

声表面波温度传感器抗干扰技术研究

邓富成, 赵嫣菁, 张辰, 杨阳, 范彦平

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: **目的** 设计一种声表面波 (SAW) 温度传感器抗干扰技术, 以提高温度测量的稳定性。**方法** 分析 SAW 谐振器 (SAWR) 回波特性, 建立 SAWR 回波信号熵能量模型, 发现 SAWR 回波信号的衰减过程与熵能量的上升过程对应。当回波信号达到噪声水平时, 熵能量的单调上升过程消失。为了抑制正弦干扰设计一种改进型自相关算法, 利用该算法对信号进行去噪的同时使谐振器回波信号的衰减特性和正弦干扰的等幅特性得到保持。**结果** 根据模拟仿真结果设置了 SAWR 回波信号的检测阈值 ($V_{\text{thre}}=1$), 并对该阈值进行了蒙特卡罗仿真实验。仿真结果表明, 当信号信噪比大于 4 dB 时, SAWR 回波信号的检测率达到 86%, 而正弦干扰误检率小于 0.5%。最后应用该算法对实际的正弦信号和 SAWR 回波信号进行了检测, 得到的误检率接近于 0。**结论** 实验结果显示, 所设计的算法可以用作声表面波温度传感器的抗干扰技术。

关键词: 声表面波; 声表面波谐振器; 熵能量; 抗干扰

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)19-0098-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.19.018

Anti-interference Technology of Surface Acoustic Wave Temperature Sensor

DENG Fu-cheng, ZHAO Yan-jing, ZHANG Chen, YANG Yang, FAN Yan-ping

(School of Optical-Electrical Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to develop an anti-interference technology for surface acoustic wave (SAW) temperature sensor so as to improve the stability of temperature measurement. The characteristics of surface acoustic wave resonator (SAWR) response were analyzed, and the entropy energy model of SAWR response was established. The attenuation process of SAWR response corresponded to the rising process of entropy energy. The monotonous rising process of entropy energy disappeared when the response signal reached the noise level. An improved auto-correlation algorithm was designed to reduce the influence of the sinusoidal interference. The designed algorithm can remove the noise when maintaining the decay characteristics of the resonator response and the equal-amplitude characteristics of the interference signal. The detection threshold ($V_{\text{thre}}=1$) of the SAWR response signal was set up based on the simulation results and the Monte Carlo simulation experiments were performed on the threshold value. Simulation results showed that when the signal to noise ratio (SNR) was greater than 4dB, the SAWR response detection rate reached 86%, and false detection rate of the sinusoidal interference was less than 0.5%. Finally, the proposed algorithm was used to detect the actual sinusoidal signal and SAWR response. The false detection rate was close to 0. The experimental results show that the designed algorithm can be used as the anti-interference technology of SAW temperature sensor.

KEY WORDS: SAW; SAWR; entropy energy; anti-interference

收稿日期: 2018-05-18

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (51705326)

作者简介: 邓富成 (1995—), 男, 上海理工大学硕士生, 主攻声表面波器件设计。

通信作者: 范彦平 (1983—), 男, 博士, 上海理工大学讲师, 主要研究方向为声表面波传感器及信号处理。

温度在水果生鲜包装储运过程中起着至关重要的作用,温度越低对大部分的生鲜果蔬保鲜作用越明显,如茶树菇在 4 ℃ 和 20 ℃ 下其储存期分别为 2 d 和 15 d^[1];甜樱桃在 25 ℃ 和 5 ℃ 贮藏时,其贮藏期分别为 5 d 和 15 d,甜樱桃在 0 ℃ 贮藏 35 d 后仍具有较好的感官品质^[2];小黄鱼在不同的温度下贮藏相同一段后,其菌落总数与贮藏温度成正比,持水率与贮藏温度成反比^[3],因此对生鲜果蔬的贮藏温度的监测具有重要意义。生鲜果蔬的贮运环境通常是一种潮湿封闭环境,常用的传感器需要电源,增加了漏电的危险性,此外,电源也需要经常维护,增加了维护成本。

声表面波 (SAW) 传感器是一种可以工作于无线模式的无源传感器,可以工作于各种恶劣的环境^[4-5]。它是依靠声表面波的速度、频率等会随被测量的变化而发生变化的原理来工作。目前 SAW 传感器已用于温度、压力、扭矩、转速、高压输电线张力、流量、生物^[6-12]等许多量测量。相较于常见的其他种类传感器,SAW 传感器具有许多独特的优点,如下所述。

