

# 无应力组合贴片天线传感器温度性能模拟测试

薛松涛<sup>1,2</sup>, 易卓然<sup>1</sup>, 谢丽宇<sup>1,3</sup>, 万国春<sup>4</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 日本东北工业大学 工学部建筑学科, 宫城县 仙台市 982-8577; 3. 同济大学 工程结构性能演化与控制教育部重点实验室, 上海 200092; 4. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

**摘要:**基于组合式贴片天线的无源无线传感器可应用于结构形变的测量,但环境温度的变化会影响组合式贴片天线的电磁性能。针对环境温度变化影响天线传感器性能的问题,通过温度效应影响理论研究了材料温度系数(热膨胀)和介电常数变化(电磁场变化)对组合式天线谐振频率的影响规律,采用多物理场耦合方法对组合式贴片天线传感器进行了温度效应的数值模拟,对受热膨胀和基板介电常数受热变化的影响进行了量化分析。基于数值模拟明确了天线谐振频率变化的主要原因是基板受热导致介电常数变化,材料受热膨胀引起的谐振频率变化约为主因引起变化的20%,且为负相关。通过试验进一步研究温度对谐振频率的影响,将组合式贴片天线置于温箱中测定了温度梯度下谐振频率变化。模拟和试验结果均表明,随温度的升高,组合式贴片天线一阶纵向谐振频率增加,且具有线性关系,线性拟合系数均高于0.93,模型仿真平均增量预测误差小于20%。明确了该类组合式天线可采用线性温度补偿机制进行形变测量值的修正,为组合式天线传感器在实际工程应用中提供了技术基础。

**关键词:**贴片天线; 形变传感器; 温度补偿; 结构健康监测; 谐振频率; 耦合效应; 介电常数; 热膨胀

**DOI:** 10.11990/jheu.202004049

**网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1390.u.20210628.1458.006.html>

**中图分类号:** TP212; TN823 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2021)10-1439-07

## Simulation and experiment on the temperature performance of sensors based on unstressed patch antennas

XUE Songtao<sup>1,2</sup>, YI Zhuoran<sup>1</sup>, XIE Liyu<sup>1,3</sup>, WAN Guochun<sup>4</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Architecture, Tohoku Institute of Technology, Sendai-shi 982-8577, Japan; 3. Key Laboratory of Performance Evolution and Control for Engineering Structures of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Department of Electronic Science and Technology, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Wireless sensors based on patch antennas can be used to measure the deformation of a structure, but temperature variations affect the electromagnetic performance of patch antennas. To solve this problem, this study conducts a series of simulation and experiments. Temperature effect theory is adopted to investigate the influence laws of coefficient temperature coefficients (thermal expansion) and the changes of dielectric constant contrast (electromagnetic field) of thermal expansion. The multiphysics coupling method is used to simulate the temperature effect numerically. Moreover, the influence caused by the thermal expansion and dielectric constant contrast variation of substrates due to temperature changes is analyzed quantitatively. On the basis of a numerical simulation, this study identifies the main factor behind the shift of resonance frequency, that is, the change of the dielectric constant contrast caused by the heating of the substrate; such factor is five times more serious than thermal expansion. The effect of temperature on the resonant frequency is further studied by experiments in which patch antennas are placed in a thermostat to measure the variation of the resonant frequency at different temperatures. Simulation and experiment results show a linear relationship between temperature change and shift of resonant frequency, with the linear fitting coefficient being higher than 0.93 and with the average detection error of the model simulation being lower than 20%. Such findings indicate that the temperature compensation mechanism can be used to correct the deformation measurement values of unstressed patch antennas. Hence, this work provides a technical foundation for the application of sensors based on unstressed patch antennas.

**Keywords:** patch antennas; deformation sensors; temperature compensation; structural health monitoring; resonant frequencies; coupling effects; dielectric constant; thermal expansion

传统建筑往往设计服役近百年,随着时间的推移,

结构将逐渐出现损伤,对这些损伤的监测和修复是确保结构服役期安全的重中之重。结构健康监测是评估结构性能的重要手段<sup>[1]</sup>。通过在结构上添加传感单元,结构健康监测系统可以采集结构性能相关的各种参数,如应变、加速度、裂缝宽度等,对结

收稿日期:2020-04-26.

网络出版日期:2021-06-28.

基金项目:国家自然科学基金项目(52078375, 52178298).

