

文章编号: 2096-1618(2022)01-0051-04

5G 频段下材料无损检测传感装置设计

王 韧¹, 孙浩然², 敬守钊¹, 樊 勇¹

(1. 电子科技大学电子科学与工程学院, 四川 成都 610071; 2. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:利用高灵敏度射频无损检测传感器评估样品的电磁特性在航空航天和生物医学等领域应用越来越广泛,提出一种工作在 5G 频段下的高灵敏度材料无损检测传感装置,该传感装置基于微带型射频电路和矢量网络分析仪。射频电路包括一对 T 型结功分器、一对交指电容(IDC)和互补谐振环(CSRR)。对该电路加工并对标准样品如 PVC、玻璃环氧树脂、FR4 等材料测试发现:测量样品的介电特性与已发表文献结果吻合,证明了该无损检测传感装置的高精度和可兼容特性。

关键词:5G 频段;传感器;无损检测

中图分类号:TN806

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2022.01.009

0 引言

随着微波毫米波和 5G 通信技术的不断发展,人们研制出各种基于 PCB 工艺制作的印刷微带电路、天线等射频器件^[1-2]。其中微波电路中介质材料的介电特性对该电路的频率响应影响较大。这使得准确测量介质的相对介电系数变得愈发重要。常用的介电常数测量方法主要分为自由空间方法、传输/反射方法和谐振腔方法^[3-6]。自由空间方法的原理是测量样本构成天线系统的远场,并由此求出介电常数。这种方法需要待测样本具有很大的截面以减小色散影响。传输/反射方法通过将样本放置在传输线的一部分(例如波导、同轴线)内,通过测量系统的反射和透射系数确定材料的复介电系数。不足之处是对于低损耗物质,该方法准确性较低。谐振法可以分为传统的波导型谐振器和基于传输线的平面谐振器。而基于平面微带线的谐振技术由于成本低、重量轻、易于制造等优点,近年来国内外研究较多。如使用单个谐振单元(例如开口谐振环、互补 SRR 或叉指式电容单元)等结构提高平面型谐振传感器测量精度^[7-14]。Kiani 等^[7-11]针对磁性材料,提出了基于 SRR 结构的微波测量电路,Mrozowski 等^[12-14]提出基于微带结构的 CSRR 传感器,用于微弱介电变化的精度测量,测量误差最大为 2.14%;Alahnomi 等^[15-16]总结了近年来微波无损检测装置的典型装置,并指出基于叉指式电容单元等结构的微波传感器具有非常良好的应用前景。为进一步抑制杂波信号干扰并提高测量灵敏度,文中提出了一种新型微带型射频电路,该电路包括一对交指电容

(IDC)和互补谐振环(CSRR)。对该电路进一步加工并对标准样品如 PVC、FR4 等材料测试发现:测量样品的介电特性与已发表文献结果非常接近,最终证明了该方法的准确性和可行性。

本文设计了一种工作在 5G 频段下的高灵敏度材料无损检测传感装置,该传感装置基于微带型射频电路和矢量网络分析仪。其中核心射频电路包括一对 T 型结功分器、一对交指电容(IDC)和互补谐振环(CSRR)。通过对该传感装置进行加工测试,并结合参考材料进行实时无损检测,进一步分析了测量数据和参考值以及传感器结构中关键参数对传感系统测量性能的影响。

1 传感器结构与仿真性能分析

1.1 电路工作原理

对称型测量电路结构如图 1 所示。每条微带线上平面上加载一对 IDC 单元,而 CSRR 单元则蚀刻在背部接地面。交指电容可以等效为磁偶极子,而 CSRR 可等效为电偶极子,电磁偶极子的适当排布可形成场强集中区,两端口和 T 形结之间通过加载 35.35Ω 阻抗变换线实现匹配。

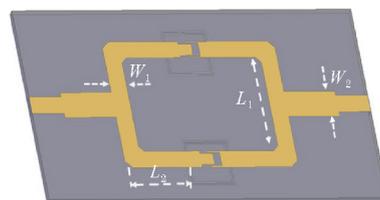


图 1 射频传感电路结构图

收稿日期:2021-07-01

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2020B0101080001)

