

光学鉴频器的精密温控及其对测量的影响

赵存峰^{1,2}, 毕德仓^{1*}, 姜丽媛¹, 竹孝鹏¹, 杜娟^{1,2}, 李文冬^{1,2}, 陈卫标¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 研究了光学鉴频器的精密温控方法及其对鉴频光学谱线、鉴频误差的影响。设计了双层温控结构及电路, 采用三线制等长接法、双路电流源方向切换等方式来减小引线电阻影响, 消除了两路电流源失配。研究了基于现场可编程门阵列(FPGA)的模拟和数字混合温度控制方法, 不同温度设置点的控制实验显示温控精度达到了 0.0062 °C, 测量误差为 0.0036 °C。用单频紫外激光测试了该温控精度对光学鉴频器的谱线移动、透过率的影响边界, 在该控制精度下的透过率谱线平移为 0.11 MHz, 造成的速度测量误差为 0.0195 m/s。

关键词 测量; 鉴频器; 温度; 光谱; 多普勒频移

中图分类号 O433; O551.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0704008

High Precision Temperature Control of Optical Frequency Discriminator and Its Influence on Measurement

Zhao Cunfeng^{1,2}, Bi Decang¹, Jiang Liyuan¹, Zhu Xiaopeng¹,
Du Juan^{1,2}, Li Wendong^{1,2}, Chen Weibiao¹

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The precision temperature control method of the optical frequency discriminator and its influence on optical transmission spectrum and measurement error are studied. A double-deck temperature controlling structure and corresponding circuit are designed, and the influence of the wire resistance is reduced by using a three-wire equal length method and dual switchable current source, and the mismatch of the current source is eliminated. The analog and digital hybrid temperature control method based on field-programmable gate array (FPGA) is studied. Control experiment with different temperature set points show that the temperature control accuracy is 0.0062 °C and the temperature measurement error is 0.0036 °C. The influence of the temperature control accuracy on the spectral line movement and transmittance of the optical frequency discriminator is tested with a single-frequency ultraviolet laser. The transmittance spectrum line translation under this temperature control accuracy is 0.11 MHz, resulting in a speed measurement error of 0.0195 m/s.

Key words measurement; frequency discriminator; temperature; spectrum; Doppler shift

OCIS codes 120.2230; 050.2230; 120.2650

1 引言

多普勒光学鉴频器(本文指基于法布里-珀罗的

鉴频器)是直接探测多普勒激光雷达中的一种鉴别频率的关键部件,其能够将微弱的光频信号转化为能量探测^[1],并继续承载着大气回波多普勒频率鉴

收稿日期: 2018-01-31; 收到修改稿日期: 2018-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(6138108)

作者简介: 赵存峰(1993—),男,硕士研究生,主要从事激光雷达频率控制方面的研究。

E-mail: zhaocunfeng@siom.ac.cn

导师简介: 陈卫标(1969—),男,博士,研究员,主要从事激光遥感方面的研究。E-mail: wbchen@mail.shenc.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: bidecang@siom.ac.cn

别的核心任务。当前对于鉴频器温度控制对性能测量影响的研究都集中在大气本身温度不确定度对风速测量的影响方面,1998年Korb等^[2]研究了在双边缘大气风场测量过程中大气温度廓线误差为5 K时对鉴频器多普勒频率测量的影响,发现在后向散射比为10、温度为250 °C时的测量误差 ≤ 1 m/s;2010年竹孝鹏等^[3]报道了大气温度对基于瑞利散射双边缘技术激光测风雷达的误差的影响。在鉴频器方面,刘继桥等^[4]研究了车载光学鉴频器的基本特性,2015年张飞飞等^[5]研究了基于法布里-珀罗干涉仪的多普勒激光测风雷达观测径向风速测量偏差,指出温漂系数799 MHz/°C对干涉仪的温度控制系统要求为0.007 °C,但没有给出控制方案及实验结果。2007年卜令兵等^[6]报道了温度变化引起的干涉仪光谱漂移从而产生测速误差0.226 m/s,该误差仍然较大。2015年Zhao等^[7]研究了大气的温度误差导致的测量灵敏度误差:1 K大气温度不确定度将导致0.2%的径向风速测量误差,但是对于鉴频器本身的温度控制则没有给出影响数据。本文调研发现,所发表文献尚无涉及鉴频器本身温度控制具体实验及影响的研究。