作者简介:薛松涛,男,教授,博士生导师;

谢丽宇,男,副教授,硕士生导师.

通信作者:谢丽宇, E-mail: liyuxie@tongji.edu.cn.

构损伤进行动态评估<sup>[2]</sup>。

传统的结构健康监测传感器主要有压电式传感器<sup>[3]</sup>、光纤式传感器<sup>[4]</sup>、电阻式传感器等。这些传感器工作往往较为稳定,能满足传统土木监测的精度要求,但是,由于它们均需要采用电线进行数据传输和能量供给,这些传感器的现场安装过程往往需要众多引线,作业较为复杂,并要求较多的人力资源进行协助<sup>[5-6]</sup>。因此,学者们设计提出了许多基于单片受力式贴片天线的无源无线传感器<sup>[7-9]</sup>。这些传感器直接黏贴在结构上,通过结构形变引起天线形变,从而改变天线的谐振频率。这些贴片天线传感器使用谐振频率作为检测量,可以无源无线对结构应变、裂缝、位移等参数进行测量,且在实验室试验中具有较好的工作性能。但是,由于天线体积较大,其测量精度和量程受胶黏材料影响较为严重。为了提高传感器精度和量程,Xue 等<sup>[10-11]</sup>提出了多种无应力组合式的贴片天线传感器,采用天线与天线组件的相对位移作为测量单元,可避开剪力滞后、黏贴强度不足带来的问题。

在这些传感器中,温度对测量精度的影响是不容忽视的。Huang 等<sup>[12-13]</sup>对单片受力式贴片天线的温度效应进行了理论研究和试验,指出温度效应实质通过应力场和电磁场同时影响天线的谐振频率,初步揭示了单片受力式贴片天线传感器在温度变化下谐振频率的变化趋势。Wang 等<sup>[14]</sup>也对单片受力式天线的温度效应进行了试验研究。但是,温度变化的理论模型仍然不够完善,同时,并未对无应力组合

式贴片天线传感器的温度效应进行研究。

本文针对无应力组合式贴片天线传感器的温度效应进行了研究。概述了温度效应影响传感器谐振频率的原理;对温度效应的影响进行了基于 COM-SOL 的多物理场模拟,并对电磁场和温度下形变的影响分别进行了量化;制作了实际的天线传感器,进行了温度效应试验,与模拟的数据进行了对比,并提出了一种可行的温度效应的补偿手段。

## 1 温度效应的影响

贴片天线传感器主要测量谐振频率来表征结构形变。谐振频率同时受天线热膨胀形变和电磁场的影响,其中,天线热膨胀形变直接改变天线上辐射贴片尺寸,而电磁场通过影响贴片天线基板介电常数影响谐振频率。当贴片天线所处温度场改变时,贴片天线的上贴片尺寸与介质板介电常数都会发生变化,因此,贴片天线谐振频率的温度效应存在多种物理场影响,需要综合进行考虑。

### 1.1 无应力组合式贴片天线模型

组合式贴片天线由一块传统的单片式贴片天线和一块短接上贴片构成,如图 1 所示。单片式贴片天线由上辐射贴片、介质基板和接地平面构成,短接上贴片主体是与上辐射贴片短接的短接贴片,在短接贴片上有一块上覆介质板来保证短接贴片足够平整。其中,短接上贴片与单片式贴片天线紧密堆叠,短接贴片和上辐射贴片之间发生短路,构成整体的谐振单元,使得电流能在 2 块贴片之间流动。

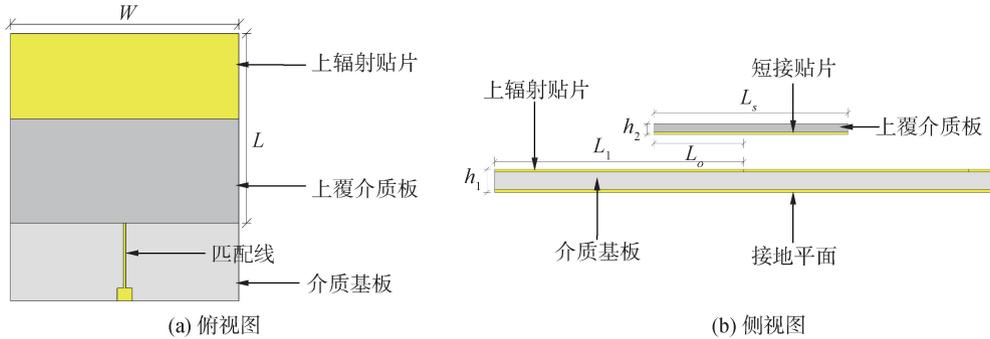


图 1 组合式贴片天线

Fig. 1 Patched antenna with overlapped sub-patch

传统的单片式贴片天线的初始谐振频率与天线谐振方向的电长度有关,可以近似计算<sup>[15]</sup>。当天线厚度足够小时,天线谐振方向电长度可以近似等效为天线谐振方向上谐振单元的长度:

