

# 基于单频正交线偏振光的激光波长直接测量方法

严利平,刘朋朋,谢建东,陈本永

(浙江理工大学纳米测量技术实验室,杭州 310018)

**摘 要:**提出了一种激光波长的直接测量方法,将对未知波长的测量转化为干涉条纹信号整周期计数和两路干涉信号相位差的测量,不需要参考光源,能实现激光波长的大范围高精度连续直接测量。介绍了系统的光路结构和激光波长直接测量原理,设计了基于FPGA的整数干涉条纹计数和小数干涉条纹相位差测量的干涉信号处理方法。对He-Ne激光器测量实验结果表明:激光波长测量误差小于0.27 pm,测量不确定度为 $4.5 \times 10^{-7}$ ,由此验证了该方法的可行性以及干涉信号处理方法的有效性。

**关键词:**光波长测量;干涉仪;相位差测量;FPGA

**中图分类号:** TH741

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851 (2017) 05-0699-06

## 0 引 言

长度基准是保证量值准确和实现互换性的基础,现行长度基准“米”采用激光波长作为复现手段。激光波长作几何测量的标尺,被广泛应用于激光干涉仪中用于测量位移、角度、粗糙度和直线度等几何量,是超精密加工、微电子制造以及精密计量领域中的重要参数。因此精确地测量波长大小是保证几何量测量准确性和量值溯源的关键<sup>[1-4]</sup>。激光波长测量方法大致可以分为三类:干涉式测量法、双光电探测器法、光栅光谱仪测量法,其中干涉式测量法因具有实用性和精确性的优点,成为国内外重点研究对象。典型的干涉式激光波长测量有法布里-珀罗干涉法、迈克尔逊干涉法和斐索干涉法。法布里-珀罗干涉法将被测激光和参考激光都锁定至F-P标准具的透射峰值处,通过计算两波长的干涉级次比和拍频测量两波长的波长差值来测得被测激光波长。由于F-P标准具长度固定,虽然波长测量不确定度能达到 $10^{-8}$ ,但是激光波长测量范围很窄<sup>[5-6]</sup>。迈克尔逊干涉法通常采用推拉式的光路结构,参考激光器和被测激光器光束同时入射迈克尔逊干涉仪,

测量同一光程差下参考激光和被测激光干涉条纹数之比,可得到两光束波长之比。当被测激光和参考激光波长非常接近(比如1 pm)时,需要大大增加导轨运动范围(如运动范围达到475 mm),或者需要对干涉信号进行高精度细分,这将导致测量系统结构复杂、可靠性差,而且成本很高。此外,该方法的测量精度不仅受限于参考激光器精度,而且易受导轨运动过程中参考激光和被测激光的平行度影响,波长测量不确定度通常为 $10^{-7}$ ~ $10^{-10}$ 。笔者在前期研究中,提出了基于合成波长检测的激光波长测量方法,通过检测被测导轨运动过程中参考激光和被测激光干涉信号的两次同时过零位置来测得合成波长大小,从而计算被测激光波长大小,波长测量不确定度能达到 $10^{-7}$ ~ $10^{-8}$ ,但是光路中仍需要参考激光器,测量精度仍受限于参考激光器精度<sup>[11-13]</sup>。斐索干涉法采用线阵CCD图像传感器,检测待测激光通过斐索标准具后产生的干涉条纹在空间的光强分布,通过计算条纹的周期间隔实现对待测激光波长的测量,该方法虽然不需要参考激光,结构简单,但是由于系统对环境温度变化、机械振动的抗干扰能力差,因此在测量过程中需要实时标定,给使用带来

收稿日期:2016-11-06 网络出版日期:2017-01-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51205365,51475435);浙江理工大学521人才培养计划

