

# 激光与光电子学进展

## 基于激光单频干涉和 PTF 传感融合的空气折射率测量方法

严利平, 蒋剑波, 楼盈天, 陈本永\*, 谢建东

浙江理工大学纳米测量技术实验室, 浙江 杭州 310018

**摘要** 针对空气折射率测量中 Edlén 公式法测量精度受限于传感器精度, 以及固定长度真空腔的激光干涉法条纹整周期难以确定的问题, 提出了一种融合激光单频干涉和 PTF 传感的空气折射率测量方法。设计了基于固定长度单真空腔的正弦相位调制激光干涉空气折射率测量光路。利用低精度传感器获得的空气折射率预测值来确定干涉条纹整数, 采用 PGC-Arctan 算法精确解调干涉信号相位来获得小数干涉条纹, 实现空气折射率的大范围高精度实时测量。搭建了实验装置, 开展了与 Edlén 公式法的空气折射率测量比对实验。实验结果显示, 在 12 min 和 1 h 内, 两种方法测得结果具有较好的一致性, 两者偏差的标准偏差分别为  $1.5 \times 10^{-8}$  和  $2.3 \times 10^{-8}$ , 表明本文方法可应用于激光干涉精密位移测量中空气折射率的实时补偿。

**关键词** 测量; 空气折射率测量; 激光单频干涉; Edlén 公式法; 正弦相位调制

中图分类号 TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220579

### Measurement of Air Refractive Index Method by Combining Laser Single-Frequency Interferometry with PTF Sensing

Yan Liping, Jiang Jianbo, Lou Yingtian, Chen Benyong\*, Xie Jiandong

Laboratory of Nanometer Measurement Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China

**Abstract** Aiming at the issue that the air refractive index measurement accuracy with the Edlén equation is limited by the sensors' accuracies and the integral interference fringe number is difficult to determine using laser interferometry with a length fixed vacuum cavity, an air refractive index measurement method combining laser single-frequency interferometry and PTF sensing is proposed. We design a sinusoidal phase modulated laser single-frequency interferometer with one length-fixed vacuum cavity for measuring the air refractive index. A pre-estimated value of air refractive index is obtained to determine the integral interference fringe number using the environmental parameters obtained by the low precision sensors. Then, the PGC-Arctan algorithm is adopted to accurately demodulate the phase of the interference signal to obtain the fractional interference fringe. Therefore, real-time large-range and high-accuracy measurements of air refractive index can be realized. The experimental setup is built, and the measurement results of the proposed method are compared with the findings of the Edlén equation. The experimental findings show that the measurement results of the two methods are in good agreement. The standard deviations of the differences between the measurement results of the two methods in 12 min and 1 h are  $1.5 \times 10^{-8}$  and  $2.3 \times 10^{-8}$ , respectively. Experimental results indicate that the proposed method can be applied to the real-time compensation of air refractive index in laser interferometric precision displacement measurement.

**Key words** measurement; air refractive index measurement; laser single-frequency interferometer; Edlén equation; sinusoidal phase modulation

收稿日期: 2021-12-18; 修回日期: 2022-01-18; 录用日期: 2022-01-21; 网络首发日期: 2022-02-01

基金项目: 国家自然科学基金(51875530)、浙江省自然科学基金(LZ18E050003)、教育部长江学者和创新团队计划(IRT17R98)

通信作者: \*chenby@zstu.edu.cn

## 1 引言

以激光波长为长度基准的激光干涉位移测量技术具有测量范围大、测量精度高和可溯源等优点,在超精密加工、微电子制造和精密位移传感等领域应用广泛<sup>[1-4]</sup>。由于激光干涉位移测量大都在空气中进行,而激光在空气中的波长值与空气折射率密切相关( $\lambda_a = \lambda_v / n_a$ ,  $\lambda_a$ 为空气中的波长,  $\lambda_v$ 为真空波长,  $n_a$ 为空气折射率),因此,空气折射率的准确测量是提高激光干涉仪位移测量精度的关键因素<sup>[5-7]</sup>。

通常,空气折射率测量主要分为间接测量法和直接测量法。间接测量法又称为 PTF 法,该方法是在光路中布置高精度环境参数传感器,测得空气的压力( $P$ )、温度( $T$ )和相对湿度( $F$ )后,利用 Edlén 公式计算空气折射率。Edlén 公式自 1966 年提出以来,经过不断地修正完善,其不确定度可达  $1.7 \times 10^{-8}$ <sup>[8-13]</sup>,该公式适用于一般大气环境下可见光波段激光波长的空气折射率计算。然而,受限于 PTF 传感器精度和 Edlén 公式自身不确定度,Edlén 公式计算的空气折射率精度通常在  $10^{-7} \sim 10^{-8}$  量级。此外,PTF 传感器是点位测量,难以获得沿整个干涉测量光路的环境参数分布。

