

DOI: 10.11991/ykj.201810008

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20181220.1128.008.html>

一种双频基板集成波导介电常数测试系统

龙卓, 刘长军

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

摘 要: 为了同时测量不同频率下的复介电常数, 设计了一种基于基板集成波导结构可工作于 S 和 C 波段的双频介电常数测量系统, 在 2.45 和 5.85 GHz 附近可同时测量待测物的复介电常数。该测试系统的传感器包含 2 个按对角线级联的正方形谐振腔、2 条测试缝隙以及一段微带馈电耦合结构。2 条缝隙的工作波段相互独立, 待测物接触传感器表面的 2 条缝隙影响系统的谐振频率和品质因数, 基于人工神经网络的反演获得待测物复介电常数。仿真数据作为训练人工神经网络的样本, 验证阶段, 使用不同浓度的乙醇与水混合溶液检验传感器准确性, 与理论值相比, 在 2.45 GHz 时介电常数实部和虚部的测试结果最大相对误差为 1.98% 和 1.28%, 5.85 GHz 时分别为 2.15% 和 2.68%, 该传感器具有较高的精度及双频测量特性。

关键词: 基板集成波导; 双频传感器; 人工反演网络; 复介电常数; 微波测量; 谐振频率; 品质因数; 谐振腔

中图分类号: TN972

文献标志码: A

文章编号: 1009-671X(2019)03-0021-04

A dual-band substrate integrated waveguide permittivity measurement system

LONG Zhuo, LIU Changjun

School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China

Abstract: In order to measure complex permittivity under different frequencies, a permittivity measurement system is designed to measure complex permittivities at S- and C-band, which is based on a substrate integrated waveguide structure. In the vicinity of 2.45 GHz and 5.85 GHz, the complex permittivities of the object can be measured simultaneously. The sensor of the test system includes two square resonant cavities cascaded diagonally, two test slots and a microstrip feed coupling structure. The working bands of the two slits are independent of each other, and the two slits on the surface of the object to be measured contacting the sensor affect the resonant frequency and quality factor of the system. The complex permittivity of the object to be measured was obtained based on the inversion of the artificial neural network. The simulation data were used to train the artificial neural network. In the verification stage, the accuracy of the sensor was checked by using mixed solutions of ethanol and water with different concentrations. Compared with the theoretical value, at 2.45 GHz, the maximum relative errors of the real and imaginary parts of complex permittivities were 1.98% and 1.28%; and at 5.85 GHz they were 2.51% and 2.68% respectively. The sensor has high precision and dual-frequency measurement characteristics.

Keywords: substrate integrated waveguide; dual-band sensor; artificial neural network (ANN); complex permittivity; microwave measurement; resonant frequency; quality factor; resonant cavities

随着微波能应用和发展, 复介电常数在工业、医学、科学研究中有着越来越重要的意义^[1-3]。复介电常数包含实部和虚部 2 部分, 近年来众多学者对这 2 个参数的准确测量进行了广泛的研究。现有研究中利用微带线、共面波导、带状线等结

构进行复介电常数测量的设计有很多^[4-5]。文献[6]提出一种利用矩形基板集成波导谐振腔测量液体 C 波段复介电常数的方法, 实部和虚部相对误差分别为 5% 和 7%, 复介电常数的反演过程使用了人工神经网络。文献[7]提到一种利用微带线谐振法测量液体 S 波段复介电常数的方法, 介电常数实部和虚部相对误差分别为 4.4% 和 8.6%, 反演使用了牛顿迭代法。2 种方法具有较高的测量精度, 但都只能用于单一频段测量。

收稿日期: 2018-10-26. 网络出版日期: 2018-12-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61271074).

作者简介: 龙卓, 男, 硕士研究生;

刘长军, 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 刘长军, E-mail: cjliu@scu.edu.cn.

在微波工程设计中双频、多频器件的设计一直是个热点^[1],同时部分物质的介电常数在不同频率时有较大差别。因此,研究多频点复介电常数的高精度测量就非常有必要。本文提出了一种基于基片集成波导结构 S 和 C 波段的复介电常数测量系统,待测物通过传感器表面的缝隙直接影响腔体的谐振频率和品质因数。我们使用电磁仿真软件和二元混合液模型,完成对人工神经网络的训练。利用矢量网络分析仪实际测量得到的传感器谐振频率和品质因数,使用训练好的神经网络获得目标频率下介质的复介电常数。

1 传感器原理与测量方法

1.1 基片集成波导谐振原理及分析

基片集成波导(substrate integrated waveguide, SIW)最早于 1994 年提出^[8],广泛应用于各种微波器件,包括滤波器、天线、耦合器、传输结构、功率分配器等^[9-10]。该结构是由介质基片的上下金属层和两排间隔一定距离的金属化过孔构成。金属化过孔的相邻间隔远小于波长,等效为理想金属壁。

