

# 基于 SAW 谐振器无源无线传感器编码方法研究

崔宏杰, 张向文

(桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:**为简化声表面波(SAW)传感器的编码过程,提出了一种基于 SAW 谐振器的编码方法,通过多个不同中心谐振频率的 SAW 谐振器分别连接不同的负载阻抗进行传感器的编码。设计了传感器的具体结构,建立了传感器的等效电路模型,利用 ADS 仿真软件对中心谐振频率分别为 868 MHz 和 915 MHz 的 2 个 SAW 谐振器组成的传感器进行仿真,结果表明,SAW 谐振器外接 1 pF 与 4 pF 的阻抗,其谐振频率差可达 200~300 kHz。根据仿真结果,设计制作了不同编码的 2 个传感器,一个不外接阻抗,一个外接 10 pF 的阻抗,测试谐振频率差别可达 39.75~40.2 kHz,因此,SAW 谐振器外接不同阻抗时谐振频率的差异明显,基于 SAW 谐振器与外接阻抗的传感器编码方法是可行的。

**关键词:**声表面波(SAW)谐振器;无源无线;传感器;编码;外接阻抗

**中图分类号:**TN65 **文献标识码:**A

## Coding Method of Passive Wireless Sensor Based on SAW Resonator

CUI Hongjie, ZHANG Xiangwen

(School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electric Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** In order to simplify the coding process of the SAW sensor, a novel encoding method is proposed based on SAW resonators connecting SAW resonators with different center frequencies to different load impedance. The specific structure of the encoded sensor is designed and the equivalent circuit model is established. Two sensors consisted with SAW resonators of the center resonant frequency of 868 MHz and 915 MHz respectively, were simulated using the ADS simulation software. The results show that the center resonant frequency difference of the two SAW resonators with 1 pF external impedance and 4 pF external impedance reaches to 200-300 kHz. According to the simulation results, two different encoded sensors, one with no external impedance and another with 10 pF external impedance, were designed and tested. The measured resonant frequency difference can reach to 39.75-40.2 kHz. So the resonance frequencies of the two SAW resonators with different external impedance are different, and the sensor coding method based on the SAW resonator and the external impedance is feasible.

**Key words:** SAW resonator; passive wireless; sensor; coding; external impedance

### 0 引言

声表面波(SAW)传感器具有无源、无线、体积小,质量轻,灵敏度高,传播损耗低及抗电磁干扰能力强的优势,特别适用于高温、高污染、高电压及强电磁干扰等恶劣环境和封闭中空空间、旋转、高速运动等常规传感器无法工作的场合<sup>[1]</sup>,具有广泛的应用前景。在进行多传感器应用的场合,需进行传感器的区分和编码。

目前,SAW 传感器的编码方法主要有:

1) 李平等研究的基于 SAW 谐振器外加延

迟线的编码方法<sup>[2]</sup>,通过传感器返回信号的不同延时实现编码,这种编码方法需进行延迟线的专门和制作,编码的灵活性不高。

2) Malocha D. C. 和 Saldanha N. 等人研究的正交频率编码方法<sup>[3-7]</sup>,通过改变 SAW 谐振器的内部结构设计特定的传感器,使传感器的回波信号为一定带宽的正交频率,从而实现对传感器的编码。该方法需对 SAW 谐振器作专门设计与制作,过程复杂,编码方式不灵活,无法实现较大规模的编码。

本文提出一种基于 SAW 谐振器的无源无线传

收稿日期:2013-12-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60804059);广西自然科学基金资助项目(2010GXNSFA013130)

作者简介:崔宏杰(1988-),男,山西阳泉人,硕士生,主要从事无源无线传感器、嵌入式系统及汽车电子方面的研究。E-mail:569225590@qq.com。张向文(1976-),男,河南南阳人,研究员,博士,主要从事汽车电子、SAW 传感器、智能控制和信号处理的研究。E-mail:zxw@guet.edu.cn。

传感器编码方法,该方法不需改变 SAW 谐振器的内部结构,通过外部电路将 2 个或更多中心频率不同的 SAW 谐振器连接在一起,SAW 谐振器连接外部负载阻抗组成传感器。SAW 谐振器连接不同的外部负载阻抗可得到不同的中心谐振频率,实现 SAW 谐振器的区分,不同中心谐振频率的谐振器组合可实现传感器的编码和识别。用不同频率间歇正弦脉冲信号作为激励信号,SAW 谐振型传感器的回波信号为多个瞬变振荡信号,接收系统可根据回波信号的频率组合区别出不同传感器,实现不同 SAW 谐振型传感器的编码与识别。该编码方法易实现,且编码较灵活,可实现较大规模的编码。

