

小型化空气折射率测量装置的精度修正

吴炳阳¹, 于晋龙¹, 王菊^{1*}, 王文睿²

¹天津大学电气自动化与信息工程学院光纤通信实验室, 天津 300072;

²浙江大学航空航天学院, 浙江 杭州 310058

摘要 基于 Edlen 公式法理论精度高的特点, 采用小型数字传感器测量温度、湿度、大气压等参数, 间接计算了空气折射率的值。针对传统方法精度不足的问题, 提出利用二等标准铂电阻温度计和气压传感器对数字传感器测量值进行校准和修正的方法, 并利用温度值对大气压值进行修正, 提高了空气折射率的计算精度。使用修正后的传感器进行测量, 结果表明空气折射率的精度达到 $\pm 5.13 \times 10^{-8}$, 接近 Edlen 公式所提的 10^{-8} 量级的理论精度。与测距法相比, Edlen 公式法的空气折射率测量值的准确度为 10^{-7} 量级, 该方法可广泛用于需求小型化空气折射率测量装置的场合。

关键词 大气光学; 空气折射率; 测量值修正; Edlen 公式法; 高精度

中图分类号 TB96; TP212.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.040102

Accuracy Correction of Miniaturization Device for Air Refractive Index Measurement

Wu Bingyang¹, Yu Jinlong¹, Wang Ju¹, Wang Wenrui²

¹Laboratory of Optical Fiber Communications, School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China

Abstract Based on the high theoretical accuracy of the Edlen formula method, the value of air refractive index is calculated according to parameters, such as temperature, humidity, and atmospheric pressure, which are measured by the small digital sensor. Aiming at the problem of insufficient accuracy in traditional method, we propose a method based on the second class standard platinum resistance thermometer and the pressure sensor to calibrate and correct the measured values of digital sensors, and use the temperature value to correct the atmospheric pressure, which can improve the accuracy of air refractive index. We use the revised sensor in the measurement, and the experimental results show that the precision of air refractive index reaches to $\pm 5.13 \times 10^{-8}$, which is closed to the theoretical accuracy of 10^{-8} obtained by Edlen formula. Compared with the results of distance ranging method, the accuracy of measured air refractive index reaches to 10^{-7} . The sensors can be widely used in the air refractive index measurement applications which need miniaturization.

Key words atmospheric optics; air refractive index; measurement value correction; Edlen formula method; high precision

OCIS codes 010.1285; 290.3030

1 引言

激光测距技术在现代距离测量与目标定位中有

着广泛的应用^[1], 并逐渐向远距离、高精度的方向发展^[2], 在如车辆检测、精密武器制造、导弹拦截、卫星编队等^[3]民用、军事和航天领域中表现卓越。对于

收稿日期: 2017-10-20; 收到修改稿日期: 2017-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(61427817)

作者简介: 吴炳阳(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事空气折射率方面的研究。E-mail: wbyakura@tju.edu.cn

导师简介: 于晋龙(1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事微波光子技术及光通信方面的研究。

E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: wangju@tju.edu.cn

地上激光测距系统,空气折射率是不可忽略的因素。以激光干涉仪为例,测量距离值 L 与激光波长 λ 成正比,而空气折射率 n 直接影响波长的大小,若 $\Delta n = 10^{-6}$,因空气折射率引起的距离测量误差 $\Delta L \approx 10^{-6}$ m,即空气折射率的精度直接影响被测距离的精度^[4]。想要提高激光测距的精度,需根据大气折射率对测量距离进行补偿。

