

基于 DSP 的 SAW 温度检测系统的设计

余翔,刘礼跃,漆晶

(重庆邮电大学 信息与通信工程学院,重庆 400065)

摘要:介绍了基于谐振器型声表面波(SAW)传感器的温度检测系统的工作原理及组成结构,详细说明了系统中读写器设计过程中的关键技术,重点说明了读写器中射频前端电路的设计,包括锁相环(PLL)频率合成器模块、发射电路和接收电路的硬件设计,同时给出了数字信号处理(DSP)基带主控模块的设计框图和工作流程。对传感器在 $0\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境下测试数据进行了详细分析,测量温度的精度可达 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,在良好电磁环境下,最大测温距离可达5 m。

关键词:读写器;谐振器;声表面波;温度检测系统

中图分类号:TN384 **文献标识码:**A

Design of SAW Temperature Detection System Based on DSP

YU Xiang, LIU Liyue, QI Jing

(College of Information and Communication Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract:The working principle and structure of the temperature detection system based on the resonator SAW sensor are presented in this paper. The key technology of the reader design in the system is described in detail. The design of RF front-end circuit in the reader is emphasized, including the hardware designs of PLL frequency synthesizer module, the transmitting circuit and the receiving circuit. At the same time, the design block diagram and workflow of the main control module of DSP is given. A detailed analysis of the test data of sensor under the environment temperature of $0\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ is carried out. The accuracy of measuring temperature is $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. In good electromagnetic environment, the maximum temperature measurement range is up to 5 m.

Key words:reader; resonator; SAW; temperature detection system

0 引言

声表面波(SAW)传感器是继陶瓷、半导体等传感器后的一种新型的传感器,是SAW技术的一个新的应用领域。SAW传感器主要分为谐振器型和延迟线型两类。延迟线型传感器占用的带宽较宽,需要较长的数据读取时间。谐振器型传感器的插入损耗、品质因数、可靠性和无线检测距离等指标均优于同尺寸大小的延迟线型传感器,因此,其读写器的带宽更窄,数据读取时间更短。由于不能对谐振器型传感器进行编码,故可通过频分的方式对传感器进行区分。

本文在分析SAW温度检测系统的原理及组成的基础上以TMS320F28335为核心芯片设计了系统的核心部件——读写器。利用数字信号处理(DSP)的高速处理能力完成对传感器返回信号频率的快速提取。该读写器具有4个天线端口,每个端

口可以读取6个不同频点的谐振器型传感器的数据,即6个通道。最大发射功率为17 dBm,测量温度范围 $0\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$,测量精度 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,最远测量距离可达5 m。

1 系统的原理及组成

一个完整的基于SAW传感器的温度检测系统由SAW温度传感器、读写器及应用系统3大部分组成,如图1所示。SAW传感器由谐振器和天线组成。谐振器由压电基片、叉指换能器(IDT)和两个反

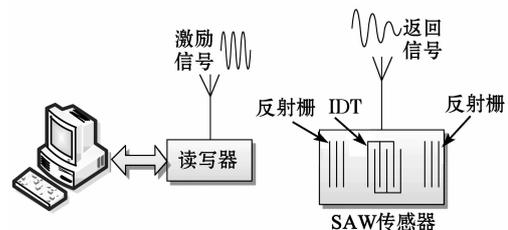


图1 无线谐振式声表面波温度传感器系统

收稿日期:2015-07-27

作者简介:余翔(1969-),男,重庆人,副教授,硕士生导师,主要从事无线传感网络方向的研究。

射栅组成。其中反射栅构成一个品质因数(Q)值较高的声谐振腔;而 IDT 能将激励信号的电磁能耦合进谐振腔,并能从谐振腔中耦合出电磁能经天线发出。

读写器是一种具有能发射不同频率的射频信号和接收传感器返回信号功能的装置,SAW 温度传感器放置在被测量物体的表面,用来测量温度。当传感器的天线收到读写器发出的频率为 f 的激励信号,与天线相连的 IDT 因逆压电效应将射频信号转化为同频的 SAW,此声波在两边的反射栅之间多次来回反射,经 IDT 转化为电磁信号,发射回读写器。当 f 与传感器的谐振频率 f_0 相近或相等时,传感器将发生谐振。

读写器根据 f_0 来确定传感器所处位置的温度。当外界环境温度发生变化时,压电基片表面上的 SAW 传播速度会改变,从而引起 f_0 的变化。读写器通过发射不同频率的激励信号,分析接收到的传感器返回信号的频率,来确定 f_0 ,从而获取被测量物体的温度。在工程上,谐振器的频率-温度关系为

$$f = f_0 [1 + a(T - T_0) + b(T - T_0)^2 + L] \quad (1)$$

式中: T 为任意温度; T_0 为参考温度; a 、 b 分别为 T_0 时的一、二阶频率温度系数,通常忽略其高阶温度系数 L 。这几个系数与压电基片的晶体材料及切割方向有关,反映器件的温度灵敏度,需通过实验确定。