空气折射率直接测量法又称为空气折射率计,该方法通常采用激光干涉技术检测光束经过真空路径和空气路径的光程差来获得空气折射率,主要包括抽气法和封闭真空腔法。抽气法对固定长度真空腔进行抽气或充气,记录腔内交替产生真空和大气条件时的干涉相位变化,根据式  $2L \cdot (n_a - 1) = \Delta\varphi \cdot \lambda$ ,求得空气折射率( $L$ 为真空腔长度,  $\Delta\varphi$ 为干涉相位变化量)<sup>[14-17]</sup>。Birch 等<sup>[14]</sup>设计的双共光路空气折射率计,对于干燥空气折射率的测量结果与 Edlén 公式计算值的差异为  $\pm 3.2 \times 10^{-8}$ 。Schellekens 等<sup>[15]</sup>将研制的空气折射率计与英国、德国、荷兰三个国家计量机构的折射率计进行了比对,4套系统的空气折射率测量一致性优于  $5 \times 10^{-8}$ 。在这种测量方法中,抽气或充气过程中腔内温度和气压的急剧非均匀性变化、真空腔的变形及振动将导致干涉信号的失真且引入较大的噪声,从而限制了相位解调精度和空气折射率测量精度的提高。封闭真空腔法采用一个或多个真空腔,比较光束通过真空腔内外光路或通过不同长度真空腔光路的干涉相位变化来测得空气折射率<sup>[18-24]</sup>。基于单个真空腔, Yang 等<sup>[18]</sup>采用色散干涉技术实现了  $1.000008 \sim 1.022$  范围内  $1563 \text{ nm}$  飞秒光频梳的群折射率测量。陈强华等<sup>[19]</sup>采用长度不同的两个真空腔构建等效合成波长,在空气折射率变化范围不超过  $3 \times 10^{-5}$  时,测量结果与 Edlén 公式计算值的差异优于  $5 \times 10^{-8}$ 。Huang 等<sup>[20-21]</sup>采用三个特定长度真空腔,空气折射率测量范围扩大到  $3.1 \times 10^{-4}$ ,测量不确定度达  $2.9 \times 10^{-8}$ 。现有单根或多根封闭真空腔的方法,虽然避免了抽气过程的影

响,但是由于无法直接测得真空腔内外光程差对应的整周期干涉条纹数,仅能实现一定范围内的空气折射率测量,而且多个真空腔之间的平行误差会引入额外的测量误差。此外,现有空气折射率计大多采用激光外差干涉测量技术,其较大的相位解调非线性误差限制了空气折射率测量精度的提高。

本课题组在前期工作中,结合激光合成波长干涉法和 Edlén 公式法,将两个不同长度的真空腔交替放置于测量光路,构建测量光束经过不同真空光路的光程差,用低精度 PTF 传感获得的低精度空气折射率预测值来确定该光程差对应的干涉条纹整周期数,再利用合成波长干涉法精确测得小数干涉相位,短时间内和长时间内空气折射率测量精度分别为  $2.5 \times 10^{-8}$  和  $6.2 \times 10^{-8}$ ,但是由于需要检测参考镜运动时的两次同时过零位置来获得小数干涉相位,单次测量需要  $2 \sim 3 \text{ min}$ ,空气折射率测量实时性不够好<sup>[22]</sup>。

本文提出一种基于 PTF 传感和激光单频干涉融合的空气折射率测量方法,采用单根真空腔,在干涉仪的测量臂同时构建了经过真空腔内部光路和外部光路的两束测量光束,测得这两束测量光束的干涉信号相位差即可获得真空腔内外光程差对应的小数干涉相位,同时采用正弦相位调制 PGC-Arctan 解调方法,实现干涉相位的实时高精度解调,从而实现空气折射率的实时测量。

## 2 基于 PTF 传感和激光单频干涉融合的空气折射率测量

### 2.1 相位调制激光单频干涉空气折射率测量原理

相位调制激光单频干涉空气折射率测量原理框图如图 1 所示。稳频激光器发出真空波长为  $\lambda$  的椭圆偏振光,通过偏振片  $P_1$  调整为  $45^\circ$  线偏振光后经分束器  $BS_1$  分成两束:反射光束经过偏振分束器  $PBS_1$ 、平面反射镜  $R_1$  后分为偏振方向正交的两束平行光①和②,分别通过真空腔内外光路到达角锥棱镜  $M_2$ ,  $M_2$  反射回的两平行光束经平面反射镜  $R_2$  和偏振分束器  $PBS_2$  后重新合为一束  $45^\circ$  线偏振光;透射光束经  $1/2$  波片 HWP 后调制为 S 偏振方向线偏振光,经电光相位调制器(EOM)进行相位调制,经过角锥棱镜  $M_1$  反射后再通过偏振片  $P_2$  调制为  $45^\circ$  线偏振光。两路  $45^\circ$  线偏光在  $BS_1$  处会合后产生干涉,经偏振分束器  $PBS_3$  分光后, S 偏振方向和 P 偏振方向的干涉信号分别由光电探测器  $PD_1$  与  $PD_2$  检测,从而得到经过真空腔内外光路的干涉信号。

在图 1 所示光路中,经过真空腔内真空光路的测量光束①和经过真空腔外空气光路的参考光束②分别构成了测量干涉仪和参考干涉仪,EOM 对两干涉仪的公共参考臂  $BS_1$ - $M_1$  之间的光程进行相位调制。空气折射率测量过程中,直流电机将安装在线性导轨上的真空腔平行移入两干涉仪的  $BS_1$ - $M_2$  之间测量臂。现