$$f_0 = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_e} L_e} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_e} L_1 + 2\Delta L_1} \approx \frac{c}{2L_1\sqrt{\epsilon_e}} \quad (1)$$

式中: $f_0$  是天线在初始状态下的一阶纵向谐振频率; $h_1$  是单片贴片天线的厚度; $h_2$  是短接上贴片的厚度; $c$  是真空中光速; $\epsilon_e$  是介质板的相对介电常

数; $L_e$  是天线谐振方向上电长度; $L_1$  是上辐射贴片长度; $\Delta L_1$  是天线的附加长度,受到天线厚度、介质基板厚度及材料的影响。

对于组合式贴片天线,短接贴片和辐射上贴片协同构成组合式贴片天线的谐振单元,其电长度约等于上辐射贴片与短接贴片构成的组合辐射贴片净长。类似的,其谐振频率近似计算<sup>[10]</sup>为:

$$f_0 \approx \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_e}} = \frac{c}{2(L_1 + L_s - L_o)\sqrt{\epsilon_e}} \quad (2)$$

式中: $L$  是天线谐振方向上组合辐射贴片的长度; $L_s$  是短接贴片长度; $L_o$  是短接贴片与上辐射贴片重叠的长度。

## 1.2 温度效应影响理论计算

温度变化对贴片天线的上辐射贴片长度、天线介质基板介电常数均有影响,且对不同材料的影响系数不同。一般而言,温度效应可以从辐射贴片的膨胀效应、天线介质板介电常数受热改变两个方面进行量化。

### 1.2.1 热膨胀效应

单片式贴片天线和短接上贴片均是多层压合板结构,当温度发生变化时,由于各层板的热膨胀系数不同,在层与层之间会产生内力,最终使多层压合板之间产生协同变形,因此,辐射贴片的热膨胀变形需要考虑贴片天线基板的热膨胀系数和贴片天线上贴片的热膨胀系数,对超静定结构进行求解,如图 2 所示。



图 2 热膨胀求解

Fig. 2 Concept figure for the thermal expansion

短接贴片和上覆介质板间、上辐射贴片和介质基板间、介质基板和接地平面间视为固接;短接上贴片和单片贴片天线间紧密压合无连接,可在天线纵向沿轴线自由相对滑动而无滑动摩擦力产生。

当发生温度变化时,为维持协同变形,单片贴片天线和短接上贴片的材料层间产生内部作用力:

$$\frac{F_1}{E_1 A_1} + \Delta T e_1 = -\frac{F_1 + F_2}{E_2 A_2} + \Delta T e_2 \quad (3)$$

$$\frac{F_2}{E_3 A_3} + \Delta T e_3 = -\frac{F_1 + F_2}{E_2 A_2} + \Delta T e_2 \quad (4)$$

$$\frac{F_3}{E_4 A_4} + \Delta T e_4 = -\frac{F_3}{E_5 A_5} + \Delta T e_5 \quad (5)$$

最终的组合贴片有效变形是短接贴片和上辐射贴片总变形的一半:

$$\Delta L = \frac{\left(\frac{F_1}{E_1 A_1} + \Delta T e_1\right) L_1 + \left(\frac{F_3}{E_4 A_4} + \Delta T e_4\right) L_o}{2} \quad (6)$$

式中: $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  分别是上辐射贴片与介质基板间的内力、介质基板与接地平面间的内力、短接贴片和上覆介质板间的内力; $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 、 $E_4$ 、 $E_5$  和  $e_1$ 、 $e_2$ 、 $e_3$ 、 $e_4$ 、 $e_5$  分别是上辐射贴片、介质基板、接地平面、短接贴片、上覆介质板的弹性模量和谐振方向上的线膨胀系数; $\Delta T$  是温度差; $\Delta L$  是组合辐射贴片的净长度变化。

