 450 ppm(1 ppm=10⁻⁶), 根据 Ciddor 公式计算该环境下空气群折射率为 1.000 271 8, 考虑到常用示波器的采样率, 设置采样点数为 5 000, 采样频率为 5 GHz。另外, 考虑到实际测量中会受到各种噪声的干扰, 将软件分辨率设置为 4 位有效数字。仿真信号波形如图 2 所示。



(a) 参考信号

(a) Reference signal



(b) 测量信号

(b) Measuring signal

图 2 仿真信号波形

Fig.2 Simulation signal waveform

两信号的幅频特性曲线如图 3 所示,可以看出,

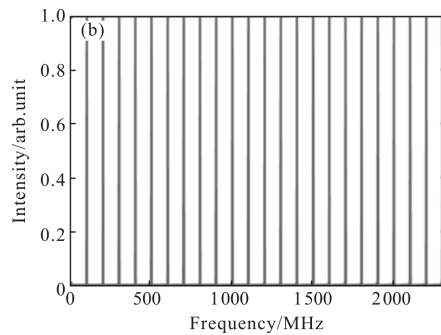
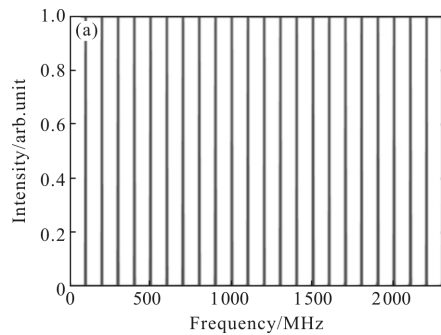


图 3 信号幅频特性曲线

Fig.3 Signal amplitude-frequency characteristic curve

其频域为等间隔频率梳齿,由于测量目标运动速度远低于光速,引起多普勒频移不高于 Hz 量级,而光频梳重复频率范围在 MHz 级别以上,多普勒频移对光谱的影响可以忽略不计,因此可以认为,飞秒光频梳经过运动目标反射,其频域特性几乎没有改变。

在获取测量信号后,鉴相处理直接关系到测量精度。课题组在此采用快速傅里叶变换法做了速度测量仿真实验并分析了实验结果。

2.1 相位信息提取及速度解算

首先采用快速傅里叶变换(FFT)的方式来提取相位信息,如图 4 所示,横轴代表不同频率成分,纵轴表示不同频率成分对应的相位信息。

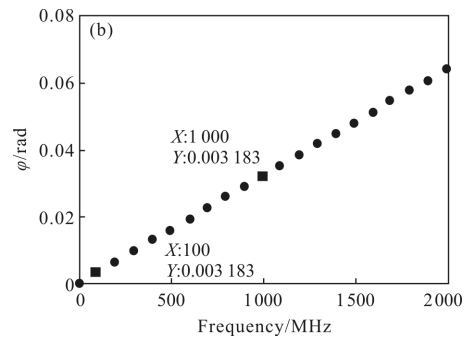
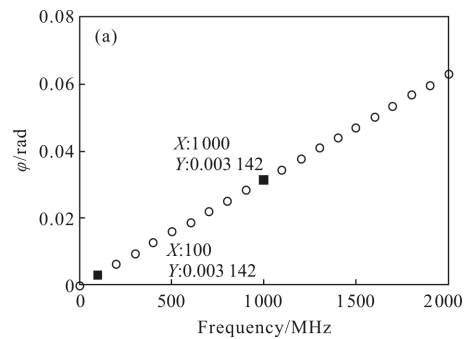


图 4 信号相频关系

Fig.4 Signal phase-frequency relationship

在此,提取了基频 $f=f_{rep}$ 和 10 倍重复频率 $f=10f_{rep}$ 信号的相位信息,然后根据公式(5)计算得出运动目标在采样时间内的位移并计算出其平均运动速度。由于软件分辨率只能显示四位有效数字的限制,仿真实验只能测到 $\mu\text{m/s}$ 量级的速度。在此做了四组仿真实验,第一组测试了 1、2、3、4 $\mu\text{m/s}$,测量速度与实际速度关系如表 1 所示;第二组测试了 1、2、3、4 mm/s ,测量速度与实际速度关系如表 2 所示,第三组测试了 1、2、3、4 m/s ,测量速度与实际速度关系如表 3 所示。