2 温度检测系统设计

2.1 射频前端模块设计

读写器具有 4 个天线端口,每个天线端口可读取 6 通道数据。天线之间采用时分的工作方式,不同的通道间采用频分的工作方式。为了达到快速扫

描到传感器的谐振频率的目的,读写器的发射电路采用锁相环(PLL)频率合成器作为信号源。为了增强系统的抗干扰能力和提高系统的稳定性,读写器接收电路采用二次变频的工作方式。考虑电路的设计成本及传感器的带宽,将接收电路的第一中频的中心频率设置为 50 MHz,基带信号的中心频率设置为 0.5 MHz。基带信号通过 A/D 采样模块转化为基带数字信号,DSP 通过快速傅里叶变换(FFT)提取出信号的频率。DSP 还兼有对射频前端电路中各个模块的工作状态进行控制。

2.1.1 PLL 频率合成器的设计

本征源是射频电路中的重要组成部件,通常采用频率合成器作为电路的本征源。通用的频率合成器由频率合成芯片和分立元器件组装而成,以往的频率合成芯片只集成了频率合成器中主要部件如程序分频器、鉴相器、参考分频器、锁相器、锁定指示器。在实际应用中,要构成完整的频率合成器还需外接压控振荡器(VCO)、环路滤波器(LF)和双模分频器。采用通用的频率合成芯片构成频率合成器电路需要的外接元件较多,电路体积和功耗都较大,电路的调试复杂度较大。

SI4112 数字频率合成芯片内部集成了 LF、VCO、分频器和鉴相器,只需简单的外围电路便可组成一个 PLL,其输出的频率范围为 62.5 ~ 1 000 MHz。因此,选用 SI4112 芯片设计 PLL 频率合成器可降低硬件电路成本、体积和功耗,简化电路调试的复杂度及提高系统的可靠性。PLL 模块设计如图 2 所示。

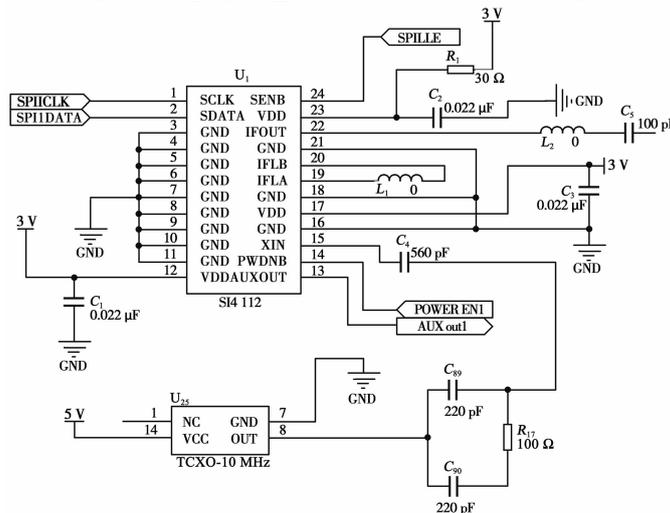


图 2 PLL 频率合成模块部分原理图

本设计选用 10 MHz 恒温晶振为 SI4112 提供参考频率。DSP 通过 SPI 总线配置芯片内部的 N

和 R 寄存器,设定分频系数来控制输出信号的频率;通过检测芯片的 AUXOUT 引脚的高、低电平来

判断 PLL 频率是否锁定;通过设定芯片的 PWDNB 引脚的高、低电平来控制芯片的工作状态。

2.1.2 发射电路的设计

发射电路框图如图 3 所示,采用 PLL1 模块作为发射电路的信号源。根据传感器的中心频率特性,DSP 控制 PLL1 模块产生的 RF 信号输出带宽为 429~442 MHz。PLL1 合成产生的信号通过低噪声放大器后进入衰减器,衰减器采用陶瓷固定衰减器。链路中的带通滤波器采用声表面波滤波器(SAWF),中心频率为 437 MHz,带宽为 17 MHz,插入损耗为 1.5 dB。可调增益放大器(VGA)的输入带宽为 300~1 100 MHz,根据 SAW 传感器与读写器的距离远近,自动增益控制模块(AGC)自适应地调整 VGA 的增益,最大输出功率为 17 dBm。