### 1.2.2 电磁场下的介电常数受热改变

介电常数是介质在未被电场击穿的情况下容纳电荷能力的度量。天线介质基板的介电常数随温度变化会有轻微的改变,从而影响天线的谐振频率。

介质介电常数改变量可表示为:

$$\Delta \varepsilon_e = k \varepsilon_e \Delta T \quad (7)$$

式中: $\Delta \varepsilon_e$  是介电常数改变量; $k$  是介电常数温度漂移系数。

一般而言,对于常用的天线基板材料,天线基板介电常数温度漂移系数是恒定的。表 1 给出了常用的天线基板材料介电常数的温度漂移系数<sup>[16]</sup>。

表 1 常用介质基板的介电常数温度漂移系数

Table 1 Thermal coefficient for dielectric constant of common dielectric board in patch antenna

| 材料                    | 介电常数温度漂移系数/<br>( $1/10^6 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) |
|-----------------------|--|
| FR4                   | 50~70  |
| 氰酸盐脂玻璃                | 50~60  |
| BT 环氧树脂玻璃             | 55~65  |
| Rogers RT/duroid 5870 | -115   |
| Rogers RT/duroid 5880 | -207 <sup>[14]</sup>                                     |

综上,温度变化  $\Delta T$  的情况下,组合式天线在温度影响下的基础谐振频率  $f_T$  可以表示为:

$$f_T \approx \frac{c}{2(L_1 + L_s - L_o + \Delta L) \sqrt{\varepsilon_e + k \varepsilon_e \Delta T}} \quad (8)$$

## 2 温度效应多物理场模拟

在理论分析的基础上,采用多物理场耦合软件 COMSOL 建立了基本的组合式贴片天线模型,通过预设温度变量,综合分析了温度对组合式天线传感器基础谐振频率的影响;随后,更改仿真参数的设计,研究了温度变化下,热膨胀变形和电磁场各自对天线谐振频率的影响,并进行了数值上的对比。

### 2.1 模型建模

天线的工作频率设计在 2.0~2.8 GHz。为简化计算步骤,上辐射贴片、短接贴片和接地平面材料均为铜制,介质基板和上覆介质板材料均采用 Rogers RT/duroid 5880。模型被球形真空腔包裹来保证远场影响的计算精度,真空腔直径为天线最大尺寸的 2 倍。在端部由集总端口对引出的同轴线进行馈电。模型进行自适应网格剖分,并在网格密集处进行网格大小调整。

为简化计算,电磁仿真与力学仿真使用同一套网格。具体计算时,先进行力学方程求解结构热变形量,再以变形后的结构进行电磁仿真求解  $S$  参数。最终模型图(含网格划分)如图 3 所示。

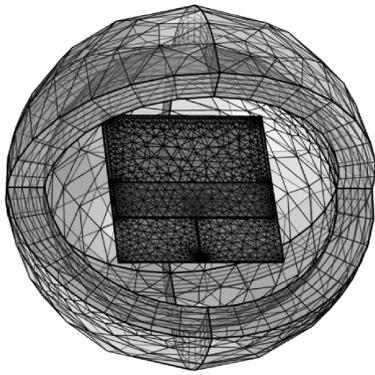


图 3 COMSOL 中模型

Fig. 3 Concept figure of the model in COMSOL

经过理论计算和数值仿真,组合式天线传感器的基本参数如表 2 所示。

表 2 组合式贴片天线基本尺寸

Table 2 Parameters of the patch antenna with overlapping sub-patch

| 参数               | 值     | 参数              | 值     |
|------------------|-------|-----------------|-------|
| $f_0/\text{GHz}$ | 2.7   | $L_1/\text{mm}$ | 32    |
| $L_s/\text{mm}$  | 13    | $L_o/\text{mm}$ | 0~10  |
| $h_1/\text{mm}$  | 0.508 | $h_2/\text{mm}$ | 0.508 |
| $W/\text{mm}$    | 49    | $\epsilon_r$    | 2.2   |

