

文章编号:1004-2474(2014)05-0698-03

# 谐振式 SAW 无线传感系统的测量不确定度分析

傅洋, 韩韬, 刘伯权

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

**摘要:**结合谐振式声表面波(SAW)无线传感系统的脉冲查询原理,从阅读器的硬件系统出发,研究了其本振相位噪声和模数转换器(ADC)误差两个主要误差源,并分别分析了两者的测量不确定度带来的影响,最后对各自的分量进行合成。通过定量分析,选择合适参数,改进系统的硬件设计,使其测量性能得到更大提高。

**关键词:**声表面波(SAW);相位噪声;模数转换器(ADC);信噪比;标准差

**中图分类号:**TN65;TB556 **文献标识码:**A

## Analysis of Measurement Uncertainty of Resonant SAW Wireless Sensor System

FU Yang, HAN Tao, LIU Boquan

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Combined with pulsed interrogation principle of resonant SAW wireless sensor system, based on the reader hardware system, the two main sources of error, which are local oscillator phase noise and ADC error are studied. The effects of the two main source errors on the system measurement uncertainty have been analyzed respectively, and each component has been synthesized. Quantitative analysis can be used as a guide to choose appropriate parameters and improve the system hardware design, and the measurement performance can be enhanced greatly.

**Key words:** SAW; phase noise; AD converter; signal to noise ratio; standard deviation

### 0 引言

基于声表面波(SAW)技术的无线传感器具有纯无源(传感器不需电源)、耐受恶劣环境(高、低温和射线辐照)和长寿命等特点,使SAW无线传感器在测温、测压等领域中优势明显<sup>[1]</sup>。声表面波谐振器(SAWR)与延迟线型传感器相比,其插损小,有效品质因数(Q)大<sup>[2]</sup>,适合于无线传感器。在脉冲查询式谐振型SAW传感系统中,阅读器发送频率接近SAWR谐振频率的短脉冲激励SAWR,使其能量达到稳态。脉冲发射结束后,谐振器处于自由衰减状态,并通过天线不断向外发送能量,阅读器收到SAWR返回的衰减信号,再用谱分析的方法估计接收信号的频率,就可获得SAWR的谐振频率<sup>[3]</sup>,从而测得传感量的数值。针对上述测量系统,如何进一步提高测量精度、优化性能是研究重点。本文将从阅读器的硬件系统出发,研究其主要误差源,重点分析本振相位噪声和模数转换(ADC)误差对整个系统的测量不确定度所带来的影响,从而可以此为

指导,改进系统设计,使测量精度得到更大改善。

### 1 本振相位噪声分析

本振的相位噪声是影响电路系统灵敏度、选择性及线性度的重要因素。其一般用单边带1 Hz带宽内的相位噪声功率谱密度 $\mathcal{L}(f_m)$ 表示<sup>[4]</sup>。脉冲查询式谐振型SAW传感系统的基本原理是通过向谐振器SAWR发送短脉冲,接受其反射的回波信号,测量该回波相对本振的谐振频率。

根据Leeson的反馈振荡器模型<sup>[5-7]</sup>,振荡器的单边带相位噪声为

$$\mathcal{L}(f_m) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 + \frac{f_c FkT}{f_m P}\right) \times \frac{1}{f_m^2} \left(\frac{f_{LO}}{2Q_{LO}}\right)^2 & f_m < \frac{f_{LO}}{2Q_{LO}} \\ \frac{1}{2} \left(1 + \frac{f_c}{f_m}\right) \frac{FkT}{P} & \frac{f_{LO}}{2Q_{LO}} < f_m < f_c \\ \frac{1}{2} \frac{FkT}{P} & f_m > f_c \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2013-12-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11174205)

作者简介:傅洋(1987-),男,上海人,硕士生,主要从事声表面波无线无源传感器研究。韩韬(1973-),男,山东莱芜人,教授,博士,主要从事基于声表面波技术的射频标签和传感器方面的应用基础的研究。E-mail: than@sjtu.edu.cn.

式中:  $f_{LO}$  为振荡器中心频率;  $f_m$  为偏离载频频率;  $f_c$  为闪烁噪声拐角频率;  $Q_{LO}$  为振荡器的有载品质因数;  $P$  为输入激励功率;  $F$  为反馈系数;  $k$  为波尔兹曼常数;  $T$  为绝对温度。

该模型下的相位噪声分布曲线如图 1 所示。由图可看出,在频率偏离量  $f_m$  较小的频段,相位噪声的能量较高,随着  $f_m$  不断增大,对应的相位噪声逐渐减弱。这个趋势中的转折点就是 Leeson 频率

$$f_L = f_{LO} / (2Q_{LO}) \quad (2)$$

$f_L$  只与本振的中心频率和品质因数有关。在  $f_m > f_L$  的频段上,对应的相噪处在一个相对较低的水平,且随  $f_m$  增大而继续衰减,最终趋近于一个常数。