表 1 第一组仿真实验结果

Tab.1 First group of simulation results

True value/ $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1	2	3	4
Measurement results $/\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.954 3	1.980 1	2.982 1	4.007 9
Measurement error $/\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	-0.045 7	-0.019 9	-0.017 9	0.007 9

表 2 第二组仿真实验结果

Tab.2 Second group of simulation results

True value/ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	1	2	3	4
Measurement results $/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	0.999 58	1.996 8	2.999 44	3.999 53
Measurement error $/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	-0.000 42	0.003 2	-0.000 56	-0.000 47

表 3 第三组仿真实验结果

Tab.3 Third group of simulation results

True value $/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1	2	3	4
Measurement results $/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.99999944	2.0000054	2.99999964	3.99999956
Measurement error $/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	-0.00000056	0.0000054	-0.00000036	-0.00000044

鉴于实际应用中,被测目标多为变速运动,第四组实验测试了变速运动目标。将目标运动速度函数设置为 $V=\sin(2\pi t)+\sin(4\pi t)+2$,单位为 cm/s 。通过测量目标在 0.001 s 内的相位变化来计算其运动速度,测量结果如图 5 所示,图中实线为目标实际运动状

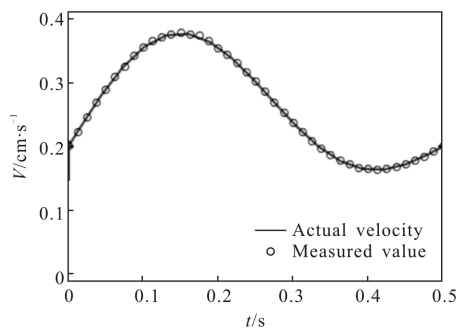


图 5 变速运动目标测速结果

Fig.5 Measured results of variable moving target

态,黑点为每隔 0.25 s 采样一次测得的目标瞬时速度。根据结果显示,测量结果基本吻合真值,可还原目标运动状态。

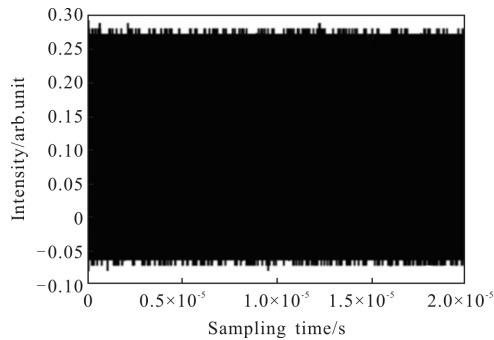
2.2 结果分析

根据以上四组实验结果可以发现,文中方法对 $\mu\text{m/s}\sim\text{m/s}$ 范围内的速度均可以进行测量,具有宽测量范围的优势,且所测速度精度理论上能达 $1\ \mu\text{m/s}$ 。采用快速傅里叶变换的相位提取方法不需要对各频率梳齿所携带的信号进行分离即可提取相位信息,能够大大提高信号的处理速度,从而快速地对测量信号进行处理和提取。