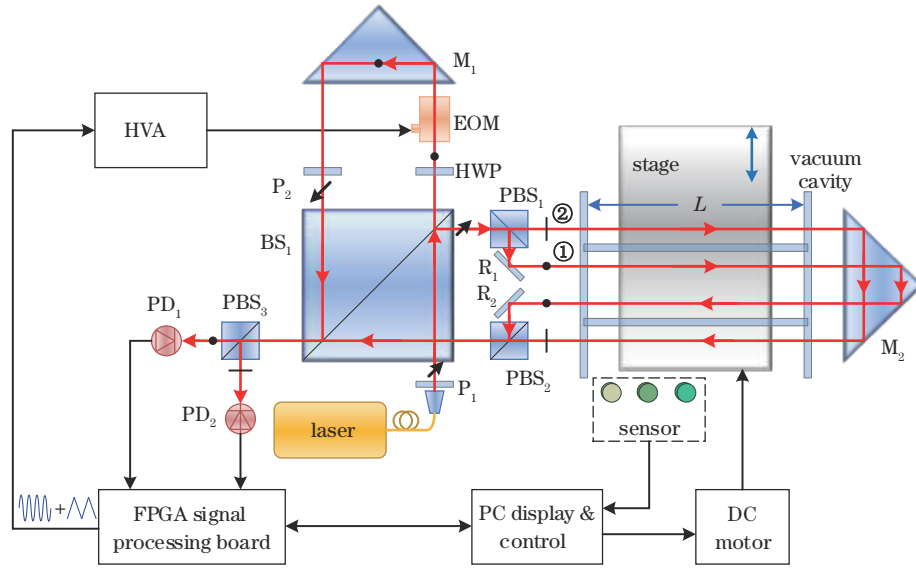


图 1 相位调制激光单频干涉空气折射率测量原理框图

Fig. 1 Schematic of air refractive index measurement with phase modulated laser single-frequency interferometer

场可编程逻辑门阵列(FPGA)信号处理板通过数/模(D/A)模块输出模拟调制信号,经高压放大器放大后对EOM进行调制,同时通过模/数(A/D)模块采集两路干涉信号,利用相位载波生成(PGC)算法解调其相位。低精度环境参数传感器置于真空腔附近,计算机根据环境参数测量结果和两路干涉信号相位解调结果计算空气折射率值。

如图 1 所示,真空腔移入测量臂之前,记两干涉仪参考臂和测量臂之间的初始光程差分别为  $L_1$  和  $L_2$ ,则两路干涉信号初始相位差为

$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} L_2 - \frac{2\pi}{\lambda} L_1, \quad (1)$$

式中:  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  表示参考干涉仪和测量干涉仪的初始相位;  $\varphi$  为两干涉仪的初始相位差。

长度为  $L$  的真空腔平行移入两干涉仪的公共测量臂后,光束①和②穿过真空腔两端透光窗片后分别经过真空光路和空气光路,两干涉仪的光程差变为  $L_1 + (n_g - n_a) \cdot 4D + (n_v - n_a) \cdot 2L$  和  $L_2 + (n_g - n_a) \cdot 4D$ ,  $n_g$  为真空腔两端透光窗片折射率,  $n_a$  为真空腔外的待测空气折射率,  $n_v$  为真空腔内的真空折射率且  $n_v = 1$ ,  $D$  为透光窗片厚度,则两干涉仪的相位差变为

$$\begin{aligned} \varphi' = \varphi'_2 - \varphi'_1 &= \frac{2\pi}{\lambda} [L_2 + (n_g - n_a) \cdot 4D] - \\ &\frac{2\pi}{\lambda} [L_1 + (n_g - n_a) \cdot 4D + (n_v - n_a) \cdot 2L] = \\ &\frac{2\pi}{\lambda} (L_2 - L_1) + \frac{2\pi}{\lambda} (n_a - 1) \cdot 2L. \end{aligned} \quad (2)$$

比较式(1)和(2)可知,真空腔移入测量臂前后,参考干涉仪和测量干涉仪的相位差变化量  $\Delta\varphi$  可表示为

$$\Delta\varphi = \varphi' - \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_a - 1) \cdot 2L = 2\pi \cdot (N + \epsilon). \quad (3)$$

从式(3)可以看出,  $\Delta\varphi$  包含  $2\pi$  的整周期相位( $N$ )

和不足  $2\pi$  的小数相位( $\epsilon$ )。其中,小数相位  $\epsilon$  通过 PGC-Arctan 算法解调两干涉仪的相位  $\varphi_j (j=1, 2)$  来确定,而相位整周期数  $N$  则是通过 PTF 传感预测的空气折射率  $n_{ac}$  来计算。

## 2.2 混合相位调制激光单频干涉相位解调

在图 1 所示光路中,FPGA 信号处理单板输出正弦波与三角波混合调制信号,经高压放大器放大后对两套干涉仪进行相位调制,两个探测器  $PD_1$  和  $PD_2$  获得的调制干涉信号  $S_j(t)$  表示为

$$\begin{aligned} S_j(t) &= S_{j0} + S_{j1} \cos \left[ \frac{A \cos(\omega_c t) + B \text{tri}(\omega_1 t)}{V_\pi} \pi + \varphi_j(t) \right] = \\ &S_{j0} + S_{j1} \cos [z \cos(\omega_c t) + \Phi_j(t)], \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $A$ 、 $B$  和  $\omega_c$ 、 $\omega_1$  分别表示正弦波和三角波的幅值及频率;  $V_\pi$  为 EOM 对应  $S$  偏振方向的半波电压;  $z = A\pi/V_\pi$  为相位调制深度;  $\varphi_j(t)$  表示干涉仪测量臂和参考臂的光程差引入的待测相位;  $\Phi_j(t) = \varphi_{in}(t) + \varphi_j(t)$  表示待解调相位;  $\varphi_{in}(t) = B \text{tri}(\omega_1 t) \pi / V_\pi$  为三角波调制引入的相位。

