

嵌套型开口谐振环阵列设计及其在冰层检测中的应用*

胡崇琳 高尚 王浩 杨尚可 江剑

(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

摘要:针对传统技术检测飞行器表面冰层厚度存在灵敏度低、检测面积小及线性度差的行业难题,利用嵌套型开口谐振环(nested split ring resonator, NSRR)结构辐射能力强、低损耗、高品质因数、场集中效应强、易小型化的特性,以尺寸大小为 11×11 mm的NSRR单元结构为基础,设计并制备了一种由72个单元组成的传感器阵列,该阵列总体尺寸为 88×99 mm,通过提取传感器阵列谐振频率偏移量实现金属结构件上冰层厚度的反演。ADS等效电路仿真结果表明,NSRR等效电容与传感器阵列的谐振频率存在一一对应关系。HFSS仿真结果表明,该传感器阵列具备不同浓度介质检测和毫米级冰层平均厚度测量的能力,仿真灵敏度为23.46 MHz/mm。实验结果表明,该传感器阵列的谐振频率与冰层平均厚度具有良好的线性关系,线性拟合的决定系数为0.989,对冰层平均厚度的最大检测灵敏度达到21.15 MHz/mm,最大相对误差小于5%,证明了该传感器能够实现结构表面冰层平均厚度的大面积量化检测,具有高灵敏度、大尺寸、低成本、易扩展等优点。

关键词: 结冰检测;开口谐振环;有限元分析;谐振频率;传感器阵列

中图分类号: TP212.9;TN304.3

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.1025

Design of nested split ring resonator (NSRR) array and application in ice detection

Hu Chonglin Gao Shang Wang Hao Yang Shangke Jiang Jian

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In response to industry challenges such as low sensitivity, limited detection area, and poor linearity in conventional methods for measuring ice thickness on aircraft surfaces, this study proposes a sensor array based on the nested split-ring resonator (NSRR) structure. This structure is characterized by strong radiation capability, low loss, high quality factor, strong field confinement effect, and ease of miniaturization. A sensor array composed of 72 nested split-ring resonator (NSRR) units (11×11 mm) was designed and fabricated, achieving a compact footprint of 88×99 mm. This system quantifies ice thickness by monitoring shifts in resonance frequency. ADS equivalent circuit simulations revealed a deterministic relationship between the NSRR's equivalent capacitance and the array's resonance frequency. HFSS electromagnetic simulations further demonstrated the array's capability to detect media with varying dielectric constants and measure ice thickness at millimeter-scale resolution, with a simulated sensitivity of 23.46 MHz/mm. Experimental results further validate a strong linear relationship between the resonance frequency and average ice thickness, with a coefficient of determination (R^2) of 0.989. The maximum detection sensitivity reaches 21.15 MHz/mm, with a maximum relative error of less than 5%. These findings demonstrate that the proposed sensor facilitates large-area, quantitative detection of average ice thickness on structural surfaces, offering advantages such as high sensitivity, extensive coverage, low cost, and scalability.

Keywords: ice detection; split-ring resonator; finite element analysis; resonant frequency; sensor array

0 引言

在航空飞机航行中,表面结冰使飞行器负载增加,甚至对飞行器的发动机涡轮造成重大损伤,严重威胁航空器的安全性和可靠性。有研究表明,机翼上小于 8 mm 的轻微结冰就能导致升力下降 25%^[1]。在 29 个月的运行周期内,涡轮叶片结冰会造成 19 MW·h 的功率损失^[2]。由于结冰具有隐蔽、随机、即时的特性,导致结冰检测成为一个难题。因此,及时检测结冰与否以及量化检测结冰厚度对于预防和启动除冰系统至关重要。

现有的结冰检测技术有光纤式、超声波和基于阻抗的方法。光纤式具有高灵敏度和精度,但有对光源稳定性要求高、抗干扰能力差的特点^[3];超声波检测方法利用超声波在空气中的传播速度和反射特性来检测路面结冰,具有非接触性和实时性等特点^[4];基于阻抗的结冰检测通过测量表面阻抗变化的方式进行结冰检测^[5]。

