

宽温度范围声表面波标签温度补偿的研究

王晓伟, 韩 韬

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘 要:大容量延迟线型声表面波(SAW)标签除需利用回波时延, 还需利用回波的载波相位进行编码, 而回波载波相位会受温度的影响而发生变化。在实际应用中必须对回波相位进行温度补偿。因此, 该文提出了一种基于3根标准温度反射栅的设计及实际温度补偿过程中温度补偿系数的确定方法, 并讨论了相位测量误差对温度补偿适用范围及温度补偿精度的影响。

关键词:声表面波(SAW); 射频识别; 延迟线; 测量误差; 温度补偿

中图分类号: TN65; TB556 **文献标识码:** A

Research on Temperature Compensation of SAW Label with Wide Temperature Scope

WANG Xiaowei, HAN Tao

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

Abstract: The delay-line surface acoustic wave label with large capacity based on coding scheme of TOPPS needs to encode using the phase of carrier, but the phase of carrier will be influenced by the change of temperature. In the practical application phase-temperature compensation to phase of carrier must be carried out. In order to solve this problem, this paper proposes a design method based on three standard-temperature reflecting gratings and the method to determine the coefficient of temperature compensation in actual temperature compensation process. The influence of phase measuring error on the applicable scope and accuracy of temperature compensation is also discussed.

Key words: SAW; RFID; delay-line; measuring error; temperature compensation

0 引言

声表面波射频识别技术(SAW RFID)具有纯无源、读取速度快, 成本低, 高低温性能好等特点。SAW 标签可用许多方式进行编码, 现阶段 SAW 标签产品通常仅采用回波时延进行编码^[1]。为提高 SAW 标签的编码容量, 除需利用回波时延, 还需利用回波载波相位进行编码^[2]。但当温度变化时, 回波的载波相位会随温度而变化^[3]。由于温度引起的相位变化将给系统解码造成很大困难, 如果标签相位的温度漂移与测量误差叠加而成的综合相位误差超过标签设计时各槽位之间允许的相位误差范围, 则标签解码就会出错^[4-5]。这将影响大容量 SAW RFID 的鲁棒性及有效工作温度范围。所以在实际应用中, 必须对 SAW 的载波相位进行温度补偿。

延迟线型 SAW RFID 温度补偿法是设置温度补偿参考反射栅。参考反射栅的数目一方面不能多, 否则将严重影响编码容量; 另一方面, 只设置一个标准间隔的 2 条参考反射栅不仅限制了标签有效工作范围, 且影响了相位补偿精度。本文在考虑阅读器相位测量精度的前提下, 分析了参考反射栅设计与温度补偿范围及精度进行了深入分析, 实验设计了一种利用 3 根标准温度反射栅, 进行 180 °C 温度补偿的 SAW RFID。

1 温度补偿原理及温度补偿反射栅设计

1.1 温度补偿原理

在不同温度下, SAW 在基片表面上传输的波速不同, 标准温度下设计的传输时延 τ ; 必然会在未

收稿日期: 2013-12-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11174205); 教育部新世纪人才计划基金资助项目(NCET-12-0357); 博士点基金资助项目(SR-FDP-20120073110021)

作者简介: 王晓伟(1989-), 男, 福建仙游人, 硕士生, 主要从事声表面波标签研究。通信作者: 韩韬, 教授, 博士生导师。E-mail: than@sjtu.edu.cn.

知工作环境下发生变化。回波脉冲载波相位为

$$\phi_i = 2\pi f_c \tau_i \quad (1)$$

式中 f_c 为载波频率。

为消除无线信道长度对于标签温度传感参数测量的负面效应,实际通常采用第 i 根反射栅与第 j 根反射栅相延时间间隔 ϕ_{ij} 来对标签温度补偿系数值实现高精度测量,即

$$\phi_{ij} = \phi_j - \phi_i = 2\pi f_c (\tau_j - \tau_i) = 2\pi f_c \tau_{ij} \quad (2)$$

式中 τ_{ij} 为第 i 根反射栅与第 j 根反射栅的时延。

温度变化时,反射栅相延时间间隔将发生变化,根据文献[6]可得 ϕ_{ij} 与当前环境温度 T 的关系为

$$\phi_{ij} = \phi_{ij,0} [1 + TCD(T - T_0)] = \phi_{ij,0} (1 + TCD \cdot \Delta T) \quad (3)$$

