

基于微波谐振器的无人机柔性阵列结冰传感器

栗子涵¹, 鲁泊尚¹, 谢建兵^{1,*}

(1. 西北工业大学机电学院 西安 710072)

Email: xiejb@nwpu.edu.cn

摘要: 本文提出了一种的微波柔性阵列式结冰传感器用于测量无人机迎风面表面的结冰情况, 并在互补分裂环谐振器 (CSRR) 结构演变的基础上, 提出了一种具有高灵敏度和高品质因数值的互补耦合开口环 (CCSRR) 结构。传感器薄膜由金属缺陷微带, 聚酰亚胺薄膜, 柔性介质和金属地组成。通过在传感器缺陷微带结构表面结冰, 再观察实验装置反馈的透射系数 (S21) 得到不同冰厚对应的谐振频率, 本文建立了冰厚与谐振频率的函数关系。与传统的结冰传感器相比, 柔性结构可以更好的与无人机表面贴合, 阵列形式拓展了传感器的检测功能, 不但能测量单点厚度, 还能反馈结冰敏感区的冰层形态, 填补了国内小型无人机结冰检测传感器的空白

关键词: 微波谐振; 结冰传感器; 柔性电子; 阵列; UAV

Microwave-based flexible array icing sensor for UAVs

Li Zihan¹, Lu Boshang¹, Xie Jianbing^{1,*}

(1. College of Mechatronics, North-western Polytechnical University,
Xi'an 710072, China)

Abstract: In this paper, a microwave flexible array icing sensor for measuring icing on the windward surface of a UAV is proposed, and a complementary coupled open resonator ring (CCSRR) structure with high sensitivity and high quality factor value is proposed based on the evolution of the complementary split ring resonator (CSRR) structure. The sensor film consists of a metal defect microstrip, a polyimide film, a flexible medium and a metal ground. The resonant frequencies corresponding to different ice thicknesses are obtained by icing on the surface of the sensor defective microstrip structure and observing the transmission coefficient (S21) fed back from the experimental setup, and a functional relationship between ice thickness and resonant frequency is established in this paper. Compared with the traditional icing sensor, the flexible structure can be better adhered to the surface of the UAV, and the array form expands the detection function of the sensor, which not only measures the thickness of a single point, but also provides feedback on the ice morphology in the icing-sensitive area, which fills the gap of domestic small UAV icing detection sensor.

Keywords: Microwave resonance; Icing sensors; Flexible electronics; Arrays; UAV

1、研究背景

积冰是指固体结构在低于冰点的温度下接触液态云滴时结冰的现象。飞行中积冰是一种非常危险的情况，会破坏飞行器的气动性能，增加阻力，降低操纵控制能力 [1]。目前，结冰传感器主要采用直接接触式检测方法，由于体积大、成本高、易受环境干扰等原因，其应用也受到一定限制。与大型客机相比，无人机体积小、速度慢，更容易在飞行中发生结冰，这对防冰技术提出了更高的要求 [2]。微波传感器具有小型化、低成本、无损检测、实时检测等优点，已广泛应用于生物、医学、农业、环境监测等多个领域 [3]。在之前的研究中，我们提出了一种具有结冰检测能力的刚性微波传感器 [4]，但实践证明该传感器还不能应用于无人机的结冰检测。本文提出了一种基于缺陷微带结构的柔性阵列微波传感器。

2、研究内容

本文基于缺陷微带 (Defected microstrip structure, DMS) 结构，在 CSRR 超材料谐振单元的基础上进行拓扑，提出一种新型的互补耦合开口环 (Coupling complementary split ring resonator, CCSRR) 结构。传感器通常安装在无人机的迎风面用以探测结冰类型、结冰速率、冰厚和冰层形状等信息。通过仿真优化后，得到的柔性阵列结冰传感器如图 1 所示。图中橙色部分为 PI 基底，灰色部分为 Ecoflex 基底，黄色部分为金属铜。所设计的 DMS-CCSRR 柔性结冰传感器长 95mm，宽 40mm。

