SAW Sensor Measurement System Based on Welch Algorithm*

GAN Yu[1,2], *TAN Qiulin*[1,2*], *HAN Lei*[1,2], *WANG Xin*[1,2]

(1.*National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan Shanxi* 030051, *China*;
2.*MOE Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan Shanxi* 030051, *China*)

Abstract: The surface acoustic wave (SAW) sensor has excellent performance and can meet the measurement requirements of harsh environments. To solve the problem that the accuracy of the sensor measurement system is poor due to the interference source inundating the echo signal, the estimation method of the Welch algorithm to improve the detection accuracy of the echo signal in a complex environment is studied, and a general temperature measurement system is designed. The performance of the algorithm in power spectrum estimation is verified. The measurement system includes transmitting and receiving links, which realizes the functions of transmitting the excitation source, receiving and processing the echo signal and calculating the temperature. We build a temperature rise experimental platform, and test the temperature of high-precision digital display heating table in the temperature range of 20 ℃ to 110 ℃. The test results show that, compared with the set temperature of the heating table, the actual temperature measurement error is controlled below 2.4%, and the system has high reliability and good measurement effect.

Key words: SAW; Welch algorithm; measurement system; echo signal; temperature calculation
EEACC: 7210A; 7230; 7220 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2021.01.018

基于 Welch 算法的 SAW 传感器测量系统*

甘 宇[1,2], 谭秋林[1,2*], 韩 磊[1,2], 王 鑫[1]

(1.中北大学电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051;
2.中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘 要: 声表面波(SAW)传感器性能卓越, 能满足恶劣环境的测量需求。针对测量过程中干扰源淹没回波信号的问题, 研究了 Welch 算法在复杂环境下对提升回波信号检测精度的估计方法, 设计了基于 SAW 温度传感器的温度测量系统, 验证了算法在功率谱估计中的性能。测量系统包括发射及接收链路, 实现了激励源的发射、回波信号的接收与处理及温度解算等功能。搭建温升实验平台, 在 20 ℃~110 ℃的温度范围通过该系统对高精度数显加热台进行温度测试。测试结果表明, 相较于加热台设定温度, 实际温度测量误差控制在 2.4%以下, 系统可靠性高且具有较好的测量效果。

关键词: 声表面波; Welch 算法; 测量系统; 回波信号; 温度解算
中图分类号: TP274 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2021)01-0091-06

传感器技术, 作为高新技术之一, 发展迅猛[1]。传统的有线传感器成本高、易老化、安全性较低, 导致传感器的安装和长期使用中出现重大问题。有源传感器无法满足在一些极端温度、高速旋转、密闭空间等恶劣环境的测量需求[2]。所以基于 SAW 技术的无线无源传感器受到广泛关注, 在过去的 30 年中取得了丰硕的研究成果[3]。

声表面波无线无源传感器因其具有高 Q 值、小体积、低成本及远距离传输特性[4-5], 对于测量参数的获取具有重要意义。测量传感器的谐振频率的方法很多, 文献[6]提出一种基于检测群时延的方法, 利用相位在谐振峰的偏移提取传感器信息, 这种方法测频范围广, 但测量过程需要使用网络分析仪, 灵活性不高。文献[7]采用的等精度测量法通过 AGC 电路对传感器信号限幅, 利用施密特触发器将波形整形为方波后送入 FPGA 测量。此种方法精度较高, 不过测频范围有限。

本文设计了一种无线无源 SAW 温度传感器测

项目来源: 国家自然科学基金项目(U1837209)
收稿日期: 2020-07-01 **修改日期**: 2020-08-02

量系统,通过分析询问天线的回波信息[8]与环境温度参数建立的对应关系,运用 Welch 算法对噪声信号进行处理[9],解算环境的温度参数,测量精度高,测频范围广。通过温升实验,验证测量系统可行性,利用最小二乘法[10]拟合温度曲线。