本文中的传感器主要由 2 个对角线级联的 SIW 矩形谐振腔构成,在工作频率下分别谐振于各自的 TE_{101} 模式。类似于矩形波导谐振腔,模式为 TE_{mnp} 的 SIW 谐振腔的谐振频率计算公式如下^[11]:

$$f_{mnp}^{SIW} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\epsilon\mu}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{L_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W_{eff}}\right)^2} \quad (1)$$

式中: $m=1,2,\dots$; $n=1,2,\dots$; $p=1,2,\dots$; $\mu=\mu_0\mu_r$, $\epsilon=\epsilon_0\epsilon_r$, 分别表示介质基板的介电常数和磁导率; h 为基板的厚度; 等效宽度 W_{eff} 和等效长度 L_{eff} 分别为^[12]:

$$W_{eff} = W_{SIW} - 1.08 \frac{D^2}{S_{VP}} + 0.1 \frac{D^2}{W_{SIW}}$$

$$L_{eff} = L_{SIW} - 1.08 \frac{D^2}{S_{VP}} + 0.1 \frac{D^2}{L_{SIW}}$$

式中: D 为金属化过孔直径, S_{VP} 为过孔之间的周期距离, W_{SIW} 和 L_{SIW} 分别为 SIW 腔体的实际宽度和长度。依据文献^[12]中的计算公式, SIW 谐振腔空载品质因数 Q_u 受到 Q_c 和 Q_d 的影响:

$$\frac{1}{Q_u} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} \quad (2)$$

式中: Q_c 表示无介质损耗时谐振器的品质因数; Q_d 表示无欧姆损耗时谐振器的品质因数。 Q_d 与损耗角正切之间的关系为:

$$Q_d = \frac{\epsilon'}{\epsilon''} = \frac{1}{\tan \delta} \quad (3)$$

式中 ϵ' 、 ϵ'' 分别表示基板介电常数的实部和虚部。

根据腔体微扰法,引入介质微扰将会使得谐振腔的谐振频率和品质因数发生变化^[11]。其介电常数将会使式(1)中 SIW 谐振腔的等效介电常数 ϵ 发生变化并影响谐振频率;式(2)、(3)中谐振器的 Q_d 和 Q_u 也会受到影响。待测物介电常数 ϵ 与腔体的谐振频率和品质因数的关系通常难以直接求解。

1.2 传感器仿真及测试

本设计中的传感器结构如图 1 所示。

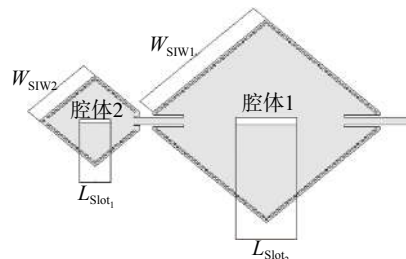


图1 传感器模型结构

介质基板选用 F4B-2, 厚度 1 mm, 传感器的几何参数如下: 50 Ω 微带线宽度为 2.88 mm; 腔体 1 边长 $W_{SIW1} = 55.2$ mm, 腔体 2 边长 $W_{SIW2} = 23.6$ mm, 2 个腔体都是正方形腔体; 缝隙位于各自正方形腔体的对角线中间, 长度分别为 $L_{Slot1} = 20$ mm, $L_{Slot2} = 10$ mm, 宽度为各自长度的 14%; 金属化过孔直径 D 为 0.8 mm; 过孔周期 S_{VP} 为 1.2 mm。整个传感器尺寸为 128 mm $\times$ 88 mm $\times$ 1 mm, 表面镀铜层厚度为 17 μ m。腔体 1 谐振频率为 2.45 GHz, 腔体 2 谐振频率为 5.85 GHz, 2 个腔体之间的馈电耦合结构使得传感器能够在 2 个谐振频点都取得较好的谐振效果。采用 50 Ω 微带线与外部电路连接, 通过仿真优化提高腔体的品质因数并减少输入端的反射。结合电磁仿真软件分析, 传感器腔体在 2.45 GHz 和 5.85 GHz 的谐振模式和场强分布, 如图 2 所示。