作者简介:严利平(1977-),女,四川内江人,副教授,博士,主要从事精密测量技术方面的研究。

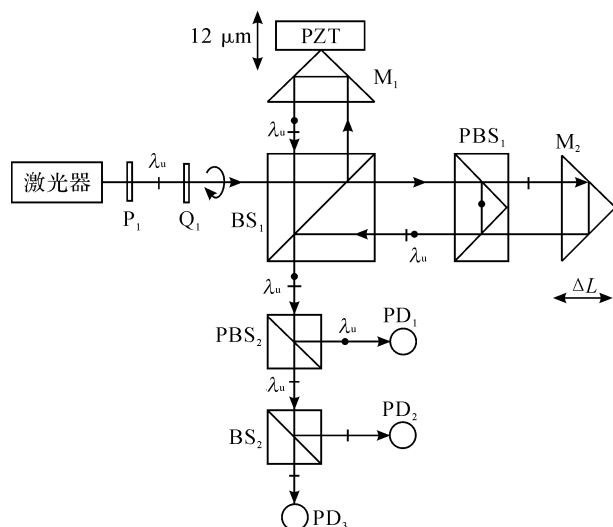
通信作者:陈本永,E-mail:chenby@zstu.edu.cn

极大不便,测量不确定度为  $10^{-6} \sim 10^{-7}$ [14-15]。

本文提出了一种基于单频正交线偏振光的激光波长直接测量新方法,不需要参考激光光源,不仅能够测出干涉条纹变化的整周期部分,还能够测出干涉条纹变化不足一个周期的部分,能实现激光波长的大范围高精度连续直接测量。

## 1 测量原理

基于单频正交线偏振光的激光波长直接测量系统的光路结构如图1所示,被测激光器输出波长为  $\lambda_u$  的单频激光经过偏振片  $P_1$  后形成线偏振光,射向  $e$  轴与线偏振光的偏振方向成  $45^\circ$  角的  $1/4$  波片  $Q_1$  后形成圆偏振光,该圆偏振光由正交线偏振光组成,其中  $\lambda_u$  垂直偏振分量射向由分光镜  $BS_1$ 、安装在压电陶瓷驱动器 (piezoelectric ceramic transducer, PZT) 上的参考镜  $M_1$  和偏振分光镜  $PBS_1$  组成的第一套迈克尔逊干涉仪,形成垂直偏振分量的干涉信号,该干涉信号经偏振分光镜  $PBS_2$  反射后由光电探测器  $PD_1$  接收;同时  $\lambda_u$  水平偏振分量射向由分光镜  $BS_1$ 、参考镜  $M_1$  和测量镜  $M_2$  组成的第二套迈克尔逊干涉仪,形成水平偏振分量的干涉信号,该干涉信号经  $PBS_2$  透射后,再经分光镜  $BS_2$  反射和透射,分别由光电探测器  $PD_2$  和  $PD_3$  接收,通过机械移相使  $PD_2$  和  $PD_3$  接收到的两路干涉信号相位差为  $90^\circ$ 。 $PD_1$  和  $PD_2$  接收到的干涉信号用于计算小数干涉条纹, $PD_2$  和  $PD_3$  接收到干涉信号用于计算整数干涉条纹。



$P_1$ : 检偏器;  $Q_1$ :  $1/4$  波片;  $PBS_{1-2}$ : 偏振分光镜;  $BS_{1-2}$ : 分光镜;  
 $PD_{1-3}$ : 光电探测器;  $M_{1-2}$ : 角锥棱镜; PZT: 压电陶瓷驱动器

图1 基于单频正交线偏振光的激光波长直接测量系统的光路结构

记  $L_0$  为第一套迈克尔逊干涉仪的参考光路和测量光路之间的初始光程差,  $L_1$  为第二套迈克尔逊干涉仪的参考光路和测量光路之间的初始光程差。则测量开始前,探测器  $PD_1$  和  $PD_2$  检测到的垂直和水平偏振分量干涉信号之间的初始相位差为:

$$\Delta\varphi_1 = 2\pi \frac{L_0 - L_1}{\lambda_u} \quad (1)$$

当测量镜  $M_2$  移动位移  $\Delta L$  时,第二套干涉仪的参考光路和测量光路之间的光程差变为  $L_1 - 2\Delta L$ ,则两路干涉信号之间的相位差变为:

$$\Delta\varphi_2 = 2\pi \frac{L_0 - L_1 + 2 \cdot \Delta L}{\lambda_u} \quad (2)$$