1 基本理论和方法

1.1 声表面波测温原理

谐振型 SAW 传感器相对于延迟线型结构的传感器,具有传输距离远,抗干扰能力强和测试精确度高等优势。声表面波测温技术的无线读取,是通过表面波器件与天线耦合实现的[11],通过提取频率信号获取环境温度值。当叉指换能器(IDT)通过应答天线受到外界的激励信号源时,由于逆压电效应,输入的电信号将转变为声信号并且此信号会沿着衬底的表面进行传播。产生的 SAW 信号被两边的反射栅反射,并与 IDT 激发的 SAW 形成驻波,产生谐振信号,谐振信号通过 IDT 将声信号转变成电信号并传递给应答天线。远程声表面波温度传感器读取系统总体结构如图 1 所示。

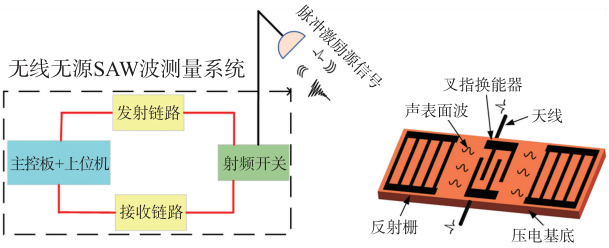


图 1 声表面波温度传感器读取系统总体结构

SAW 传感器[12]的压电基片的表面区域是声表面波传播的区域,基底压电材料的物理或化学属性发生改变[13],将导致基底中 SAW 传播速率或者 IDT 结构发生改变,最终将会引起谐振频率的变化。其中谐振频率 f_T 的温度特性满足方程[14]

$$f_T=f_0[1+a_0(T-T_0)^2+b_0(T-T_0)^2+S_G\xi] \quad (1)$$

式中:T 为测量温度,T_0 为参考温度;f_T 为测量谐振频率;f_0 为应变情况下的谐振频率;a_0、b_0 分别代表 1 阶和 2 阶的频率温度系数;S_G 为应变灵敏度;ξ 为应变大小。

1.2 Welch 算法原理

平滑周期图法(Welch 法)是一种快速傅里叶变换算法在功率谱估计中的估计方法,该方法包括对数据进行分段,对分段的数据进行修正,并对修正后的周期图进行平均。在许多情况下,这种方法比其他方法所需的计算量要少。平滑周期图法的主要优点是减少了计算量和所需的核心存储量,并且在非平稳性测试中运用广泛。

假设 $x(n)=\{x(0),x(1),\cdots\cdots,x(N-1)\}$ 是一个二阶随机序列信号,该信号的功率谱为:

$$\hat{p}(w)=\frac{1}{N}|X_N(w)|^2=\frac{1}{N}\left|\sum_{n=0}^{N-1}x(n)e^{-jwn}\right|^2 \quad (2)$$

N 为二阶随机序列的长度,因信号的 FFT 变换及其功率谱具有周期性,所以这种估计方法称为周期图法。理论上该估计方法是渐近无偏的非一致估计。假设正态白噪声信号,方差是 σ_x^2,而按照周期图法估计:

$$\mathrm{Var}[\hat{P}_{\mathrm{PER}}(e^{jw})]\overrightarrow{N\to\infty}\sigma_x^4 \quad (3)$$

周期图的方差总是趋近于 σ_x^4,而正态白噪声信号功率谱真值是 σ_x^2,所以均方误差过大,功率谱在 σ_x^2 附近起伏很大,和理论值差距大,不是一致估计。

Welch P D 提出的 Welch 算法[15]解决了当 N 趋向于无穷大时,方差性能差及频谱泄露的问题,是对周期图法的一种改进:

(1)将二阶随机序列信号 $x(n)$ 的数据视为能量有限信号,分为 L 段,每段的长度为 M;

(2)对分段的数据进行加窗处理;

(3)求每一段数据的功率谱 $\hat{p}(w)$;