- 1) 纯无线无源,可进行远距离遥测,不受电源或电池寿命的限制。
- 2) 可按工作频率不同实现多点同时测量。
- 3) 体积小,质量轻,功耗低,准数字输出。
- 4) 多参数敏感,抗电磁干扰能力强,可工作于恶劣的环境条件下。

- 5) 采用半导体平面加工工艺,易于大批量生产。

SAW 传感器可用于检测贮藏运输过程中的生鲜果蔬的贮藏温度,以保证它们的新鲜度。

完整的 SAW 温度传感器系统主要由作为温度敏感单元的 SAW 器件和用于激励、接收 SAW 信号的阅读器组成。SAW 传感器系统中阅读器的主要功能是发射窄脉冲激励信号,并在激励停止后开始接收 SAW 器件的回波信号,并通过调理处理得到回波信号谐振频率,进而得到贮藏环境的温度。SAW 温度传感器工作于无线模式^[13],易受工作环境中的各种射频信号干扰。为了提高 SAW 传感器测温的可靠性需要对各种射频信号干扰进行抑制。SAW 温度传感器制作完成时,其敏感单元即 SAW 谐振器具有确定的工作频率范围,因此可以通过滤波的方法抑制环境中频率不在此范围的射频干扰信号。当干扰信号与声表面波谐振器回波信号处于同一个频段时,此时无法通过滤波的方法简单抑制。目前较常用的方法是将 SAW 传感系统进行封装隔离使外界射频干扰信号不能被阅读器接受。这种方法会导致传感系统变得相当复杂。文中在 SAW 温度传感器前期研究的基础上,提出一种声表面波回波信号检测算法,以抑制环境中的同频正弦干扰信号。

1 SAW 温度传感器干扰抑制算法

根据香依熵理论,声表面波阅读器接收的谐振器回波信号 $y(t)_{\text{off}}$ 的时域熵能量为^[14]:

$$En(t) = -\log_2 \left(\frac{P(t)}{P} \right) \quad (1)$$

式中: $P(t) = y(t)_{\text{off}} \times y(t)_{\text{off}}^*$, $P = \sum_t P(t)$, 上标*

为取共轭。从式(1)可知,如果 $P(t)$ 越大,则 $En(t)$ 越小,即熵能量大小与该点信号在总信号能量上的占比成反比。对于每一个回波信号,其振幅以 τ_0 时间常数衰减^[9-10]:

$$y(t)_{\text{off}} = A \exp \left(-\frac{\omega_0 t}{Q} + j\omega_0 t \right) \quad (2)$$

式中: A 为信号的振幅; ω_0 为信号的角频率; Q 为 SAW 谐振器的品质因数,因此有 $P(t) = A^2 \exp \left(-\frac{2\omega_0 t}{Q} \right)$ 。对于一个已采集的确定的信号,其信号总能量 P 不变,可认为是一个常数,则可以得到:

$$En(t) = \frac{2\omega_0 t}{Q} \log_2(e) - \log_2(A^2) + \log_2(p) \quad (3)$$

由于 $Q = f_0/B_r$, 其中 B_r 为谐振器的工作带宽^[15]。 $\log_2(e)$, $\log_2(A^2)$ 和 $\log_2(p)$ 为常数分别记为 A_1 , A_2 和 A_3 , 因此式(3)变为:

$$En(t) = 4A_1 \pi B_r t - A_2 + A_3 \quad (4)$$

可以看到,此时信号熵能量 $En(t)$ 的斜率为 $4A_1 \pi B_r$, 与谐振器的带宽 B_r 有关。在谐振器确定的情况下,工作过程中其 3 dB 带宽变化很小,可近似为恒定值,因此可以通过求解熵能量函数的斜率来确定信号是否包含有效激励。图 1a 是一个 435 MHz 的 SAW 谐振器的回波信号,图 1b 是得到的熵能量,其中 V_{sma} 为熵能量最小值, V_{first} 为熵能量最小值后的第一个极大值。此时从图 1b 可以看出信号熵能量在 V_{sma} 后面有一个单调上升的过程,在到达图 1a 中噪声信号水平时,即 V_{first} 处时,信号的单调上升趋势消失。信号的上升过程即表示此时有一个衰减的回波信号,因此可以通过这一上升过程 (V_{sma} 和 V_{first} 之间) 的熵能量变化特性来判断信号是否有效。