目前,国内外对于大气折射率的测量方案大致分为两种:直接测量和间接测量。直接测量方法是利用光的成像特性测算光的实际波长,从而推算出折射率的值。典型的代表是干涉法和抽气法。1993年,Birch等^[5]采用抽气法使干涉条纹发生变化,从而推算出空气折射率的值,测量精度为 10^{-5} 量级。李东光等^[6]提出的预抽气真空腔法避免了抽气过程带来的干扰,测量精度为 10^{-6} 量级,补偿后的精度可达到 10^{-7} 量级。间接测量方法的原理为通过测量光路所在大气环境的多种参数,以建模的方式进行间接计算。间接测量方法的典型代表是 Edlen 公式,通过测量空气的温度、湿度、大气压和二氧化碳浓度值等参数得出折射率的值,精度在理论上可以达到 3×10^{-8} ^[7]。陈强华等^[8]对 633 nm 波长下的湿空气折射率计算公式进行精确修正,使其计算精度达到 10^{-7} 量级,优于 Boensch 改进公式。直接测量方法不会受到空气状态的影响,测量精度较高,能很好地反映空气折射率的瞬态变化^[9],在空气状态不稳定的情况下多采用该方法,但这一方法的系统复杂、体积大、成本高。间接测量方法不需要搭建光路,只需要获取准确的空气参数值就能实现高精度的测量,系统方案较简单、成本较低。

在实际的工程应用中,特别是在激光测距^[10]过程中,既要求空气折射率的测量精度高,也需要保证空气折射率测量装置的小型化和自动化。直接测量方法需要大量的光学器件,虽然精度高,但是难以提出便携式小型化方案;而间接测量方法的理论精度较高,只要选择合适的传感器,并与嵌入式技术结合,就能同时满足小型化和高精度测量的要求。基于 Edlen 公式的间接测量方法中,传感器的测量精度将直接影响空气折射率的计算精度,而小型的数字传感器又存在精度不足的问题。本文提出了一种小型化空气折射率测量装置精度修正方法,采用精度水平更高的传感器对数字传感器进行校准,以提高测量值的准确性,并利用温度值对大气压值进行修正,从而提高气压测量值的稳定性,在保证整体系统体积小、结构简单的同时,能满足高精度的测量需

要,因此所提方法具有广阔的应用前景。

2 原理分析与方案设计

2.1 Edlen 公式简介

1998年,中国计量科学院对 Edlen 公式进行修改,使其适用于国际单位制,修改后的公式为^[11]

$$10^8(n-1)_s = 8342.54 + \frac{2406147}{130 - \sigma^2} + \frac{15998}{38.9 - \sigma^2}, \quad (1)$$

$$(n-1)_{\text{tp}} = (n-1)_s \frac{P}{96095.43} \times \frac{[1 + 10^{-8}(0.601 - 0.00972t_{90})P]}{1 + 0.003661t_{90}}, \quad (2)$$

$$n_{\text{tpf}} - n_{\text{tp}} = -f(3.7345 - 0.0401\sigma^2)10^{-10}, \quad (3)$$

式中 σ 为真空中的波数,单位为 μm^{-1} ; n_{tpf} 为所求的考虑空气湿度时的折射率值; f 为水蒸气分压力。(1)式为标准干燥空气温度 $t = 15$ °C、大气压 P 为一个标准大气压的条件下的折射率计算公式,(2)式为标准干燥空气温度为 t_{90} (单位为°C)、压力为 P (单位为 Pa)时的折射率 n_{tp} 计算公式。

水蒸气分压力 f 与饱和蒸汽压 f_0 的关系为

$$f = f_0 R, \quad (4)$$

式中 R 为相对湿度。饱和蒸汽压 f_0 采用 Goff-Gratch 公式进行计算^[12]:

$$\lg f_0 = a_1 \left(1 - \frac{T_1}{T}\right) + a_2 \lg \frac{T_1}{T} + a_3 [1 - 10^{b(T_1/T-1)}] + a_4 [10^{c(1-T_1/T)} - 1] + a_5, \quad (5)$$

式中 $a_1 = 10.79574$, $a_2 = -5.02800$, $a_3 = 1.50475 \times 10^{-4}$, $a_4 = 4.28730 \times 10^{-4}$, $a_5 = 0.78614$, $b = -8.29690$, $c = 4.76955$, $T_1 = 273.16$ K, $T = 273.15 + t$ 。