根据谐振理论考虑对称结构的一般情况,包括 IDC 单元和矩形 CSRR。设计电路的集总元件模型如图 2 和图 3 所示。其工作原理基于微扰理论,中心频率和等效电感电容如式(1)~(4)。其中 $L_u(L_d)$ 和 $C_u(C_d)$ 分别代表上(下)并联支路中微带线的总电感和电容。谐振单元 CSRR 等效为 $L_{Cu}-C_{Cu}$ 。IDC 的等效串联电容由 $C_{ui}(C_{di})$ 表示。在这种情况下,由 IDC 和 CSRR 引入的等效串联电容可以用作电磁场敏感区域,实现更高的灵敏度。基于 CSRR 的射频电路谐振频率和品质因数可分别由式(1)~(4)给出。

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Cu}(C_u+C_{ui}+C_{Cu})}} \quad (1)$$

$$Q = R \frac{\sqrt{C_u+C_{ui}+C_{Cu}}}{\sqrt{L_{Cu}}} \quad (2)$$

$$C_u+C_{ui}+C_{Cu} = C_0 + \varepsilon'_r C_{MUT} \quad (3)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon'_r - j\varepsilon''_r \quad (4)$$

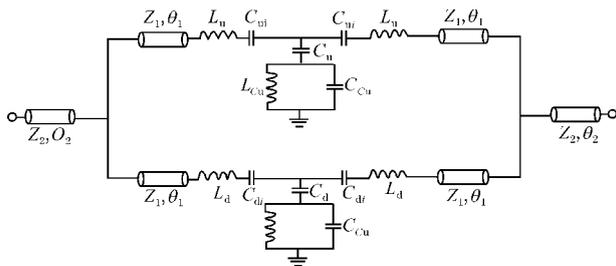


图2 射频传感电路等效电路图

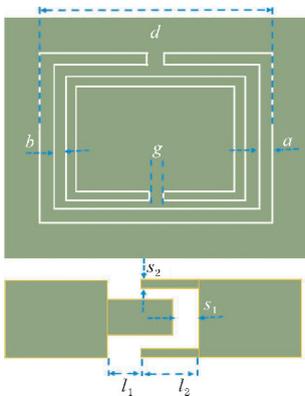


图3 射频传感电路测量区域结构图

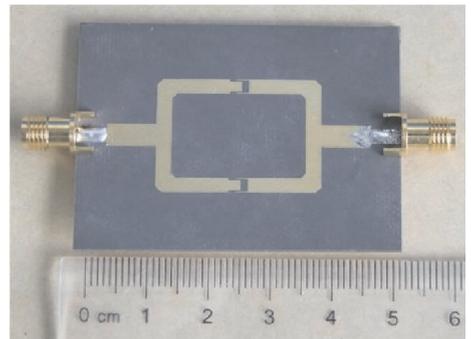
引入待测材料后,电路谐振频率和品质因数都将是材料介电常数的函数,表示为式(5)。当待测介质覆盖在测量装置敏感区域时,由式(1)~(3)可知,电路的谐振频率和品质因数会随着变化,再用相关理论推导或仿真模拟即得到待测介质的介电常数。基于以上电路分析,该对称性射频电路选用 R5880 ($\varepsilon_r = 2.20, h = 1 \text{ mm}$) 最终设计的电路模型参数为: $l_1 = 1.1 \text{ mm}, l_2 = 2.0 \text{ mm}, S_1 = 1.1 \text{ mm}, S_2 = 0.2 \text{ mm}, a = 0.2 \text{ mm}, b = 0.1 \text{ mm}, d = 3.5 \text{ mm}, g = 0.2 \text{ mm}, W_1 = 2.6 \text{ mm}, L_1 = 20.8 \text{ mm}, L_2 = 8.2 \text{ mm}$ 。

$$\begin{aligned} f_0 &= F_1(\varepsilon'_r, \varepsilon''_r) \\ Q &= F_2(\varepsilon'_r, \varepsilon''_r) \end{aligned} \quad (5)$$