注: $h_1$  是单片贴片天线的厚度, $h_2$  是上覆贴片的厚度, $W$  是单片贴片天线的宽度。

通过数据查询,基板材料(0.508 mm 厚 Rogers RT/duroid 5880)和铜箔材料的基本力学参数和电磁学参数如表 3 所示。

表 3 材料基本力学参数和电磁学参数

Table 3 Parameters of the copper sheet and dielectric board made by RT/duroid 5880

| 参数  | 值                    |
|---|----------------------|
| $E_1, E_3, E_4 / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$   | 1 070                |
| $E_2, E_5 / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$        | 5.5                  |
| $k (1/10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C})$             | -207 <sup>[14]</sup> |
| $e_1, e_3, e_4 (1/10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C})$ | 31                   |
| $e_2, e_5 (1/10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C})$      | 16.7                 |

## 2.2 模拟结果

通过 COMSOL 模拟了温度从 -10 °C 变化至 60 °C 的天线模态变化,先对天线受到的电磁场和热膨胀形变的影响分别进行了量化,并进行了数值上的对比;随后,综合考虑应力场和温度场的影响,进行了参数仿真。

### 2.2.1 热膨胀形变影响

将介电常数温度漂移系数  $k$  定为 0,得到纯应力场对贴片天线温度效应的影响,图 4 是天线在一阶纵向谐振频率范围内的回波损耗曲线。提取每一条回波损耗曲线的最低点作为谐振点,得到谐振频率随温度变化的变化曲线图 5。

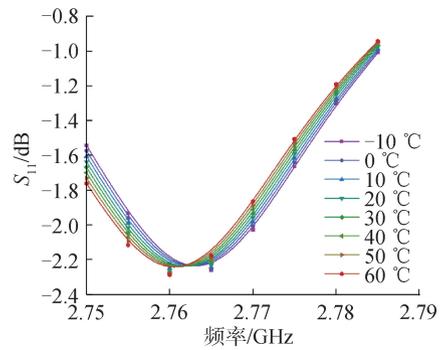


图 4 不同温度热膨胀下回波损耗曲线

Fig. 4 Return loss curves caused by thermal expansion

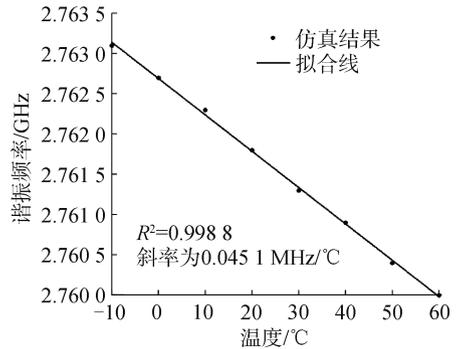


图 5 应力影响下谐振频率-温度变化曲线

Fig. 5 Relationship between resonant frequency and temperature change caused by thermal expansion

### 2.2.2 电磁场影响

将天线基板和上辐射贴片热膨胀系数  $e_1, e_2, e_3, e_4, e_5$  定为 0,得到纯应力场对贴片天线温度效应的影响,图 6 是天线在一阶纵向谐振频率范围内的回波损耗曲线。提取每一条回波损耗曲线的最低点作为谐振点,得到谐振频率随温度变化的变化曲线图 7。

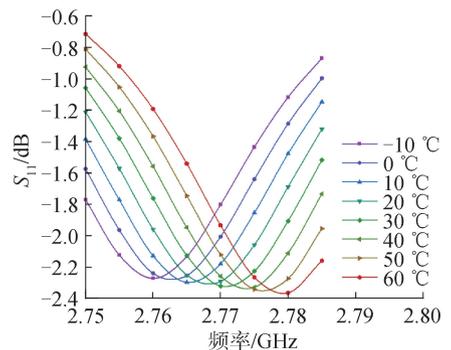


图 6 电磁场影响下回波损耗曲线

Fig. 6 Return loss curves impacted by electromagnetic field

综合图 5 和图 7,可知热膨胀形变和电磁场对谐振频率的影响都是接近线性的,温度升高时,热膨胀形变使天线谐振频率有下降的趋势,而电磁场则会使谐振频率上升;提高相同的温度时,电磁场的影响效果是应力场影响效果的 5 倍,因此,需要综合考虑电磁场和热膨胀形变对天线谐振频率的影响。

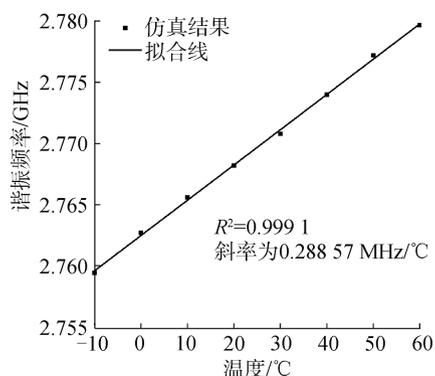


图 7 谐振频率-温度变化曲线

Fig. 7 Relationship between resonant frequency and temperature caused by electromagnetic field