利用单一变量法进行仿真计算,考察各个参量对空气折射率的影响,可以发现温度、湿度和大气压对空气折射率的影响均呈线性或近似线性关系^[13]。估算折射率的表达式为

$$n = -k_1 t - k_2 R + k_3 P, \quad (6)$$

式中 $k_1 = 0.94 \times 10^{-6}$ °C; $k_2 = 0.87 \times 10^{-6}$; $k_3 = 0.24 \times 10^{-8}$ Pa。假设折射率测量的系统误差为 Δn ,温度、相对湿度和气压的系统误差分别为 Δt 、 ΔR 和 ΔP ,由(6)式可以得出空气折射率测量的系统误差的估算公式为

$$|\Delta n| = |k_1 \Delta t| + |k_2 \Delta R| + |k_3 \Delta P|. \quad (7)$$

系统误差常用来表征测量值的准确度,因此(7)式

又可以视为对空气折射率 n 的准确度的估算公式。

2.2 测量方案的选择

SHT75 传感器^[14]是 PN 结型集成电路传感器中的一种,是瑞士 Sensirion 公司开发的一款数字式温湿度传感器,集成了 14 位模/数(A/D)转换器,可以输出 14 位的温度和 12 位的湿度(二进制数),一般的出厂参数为:温度的精度为 $\pm 0.3\text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度的精度为 $\pm 1.8\%$ 。传感器体积小,引脚简单,采用串行总线(I²C)接口协议,可方便其与微程序控制器(MCU)进行通信,具有低功耗和长期稳定性好的优点。选用 SHT75 传感器可以满足对温度和湿度两个参量的实时测量,省掉一个传感器的空间,其湿度的精度水平为 $\pm 1.8\%$,对应空气折射率的精度水平优于 2×10^{-8} ,达到 Edlen 公式的理论精度水平,因此不需要对湿度进行校准和修正。

测量大气压的传感器选用美国 Measurement Specialties Inc 公司生产的 Ms5803,它集成了线性度较好的压力传感器和低功耗 24 位 A/D 转换器^[15],测量范围为 $10 \sim 1300\text{ hPa}$,精度水平为 $\pm 1.5\text{ hPa}$ 。Ms5803 传感器支持串行外设接口和 I²C 传输协议,能与多种 MCU 共同使用,具有不同的工作模式。该传感器的测压面采用防水硅胶密封,可用于测量相对高度,理论上其分辨率可达 50 cm。

通常所说的精度水平表示测量值的准确度与精密度之和的一般值的大小。准确度体现测量值与真实值的一致程度,而精密度体现多个测量值的重复性^[16]。由于 SHT75 和 Ms5803 是数字式传感器,可对其输出的数字量进行进一步的再校准处理。影响精度水平的误差分为系统误差和随机误差,系统误差是可以通过校准来消除的。利用某一特定的 SHT75 传感器对现场温度(气流稳定的情况下)进行多次测量,对测量值取平均可以得到一个稳定的读数 t_1 ,将其与更高精度的测量工具(如铂电阻温度计)测得的温度值 t_2 进行对比,偏移量 $|t_1 - t_2|$ 可以直接作为修正常数加在 SHT75 传感器的温度计算公式中,这是一维线性校准,即将传感器的输出曲线近似视为线性。若要进行多维校准,则需要不同温度环境下进行重复对比,得到多组偏移量,再进行高次拟合,得到输出曲线。随机误差的解决方法是采用校准过的传感器进行多次测量并取平均值。

2.3 校准方案的选择

在温度计量中,采用二等标准铂电阻温度计是

一种有效的校准方法^[17]。使用这种元件时一般需要得到其电阻值小数点后几位的精确值,推荐使用符合国家规程的七位半万用表,可有效利用铂电阻温度计高达 $0.003\text{ }^\circ\text{C}$ 的测量精度,本方案使用美国 Agilent 公司生产的 3458A 万用表。利用铂电阻温度计作为温度参照基准,可修正 SHT75 传感器的温度计算公式,从而达到对温度进行精确测量的目的。

Ms5803 传感器输出的气压测量值与当前的温度值相关,而 Ms5803 传感器自身测量温度的精度不高,稳定性较差,因此考虑采用校准过的 SHT75 传感器的温度测量值作为气压计算时的温度参照基准,从而提高气压测量值的精密性。

美国 Setra 公司推出的 Model278 型的大气压传感器^[18]具有精确测量、响应速度快、长期稳定性好的特点,其卓越的热膨胀系数和低机械迟滞使得 Model278 传感器具有良好的长期稳定性。标定源可追溯至美国国家标准技术研究院,精度水平为 $\pm 30\text{ Pa}$,对应空气折射率的测量精度优于 10^{-7} 量级。采用 Model278 对 Ms5803 传感器进行校准可以提高气压测量值的准确度。

