

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508589

一种近距离位移测量环形探针嵌套收发天线设计*

蒋旭中 冷开茂 樊 薇

(江苏大学机械工程学院 镇江 212013)

摘 要:毫米级近距离位移测量在精密制造、医疗监测、航空航天等领域应用广泛。微波法凭借非接触、抗干扰性强和空间分辨率适中等优势,成为近距离位移测量的有效手段。针对环形探针天线存在多频谐振和天线尺寸与性能难以兼容的问题,提出一种基于模态抑制的四元扇形截断结构和利用嵌套式布局的环形探针收发天线,能够有效抑制传统环形天线的多频点谐振现象,实现单一目标频点(24.01 GHz)的高效辐射并提升信号接收纯度与抗干扰能力。仿真结果表明,该天线在保留高增益特性的同时,尺寸较同类典型环形天线缩减65.385%,工作带宽小于0.1%,目标频点反射系数为-64.001 dB,中心频点增益达11.028 dBi,实测结果与仿真高度吻合,实物测试显示在24.14 GHz处的反射系数为-42.807 dB,绝对带宽为0.027 GHz,相对带宽为0.004%,远低于窄带要求的1%。所设计的天线不仅尺寸小、结构简单,且性能良好,满足毫米级近距离位移测量需求。

关键词: 位移测量; 环形探针天线; 模态抑制; 嵌套结构; 极窄带宽

中图分类号: TN822

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460.4099

Design of a nested transceiver loop probe antenna for close-range displacement measurement

Jiang Xuzhong Leng Kaimao Fan Wei

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Millimeter-scale close-range displacement measurement is widely used in fields such as precision manufacturing, medical monitoring, and aerospace. Owing to its non-contact operation, strong immunity to interference, and moderate spatial resolution, microwave sensing has become an effective technique for such tasks. Conventional loop probe antennas, however, suffer from multi-mode resonances, and achieving a desirable compromise between antenna size and performance remains challenging. To tackle these issues, this paper proposes a Four-Element sector truncated structure based on mode suppression, together with a nested-configuration transceiver antenna. This design effectively suppresses multi-frequency resonances, enabling efficient radiation at a single target frequency of 24.01 GHz while enhancing receive-signal purity and anti-interference capability. Simulations demonstrate that, while maintaining high gain, the antenna size is reduced by 65.385% typical loop probe antennas reported in the literature; the operational bandwidth is below 0.1%; the reflection coefficient at the target frequency reaches -64.001 dB; and the center-frequency gain attains 11.028 dBi. Experimental measurements closely align with the simulations: the fabricated prototype exhibits a reflection coefficient of -42.807 dB at 24.14 GHz, an absolute bandwidth of 0.027 GHz, and the relative bandwidth of 0.004% is far below the narrowband requirement of 1%. Therefore, the developed antenna is not only compact and structurally simple, but also exhibits robust performance, meeting the requirements of millimeter-scale close-range microwave displacement measurement.

Keywords: displacement measurement; loop probe antenna; modal suppression; nested structure; very narrow bandwidth

收稿日期: 2025-07-22 Received Date: 2025-07-22

* 基金项目: 国家自然科学基金(52375100)、江苏省自然科学基金(BK20240156)、江苏省双创团队(JSSCTD202448)和中国科协青年人才托举工程(2022QNRC001)资助项目

0 引言

毫米级近距离位移测量是精密制造、医疗监测、航空航天等领域的重要支撑技术。在精密制造领域, Och 等^[1]提出的高分辨率微波层析成像系统结合天线网络与图像重构算法,实现了低介电常数材料内部结构的毫米级无损成像(误差 ≤ 0.5 mm),为在线质量检测与工艺优化提供了有效手段;在医疗监测领域, Antolinos 等^[2]基于 134 GHz 线性调频连续波(linear frequency modulated continuous wave, LFMCW)雷达与频域相位解算,实现了胸腔微位移的高灵敏度探测,并在心率变异性(heart rate variability, HRV)估计中取得较低误差(平均绝对误差 0.53 ms),体现了非接触生命体征监测的应用潜力。在航空航天领域,传感融合技术可将叶尖间隙测量精度提升至微米级(≤ 10 μm),有助于提升运行效率并降低碰撞风险^[3-5]。当前非接触近距离位移测量手段主要包括:光纤法(分辨率高但抗电磁干扰能力弱)^[6]、电容法(响应快但对介质变化敏感)^[7]、电涡流(耐高温但量程受限)^[8]以及微波法。微波法兼具非接触、抗干扰和适中的空间分辨率等优势,逐渐成为研究热点^[9-10]。然而在空间受限的应用场景中,微波传感器的天线面临尺寸与性能的双重约束:尺寸过大会增强近场耦合并降低辐射效率与测量精度,尺寸过小则会影响增益和带宽等性能^[11-12]。