$PD_1$  和  $PD_2$  两路干涉信号的这种相位差变化如图2所示。 $V(\lambda_{u\perp})$  表示垂直偏振分量的干涉信号波形,  $V(\lambda_{u\parallel})$  表示  $M_2$  移动前水平偏振分量的干涉信号波形,  $V(\lambda'_{u\parallel})$  表示  $M_2$  移动后水平偏振分量的干涉信号波形。

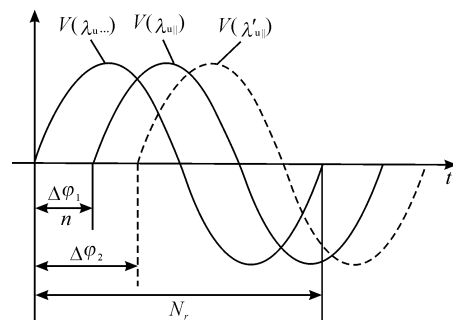


图2  $M_2$  移动前后  $\lambda_u$  垂直偏振分量和  $\lambda_u$  水平偏振分量干涉信号的相位差变化示意图

当  $M_2$  移动的位移  $\Delta L$  超过半个被测激光器波长  $\lambda_u/2$  时,  $\Delta\varphi_2$  中包含整数个  $2\pi$ , 因此式(2)减去式(1)可表示为:

$$\Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1 = 2\pi \frac{2 \cdot \Delta L}{\lambda_u} = 2\pi(N + \epsilon) \quad (3)$$

其中:  $N$  为  $\lambda_u$  水平偏振分量干涉信号相位变化的整周期数,  $\epsilon$  为  $\lambda_u$  水平偏振分量干涉信号相位变化的小数部分, 且有:

$$\epsilon = \frac{\Delta\varphi_{22} - \Delta\varphi_{11}}{2\pi} \quad (4)$$

其中:  $\Delta\varphi_{11}$  为测量镜  $M_2$  运动前  $V(\lambda_{u\perp})$  与  $V(\lambda_{u\parallel})$  两路信号之间的相位差,  $\Delta\varphi_{22}$  为测量镜  $M_2$  运动后  $V(\lambda_{u\perp})$  与  $V(\lambda_{u\parallel})$  两路信号的相位差,  $\Delta\varphi_{11}$  和  $\Delta\varphi_{22}$  的范围为  $0 \sim 2\pi$ 。

因此,在测量镜  $M_2$  移动前后,通过测量  $V(\lambda_{u\perp})$  与  $V(\lambda_{u\parallel})$  两路信号之间的相位差  $\Delta\varphi_{11}$  和  $\Delta\varphi_{22}$  计算出小数干涉条纹  $\epsilon$ , 在  $M_2$  移动时,测得  $V(\lambda_{u\parallel})$  的整周期干涉条纹数  $N$ , 结合式(3),可计算出被测激光器波长为:

$$\lambda_u = \frac{2 \cdot \Delta L}{N + \epsilon} \quad (5)$$

考虑空气折射率的影响,被测激光器在真空中的波长为:

$$\lambda_{uv} = \frac{\lambda_u}{n_{air}} = \frac{2 \cdot \Delta L}{(N + \epsilon) \cdot n_{air}} \quad (6)$$

其中,  $n_{air}$  为空气折射率。

## 2 干涉信号处理

根据上述测量原理可以看出,干涉信号的处理包括:测量镜  $M_2$  运动时,  $\lambda_u$  水平偏振分量两路干涉

信号的整周期计数;测量镜  $M_2$  运动前后,  $\lambda_u$  水平与  $\lambda_u$  垂直偏振分量两路干涉信号之间的相位差测量。基于可编程逻辑器件(field programmable logic array, FPGA) 的干涉信号处理总体框图如图3所示,包括 AD7606 模数转换、级联积分梳状(cascaded integral comb, CIC) 数字滤波、整周期干涉条纹计数、小数干涉条纹计数和串行通信等模块。