式中: T_0 为标准温度; $\phi_{ij,0}$ 为标准温度下的相延时间间隔; ΔT 为温度变化量; TCD 为延时温度系数。

由式(3)可得

$$F(\Delta T) = 1 + TCD \cdot \Delta T = \phi_{ij} / \phi_{ij,0} = 1 + \Delta\phi_{ij} / \phi_{ij,0} \quad (4)$$

即在 ΔT 下, ϕ_{ij} 与其标准状态下设计的相延时间间隔 $\phi_{ij,0}$ 成正比,且为常量,定义该比例为温度补偿系数 $F(\Delta T)$ 。因此,可以对某一段设计 $\phi_{ij,0}$ 为参考,测量其在未知温度下的相延时间间隔变化量 $\Delta\phi_{ij}$,然后通过式(4)求得 $F(\Delta T)$,并以 $F(\Delta T)$ 为标准,对所测相延时间间隔进行逆温度补偿,得到标准状态下设计的相延时间间隔以进行解码,最终得到编码信息。

由式(4)可推得,当信噪比一定的条件下 $\Delta\phi_{ij}$ 测量精度固定时,若其参考温度下 $\phi_{ij,0}$ 具有较长的设计时延长度,则 $F(\Delta T)$ 将具有更高的测量精度。

在实际阅读系统中,由于测得的回波包含往返两个方向的相时延信息,因此得到的相位变化量是 $\Delta\phi_{ij}$ 的 2 倍,即 $2\Delta\phi_{ij}$,由于相位测量存在 2π 模糊性,故有 $0 < 2\Delta\phi_{ij} < 2\pi$ 。由此可得 $\max(\Delta\phi_{ij}) = \pi$ 。则由式(4)还可推出,温度补偿反射栅的适用温度范围 RT_{ij} 可表示为

$$RT_{ij} = \frac{\max(\Delta\phi_{ij})}{TCD \cdot \phi_{ij,0}} = \frac{\pi}{TCD \cdot \phi_{ij,0}} \quad (5)$$

由式(5)可看出,参考 $\Delta\phi_{ij}$ 的温度特性曲线以 RT_{ij} 为周期。由式(4)可知, $F(\Delta T)$ 的温度特性曲线也是以 RT_{ij} 为周期,这从根本上制约了温度补偿的适用温度范围,若其参考温度下相延时间间隔 $\phi_{ij,0}$ 具有较小的设计时延长度,则引入温度补偿的大量程 SAW RFID 标签将具有更宽的适用温度范围。

结合以上相延时间间隔 $\phi_{ij,0}$ 对温度补偿精度及适

用范围的影响可推出,采用单一相延时间间隔 $\phi_{ij,0}$ 设计无法实现对温度补偿精度及适用温度范围的同时提升。针对这一矛盾不难想到,若采用合理的多相延时间间隔设计,则可解决温度补偿精度及适用温度范围的同时优化。

1.2 温度补偿反射栅设计

由于制造工艺及阅读器性能的限制,反射栅之间的间隔 $\phi_{ij,0}$ 的最小值受限,为得到较小的参考相延时间间隔,采用 3 根温度补偿反射栅设计,以 2 个相延时间间隔之差作为参考相延时间间隔构造出能适用于较宽温度范围的温度补偿结构。

3 根反射栅的相延时间间隔分别为 $\phi_{12,0}$ 、 $\phi_{23,0}$ 。以 $\phi_{23,0} - \phi_{12,0}$ 作为参考相延时间间隔。由式(4)可得

$$F_{23-12}(\Delta T) = 1 + \frac{\Delta\phi_{23} - \Delta\phi_{12}}{\phi_{23,0} - \phi_{12,0}} \quad (6)$$

此时,由于分母 $\phi_{23,0} - \phi_{12,0}$ 较 $\phi_{12,0}$ 小,而分子 $\Delta\phi_{23} - \Delta\phi_{12}$ 的误差较 $\Delta\phi_{12}$ 的误差大,所以 $F_{23-12}(\Delta T)$ 的误差较大。

为保证温度补偿系数的精度,需将有较宽适用温度范围的 $F_{23-12}(\Delta T)$ 与具有较高温度补偿精度的 $F_{12}(\Delta T)$ 及 $F_{13}(\Delta T)$ 结合起来。