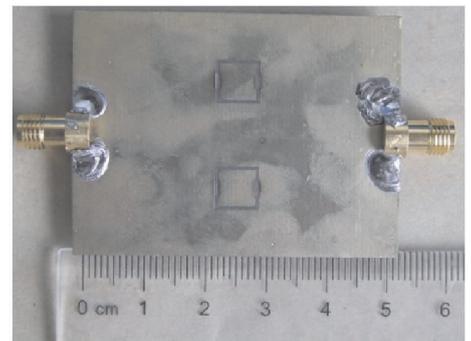
综上所述,所设计射频传感器的谐振特性由带测量材料的复介电常数决定。当无负载时(如当测量区域中没有引入材料时),阻带谐振器是对称的。当待测材料放置在一个传输线段的测量区域时,电路的对称性被破坏,从而影响所提出的传感器的谐振频率和传输系数的大小。因此,又指电容器单元和 CSRR 的电容变化通常取决于待测材料复介电常数的变化。可以根据以上工作原理进行电路散射参数测量并推导出试样的复介电常数。

1.2 实物制作与测量

基于以上设计的模型尺寸,测量装置制作在介电常数为 2.2、厚度为 1.0 mm 的 Rogers 板材上,如图 4 所示。该射频传感电路选用 R5880 ($\varepsilon_r = 2.20, h = 1 \text{ mm}$) 最终设计的电路模型参数为: $l_1 = 1.1 \text{ mm}, l_2 = 2.0 \text{ mm}, S_1 = 1.1 \text{ mm}, S_2 = 0.2 \text{ mm}, a = 0.2 \text{ mm}, b = 0.1 \text{ mm}, d = 3.5 \text{ mm}, g = 0.2 \text{ mm}, W_1 = 2.6 \text{ mm}, L_1 = 20.8 \text{ mm}, L_2 = 8.2 \text{ mm}$ 。



(a) 正面



(b) 背面

图4 射频传感电路测量实物图

实验测量系统主要由对称性射频电路、微波电缆、矢量网络分析仪组成(Rohde & Schwarz ZVB20),为保证测量结果一致性和准确性,所有待测样品均放置于室温 $20.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 32.5% 的恒温实验室 48 h 以

上,同时测试环境保持同样的温湿度。具体实验装置如图 5 所示。



图 5 对称电路加工实物及实验系统照

实验过程使用矢量网络记录 S_{21} 的谐振频率和幅度数据的相对变化。图 4 显示样品材料的介电常数变化时反射系数的变化。选用标准样品 PVC、玻璃环氧树脂、FR4 等材料进行实验测量。采用基于人工神经网络的介电常数反演算法对从实测数据中提取的谐振频率和幅度衰减进行处理,可以得到不同测量样品的等效复介电常数,具体结果如表 1 所示。

表 1 不同方法测量的介电常数对比^[8]

方法	PVC		环氧树脂		FR4	
	ϵ_r'	$\tan\delta$	ϵ_r'	$\tan\delta$	ϵ_r'	$\tan\delta$
文献	2.31	/	3.77	0.035	4.60	0.02
本文	2.65	0.014	3.86	0.031	4.50	0.018

2 实验结果分析

图 6 显示了电路反射系数随不同的样品材料的变化,每次测量至少重复 5 次,检查被测数据点的方差并取平均值。测试结果显示:增加样品介电常数会降低电路谐振点的工作频率。对比表 1 中的数据可以看出,测量装置测量 3 种介质材料的介电常数与已发表文献的测量值基本吻合,测量装置的相对测量精度在 4.6% 左右。误差来源主要为在电路加工制作过程中粗糙的焊接,介质板介电常数偏差及测量装置与待测介质中间存在空气缝隙等。

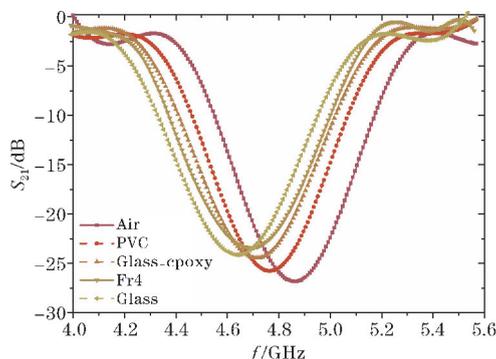


图 6 不同标准样品的 S 参数测试结果

3 结束语

本文介绍了一种基于射频电路的材料无损检测方法和测量装置,该电路通过引入对称型分支线功分器、一对交指电容 (IDC) 及互补谐振环 (CSRR) 建立了电场敏感区,进一步提高了电路的测量灵敏度。并设计了一款谐振频率在 5G 频段的传感器实物和测量装置。通过测量标准介质基片发现,测量样品的介电特性与已有文献结果相吻合,证明了该装置的准确性和可行性,为 5G 频段下材料的无损检测提供更广泛的测试方案。