声表面波传感器的工作环境中充满了许多正弦干扰信号,当干扰信号的频率不在谐振器的工作频带时可通滤波的方式去除。还有部分干扰信号与传感器工作带宽同频段,此时无法简单的通过滤波的方法滤除。虽然这些同频正弦干扰大部分是等幅信号,但由于信道的白噪声会使正弦干扰的振幅随机变化,部分信号会呈现与谐振器回波信号类似的震荡衰减特性,如果此时直接采用上述的熵能量法来检测回波信号会引起误检。为此,需要对信号进行预处理才能进行熵能量判断。由于声表面波传感器的

回波信号是一个频率受被测量调制的信号,因此对回波信号处理的前提是不能改变信号的频率。自相关算法是一种既能去除白噪声又能保持原有信号频率的算法,因此非常适合于回波信号的处理。频率都为 750 kHz、信噪比为 8 dB 的等幅正弦信号和震荡衰减信号见图 2。分别对这 2 个信号做自相关处理,得到自相关结果见图 3。从图 3 中可以发现,信号经自相关处理后其周期特性得到保持,且大部分噪声得到抑制,但信号两边都成衰减特性,这不利

于 SAW 回波检测。

为了使受白噪声影响的正弦信号保持等幅特性,同时保证谐振器的回波信号保持震荡衰减特性,必须对自相关算法进行改进。首先产生 2 个信号,分别为:

$$\begin{aligned} x_1(i) &= y(i)_{\text{off}}, \quad i=1,2,3\cdots N \\ x_2(j) &= y(j)_{\text{off}}, \quad j=1,2,3\cdots N/2 \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $y(i)_{\text{off}}$ 为采集的原始信号, N 为采集到的谐振器回波信号长度。然后可以得到一个长度为 $N/2$ 的改进后的自相关结果:

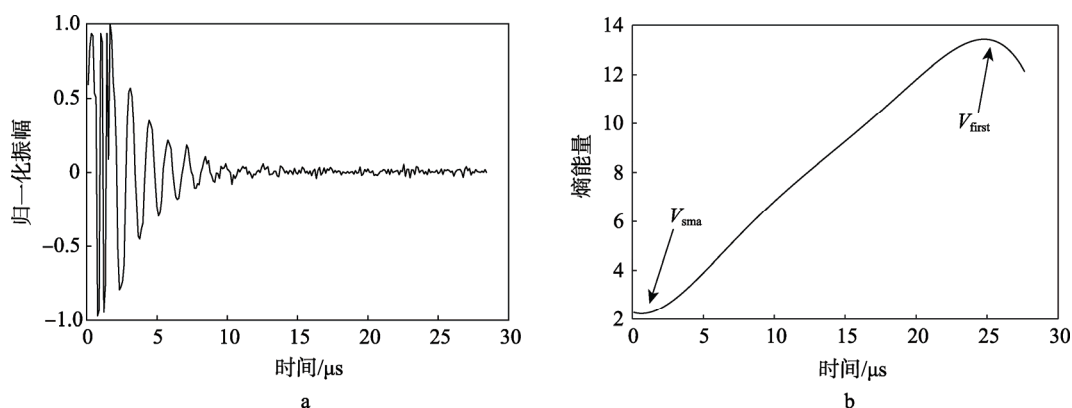


图1 表面波响应信号及分段熵能量
Fig.1 SAW response signal and piecewise entropy energy

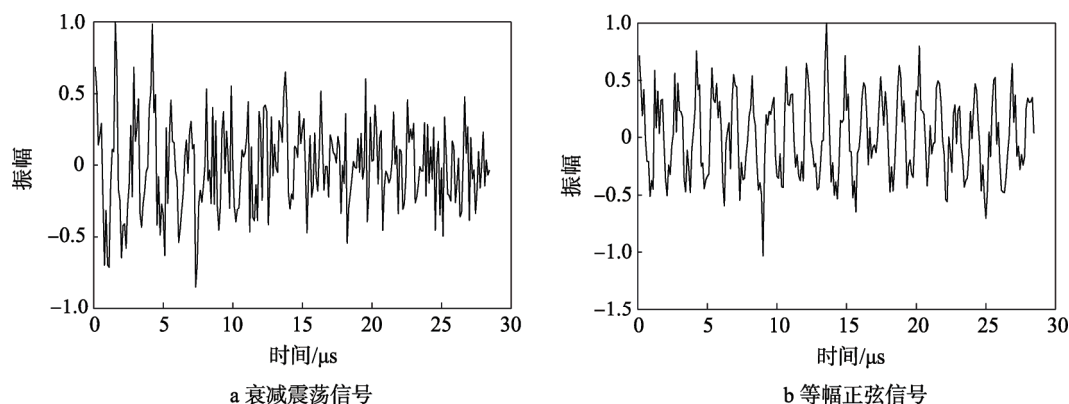


图2 混有噪声的信号
Fig.2 Signal blurred with white noise

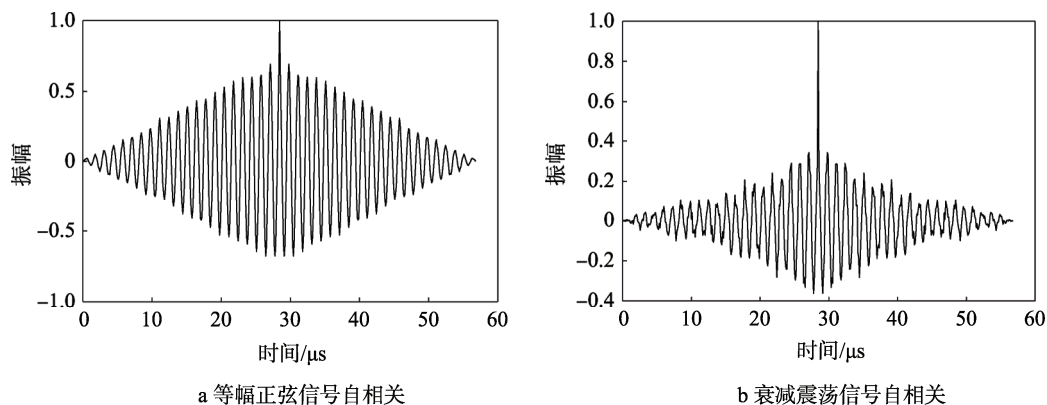
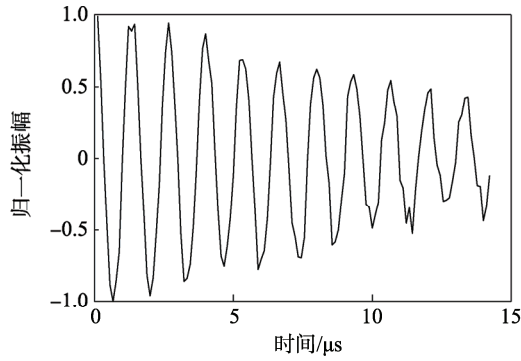


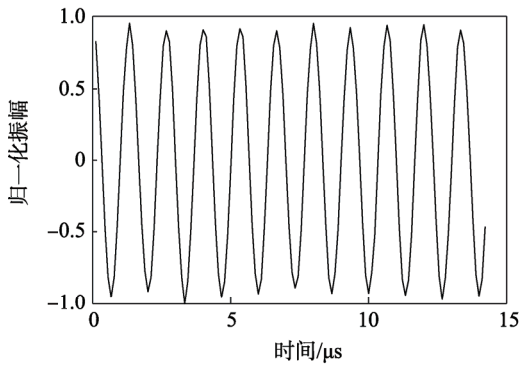
图3 自相关处理后的信号
Fig.3 Signal after self-correlation treatment

$$C_{\text{self}}(m) = \sum_{i=1}^{N/2} x_1(i+m) \times x_2(i)^*, \quad m=1, 2, 3 \cdots N/2 \quad (6)$$

经过这一处理后,等幅正弦信号仍为一近似等幅信号,而谐振器回波信号则保持震荡衰减特性,见图 4a

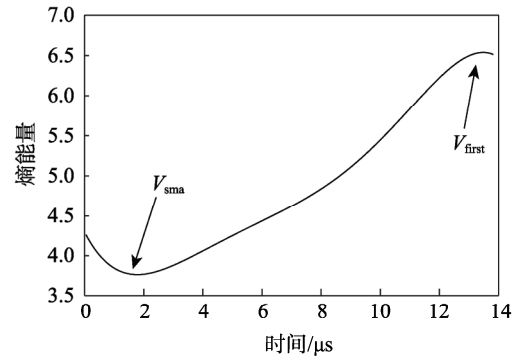


a 衰减震荡信号经改进自相关算法处理后结果

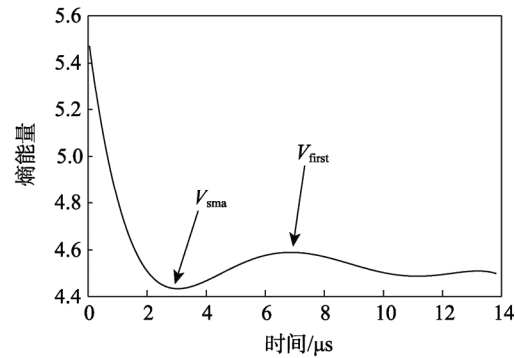


c 等幅正弦信号经改进自相关算法处理后结果

和图 2c。然后求得这 2 个经改进自相关算法处理后的信号的熵能量,见图 4b,图 4d。此时可以发现这 2 个信号的熵能量极小值和极小值后的第 1 个极大值之间的差异较大,因此,可以通过设定特定的阈值进行检测。