多普勒光学鉴频器是由两块平面度和平行度极高的光学平板及隔圈组成^[8],它对温度等环境比较敏感。鉴频器控制温度的变化将导致隔圈长度改变,因此提高温度控制的精度十分必要。2008年易先军等^[9]提出了以铂电阻Pt100为测温元件的温度测量方案,在硬件电路上虽实现了对温度的测量,但测量精度为0.4 °C,精度不高的原因是没有解决恒流源温漂和导线电阻等对实验结果造成的影响。2010年张瑜等^[10]报道了四线制恒流源温度测量电路,同时对铂电阻传感器温度检测电路的测量误差进行了分析,实验中Pt100驱动电流设计为1 mA,电流过大,导致了温漂及误差增大,报道的测量精度为0.1 °C。2010年方益喜等^[11]设计出一种三线制测量电路,为采用恒流源驱动的铂电阻温度测量系统,给出了电路结构和电路参数,解决了自热效应,但是没有提出引线电阻不一致的解决方法,没有给出整个系统的误差分析,没有考虑搭建的电流源电路中电阻温漂、运放匹配对电流源造成的影响,实验测量精度为0.01 °C。2012年,刘孟德等^[12]设计了恒流源激励的温度测量电路,解决了因电阻自加热和恒流源波动产生的测量误差,但是采取的是单路电流源驱动热敏电阻的方案,其缺陷是没解决导线电阻的影响。2013年,郑泽祥等^[13]研制了一种恒流

源微电流驱动四线制Pt100铂电阻的温度测量系统,测量精度为0.03 °C;郑泽祥等^[13]给出了软、硬件抗干扰滤波技术降低噪声、抑制干扰、减少系统误差的方法,但是没有消除电流源温漂的影响,随机噪声抑制效果不明显。2016年杜帅帅等^[14]设计了高精度温度测量系统,采用四线制驱动有效解决了引线电阻问题,给出的实验精度为0.02 °C,但是没能解决模数转换器(ADC)参考电阻温漂问题,没有分析整个系统温漂对实验产生的影响。2001年宋明刚等^[15]介绍了一种用于高精度温度控制的复合方法及其在恒温槽上的成功应用;该方法集模糊逻辑和专家式智能比例、积分、微分(PID)控制于一体,得到恒温槽控制精度优于0.01 °C。2016年田焜彤等^[16]报道了利用AD7793的芯片、温度半导体致冷器、进阶精简指令集机器ARM(STM32)以及抗积分饱和PID算法,给出了60 s内300个点的实测数据,实现了0.008 °C的温度控制,文中讲述了温度采集时刻受到脉冲宽度调制(PWM)开关影响应予以避免,但是没有给出解决方案,给出的高精度控制时间不够长,无法预测长期效果。

为了解决法布里-珀罗(FP)鉴频器温度稳定性问题,本文设计了一套基于现场可编程门阵列(FPGA)的双层温控组件,采用基于铂电阻传感器(RTD-Pt1000)的三线制等长设计,双路弱电流、方向可切换的电流源匹配驱动方案,显著减小了自热效应、系统器件温漂的影响,消除了电流源匹配误差,净误差分析测量精度提高到0.0036 °C。采用基于数字和模拟混合的控制技术,提高了控制精度,实验结果表明在30~50 °C范围内实现了0.0062 °C的温度控制精度。针对该精度本文根据温控边界测量了鉴频器谱线稳定度为0.11 MHz,对应速度测量误差为0.0195 m/s。

2 原 理

实现高精度的温度控制首先需要提高温度测量精度,研究选用的RTD-Pt1000温度传感器的测量原理如图1所示。首先电流源分别输出两组理论相等的电流 I_{RTD_in1} 、 I_{RTD_in2} ,两个电流分别流向RTD-Pt1000,然后汇合总电流 $I_{RTD_in1} + I_{RTD_in2}$ 流经参考电阻 R_{ref} ,其中RTD-Pt1000两端电压作为采集芯片ADC的输入端, R_{ref} 两端电压作为ADC的参考电压输入端。实验中电流源依赖于模拟开关进行切换配置电流方向,如图1所示。

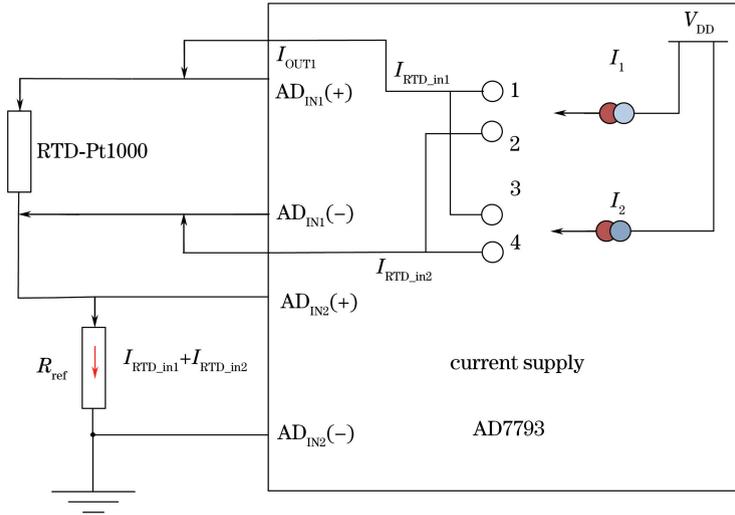


图 1 基于 AD7793 的温度测量原理图

Fig. 1 Temperature measurement principle diagram based on AD7793

设实验测到输入电流分别是 I_{RTD_in1} 、 I_{RTD_in2} 时的 RTD-Pt1000 两端电压分别为 V_{RTD_in1} 、 V_{RTD_in2} ，温度为 T 时的 RTD-Pt1000 的电阻为 R_T ，参考电阻 R_{ref} 两端电压为 V_{ref} 。则 ADC 输入端的电压表示为：

$$V_{RTD_in1} = I_{RTD_in1} \times R_T, V_{RTD_in2} = I_{RTD_in2} \times R_T. \quad (1)$$

