

基于阻抗负载原理的SAWR传感研究

刘翔宇¹, 陈智军¹, 庞旗旗², 刘清睿¹, 薛昕烁¹

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 211106;

2. 中电科技德清华莹电子有限公司, 浙江 德清 313200)

摘要:声表面波谐振器型传感器作为一种新型的无源无线传感器,在诸多场合具有应用潜力,但依赖待测对象对谐振器本身的直接作用。为拓展应用范围,将电抗敏感元件作为阻抗匹配网络的元件之一,设计了基于低失配网络的阻抗负载谐振器型传感器,并对其敏感原理及低失配网络的实现本质进行分析。在此基础上提出预偏置器件方案,不仅将谐振器自身谐振频率移至阻抗测量范围中间,而且使频率敏感范围提升了一倍。实际制作低失配网络测试电路板并验证其理论的正确性,最后分析了实测结果与理论存在偏差的原因,并提出了理论模型的改进方向。

关键词:声表面波谐振器;无源无线;阻抗负载;低失配网络;预偏置器件

中图分类号:TN384;TN64 **文献标识码:**A

Research on SAWR Sensing Based on Impedance-Loaded Principle

LIU Xiangyu¹, CHEN Zhijun¹, PANG Qiqi², LIU Qingrui¹, XUE Xinshuo¹

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. CETC Deqing Huaying Electronics Co., Ltd., Deqing 313200, China)

Abstract: As a new type of passive wireless sensor, surface acoustic wave resonator has application potential in many occasions, but it depends on the direct effect of the object to be measured on the resonator itself. In order to expand the application range, the reactance sensitive element is utilized as one of the components of the impedance matching network, and the impedance-loaded resonator-type sensor based on the low-mismatch network is designed. The sensing principle and the implementation essence of the low-mismatch network are analyzed. Furthermore, the scheme including pre-bias device is proposed, which not only moves the resonant frequency of the resonator itself to the middle of the impedance measurement range, but also doubles the frequency sensitivity range. The low-mismatch network test circuit board is made and the theory is verified. Finally, the reasons for the deviation between the measurement and the theory are analyzed, and the improvement direction of the theoretical model is put forward.

Key words: surface acoustic wave; passive and wireless; impedance-loaded; low-mismatched network; pre-bias device

0 引言

声表面波谐振器(SAWR)作为一种新型传感器,具有无源无线的优点,在多种复杂工况下有着潜在的应用价值。其内部结构包括周期性分布的叉指换能器以及由两侧密集排布的反射栅构成的声学谐振腔,两者在压电基底上的共同作用使得谐振器能够以机械波的形式存储能量,且在电学上表现出较强的选频特性。常规的SAWR传感方式以

谐振器自身作为敏感单元,通过待测对象直接作用于SAWR以改变谐振器的谐振频率^[1-4]。此方式直观高效,在温度、扭矩测量等领域取得了显著进展。但该传感原理的优势也暗含了其劣势:依赖于待测对象对SAWR的直接影响,无法测量如位移、土壤湿度等难以直接作用在SAWR上的物理量。

与直接敏感的方式不同,基于阻抗负载原理的SAWR传感器有着更广阔的应用前景^[5-7]。通过阻

收稿日期:2024-11-05

基金项目:江苏省重点研发计划社会发展项目(BE2022844)

作者简介:刘翔宇(2000-),男,山东省烟台市人,硕士生。通信作者:陈智军(1976-),男(侗族),湖北省武汉市人,副教授,硕士生导师。

抗元件敏感待测对象,SAWR 传感器可以应用于绝大多数场合,有效挖掘了 SAWR 在传感器领域的应用潜力,并使经典的阻抗型传感器具有了无源无线功能。SAWR 主要起到两方面作用:其一是储存能量并在短时间内充当高频交流电源,在外部激励信号消失后,SAWR 对低失配网络起供能作用;其二是利用谐振腔特性,SAWR 作为选频网络的一部分参与整体网络中。