正弦调制信号的基频和二倍频信号与干涉信号  $S_j(t)$  相乘,经低通滤波后得到一对包含待解调相位信息  $\Phi_j(t)$  的正交信号,表示为

$$\begin{aligned} P_j(t) &= \text{LPF} [S_j(t) \cdot \cos \omega_c t] = \\ &X_j(t) \sin \Phi_j(t) + X_{0j}(t), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Q_j(t) &= \text{LPF} [S_j(t) \cdot \cos 2\omega_c t] = \\ &Y_j(t) \cos \Phi_j(t) + Y_{0j}(t), \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $\text{LPF}[\ ]$  表示低通滤波;  $X_j(t)$ 、 $Y_j(t)$  和  $X_{0j}(t)$ 、 $Y_{0j}(t)$  分别表示正交信号的幅值和偏置。

可以看出,受正弦相位调制深度波动、载波相位延迟和光强波动等因素的影响,  $P_j(t)$  和  $Q_j(t)$  的幅值和偏置都随时间变化。如果对  $P_j(t)$  和  $Q_j(t)$  直接进行



相除和反正切运算,解调所得相位  $\Phi_j(t)$  包含非线性误差。本文利用三角波调制构建干涉信号相位的连续变化,实施实时椭圆拟合<sup>[25]</sup>,计算和修正  $P_j(t)$  和  $Q_j(t)$  的幅值和偏置,表示为

$$P'_j(t) = [P_j(t) - X_{0j}(t)] / X_j(t) = \sin \Phi_j(t), \quad (7)$$

$$Q'_j(t) = [Q_j(t) - Y_{0j}(t)] / Y_j(t) = \cos \Phi_j(t). \quad (8)$$

进一步得到消除调制深度波动和载波相位延迟等因素影响的待解调相位,表示为

$$\Phi_j(t) = \arctan \left[ \frac{P'_j(t)}{Q'_j(t)} \right] = \arctan \left[ \frac{\sin \Phi_j(t)}{\cos \Phi_j(t)} \right]. \quad (9)$$

最后,对一个三角波周期内的  $\Phi_j(t)$  取滑动平均,

消除三角波调制引入的相位  $\varphi_{\text{in}}(t)$ , 获得干涉信号的光程差引入的待测相位  $\varphi_j(t)$ 。结合真空腔移入前后两干涉仪测得的相位值,得到小数相位,表示为

$$\epsilon = \frac{1}{2\pi} [(\varphi'_2 - \varphi_2) - (\varphi'_1 - \varphi_1)]. \quad (10)$$

因此,采用实时椭圆拟合修正的 PGC-Arctan 解调算法,可以补偿调制深度波动和载波相位延迟引入的非线性误差,实现干涉相位的精确解调。

### 2.3 基于 PTF 传感的整数干涉相位测量

根据 PTF 传感器获得的环境参数值,采用 Nsch 等<sup>[11]</sup>修正后的 Edlén 公式计算空气折射率预估值  $n_{\text{ae}}$ , 表示为

$$\begin{cases} (n_s - 1) \times 10^8 = 8091.37 + \frac{2333983}{130 - \sigma^2} + \frac{15518}{38.9 - \sigma^2} \\ (n_{\text{tp}} - 1) = \frac{(n_s - 1) \cdot p}{93214.60} \times \frac{[1 + 10^{-8}(0.5953 - 0.009876 \cdot t) \cdot p]}{1 + 0.0036610 \cdot t} \\ n_{\text{tpf}} - n_{\text{tp}} = -f \times [3.8020 - 0.0384 \cdot \sigma^2] \times 10^{-10} \end{cases}, \quad (11)$$

式中:  $\sigma$  为真空波数,单位为  $\mu\text{m}^{-1}$ ,  $\sigma = 1/\lambda$ ;  $t$  为环境温度,单位为  $^\circ\text{C}$ ;  $p$  为大气压强,单位为 Pa;  $f$  为水蒸气分压强,单位为 Pa;  $n_s$ 、 $n_{\text{tp}}$ 、 $n_{\text{tpf}}$  为分别表示  $\lambda$  在标准大气条件、在干燥空气中温度为  $t$  和压强为  $p$ 、在潮湿空气中水蒸气分压强为  $f$  的空气折射率。

根据式(3)获得空气折射率,当  $n_{\text{ae}}$  的不确定度  $u(n_{\text{ae}}) < \lambda/4L$  时,可以确定唯一的相位整周期数  $N$ , 表示为

$$N = \text{INT} \left[ \frac{2L(n_{\text{ae}} - 1)}{\lambda} \right], \quad (12)$$

式中: INT[] 表示向下取整。

对于真空波长  $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$  的光源,当真空腔长度  $L$  分别为 200 mm 和 100 mm 时,  $u(n_{\text{ae}})$  最大值分别为  $7.9 \times 10^{-7}$  和  $1.6 \times 10^{-6}$ 。

表 1 列出了在几种不同传感器精度下,Edlén 公式法得到的  $u(n_{\text{ae}})$ 。可以看出,如果采用 PTF 法测量空气折射率,  $n_{\text{ae}}$  精度要达到  $5.5 \times 10^{-8}$  量级,压强、温度和湿度传感器精度应分别为 10 Pa、 $0.05 \text{ }^\circ\text{C}$  和 1%,  $n_{\text{ae}}$  精度要达到  $2.1 \times 10^{-8}$  量级,传感器精度应提高到 5 Pa、 $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$  和 1%。这表明 PTF 法要实现高精度的空气折射率测量,对传感器的精度要求非常高。另一方面,如果只是采用 PTF 法预测精度为  $1.58 \times 10^{-6} \sim 7.91 \times 10^{-7}$  量级的空气折射率值,对传感器的精度要求就大大降低。比如,压强、温度和湿度传感器精度应分别为 200 Pa、 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 、5% 和 100 Pa、 $0.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 、5% 时,  $u(n_{\text{ae}})$  也不会超过  $7.1 \times 10^{-7}$ , 完全满足  $L = 200 \text{ mm}$  时确定整周期数  $N$  的要求。