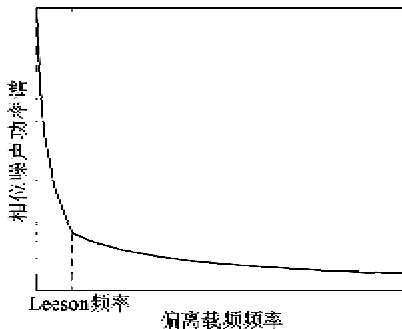


图 1 基于 Leeson 模型的相位噪声功率谱分布示意图

由于 SAWR 受激励后的充能和放能时间均为一个时间常数,即

$$\tau = Q / (\pi f_0) \quad (3)$$

式中  $f_0$  为谐振频率。每次脉冲查询的测量持续时间最短为  $2\tau$ 。因此,在本振选择时,更关注相对于载波频率的偏离量的那部分相位噪声,载波频率的偏离量为

$$f_m = 1 / (2\tau) = \pi f_0 / (2Q) \quad (4)$$

测量带宽  $B = 2f_m$ , 且  $f_m$  处的相噪值为  $\mathcal{L}(f_m)$ , 则由本振相位噪声所引起的频率测量的标准差为

$$\sigma_f = \sqrt{2 \cdot 10^{\mathcal{L}(f_m)/10} \cdot B \cdot f_m^2} \quad (5)$$

可见,相位噪声直接影响频率测量的不确定度,而所测量的频率与传感量有一一对应的关系,所以本振的相位噪声对整个传感系统的精度和分辨率有重要的影响。

通过使用一组不同相噪级别的本振进行实验,可得到本振相位噪声大小与标准差  $\sigma_f$  的关系如图 2 所示。由图可看出,随着相位噪声的逐渐增大,  $\sigma_f$  呈指数增长,这一趋势与理论推导所得出的曲线一致,即相位噪声每增大 10 dBc/Hz, 频率标准差相应地增大  $\sqrt{10}$  倍。图 2 中相噪为 -70 dBc/Hz 时对应的频率标准差为 600 Hz, 即在该相噪影响下测温系统

的分辨率可达 0.075 °C, 此分辨率已可满足一般的测温需求。若相噪大小降低至 -100 dBc/Hz 的更理想情况, 相应的温度分辨率能达  $10^{-3}$  量级。

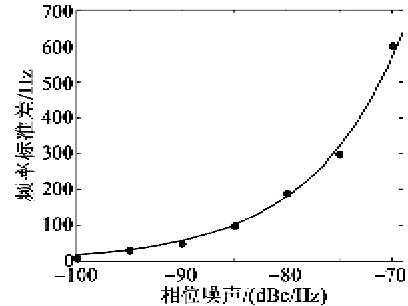


图 2 相位噪声对频率标准差的影响

在谐振器 SAWR 的谐振频率  $f_0$  不变的情况下, 选择较大的  $Q$  值可增加脉冲查询的测量持续时间, 从而减小特定相噪所对应的偏离载频频率  $f_m$ , 使式(2)中的频率标准差  $\sigma_f$  也减小。然而在谐振器各参数都固定不变的情况下,  $f_m$  也随之确定不变, 此时只有选择相位噪声较小的本振才可有效地减小。此外, 应尽量选择 Leeson 频率  $f_L$  较小的本振, 这样可保证频偏量  $f_m \gg f_L$ , 从而确保此处对应的相噪  $\mathcal{L}(f_m)$  处在较低的水平, 如此便可将频率测量的标准差  $\sigma_f$  控制在可接受范围内。

## 2 ADC 误差分析

影响硬件系统测量不确定度的另一个不可忽视的重要误差源就是由 ADC 引起。在一个 ADC 系统中, 其误差来源主要有孔径抖动、量化、差分非线性和热噪声, 其中孔径抖动误差和量化误差占主导地位, 其余部分的影响一般可忽略。

孔径抖动又被称为孔径时间抖动或孔径不确定, 它是指 ADC 采样时钟(通常作用于采样保持器)的各个采样脉冲边沿出现时刻的不确定性, 通常以时间(一般为纳秒或皮秒量级)表示(一般为时间变化量的有效值)<sup>[8]</sup>。对于一个动态模拟信号, 由于孔径抖动的存在, 使输入的模拟信号值在孔径时间内是不确定的, 从而导致孔径抖动误差(电压误差)。此外, 在 ADC 对输入模拟量进行量化的过程中, 会产生量化误差, 误差的幅值最大可达到量化电平的一半。

由于 ADC 的孔径抖动误差和量化误差相互独立, 在这一前提下, 两者的共同作用导致 ADC 的信噪比变<sup>[9]</sup>为

$$SNR = 10 \cdot \lg \left[ \frac{1}{\omega^2 t_j^2 + \frac{1}{6} \left( \frac{V_0}{2^n A} \right)^2} \right] \quad (6)$$