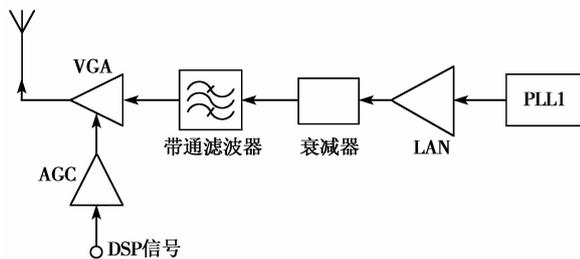


图 3 发射电路设计框图

2.1.3 接收电路的设计

读写器的接收电路采用二次变频方案,电路设计较成熟。接收电路框图如图 4 所示。通过开关将天线的传感器返回信号切入到接收电路前端。接收前端电路由低噪声功率放大器、带通滤波器构成,完成对传感信号的放大与选取。带通滤波器抑止 429~442 MHz 频段以外的信号。滤波后的信号进入混频器进行混频得到第一中频信号,第一本征信号由 DSP 根据发射信号频率控制 PLL2 模块合成产生。第一中频信号通过 50 MHz 带通滤波器滤波后经对数放大器后进行二次混频,下变频出来的信号即为 I/Q 正交基带信号,第二本征信号(LO2)为 100 MHz。基带信号经过有源低通滤波器进行滤

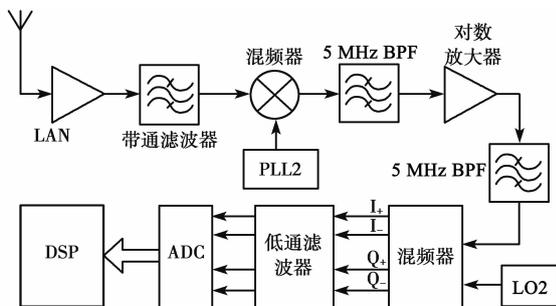


图 4 接收链路框图

波,滤波后的信号进入 AD/DA 转换模块进行 AD 采样转化为数字基带信号,DSP 对采样数据进行 FFT 变换,提取出传感器返回信号的频率。

2.2 基带主控模块的设计

DSP 芯片是整个读写器的控制核心,本文采用 TI 公司的 TMS320F28335 芯片,基带主控的设计框图如图 5 所示。

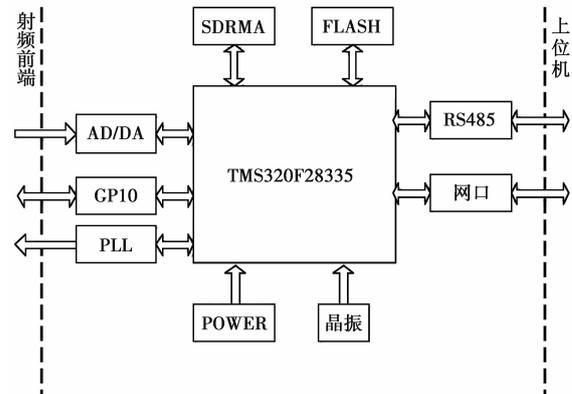


图 5 基带主控的设计结构

外部晶振为芯片提供精确的外部参考时钟,电源模块为整个系统提供稳定的电源。外扩 SDRAM 和 FLASH 分别负责存储数据和程序。芯片上电后通过运行 BootLoad 程序将存储在外部 Flash 中的程序加载到芯片内部的 RAM 中运行。DSP 芯片通过 SPI 总线控制 PLL 模块合成产生激励信号和接收链路中的第一本征信号。DSP 的工作流程为:

- 1) 系统上电,将程序加载至片内 RAM 中开始运行。
- 2) 根据程序设置,对系统进行初始化,即完成对 GPIO 口、中断、定时器等相关寄存器的设定。
- 3) 将天线开关调整为发射状态,通过 SPI 总线控制发射链路的 PLL1 模块,使其产生某一频率的激励信号。
- 4) 控制接收链路的 PLL2 模块产生比激励信号大 50 MHz 的第一本征信号,关闭发射链路的 PLL1 模块(防止激励信号对接收信号造成干扰),将天线开关调整为接收状态。
- 5) 控制 A/D 模块进行 A/D 采样,采样后对数字基带信号进行 FFT 变换,提取基带信号的频率信息。
- 6) 通过多次发送同一频率的激励信号,根据接收信号的频率是否相同来判定谐振器是否发生谐振,若发生谐振则根据传感器的温频关系将频率转化为温度,将结果通过 RS485 传往上位机进行其他处理,否则转往第 3)步调整发射信号频率重新进行处理。

3 系统测试

本文采用 YZ-切型钕酸锂单晶制作 SAW 温度传感器(中心频点为 431~441 MHz,每隔 2 MHz 设置一个频点,共 6 个)。将 6 个传感器分别放置在不同的环境中测试,读写器将测量得到的数据通过 RS485 上传给上位机软件,上位机软件由 C# 编写而成,其测量结果如图 6 所示。