本文首先给出设计传感器的结构,然后根据传感器的结构建立传感器的等效电路,推导出传感器谐振频率的计算公式,利用 ADS 软件进行不同编码的传感器仿真,最后,设计制作了 2 个不同编码的传感器,进行实验测试研究,验证了设计方法的正确性。

## 1 传感器结构

本文以 2 个 SAW 谐振器进行传感器编码方法的阐述。传感器的结构如图 1 所示。

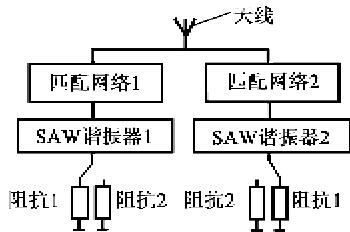


图 1 传感器结构示意图

该传感器由 2 个 SAW 谐振器共用 1 个天线,每一个 SAW 谐振器分别连接独立的匹配网络和外部负载阻抗,假设 SAW 谐振器 1 的谐振频率为  $f_1$ ,SAW 谐振器 2 的谐振频率为  $f_2$ 。每个 SAW 谐振器外接阻抗各有 2 种,分别为阻抗 1、2。外部负载阻抗可改变 SAW 谐振器的谐振频率,因此,SAW 谐振器 1 外加阻抗 1 的谐振频率为  $f_{11}$ ,SAW 谐振器 1 外加阻抗 2 的谐振频率为  $f_{12}$ ,SAW 谐振器 2 外加阻抗 1 的谐振频率为  $f_{21}$ ,SAW 谐振器 2 外加阻抗 2 的谐振频率为  $f_{22}$ 。假设频谱没有重合, $f_{11} < f_{12} < f_{21} < f_{22}$ ,由传感器结构可得出 4 种编码: $f_{11} f_{21}$ 、 $f_{11} f_{22}$ 、 $f_{12} f_{21}$ 、 $f_{12} f_{22}$ 。

当外部负载阻抗的类型和 SAW 谐振器的数量增加时,编码的容量也随着增加。假设外部负载阻抗类型的数量为  $N$ ,SAW 谐振器的数量为  $m$ ,编码的数量可达到  $N^m$ ,因此,这种编码方法可实现大规

模的编码。

## 2 传感器等效电路

为简化分析,SAW 谐振器用电容、电感和电阻的 LRC 串并联谐振电路等效,外接阻抗用电容阻抗,匹配网络用  $\pi$  型电感-电容-电阻电路,可建立图 1 所示的传感器结构的等效电路如图 2 所示。图中, $L_0 L_2$  和  $C_0 C_4$  分别为 2 个 SAW 谐振器基片弹性和惯性引起的动态电感和动态电容, $C_1$  和  $C_5$  为 2 个 SAW 谐振器叉指换能器 (IDT) 的静电容, $R_0$  和  $R_2$  为阻尼引起的动态电阻。

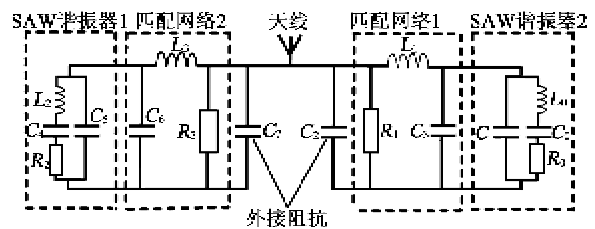


图 2 传感器等效电路

由图 2 可得 SAW 谐振器的中心谐振频率与外接阻抗大小的关系。以图 2 中 SAW 谐振器 1、匹配网络 1 的等效电路和外接阻抗  $C_2$  进行推理计算。

SAW 谐振器 1 等效电路的导纳为

$$Y_1(j\omega) = \frac{R_0}{\omega^2 C_0^2 R_0^2 + (\omega^2 L_0 C_0 - 1)^2} + j \left[ \omega C_1 - \frac{\omega^3 L_0 C_0^2 - \omega C_0}{\omega^2 C_0^2 R_0^2 + (\omega^2 L_0 C_0 - 1)^2} \right] \quad (1)$$