假设设计温度补偿的适用温度范围为 R ,可通过对 $\phi_{12,0}$ 和 $\phi_{23,0}$ 的参数设计,使 $\phi_{23,0} - \phi_{12,0}$ 足够小以保证温度补偿的适用温度范围。此时, $\phi_{23,0} - \phi_{12,0}$ 的选择条件为

$$\frac{\pi}{TCD(\phi_{23,0} - \phi_{12,0})} > R \quad (7)$$

假设相位的测量误差为 δ_ϕ ,相位的最大测量误差为 $\delta_{\phi_{\max}}$,由于 $\phi_{23,0}$ 与 $\phi_{12,0}$ 两者的测量误差是随机独立的,我们可以简单假设 $\phi_{23,0} - \phi_{12,0}$ 的最大测量误差为 $\sqrt{2}\delta_{\phi_{\max}}$,则由式(4)不难得出,利用 3 根温度补偿反射栅组合能得到 3 组温度补偿系数可能落在的区间分别为

$$F_{12}(\Delta T) = 1 + \frac{\Delta\phi_{12} \pm \sqrt{2}\delta_{\phi_{\max}}}{\phi_{12,0}} \quad (8)$$

$$F_{13}(\Delta T) = 1 + \frac{\Delta\phi_{13} \pm \sqrt{2}\delta_{\phi_{\max}}}{\phi_{13,0}} \quad (9)$$

$$F_{23-12}(\Delta T) = 1 + \frac{\Delta\phi_{23} - \Delta\phi_{12} \pm 2\delta_{\phi_{\max}}}{\phi_{23,0} - \phi_{12,0}} \quad (10)$$

若能够保证以上 3 个区间的交集唯一,则可将三者的结果有机结合,以实现宽适用温度范围、高精度温度补偿。

此时需保证 $F_{23-12}(\Delta T)$ 可能落在的区间小于 $F_{12}(\Delta T)$ 不可能落在区间,且 $F_{12}(\Delta T)$ 可能落在的

区间小于 $F_{13}(\Delta T)$ 不可能落在的区间,即

$$\frac{4\delta_{\varphi_{\max}}}{\phi_{23,0} - \phi_{12,0}} < \frac{\pi - 2\sqrt{2}\delta_{\varphi_{\max}}}{\phi_{12,0}} \quad (11)$$

$$\frac{2\sqrt{2}\delta_{\varphi_{\max}}}{\phi_{12,0}} < \frac{\pi - 2\sqrt{2}\delta_{\varphi_{\max}}}{\phi_{13,0}} \quad (12)$$

由于制造工艺及系统时延分辨能力的限制,两组反射栅的间距还应不小于反射栅间最小间距 A ,即

$$\frac{\phi_{12,0}}{2\pi f_c} \cdot v \geq A \quad (13)$$

设 $\phi_{12,0} = l_\varphi$, $\phi_{23,0} = k \times \phi_{12,0} = k \times l_\varphi$, 则式(7)、(11)~(13)可简化为

$$\frac{\pi}{TCD(k-1)l_\varphi} > R \quad (14)$$

$$\frac{4\delta_{\varphi_{\max}}}{(k-1)l_\varphi} < \frac{\pi - 2\sqrt{2}\delta_{\varphi_{\max}}}{l_\varphi} \quad (15)$$

$$\frac{2\sqrt{2}\delta_{\varphi_{\max}}}{l_\varphi} < \frac{\pi - 2\sqrt{2}\delta_{\varphi_{\max}}}{(k+1)l_\varphi} \quad (16)$$

$$\frac{l_\varphi}{2\pi f_c} \cdot v \geq A \quad (17)$$

由此推得

$$1 + \frac{4\delta_{\varphi_{\max}}}{\pi - 2\sqrt{2}\delta_{\varphi_{\max}}} < k < 1 + \frac{\pi}{TCD \cdot l_\varphi \cdot R} \quad (18)$$

$$k < \frac{\pi}{2\sqrt{2}\delta_{\varphi_{\max}}} - 2 \quad (19)$$

$$l_\varphi \geq \frac{A \cdot 2\pi f}{v} \quad (20)$$

其中,要保证式(18)有解,可推出

$$R < \frac{\pi(\pi - 2\sqrt{2}\delta_{\varphi_{\max}})}{4\delta_{\varphi_{\max}} TCD \cdot l_\varphi} \quad (21)$$

实际设计过程中, l_φ 与 TCD 为已知量,所以最大相位误差限制了此种设计方法的温度补偿适用范围。 $\delta_{\varphi_{\max}}$ 越小,则理论上可设计出更大适用范围的温度补偿反射栅。由式(18)~(20)中 TCD 只与材料有关,波速 v 与材料及温度有关, A 与系统有关,三者都可确定为已知值, $\delta_{\varphi_{\max}}$ 与测试系统有关,也可认定为已知量。当 $\delta_{\varphi_{\max}}$ 值足够小时,我们只要给定目标适用温度范围 R 及 l_φ 就可确定 k 的范围,同时也就可确定设计得到理论温度补偿系数的误差精度为 $\sqrt{2}\delta_{\varphi_{\max}}/[l_\varphi \times (k+1)]$ 。