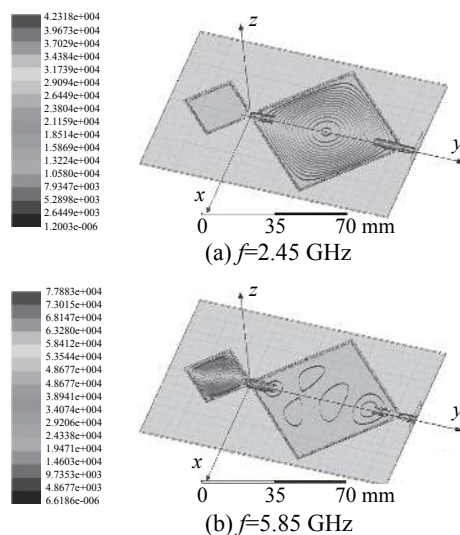


图2 传感器仿真电场强度分布

2条缝隙位于传感器的对角线上每个腔体中心位置,长度分别接近于工作频率下的四分之一波导波长。随着待测物介电常数的变化,传感器的谐振频点和品质因数都会随之变化。图3是传感器的实物以及介电常数测量系统,传感器表面的矩形方框是附加测试槽,它使得液体类待测物能够始终保持在腔体的电场最强处,并保证每次测量的用量一致,根据理论分析和实验验证表明附加测试槽对腔体的谐振结构不产生影响。

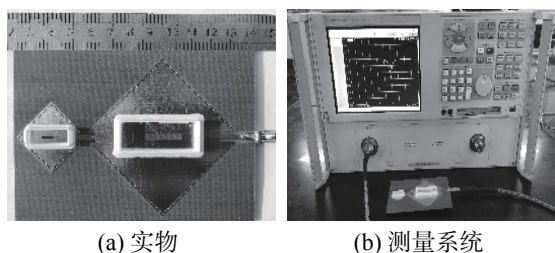


图3 传感器

表1中为仿真与实测腔体的谐振频率和品质因数 Q 对比,从数据中看出仿真结果与实测结果吻合良好。

表1 仿真与测试谐振频率和品质因数 Q

项目	S 波段		C 波段	
	f_0/GHz	Q	f_0/GHz	Q
仿真结果	2.441 7	301.5	5.841 5	324.3
测试结果	2.441 4	319.2	5.841 2	317.9

2 神经网络反演系统及反演结果

2.1 神经网络反演系统

人工神经网络(artificial neural network, ANN)是一种模仿人类大脑中神经突触联结的结构来处理信息的数学模型,是一种自适应系统,能够根据外界信息改变内部联系强度和传递规则^[13]。

现阶段对于介电常数双频测量难以获得准确的公式。因此,利用人工神经网络反演系统作为数据关系重构工具。重构过程中调节传输函数和加权因子,采用大量数据训练神经网络。当训练误差小于设定目标后,完成训练过程,得到能够直接构建传感器品质因素和谐振频点与介电常数之间的神经网络系统。利用神经网络重构数据关系,实现较高的复介电常数重构精度。

2.2 复介电常数反演过程和结果

由于独特的结构设计,这个传感器在2个工作频段都具有较高的品质因数,使得其有一个较宽的测量范围和测试精度。本工作的关键点在于

重构提取出来的品质因数和谐振频率与待测液体的复介电常数的关系。通过对测量数据中的S波段参数进行处理,得到传感器的品质因数和谐振频点。

为了确定传感器的测量精度和范围,我们采用了乙醇与水混合二元溶液作为待测液体。该混合溶液有较宽的介电常数范围,配制简单易得。在20℃下配制了乙醇浓度从0~100%均匀变化的溶液11份。在测试槽内满载待测液体,使用矢量网络分析仪测量传感器的 $|S_{11}|$,并计算谐振频率和品质因数。由于温度对复介电常数影响较大,整个测试过程中尽量保持温度一致。

采用神经网络进行介电常数的反演。首先进行神经网络的训练。将加载了不同介电常数的传感器进行电磁仿真,获得相应的谐振频率和品质因数;再将这些数据作为神经网络的输入层数据,介电常数实部和虚部作为输出层的数据;然后在训练过程中不断调节隐藏层的神经元数目以及传递函数,直到训练误差收敛时完成训练;最后保存训练好的神经网络,将传感器实际测量乙醇混合溶液得到的谐振频率和品质因数输入到神经网络,就可以获得待测溶液的介电常数。