匹配网络 1 和外接阻抗等效电路的导纳为

$$Y_2(j\omega) = \frac{R_1}{(R_1 - \omega^2 L_1 R_1 C_2)^2 + L_1^2 \omega^2} + j \left[ \omega C_3 - \frac{\omega C_2 R_1^2 - \omega L_1 - \omega^3 C_2^2 R_1^2 L_1}{(R_1 - \omega^2 L_1 R_1 C_2)^2 + L_1^2 \omega^2} \right] \quad (2)$$

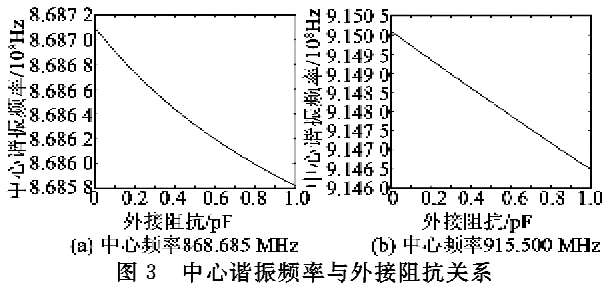
等效电路总导纳为

$$Y(j\omega) = Y_1(j\omega) + Y_2(j\omega) \quad (3)$$

该等效电路谐振的条件  $Y(j\omega)$  的虚部为 0,即

$$\left[ \omega C_1 - \frac{\omega^3 L_0 C_0^2 - \omega C_0}{\omega^2 C_0^2 R_0^2 + (\omega^2 L_0 C_0 - 1)^2} \right] + \left[ \omega C_3 - \frac{\omega C_2 R_1^2 - \omega L_1 - \omega^3 C_2^2 R_1^2 L_1}{(R_1 - \omega^2 L_1 R_1 C_2)^2 + L_1^2 \omega^2} \right] = 0 \quad (4)$$

将中心谐振频率为 868.685 MHz 和 915.5 MHz 的 SAW 谐振器的等效模型参数和相应匹配网络参数分别代入式 (4) 中,使用 MATLAB 软件绘制 SAW 谐振器的中心谐振频率随外接阻抗  $C$  的变化曲线,如图 3 所示。



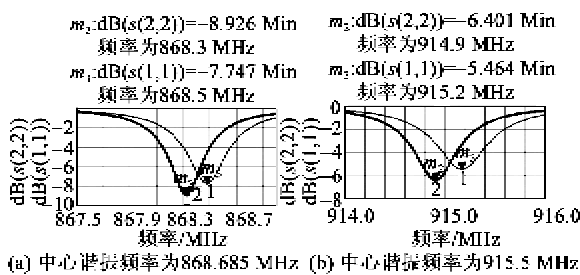
由图 3 可知,SAW 谐振器的中心谐振频率随外接阻抗的改变而变化,外接阻抗增大,SAW 谐振器的中心谐振频率减小。

### 3 传感器仿真验证

为验证前面理论分析的结果,利用美国安捷伦公司 ADS 射频仿真软件进行仿真分析,仿真电路结构如图 2 所示。SAW 谐振器的中心谐振频率分别选取 868.685 MHz 和 915.5 MHz,外接阻抗选取 1 pF 和 4 pF。中心谐振频率为 868.685 MHz 的 SAW 谐振器的等效模型参数  $L_0 = 25.582 \mu\text{H}$ ,  $R_0 = 27 \Omega$ ,  $C_0 = 1.3131 \text{ fF}$ ,  $C_1 = 1.67 \text{ pF}$ ; 匹配网络参数  $L_1 = 10 \text{ nH}$ ,  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $C_3 = 1 \text{ pF}$ 。中心谐振频率为 915.5 MHz 的 SAW 谐振器的等效模型参数  $L_2 = 17.298 \mu\text{H}$ ,  $R_2 = 21.76 \Omega$ ,  $C_2 = 1.749 \text{ fF}$ ,  $C_3 = 2.3 \text{ pF}$ ; 匹配网络参数  $L_3 = 10 \text{ nH}$ ,  $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $C_4 = 0.5 \text{ pF}$ 。