(4)对所有分段的功率谱累加、除以 N,求平均功率谱。

用 $\hat{P}_{\mathrm{PER}}(e^{jw})$ 表示整个信号序列 $x(n)$ 的功率谱估计:

$$\hat{P}_{\mathrm{PER}}(e^{jw})=\frac{1}{\mathrm{MUL}}\sum_{i=1}^{L}\left|\sum_{n=0}^{M-1}X_N^i(n)w(n)e^{-jwn}\right|^2 \quad (4)$$

通过分段求功率谱再累加求平均,有效降低了序列的方差,各分度数据相互独立,减小了随机起伏的现象,是一种优良的估计方法。

2 系统设计及实现

无线无源温度测量系统总体思路为:主控板和上位机组成的微控制单元,控制着发射及接收链路,其中发射链路包含激励信号源、滤波器、功率放大器,实现问询信号的发送。接收链路包含低噪声放大器、带通滤波器、运算放大器、模数转换器等。当发射的扫频信号与应答天线的谐振频率相同时,传感器被激励产生的谐振信号最强。接收链路通过电磁耦合方式接收传感器受到激励谐振后产生的回波信号。调制开关通过周期性开启和关断产生间歇性正弦激励信号。射频收发隔离开关,主要作用是实现询问单元发送与接收之间的切换,起到链路隔离的作用。测量系统结构框图如图 2 所示。

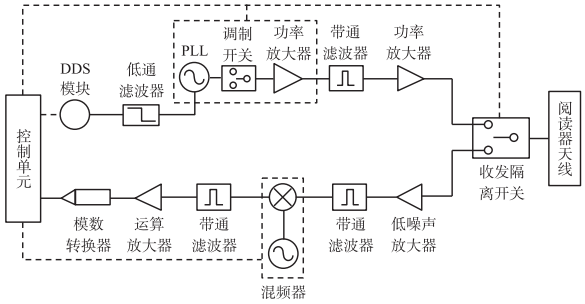


图 2　测量系统结构框图

2.1　信号发射链路设计

2.1.1　射频激励源设计

直接数字式频率合成器(DDS),主要由信号发生器部分和控制部分组成[16]。DDS 信号源(AD9910)产生相应的正弦电流信号。基于微控制器指令,信号通过低通滤波器(LPF)、高通滤波器(HPF)和信号调节电路。A/D 芯片采集输出的正弦信号,将采集数字信号至 STM32F407 单片机主控板与用户设定值相比较,保证输出正弦电流信号是标准的。通过主控板调节 DDS 的三个信号控制参数:频率、相位和幅度。配合高精度温度补偿型晶振(TCXO)产生频率、相位可编程控制的并且频谱纯净的模拟正弦波输出。

DDS 产生两路低频信号,经锁相环(PLL)64 倍频,分别作为发射模块的激励源及接收模块的本振信号。

2.1.2　功率放大器设计

发射链路的发射功率应足够大,即激励信号在经过无线传输路径损耗后,回波信号仍然能够被接收链路检测到。温度传感系统的传输距离约为 1 m,选择的功率放大器的增益应在 20 dB~30 dB 之间,芯片的工作范围需包含射频信号的频率范围。根据以上要求,功率放大器选择 ADI 公司的 HMC580 组成一个分布式功率放大器,工作在直流和 1 GHz 之间。

锁相环倍频后激励源通过两级功放实现射频放大,射频放大电路由两级组成,第一级功放 PA1 将信号功率放大到 13.5 dBm,第二级功放 PA2 将信号功率放大 30 dBm,功率放大电路如图 3 所示。