本设计中,传感器测试样本的谐振频率和品质因数结果如图4、5所示,图4为S波段测试结果,图5为C波段测试结果,谐振频率与品质因数变化明显,在不同频段有明显特点。

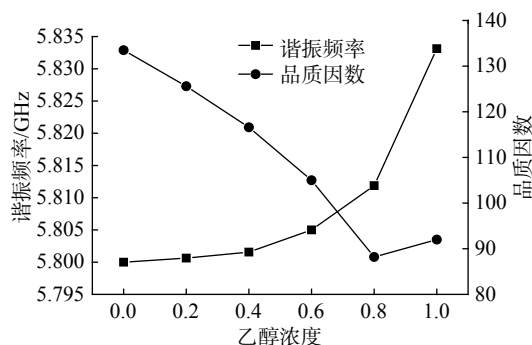


图4 S波段传感器测试结果

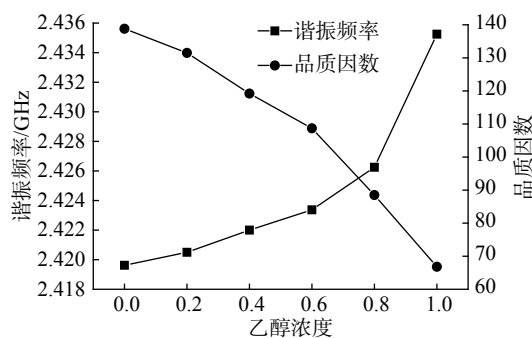


图5 C波段传感器测试结果

测试数据经过神经网络反演后得到的复介电常数与理论值^[14]计算相对误差,在 2.45 GHz 时测试结果的最大误差分别为 1.98% 和 1.28%, 5.85 GHz 时为 2.51% 和 2.68%, 整个范围内吻合良好。

3 结论

1) 提出一种可用于 S 和 C 波段的介电常数测量系统, 经过加工测试, 仿真与实测数据吻合良好;

2) 在介电常数反演过程中, 成功利用人工神经网络技术加速推演过程;

3) 利用乙醇与水混合二元溶液进行测量系统精度验证, 介电常数实部和虚部的相对误差在 2.45 GHz 分别为 1.98% 和 1.28%, 5.85 GHz 分别为 2.51% 和 2.68%。

该介电常数测量系统中的传感器易于其他平面电路和射频系统, 具有双频工作和易于加工的特性, 可推广用于工业应用中介电常数的在线测量。

参考文献:

- [1] WAGNER N, EMMERICH K, BONITZ F, et al. Experimental investigations on the frequency and temperature-dependent dielectric material properties of soil[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2011, 49(7): 2518–2530.
- [2] 位宇, 陈潇杰, 刘臻龙, 等. 两路 15kW 连续波微波磁控管相干功率合成技术[J]. *应用科技*, 2018, 45(2): 34–37.
- [3] 吴秉琪, 刘长军. 一种测量微波介质基板复介电常数的方法[J]. *应用科技*, 2018, 45(4): 100–103.
- [4] WALDRON I, MAKAROV S N, BIEDERMAN S, et al. Suspended ring resonator for dielectric constant measurement of foams[J]. *IEEE microwave and wireless components letters*, 2006, 16(9): 496–498.
- [5] VERMA A K, NASIMUDDIN, OMAR A S. Microstrip resonator sensors for determination of complex permittivity of materials in sheet, liquid and paste forms[J]. *IEEE proceedings-microwaves, antennas and propagation*, 2005, 152(1): 47–54.
- [6] LIU Changjun, TONG Fan. An SIW resonator sensor for liquid permittivity measurements at C band[J]. *IEEE microwave and wireless components letters*, 2015, 25(11): 751–753.
- [7] LIU Changjun, PU Yang. A microstrip resonator with slotted ground plane for complex permittivity measurements of liquids[J]. *IEEE microwave and wireless components letters*, 2008, 18(4): 257–259.
- [8] SHIGEKI F. Waveguide line: 06-053711[P]. Japan, 1994-02-25.
- [9] 胡南. 论分层基片集成波导功分器及宽带功率放大器研制[J]. *科学技术创新*, 2018(3): 25–26.
- [10] 林彬彬, 周春霞, 王玉洁, 等. 基于半模基片集成波导的滤波功分器设计[J]. *微波学报*, 2017, 33(S1): 140–143.
- [11] POZAR D M. 微波工程[M]. 张肇仪, 周乐柱, 吴德明, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2006: 238–242, 256–261.
- [12] XU Feng, WU Ke. Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide[J]. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 2005, 53(1): 66–73.
- [13] MKADEM F, BOUMAIZA S. Physically inspired neural network model for RF power amplifier behavioral modeling and digital predistortion[J]. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 2011, 59(4): 913–923.
- [14] SATO T, CHIBA A, NOZAKI R. Dynamical aspects of mixing schemes in ethanol–water mixtures in terms of the excess partial molar activation free energy, enthalpy, and entropy of the dielectric relaxation process[J]. *The journal of chemical physics*, 1999, 110(5): 2508–2521.

本文引用格式:

龙卓, 刘长军. 一种双频基片集成波导介电常数测试系统[J]. *应用科技*, 2019, 46(3): 21–24.

LONG Zhuo, LIU Changjun. A dual-band substrate integrated waveguide permittivity measurement system[J]. *Applied science and technology*, 2019, 46(3): 21–24.