除 SAWR 外,包括阻抗敏感元件的低失配网络是阻抗负载型 SAWR 的重要组成部分。以中电科技清华莹电子有限公司生产的 868 MHz 频段 NDR964 型 SAWR 为基础,通过优化低失配网络的方式,实现了一种无源无线的阻抗负载型 SAWR 传感器,并对其设计方法进行研究。

1 理论分析

阻抗匹配是需要完成的重要工作。阻抗的不匹配会引起能量的损失,导致传感器的工作状态不理想,直接影响系统的性能,如检测距离减小、检测精度降低等。常规的阻抗匹配网络主要有 L 型、 π 型、T 型结构。理论上,2 个元件即可完成阻抗匹配,3 个元件提供了额外的自由度,更易于实现。本文拟将三元件阻抗匹配网络中第 3 个原本阻抗值固定的元件更换成阻抗敏感元件,在一定的频率范围内实现匹配网络的低失配。当敏感元件的阻抗变化时,低失配网络的谐振频率也发生变化。

声表面波谐振器有效匹配网络的排列组合有 4 种:T 型 CLC 网络、 π 型 CLC 网络、T 型 CLL 网络、 π 型 CLL 网络^[8]。将远离 SAWR 处的元件设置为可变阻抗,4 种低失配网络如图 1 所示。

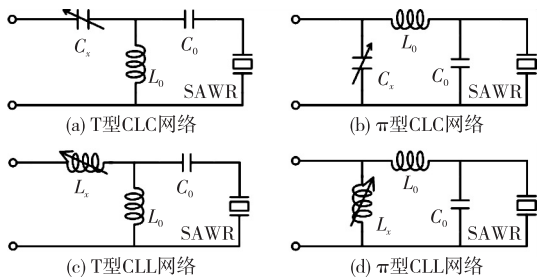


图 1 SAWR 可用的低失配网络

使用 ADS 软件仿真上述低失配网络,仿真结果如图 2 所示。T 型与 π 型 CLC 网络相比,前者在小容值范围内具有较高的灵敏度,后者的线性度更好且具备更大的敏感电容测量范围。T 型与 π 型 CLL 网络相比,前者在大感值范围内具有较大的谐

振频率变化,后者在小感值范围内具有很好的线性度。

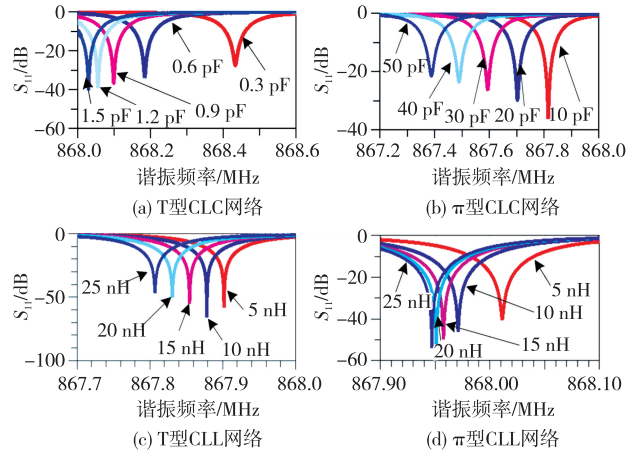


图 2 敏感元件对不同网络的谐振频率影响

为有效观察阻抗匹配的效果,使用史密斯圆图作为观察和阻抗匹配工具。图 3 展示了 NDR964 型 SAWR 的 S_{11} 。由图可见,该模型下 SAWR 的 S_{11} 曲线整体表现近似一个圆形。在史密斯圆图中,靠近中心点的频点反射系数更小,表现为匹配更佳的频点,距离中心点最近的频点即为网络的谐振频率。