最后,将测得的  $N$  和  $\epsilon$  代入  $(n_a - 1) \cdot 2L = \lambda \cdot (N + \epsilon)$ , 得到融合 PTF 法和干涉法的空气折射率测量结果,表示为

表 1 不同传感器精度下空气折射率的不确定度  $u(n_{\text{ae}})$   
Table 1 Uncertainties of air refractive index  $u(n_{\text{ae}})$  with different sensor accuracies

No.	Uncertainties of environmental parameters			Uncertainty of $u(n_{\text{ae}})$ with Edlén equation
	Pressure / Pa	Temperature / $^\circ\text{C}$	Relative humidity / %	
1	5	0.01	1	$2.1 \times 10^{-8}$
2	10	0.05	1	$5.5 \times 10^{-8}$
3	50	0.50	5	$4.8 \times 10^{-7}$
4	100	0.50	5	$5.4 \times 10^{-7}$
5	200	0.50	5	$7.1 \times 10^{-7}$
6	100	0.70	5	$7.0 \times 10^{-7}$
7	150	0.30	5	$4.9 \times 10^{-7}$

$$n_a = 1 + \frac{\lambda}{2L} \cdot (N + \epsilon). \quad (13)$$

## 3 实验与结果分析

为了验证本文提出的基于激光单频干涉和 PTF 传感融合的空气折射率测量方法的有效性和可行性,搭建了如图 2 所示的实验装置。激光光源为可调谐半导体激光器(DLpro 633 ECDL, Toptica, 日本),该激光器通过光锁相环技术锁至碘稳频激光器<sup>[26]</sup>,锁定后真空波长为  $\lambda = 632.9910907 \text{ nm}$ 。真空腔长度为 200.18 mm,直径为 20 mm,其两端透光窗为直径 50 mm 镀有 633 nm 增透膜的 N-BK7 窗片,真空腔置于行程为 100 mm 的线性导轨滑块上(GCD-040101M, 大恒光电,北京)。采用压强、温度和湿度精度分别为 200 Pa、 $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、5% 的自制低精度 PTF 传感器进行空

气折射率初测,如表 2 所示,PTF 法初测的空气折射率精度为  $4.9 \times 10^{-7}$ ,能够确定唯一的整周期数  $N$ 。信号处理采用 RedPitaya 开发板,搭载 ZYNQ-XC7Z010 FPGA 高性能芯片和 Cortex A9 ARM 处理器,配有双通道 14 位 A/D 和双通道 14 位 D/A 模块,D/A 输出  $\omega_c=244$  kHz 和  $\omega_i=59.6$  Hz 的混合调制信号经两级放大后,对宽带 EOM(EO-PM-NR-CI, Thorlabs, 美国)进行相位调制,正弦相位调制深度约为 2.3 rad,三

角波调制产生约  $0^\circ \sim 270^\circ$  范围内的连续相位变化以实现椭圆拟合。此外,空气折射率补偿单元(XC-80, Renishaw, 英国)放置在真空腔附近记录环境压强、温度和湿度参数,该补偿单元测得的环境参数用于 Edlén 公式计算空气折射率值,折射率不确定度优于  $4.6 \times 10^{-8}$ 。整个实验装置由一个铝合金外罩覆盖,避免空气局部湍流对折射率测量的影响。

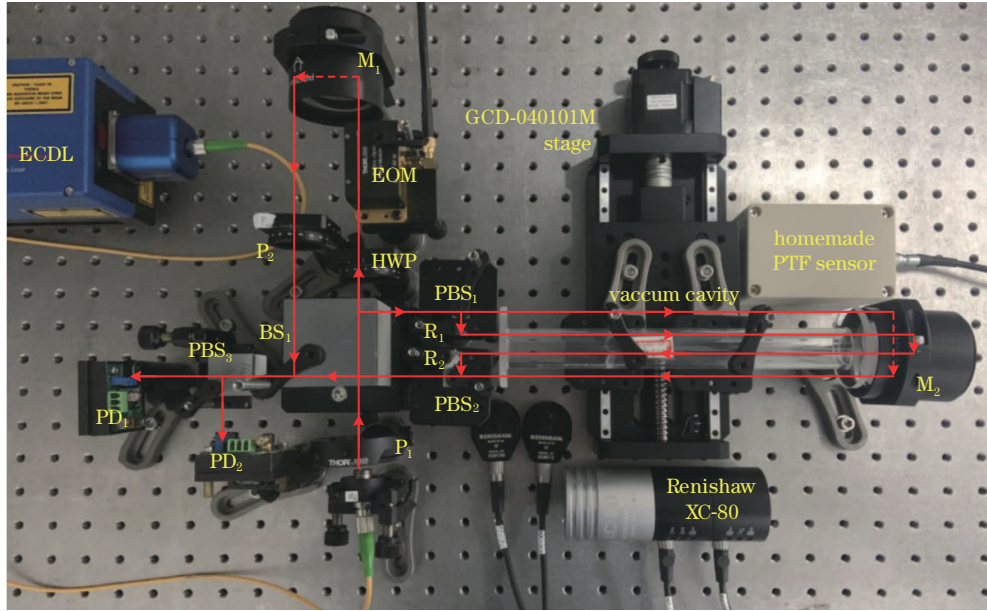


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup

### 3.1 空气折射率测量过程

根据前文所述的测量原理和图 2 所示的实验装置,开展了 12 min 和 1 h 的空气折射率测量对比实验,实验步骤如下:

1) 真空腔置于空气折射率测量光路之外,自制 PTF 传感器记录环境参数值并计算空气折射率预测值  $n_{ac}$ ,PGC 解调获得两路干涉信号初始相位分别为  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$ 。

2) 线性导轨将真空腔移入测量光路,真空腔到达合适位置且系统稳定后,记录两路干涉信号相位  $\varphi'_1$  和  $\varphi'_2$ ,记录 XC-80 传感器测得的温度、湿度和压强值。

3) 真空腔始终置于测量光路,每隔 2 s 记录一次干涉信号相位值  $\varphi'_1$ 、 $\varphi'_2$  和环境参数测量结果。

4) 根据式 (12) 和初始测得的预测值  $n_{ac}$ ,计算初始干涉条纹整数  $N$ ,同时根据实时测得的  $\varphi'_1$ 、 $\varphi'_2$  和初始记录的  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ ,利用式 (10) 计算实时干涉条纹小数相位  $\epsilon$ 。

5) 将  $N$  和  $\epsilon$  代入式 (13),得到空气折射率实时测量结果  $n_a$ ,并将其与 Edlén 公式法计算的结果进行比较。

### 3.2 空气折射率测量结果

图 3 是 12 min 空气折射率测量结果。根据折射率初测值  $n_{ac}$  算得干涉条纹整数  $N=170$ ,测量过程中,温度缓慢上升约  $0.04^\circ\text{C}$ ,大气压强波动为 20 Pa,相对湿度几乎不变。从图 3(a) 和 (b) 可以看出,干涉和 PTF 融合法测得的空气折射率  $n_a$  和 Edlén 公式计算结果  $n_e$  的变化趋势非常一致, $n_a - n_e$  的平均值约为  $1.9 \times 10^{-9}$ , $n_a - n_e$  的标准差为  $1.5 \times 10^{-8}$ 。从图 3(c) 和 (d) 可以看出,当压强不变、湿度变化较小时,小数相位  $\epsilon$  变化趋势和温度变化趋势正好相反。

图 4 是 1 h 左右空气折射率测量结果。根据折射率初测值  $n_{ac}$  算得干涉条纹整数  $N=167$ ,测量过程中,温度上升约  $0.59^\circ\text{C}$ ,大气压强下降 40 Pa,相对湿度变化约 2%。两种方法测量结果偏差  $n_a - n_e$  的平均值约为  $1.4 \times 10^{-8}$ , $n_a - n_e$  的标准差为  $2.3 \times 10^{-8}$ 。

根据式 (11) 可知,当真空波长  $\lambda=0.633 \mu\text{m}$  时,空气折射率对温度、压强和相对湿度的灵敏度系数分别为  $c_t=-9.2 \times 10^{-7}$ , $c_p=2.7 \times 10^{-9}$  和  $c_f=-8.6 \times 10^{-9}$ ,这表明温度和压强变化是影响空气折射率波动的主要因素。从图 3 和图 4 的测量结果可以看出,传感器分辨力有限且响应缓慢,测得的环境参数呈台阶式变化,尤