2.4 基于测距法的空气折射率测量方案

将利用测距法测量空气折射率的方案作为 Edlen 公式法的对比参照。基于二次偏振调制测距系统的空气折射率测量方案原理图如图 1 所示,利用事先标定好长度(标定长度 $d = 1037.0\text{ mm}$)的石英玻璃真空管,分别在抽真空的前后对激光的飞行距离(真空管与光纤的长度之和)进行测量,并对测量结果求差值以消除光纤的长度并计算出空气折射率的值。采用的是黑克非等^[19-20]提出的二次偏振调制测距系统,测量精度最高可达到 10^{-7} m 量级,激光通过准直器发射进入真空管,到达另一端的反射镜后返回,再由准直器接收。二次偏振调制测距系统的基本原理是通过改变调制频率实现对波长个数的准确计数,从而求出距离值,计算公式为

$$D = \frac{N}{2}\lambda, \quad (8)$$

式中 D 为所测得的距离, N 为激光往返的波长个数, λ 为波长。

在抽真空之前,受空气折射率的影响,激光波长的实际值偏小,使得 N 增大,而系统仍基于原波长计算距离值,导致抽真空前的距离测量值大于抽真空后的测量值。空气折射率的计算公式为

$$D_1 - D_2 = d(n - 1), \quad (9)$$

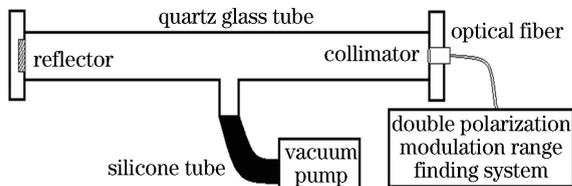


图 1 基于二次偏振调制测距系统的空气折射率测量方案原理图

Fig. 1 Principle diagram of air refractive index measurement scheme based on secondary polarization modulation ranging system

式中 D_1 为抽真空前的测量值, D_2 为抽真空后的测量值。

3 公式修正与测量结果

3.1 温度测量值的修正

将铂电阻温度计与 SHT75 传感器放置在密闭的石英玻璃管内, 铂电阻温度计从石英玻璃管的一端悬空插入并避免与玻璃管壁接触, SHT75 传感器从石英玻璃管中间的小孔插入管内并与铂电阻温度计尽可能接近, 对石英玻璃管的另一端进行密封处理, 万用表型号为 3458A(八位半), 温度修正方案原理图如图 2 所示。

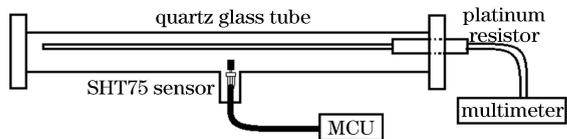


图 2 温度修正方案原理图

Fig. 2 Principle diagram of temperature correction scheme

SHT75 传感器计算温度的公式为

$$T = -39.7 + 0.01T_{SO}, \quad (10)$$

式中 T_{SO} 为二进制整数温度读数, T 为计算所得温度值, 温度最小分辨率为 $0.01\text{ }^\circ\text{C}$ 。选取万用表读数稳定时的读数作为该温度点下铂电阻温度计的电阻值, SHT75 传感器则进行间隔为 1 s 的等时间间距测量。SHT75 传感器温度测量结果如图 3 所示。由于 SHT75 传感器上电后需要一段稳定时间, 因此应该舍弃稳定过程中测得的数据, 选取后 100 组数据作为该温度点的测量值样本, 计算其平均值和标准差, 两种方法的温度测量结果对比如表 1 所示(万用表测量电阻灵敏度为 $10^{-5}\ \Omega$)。

由表 1 可知, SHT75 传感器的温度测量平均值 $\bar{X} = 28.84\text{ }^\circ\text{C}$, 样本标准差 $s(X_k) = 0.01\text{ }^\circ\text{C}$, 根据统计学理论, 该样本的 3σ 置信区间为 $[\bar{X} - 3s(X_k), \bar{X} + 3s(X_k)] = [28.81, 28.87]$, 可以认为任意一次