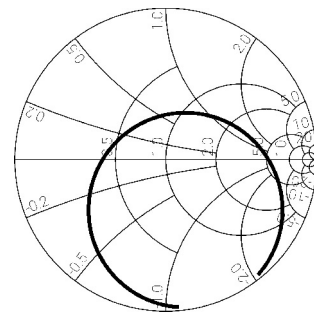


图 3 NDR964 型 SAWR 等效网络及参数

针对 π 型匹配网络,SAWR 通过两个元件匹配完成后的史密斯圆图如图 4(a) 所示。并联第 3 个敏感元件会导致整体图形沿电导圆旋转。就整体效果而言,本身极其接近圆形的原网络在并联元件的影响下表现出以自身为圆心进行旋转的特点,意味着在旋转过程中某一个频点与中心点距离极近,也代表着整体网络的某一频点可以实现极强的匹配。

针对 T 型匹配网络的匹配结果如图 4(b) 所示。在串联第 3 个敏感元件时,依据史密斯圆图“上感下容、左并右串”的特性,串联元件使得整体网络沿电阻圆旋转。无论串联的是电容还是电感,以串联方

式连接至整体网络的元件会导致近似圆形的网络基本沿圆心旋转,始终与史密斯圆图中心保持某一频点的高度匹配。

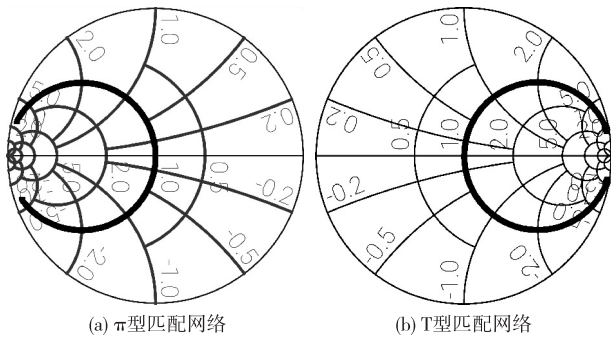


图4 不同匹配网络的理想匹配结果

需要注意的是,上述旋转并不是简单的旋转整圆,而是一种运动规律的形容,如图5所示。由图可见,尽管其外形与圆形高度相似,但在实际SAWR中,与史密斯圆图中心点接近的频点明显稀疏于两侧频点,接近中心点的频点在旋转过程中运动速度高于两侧频点。

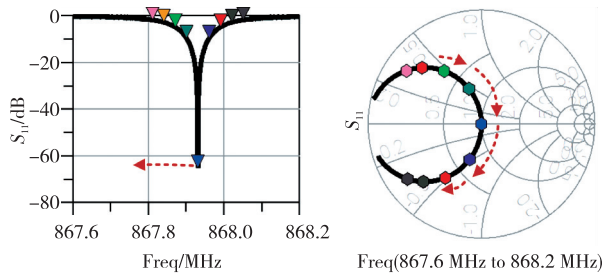


图5 等距频点在史密斯圆图中的分布

从阻抗或导纳的角度可以理解上述现象发生的原因。以基于敏感电容的网络为例,T型CLC网络在第3个元件处串联了可变电容 C_x ,SAWR与前两个元件的整体阻抗 Z 的关系为

$$Z = Z_0 + \frac{1}{j\omega C_x} \quad (1)$$

由式(1)可知, Z 的虚部变化与 C_x 的变化呈反比,即在史密斯圆图上 C_x 与旋转的角度成反比,因此,当 C_x 较小时,网络具有较高的灵敏度。类似地,假设 π 型CLC网络在前两个固定元件作用下转换到导纳 Y_0 ,在额外并联一个可变电容 C_x 的情况下,整体网络最终的导纳 Y 为

$$Y = Y_0 + j\omega C_x \quad (2)$$

由式(2)可知, Y 的虚部变化与 C_x 的变化呈正比,即该网络具有很好的线性度,对传感器设计而言是个极大的优点。基于敏感电感的网络分析与

敏感电容类似,此处不予赘述。

相较电感而言,量产贴片电容无论在公差还是在标称值的指数间距上均具有较大优势。因此,本文拟采用 π 型和T型CLC网络实现低失配,以不同容值的贴片电容替代敏感元件,设计实验并获取测试结果。