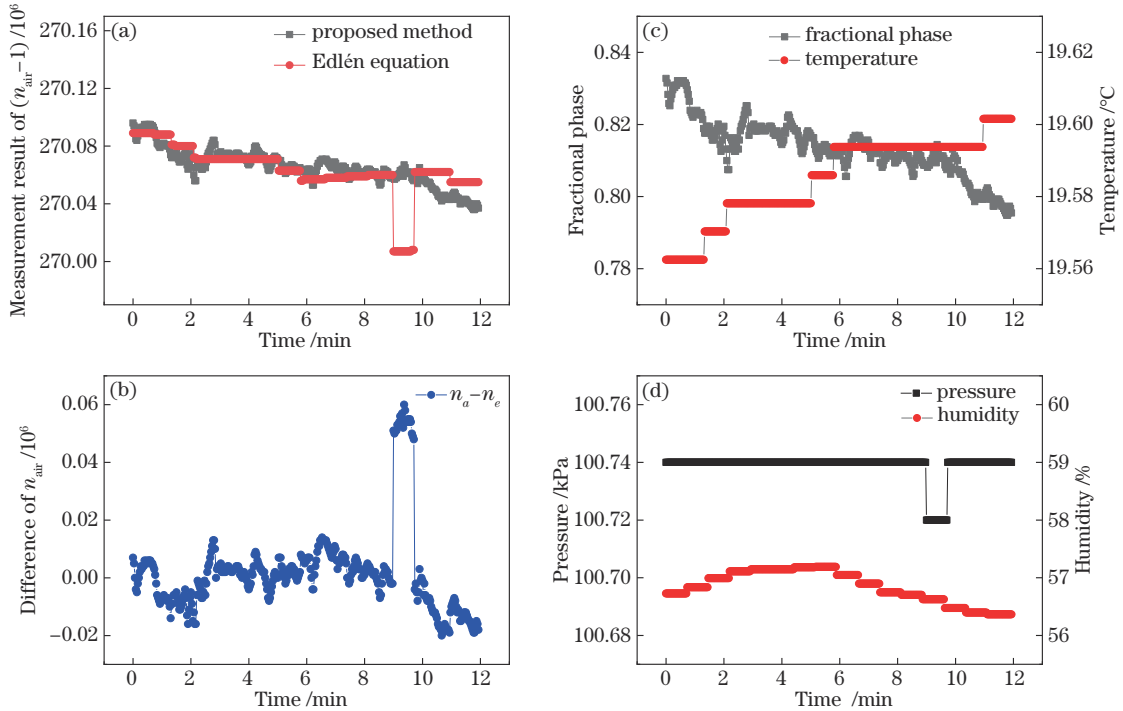


图 3 12 min 空气折射率测量和对比实验。(a) 两种方法  $n_{air}$  测量结果; (b) 两种方法  $n_{air}$  测量结果偏差; (c) 小数相位和环境温度; (d) 环境压强和湿度  
 Fig. 3 Air refractive index measurement and comparison experiment in 12 min. (a) Measurement results of  $n_{air}$  by two methods; (b) difference of  $n_{air}$  measured by two methods; (c) fractional phase and temperature data; (d) pressure and humidity data

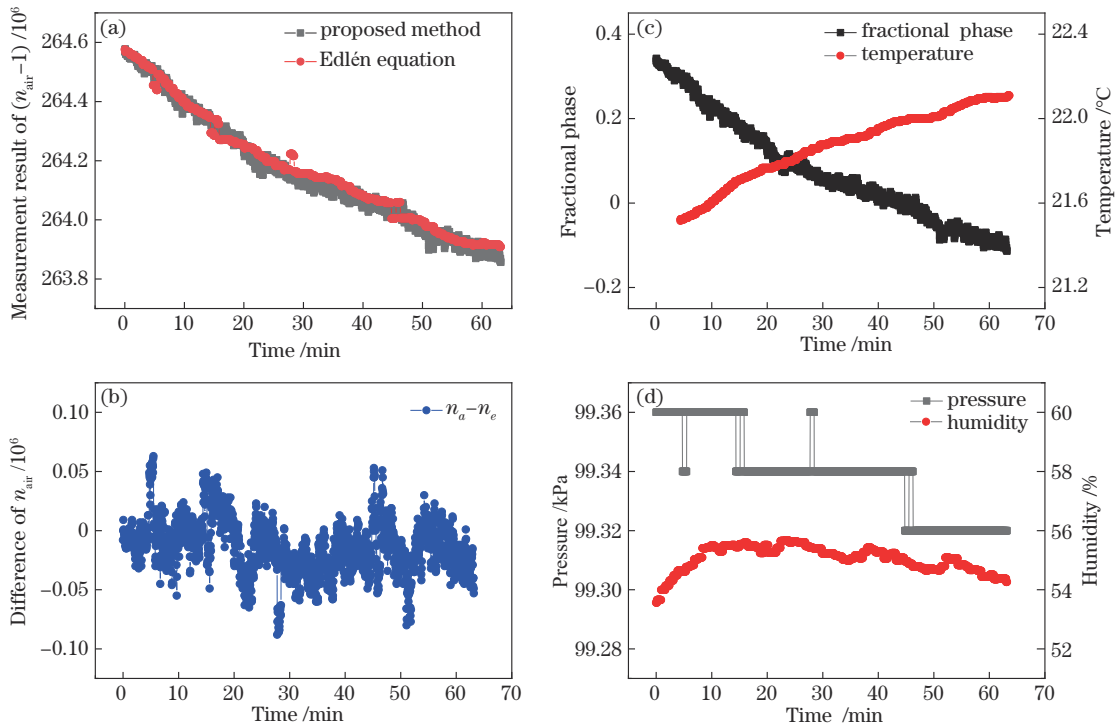


图 4 1 h 空气折射率测量和对比实验。(a) 两种方法  $n_{air}$  测量结果; (b) 两种方法  $n_{air}$  测量结果偏差; (c) 小数相位和环境温度; (d) 环境压强和湿度  
 Fig. 4 Air refractive index measurement and comparison experiment in 1 h. (a) Measurement results of  $n_{air}$  by two methods; (b) difference of  $n_{air}$  measured by two methods; (c) fractional phase and temperature data; (d) pressure and humidity data

其是压强波动高达 20 Pa, 导致 Edlén 公式计算的  $n_e$  会产生约  $5 \times 10^{-8}$  量级的突变, 而干涉法通过解调相位可

获得小数相位  $\epsilon$  的实时变化, 因此干涉和 PTF 融合法测得的空气折射率具有较好的实时性和连续性。



## 4 结 论

基于单根固定长度的真空腔,本文提出了一种融合激光单频干涉和 PTF 传感的空气折射率测量方法。利用低精度环境参数传感器和 Edlén 公式法测得精度为  $10^{-7}$  量级的空气折射率预测值,能准确确定真空腔内外光程差对应的整数干涉条纹,结合椭圆修正的 PGC-Arctan 算法精确解调干涉信号相位获得干涉条纹小数相位,非线性误差小,解调精度高,单次测量仅需 50 ms,从而可以实现大范围高精度空气折射率的实时测量。与 Edlén 公式法的空气折射率测量比对实验表明,在 12 min 和 1 h 的时间内,两种测量结果偏差的标准偏差分别为  $1.5 \times 10^{-8}$  和  $2.3 \times 10^{-8}$ 。本方法融合了 PTF 传感具有监测空气折射率大范围变化的能力和激光干涉法能精确跟踪空气折射率小范围波动的优点,可应用于激光干涉精密位移测量系统中对空气折射率进行实时修正。