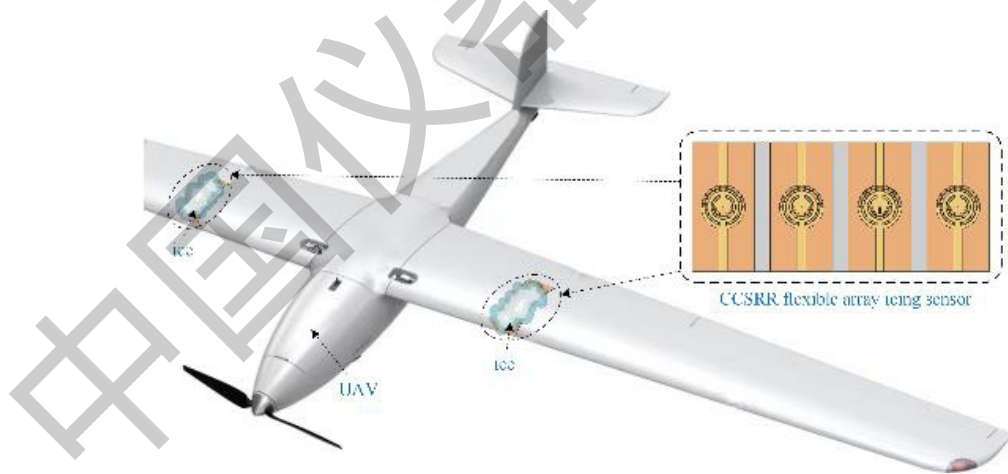


Figure 1. Schematic diagram of the DMS-CCSRR-based flexible sensor array attached to the surface of the wing

传感器制作采用柔性电路板 (Flexible Printed Circuit, FPC) 工艺中的单面板裸铜工艺，采用聚酰亚胺 (PI) 作为基片，在基片的表面沉积了一层厚度为 0.035mm 的铜层，形成了 DMS-CCSRR 柔性阵列结冰传感器的图案结构和传感器的参考地。传感器基底材料目前使用美国

Smooth-On 公司生产的脂肪族芳香族无规共聚酯 Ecoflex 00-30。

实验结果如图 2(a) 所示, 从图中可以看出, 随着结冰厚度的增加, 传感器谐振频率逐渐降低, 空载时, 传感器的谐振频率为 2.134GHz, 当结冰厚度小于 1mm 时, 传感器的冰厚分辨率可达到 0.1mm, 谐振频率从 2.040GHz 变化到 1.920GHz。当结冰厚度在 1.0mm-4.0mm 范围内时, 结冰厚度分辨率可达到 0.5mm, 谐振频率从 1.920GHz 变化到 1.842GHz。