b 衰减震荡信号的熵能量



d 等幅正弦信号的熵能量

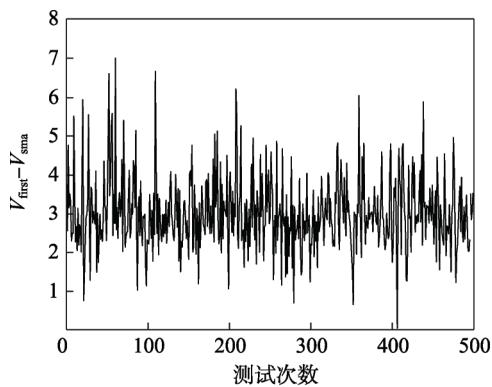
图 4 熵能量信号

Fig.4 Energy-entropy signal

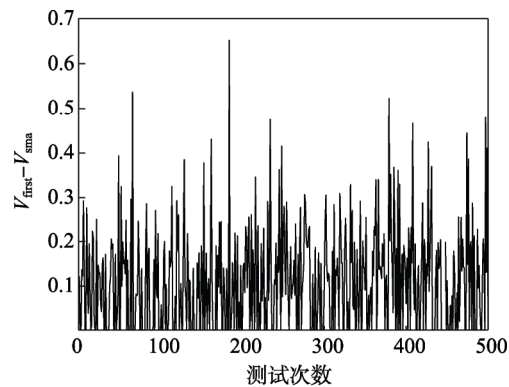
2 仿真与实验

为了设定声表面波谐振器回波信号检测阈值进行了仿真实验。信噪比为 8 dB 时的 500 次仿真结果见图 5。其中震荡衰减信号的 $|V_{\text{first}} - V_{\text{sma}}|$ 的值见图 5a;

等幅震荡信号的 $|V_{\text{first}} - V_{\text{sma}}|$ 的值见图 5b。2 个信号的频率都为 750 kHz,白噪声随机产生。通过对比可以发现,这 2 个信号的 $|V_{\text{first}} - V_{\text{sma}}|$ 的差异较大,通过设定合适的 $|V_{\text{first}} - V_{\text{sma}}|$ 的值,可以很好地区分出衰减震荡信号和等幅震荡信号。为此,对不同信噪比的信号



a 衰减震荡信号



b 等幅震荡信号

图 5 不同信号的 $|V_{\text{first}} - V_{\text{sma}}|$

Fig.5 $|V_{\text{first}} - V_{\text{sma}}|$ of different signals

分别进行了 500 次仿真实验,得到的结果见图 6。从图 6 中可以发现,当信噪比 $\text{SNR} \geq 4$ dB, 阈值设为 $V_{\text{thre}}=0.5$ 或 $V_{\text{thre}}=1$ 时,此时大部分的衰减震荡信号都能被检测出 (SAWR 回波检测率大于 86%)。当信噪比继续减少,由于信号恶化,此时检测成功率快速下降。对于等幅震荡信号,当阈值设置为 $V_{\text{thre}}=1$ 或

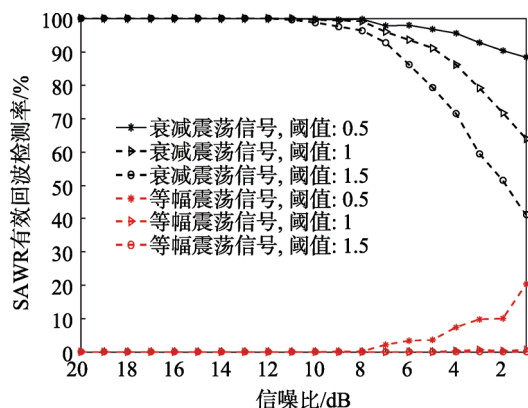


图 6 不同的信号采用不同阈值时得到不同信噪比下的检测率

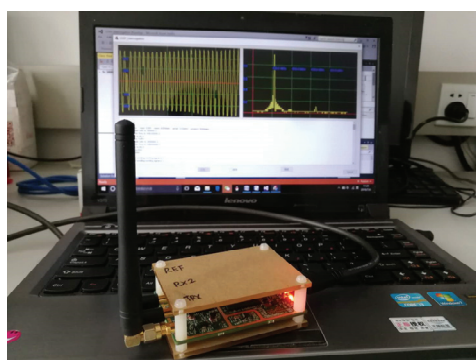
Fig.6 Detection ratio of different kinds of signals with different threshold V_{thre} under different SNR