参考电阻两端的电压 V_{ref} 的表达式为：

$$V_{ref} = (I_{RTD_in1} + I_{RTD_in2}) \times R_{ref}. \quad (2)$$

联合(1)和(2)式得到 RTD 电阻为：

$$R_T = \frac{V_{RTD_in1} + V_{RTD_in2}}{V_{ref}} \times R_{ref}, \quad (3)$$

式中参考电阻 R_{ref} 为已知量，而 $\frac{V_{RTD_in1} + V_{RTD_in2}}{V_{ref}}$ 由 ADC 采集卡两次采集的量输出码值 X_{Code_in1} 和

X_{Code_in2} 求出：

$$\frac{V_{RTD_in1} + V_{RTD_in2}}{V_{ref}} = \frac{X_{Code_in1} + X_{Code_in2}}{2^{24}}. \quad (4)$$

由(3)式、测温标准(EN 60751:2008)可得：

$$R_T = -0.0005763T^2 + 3.908T + 1000. \quad (5)$$

单路温度控制流程如图 2 所示，温度控制部分流程是首先得到测量温度值 $T_{measure}$ 定义温度误差为温度设定值与实测温度差值：

$$T_{error} = |T_{set} - T_{measure}|. \quad (6)$$

如果温度误差 T_{error} 在允许范围 ϵ 内，则输出控制电压为 0；如果温度误差 $\epsilon \leq T_{error} \leq \mu$ ，则控制金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)栅源电压使之工作在可变电阻区(线性区)；如果 $T_{error} \geq \mu$ ，则

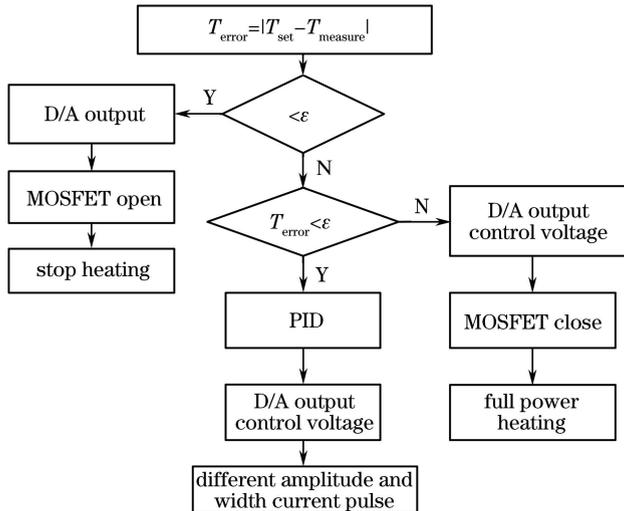


图 2 温度控制流程图

Fig. 2 Flow chart of temperature control

PID 运算模块将输出满量程电压控制量使得 MOSFET 管完全导通加热。PID 算法根据当前温度值和控制目标值之间的差别让 MOSFET 开关工作在线性区或者开关区进而形成输出幅度和宽度变化的电压,具有模拟和数字联合温控效果,实现精密温控。

温控精度对鉴频器的影响主要在于鉴频器腔长度 l 的变化:

$$l = l_0 + \alpha \times \Delta T, \quad (7)$$

式中 α 、 ΔT 分别为支撑腔体的隔环线性温度膨胀系数和温度变化量, l_0 是鉴频器在初始温度下的腔长。鉴频器的透过率曲线公式^[17]为:

$$T(\lambda) = \frac{1}{1 + \left(\frac{2F_{\text{eff}}}{\pi}\right)^2 \sin^2[2\pi n l \cos(\chi)/\lambda]}, \quad (8)$$

式中 χ 为鉴频器的入射角, λ 为入射的波长, F_{eff} 为有效精细度, n 为腔折射率。最后根据(8)式得到关于温控精度 ΔT 对于鉴频器的透过率谱线的影响值。

3 测量结果

鉴频器温控结构方案采用了双层温控结构,如图 3 所示。壳体外部通过一层加热带、一层隔热层的方式设计了两层温度控制环路。加热带采用聚酰亚胺材质的加热带贴合壳体,隔热层则采用导热系数为 $0.02 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ 的材料。