近年来,微波传感器因非接触的优点而备受研究人员关注。Bahl 等^[6]在早期首次提出并分析了微波传感器谐振频率受冰层厚度影响的理论后,Tariq 等^[7]证明了微带矩形贴片天线传感器检测天线罩表面覆冰的能力,实现了在天线防护罩内部检测防护罩表面冰层厚度(6 mm),该传感器尺寸为 32.5×40 mm。Kozak 等^[8]提出了工作在 2.378 GHz 的含 T 形槽尺寸为 60×67.5 mm 的贴片天线传感器。该传感器可用于冰霜检测但无法量化检测冰层厚度。Li 等^[9]提出了一种能够对 3 种冰层厚度开展检测的微带贴片天线传感器,可检测的最高厚度为 3.2 mm,但线性度较差。Wagih 等^[10]设计了一种尺寸为 107×2 mm 的 UHF RFID 标签柔性偶极子天线结冰传感器,该传感器的最大检测厚度为 9.8 mm,但线性精度较差。以上学者所提出的微带天线传感器虽然能够实现对水、冰或霜介质甚至介质厚度的检测,但是所采用的传感器结构是单一的天线形式,难以在机翼等大面积结构上进行布置,传感器结构难以复制扩展,不利于传感器的工程应用。Kozak 等^[11]提出了一种基于馈线的 SRR 传感器用于道路结冰检测。Wiltshire 等^[12]与 Kozak 等^[13]设计的带馈线 SRR 传感器,通过谐振频率、幅度的变化来检测水、霜和冰。Masrakina 等^[14]提出了工作在 5.122 GHz 的方形 SRR 传感器,用于测量材料的介电常数。江正峰等^[15]设计了一种含馈线的基片集成波导互补开口谐振(SIW-CSRR)微带传感器阵列,实现了对金属结构表面直、针孔、星型裂纹的毫米级量化检测。相较于传统贴片天线,以上学者所提出的 SRR、CSRR^[15-16]具有较高的灵敏度、小尺寸和易于集成其他平面结构等优点,但它们基于馈线结构的测量方式增大了复杂环境下传感器的维护成本与损坏概率,不利于传感器的工程应

用。文献[17-20]设计了以 SRR 结构为阵元组成传感器阵列,用于材料介电特性、应变、冰霜介质检测,证明了阵列具有低成本、高可靠性、可重复使用、高灵敏度等优点。上述单一 SRR 传感器及传感器阵列摆脱了馈线对于使用环境的限制并实现了无线无源结冰检测,但只能检测结构表面有无介质存在,依然不具备量化测量介质的能力。Hartwig 等^[21]在柔性基板上制备了含 100 个阵列单元且尺寸可达到 90×90 mm 的高频传感器阵列。该阵列只能对最高 3 mm 冰层平均厚度开展量化检测,且该结构不具备 SRR 结构的辐射特性,传感器受噪声干扰较大,线性度较差。

近年来,在 CSRR 和 SRR 基础上,国内外相关学者^[22-23]进一步提出了 NSRR 结构,该结构通过裂环和多环的结构能够显著增强电磁共振耦合,提高场集中效应与介电常数灵敏度系数,因此在实现相同耦合效果时所需的面积更小,这有助于传感器阵列设计的小型化。

因此,针对大面积量化检测金属表面冰层平均厚度的测试需求,本文基于 NSRR 结构提出一种新的 NSRR 传感器阵列,该传感器阵列具有更小的体积,更集中的电磁场分布,且不依赖于馈线的结构优势极大地拓宽了传感器的工程应用场景,有望解决大面积结构上结冰平均厚度量化测量的问题。

1 嵌套式开口谐振环传感器阵列单元设计

1.1 嵌套式开口谐振环结构设计

NSRR 结构具有频率选择特性,当空间中的电磁波和 NSRR 结构共振时,NSRR 结构可以被等效为 RCL 谐振电路吸收对应频率的电磁波信号。NSRR 传感器阵列的基本单元包含 NSRR 敏感图案、介质层、接地屏蔽层 3 个部分,其结构如图 1 所示。



图 1 NSRR 传感器阵列单元

Fig. 1 NSRR sensor array unit

敏感单元的 NSRR 图案通过感光法刻蚀在传感器的上表面;传感器背面覆盖有导电金属,用于屏蔽不同的安装材料对于 NSRR 传感器阵列的影响。基底材料选择环氧玻璃布层压板 (FR4),该材料具有良好温度稳定性,自身介电常数受温度影响较小,且成本低、易获取,被广泛用于电路板、贴片天线制作等领域。

表 1 传感器阵列单元结构尺寸

Table 1 Dimensional parameters of NSRR sensor array unit

参数	尺寸/mm
W	9
L	11
t	1
d	1
g	1.5

传感器阵列单元的结构尺寸参数如表 1 所示,其结构参数包括 NSRR 线宽 t 、栅格间距 d 、开口宽度 g 、NSRR 整体宽度 W 。图 2 所示为传感器的等效电路。传感器的谐振频率 f_r 可以通过^[6]表示为:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

式中: C 表示传感器阵列单元等效电容的总值,由 NSRR 等效电容和 NSRR 与屏蔽层间的电容组成; L 表示传感器阵列单元等效电感的总值。当传感器阵列单元敏感图案上的空气被其他材料代替时,传感器阵列单元的有效介电常数发生改变,继而影响等效电容,最后使传感器阵列单元的谐振频率发生改变。

