

提高声表面波传感器检测精度的方法

刘丹平¹, 刘亚¹, 刘晓明¹, 胡学斌², 彭云¹, 汪梦柔¹, 曾孝平¹, 冯文江¹

(1. 重庆大学通信工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:在利用声表面波(SAW)进行检测的系统中,回波相位解调的相位模糊严重影响检测精度。针对延迟线型声表面波温度传感器,理论分析表明,结合时延测量和相位测量的解调方法可唯一确定待测量;实验证明,在温度变化较大的范围内,该方法能解决相位模糊问题,检测精度可达 0.5 °C。

关键词:声表面波;传感器;相位模糊;相位解调;时延解调

中图分类号:TP 212.1 **文献标识码:**A

Novel Method of Improving Detection Precision of SAW Sensor

LIU Danping¹, LIU Ya¹, LIU Xiaoming¹, HU Xuebin², PENG Yun¹, WANG Mengrou¹,
ZENG Xiaoping¹, FENG Wenjiang¹

(1. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Key Lab. of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education of China,
Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: In the detection system based on SAW, the detection precision is affected by the phase ambiguity of the echo phase demodulation. The theory analysis showed that the demodulation method combining the time delay measurement with the phase measurement could uniquely determine the physical quantity to be measured for the delay line SAW sensor. The experiment verified that the proposed method could solve the phase ambiguity problem within a large temperature range and the detection accuracy could be up to 0.5 °C.

Key words: surface acoustic wave; sensors; phase ambiguity; phase demodulation; time delay demodulation

0 引言

声表面波(SAW)传感器因其检测精度较高和无线无源的优点而得到广泛研究^[1-10]。该传感器可用于较多参量的测量,如温度、压力、扭矩等,尤其是危险环境中这些参量的实时检测。对于延迟线型SAW传感器,回波信号采用相位测量的精度要比时延测量高 150~1 500 倍。但当相位超过 2π 时,相位模糊问题阻碍了传感器的高精度解调。

对于相位模糊问题,Jan H. Kuypers 等提出了使用相位差来得到被测量变化^[9]。该方法通过降低相位差的灵敏度来避免产生相位模糊问题,但计算量相应增加。本文详细讨论了相位模糊问题,理论分析了结合时延测量和相位测量相结合的方法可唯一确定待测量。实验结果表明,该方法既保证了较高的相位解调的精度,又兼顾了较大的测量量程。

1 测量原理

图 1 为延迟线型 SAW 芯片结构图。图中, IDT 为叉指换能器。我们定义信号由 IDT 到反射栅 1, 2, 3 后,经反射后再回到 IDT 的时延分别为 τ_1 , τ_2 和 τ_3 ,与时延相对应的相位值分别为 φ_1 , φ_2 和 φ_3 。

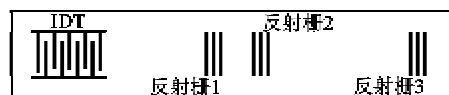


图 1 延迟线型 SAW 器件结构

被测量变化导致基底变形所引起的总延迟时间与被测量 X 之间的关系^[9]:

$$\tau_X = \tau_{X_0} [1 + \alpha \cdot (X - X_0)] \quad (1)$$

式中: τ_{X_0} 是初始状态为 X_0 时 2 个反射栅间的时延差; α 为基底材料的敏感系数; τ_X 是状态为 X 时反射栅间的时延差。

收稿日期:2011-06-02

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(1010200220100131);重庆大学研究生科技创新基金创新资助项目(CDJXS11160018)

作者简介:刘丹平(1969-),男,四川邻水人,副教授,博士,主要从事新型传感器、无线传感器网络和车联网的研究。E-mail: ldpsbs@163.com。

如果用 τ_{210} 表示状态为 X_0 时反射栅 1、2 间的时延差, τ_{21} 表示状态为 X 时反射栅 1、2 之间的时延差, 则

$$\tau_{21} = \tau_{210} [1 + \alpha(X - X_0)] \quad (2)$$

对于无色散的延迟线型 SAW 传感器, 相位与延迟时间变化有关, 可表示为:

$$\varphi_{21} = 2\pi f \tau_{210} [1 + \alpha(X - X_0)] \quad (3)$$

式中: f 为信号频率; φ_{21} 为反射栅 1、2 之间的相位差。

当温度发生变化时, 反射栅之间的时延差和相位差会发生变化。通过测定信号的时延和相位变化, 可得到相应的被测量变化。

如果相位变化 2π 不能涵盖整个测量范围时, 一个相位值就会对应被测量 X 的多个值, 因此, 当使用相位求被测量时, 很难确定被测量的实际值。由式(2)、(3)可得