2.2.3 热膨胀形变与电磁场协同变化

同时考虑热膨胀形变和电磁场的作用,结果如图 8 所示是天线在一阶纵向谐振频率范围内的回波损耗曲线。提取每一条回波损耗曲线的最低点作为谐振点,得到谐振频率随温度变化的变化曲线图 9。

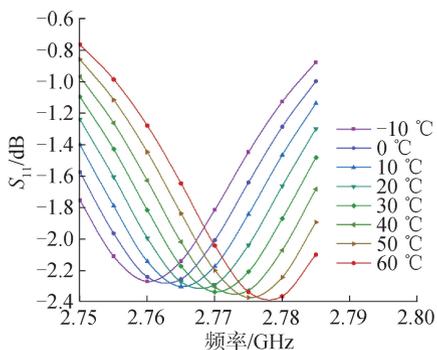


图 8 COMSOL 中回波损耗曲线

Fig. 8 Return loss curves in COMSOL

由图 9 可知,随着温度的升高,谐振频率呈现增大的趋势,且线性拟合因子为 0.998 8。每升温 1 °C,谐振频率近似偏移 0.268 MHz。因此,可以通过设定预期温度影响下谐振频率变化值的方式,对谐振频率变化进行温度补偿,从而提高组合式贴片天

线传感器的测试精度。

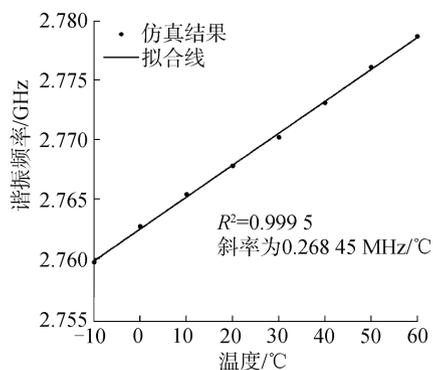


图 9 谐振频率-温度变化曲线

Fig. 9 Relationship between resonant frequency and temperature change in COMSOL

值得指出的是,由于在 COMSOL 中,力学模拟和电磁学模拟共用一套网格,因此,在温度变量较小的情况下,可能会出现一定的偏差,因此,仍需要进行实际试验,来对模拟的结果进行检验的校正。

3 温度效应试验

在理论研究和模拟计算的基础上,对温度效应进行了实验室试验测定。由于计算方法对于各种材料和温度变化梯度都相同,本文仅对 RT5880 材料作为基板时的温度效应进行了个例试验研究。为方便试验,选取的温度变化范围为 30 °C ~ 60 °C,其余的温度梯度和基板材料直接替代变量进行仿真和试验即可。

天线采用委托加工,如图 10(a)所示,其尺寸参数与表 2 相同,材料性能与表 3 相同。试验台搭建如图 10(b)所示。组合式贴片天线端部用微带线馈电,馈电点处由同轴线导出,并与矢量网络分析仪相连。采用封闭式温箱模拟环境温度变化。天线整体置于温箱内部并悬空,与温箱四壁无任何接触,保持无应力状态。

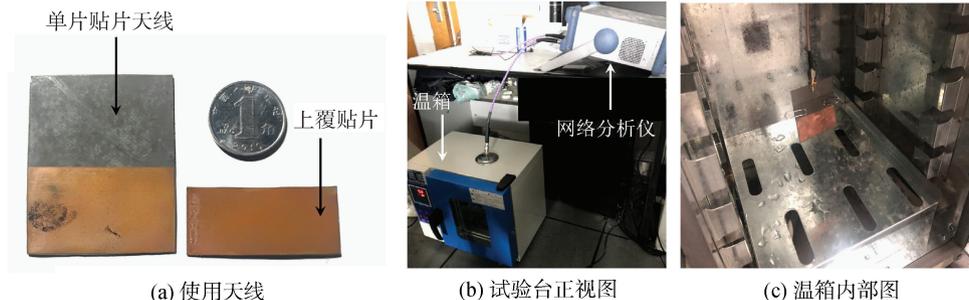


图 10 试验台搭建

Fig. 10 Experimental setup

一共对 2 片同一批次的组合式天线进行了试验。温箱内温度从 30 °C 开始,以 2 °C 为升温梯度,均匀升温到 60 °C,在每个温度点上静置 2 min 左