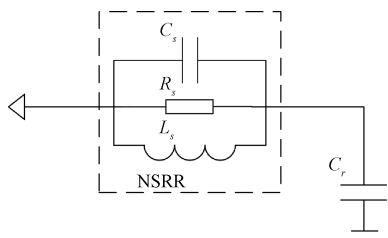


图 2 NSRR 传感器阵列单元 RCL 等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of the NSRR sensor array unit

通过矢量网络分析仪中回波损耗 (S_{11}) 曲线可以观察谐振频率的变化。 S_{11} 表示入射波与反射波之间的比例关系,通过观察 S_{11} 曲线峰值的变化可以记录传感器谐振频率的变化。此外,研究表明介质层的厚度也会影响传感器的谐振频率。根据上述理论,介质层的厚度信息可以通过传感器阵列的谐振频率偏移进行表达。传感器阵列单元可以被等效为图 2 中 RCL 谐振电路,电容 C_r 为屏蔽层与 NSRR 间的等效电容。

1.2 传感器阵列单元等效电路 ADS 仿真验证

利用 ADS 软件中对阵列单元的等效电路进行仿真,

得到 NSRR 传感器阵列单元的等效电路参数为 $C_r = 4 \text{ pF}$ 、 $C_s = 4.335 \text{ pF}$ 、 $R_s = 50 \Omega$ 、 $L_s = 0.2 \text{ nH}$ 。当介质层代替 NSRR 的空气间隙时,由于介质材料从空气变化为相应介质,介电常数发生了改变,导致了 C_s 的电容值发生改变。这一变化可以参考公式如式 (2) 所示。

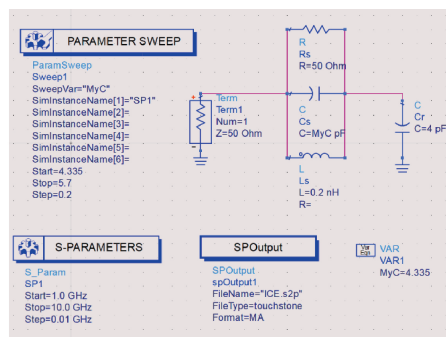
$$C_s = \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2)$$

式中: ϵ_r 为有效介电常数; A 为电容板的面积; d 为电容板间的距离。将式 (2) 代入式 (1) 得到:

$$f_r = \left(2\pi\sqrt{L\epsilon_r \frac{A}{d}} \right)^{-1} \quad (3)$$

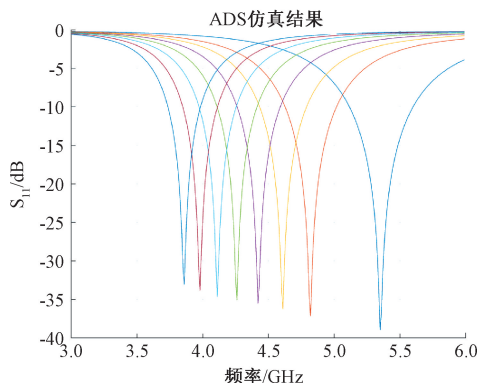
当介质层的介电常数大于空气的介电常数 ($\epsilon_{\text{air}} = 1$) 时,由式 (3) 可知谐振频率随着介电常数的增大而减小。

在 ADS 软件中,通过增大等效电路中 C_s 的电容值,对这一过程进行仿真分析。ADS 仿真电路如图 3(a) 所示,仿真结果如图 3(b) 所示,等效电路的谐振频率随着 C_s 电容值的增大而减小,这与传感原理分析结果一致,验证了等效电路正确性。



(a) ADS 仿真电路

(a) ADS simulation circuit



(b) ADS 仿真结果

(b) ADS simulation results

图 3 NSRR 传感器阵列单元等效电路仿真

Fig. 3 Simulation of the equivalent circuit of the NSRR sensor array unit

NSRR 传感器阵列测量时,使用矢量网络分析仪作为喇叭天线的激励,同时矢量网络分析仪能够绘制喇叭

天线的 S_{11} 曲线。通过建立谐振频率和介质层厚度的数学模型,实现介质层厚度的量化检测,图 4 为检测系统示意图。

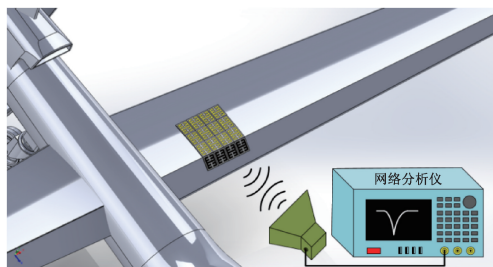


图 4 NSRR 传感器阵列检测系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the NSRR sensor array detection system