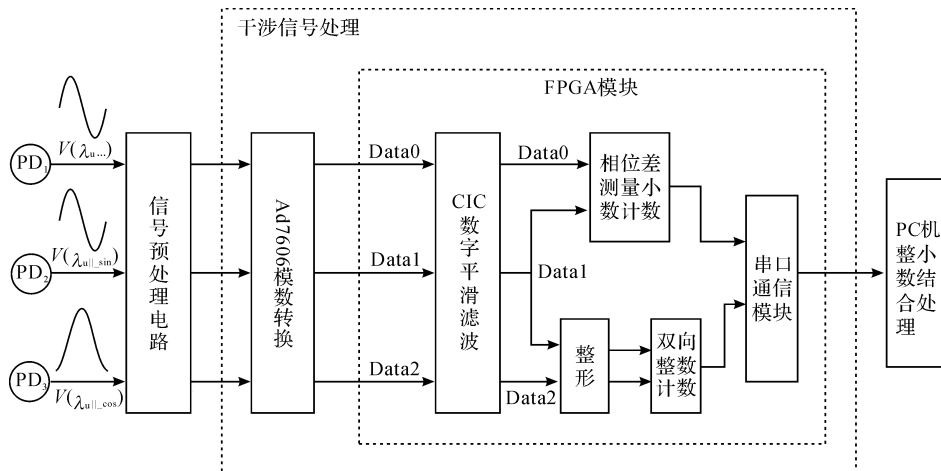
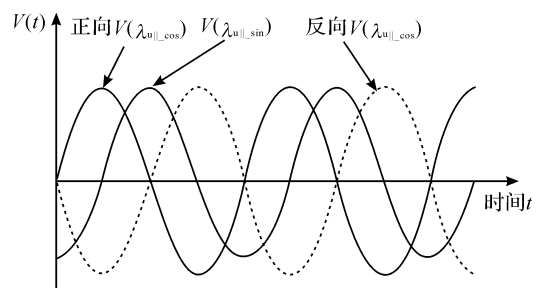


图3 干涉信号处理整体框图

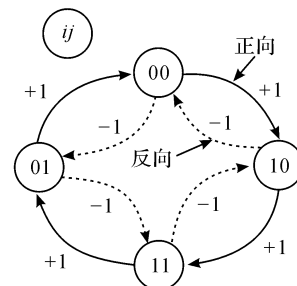
探测器  $PD_1$ 、 $PD_2$  和  $PD_3$  测得的三路干涉信号  $V(\lambda_{u||})$ 、 $V(\lambda_{u||\_sin})$  和  $V(\lambda_{u||\_cos})$ , 经放大、滤波、及电平调零等信号预处理后, 峰峰值为  $\pm 2.5$  V, 分别送至模数转换芯片 AD7606 的三个模拟量输入端口进行模数转换。AD7606 是一个四通道同步采集、16 位转换的模数转换芯片, 其最高采样频率为 200 kHz。当 AD7606 模块进行模数转换时, 受电路噪声及外界扰动的影响, A/D 转换后的数据会出现抖动, 为了消除信号抖动对后续的干涉条纹整数计数和相位测量的影响, 在 FPGA 中利用 CIC 数字滤波算法分别对采样得到的三路信号  $Data_0$ 、 $Data_1$  和  $Data_2$  进行平滑滤波。