3 实验及结果讨论

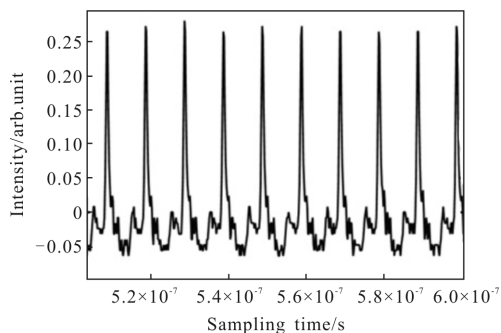
3.1 实验装置及测量结果

为了验证飞秒光频梳相位测速的实用性,搭建了图 1 所示实验装置,光源采用 Menlo System 公司的 ORANGE 飞秒脉冲激光器,中心波长 $1\ 040\ \text{nm}$,光谱宽度为 $20\ \text{nm}$,脉宽 $<150\ \text{fs}$, $100\ \text{MHz}$ 的重复频率锁定到铷原子钟 (Microsemi 8040, $1\ \text{s}$ 内频率稳定度为 2×10^{-11}) 上。实验时室内温度为 $25\ ^\circ\text{C}$,大气压为 $101.325\ \text{kPa}$,相对湿度为 58% ,根据 Ciddor 公式计算该环境下空气群折射率为 $1.000\ 266\ 9$,运动目标采用精密移动导轨(德国 PI 公司, M-521.DD1, 编码分辨率 $50\ \text{nm}$) 搭载反射镜,两个高速光电探测器分别接收参考光和运动目标反射回的信号光。通过示波器采集信号,采样率设置为 $5\ \text{GHz}$,采样点数为 105 个,所得信号波形如图 6 所示,图 6(a) 为采集到的信号的时域波形,为了便于识别,将其时间轴展开得到图 6(b) 所示的脉冲信号,可以看出其脉冲周期对应 $100\ \text{MHz}$ 的重复频率。对所得信号进行快速傅里叶变



(a) 时域波形

(a) Time domain waveform



(b) 时域展开后的波形

(b) Waveform of expanding time domain

图 6 测量信号波形

Fig.6 Measured signal wave

换得到其幅频特性曲线,如图 7 所示,图中只截取了傅里叶变换后频率正值部分,探测器带宽限制最大能探测到 1.5 GHz 信号,因此无法显示更高阶频率成分。

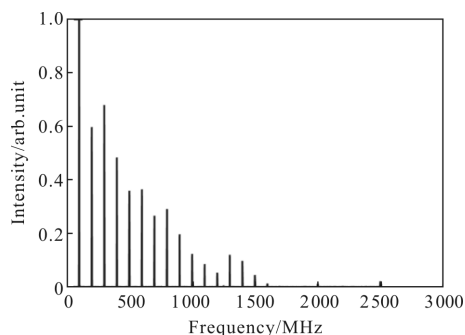


图 7 测量信号幅频特性曲线

Fig.7 Measured signal amplitude-frequency characteristic curve

由于存储速度的限制,设置示波器相邻两次存储波形时间间隔为 2 s。进行了七组实验,测量了 0.1、0.3、0.5、1、3、5、8 mm/s 等七个速度值,通过快速傅里叶变换法提取 1 GHz 频率成分的相位。得到单位时间内的相位变化,计算运动速度,所得结果如图 8 所示。

图中虚线代表导轨运动速度,七个黑点为测量值,可以看出,测量结果与精密导轨速度吻合,测量误差如图 9 所示,最大误差发生在 3 mm/s 处,仅为 0.074 86 mm/s,相对误差均低于 4%。每个测量点分别测了三次,标准差均在 10^{-3} mm/s。验证了基于飞秒光频梳基于鉴相处理速度测量方法应用于低速测量时能够保证高精度的优势。

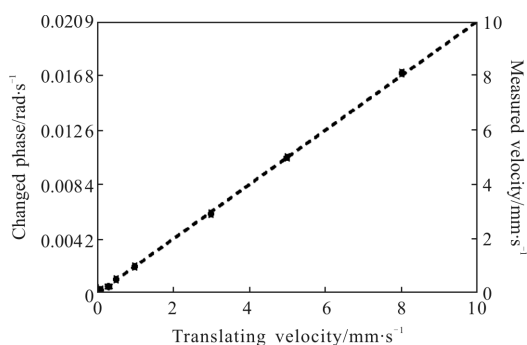


图 8 实验测量结果(虚线为导轨速度,黑点为测量值)

Fig.8 Measured results(The dashed line is the speed of rail, and the black spots are measured values)