2 HFSS 有限元仿真分析

2.1 嵌套式开口谐振环传感器阵列电磁特性仿真

通过 HFSS 软件进行建模和仿真分析,设置求解频率为 5 GHz。使用 FR4 材料作为介质层,在底部和顶部覆铜作为导电金属,并在传感器顶层创建 NSRR 图案。为模拟电磁波通过喇叭天线传输的方式,在空气腔顶部添加激励,设置腔体边界条件,使电磁波在其内部以平面波形式传播。建立 NSRR 传感器阵列单元仿真模型以及 8×9 的传感器阵列仿真模型。仿真结果表明无覆盖时传感器阵列单元和阵列的谐振频率分别为 5.35 和 5.37 GHz。传感器阵列布置后其初始谐振频率没有发生变化,阵列单元间无相互影响。

NSRR 传感器阵列单元及阵列的电磁场分布如图 5 所示,NSRR 传感器阵列单元结构电场强度最大值达到 91 dB,磁场强度最大值达到 52 dB,且电磁场分布均匀。电磁波聚集在 NSRR 内部及其末端,这表明 NSRR 结构电磁辐射特性优异,能够增强传感器的灵敏度。

2.2 嵌套式开口谐振环传感器阵列单元屏蔽层结构仿真

在实际使用过程中,传感器阵列可能被安装于不同材料表面,为了避免安装材料对于传感器阵列谐振频率的影响,设计了 0.018 mm 厚的铜作为屏蔽层,在 5 GHz 下铜的趋肤深度为 $0.922 \mu\text{m}$,屏蔽层的厚度相当于近 20 倍的趋肤深度,可以将入射波的振幅衰减至原来的 e^{-20} 倍,能够有效减小安装材料对于传感器阵列的影响。传感器阵列由重复的阵列单元组成,且屏蔽层覆盖整个传感器阵列的底部,因此采用阵列单元仿真能够反映传感器阵列屏蔽层结构的性能,同时降低了仿真难度。

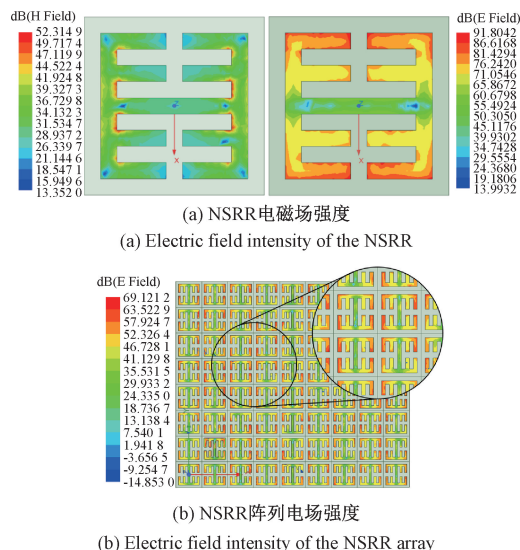


图 5 NSRR 与 NSRR 阵列的电磁场强度

Fig. 5 Electromagnetic field intensity of the NSRR and NSRR array

在 HFSS 有限元仿真软件中对 NSRR 传感器阵列单元仿真模型添加安装表面模型进行仿真。在保持传感器阵列单元其他参数不变的情况下,通过将安装表面模型的边界条件设置为铜、不锈钢和铝,对应传感器安装在铜、不锈钢和铝表面的情况,仿真分析其谐振频率的变化。

如图 6 所示,在 HFSS 仿真中,传感器的谐振频率没有随着安装在不同金属表面发生改变。这表明屏蔽层能够很好地屏蔽安装表面对 NSRR 传感器阵列谐振频率的影响。

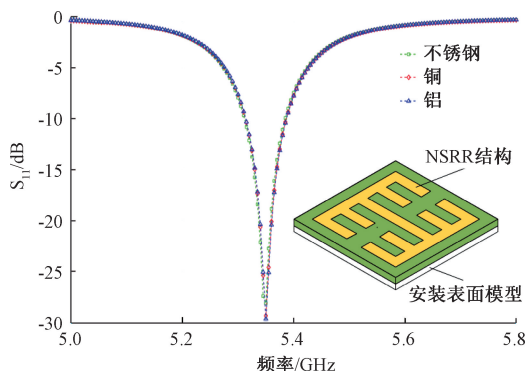


图 6 屏蔽层结构仿真结果

Fig. 6 Simulation results of the shielding layer structure

2.3 嵌套式开口谐振环传感器单元介质检测仿真

同样的,可以通过 HFSS 软件仿真阵列单元的介质检测能力以反映传感器阵列的介质检测能力。通过在传感器阵列单元仿真模型中添加介质材料模型,并对介质

材料模型的介电常数、磁导率进行赋值,探究了当传感器被冰($\epsilon_{ice} = 3.15$)、盐水冰(ϵ_r 大于纯水冰)、空气($\epsilon_{air} = 1$)覆盖时的谐振频率的偏移情况。