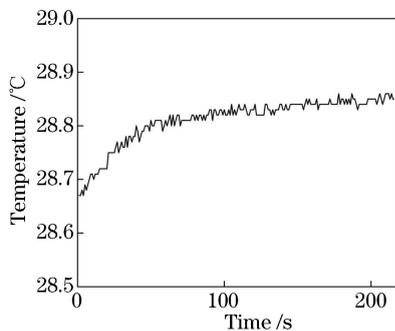


图 3 SHT75 传感器温度测量结果

Fig. 3 Temperature measurement result of SHT75 sensor

表 1 两种方法的温度测量结果对比

Table 1 Comparison of temperature measurement results of two methods

Parameter	Value
Platinum resistance / Ω	28.56642
Temperature of platinum resistance / $^\circ\text{C}$	28.714
Temperature of SHT75 sensor / $^\circ\text{C}$	28.84
Sample standard deviation of SHT75 sensor / $^\circ\text{C}$	0.0101

的测量值落在该区间的概率为 99.73% , 单次测量的随机误差为 $\pm 0.03\text{ }^\circ\text{C}$ 。

由于 SHT75 传感器的最小分辨率为 $0.01\text{ }^\circ\text{C}$, 因此作为基准参照的铂电阻温度计的温度值应保留小数点后 2 位有效位数, 即 $28.71\text{ }^\circ\text{C}$ 。通过对比可得, SHT75 传感器的温度测量值比铂电阻温度计的测量值大, 偏移量为 $0.13\text{ }^\circ\text{C}$, 将此偏移量在 SHT75 传感器的温度计算公式中扣除, 则(10)式应修正为

$$T_{\text{SHT75}} = -39.83 + 0.01T_{SO}. \quad (11)$$

修正后公式的精密为 $\pm 0.03\text{ }^\circ\text{C}$, 该精密是用测量不确定度进行评定的。参照基准的准确度优于 $\pm 0.01\text{ }^\circ\text{C}$, 但由于 SHT75 传感器的最小分辨率为 $0.01\text{ }^\circ\text{C}$, 因此准确度取值应为 $\pm 0.01\text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.2 大气压测量值的修正

大气压数字传感器 Ms5803 计算大气压和温度的公式为

$$P = T_1 a_1 - a_2 + (T_1 a_3 - a_4)(P_2 - a_5), \quad (12)$$

$$T_{\text{Ms5803}} = 20 + (P_2 - a_5) a_6, \quad (13)$$

式中 T_1 为温度读数, P_2 为压力读数, $a_1 \sim a_6$ 为出厂参数, $a_1 \sim a_6$ 参数值分别为 $0.01886, 71742, 4.2 \times 10^{-5}, 172.72, 256.38, 1.094$ 。

由(12)、(13)式可以看出, 大气压的计算与温度有关。Ms5803 传感器测量温度的精度为 $\pm 0.8\text{ }^\circ\text{C}$, 精度低于 SHT75 传感器。图 4 为

SHT75 传感器与 Ms5803 传感器测量温度值的结果比较, SHT75 传感器与 Ms5803 传感器在同一条件下同处在石英玻璃管中。由图 4 可以直观地看出, Ms5803 传感器对该温度点的测量稳定性较差, 需要较长的稳定时间, 这对于大气压值的计算是不利的。因此, 可以考虑利用 SHT75 传感器测得的温度值修正 Ms5803 传感器的测量温度值, 从而提高大气压的计算精度。

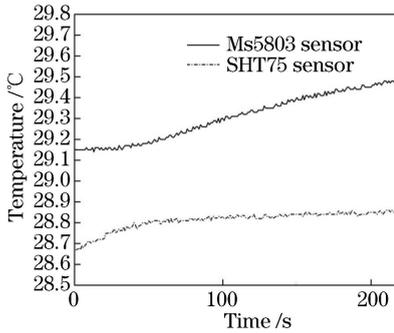


图 4 SHT75 传感器与 Ms5803 传感器测量温度值的结果比较

Fig. 4 Comparison of temperature measurement results using SHT75 sensor and Ms5803 sensor