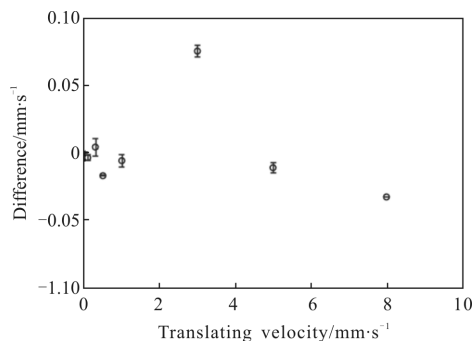


图 9 平移速度与测量速度之间的测量误差

Fig.9 Difference between translating velocity and measured velocity

3.2 结果讨论

文中方法采取 $V=L/t$ 进行速度量测量,速度测量值 v 的合成不确定度为:

$$u_v^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial L} \cdot u_L \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial t} \cdot u_t \right)^2 = \left(\frac{1}{t} \cdot u_L \right)^2 + \left(-\frac{L}{t^2} \cdot u_t \right)^2 = \left(\frac{V}{L} \cdot u_L \right)^2 + \left(\frac{V}{t} \cdot u_t \right)^2 \quad (7)$$

式中: u_L, u_t 分别为距离不确定度和时间不确定度。可以看出,随着测量距离和测量时间的增加,测量不确定度也会随之降低。测量中,示波器与飞秒激光器锁到同一铷钟上。如此, u_t 约为 10^{-11} s,对测量结果的影响可忽略不计。

对于 u_L ,根据公式(5)可知,影响距离不确定度的因素有:空气折射率 n ,光频梳重频 f_{rep} 抖动以及相位 $\Delta\varphi$ 的测量精度。影响空气折射率变化的因素有温度、湿度、压强和 CO_2 浓度。由于目标运动速度很低,2 s 内运动的位移不超过 16 mm,如此小的空间范围内,可以认为温度、湿度、压强和 CO_2 浓度均未

发生变化。而铷钟的 1 s 内频率稳定度为 2×10^{-11} , 光频梳抖动 $\delta f_{\text{rep}} = 100 \text{ MHz} \times 2 \times 10^{-11} = 2 \text{ mHz}$, 其引起的相对误差为 $2 \text{ mHz} / 100 \text{ MHz} = 2 \times 10^{-11}$, 因此对测量结果的影响可以忽略。在相位测量过程中引起测量误差的因素主要是以下两个方面: (1) 空气抖动引起光路变化和折射率改变, 导致测量光程发生变化, 引起相位差测量误差, 从而影响测量精度; (2) 实验光路搭建时很难保证反射镜镜面与入射光绝对垂直, 因此, 光程变化不绝对等于目标位移, 导致测量结果与导轨速度有些许偏差。

最终 mm/s 级实验测量结果误差在 $10 \mu\text{m/s}$ 量级, 大于仿真实验测量误差。尽管仿真条件下加入一些人为干扰, 但相对于真正实验来说, 仍然缺少复杂环境干扰以及人为操作引起误差的影响, 故仿真结果会优于实验结果。虽然实验结果并没有达到仿真结果的精度, 但 $75 \mu\text{m/s}$ 的测量精度已经足以证明文中方法在速度测量中高精度的优越性。

4 结 论

文中详细推导了采用飞秒光学频率梳测量运动目标速度的原理, 设计了测量光路, 采集参考信号和携带速度信息的测量信号。用 MATLAB 仿真了参考信号和测量信号在时域及频域的变化, 建立了此测量方法的理论数学模型。在此基础上采用快速傅里叶变换法提取相位信息, 做了理想情况下的仿真实验, 测量了 1、2、3、4 $\mu\text{m/s}$, 1、2、3、4 mm/s, 1、2、3、4 m/s 12 个速度值, 结果显示, 理论上测量精度为 $1 \mu\text{m/s}$ 。然后搭建了实验装置对 mm/s 量级的七个速度值进行了测量, 最大误差仅为 0.074 86 mm/s, 相对误差均小于 4%, 具有较高的测量精度。数值模拟结果表明, 所提出的方法理论上可以实现量级在 $\mu\text{m/s} \sim \text{m/s}$ 范围内的速度测量。此外, 鉴于实际工程测量中, 目标速度很难保持匀速运动, 也做了变速目标运动速度的测量仿真, 测量结果与真值基本吻合, 可应用于还原目标运动状态。这需要采用高采样率 FPGA 作算法处理, 实现在线实时速度监测, 在以后的工作中会进行进一步的研究。

参 考 文 献:

[1] Zhou Jian, Wei Guo, Long Xingwu. Research on direction discrimination and low-speed measurement for laser Doppler

velocimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 632-638. (in Chinese)

周健, 魏国, 龙兴武. 激光多普勒测速仪方向辨别及低速测量的研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 632-638.