如图7所示,相较于介质材料模型为空气,覆盖纯水冰和盐水冰时谐振频率和幅值均发生明显的偏移,且由于盐水冰的介电常数高于纯水冰,可以发现传感器覆盖盐水冰的谐振频率低于覆盖纯水冰,符合式(3)的规律。这表明该传感器阵列单元模型具有介质检测的能力。

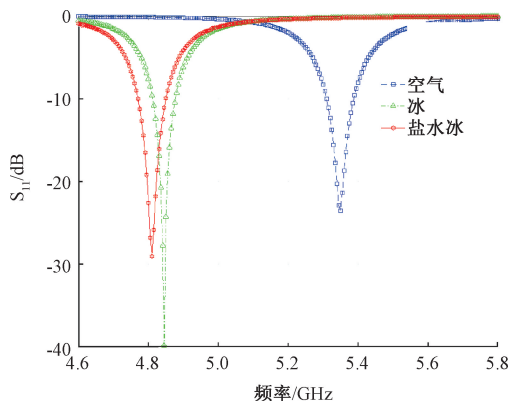


图7 介质检测仿真结果

Fig. 7 Dielectric detection simulation results

2.4 嵌套式开口谐振环传感器阵列结冰检测仿真分析

通过在 HFSS 软件中建立传感器阵列对于结冰厚度检测的仿真模型以探究传感器阵列对冰层平均厚度的检测能力。在仿真模型中建立待测介质材料模型,并将介质材料模型的电磁参数设置为冰对应的电磁参数大小(介电常数 $\epsilon_{ice} = 3.15$ 、磁导率 $\mu_{ice} = 1$ 、损耗角正切等 $\tan\delta = 0.0009$),在 Optmetrics 中将介质材料模型的厚度设置为变量,设置变化范围和步距,分析冰层平均厚度改变时 8×9 传感器阵列的谐振频率变化情况,仿真结果如图8所示。

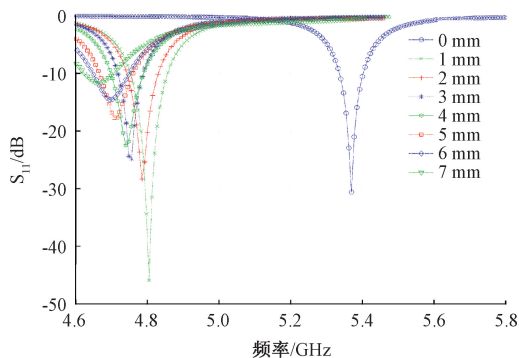


图8 冰层平均厚度-谐振频率仿真结果

Fig. 8 Simulated correlation between ice thickness and resonant frequency

由图8可知,随着冰层平均厚度的增加传感器阵列的谐振频率和幅值都逐渐减小,传感器阵列的谐振频率与冰层平均厚度的线性拟合公式为 $y = -0.02346x + 4.83$, $R^2 = 0.993$,灵敏度系数为 23.46 MHz/mm 。

3 实验测量及结果分析

3.1 测量系统设计

本文测量系统主要由喇叭天线、矢量网络分析仪、微波线缆和制冷平台组成,测试系统如图9所示。喇叭天线采用英联微波的 LB-SJ-10100-NF 双极化喇叭天线,其 $1 \sim 10 \text{ GHz}$ 扫频段可满足传感器阵列工作要求。Ceyear 公司 3565B 型矢量网络分析仪的工作频率范围为 $100 \text{ kHz} \sim 8.5 \text{ GHz}$ 。制冷平台使用半导体制冷片进行降温,能够实现在室温($20^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$)条件下将平台温度降低至 -10°C ,制冷平台大小为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$,该平台能够制备厚度均匀的冰层,通过在传感器阵列表面滴加纯净水控制体积的方法实现对冰层平均厚度的控制。

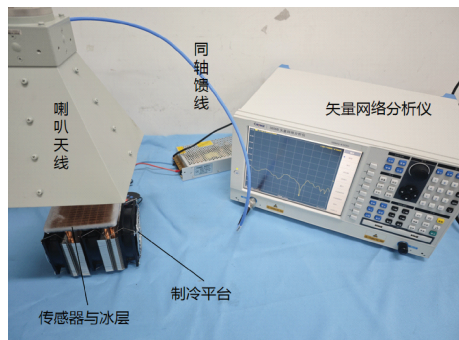


图9 传感器阵列测试系统

Fig. 9 Sensor array testing system

3.2 传感器阵列与试件制作

传感器阵列使用 FR4 双面覆铜板作为原材料,采用感光法刻蚀完成了传感器阵列的制备。图10所示为制备的传感器阵列($88 \times 99 \text{ mm}$),该阵列最小组成单元大小为 $11 \times 11 \text{ mm}$ 。