测量镜  $M_2$  运动时,  $V(\lambda_{u||})$  相位差为  $90^\circ$  的两路干涉信号相位变化关系如图4所示。图4(a)中, 粗实线表示  $M_2$  运动时的正弦信号  $V(\lambda_{u||\_sin})$ , 细实线表示  $M_2$  正向运动时的余弦信号  $V(\lambda_{u||\_cos})$ , 虚线表示  $M_2$  反向运动时的余弦信号  $V(\lambda_{u||\_cos})$ 。干涉信号经 A/D 转换后得到的数据为有符号型整数, 采样数据大于等于 0 时整形输出为 1, 采样数据小于 0 时整形输出为 0, 从而在 FPGA 内部通过软件将  $V(\lambda_{u||\_sin})$  和  $V(\lambda_{u||\_cos})$  整形为方波, 分别用状态量  $i$  和  $j$  表示。因此在一个干涉条纹周期内, 状态量  $(i, j)$  有四种组合, 即 00、01、10、11。如图4(b)所示, 如果状态量  $(i, j)$  按照

01—00—10—11—01 规律变化, 则表明测量镜  $M_2$  正向运动, 状态量每变化一次, 计数器加 1; 反之如果状态量  $(i, j)$  按照 00—01—11—10—00 规律变化, 则表明测量镜  $M_2$  反向运动, 状态量每变化一次, 计数器减 1。干涉条纹整周期数  $N$  为计数器值除以 4 取整。



(a)  $M_2$ 运动时  $V(\lambda_{u||})$  两路干涉信号波形图



(b) 干涉信号状态变化与双向计数关系示意图

图4 整周期干涉条纹计数示意图

根据式(4),通过检测两路信号  $Data_0$  和  $Data_1$  的相位差计算干涉信号  $V(\lambda_{x\parallel})$  的小数条纹  $\epsilon$ 。由于图1中两套干涉仪都是单频迈克尔逊干涉仪,在参考镜  $M_1$  静止不动时,两路干涉信号均为直流信号,为了测得两路干涉信号相位差,通过PZT驱动器调制参考镜  $M_1$  在  $12\ \mu\text{m}$  范围内往返运动,从而将直流干涉信号调制为图2所示的交流干涉信号。FPGA判断并计算出两路干涉信号相邻正向过零点之间的AD采样点数  $n$ ,同时计算出  $V(\lambda_{u\parallel})$  一个周期内的采样点数  $N_r$ ,根据  $\Delta\varphi = n/N_r \times 360^\circ$  计算出两路干涉信号之间的相位差。

基于 Visual Basic(VB) 程序设计的上位机波长测量软件流程如图5所示。波长测量过程中,测量镜  $M_2$  运动时,测得  $V(\lambda_{x\parallel})$  干涉条纹变化的整周期数,测量镜  $M_2$  运动前后,PC机通过VB程序调制参考镜  $M_1$  测量干涉信号的小数部分  $\epsilon$ ;最后,根据FPGA经串行通信模块上传的整小数干涉条纹计数结果计算出被测激光波长。