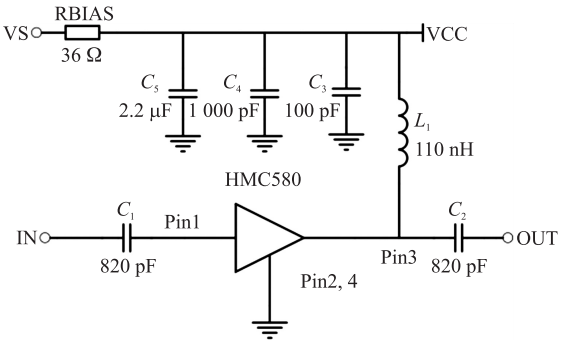


图 3　功率放大电路

2.2　Welch 算法的频率估计

为了分析 Welch 算法在功率谱估计中的性能,对有噪序列进行功率谱估计。采用的信号是正弦信号加高斯白噪声,采样率 F_s=1 000 Hz,交叠数为 8,正弦信号的频率为 f=433 MHz,所用数据长度 N=400。将周期图法与 Welch 法得到的功率谱曲线进行对比,如图 4 所示。

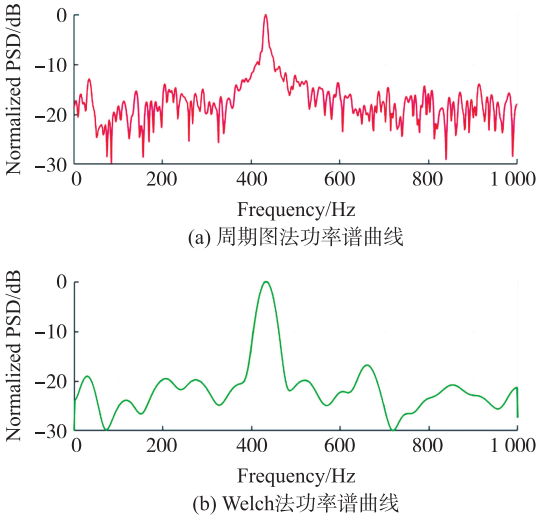


图 4　周期图法与 Welch 法功率谱曲线

由图 4 可知,周期图法功率谱线起伏较为剧烈,而且在谱峰处起伏较大,这种方法功率谱分辨率高,但是方差性能差。在实际测试环境中,背景环境不可能是绝对的纯净环境,由于干扰信号的存在谱峰甚至有被淹没的可能性。而 Welch 法估计的功率谱曲线,起伏平缓并且方差性能好,估计的功率谱也较为平滑,虽然 Welch 法是以分辨率的下降及偏差的增大为代价的,不过此种方法,原理简单易实现,能够得到较为准确的估计效果。

2.3　信号接收链路设计

影响回波信号质量的主要是电路的噪声及测试环境的干扰源。噪声的来源很多,包括前置放大电路混入的噪声以及 ADC 采样噪声。干扰信号的存在对传感器测试产生了很大的影响,甚至有可能会淹没传感器回波信号。回波信号接收的基本功能,指在一定信噪比(SNR)条件下,接收传感器谐振产生的小功率回波信号。收链路可以检测到最小功率 P 为:

$$P=F*\mathrm{SNR}*kT*B \tag{5}$$

式中:kT 是热能,B 是接收器的带宽,F 是接收器的噪声系数,最小功率 P 越低,检测的回波信号的灵敏度越低,电路稳定性就越高。由式(5)可知,噪声系数 F 直接影响接收链路功率 P 带宽越小,热噪声的功率越低,适当减小带宽能提高接收链路的检测能力。

综合以上要求,测量系统接收链路必须要有足

够高的信噪比、较大的动态范围。其中低噪声放大器处于接收链路前端,对微弱的回波信号进行放大,在整个测量系统中尤为重要。低噪声放大器的选取需根据电路实际情况权衡噪声系数、外部电路阻抗、增益及电路带宽等参数。防止信号失真,同时为了保证后级混频器工作在线性工作状态,增益不能过大,低噪声放大芯片选用凌力尔特公司的 RF2361,电路如图 5 所示。