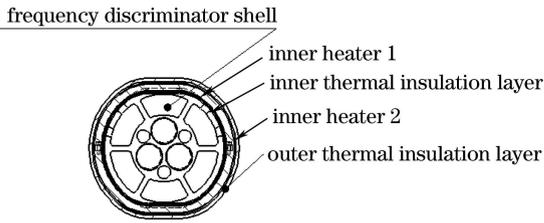


图 3 鉴频器温控结构布局

Fig. 3 Temperature control structure layout of frequency discriminator

鉴频器双层温度控制的结果如图 4 所示, $30 \sim 45 \text{ } ^\circ\text{C}$ 温度设置点下测量 1 h 以上的数据,统计数据如表 1 所示,标准差(STD)平均值为 $0.0062 \text{ } ^\circ\text{C}$,系统差平均值为 $0.0066 \text{ } ^\circ\text{C}$,测温系统差可以通过校准消除。

从图 4 可以看到,随着温度设定值增高,温控稳定时间逐渐增大($35 \text{ min}@30 \text{ } ^\circ\text{C} \sim 100 \text{ min}@45 \text{ } ^\circ\text{C}$),产生这一现象主要是由鉴频器热容及外部界面散热系数所致。温度稳定后的曲线如图 5 所示。

图 6 是对图 5 温控数据利用 Allan 方差计算的结果^[18],在 1000 s 时,Allan 方差小于 2%,长期稳定性较

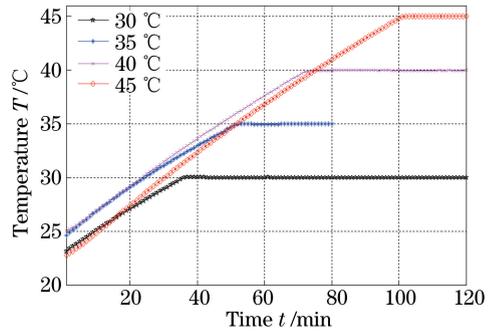


图 4 鉴频器温度控制测量曲线

Fig. 4 Temperature control measurement curves of frequency discriminator

好。在 10000 s 时, $45 \text{ } ^\circ\text{C}$ 温控曲线 Allan 方差较大,原因是由于 $45 \text{ } ^\circ\text{C}$ 温度与室温的温差大,保温层系统散热速度较快,可见保温对温度控制精度的重要性。

表 1 鉴频器温度控制实验统计结果

Table 1 Temperature control experimental statistics results of frequency discriminator $^\circ\text{C}$

Set value	Measure value	System error	STD error	Peak to peak error
30	29.9929	0.0071	0.0061	0.0239
35	34.9911	0.0089	0.0056	0.0239
40	39.9920	0.0080	0.0057	0.0240
45	44.9976	0.0024	0.0075	0.0273

采用了实验测量的方法研究了温控精度对鉴频器的影响,测量光路如图 7 所示。采用的单频光源为 355 nm 的激光光源,线宽为 200 MHz 。

首先激光光源发出的光被分束成三束,两束进入鉴频器两个通道到达光电探测器 PIN-1 和 PIN-2 分别得到在频率 ν 处两个通道的测量值 $P_1(\nu)$, $P_2(\nu)$,第三束到达 PIN-3,经过 A/D 采样给出测量值 $P_3(\nu)$,用于得到归一化参数 k_1, k_2 。两个测量通道的谱线表达式分别为:

$$L_{\text{ch1-trans}} = k_1 \times \frac{P_1(\nu)}{P_3(\nu)}, \quad (9)$$

$$L_{\text{ch2-trans}} = k_2 \times \frac{P_2(\nu)}{P_3(\nu)}. \quad (10)$$

改变激光输出的频率得到鉴频器光谱测量结果如图 7 所示。 $L_{\text{ch1-trans}}$ 和 $L_{\text{ch2-trans}}$ 分别是两个通道的谱线,由于随机噪声的影响,研究对两个测量谱线分别进行拟合得到 $L_{\text{ch1-trans-fit}}$ 和 $L_{\text{ch2-trans-fit}}$ 。