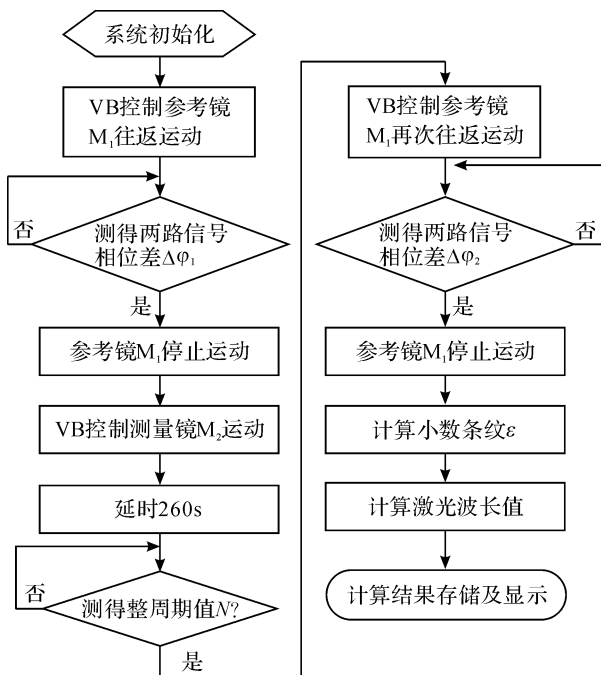


图5 波长测量上位机软件流程

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 波长测量实验

为了验证提出的激光波长直接测量方法的可行性,根据图1搭建了实验平台。如图6所示,激光器采用 Renishaw 公司生产的 ML-10 He-Ne 激光器,其波长值为  $632.992027\ \text{nm}$ ;参考镜  $M_1$  选用德国 PI 公司生产的纳米定位平台 P-752.1CD 驱动,运动范围为  $15\ \mu\text{m}$ ,分辨率为  $0.1\ \text{nm}$ ;测量镜  $M_2$  的运动由 PI 公司生产的 M531. CD 直线位移工作台驱动,运动范围为  $300\ \text{mm}$ ,测量镜位移由 Aglient

5519A 干涉仪提供,5519A 干涉仪的测量分辨率为  $10\ \text{nm}$ ;采用 Altera 的 EP4CE6F17C8 FPGA 开发板,用于测量镜  $M_2$  运动时  $V(\lambda_{x\parallel})$  干涉条纹的整周期计数和参考镜调制时  $V(\lambda_{u\parallel})$  和  $V(\lambda_{u\parallel})$  两路干涉信号的相位差测量。

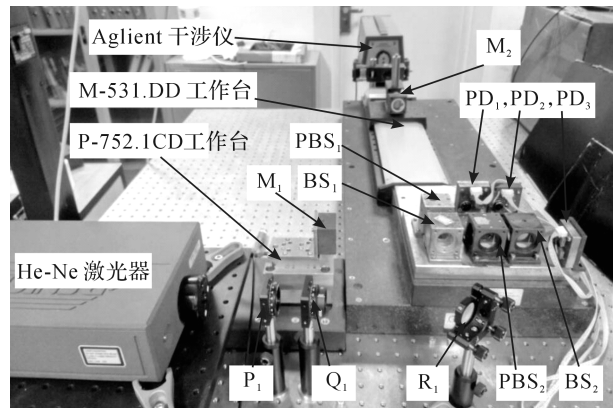


图6 实验装置照片

实验开始时,测量镜  $M_2$  静止不动,通过 PZT 驱动器调制参考镜  $M_1$  在  $12\ \mu\text{m}$  范围内往返运动,  $M_1$  运动速度为  $200\ \mu\text{m/s}$ ,测得  $V(\lambda_{u\parallel})$  和  $V(\lambda_{u\parallel})$  两路干涉信号的初始相位差为  $\Delta\varphi_{11}$ ;然后测量镜  $M_2$  运动位移  $250\ \text{mm}$ ,测得  $V(\lambda_{u\parallel})$  干涉条纹变化的整周期值  $N$ ;  $M_2$  停止运动后,再次通过 PZT 调制参考镜  $M_1$ ,测得两路干涉信号的相位差  $\Delta\varphi_{22}$ 。在此过程中,  $M_2$  的运动位移  $\Delta L$  的准确值由 Aglient 5519A 干涉仪测得,同时环境空气折射率  $n_{\text{air}}$  也由 Aglient 5519A 干涉仪的折射率补偿单元测得。将测得的  $\Delta\varphi_{11}$ 、 $\Delta\varphi_{22}$ 、 $N$ 、 $\Delta L$  和  $n_{\text{air}}$  代入式(4)和(6),可计算出被测激光的真空波长值。按以上实验步骤进行了 30 次重复性实验,共测得 30 组激光真空波长值,波长测量结果如图7所示。30 组重复性实验测得激光波长的平均值为  $632.991754\ \text{nm}$ ,测量误差小于  $0.27\ \text{pm}$ ,测量不确定度达到  $4.5 \times 10^{-7}$ 。