$V_{\text{thre}}=1.5$, 此时等幅震荡信号检测为衰减震荡信号的几率小于 0.5%, 因此, 文中选用阈值 $V_{\text{thre}}=1$ 作为声表面波谐振器回波信号检测的阈值。

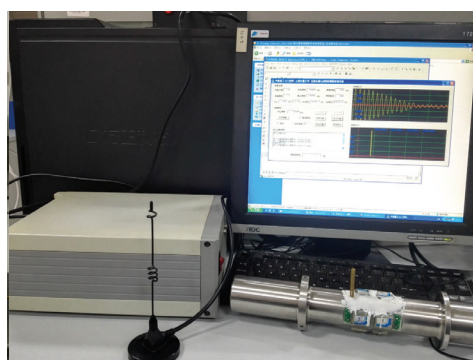
为了对设计的声表面波传感器抗等幅正弦干扰算法进行验证, 文中开展了声表面波谐振器回波信号检测实验。等幅正弦干扰信号由软件无线电平台 USRPB200MINI 产生, 见图 7a。声表面波阅读器为实验室开发的 SAW 传感器阅读器, 见图 7b。

产生的 435 MHz 的等幅正弦信号经系统采集后见图 8a, 得到的 100 组 $|V_{\text{first}} - V_{\text{sma}}|$ 的值见图 8b, 可以发现, 当阈值设为 $V_{\text{thre}}=1$ 时, USRPB200MINI 产生的等幅正弦信号能被检测为 SAW 谐振器回波信号的几率接近于 0。

此外, 对 SAW 谐振器的 100 组回波信号 (见图 1a) 用上述的检测方法进行了检测, 得到的检测结果见图 9a, 从图 9a 中可以发现, SAWR 回波信号的 $|V_{\text{first}} - V_{\text{sma}}|$ 的值都大于 1。然后进行了有等幅正弦干扰环境的 SAW 回波信号检测实验, 信号查询的间隔是 10 s。当在 50 s 的整数倍时, USRPB200MINI 发送一个同频且持续时间大于 SAW 阅读器查询周期的等幅正弦信号, 并对得到的 100 组信号进行检测, 结



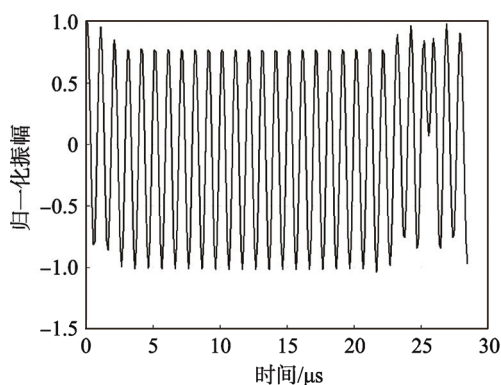
a 软件无线电平台 USRPB 200MINI



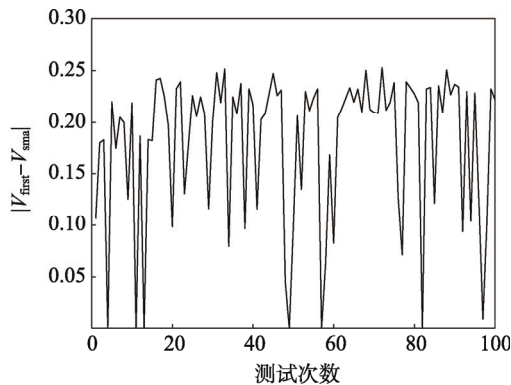
b SAW 阅读系统

图 7 无线阅读系统

Fig.7 Interrogation system



a 采集的等幅正弦信号



b 采集的等幅正弦信号的 $|V_{\text{first}} - V_{\text{sma}}|$ 的值

图 8 采集的正弦信号及熵能量值

Fig.8 Sampled sinusoidal signal and energy-entropy

果见图 9b。从图 9b 可以发现，测试次数 5 的整数倍处所得到的值基本都小于 1，这表面所设计的算法能很好地区分 SAW 回波信号和等幅正弦干扰。通过对比图 9b 和图 8b 可以发现，图 9b 中得到的等幅正弦干扰的 $|V_{\text{first}} - V_{\text{sma}}|$ 的值要大于图 8b，且在第 15, 40, 65 次的位置处的值大于 1，其原因是图 9b 中的等幅正弦干扰信号叠加有衰减震荡 SAW 回波信号，迫使信号有一个很小的衰减特性，造成接收信号的 $|V_{\text{first}} - V_{\text{sma}}|$ 的值变大。