图 7 测量数据中横坐标频率为相对频率,通过电压扫描频率的方法得到。扫频之前进行了电压和激光频率之间调谐关系的标定。

将温控温度分别控制在 $35 \text{ } ^\circ\text{C}$ 和 $34.9938 \text{ } ^\circ\text{C}$ 两

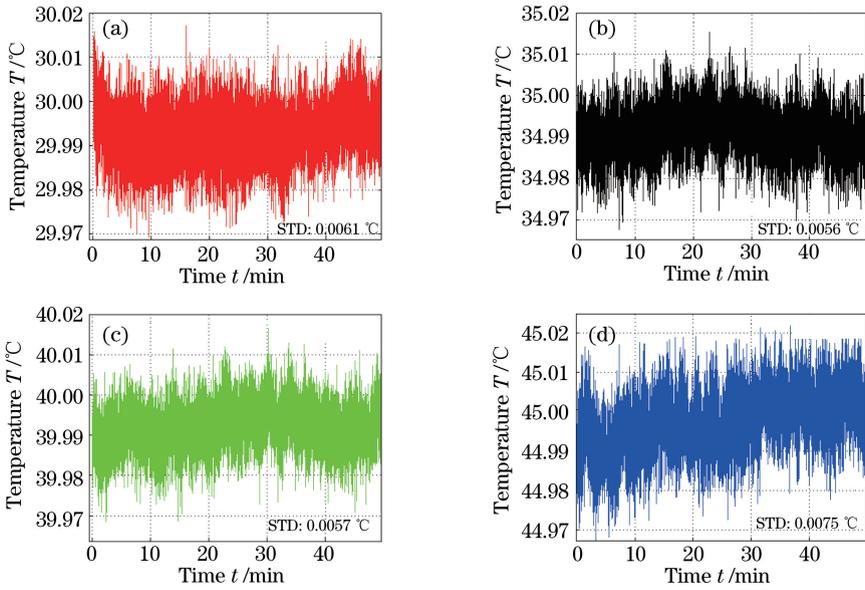


图 5 鉴频器不同设置点的温控曲线。(a) 30 °C ;(b) 35 °C ;(c) 40 °C ;(d) 45 °C
Fig. 5 Temperature control curves of frequency discriminator at different set points.

(a) 30 °C ; (b) 35 °C ; (c) 40 °C ; (d) 45 °C

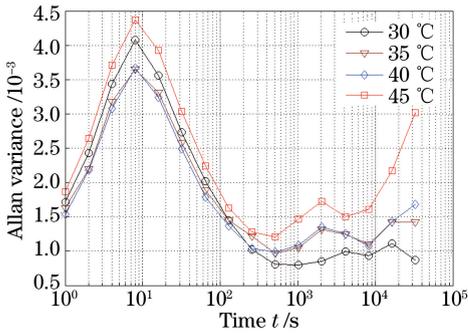


图 6 图 5 测温数据的 Allan 方差曲线

Fig. 6 Allan variance curves of temperature data in Fig. 5

个点上,然后分别测量鉴频器的透过谱线,如图 8 所示,这样就测量到了温度控制精度 0.0062 °C 时的谱

线影响边界。通过对比发现谱线移动了 0.11 MHz; 也就是意味着控制精度 0.0062 °C 造成的谱线移动 0.11 MHz,造成的风速测量误差为:

$$\Delta V = \Delta \nu / \left(\frac{2}{\lambda} \right) = 0.0195 \text{ m/s}, \quad (11)$$

式中,波长 $\lambda = 355 \text{ nm}$ 。

4 误差分析

4.1 温度测量误差分析

影响铂电阻测温精度的主要因素是 RTD-Pt1000 的标定精度、自热效应、引线电阻、系统温漂、器件非线性等^[10]。研究的温度采集方案中充分考虑并尽量减小上述因素的影响,下面将逐一分析测温误差。

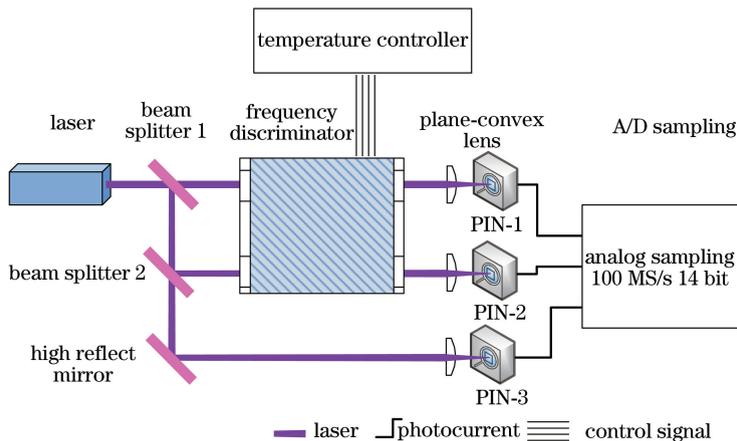


图 7 鉴频器光谱测量光路图

Fig. 7 Spectral measurement optical path of frequency discriminator

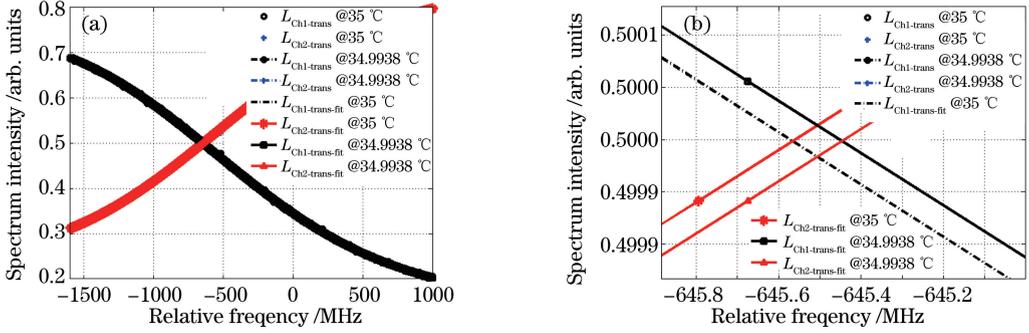


图 8 温控精度对双通道谱线的影响。(a) 35 °C 和 34.994 °C 温控点下的透过率谱线；(b) 图(a)交叉点局部细节图

Fig. 8 Effect of temperature control accuracy on dual channel lines. (a) Transmission spectra under the temperature of 35 °C and 34.994 °C ; (b) local detail of the intersection in Fig. (a)