2 实验设计及结果

2.1 实验平台

为验证本文所提出的温度补偿反射栅设计方案的有效性实用性,接下来将从实验角度予以分析,

实验平台主要组成部分及原型标签如图 1 所示。由图可看出,所构建的实验平台包括一个线极化天线(增益约 8 dBi)、自主开发的高性能脉冲查询式阅读器原型机、应用系统主机、最小分辨率为 0.1 °C 的温控箱、测量范围 0~250 °C,精度为 0.01 °C 的水银温度计一组、一台网络分析仪及若干温度补偿反射栅标签样品。

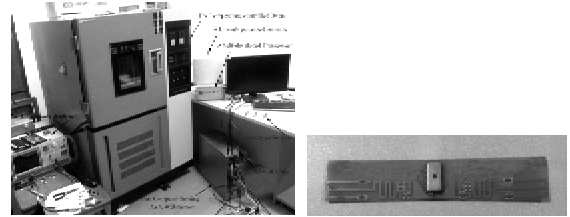


图 1 标签实验平台

2.2 标签参数设计

实验中采用的基底材料为 128°YX-LiNbO₃, $TCD = -72 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$,标准温度下的 $v = 3\,978 \text{ m/s}$, $f_c = 922.5 \text{ MHz}$,由于制造工艺及系统时延分辨能力的限制, $A = 1.114 \times 10^{-3} \text{ m}$,由式(20)则可取 $l_\varphi = \phi_{12,0} = 1.623 \times 10^3 \text{ (rad)}$ 。将 TCD 与 l_φ 代入式(21)得到此时温度范围上限 R_{\max} 与 $\delta_{\varphi_{\max}}$ 间的函数关系为

$$R_{\max} = \frac{\pi(\pi - 2\sqrt{2}\delta_{\varphi_{\max}})}{4\delta_{\varphi_{\max}} \times 1.623 \times 10^3 \times 72 \times 10^{-6}} \quad (22)$$

图 2 为 R_{\max} 与 $\delta_{\varphi_{\max}}$ 关系。由图可看出, R_{\max} 随着 $\delta_{\varphi_{\max}}$ 的加大而逐渐变窄,本文采用的系统 $\delta_{\varphi_{\max}} = 5^\circ = 0.0873 \text{ (rad)}$,代入式(22)推得适用温度范围上限为 222.8 °C,可拟定 $R = 180 \text{ }^\circ\text{C}$ 。将 $\delta_{\varphi_{\max}}$ 与 R 代入式(18)~(20)得 $1.1206 < k < 1.1494$ 。取 $k = 1.14$,此时 $F(\Delta T)$ 的理论精度为 3.4×10^{-5} 。

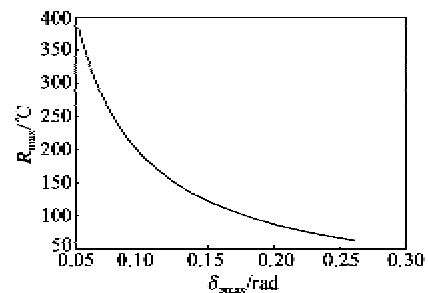


图 2 R_{\max} 与 $\delta_{\varphi_{\max}}$ 关系图

2.3 实验结果

图 3 为标准温度为 33 °C,环境温度为 72.3 °C 时,标签 $F(\Delta T)$ 的确定过程及结果。由图 3(a)可看出,在适用温度范围内,待测温度补偿系数的可能区

间为[0.996 2,0.997 8]。由图 3(b)可看出,由 $\Delta\phi_{12}$ 确定的一系列温度可能的区间中,仅[0.997 1, 0.997 3]与[0.996 2,0.997 8]有交集,因此,可认为 $F(\Delta T)$ 的真值范围为[0.997 1,0.997 3]。同理可知由 $\Delta\phi_{13}$ 确定的 $F(\Delta T)$ 真值范围为[0.997 10, 0.997 18],并以 $\Delta\phi_{13}$ 确定的 $F(\Delta T)=0.997 14$ 作为最终测量值。由式(4)可得,在 72.3 °C 时,理论 $F(\Delta T)$ 为 0.997 17,而系统测量得到的 $F(\Delta T)$ 值与理论计算得到的 $F(\Delta T)$ 值误差为 3×10^{-5} ,完全符合设计的误差范围。