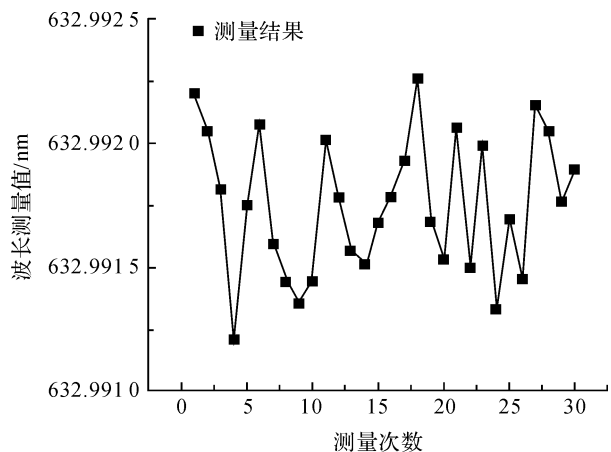


图7 ML-10 激光器波长测量结果



### 3.2 测量不确定性分析

根据式(6)可知,被测激光波长测量相对不确定度为:

$$\frac{u(\lambda_{uv})}{\lambda_{uv}} = \sqrt{\left(\frac{u(\Delta L)}{\Delta L}\right)^2 + \left(\frac{u(n_{air})}{n_{air}}\right)^2 + \left(\frac{u(N+\epsilon)}{N+\epsilon}\right)^2} \quad (7)$$

其中: $u(\Delta L)$ 为测量镜  $M_2$  运动位移  $\Delta L$  的不确定度, $u(n_{air})$ 为空气折射率的测量不确定度, $u(N+\epsilon)$ 为干涉条纹整小数计数测量不确定度。

在实验中,Aglient 5519A 干涉仪位移测量分辨率为  $u(\Delta L) = 10 \text{ nm}$ ,Aglient 5519A 折射率补偿单元测量不确定度  $u(n_{air}) = 5 \times 10^{-7}$ 。测量镜  $M_2$  运动位移  $\Delta L = 250 \text{ mm}$  时, $u(\Delta L)/\Delta L = 4.0 \times 10^{-8}$ ,当激光器的真空波长  $\lambda = 632.992027 \text{ nm}$ ,干涉条纹整数计数值  $N$  为 790138,PZT 驱动器调制参考镜  $M_1$  运动时,相位差测量不确定度为  $0.87^\circ$ ,则  $u(\epsilon) = 0.015$ ,由于干涉条纹整周期计数  $N$  不存在误差,因此  $u(N+\epsilon) = u(\epsilon) = 0.015$ 。将上述参数代入式(7),可得被测激光波长的相对不确定度为  $u(\lambda_{uv})/\lambda_{uv} = 5.0 \times 10^{-7}$ ,该分析结果与波长测量结果基本一致。

此外,从上述分析可以看出,被测波长的测量不确定度主要取决于空气折射率的测量不确定度  $u(n_{air})$ 。当被测波长在  $400 \sim 1100 \text{ nm}$  范围内变化时, $u(n_{air})$ 的值和  $u(\epsilon)$ 与被测波长无关,基本保持不变。如果测量镜  $M_2$  运动位移  $\Delta L$  仍为  $250 \text{ mm}$ , $u(\Delta L)/\Delta L$ 也保持不变,此时干涉条纹整数计数值  $N$  的变化范围是  $454545 \sim 125000$ ,则式(7)中  $u(N+\epsilon)/N$ 为  $1.2 \times 10^{-8} \sim 3.3 \times 10^{-8}$ 。波长测量相对不确定度仍为  $u(\lambda_{xy})/\lambda_{xy} = 5.0 \times 10^{-7}$ 。因此,本文提出的波长测量方法能实现激光波长的大范围高精度连续直接测量。

## 4 结 语

本文提出了一种基于单频正交线偏振光的激光波长直接测量方法,在光路中构建了两套迈克尔逊干涉仪,通过压电陶瓷驱动器调制两套干涉仪的参考镜,将对未知波长的测量转化为干涉条纹信号整周期计数和干涉信号相位差的测量。采用 Altera 的 EP4CE6F17C8 FPGA 实现对干涉信号 A/D 采样、滤波、整形、整周期计算和相位差计算,并结合 Agilent 5519A 干涉仪测得的测量镜移动距离及空气折射率值,计算出被测激光器波长。对 He-Ne 激光器波长测量实验结果表明,激光器波长测量误差小于  $0.27 \text{ pm}$ ,测量不确定度达到  $4.5 \times 10^{-7}$ 。