将(13)式中的 T_{Ms5803} 替换为 T_{SHT75} , 可得

$$\frac{T_{SHT75} - 20}{a_6} = P_2 - a_5. \quad (14)$$

将(14)式代入(12)式可得修正后的大气压为

$$P_{\text{calib}} = T_1 a_1 - a_2 + \frac{(T_1 a_3 - a_4)(T_{SHT75} - 20)}{a_6}. \quad (15)$$

利用修正后的 Ms5803 传感器与测量精度更高的 Model278 传感器进行同一条件下的测量。通过 3458A 八位半万用表对 Model278 传感器输出的电压值进行测量, 并将两个传感器得到的数据平均值的差值作为偏移量对(15)式进行修正。两个传感器在同一密闭环境下同时进行测量, 测量间隔为 1 s, Ms5803 传感器与 Model278 传感器的测量结果对比如图 5 所示, 两种方法的测量结果对比如表 2 所示。

由表 2 可知, Ms5803 传感器的大气压测量平均值 $\bar{X} = 101411.5$ Pa, 样本标准差 $s(X_k) = 7.54$ Pa, 根据统计学理论, Ms5803 传感器所测样本的 3σ 置信区间为 $[\bar{X} - 3s(X_k), \bar{X} + 3s(X_k)] = [101388.9, 101434.1]$, 可以认为任意一次的测量值落在该区间的概率为 99.73%, 单次测量的随机误差或者精度水平为 ± 22.6 Pa (3σ 置信区间宽度)。

Ms5803 传感器的最小分辨率为 1.2 Pa, 因此应

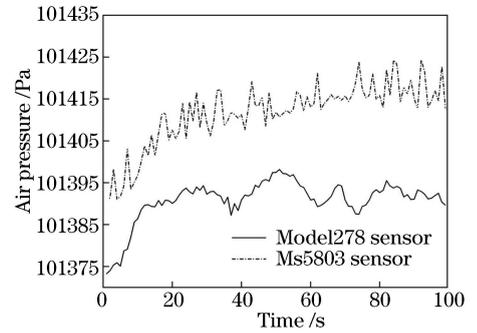


图 5 Ms5803 传感器与 Model278 传感器的测量结果对比
Fig. 5 Comparison of measurement results using Ms5803 sensor and Model278 sensor

表 2 两种方法的测量结果对比

Table 2 Comparison of measurement results of two methods

Parameter	Value
Average output voltage of Model278 sensor /V	3.5651379
Average air pressure of Model278 sensor /Pa	101390.8
Sample standard deviation of Model278 sensor /Pa	4.95
Average air pressure of Ms5803 sensor /Pa	101411.5
Sample standard deviation of Ms5803 sensor /Pa	7.54

保留小数点后 1 位有效位数, 即 101411.5 Pa。对比得出, Ms5803 传感器的气压测量值比 Model278 传感器的测量值偏大, 偏移量为 20.7 Pa, 将此偏移量在 Ms5803 传感器的气压计算公式中去除, 则(15)式应修正为

$$P_{\text{true}} = T_1 a_1 - a_2 - 20.7 + \frac{(T_1 a_3 - a_4)(T_{SHT75} - 20)}{a_6}. \quad (16)$$

修正后的偏移量精度为 ± 22.6 Pa, 该精度是用测量不确定度进行评定的。准确度根据参照基准应取 ± 30 Pa, 则总体精度为 ± 52.6 Pa。

3.3 空气折射率测量结果

在完成对温度、湿度、大气压传感器的测量值的修正后, 利用修正后的传感器对空气折射率进行测量, 得到空气折射率的测量结果如图 6 所示。根据测量结果计算可得空气折射率的平均值和标准差分别为 $\bar{n} = 1.00026056$, $s(n_k) = 0.87 \times 10^{-8}$ 。根据统计学理论, 单次测量的随机误差为 $\pm 2.61 \times 10^{-8}$ (3σ 置信区间宽度), 达到了 Edlen 公式的理论精度水平。