2 低失配网络实现

SAWR常用的等效电路模型为Butterworth-Van Dyke(BVD)模型^[9],如图6所示。图中, C_m 和 L_m 分别代表压电基底弹性和惯性引起的动态电容和动态电感, C_0 代表SAWR自身的静电容, R_m 是阻尼引起的动态电阻。根据NDR964型SAWR数据手册,在ADS软件中绘制其BVD模型。ADS可通过内置工具进行 S_{11} 、阻抗和导纳的计算。

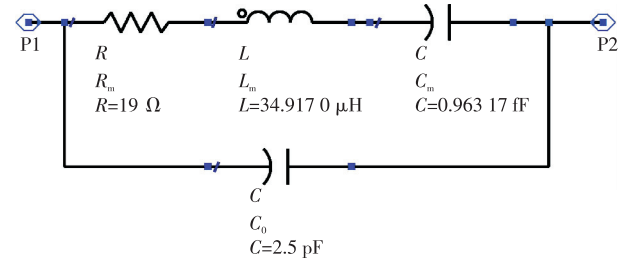


图6 SAWR的BVD等效模型

对于 π 型CLC匹配网络,距离SAWR最近的匹配元件是并联的电容。并联电容可使整体圆周在阻抗坐标系上缩小,如图7(a)所示。该步骤匹配的目标是使整体网络在阻抗坐标系上与 $X = 50 \Omega$ 相切。第2个匹配元件是串联电感,该步骤可使整体网络向上偏移,其圆形轮廓沿极轴对称,如图7(b)所示。该网络在理想状态下与 $50 + j0 \Omega$ 相交,即在史密斯圆图上与中心点相交,意味着网络上有一频点的匹配极佳。

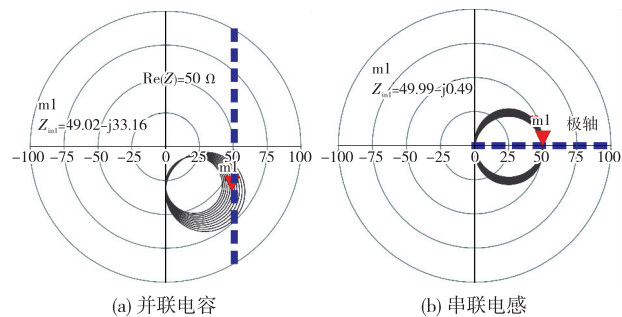


图7 π 型CLC匹配网络实施步骤

第3个匹配元件是并联的可变电容,该可变电容用作传感器,其容值随待测对象的变化而变化。

如图 8(a)所示,在史密斯圆图上,近乎圆形的整体网络因并联电容而产生了旋转。该网络在旋转前与中心点相交且关于横轴对称,旋转后仍接近圆形,但与中心点相交的频率发生了改变,具体频率如图 8(b)所示。正如第 1 节“理论分析”部分所述,SAWR 本身圆形的阻抗曲线在此处发挥了重要作用。

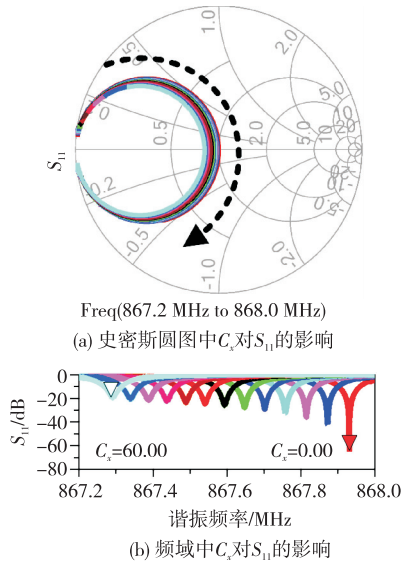


图 8 π 型 CLC 网络中对 S_{11} 的影响

对图 2(b)中可变电容 C_x 进行细化扫描(见图 8(b)),在 $0 \sim 60$ pF 内,整体网络的 S_{11} 保持在 -20 dB 以下,意味着匹配程度较好。匹配网络的谐振频率随 C_x 的变化及其最小二乘拟合曲线如图 9 所示,验证了第 1 节“理论分析”部分关于 π 型 CLC 匹配网络线性度良好的结论。