1) RTD-Pt1000 的非线性误差

RTD-Pt1000 厂家给出的标定电阻为每隔 1 °C 一个标定点。根据(5)式的拟合曲线,可以得出 PT1000 电阻温度拟合曲线,如图 9。对比在拟合曲线和标定点之间的误差以及带来的温度误差,如表 2 所示。由表 2 可以看出,当温度范围为 10~50 °C 时,标定整温度点的误差平均值为 0.001 °C,均方根(RMS)值为 0.0013 °C。

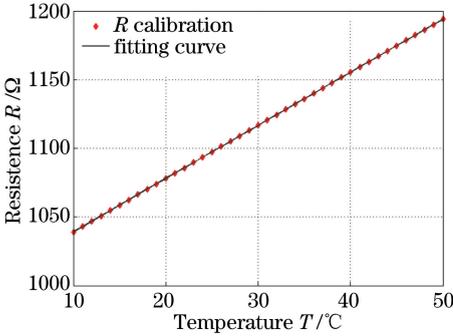


图 9 RTD-Pt1000 的电阻-温度拟合曲线

Fig. 9 Resistance-temperature fitting curve of RTD-Pt1000

表 2 RTD-Pt1000 拟合误差

Table 2 RTD-Pt1000 fitting error

Temperature /°C	R calibration /Ω	R linear fit /Ω	Error /°C
10	1039.025	1039.0263	0.0004
15	1058.495	1058.4969	0.0007
20	1077.935	1077.9391	0.0005
25	1097.347	1097.3529	0.0004
30	1116.729	1116.7384	0.0001
35	1136.083	1136.0956	0.0005
40	1155.408	1155.4243	0.0011
45	1174.704	1174.7247	0.0019
50	1193.971	1193.9966	0.0028

2) RTD-Pt1000 自热效应

选用的 RTD-Pt1000 本身自热系数 $P = 0.4 \text{ K/mW}$ 。驱动电流经 RTD-Pt1000 产生测量温

度升高值利用下式计算:

$$T_{\text{heat_error}} = I^2 \times R \times P, \quad (12)$$

式中驱动电流 $I = 210 \mu\text{A}$,在电阻 $R = 1000 \Omega$ 时的自热温升为 0.0176 °C ,经过后续校准,自热效应产生的误差可以消除。

3) 导线电阻及电流源失配误差

为了达到最佳三线式 RTD-Pt1000 最佳配置消除引线电阻的影响,引线、印制电路板(PCB)等作严格等长设计。电流源的匹配误差是指 AD7793 产生的两路电流源 $I_{\text{OUT}1}$ 和 $I_{\text{OUT}2}$ 不相等导致的误差。测量温度过程中切换 $I_{\text{OUT}1}$ 和 $I_{\text{OUT}2}$ 使得测量值为两次测量平均值,即使电流源不匹配(3)式的比值算法,其误差也被消除。

4) R_{ref} 精度及温漂

选择定制的 1000Ω 参考电阻 R_{ref} ,其精度为 0.01% ,温度稳定性 $\eta \leq 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$ 。电阻生产出来即具有确定阻值,其误差可以通过定时温度标定来消除。根据(3)、(4)式得到考虑 R_{ref} 温漂后的测量电阻误差 $\Delta R_{T_{\text{tem-drift}}}$ 公式为:

$$\Delta R_{T_{\text{tem-drift}}} = \frac{X_{\text{Code}_{in1}} + X_{\text{Code}_{in2}}}{2^{24}} \times R_{\text{ref}} \times \eta \times \Delta T = R_T \times \eta \times \Delta T. \quad (13)$$

根据 20 °C 标定值,其工作范围偏离标定值不超过 $\pm 10 \text{ °C}$,对应温漂导致的误差如图 10 所示,可以求出温度误差的 RMS 值 $T_{\text{err_drift}} = 0.0018 \text{ °C}$ 。

5) 信号放大及采集噪声

ADC 输出的 RMS 噪声与增益和输出速率密切相关。通常为了便于后续 ADC 探测,前段电压信号通常会进行放大。但是随之引入的问题就是对前级电路噪声也进行了放大,导致后续采集难以消除。此时在 ADC 更新速率为 4.71 Hz 时采集噪声数据,采集到码值 $\Delta_{\text{Code}_{in1}}, \Delta_{\text{Code}_{in2}}$ 在 $0 \sim 7$ 之间变化,即根