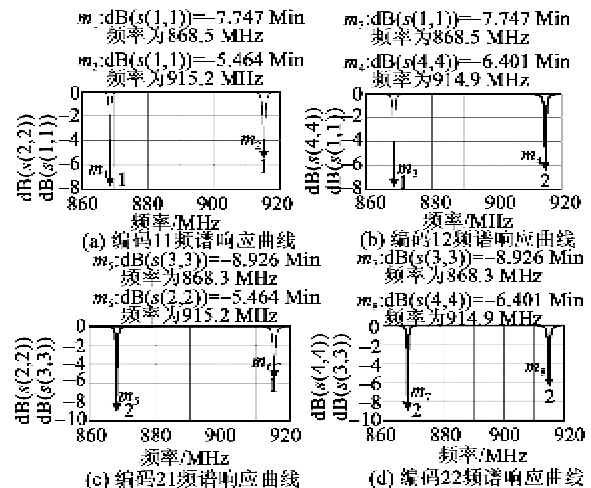
由于在特高频(UHF)频段仿真,ADS 仿真软件的精度和分辨率有限,故在 868 MHz 和 915 MHz 2 个频点处单独作放大处理。

中心谐振频率为 868.685 MHz 和 915.5 MHz 的谐振器模型分别外接 1 pF 和 4 pF 负载阻抗时仿真如图 4 所示。图 4(a)中曲线 1 为外接阻抗 1 pF 时,谐振频率为 868.5 MHz,曲线 2 为外接阻抗 4 pF 时谐振频率为 868.3 MHz,相差 200 kHz。图 4(b)曲线 1 为外接阻抗 1 pF 时谐振频率为 915.9 MHz,曲线 2 为外接阻抗 4 pF 时谐振频率为 915.2 MHz,相差 300 kHz。



仿真结果表明,SAW 谐振器的中心谐振频率随外接负载阻抗变化,负载阻抗增大,中心谐振频率减小。外接不同的负载阻抗可区分 SAW 谐振器,不同谐振器和外接阻抗组合可实现传感器编码与识别。故传感器外接 1 pF 和 4 pF 负载阻抗可实现 4 种编码,分别为 11、12、21、22。

中心谐振频率为 868.685 MHz 和 915.5 MHz 的 SAW 谐振器都外接 1 pF 负载阻抗时,编码为 11;中心谐振频率为 868.685 MHz 的 SAW 谐振器外接 1 pF 阻抗,中心谐振频率为 915.5 MHz 的 SAW 谐振器外接 4 pF 阻抗,编码为 12;中心谐振频率为 868.685 MHz 的 SAW 谐振器外接 4 pF 阻抗,中心谐振频率为 915.5 MHz 的 SAW 谐振器外接 1 pF 阻抗,编码为 21;中心谐振频率为 868.685 MHz 和 915.5 MHz 的 SAW 谐振器都外接 4 pF 负载阻抗时,编码为 22,仿真结果如图 5 所示。



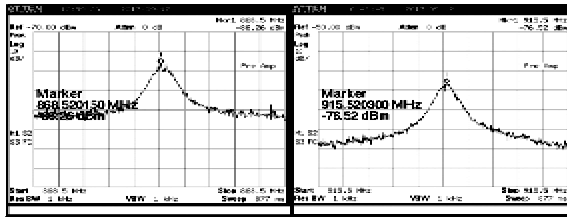
由图 5 可看出,通过 SAW 谐振器 1、2 分别与不同的外接阻抗连接可实现不同的传感器编码,不同编码结构产生的谐振频率易区分。

### 4 实验测试

为进一步验证仿真中的结果,利用无锡市好达电子有限公司生产的中心谐振频率为 868.685 MHz 和 915.5 MHz 的 SAW 谐振器,同轴小棒状射频天线,外加设计的匹配网络分别制作 2 个传感器,匹配网络参数与仿真相同。其中一个传感器中的 2 个 SAW 谐振器都没有外接负载阻抗,为传感器 1;另一个传感器中的 2 个 SAW 谐振器分别外接 10 pF 的阻抗,为传感器 2。

实验测量系统由无线发射器、型号为 AT6030DM 的频谱分析仪和两个传感器组成。通过无线发射器分别发射 868.5 MHz 和 915.5 MHz 激励信号,用频谱分析仪分别测量 2 个传感器的回波信号。