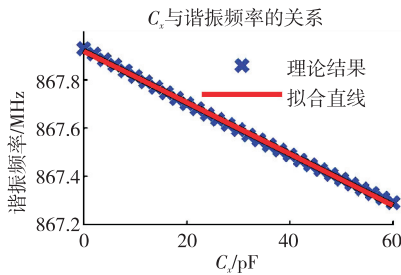


图 9 π 型 CLC 匹配网络中 C_x 与谐振频率的关系

T 型 CLC 网络的第一个匹配元件为串联电容 C_0 。串联电容可使网络在导纳坐标系下扩张,如图 10(a)所示。选取合适的容值,使网络在导纳坐标系下与 $Y=0.02$ S 相切。该步骤保证了在并联电感的介入下,整体网络导纳平移后可达到 $0.02+j0$ S;通过扫描电感参数,明确电感 L_0 ,使得整体网络沿 X

轴对称,如图 10(b)所示。与 π 型 CLC 网络相似,该步骤实现了网络的低失配。

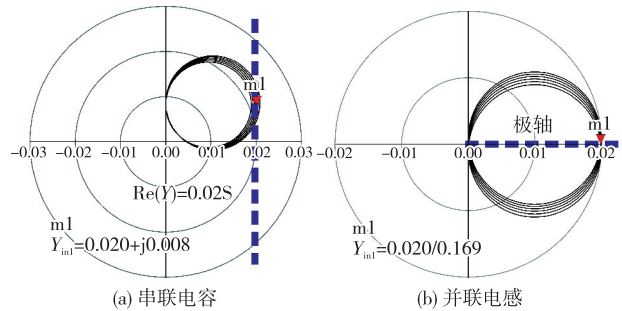


图 10 T 型 CLC 匹配网络实施步骤

串联敏感电容 C_x ,可获得整体网络谐振频率和 C_x 的关系如图 11 所示。由图可见,当 $C_x \in (0, 0.15]$ 时,整体网络的 S_{11} 表现较差,存在较大的失配现象,但 SAWR 传感器的灵敏度极佳;当 $C_x \in [0.15, +\infty)$ 时,整体网络的 S_{11} 保持在 -20 dB 以下,匹配较好,但随着 C_x 逐渐增大,该网络的灵敏度下降严重。上述两个重要参数存在较大的取舍,因此,T 型 CLC 电路仅适用于对性能要求较为极端的场合。

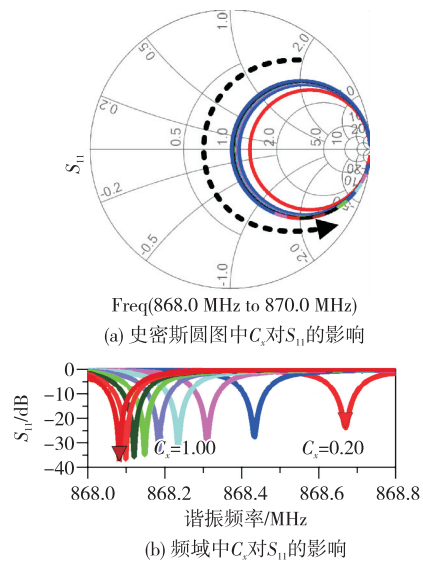


图 11 T 型 CLC 网络中对 S_{11} 的影响

以上方式可以实现 SAWR 匹配的低失配网络,由分析可知 π 型 CLC 匹配网络在匹配程度和线性度上都有明显优势,以该网络设计的 SAWR 传感器将具备更强的通用性。但该网络仍具有额外的改进空间,如图 8(b)所示,以 SAWR 自然谐振频率为基准,随着敏感电容 C_x 的变化,整体网络的谐振频率仅朝向一侧变化,此现象对于 SAWR 元件本身极为不利,随着频率逐渐偏离 SAWR 的谐振频率,