右,确保温度效应完全稳定。采用矢量网络分析仪对此时天线的回波损耗曲线进行 3 次记录,以排除误差。

对每个温度点记录的 3 条回波损耗曲线进行平均后,对曲线进行 4 次函数拟合,并取函数最低点作为谐振点。图 11 是天线测定的温度梯度下回波损耗曲线,随温度升高,谐振频率逐渐增大;图 12 给出了谐振频率与温度之间的变化关系和拟合曲线,由图可知,谐振频率与温度之间的变化关系近似线性,温度每升高 1 °C,谐振频率近似增大 0.355 MHz。模拟与试验的数据对比如表 4 所示。由表可知,试验结论与模拟结果都显示温度变化与谐振频率变化之间存在较好的线性关系,因此,可以采用预制表线性内插补偿值的方式对温度效应进行补偿。其中,模拟组的平均增量是试验组的 80%,与试验组较为接近,证明可以通过模拟手段,对实际的温度影响进行预测和补偿。在实际使用时,有条件的话,可以在模拟的基础上,通过预实验对补偿值进行标定,以得到更为精确的补偿结果。

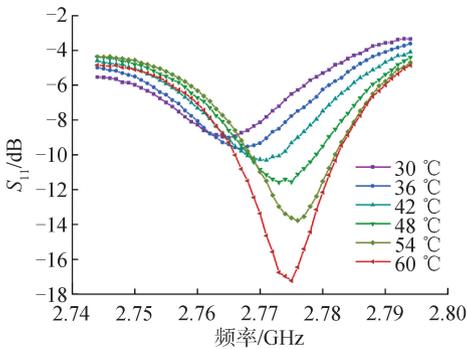


图 11 实验测定回波损耗曲线

Fig. 11 Return loss curve in experiment

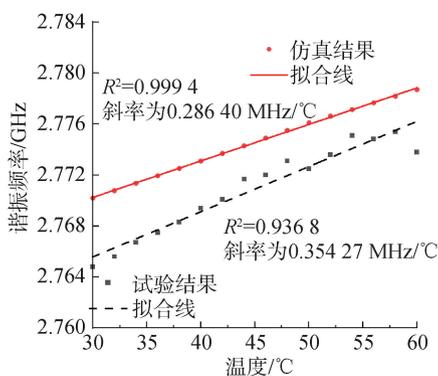


图 12 模拟-试验谐振频率-温度变化曲线对比

Fig. 12 Relationship between resonant frequency and temperature change in simulation and experiment

表 4 模拟与试验数据对比

Table 4 Comparison between simulation and experiment

| 组别  | 起始频率/<br>GHz | 平均增量/<br>(MHz·°C <sup>-1</sup> ) | 线性拟合<br>系数(1) |
|-----|--------------|----------------------------------|---------------|
| 模拟组 | 2.770 2      | 0.286                            | 0.999 4       |
| 试验组 | 2.764 8      | 0.354                            | 0.936 8       |

## 4 结论

1) 将贴片天线的温度效应量化成热膨胀效应和基板的介电常数受热变化,提出了分析贴片天线温度效应的理论模型,综合考虑了组合式贴片天线与天线组件的热效应。由于单片式贴片天线实际上是组合式贴片天线在上覆贴片厚度为零时的特殊形式,该模型对单片式贴片天线和组合式贴片天线的温度效应均适用。

2) 采用多物理场耦合模拟软件 COMSOL 对热膨胀形变和电磁场影响下组合式贴片天线的温度效应分别进行了分析,分析结果显示,随着温度的增长,热膨胀形变使得天线谐振频率减小,而电磁场影响将会增大天线谐振频率,其中,与单片式贴片天线一致,电磁场影响是天线谐振频率变化的主因,效果约为热膨胀形变的效果的五倍;电磁场和热膨胀形变耦合作用下,组合式贴片天线的谐振频率线性增大,平均增量为 0.268 MHz/°C;

3) 进行了组合式贴片天线的温度变化试验,研究了在温度变化下组合式贴片天线谐振频率的变化。试验结果分析表明,当温度升高时,组合式贴片天线的谐振频率近似线性增大,平均增量为 0.355 MHz/°C,线性拟合因子达 0.936 8,此时方针的平均增量为 0.286 MHz/°C,与试验结果较为接近。因此,可以采用温度变化下谐振频率漂移的多次试验值和模拟值来对传感器工作时的测定数据进行温度补偿。