### 参 考 文 献

- [1] 谈宜东, 徐欣, 张书练. 激光干涉精密测量与应用[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1504001.  
Tan Y D, Xu X, Zhang S L. Precision measurement and applications of laser interferometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1504001.
- [2] Gao W, Kim S W, Bosse H, et al. Measurement technologies for precision positioning[J]. CIRP Annals, 2015, 64(2): 773-796.
- [3] 孙朝明, 孙凯华, 葛继强. 超声换能器表面振动的激光干涉测量[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0904006.  
Sun C M, Sun K H, Ge J Q. Measurement of surface vibrations of ultrasonic transducers by laser interference method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0904006.
- [4] 盛启明, 郑刚, 张雄星, 等. 三通道调频连续波激光干涉位移测量系统[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0312004.  
Sheng Q M, Zheng G, Zhang X X, et al. Three-channel frequency-modulated continuous-wave laser interferometric displacement measurement system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0312004.
- [5] 池峰, 朱煜, 张志平, 等. 双频激光干涉测量中的环境补偿技术[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0408004.  
Chi F, Zhu Y, Zhang Z P, et al. Environment compensation technologies in dual-frequency laser interferometer measurement system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 0408004.
- [6] Jang Y S, Kim S W. Compensation of the refractive index of air in laser interferometer for distance measurement: a review[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2017, 18(12): 1881-1890.
- [7] 陈洪芳, 汤亮, 石照耀, 等. 基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪系统 ZEMAX 仿真方法[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0104009.  
Chen H F, Tang L, Shi Z Y, et al. ZEMAX simulation method of laser tracing system using a dual-wavelength method to compensate for the refractive index of air[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0104009.
- [8] Edlén B. The refractive index of air[J]. Metrologia, 1966, 2(2): 71-80.
- [9] Birch K P, Downs M J. Correction to the updated Edlén equation for the refractive index of air[J]. Metrologia, 2005, 31(4): 315-316.
- [10] Ciddor P E. Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared[J]. Applied Optics, 1996, 35(9): 1566-1573.
- [11] Nsch G B, Potulski E. Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén's formulae[J]. Metrologia, 1998, 35(2): 133-139.
- [12] 闵炳博, 严利平, 崔建军, 等. 高精度空气折射率测量系统设计与实现[J]. 计量学报, 2020, 41(11): 1332-1338.  
Min S B, Yan L P, Cui J J, et al. Design and implementation of high precision air refractive index measurement system[J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41(11): 1332-1338.
- [13] 吴炳阳, 于晋龙, 王菊, 等. 小型化空气折射率测量装置的精度修正[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 040102.  
Wu B Y, Yu J L, Wang J, et al. Accuracy correction of miniaturization device for air refractive index measurement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(4): 040102.
- [14] Birch K P, Downs M J. The results of a comparison between calculated and measured values of the refractive index of air[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1988, 21(7): 694-695.
- [15] Schellekens P, Wilkening G, Reinboth F, et al. Measurements of the refractive index of air using interference refractometers[J]. Metrologia, 1986, 22(4): 279-287.
- [16] Hou W, Thalmann R. Accurate measurement of the refractive index of air[J]. Measurement, 1994, 13(4): 307-314.
- [17] Kruger O, Chetty N. Robust air refractometer for accurate compensation of the refractive index of air in everyday use[J]. Applied Optics, 2016, 55(32): 9118-9122.
- [18] Yang L J, Zhang H Y, Li Y, et al. Absolute group refractive index measurement of air by dispersive interferometry using frequency comb[J]. Optics Express, 2015, 23(26): 33597-33607.
- [19] 陈强华, 闫聚群, 柳忠尧, 等. 基于等效合成波方法的双真空管空气折射率测量仪[J]. 计量学报, 2004(3): 203-206.  
Chen Q H, Yan J Q, Liu Z Y, et al. An air refractometer with dual vacuum chambers based on the method of equivalent synthetic wave[J]. Acta Metrologica Sinica, 2004(3): 203-206.
- [20] Huang P, Zhang J T, Li Y, et al. Note: real-time absolute air refractometer[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(5): 056107.
- [21] Zhang J T, Huang P, Li Y, et al. Design and

- performance of an absolute gas refractometer based on a synthetic pseudo-wavelength method[J]. Applied Optics, 2013, 52(16): 3671-3679.
- [22] Yan L P, Chen B Y, Zhang E Z, et al. Precision measurement of refractive index of air based on laser synthetic wavelength interferometry with Edlén equation estimation[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(8): 085111.
- [23] Chen B Y, Yang Y, Yan L P, et al. Precision measurement of the refractive index of air using a phase modulated homodyne interferometer with a variable length vacuum cavity[J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30(7): 075010.
- [24] 杨晔, 严利平, 陈本永, 等. 基于长度可变真空腔的激光干涉空气折射率测量误差分析与补偿[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 48-55.
- Yang Y, Yan L P, Chen B Y, et al. Analysis and compensation of the measurement error of air refractive index using a laser interferometer with a variable length vacuum cavity[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6): 48-55.
- [25] Yan L P, Chen Z Q, Chen B Y, et al. Precision PGC demodulation for homodyne interferometer modulated with a combined sinusoidal and triangular signal[J]. Optics Express, 2018, 26(4): 4818-4831.
- [26] Chen B Y, Wu K Y, Yan L P, et al. Stabilization of synthetic wavelength using offset-frequency locking for the measurement accuracy improvement of the laser synthetic wavelength interferometer[J]. Optical Engineering, 2018, 57(3): 034106.