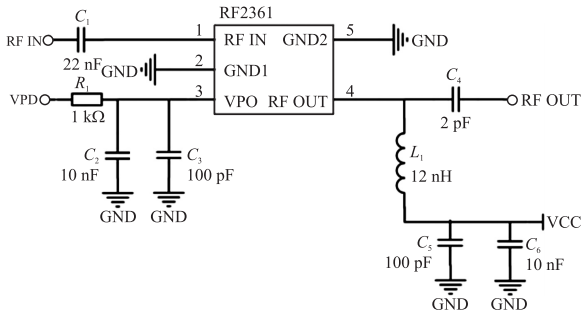


图 5 低噪声放大器电路图

混频器位于低噪声放大器之后,直接处理 LNA 放大后的射频信号。混频器选用 ADI 公司的 AD8343,通过计算回波信号与射频激励信号的频差,从而得到温度造成传感器变化的频率值。

2.4 软件设计

温度测量系统开始工作后,它将首先进行软件复位,包括微控制单元程序,DDS 及 PLL 模块程序,模数转换器程序等。复位后,设定的频率经过滤波及功率放大,微控制单元打开射频隔离开关,通过天线发送扫频信号。进行一次扫频后,判断是否已发送扫描信号。成功发射完毕后,判断接收链路能否接收到信号,若不能则说明扫频频率值过低,不足以激励温度传感器,因此增加 DDS 频率。扫频完成后,对回波信号进行 Welch 运算,得到谐振频率。根据谐振器温度频率曲线,解算当前环境温度值。软件流程图,如图 6 所示。

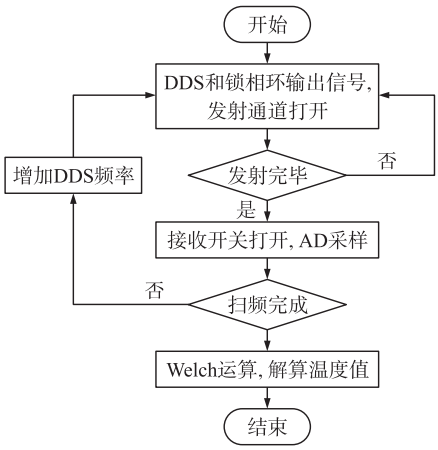


图 6 处理回波信号流程图

3 系统测试

3.1 射频信号发射测试

在程序里设置好频率值后,将程序下载到主控芯片。测试的频率值与设置值基本一样,稍微的偏差是受环境、仪器探头等的影响。使用 Tektronix 公司生产的 MDO3054 示波器测试 DDS 扫频信号频率,扫频范围是 6.707 MHz~6.803 MHz,如图 7 所示。

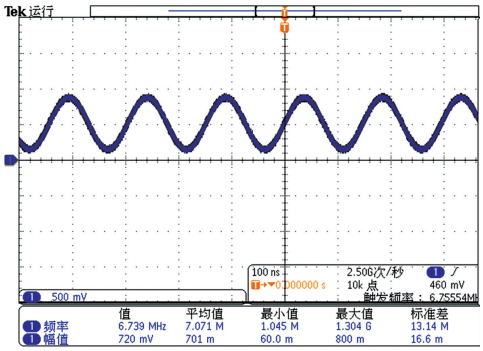


图 7 扫频信号频率

通过锁相环对 DDS 的扫频频率进行 64 倍频,锁相环倍频后的输出频率为 428 MHz~435 MHz,通过功率放大器后,从频谱仪上观测频率值及信号功率,如图 8 所示。从图中可以看出,射频发射信号主瓣带宽大,旁瓣杂波较小,与预期结果一致。

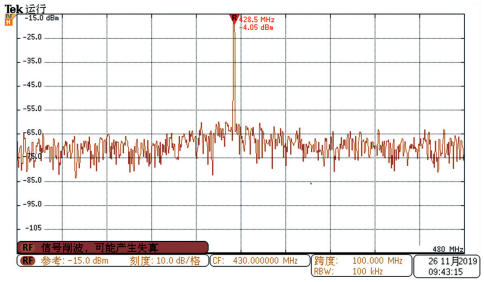


图 8 频谱仪实测频谱图

3.2 信号接收链路测试

测量系统通过天线接收传感器受到激励产生谐振后的回波信号。回波信号是一个双边带信号,其包络呈指数衰减。由于发射链路产生的激励信号在信道中传播一定的距离,需要花费时间,所以与接收链路收到的回波信号间有时延,利用射频隔离开关,将回波信号进行分离。传感器回波信号如图 9 所示。