$$\Delta\tau_{21} = -\tau_{210}\alpha \cdot (X - X_0) \quad (4)$$

$$\Delta\varphi_{21} = -2\pi f \tau_{210}\alpha \cdot (X - X_0) \quad (5)$$

式中: $\Delta\tau_{21}$ 为被测量变化所产生的时延差; $\Delta\varphi_{21}$ 为被测量变化所产生的相位差。

信号周期 $T_X = 1/f$ 。令 $\Delta X = X - X_0$, 当 $\Delta\tau_{21} = T_X$ 时, 可得

$$\Delta X = -\frac{T_X}{\tau_{210}\alpha} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5), 可得

$$\Delta\varphi_{21} = 2\pi \quad (7)$$

可见, 当被测量变化 ΔX 时, 相位将产生 2π 的变化, 就会产生相位模糊问题。而时延差的变化值为:

$$\Delta\tau_{21} = \tau_{210} - \tau_{21} \quad (8)$$

由于相位变化的时间周期为 T_X , 因此相位变化的周期数为

$$n = \left[\frac{\Delta\tau_{21}}{T_X} \right] \quad (9)$$

式中 $[]$ 表示取整。

当 $\Delta\tau_{21} = T_X$ 时, 可得

$$\Delta X = T_X / \tau_{210}\alpha \quad (10)$$

因为 φ_{21} 处在 2π 范围内, 而 $2\pi f$ 一般可近似为 2π 的整数倍。由式(3)可看出, 由 φ_{21} 得到的被测量处于 1 个周期内。在 2π 内, 被测量和相位差之间的关系可表示为

$$X_1 = \frac{\varphi_{21}}{2\pi f \tau_{210}\alpha} + X_0 \quad (11)$$

故实际被测量可表示为

$$X = X_1 + n \cdot \Delta X \quad (12)$$

2 延迟线型 SAW 温度传感分析

利用上述结论, 我们讨论了延迟线型 SAW 温度传感器相位差、时延差和被测温度间的关系, 其结果如图 2 所示。由图可知, 对应于某个 φ_{21} 会有多个温度值, 但结合 τ_{21} 的测量, 将只有一个温度值。因此, 我们提出了结合时延测量和相位测量的解调思路: 首先利用时延差粗略定位温度所处范围, 然后利用位相差精确确定温度值。

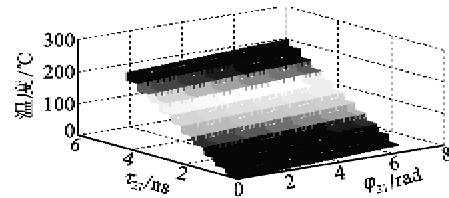


图 2 相位差、时延差和被测温度的关系

我们建立了实验系统来分析相位模糊问题。SAW 器件有 4 个反射栅, 其中心频率为 925 MHz, 该器件 $\alpha = -70 \mu\text{C}^{-1}$, 初始温度 T_0 为 25 °C。

通过相干解调得到的 I、Q 两路基带信号如图 3 所示。其中较宽的脉冲是环境直接反射的信号, 2 个较宽脉冲间的 4 个较窄的脉冲是 4 个反射栅反射的脉冲。

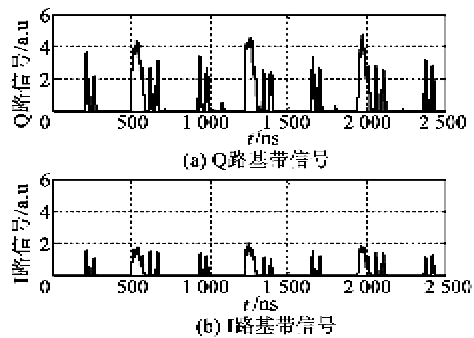


图 3 I、Q 两路基带信号

用每条反射栅反射脉冲的峰值表示脉冲位置, 即一定温度下时延值。该时延值处的 I、Q 两路基带信号幅度之比是位相的正切值 $\tan \varphi$ 。温度变化后, 时延值的变化表示时延差, 由此可计算位相差。图 4 为相位差与被测温度的关系图。由图可见, 在一定范围内相位差与温度成线性关系, 当温度变化超过 29.27 °C 时, 就会出现相位模糊。