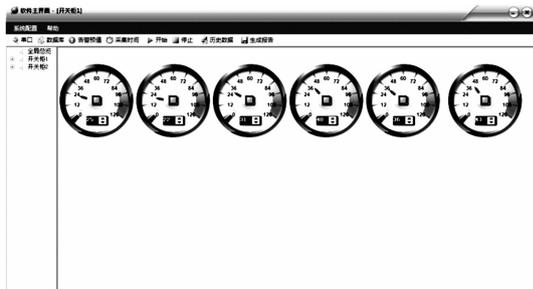


图 6 实测结果的部分数据

单通道的精度测试在黑体箱中进行,为了获得传感器所在位置的精确温度,将 1 个标准测温探头贴在传感器底座上放入黑体箱中,当温度达到设定温度后,保持温度 0.5 h 记录数据。传感器与读写器的距离为 5 m。单个传感器测试结果如图 7、8 所示。

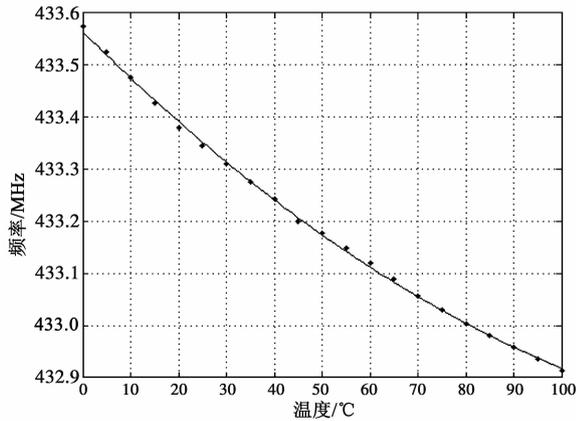


图 7 433 MHz SAW 温度传感器的频温关系

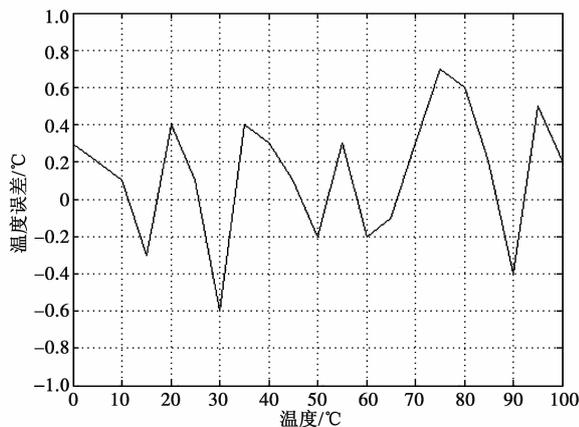


图 8 433 MHz 传感器测量值与标准测温仪的差值

4 结语

在电力开关柜中,开关的触点和母线连接等部位因老化或接触电阻过大而发热,而这些发热部位的温度无法检测,最终导致事故发生。实现温度的在线监测是保证高压设备安全运行的重要手段。传统有线或有源的测温方式均不适合在开关柜中使用。由于基于 SAW 温度检测系统具有无线无源的特性,且可靠性高和安全性强,因此可以很好地解决这一难题。

本文介绍了基于 SAW 传感器的温度传感系统的工作原理及组成结构,并重点说明了读写器设计的过程,同时给出了 DSP 基带主控模块的设计框图与算法流程。通过采用 SI4112 芯片设计 PLL 减少了电路的体积和功耗,以及电路的调试难度。收发链路通过开关进行切换与隔离,发射信号通过 PLL 频率合成器合成得到,信号频率输出精度高、切换频率快且便于控制。接收电路采用二次变频方式来增强干扰能力。通过采用对数放大器把衰减信号变为等幅信号,便于 A/D 采样及数据处理。在发射功率为 17 dBm 的情况下,最远检测距离可达 5 m,测温精度可达±1 °C。

参考文献:

- [1] BUFF W, KLEETT S, RUSKO M, et al. Passive remote sensing for temperature and pressure using SAW resonator devices[J]. IEEE Trans Ultrason, Ferroelectr Freq Contr, 1998, 45(5): 1388-1392.
- [2] POHL A. A review of wireless SAW sensors[J]. IEEE Transon UFFC, 2000, 47(2): 317-332.
- [3] JAHED H M, AUBERT T, PRIEUR G, et al. Wireless and batteryless SAW sensors, a promising solution for harsh environments[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(7): 582-590.
- [4] 李平, 谢华, 文玉梅, 等. 高接收信噪比的远距离 SAW 传感系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6): 1923-1928.
- [5] 祝雪莲, 韦穗, 柳军, 等. 基于 Si4133 频率合成器的设计与实现 [J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(5): 209-216.
- [6] 蒋平英, 罗山焱, 龙峥, 等. 谐振式声表面波温度传感系统查询器设计[J]. 压电与声光, 2014, 36(4): 498-501.

JIANG Pingying, LUO Shanyan, LONG Zheng, et al. Interrogation design of SAW resonator temperature sensor system [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(4): 498-501.