在该方案中, 温度的准确度为 ± 0.01 °C, 大气

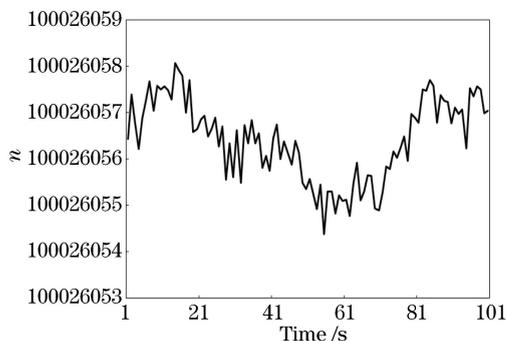


图6 空气折射率测量结果

Fig. 6 Measurement results of air refractive index

压的准确度为 ± 30 Pa,湿度的准确度为 $\pm 1.8\%$,将这3个值代入(7)式进行计算,可以得出 $|\Delta n| = 0.97 \times 10^{-7}$,即空气折射率的准确度估计值为 $\pm 0.97 \times 10^{-7}$ 。

测量铂电阻温度计阻值采用的是四线制测量方法,该方法有效地消除了引线电阻的影响。万用表测量电阻的精度为 10^{-4} Ω 量级,将其换算成温度的误差为 8×10^{-4} $^{\circ}\text{C}$,这对于空气折射率的影响是可以忽略不计的;万用表测量 Model278 传感器输出电压的精度在 10^{-5} V量级,换算成大气压的误差为0.06 Pa,这对于空气折射率的影响也是可以忽略的。

以上计算并未计入 Edlen 公式自身的理论误差,越是偏移通常状态(温度为 20 $^{\circ}\text{C}$,大气压为 101 kPa)的条件,Edlen 公式自身的理论误差越大,若要扩大测量条件的范围,则需要对 Edlen 公式进行进一步的修改才能继续保持该精度水平。

在进行 Edlen 公式法测量空气折射率的同时,开展基于测距法的空气折射率测量参照实验,测量结果如下: $D_1 = 3.9742138$ m, $D_2 = 3.9739427$ m, $n = 1.00026142$ 。

该方法测得的空气折射率值与 Edlen 公式法得到的空气折射率值的差值为 8.6×10^{-7} ,比 Edlen 公式法的准确度估计值 $\pm 0.97 \times 10^{-7}$ 大得多,这是由实验条件的限制引起的系统误差所导致的。误差主要源于3个方面:1)虽然光纤的长度在两次测量后已经消除,但是抽真空过程所影响的距离值在总测量值中的占比不大;2)二次偏振调制测距系统的测量精度最高仅为 10^{-7} m量级;3)由于真空泵存在 30 Pa的极限真空度,抽真空后真空管内仍存在极少量的气体,使折射率的计算精度降低约 0.79×10^{-7} (20 $^{\circ}\text{C}$ 条件下)。后续的研究可以采用更长的真空管验证折射率的计算精度。

将 Edlen 公式法与测距法进行对比,可以认为 Edlen 公式法测量空气折射率的测量准确度在 10^{-7} 量级。

4 结 论

对小型化空气折射率测量装置的精度修正技术进行了研究,在保证仪器小型化的同时,从提高温度和大气压的测量精度的角度出发,对传感器进行校准,从而为空气折射率的间接计算提供准确的参量。利用铂电阻温度计对温度测算公式进行修正,利用精度更高的 Model278 传感器为数字传感器提供准确的参考值,这是提高空气折射率测量精度的可行性思路。实验结果表明:修正后的空气折射率测量值的精密度达到了 Edlen 公式的理论精度(10^{-8} 量级),准确度的估计值达到 10^{-7} 量级。将 Edlen 公式法与测距法进行对比,结果表明两种方法的测量值的差异为 10^{-7} 量级,验证了基于 Edlen 公式法小型化测量方案的准确性。该测量方案可以应用于需要小型化空气折射率测量的场合,并可提供准确的空气折射率测量值。

参 考 文 献

- [1] Luo Z F, Zhang K, Wang Z G, *et al.* Pose calibration of laser range finder in automated guided vehicle[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(6): 062802.
罗志锋, 张轲, 王志刚, 等. 激光测距传感器在自主导航小车中的位置标定[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(6): 062802.
- [2] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, *et al.* Rapid and precise absolute distance measurements at long range[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(6): 351-356.
- [3] Baumann E, Giorgetta F R, Deschènes J D, *et al.* Comb-calibrated laser ranging for three-dimensional surface profiling with micrometer-level precision at a distance[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 24914-24928.
- [4] Chen Q H, Yan J Q, Liu Z Y, *et al.* An air refractometer with dual vacuum chambers eased on the method of equivalent synthetic wave[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004, 25(3): 203-206.
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, 25(3): 203-206.
- [5] Birch K P, Downs M J. An updated edlén equation for