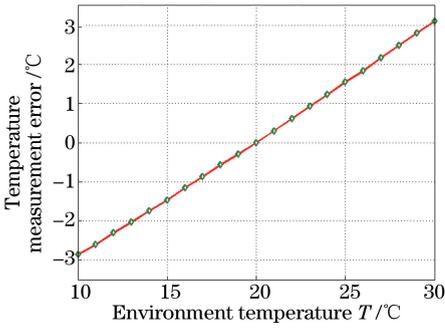


图 10 电阻温漂误差

Fig. 10 Error of resistance temperature drift

据(3)、(4)式对应探测到 RTD-Pt1000 电阻变化为 0.3 mΩ, 温度变化为 0.0001 °C。

6) ADC 非线性

AD7793 的非线性误差 $\Delta_{\text{nonlinear}} \leq 1.5 \times 10^{-5}$, ADC 满量程输出值代表电压值 V_{FSR} (本文等于 V_{ref}), 即对应探测到 PT1000 电阻变化 $\Delta R_{\text{nonlinear}}$ 的计算方法如下式所示:

$$\Delta R_{\text{nonlinear}} = \frac{\Delta V_{\text{RTD_in1}} + \Delta V_{\text{RTD_in2}}}{V_{\text{ref}}} \times R_{\text{ref}} = \frac{V_{\text{FSR}} \times \Delta_{\text{nonlinear}}}{\sqrt{2} \times V_{\text{ref}}} \times R_{\text{ref}} \leq 0.0106 \Omega, \quad (14)$$

由(14)式计算出工作时的最大温度误差为 0.0028 °C。此项误差在软件配置过程中通过 FPGA 对 AD7793 进行校准, 可以减小非线性误差。

7) 测温误差统计

由以上分析可以得出鉴频器温控系统的测量误差统计, 如表 3 所示。各个误差信号相互独立, 因此测量随机误差为各个独立测量误差的平方根值 0.0036 °C。

表 3 温度测量随机误差统计

Table 3 Temperature measurement random error statistics

Source of error	Error /°C	Description
PT1000 nonlinear	0.0013	Linear fitting
RTD-Pt1000 self-heating effect	0	Drive current 210 μA after calibration
Current source and wire resistance mismatch	0	After calibration
R_{ref} temperature drift	0.0018	Reference voltage based on R_{ref}
Signal amplification and acquisition noise	0.0001	
ADC nonlinear	0.0028	Nonlinear error $< 1.5 \times 10^{-6}$
In all	0.0036	

4.2 鉴频器谱线影响分析

为得到温控精度对鉴频器谱线强度的影响边

界, 实验中分别设置鉴频器两个温度值 34.9938 °C 与 35 °C, 并测量其两个通道的谱线, 然后将同一通道不同谱线强度相减得到 $\Delta_{\text{ch1-trans}}$ 和 $\Delta_{\text{ch2-trans}}$, 如图 11 所示。根据测量数据得到两个通道的均方差为: $\Delta_{\text{ch1-trans_STD}} = 2.9792 \times 10^{-4}$, $\Delta_{\text{ch2-trans_STD}} = 2.9830 \times 10^{-4}$, 平均值为 0.2981‰。

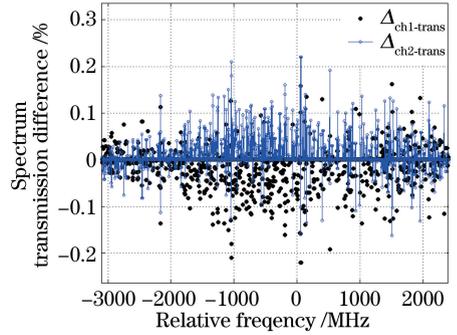


图 11 鉴频器透过率误差

Fig. 11 Transmission error of frequency discriminator

5 结 论

本文提供了一种实现鉴频器高精度温度控制方案, 并分析了该温度稳定的结果对鉴频器的影响。为了解决 FP 鉴频器温度稳定性问题, 设计了一套基于 FPGA 的双层温控组件, 采用弱电流双路方向可切换的电流源驱动方案, 显著减小了自热效应、系统器件温漂的影响, 消除了电流源匹配误差。采用基于数字和模拟混合控制技术提高了测量精度, 实验结果表明, 温度测量误差为 0.0036 °C, 在 30 ~ 50 °C 范围内实现了 0.0062 °C 的温度控制精度。该控制精度对鉴频器的影响为频率移动 0.11 MHz, 透过率误差为 0.2981 ‰, 对应速度测量误差为 0.0195 m/s。

致谢 感谢焦崇森在电路设计和调试过程中给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] Wang G C, Sun D S, Duan L F, *et al.* Analysis of factors affecting the data accuracy of Doppler wind lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0901003. 王国成, 孙东松, 段连飞, 等. 多普勒测风激光雷达风场数据影响因素分析[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0901003.
- [2] Korb C L, Gentry B M, Li S X, *et al.* Theory of the double-edge technique for Doppler lidar wind measurement [J]. Applied Optics, 1998, 37(15): 3097-3104.