BVD模型已无法准确描述谐振器的电学特性,谐振器网络 S 参数近似为圆形的假设也将失效,限制了整体网络的敏感范围。

针对此问题,通过添加额外的阻抗元件对网络实现预偏载,如图12所示。将SAWR自身的谐振频率对应的容值从范围的一侧移动到中间,在进一步扩展SAWR敏感频率范围的同时,一定程度上减少了BVD模型失效问题带来的影响。由于 π 型CLC匹配网络具有线性度优势,以下将仅使用 π 型CLC匹配网络作为预偏载的分析案例。

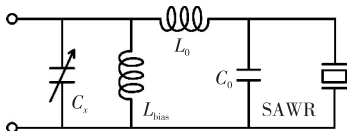
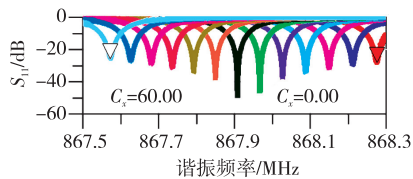
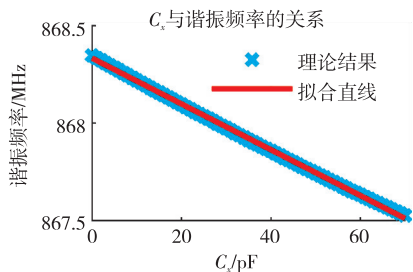


图12 π 型预偏置CLC匹配网络

对于位于最外侧的敏感元件 C_x ,在史密斯圆图上(见图8(a)), C_x 的变化会使网络沿顺时针单向转动。若在敏感元件前级通过并联 L_{bias} 提前将该网络沿逆时针旋转,即可实现网络对SAWR自然谐振频率另一侧频段的覆盖。图13为 π 型预偏置CLC匹配网络参数。由图13(a)可知,该预偏置器件将SAWR传感器的频段提升了一倍。再次对可变电容容值和频率范围进行最小二乘拟合,如图13(b)所示。由图可知,预偏置网络基本不改变曲线斜率,整体网络谐振频率随 C_x 变化的线性度依旧良好。



(a) 频域参数



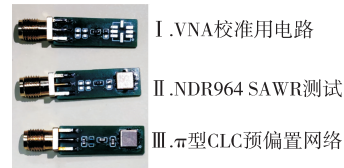
(b) C_x 与谐振频率的关系

图13 π 型预偏置CLC匹配网络参数

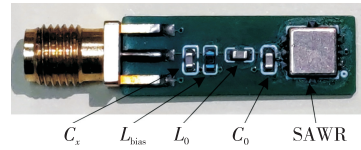
3 实验测试与分析

按照上述匹配理论值设计并制作了SAWR匹配电路测试板。在制作时尽可能缩小了传输线长度,减少传输线对整体网络带来的额外变化,最终

制作的匹配电路测试板如图14(a)所示,图14(b)展示了图12中相应元件的安装位置。该测试电路可以同时满足有偏置和无偏置的 π 型CLC匹配网络需求,是本次实验使用的主要测试设备。



(a) 测试座实验方法



(b) 测试座结构

图14 SAWR低失配网络测试电路板

如图15所示,将测试板连接至VNA进行校准,消除测试板对电路测试的影响。按照阻抗原理论值,选择合适的标称值阻抗元件来替代,进行测试与微调。

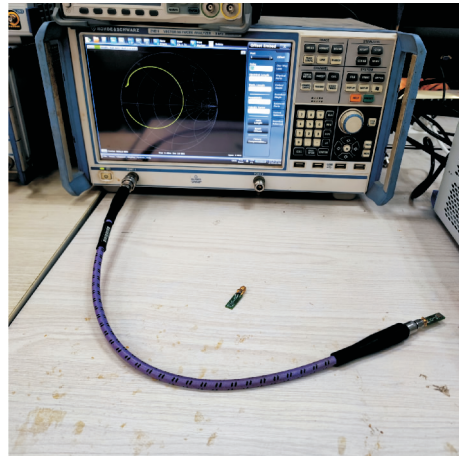


图15 SAWR测试环境

为尽可能消除电容封装带来的等效串联电感影响,使用容值最小的贴片电容作为占位,安装在 C_x 位置,最终获取的阻抗匹配网络及匹配参数为: $C_0=4$ pF, L_0 替换为电容 C_1 ,容值为30 pF,偏置电感 $L_{bias}=4.7$ nH。在原设计的匹配网络中,第2个元件的位置由电感换成了电容,此处的变化由元器件公差、元器件寄生电感、电容和PCB寄生参数所致。这些参数并不影响低失配网络每一步的匹配目标,具体使用的元器件需要根据实际情况进行灵活调整。本网络的最终匹配结果如图16所示,与理论中高度相似。