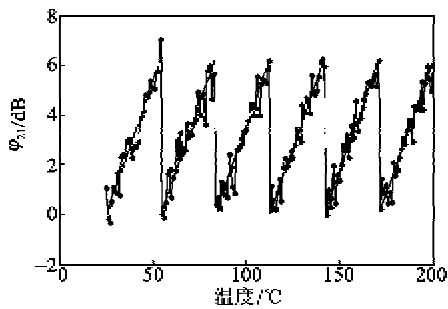


图4 相位差与被测温度的关系图

结合时延测量和相位测量,就可解决这个问题。我们仅给出了待测环境温度在0~50℃范围内的数据,实际测量范围更大。图5为实际温度与测量温度的关系图。由图可见,随着环境温度的升高,测量值在每个变化的真值温度上下波动。数据统计表明,不同真值温度的标准方差是一个随机量,最大值为0.5℃。

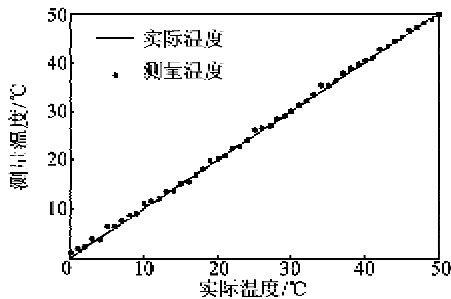


图5 实际温度与测量温度的关系图

3 结束语

在SAW传感器中,提高解调精度是关键技术之一。本文讨论了SAW传感器解调过程中的相位模糊问题,理论分析表明,结合时延测量和相位测量的解调方法可唯一确定待测量;实验证明,在温度变化较大的范围内,该方法能解决相位模糊问题,检测精度可达0.5℃。

致谢:感谢中国电子科技集团公司第26研究所对本研究的大力支持!

参考文献:

[1] SCHOLL G, OSTERTAG T, REINDL L, et al. Remote sensing of physical parameters by means of passive surface acoustic wave devices ('ID-tag')[J]. NJ, United States, IEEE, Piscataway, 1994, 1(11): 589-592.

- [2] VARADAN V, TEO P, JOSE K, et al. Design and development of a smart wireless system for passive temperature sensors[J]. Smart Materials & Structures, 2006, 9(4): 375-368.
- [3] 袁小平. 国外声表面波传感器开发近况[J]. 压电与声光, 1995, 17(4): 6-10.
YUAN Xiaoping. Recent development of foreign SAW sensor[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 1995, 17(4): 6-10.
- [4] 文玉梅, 周志坤, 李平, 等. 声表面波无源无线传感器研究[J]. 传感器世界, 2004, 10(4): 6-10.
WEN Yumei, ZHOU Zhikun, LI Ping, et al. Research of passive wireless SAW sensor[J]. World of Sensor, 2004, 10(4): 6-10.
- [5] 程卫东, 董永贵, 王生江, 等. 基于声表面波器件的无源传感器的研究[J]. 传感器技术, 2000, 13(6): 1-3.
CHENG Weidong, DONG Yonggui, WANG Shengjiang, et al. Study on passive sensor based on SAW device[J]. Technology of Sensor, 2000, 13(6): 1-3.
- [6] 杜峰, 施文康, 韩韬. 无线声表面波传感信号的正交采样处理[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(4): 570-573.
DU Feng, SHI Wenkang, HAN Tao. Quadrature sampling of the wireless surface acoustic wave sensor signals[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(4): 570-573.
- [7] FRIEDT J, RÉTORNAZ T, ALZUAGA S, et al. Surface acoustic wave devices as passive buried sensors[J]. J Appl Phys, 2011, 109(034905): 1-9.
- [8] BAO Q, BURKHARD W, VARADAN V, et al. SAW temperature sensor and remote reading system [C]//New York, NY, USA; IEEE, Proc IEEE Ultrason Symp, 1987: 583-586.
- [9] JAN K, LEONHARD R, SHUJI T, et al. Maximum accuracy evaluation scheme for wireless SAW delay-line sensors[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2008, 55(7): 1640-1652.
- [10] REINDL L, SHRENA I, KENSHI S, et al. Wireless measurement of temperature using surface acoustic waves sensors[A]//Proceedings of the annual IEEE international frequency control symposium[C]//S. I.: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2003: 935-941.