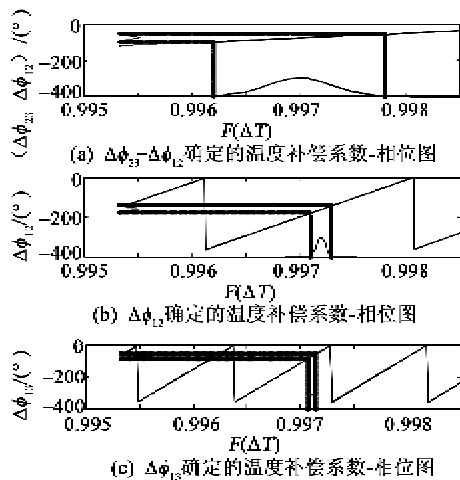


图 3 高精度 $F(\Delta T)$ 确定过程($\Delta\phi_{23} - \Delta\phi_{12} \rightarrow \Delta\phi_{12} \rightarrow \Delta\phi_{13}$)

图 4 为不同温度点下, $F(\Delta T)$ 的测量值与理论值间的对比。由图可看出,在较低温度环境下,二者之间基本重合,当温度高于 80 °C 后,二者之间出现一定偏差,但总体趋势一致且偏差量较小。偏差的来源可能为温控箱在高温下保持箱内温度稳定的能力有限。标签在 33~212 °C 都能保证有效工作,符合 180 °C 的设计值要求。

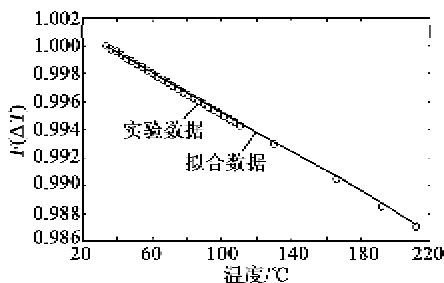


图 4 $F(\Delta T)$ 理论值及实际值与 ΔT 对应关系

图 5 为根据式(4)计算并确定出的标签第一根与第三根反射栅 $\Delta\phi_{13}$ 与 $F(\Delta T)$ 的函数对应关系。由图可看出,数据点最优拟合线斜率为 1.99×10^5 ,由式(4)的理论计算值 $\Delta\phi_{13,0} = 1.99 \times 10^5$,两者吻

合。因此,采用 3 根反射栅设计,通过利用多组反射栅间相延时间隔的变化量 $\Delta\phi_{ij}$ 作为温度补偿参量解决了仅用一组温度补偿反射栅存在温度补偿适用范围与温度补偿精度无法同时提升的问题。

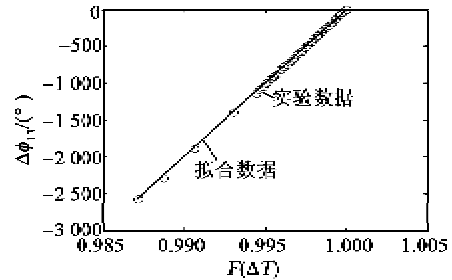


图 5 $\Delta\phi_{13}$ 与 $F(\Delta T)$ 对应关系

3 结束语

本文介绍了一种基于 3 根温度补偿反射栅以实现 SAW RFID 标签温度补偿的设计方法,在温度补偿反射栅设计的过程中详细分析了相位测量误差对温度补偿适用范围及温度补偿精度的影响,同时说明了实际温度补偿过程中温度补偿系数的确定方法。该种标签的设计及温度补偿系数的确定方法能使大容量声表面波标签在宽泛的温度范围内都能得到精确的温度补偿,标签的阅读误码率将得到有效降低。

参考文献:

- [1] PLESKY V P, REINDL L M. Review on SAW RFID tags [J]. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2010, 57(3): 654-668.
- [2] HARMA S, ARTHUR W G, HARTMANN C S, et al. Inline saw rfid tag using time position and phase encoding [J]. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2008, 55(8): 1840-1846.
- [3] 林蔚. 脉冲位置结合相位调制的声表面波射频标签的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [4] KANG A, ZHANG C, JI X, et al. SAW-RFID enabled temperature sensor [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 201: 105-113.
- [5] 周卫. 带温度补偿、低 g-振动灵敏度的小型声表面波微波波源[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2000(4): 27-30. ZHOU Wei. Small size surface acoustic microwave resource with temperature compensation and low-g-vibration sensitivity[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2000(4): 27-30.
- [6] KUYPERS J H, REINDL L M, TANAKA S, et al. Maximum accuracy evaluation scheme for wireless SAW delay-line sensors[J]. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2008, 55(7): 1640-1652.