今后研究中将有下列工作进一步完善:

1) 目前仅对未实际工作状态下的传感器进行了实验室的温度补偿试验,后续研究中,拟综合考虑温度和相对位移对传感器的影响,进行实验室实验标定;

2) 本文中仅在实验室中进行了温度补偿试验,今后,拟将传感器应用于实际工程,在实际工程中验证传感器的温度补偿理论。

## 参考文献:

[1] ARMS S W, GALBREATH J H, NEWHARD A T, et al. Remotely reprogrammable sensors for structural health monitoring[C]//Proceedings of the Structural Materials Technology: NDE/NDT for Highways and Bridges. Buffalo, NY, USA, 2004: 1-8.

[2] NOEL A B, ABDAOUI A, ELFOULY T, et al. Structural health monitoring using wireless sensor networks: a comprehensive survey[J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2017, 19(3): 1403-1423.

[3] 薛子凡, 邢志国, 王海斗, 等. 面向结构健康监测的压电传感器综述[J]. 材料导报, 2017, 31(17): 122-132.

XUE Zifan, XING Zhiguo, WANG Haidou, et al. A re-

- view of piezoelectric sensors for structural health monitoring [J]. *Materials review*, 2017, 31(17): 122–132.
- [4] ZAHID M N, JIANG Jianliang, RIZVI S. Reflectometric and interferometric fiber optic sensor's principles and applications[J]. *Frontiers of optoelectronics*, 2019, 12(2): 215–226.
- [5] KINET D, MÉGRET P, GOOSSEN K W, et al. Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: challenges and solutions [J]. *Sensors*, 2014, 14(4): 7394–7419.
- [6] BHUIYAN M Z A, WANG Guojun, WU Jie, et al. Dependable structural health monitoring using wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on dependable and secure computing*, 2017, 14(4): 363–376.
- [7] GAO Jinlan, SIDÉN J, NILSSON H E, et al. Printed humidity sensor with memory functionality for passive RFID tags[J]. *IEEE sensors journal*, 2013, 13(5): 1824–1834.
- [8] YAO Jun, TJUATJA S, HUANG Haiying. Real-time vibratory strain sensing using passive wireless antenna sensor [J]. *IEEE sensors journal*, 2015, 15(8): 4338–4345.
- [9] YI Xiaohua, CHO C, COOPER J, et al. Passive wireless antenna sensor for strain and crack sensing—electromagnetic modeling, simulation, and testing[J]. *Smart materials and structures*, 2013, 22(8): 085009.
- [10] XUE Songtao, YI Zhuoran, XIE Liyu, et al. A passive wireless crack sensor based on patch antenna with overlapping sub-patch[J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 4327.
- [11] XUE Songtao, XU Kangqian, XIE Liyu, et al. Crack sensor based on patch antenna fed by capacitive microstrip lines[J]. *Smart materials and structures*, 2019, 28(8): 085012.
- [12] SANDERS J W, YAO Jun, HUANG Haiying. Microstrip patch antenna temperature sensor[J]. *IEEE sensors journal*, 2015, 15(9): 5312–5319.
- [13] YAO Jun, TCHAFI F M, JAIN A, et al. Far-field interrogation of microstrip patch antenna for temperature sensing without electronics[J]. *IEEE sensors journal*, 2016, 16(19): 7053–7060.
- [14] YI Xiaohua, VYAS R, CHO C, et al. Thermal effects on a passive wireless antenna sensor for strain and crack sensing [C]//*Proceedings of SPIE 8345, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012*. San Diego, California, United States: SPIE, 2012: 83450F.
- [15] BALANIS C A. *Antenna theory: analysis and design* [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.
- [16] 倪国旗. 介质埋藏微带天线[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- NI Guoqi. *Dielectric embedded microstrip antenna* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.

## 本文引用格式:

- 薛松涛,易卓然,谢丽宇,等. 无应力组合贴片天线传感器温度性能模拟测试[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2021, 42(10): 1439–1445.
- XUE Songtao, YI Zhuoran, XIE Liyu, et al. Simulation and experiment on the temperature performance of sensors based on unstressed patch antennas [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2021, 42(10): 1439–1445.