3.3 实验结果与分析

对传感器阵列性能开展实验验证,启动并校准矢量网络分析仪后,将喇叭天线和矢量网络分析仪通过同轴线连接,调整喇叭天线位置至 S_{11} 曲线相对平稳处,开始测量。首先对传感器阵列无覆盖时进行测试,确定传感器阵列的初始谐振频率;然后将传感器阵列置于不同安装材料表面进行测试,验证屏蔽层的实际效果。实验结果如图11所示,矢量网络分析仪绘制的 S_{11} 曲线重合,传感器阵列的谐振频率没有受到安装材料的影响,且谐振频率为 5.29 GHz ,与仿真结果 5.35 GHz 偏差较小。

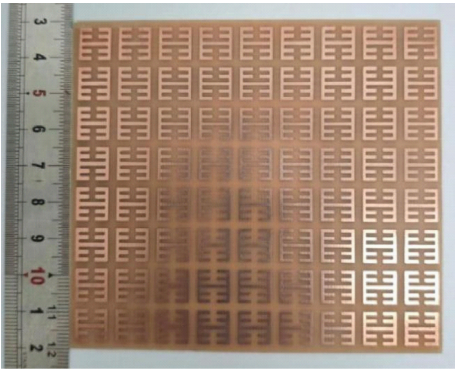


图 10 传感器阵列
Fig. 10 Fabricated sensor array

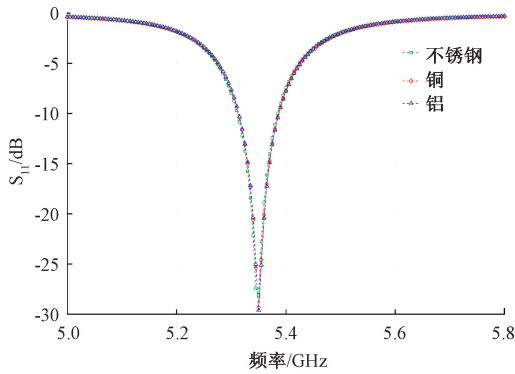


图 11 传感器阵列安装在铜、不锈钢、铝表面的 S_{11} 曲线
Fig. 11 S_{11} curve of the sensor array mounted on copper, stainless steel, and aluminum surfaces

传感器阵列的实际初始谐振频率为 5.29 GHz,该频率与仿真频率(5.35 GHz)存在较小偏差,这些偏差主要来自于 FR4 材料本身的电磁参数误差以及加工过程中的尺寸误差。

介质检测实验中,将传感器阵列放于制冷平台上,置于喇叭天线下方,开启制冷平台,进行 4 次实验,向平台上分别添加质量浓度为 1%、5%、10%、20% 的盐水,制备平均厚度为 1 mm 的冰层。等待结冰后,观察 NSRR 传感器阵列谐振频率的变化,实验结果如图 12 所示。

在冰层平均厚度为 1 mm 时,传感器阵列的谐振频率随着含盐量的上升而下降,当盐水浓度超过 10% 时,谐振频率变化减小。这是由于结冰时温度降低导致盐析出,冰中含盐量达到饱和导致的。

量化检测冰层平均厚度实验中,等待纯净水结冰后,使用游标卡尺,多点测量冰层平均厚度,取平均值记为当前冰层平均厚度,观察矢量网络分析仪中 S_{11} 曲线的变化,并记录 S_{11} 曲线数据,实验结果如图 13 所示。

图 13、14 表明冰层平均厚度与传感器阵列谐振频率间存在较好的线性关系,其拟合方程为 $y = -0.021\,15x +$

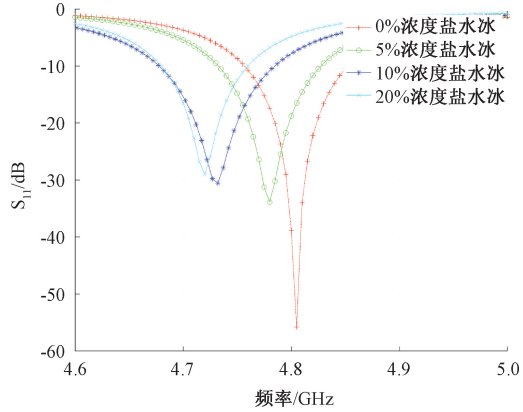


图 12 介质检测实验结果
Fig. 12 Material detection test results

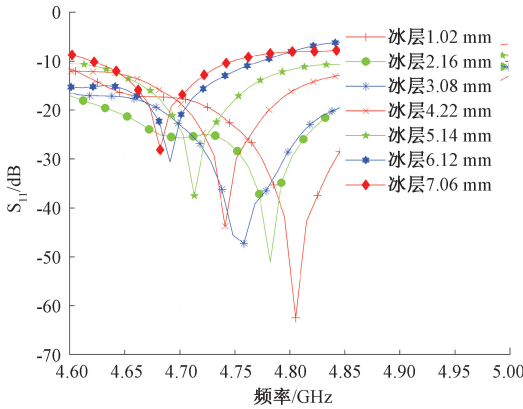


图 13 结冰厚度-谐振频率实验结果
Fig. 13 Ice thickness vs. resonant frequency experimental results