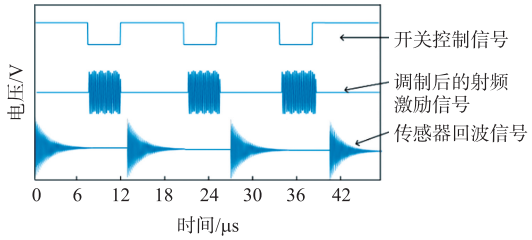


图 9 传感器回波信号

3.3　传感器温度测试

为了探究 SAW 传感器谐振频率与温度之间的关系,设计了温升实验,同时搭建了无线无源的 SAW 传感器的测试平台,如图 10 所示。将声表面波传感器放置在 SET 高精度数显恒温加热台上,控制加热台温度从室温 25 ℃以每次 5 ℃的间隔升温到 110 ℃。在数显加热平台每次调节温度后且达到稳定时,将谐振频率数据保存到上位机里,测试结束后将数据导出,剔除个别偏差较大的频率值后,一共得到 10 组数据。

表 1　温升实验测试数据

序号	温度/℃	频率/MHz	序号	温度/℃	频率/MHz
1	25	432.78	6	75	432.62
2	35	432.76	7	85	432.59
3	45	432.73	8	95	432.49
4	55	432.69	9	105	432.41
5	65	432.66	10	115	432.38

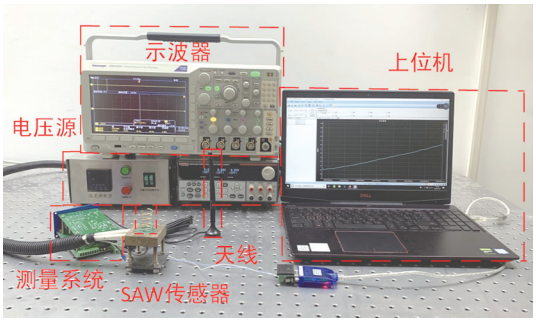


图 10　温升实验测试平台

将实验所得的数据绘制在图 11 中,使用最小二乘法对得到的数据进行拟合,图中实线为一次多项式拟合,虚线为二次多项式拟合。

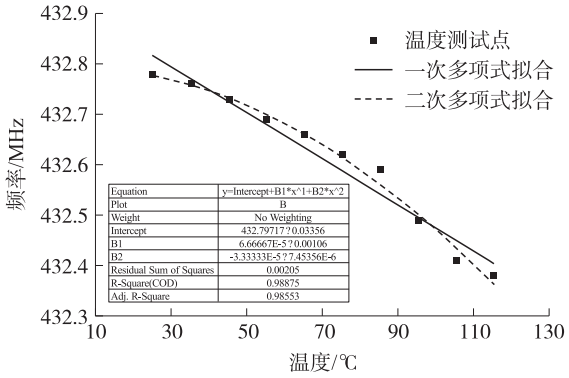


图 11　数据拟合图

根据式(1)拟合的二次多项式,f 的单位为 MHz,T 的单位为摄氏度:

$$f=-3.333\times10^{-5}T^2+6.666\times10^{-5}T+432.798 \quad (6)$$

对得到的拟合图线中较大的误差点进行分析,频率在 433.58 MHz 附近,实际测试温度为 85 ℃,而拟合曲线计算出的温度为 83 ℃。

$$\delta=\frac{T-T_0}{T_0}\times100\%=-2.4\% \quad (7)$$

由式(7)可知误差比为-2.4%,误差主要来源于 DDS 频偏,电路的温漂等。

4　结语

声表面波技术已经证明了其传感和无线通信能力,它最大优势是具有无线无源信号传递特性,近年来受到国内外研究机构普遍重视,值得进一步研究。根据测温 SAW 传感器设计了基于 SAW 传感器的测量系统,包括发射及接收链路。匹配的 Welch 算法降低了噪声及背景环境干扰源对信号质量的影响,提升了温度测量精度,回波信号频谱分析结果表明算法性能良好。最后通过传感器实测验证了系统的可行性,实验结果表明该系统测量的精度高,具有优良的测试性能。

参考文献:

[1] 詹建徽,张代远. 传感器应用、挑战与发展[J]. 计算机技术与发展,2013,23(8):118-121.

[2] Wilson W C,Perey D F,Atkinson G M,et al. Passive Wireless SAW Sensors for IVHM[C]//IEEE International Frequency Control Symposium. Honolulu,IEEE,2008:273.

[3] 叶韬,金浩,董树荣,等. 无线无源声表面波传感器研究进展[J]. 传感器与微系统,2014,33(12):1-4,9.

[4] Cunha M P D,Lad R J,Davulis P,et al. Wireless Acoustic Wave Sensors and Systems for Harsh Environment Applications[C]// 2011 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks(WiSNet). IEEE,2011:41-44.

[5] Stoney R,Geraghty D,O'Donnell G E. Characterization of Differentially Measured Strain Using Passive Wireless Surface Acoustic Wave(SAW) Strain Sensors[J]. IEEE Sensors Journal,2014,14(3):722-728.

[6] 邓森洋,张万里,彭斌,等. 时域加窗技术改进无源无线 SAW 传感器测试研究[J]. 传感器与微系统,2015,34(3):8-10.

[7] 陈心宇,曾融生,洪业,等. 基于 SAW 技术的高精度频率测量仪设计与实现[J]. 压电与声光,2020(2):163-166.

[8] 魏萌,徐科军,刘铮. 基于特征参数识别的导波雷达物位计信号处理方法[J]. 电子测量与仪器学报,2015(4):84-91.

[9] 杨婧,程乃平,倪淑燕. Welch 算法在弱信号检测中的性能分析[J]. 计算机仿真,2020,37(5):235-240.

[10] 佐磊,孙洪凯,何怡刚,等. 无失效数据的 MEMS 传感器可靠性分析[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(6):69-75.

[11] 王辉,赵卫伟,宋宇. 基于 RFID 相位测量方法影响因素分析[J]. 电子测量技术,2018,41(5):23-32.

[12] 邓森洋. 无源声表面波传感器的无线测试系统研究[D]. 成都:电子科技大学,2015.

[13] 刘小锋,冯志敏,胡海刚. 压电材料动态称重传感器的融合设计方法[J]. 仪器仪表学报,2019,40(4):115-122.

[14] ChihJer Lin,Chii Ruey Lin,ShenKai Yu,et al. Study on Wireless Torque Measurement Using SAW Sensors[M]. Applied Measurement Systems. InTech,2012:221-226.
[15] Welch P D. The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra:A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms[J]. 1967,15(2):70-73.
[16] 周遐,金瑞,曹云川. 基于 DDS 技术的高精度数控信号源设计[J]. 昆明理工大学学报(理工版),2009,34(5):50-53.



甘 宇(1996—),男,四川隆昌人,硕士生,主要从事声表面波温度传感器测量系统研究,752993529@qq.com;



谭秋林(1979—),男,湖南衡南人,教授,主要从事恶劣环境下的微传感器与集成系统的研究,Tanqiulin@nuc.edu.cn;



韩 磊(1993—),男,山西太原人,硕士生,主要从事太赫兹技术与超材料方面的研究,hanlei_666@163.com;



王 鑫(1995—),男,山西吕梁人,硕士生,主要从事无线充电方向的研究,527963339@qq.com。