最后，把设计的抗干扰算法用于 SAW 温度测量

实验。实验所用的恒温箱型号为 WEISS (见图 10a)，测温范围为 $-20 \sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。SAW 谐振器的基片为 Y+36 $^{\circ}$ 切石英晶体，设计的中心频率为 435 MHz。实验过程中随机发送等幅正弦干扰，最后得到的频率温度曲线见图 10b，可以发现频率温度曲线近似为一条直线，这说明所设计的算法有效抑制了正弦干扰。上述 3 个实验结果表明文中所设计的检测算法可以很好地区分等幅正弦干扰和 SAW 谐振器回波信号，可作为 SAW 温度传感器的抗干扰技术用于抑制检测环境中的等幅正弦信号。

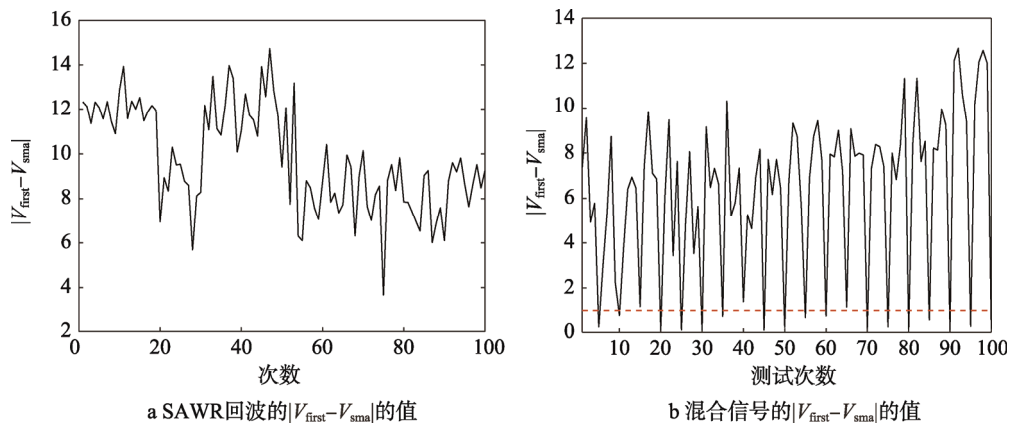


图 9 信号的 $|V_{\text{first}} - V_{\text{sma}}|$ 的值

Fig.9 $|V_{\text{first}} - V_{\text{sma}}|$ of signal

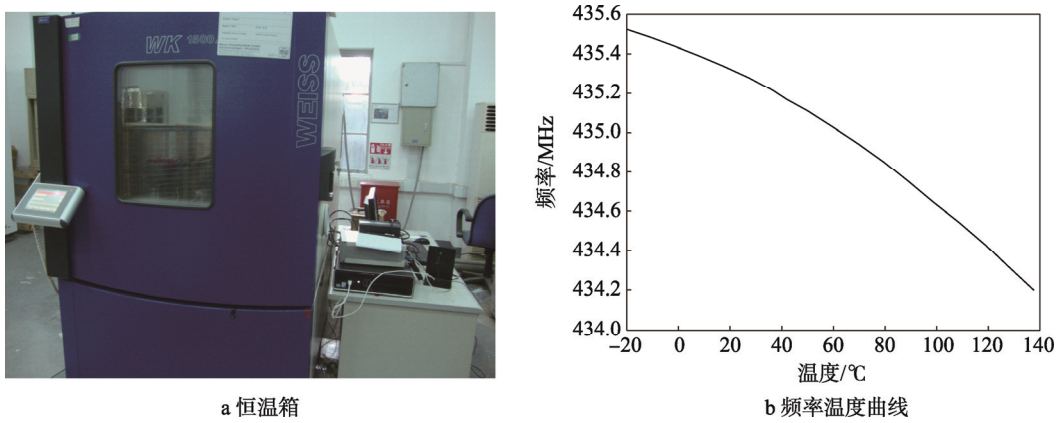


图 10 测温系统

Fig.10 Temperature measurement system

3 结语

文中分析了声表面波谐振器回波信号的特点，建立了回波信号熵能量模型，发现信号熵能量的上升过程与谐振器回波的衰减过程相对应。当信号达到噪声水平时，熵能量的单调上升过程结束。为了抑制等幅正弦信号设计了一种改进型自相关算法，通过该算法处理使信号中的大部分白噪声得到滤除，同时谐振器回波信号的衰减特性和正弦干扰的等幅特性得到保持。通过模拟仿真和实验确定了谐振器回波信号检测

阈值，并通过实验进行了验证。实验结果表明文中设计的谐振器回波信号检测算法可以很好地抑制等幅正弦干扰，为声表面波温度传感器设计提供了一种可靠的抗干扰技术。

参考文献：

[1] 赵彬, 黄美娜, 袁毅, 等. 贮藏温度对微孔膜包装茶树菇的保鲜效果影响[J]. 包装工程, 2017, 38(9): 41—45.

ZHAO Bin, HUANG Mei-na, YUAN Yi, et al. Effect

- of Storage Temperature on *Agrocybe Aegerita* Packaged with Micro-porous Film[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(9): 41—45.
- [2] 王宝刚, 李文生, 侯玉茹, 等. 常温运输后甜樱桃不同温度贮藏品质变化研究[J]. *包装工程*, 2015, 36(9): 28—32.
- WANG Bao-gang, LI Wen-sheng, HOU Yu-ru, et al. Quality Changes of Sweet Cherry During Storage at Different Temperature after Transportation at Room Temperature[J]. *Packaging Engineering*, 2015, 36(9): 28—32.
- [3] 吴行印, 谢晶, 王旭. 不同贮藏温度下小黄鱼货架期预测模型的建立和评价[J]. *包装工程*, 2016, 37(19): 84—90.
- WU Xing-yin, XIE Jing, WANG Xu. Establishment and Evaluation of the Shelf-life Prediction Model for Small Yellow Croaker under Different Store Temperatures[J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(19): 84—90.
- [4] FAN Y, JI X, CAI P, et al. Packaging the SAW Torque Sensor with Teflon[C]// *IEEE International Frequency Control Symposium (FCS)*, 2014: 1—5.