参考文献:

- [1] 王益,张翠翠,王建忠,等. 闭式谐振腔法微波介质陶瓷介电常数测量[J]. 仪器仪表学报,2017,38:2500-2507.
- [2] 汪江宇,唐涛,何胜,等. Ku 波段高增益圆极化宽带微带阵列天线设计[J]. 成都信息工程学院学报,2016,1:18-21.
- [3] 王依超,郭高凤,王娟,等. 自由空间法测量电磁材料电磁参数[J]. 宇航材料工艺,2014,1:25.
- [4] 刘君,许卫东,刘珩,等. 基于微波反射率波动特性的混凝土介电常数测量方法[J]. 电波科学学报,2015,30(1):141-146.
- [5] 卞峰,黄卡玛. 微波化学反应器与实验结果的重复性[J]. 化工学报,2007,58(2):378-382.
- [6] 郭富祥,赖展军,薛锋章. 基于微带谐振法的介电常数无损测量[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2017,29(3):346-351.
- [7] Chretiennot T, Dubuc D, Grenier K. A microwave and microfluidic planar resonator for efficient and accurate complex permittivity characterization of aqueous solutions[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 61(2):972-978.
- [8] Jang C, Park J K, Lee H J, et al. Non-invasive fluidic glucose detection based on dual microwave complementary split ring resonators with a switching circuit for environmental effect elimination[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(15):8520-8527.
- [9] Kiani S, Rezaei P, Navaei M. Dual-sensing and dual-frequency microwave SRR sensor for liquid samples permittivity detection[J]. Measurement, 2020, 160:107805.

- [10] Jha A K, Delmonte N, Lamecki A, et al. Novel MNZ-type microwave sensor for testing magnetodielectric materials [J]. *Scientific reports*, 2020, 10(1):1–13.
- [11] Armghan A, Alanazi T M, Altaf A, et al. Characterization of Dielectric Substrates Using Dual Band Microwave Sensor [J]. *IEEE Access*, 2021, 9:62779–62787.
- [12] Jha A K, Lamecki A, Mrozowski M, et al. A highly sensitive planar microwave sensor for detecting direction and angle of rotation [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, 68(4):1598–1609.
- [13] Lu J Y, Tseng C H. Permittivity Measurement of Sucrose Solution Using Complementary Split-Ring Resonator Sensor [C]. *2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. IEEE, 2020:486–488.
- [14] Gan H Y, Zhao W S, Liu Q, et al. Differential microwave microfluidic sensor based on microstrip complementary split-ring resonator (MCSRR) structure [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(11):5876–5884.
- [15] Sun H R, Du G, Liu G, et al. Symmetric coplanar waveguide sensor loaded with interdigital capacitor for permittivity characterization [J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2020, 30(1):e22023.
- [16] Alahnomi R A, Zakaria Z, Yussuf Z M, et al. Review of Recent Microwave Planar Resonator-Based Sensors: Techniques of Complex Permittivity Extraction, Applications, Open Challenges and Future Research Directions [J]. *Sensors*, 2021, 21(7):2267.

Design of RF Sensor for Non-destructive Testing of Materials in 5G Frequency Band

WANG Ren¹, SUN Haoran², JING Shouzhao¹, Fan Yong¹

(1. College of Electronic Science and Engineering, University of Electronic and Science Technology of China, Chengdu 610071, China; 2. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: The use of high-sensitivity radio frequency non-destructive testing sensors to evaluate the electromagnetic properties of samples is more and more widely used in aerospace and biomedicine fields. This paper proposes a high-sensitivity material nondestructive detection sensor device that works in the 5G frequency band. The sensor device is designed based on a microstrip radio frequency circuit and a vector network analyzer. The radio frequency circuit includes a pair of T-junction power dividers and a pair of interdigital capacitors (IDC) and Complementary Split-Ring Resonator (CSRR). After processing the circuit and testing standard samples such as PVC, glass epoxy resin, FR4 and other materials, it is found that the dielectric properties of the measured samples are consistent with those of the published data, which proves the high precision and compatibility of the non-destructive testing sensor device.

Keywords: 5G frequency band; high-sensitivity sensor; non-destructive testing