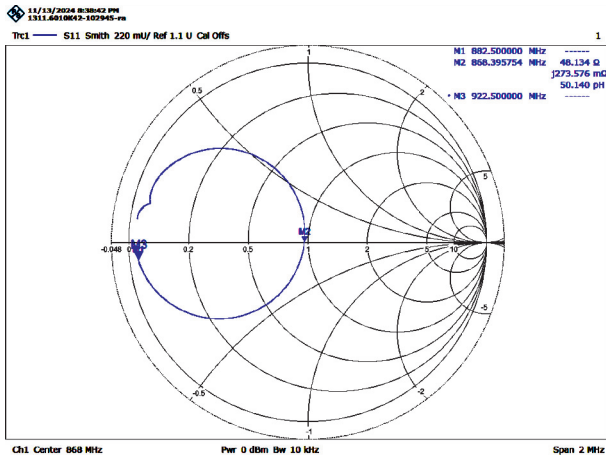


图 16 NDR964 型 SAWR 匹配结果

使用村田公司 GRM 系列陶瓷贴片电容 C_x 代替安装至对应位置,分别使用 VNA 测试其整体网络的谐振频率。针对无偏置的 π 型 CLC 匹配网络测试了多种 C_x 容值,通过 VNA 测量了每个容值下网络的谐振频率并将其绘制成曲线如图 17 所示。由图可见,该网络下整体频率变化的线性度较好,有效地验证了在敏感电容 C_x 变化的情况下,整体网络仍然可以有效实现低失配,且整体网络的谐振频率基本随敏感电容的变化而呈线性变化。

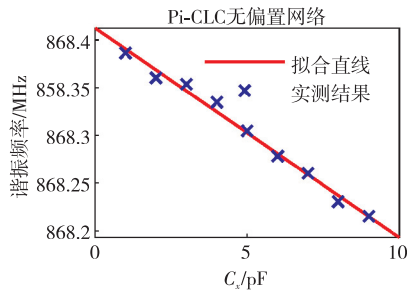


图 17 π 型 CLC 无偏置网络电容与谐振频率的关系

测试了带有预偏置的整体网络,其结果如图 18 所示。图中表现出较强的非线性,效果较理论有部分差距,且当 C_x 达到 10 pF 时,由于谐振器所带的寄生峰起到了主要影响,整体网络出现了严重的变形。

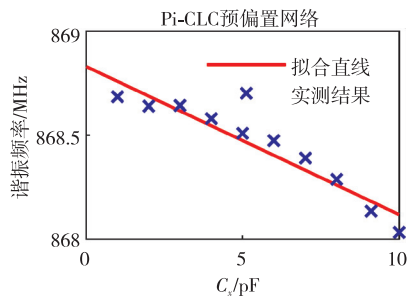


图 18 π 型 CLC 预偏置网络电容与谐振频率的关系

当 C_x 容值高于 3 pF 时,随着整体网络的工作频率逐渐偏离谐振器的工作频率,BVD 模型的误差也出现了较大的偏差,此时,理论上线性度良好的整体网络出现了较强的非线性现象,这种现象缩减了可用电容的范围,但同时提高了单位电容的频率灵敏度。解决该问题的思路:可以尝试提高 BVD 模型阶数,以便更精准细致地拟合 SAWR 在不同频率下的实际表现,使整体网络的表现更接近实际电路。