式中:  $t_j$  为孔径抖动;  $\omega$  为输入正弦信号的角频率;  $A$

为输入信号的幅值;  $V_0$  为 ADC 的输入满量程;  $n$  为 ADC 的位数。

式(6)中,  $\omega^2 t^2$  及  $\frac{1}{6} \left( \frac{V_0}{2^* A} \right)^2$  的存在分别是由孔径抖动误差和量化误差引起的。当孔径抖动较大或 ADC 的位数较少时, SNR 随之降低。此外, 在 ADC 的参数固定不变时, 输入信号的频率越高, SNR 越低。图 3、4 综合反映了孔径抖动、ADC 位数和输入信号频率对 SNR 的影响。

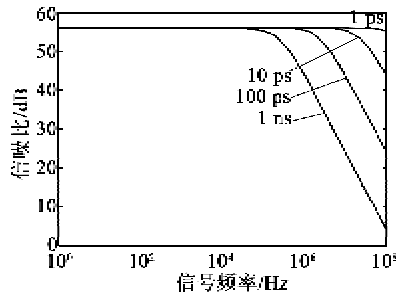


图3 8位ADC信噪比曲线

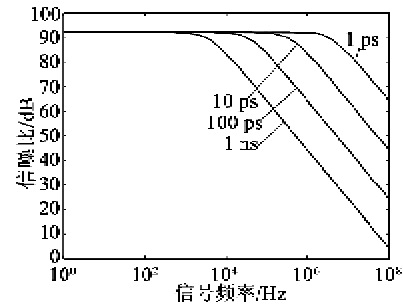


图4 14位ADC信噪比曲线

当 ADC 的输入信号频率足够高时, 量化误差部分可被忽略, 此时 ADC 的信噪比可简化为

$$SNR \approx 20 \cdot \lg \left( \frac{1}{\omega t_j} \right) \tag{7}$$

为从 ADC 的 SNR 进一步推得其对频率测量的影响, 结合 Fisher 矩阵的相关理论和推导<sup>[10]</sup>, 最终可得由 ADC 误差所引起的频率标准差为

$$\sigma_{AD} = \frac{f_s}{2\pi} \sqrt{\frac{(1-|z|^2)^3 (1-|z|^{2N})}{2 \cdot 10^{\frac{SNR}{10}} [-N^2 |z|^{2N} (1-|z|^2)^2 + |z|^2 (1-|z|^{2N})^2]}} \tag{8}$$

式中:  $f_s$  为 ADC 的采样频率;  $z$  为信号的归一化序列;  $N$  为信号长度; SNR 由式(6)或式(7)求得。若采样频率为 18 MHz, 信号长度为 512 点, 则 ADC 的信噪比与频率标准差的关系如图 5 所示。由图可看出, 当信噪比小于 70 dB 时对应的频率标准差较大, 此时 ADC 的影响已超过本振相位噪声对测频的影响。

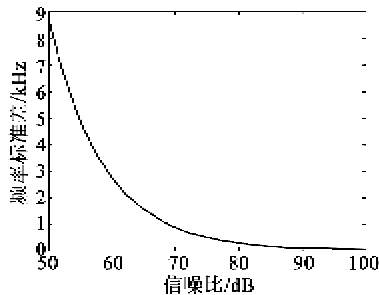


图5 ADC信噪比对频率标准差的影响

### 3 总体测量不确定度分析

我们已分别得到了本振相位噪声和 ADC 误差对频率测量不确定度的影响, 并进行了定量的分析。由于阅读器硬件系统中其他组件对测量造成的影响相对较小, 可不考虑, 因此在进行总体测量不确定度分析时, 只需对本振相位噪声和 ADC 误差的作用进行合成。显然此两者的作用是相互独立的, 所以易得整个系统的总体频率测量标准差为

$$\sigma = \sqrt{\sigma_f^2 + \sigma_{AD}^2} \tag{9}$$

式中  $\sigma_f, \sigma_{AD}$  分别由式(5)和式(8)求得。

如果考虑中期频率稳定度, 那么本振温漂对测量的影响就不容忽视。若本振的频率稳定度为  $1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , 则当环境温度变化  $30 ^\circ\text{C}$  时的本振频率漂移可达 12 kHz, 这将对系统的频率测量产生较大影响。

### 4 结束语

本文结合谐振型 SAW 无线传感系统的脉冲查询原理, 从阅读器的硬件系统出发, 研究了其主要的 2 个误差源, 即本振相位噪声和 ADC 误差, 并分别分析了两者对系统的测量不确定度所带来的影响, 最后对各自的分量进行合成。通过本文的定量分析, 选择合适参数, 改进系统的硬件设计, 使其测量性能得到更大改善。

### 参考文献:

- [1] STEVENS D S, ANDLE J C, SABAH S, et al. Applications of wireless temperature measurement using saw resonators[C]//Japan, Fourth International Symposium on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Communication Systems, Chiba University, 2010.
- [2] BECKLEY J, KALININ V, LEE M, et al. Non-contact torque sensors based on SAW resonators[C]//S. I.: Frequency Control Symposium and PDA Exhibition, 2002; 202-213.

(下转第 704 页)