[2] Zhang Yanyan, Gong Ke, He Shufang, et al. Progress in laser Doppler velocity measurement techniques [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(11): 1157-1162. (in Chinese)

张艳艳, 巩轲, 何淑芳, 等. 激光多普勒测速技术进展[J]. 激光与红外, 2010, 40(11): 1157-1162.

[3] Li Yan, Wang Haiwen, Guo Hui. Application of Pitot-tube method in the flow field calibrations of low speed water tunnel [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2009, 23(3): 104-107. (in Chinese)

李岩, 王海文, 郭辉. 皮托管测速技术在低速水洞流场校测中的应用[J]. 实验流体力学, 2009, 23(3): 104-107.

[4] Wu Lizhi, Chen Shaojie, Ye Yinghua, et al. Photonic Doppler velocimetry used for instant velocity measurement of high-speed small flyer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 263-267. (in Chinese)

吴立志, 陈少杰, 叶迎华, 等. 用于瞬态高速飞片速度测量的光子多普勒测速系统[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 263-267.

[5] Liu You, Yang Xiaotao, Ma Xiuzhen. Technique of flow field measurement based on laser Doppler velocimetry[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(1): 18-21. (in Chinese)

刘友, 杨晓涛, 马修真. 基于激光多普勒测速的流场测试技术[J]. 激光与红外, 2012, 42(1): 18-21.

[6] Li Xiuming, Huang Zhanhua, Zhu Meng. Differential laser Doppler system with expanded beams for velocity measurement [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1102-1109. (in Chinese)

李秀明, 黄战华, 朱猛. 扩展光束型激光多普勒速度测量系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1102-1109.

[7] Sharpe J P. A phase-stepped grating technique for frequency shifting in laser Doppler velocimetry [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2007, 45(11): 1067-1070.

[8] Fu Y, Guo M, Phua P B. Spatially encoded multibeam laser Doppler vibrometry using a single photodetector [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(9): 1356-1358.

[9] Czarske J W. Laser Doppler velocimetry using powerful solid-state light sources[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(7): R71.

[10] Kuang Z, Cheng L, Liang Y, et al. Dual-polarization fiber grating laser-based laser Doppler velocimeter [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(5): 10-13.

- [11] Bai Y, Ren D, Zhao W, et al. Heterodyne Doppler velocity measurement of moving targets by mode-locked pulse laser [J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 764–768.
- [12] Maru K, Watanabe K. Cross-sectional laser Doppler velocimetry with nonmechanical scanning of points spatially encoded by multichannel serrodyne frequency shifting [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(1): 135–138.
- [13] Wei Zhiyi. The 2005 Nobel prize in physics and optical frequency comb techniques[J]. *Physics*, 2006, 35(3): 213–217. (in Chinese)
魏志义. 2005 年诺贝尔物理学奖与光学频率梳 [J]. 物理, 2006, 35(3): 213–217.
- [14] Wang Guochao, Yan Shuhua, Yang Jun, et al. Analysis of an innovative method for large-scale high-precision absolute distance measurement based on multi-heterodyne interference of dual optical frequency combs [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(7): 100–110. (in Chinese)
王国超, 颜树华, 杨俊, 等. 一种双光梳多外差大尺寸高精度绝对测距新方法的理论分析[J]. 物理学报, 2013, 62(7): 100–110.
- [15] Wu Xuejian, Li Yan, Wei Haoyun, et al. Femtosecond optical frequency combs for precision measurement applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(3): 030001. (in Chinese)
吴学健, 李岩, 尉昊贇, 等. 飞秒光学频率梳在精密测量中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(3): 030001.