4.826, $R^2 = 0.989$ 表明了传感器阵列的线性度好,其灵敏度为 21.15 MHz/mm,实验测试的灵敏度低于阵列仿真的 23.46 MHz/mm,这些误差来自于传感器阵列的制造误差。

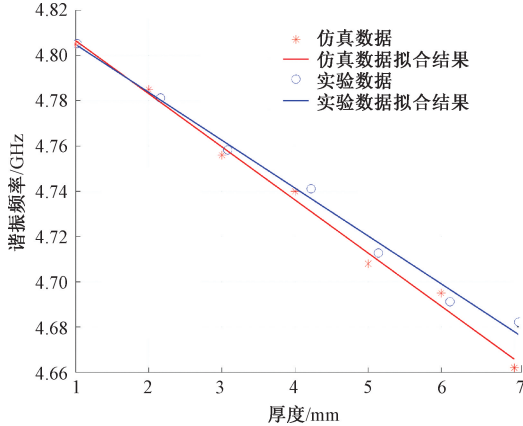


图 14 谐振频率-冰层平均厚度仿真、实验结果拟合
Fig. 14 Resonant frequency vs. ice layer thickness simulation and experimental results fit

表 2 为所设计的传感器阵列测试数据以及相对误差。可以发现在测量范围内传感器阵列的相对误差均小于 4.91%,证明了所设计的传感器阵列能够量化检测冰层平均厚度。

近年来国内外研究人员利用微波检测技术对冰层平均厚度进行检测的方法对比如表 3 所示。对比发现,本文设计的基于 NSRR 结构的传感器阵列在检测面积范围与灵敏度上均优于同类工作。

表 2 传感器阵列实验数据			
Table 2 Experimental data of the sensor array			
试样平均厚度/ mm	测试频/ GHz	测量厚/ mm	误差/%
1.02	4.805 2	0.984	3.50
2.16	4.781 2	2.212	1.85
3.08	4.758 3	3.201	3.93
4.22	4.741 1	4.013	4.91
5.14	4.712 7	5.356	4.21
6.12	4.691 2	6.373	4.14
7.06	4.682 2	6.799	3.69

表 3 结冰检测方法对比					
Table 3 Comparative analysis of ice detection methodologies					
方法		基底材料	工作频率/GHz	检测范围/mm	灵敏度
文献[9]	贴片天线	RT/Duroid 5880	3.85	0~4.66	约 0.6 MHz/mm
文献[10]	RFID 标签	聚酰亚胺	0.868	4~9	0.83 dB/mm
文献[11]	微带线 SRR	RT/Duroid 5880	1.226	0~1	0.009 6 dB/mm
文献[12]	微带线 SRR	RT/Duroid 5880	4.85	无	无
文献[13]	微带线 SRR	RT/Duroid 5880	5.82	无	无
文献[17]	SRR 阵列	RT/Duroid 5880	3.05	无	无
文献[18]	方形谐振器阵列	玻纤塑料	16.6	0~3	无线性
本文	NSRR 阵列	FR4	4.6~5.3	0~7	21.15 MHz/mm

4 结 论

本文设计了基于 NSRR 结构的传感器阵列,该阵列由 72 个尺寸为 11×11 mm 开口谐振环组成。首先,分析了传感器结构的等效电路,并在 HFSS 仿真软件中进行仿真验证,最终建立了传感器谐振频率与厚度大小的线性关系。实验表明,该传感器阵列灵敏度为 21.15 MHz/mm,相对误差小于 5%。本文所提出的传感器阵列,具有高灵敏度、低成本、易扩展等优点,能够实现对结构表面冰层平均厚度的量化检测,未来将适用于大型航空航天飞行器冰层检测的复杂场景。未来,可以对阵列单元进行分频设计或者添加 RFID 芯片以实现确定冰层平均厚度分布的能力。

参考文献

[1] RASMUSSEN R, COLE J, MOORE R K, et al. Common snowfall conditions associated with aircraft takeoff accidents [J]. Journal of Aircraft, 2000, 37(1): 110-116.

[2] PINAR PÉREZ J M, GARCÍA MÁRQUEZ F P, RUIZ HERNÁNDEZ D. Economic viability analysis for icing blades detection in wind turbines[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 135: 1150-1160.