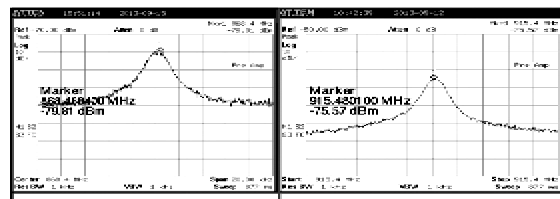
无线发射器分别发射频率 868.5 MHz 和 915.5 MHz 时,传感器 1 的回波信号如图 6 所示。



(a) 868.5MHz传感器1频率响应 (b) 915.5MHz传感器1频率响应

图 6 传感器 1 回波信号

实际测得传感器 1 的回波信号的频率大小分别为 868.520 15 MHz 和 915.520 3 MHz。无线发射器发射固定频率 868.5 MHz 和 915.5 MHz 时,传感器 2 的回波信号如图 7 所示。



(a) 868.5 MHz传感器2频率响应 (b) 915.5 MHz传感器2频率响应

图 7 传感器 2 回波信号

实际测得传感器 2 的回波信号的频率大小分别为 868.480 4 MHz 和 915.480 1 MHz。实验结果表明,该编码传感器在 868.5 MHz 和 915.5 MHz 频率处均有响应,且响应信号便于识别与测量;外接负载阻抗可区分不同的 SAW 谐振器,频率组合 868.520 15 MHz 和 915.520 3 MHz 可实现传感器 1 的识别;频率组合 868.480 4 MHz 和 915.480 1 MHz 可实现传感器 2 的识别。因此,只要实际测得传感器的回波信号频率,通过频率组合可实现传感器的区分与编码。

## 5 结束语

基于 SAW 谐振器的无源无线传感器是一种具有应用前景广的传感器,为进行多个传感器的区分,传感器编码方法的研究非常重要。本文提出了一种基于 SAW 谐振器与不同外接阻抗的传感器编码方法,建立了这种传感器的等效电路模型,并进行仿真与实验测试研究,结果表明,通过 SAW 谐振器外接

不同的阻抗可改变 SAW 谐振器的谐振频率,不同 SAW 谐振器与不同的外接阻抗相连可得不同谐振频率组合,从而实现传感器的编码。这种传感器编码方法不用进行传感器的专门设计与制作,降低了传感器的设计难度,编码灵活性好,另外,传感器的编码容量可很大。

## 参考文献:

- [1] 刘庆,张句文.基于轮胎电容阻抗和 SAWR 的胎压传感器[J].压电与声光,2011,33(1):17-18.  
LIU Qing, ZHANG Xiangwen. Tire pressure sensing system based on surface acoustic wave resonator and tire capacitor resistance [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2011, 33(1): 17-18.
- [2] 李平,文玉梅,刘双临,等.编码式谐振 SAW 无源无线温度传感阵列系统[J].仪器仪表学报,2003,24(6):551-554.  
LI Ping, WEN Yumei, LIU Shuanglin, et al. A coding resonant passive wireless SAW temperature sensing system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(6): 551-554.
- [3] GALLAGHER D R, GALLAGHER M W, SALDANHA N, et al. Spread spectrum orthogonal frequency coded SAW tags and sensors using harmonic operation [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2010, 58(3): 674-679.
- [4] 孙书诚,郎朗,苏长杰.带有时间/地理标签无线传感器网络的农业环境远程实时监测系统[J].重庆理工大学学报:自然科学版,2013,27(3):104-108.  
SUN Shucheng, LANG Lang, SU Changjie. The agricultural environment remote real-time monitor system of the wireless sensor network with label of time and geography [J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2013, 27(3): 104-108.
- [5] ODAGAWA H, MALOCHA D C, YAMANOUCHI K. High stable and sensitive orthogonal frequency coded SAW tags and sensors using unidirectional IDT and high coupling zero TCF substrates [C]//S. I.; Ultrasonics Symposium (IUS), 2011 IEEE International, 2011: 814-817.
- [6] HUMPHRIES J R, MALOCHA D C. Passive, wireless SAW OFC strain sensor [C]//S. I.; Frequency Control Symposium (FCS), 2012 IEEE International, 2012: 1-6.
- [7] SALDANHA N, MALOCHA D C. Pseudo-orthogonal frequency coded wireless SAW RFID temperature sensor tags [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2012, 59(8): 1750-1758.