- [3] Zhu X P, Liu J Q, Chen W B. Effects of atmospheric temperature on Rayleigh scattering Doppler wind lidar with the double-edge-technique [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 2005-2009.
竹孝鹏, 刘继桥, 陈卫标. 大气温度对基于瑞利散射双边缘技术激光测风雷达的影响 [J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2005-2009.
- [4] Liu J Q, Bu L B, Zhou J, *et al.* Optical frequency discriminator of a mobile direct-detection Doppler wind lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(10): 1339-1344.
刘继桥, 卜令兵, 周军, 等. 车载直接探测多普勒测风激光雷达光学鉴频器 [J]. 中国激光, 2006, 33(10): 1339-1344.
- [5] Zhang F F, Wang G C, Sun D S, *et al.* Research on the radial velocity bias in Doppler wind lidar based on Fabry-Perot interferometer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(8): 0814002.
张飞飞, 王国成, 孙东松, 等. 基于法布里-珀罗干涉仪多普勒测风激光雷达径向风速漂移研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0814002.
- [6] Bu L B, Liu J Q, Chen W B. Effect of spectrum uncertainty for direct-detection Doppler wind lidar [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(2): 335-339.
卜令兵, 刘继桥, 陈卫标. 光谱稳定性对直接探测多普勒测风激光雷达的影响研究 [J]. 光子学报, 2007, 36(2): 335-339.
- [7] Zhao R C, Xia H Y, Dou X K, *et al.* Correction of temperature influence on the wind retrieval from a mobile Rayleigh Doppler lidar [J]. Chinese Physics B, 2015, 24(2): 230-236.
- [8] Zhang N N, Han Y L, Chen T D, *et al.* Design of direct detection Doppler lidar with coherent light path [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1010005.
张楠楠, 韩於利, 陈廷娣, 等. 相干光路的直接探测多普勒激光雷达设计 [J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1010005.
- [9] Yi X J, Wen X L, Liu C M. A high-precision temperature measurement circuit design [J]. Electronic Instrumentation Customer, 2008, 15(6): 72-73.
易先军, 文小玲, 刘翠梅. 一种高精度温度测量电路设计 [J]. 仪器仪表用户, 2008, 15(6): 72-73.
- [10] Zhang Y, Zhang S W. A design of high accurate temperature measuring system based on platinum resistance transducers [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(3): 311-314.
张瑜, 张升伟. 基于铂电阻传感器的高精度温度检测系统设计 [J]. 传感技术学报, 2010, 23(3): 311-314.
- [11] Fang Y X, Lei K Z, Qu J K, *et al.* High-precision temperature measurement system based on PT1000 [J]. Electronic Design Engineering, 2010, 18(10): 79-82.
方益喜, 雷开卓, 屈健康, 等. 基于 PT1000 的高精度温度测量系统 [J]. 电子设计工程, 2010, 18(10): 79-82.
- [12] Liu M D, He H J, Du L B. Design of a high-precision temperature measurement circuit [J]. Shandong Science, 2012, 25(2): 72-75.
刘孟德, 贺海靖, 杜立彬. 高精度温度测量电路设计 [J]. 山东科学, 2012, 25(2): 72-75.
- [13] Zheng Z X, Jiang Z S, Huang G H, *et al.* Design of platinum resistance high-precision temperature measurement system [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(12): 1494-1497.
郑泽祥, 姜周曙, 黄国辉, 等. 铂电阻高精度温度测量系统设计 [J]. 机电工程, 2013, 30(12): 1494-1497.
- [14] Du S S, Ke H Q, Hu Y H. Design of temperature measurement system with high precision [J]. Light Industry Machinery, 2016, 34(3): 61-64.
杜帅帅, 柯沪琦, 胡燕海. 一种高精度温度测量系统设计 [J]. 轻工机械, 2016, 34(3): 61-64.
- [15] Song M G, Fan S C. A combined method of high precision temperature control [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(5): 560-563.
宋明刚, 樊尚春. 一种高精度温度控制的复合方法及其应用 [J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(5): 560-563.
- [16] Tian Y T, Wang H X. High-precision temperature control system for lasers [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2017, 44(3): 267-270.
田浥彤, 王海星. 激光器高精度温度控制系统的研究 [J]. 化工自动化及仪表, 2017, 44(3): 267-270.
- [17] McKay J A. Single and tandem Fabry-Perot etalons as solar background filters for lidar [J]. Applied Optics, 1999, 38(27): 5851-5858.
- [18] Xue X M. Study on properties of noise analysis with Allan variance [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2014, 34(6): 131-134.
薛学铭. Allan 方差分析测量数据噪声特性的性能研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(6): 131-134.