[3] SHAJIEE S, PAO L Y, WAGNER P N, et al. Direct ice sensing and localized closed-loop heating for active de-icing of wind turbine blades [J]. American Control Conference, 2013, DOI:10.1109/ACC.2013.6579908.

[4] GAO H, ROSE J L. Ice detection and classification on an aircraft wing with ultrasonic shear horizontal guided waves [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, 56(2): 334-44.

[5] NEUMAYER M, BRETTERKLIEBER T, FLATSCHER M. Signal processing for capacitive ice sensing: Electrode topology and algorithm design [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(5): 1458-1466.

[6] BAHL I, BHARTIA P, STUCHLY S. Design of microstrip antennas covered with a dielectric layer[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982, 30(2): 314-318.

[7] TARIQ R U, YE M, ZHAO X L, et al. Microwave sensor for detection of ice accretion on base station antenna Radome [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(17): 18733-18741.

[8] KOZAK R, KHORSAND K, ZARIFI T, et al. Patch antenna sensor for wireless ice and frost detection[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 13707.

[9] LI C, DJERAFFI T, VILLENEUVE E, et al. Planar antenna sensor with thermal stability for detection of ice formation[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, DOI:10.1016/j.sna.2022.113576.

[10] WAGIH M, SHI J. Wireless ice detection and monitoring using flexible uhfrfid tags [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(17): 18715-18724.

- [11] KOZAK R, JAIN M C, MCCLELLAND J, et al. Durable ice sensors utilizing microwave SRRs coated with protective epoxy for de-icing control [C]. 2021 IEEE Sensors. IEEE, 2021: 1-4.
- [12] WILTSHIRE B, MIRSHAHIDI K, GOLOVIN K, et al. Robust and sensitive frost and ice detection via planar microwave resonator sensor [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019, 301: 126881.
- [13] KOZAK R, WILTSHIRE B D, KHANDOKER M A R, et al. Modified microwave sensor with a patterned ground heater for detection and prevention of ice accumulation [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12 (49): 55483-55492.
- [14] MASRAKIN K, IBRAHIM S Z, RAHIM H A, et al. Microstrip sensor based on ring resonator coupled with double square split ring resonator for solid material permittivity characterization [J]. Micromachines, 2023, 14(4): 790.
- [15] 江正峰, 高尚, 江剑. 波导谐振环微带阵列多裂纹检测传感器设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(1): 1-8.
JIANG ZH F, GAO SH, JIANG J. Design of a waveguide resonant ring microstrip array multi-crack detection sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(1): 1-8.
- [16] ANSARI M A H, JHA A K, AKHTARM J. Design and application of the csrr-based planar sensor for noninvasive measurement of complex permittivity [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(12): 7181-7189.
- [17] NIKSAN O, COLEGRAVE K, ZARIFI M H. Battery-free, artificial neural network-assisted microwave resonator array for ice detection [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2023, 71 (2): 698-709.
- [18] CAO Y, CHEN K, RUAN C. A microwave metamaterial-inspired sensor for nondestructive evaluation of dielectric substrates [C]. 2021 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). IEEE, 2021: 1-3.
- [19] WILTSHIRE B D, ZARIFI T, ZARIFI M H. Passive split ring resonator tag configuration for RFID-based wireless permittivity sensing [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(4): 1904-1911.
- [20] OZBEY B. Wireless surface strain mapping by passive electromagnetic resonators [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(10): 10370-7.
- [21] HARTWIG M, GAITZSCH M, GROSSMANN T D, et al. Investigation on an inkjet printed passive sensor for wireless ice detection on wind rotor blades [J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2016, 60 (4): 040402. 1-040402. 7.
- [22] 张子瑞, 高尚. 无线无源多栅格结构式温压传感器设计与制备 [J]. 微纳电子技术, 2024, 61(3): 118-125.
ZHANG Z R, GAO SH. Design and fabrication of a wireless passive multi-grid structure temperature-pressure sensor [J]. Micro/Nano Electronics Technology, 2024, 61(3): 118-125.
- [23] WU J K, GAO K, YUE W, et al. Microwave detection towards marine climate monitoring: Fog and humidity [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2024, 420: 9.

作者简介



胡崇琳, 2018 年于洛阳理工学院获得学士学位, 现为南京理工大学硕士研究生, 主要研究方向为无线无源传感器。
Email: 18203700109@163.com

Hu Chonglin received his B. Sc. degree from Luoyang Institute of Science and Technology in 2018. He is now a M. Sc. candidate at Nanjing University of Science and Technology. His main research interest includes wireless passive sensors.



高尚(通信作者), 2017 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为南京理工大学副教授, 主要研究方向为结构健康监测。
E-mail: shang.gao@njust.edu.cn

Gao Shang (Corresponding author), received a Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2017. He is now a lecturer at Nanjing University of Science and Technology. His main research interest includes structural health monitoring.