- the refractive index of air[J]. *Metrologia*, 1993, 30(3): 155-162.
- [6] Li D G, Zhang G X. Measurement and compensation for refractive index of air using a pre-evacuated airtight sealed cavity [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(1): 80-84.
李东光, 张国雄. 用预抽气真空腔法测量及补偿空气折射率的研究[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(1): 80-84.
- [7] Edlén B. The refractive index of air[J]. *Metrologia*, 1966, 2(2): 71-80.
- [8] Chen Q H, Liu J H, Luo H F, *et al.* Correction to the calculation equations of moist air refractive index at the wavelength of 633 nm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(3): 0308002.
陈强华, 刘景海, 罗会甫, 等. 对 633 nm 波长下湿空气折射率计算公式的精确修正[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0308002.
- [9] Fendley J J. Measurement of refractive index using a Michelson interferometer [J]. *Physics Education*, 1982, 17(5): 209-211.
- [10] Wang Q L, Li J Y, Shen H K. Target tracking system of binocular vision and laser range sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0912002.
王琪龙, 李建勇, 沈海阔. 双目视觉-激光测距传感器目标跟踪系统[J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0912002.
- [11] Ni Y C. Modification of the air refractive index edling formula [J]. *Measurement Technique*, 1998, 33: 22-27.
倪育才. 空气折射率埃德林公式的修改[J]. *计量技术*, 1998, 33: 22-27.
- [12] Wexler A. Vapor pressure formulation for water in range 0 to 100 °C. A revision[J]. *Journal of Research of the National Bureau of Standards, Section A: Physics and Chemistry*, 1976, 80A(5/6): 775-785.
- [13] Jin Q F. Research on the impacts of refractive index [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
金群锋. 大气折射率影响因素的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [14] Yang J J, Huang L. The application of digital humidity and temperature sensor SHT75[J]. *Journal of Changzhou Institute of Technology*, 2009, 22(1/2): 31-33.
杨景景, 黄亮. 数字式湿温度传感器 SHT75 的应用[J]. *常州工业学院学报*, 2009, 22(1/2): 31-33.
- [15] Miller D J, Sun K, Tao L, *et al.* Open-path, quantum cascade-laser-based sensor for high-resolution atmospheric ammonia measurements [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7(1): 81-93.
- [16] Meng Q B, Qi Y J, Lu Z X, *et al.* Analysis of effect of ambient temperature variation on measurement accuracy of Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(8): 0810001.
孟庆宾, 齐月静, 卢增雄, 等. 环境温度变化对夏克-哈特曼波前传感器测量精度影响分析[J]. *中国激光*, 2016, 43(8): 0810001.
- [17] Batagelj V, Bojkovski J, Drnovšek J. Methods of reducing the uncertainty of the self-heating correction of a standard platinum resistance thermometer in temperature measurements of the highest accuracy [J]. *Measurement Science and Technology*, 2003, 14(12): 2151-2158.
- [18] Kung J T, Lee H S. An integrated air-gap-capacitor pressure sensor and digital readout with sub-100 attofarad resolution [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1992, 1(3): 121-129.
- [19] Hei K F, Yu J L, Wang J, *et al.* Variable frequency range finding technology based on double polarization modulation method and system implementation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(10): 100602.
黑克非, 于晋龙, 王菊, 等. 基于二次偏振调制的变频测距方法与系统实现[J]. *物理学报*, 2014, 63(10): 100602.
- [20] Xiao Y, Yu J L, Wang J, *et al.* Relationship between modulation frequency and range accuracy in the double polarization modulation range finding system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(10): 100601.
肖洋, 于晋龙, 王菊, 等. 二次偏振调制测距系统中调制频率与测距精度的关系[J]. *物理学报*, 2016, 65(10): 100601.