误差存在的另一主要原因是使用的电容元件存在较大的公差。尽管村田公司 GRM 系列电容是市场上能大批量获取的高精度电容,能满足绝大多数普通网络的匹配需求,但该电容自身带来的 ESL、ESR 仍然为匹配工作带来了问题,也对后期的验证工作带来了额外的误差。针对本传感器验证阶段使用的极小容量电容,虽然实验中采取了多次测量取平均的方式,尽可能地避免了元件本身的误差,但该容量下的量产电容误差仍不容小觑。以 0.2 pF 为例,该电容的公差达到了 ± 0.1 pF,且由于产线中同一批次的产品偏差基本一致,产品容值分布并不服从以标称值为中心的正态分布,无法通过取平均值的方式进一步缩小误差。这无疑对实验验证造成了较大的影响。

4 结束语

针对现有的阻抗负载型 SAWR,探索了其低失配网络的构建原理和匹配方法,阐述了该架构下低失配网络实现的电学理论,并通过实验验证了该方案下不同容值对应的谐振峰值测量结果。对数据进行分析并对该理论与实际之间的误差做出了一定程度的解释,同时提出了可能的解决办法。本文的设计可以有效拓展 SAWR 的应用领域,可将绝大多数敏感元件连接至 SAWR 以实现无源无线功能,在多种应用场合下具有较大的开发潜力。

参考文献:

- [1] 马龙祥. EPS 用 SAW 扭矩传感器的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
- [2] LEFF D, WINTERS S, DA CUNHA M P. Temperature and dynamic strain measurements using a single SAWR sensor[C]//Venice, Italy: IEEE International Ultrasonics Symposium, 2022: 1-4.
- [3] XIAO Q, MA X, WANG W, et al. High-performance SAWR strain sensor with piston-mode operation[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(9): 10514-10521.

- ture sensor fabricated on PEN substrate[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 315: 112268.
- [5] YANG Yuntao, PENG Bin, SUN Zhaofeng, et al. Highly sensitive SAW pressure sensor based on simply supported beam[C]//Dalian, China: 2023 4th International Conference on Electrical, Electronic Information and Communication Engineering, 2023.
- [6] 毛臻,张诚. 基于 TH71221 的无源声表面波传感信号读取器[J]. *电子设计工程*, 2021, 29(18): 58-62.
- MAO Zhen, ZHANG Cheng. Passive surface acoustic wave sensing signal reader based on TH71221[J]. *Electronic Design Engineering*, 2021, 29(18): 58-62.
- [7] 刘旭东. 无线无源声表面波温度传感器阅读器系统设计[D]. 湖南: 湖南大学, 2022.
- LIU Xudong. Design of wireless passive surface acoustic wave temperature sensor reader system[D]. Hunan: Hunan University, 2022.
- [8] 王其豪,曹俊豪,张光祖,等. 基于软件无线电方案无线无源 SAW 温度阅读器设计[J]. *压电与声光*, 2024, 46(1): 22-25.
- WANG Qihao, CAO Junhao, ZHANG Guangzu, et al. Design of wireless passive SAW temperature reader based on software defined radio scheme[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2024, 46(1): 22-25.
- [9] 李平. 无源无线声表面波传感器及仪器系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
-
- (上接第 845 页)
- [4] MASKAY A, DA CUNHA M P. High temperature static strain microwave acoustic sensor[C]//Tours, France: IEEE International Ultrasonics Symposium, 2016: 1-4.
- [5] 胡天玉. 基于 SAWR 的无线无源湿度传感器[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2020.
- [6] YUE X, KIELY J, LUXTON R, et al. Passive impedance sensing using a SAW resonator-coupled biosensor for zero-power wearable applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(3): 2347-2357.
- [7] 蔡飞达,李红浪,田亚会,等. 声表面波谐振型无线传感器匹配电路研究[C]//武汉: 全国声学学术会议, 2016: 721-724.
- [8] 王建玲. 基于 SAWR 的无源无线阻抗负载传感器的建模和研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [9] TSENG S, WU R. Design of SAW filter and multiplexer module for 5G carrier aggregation [C]// Hong Kong: IEEE Asia-Pacific Microwave Conference, 2020: 36-38.