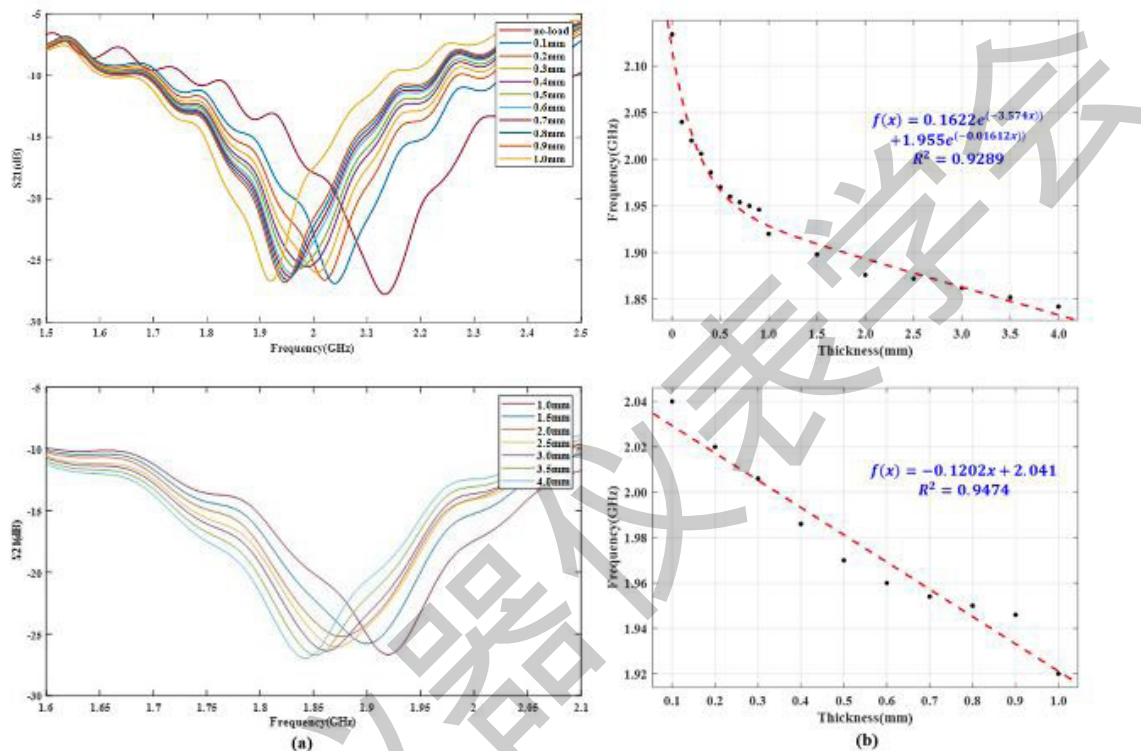


Fig. 2(a) S21 of the CCSRR flexible icing sensor for ice thicknesses of 0-4.0 mm, (b) Fitting curve of sensor S21 coefficient in the range of 0-4.0 mm

根据测量结果拟合出冰厚关于谐振频率的函数表达式, 通过测量结果判断冰厚。取 0mm 到 4.0mm 的测量结果用 Matlab 进行非线性最小二乘法拟合, 传感器谐振频率在 0-4.0mm 区间随结冰厚度的拟合曲线如图 2(b) 所示, 可以看出, 冰厚为 0.1mm-1mm 时谐振频率关于厚度呈线性分布, 冰厚为 1mm-4mm 时谐振频率关于厚度呈指数型分布。

该传感器阵列中各个阵元间可独立工作, 因此将各个阵元输出冰厚数据进行拟合, 便可近似得到传感器阵列表面结冰的大致形状, 以实现冰形的预测。通过制备 0-4mm 连续变化的楔形冰柱, 并将其置于传感器表面, 检测结果表示该柔性阵列传感器有能力对输出冰形进行大致预测。

3、结论

本论文提出了一种基于缺陷微带 CSRR 结构的用于测量冰厚的新型低成本 CCSRR 柔性阵列结

冰传感器，并制作了检测冰形的微波谐振式柔性阵列传感器。CCSRR 柔性阵列结冰传感器的工作频率为 2.134GHz，最大可检测厚度为 4.0mm，最小可检测厚度小于 0.1mm，灵敏度在结冰厚度小于 1.0mm 的区间内为 0.0133GHz/mm。同时 CCSRR 柔性阵列结冰传感器具备很好的阵列一致性，弯曲对传感器谐振频率几乎没有影响。

与现有研究和之前的工作相比，本文提出的传感器在保持较低谐振频率的同时，提高了传感器的灵敏度和分辨率，且该传感器的制备方法简单，柔性 DMS 结构的引入使得传感器可以贴敷在待测物体表面不受曲面弧度影响，突破了测量固定区域冰厚的局限，传感器的阵列化通过分别测量各振元的冰厚能表征冰层形状。

参考文献

- [1] P. Frohboese and A. Anders, "Effects of Icing on Wind Turbine Fatigue Loads," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 75, no. 1, p. 012061, Jul. 2007, doi: 10.1088/1742-6596/75/1/012061.
- [2] R. Hann, A. Wenz, K. Gryte, and T. A. Johansen, "Impact of atmospheric icing on UAV aerodynamic performance," in *2017 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS)*, Linköping, Oct. 2017, pp. 66–71. doi: 10.1109/RED-UAS.2017.8101645.
- [3] P. Vélez, F. Martín, R. Fernández-García, and I. Gil, "Embroidered Textile Frequency-Splitting Sensor Based on Stepped-Impedance Resonators," *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 9, pp. 8596–8603, May 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3163165.
- [4] J. Xie, J. Wen, J. Chen, and W. Yuan, "Microwave Icing Sensor Based on Interdigital-Complementary Split-Ring Resonator," *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 13, pp. 12829–12837, Jul. 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3176932.