- [5] SERGEI Z, ALEXANDER S, IVAN A, et al. SAW Temperature Sensor on Quartz[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2015, 62(6): 1066—1075.
- [6] LAMOTHE M, PLESSKY V, FRIEDT J M, et al. Ultra-wide Band SAW Sensors and Tags [J]. *Electronics Letters* 2013, 49(24): 1576—1577.
- [7] BENNETT J M, CLAYTON W M, CUNHAM P D. Hydrogen Fluoride Gas Detection Mechanism on Quartz Using SAW Sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 9(11): 1768—1775.
- [8] FAN Y, JI X, CAI P. Analyzing the Installation Angle Error of SAW Torque Sensor[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(9): 1—6.
- [9] FAN Y, JI X. A Novel Rotation Speed Measurement Method Based on Surface Acoustic Wave[J]. *Acoustical Physics*, 2018, 64(1): 122—128.
- [10] FLORIAN B, FABIEN J, RACHEL E M, et al. Design of SH-surface Acoustic Wave Sensors for Detection of Ppb Concentrations of BTEX in Water[C]// *2013 Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC)*, 2013: 628—631.
- [11] ANDEL J C, VETELINO J F. Acoustic Wave Biosensors[J]. *Sensor and Actuators (A)*, 1994, 44: 167—176.
- [12] JI X, FAN Y, XIAO Q, et al. Passive Wireless Measurement of Tension for Overhead Transmission Line Based on Surface Transverse Wave[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2018, 12(8): 1866—1871.
- [13] FAN Y, JI X, CAI P, et al. Non-destructive Detection of Rebar Buried in a Reinforced Concrete Wall with Wireless Passive SAW Sensor[J]. *Measurement Science Review*, 2013, 13(1): 25—28.
- [14] ZHAO J, ZHANG Y, YE M. Research on the Received Signal Strength Indication Location Algorithm for RFID System[C]// *In Proc IEEE Sym Commun Inform Technol*, 2006: 881—885.
- [15] JI X, FAN Y, QI H, et al. A Wireless Demodulation System for Passive Surface Acoustic Wave Torque Sensor[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 125001—125008.