## 参考文献:

- [1] DOBOSZ M, KO Ź UCHOWSKI M. Frequency stabilization of a laser diode by means of an optical wedge etalon [J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(3): 35202-35210.
- [2] VOIGT D, ELLIS J D, VERLAAN A L, et al. Toward interferometry for dimensional drift measurements with nanometer uncertainty [J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(9): 1083-1086.
- [3] QUINN T J. Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards(2001)[J]. Metrologia, 2003, 40(2): 103-133.
- [4] 陈本永,杨万福,严利平.激光频率(波长)测量技术研究现状及发展[J].激光杂志, 2009, 30(2): 1-3.
- [5] PARKER T R, FARHADIROUSHAN M. Femtometer resolution optical wavelength meter [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(4): 347-349.
- [6] 陆宏,姜玲珍,耿完桢,等.利用 F-P 标准具实时测量激光波长的研究[J].激光技术, 1996, 20(3): 144-146.
- [7] 彭月祥,王利强,宁可庆.单片机控制的高精度 Michelson 干涉型波长计[J].纳米技术与精密工程, 2007, 5(2): 153-156.
- [8] WAKIM M, TOPCU S, CHASSAGNE L, et al. Highly accurate laser wavelength meter based on Doppler effect [J]. Optics Communications, 2006, 262(1): 97-102.
- [9] HUSSEIN H, SOBEE M A, AMER M. Calibration of a Michelson-type laser wavemeter and evaluation of its accuracy[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(3): 393-397.
- [10] DIZ-BUGARIN J, OUTUMURO-GONZALEZ I, et al. Design of a new microcontroller-based vernier fringe counter for interferometric measurement of laser wavelength[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 65(2): 1-6.
- [11] YAN L P, CHEN B Y, YANG W F, et al. A novel laser wavelength meter based on the measurement of synthetic wavelength [J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(11): 115104.
- [12] YAN L P, CHEN B Y, ZHANG S H, et al. Laser wavelength precision measurement based on a laser synthetic wavelength interferometer [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(8): 3318-4290.
- [13] 张岑.激光合成波长干涉波长测量系统设计[D].杭州:浙江理工大学, 2015: 13-26.
- [14] VOLKOV S Y, PEPLIPENKO V I, SMIRNOV V. Computer-controlled laser radiation wavelength meter

based on the Fizeau interferometer[J]. Soviet Journal of Quantum Electronics, 1982, 12(3): 380-381.

[15] 宋建明, 是度芳. 利用斐索干涉测量激光波长[J]. 量子电子学报, 2001, 8(3): 224-227.

## Laser Wavelength Direct Measurement Method Based on the Single Frequency Orthogonal Polarized Lights

YAN Liping, LIU Pengpeng, XIE Jiandong, CHEN Benyong

(Nanometer Measurement Laboratory, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 31001, China)

**Abstract:** A laser wavelength direct measurement method based on the single frequency orthogonal polarized lights is proposed in this paper. The unknown laser wavelength is achieved by counting the integral fringes and determining the phase difference of two interference signals. Without using a reference laser, the proposed method is able to measure laser wavelength directly with a high accuracy in a wide range. Signal processing method for interference fringe counting is designed based on FPGA. The experimental result of He-Ne laser shows that the wavelength measurement error is less than 0.27 pm and the relative measurement uncertainty is  $4.5 \times 10^{-7}$ . Therefore, the feasibility of the proposed laser wavelength direct measurement and the effectiveness of signal processing method are verified

**Key words:** laser wavelength measurement; interferometer; phase difference determination; FPGA

(责任编辑: 康 锋)