环形探针天线因结构紧凑、设计灵活、支持多频段工作且方向图可控等特点成为研究热点^[13-14]。例如,李江伟等^[15]提出基于开口谐振环的 3 层小型化环形天线,采用电磁耦合激励降低介质损耗,辐射效率提升至 41% 以上。朱熙铨等^[16]在环形结构中引入开缝以获得幅值近似且相位差约 90° 的电流分布,实现了更强的定向辐射与较低副瓣。但传统环形结构普遍存在多谐振点问题。Sagar 等^[17]提出的超宽带圆环天线可覆盖 2.4 ~ 10.4 GHz 频段,并具有一定的频率选择性,但其增益仅为 4.8 ~ 5.1 dBi,难以满足近距离位移测量对高增益与稳定接收的需求。

此外,近场耦合效应仍是影响毫米级测量精度的关键因素。Aslinezhad 等^[18]建立电磁耦合模型并量化分析近场相互作用导致的信号失真,发现当测量距离小于 5 mm 时,传统 $\lambda/4$ 单极子天线出现显著性能劣化,包括输入阻抗实部变化达 35%、S21 相位非线性误差达 12.7% ~ 15.3% 以及幅度波动标准差为 1.8 ~ 2.3 dB。针对这一问题, Cao 等^[19-20]在 28 GHz 波束成形阵列中嵌入近场探测阵列并进行阻抗匹配优化,改善了非线性失真;但其性能对环境工况较敏感,温度升高时相位偏差与幅度一致性偏差均显著增大,复杂工况下测量重复性仍受

限制。

针对环形探针天线的多谐振问题及近场耦合导致的性能退化,本文提出一种截断式环形探针嵌套收发天线,该研究的主要贡献如下:

1) 结构紧凑化设计:采用截断结构与嵌套式布局,将中心圆形探针接收天线与四元扇形截断辐射单元集成,实现紧凑结构,与同类型典型环形探针天线相比,结构面积缩减约 65.385%;

2) 面向测量的窄带与辐射特性:通过嵌套结构构建稳定辐射场,提升圆极化纯度与接收有效角域,并抑制多径干扰,同时保持相对带宽低于 1%,满足高精度微波测量对窄带选择性的需求;

3) 多频点谐振现象优化:结合截断结构与模态抑制方法,将多频点谐振优化为单一目标频点响应,频率偏差控制在 0.047% 以内,从而降低多谐振对测量系统的潜在干扰。

最后,通过理论分析、全波仿真优化以及实物天线测试,验证了所提环形探针嵌套收发天线设计的可行性及性能。

1 环形探针天线工作原理及缺陷分析

1.1 环形探针天线工作原理

环形探针天线由环形辐射体、馈电探针、介质基底和金属接地板组成,其基本结构如图 1 所示。

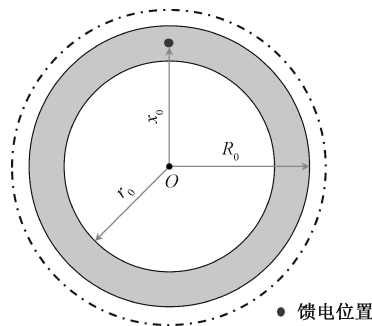


图 1 环形探针天线结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ILoop probe antenna structure

设天线等效自感为 L , 等效电容为 C , 导体宽度为 w_0 , 外半径为 R_0 , 内半径为 r_0 , 馈电点距中心圆点 O 的距离为 x_0 , 介质基板厚度为 h , 中心平均半径为 r_{avg} 。对于矩形截面导体, 环形导体的自感 L 可近似为:

$$L \approx \mu_0 r_{\text{avg}} \left(\ln \frac{8r_{\text{avg}}}{w_0} - 2 \right) \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, $r_{\text{avg}} = (R_0 - r_0)/2$ 。

环形探针天线的等效电容 C 主要由导体与地平面间

的寄生电容和介质加载效应决定,可近似为:

$$C \approx \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{h}$$

(2)

式中: A 为环形面积且 $A = \pi(R_0^2 - r_0^2)$; ε_0 为真空介电常数且 $\varepsilon_0 = 8.864 \times 10^{-12}$ F/m; ε_r 为介质基板介电常数。

环形天线的谐振频率 f_{res} 为:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

(3)

1.2 多频点谐振的成因及仿真验证

环形探针天线的多频点谐振是由结构多模态、非对称激励以及分布参数耦合共同作用的结果。在窄带通信、测向系统与毫米波雷达等应用中,谐振易引入模式耦合与杂散响应,影响频率选择性与系统稳定性,可通过对称馈电或引入滤波结构(如缺陷地^[21])进行优化。

对单圈环形天线而言,不同阶次谐振模式与环路周长 P 与工作波长 λ 的匹配关系相关。当圆环周长接近波长的整数倍时,可激发不同阶次的谐振模式,其关系可表示为:

$$P = n \times \lambda_n (n = 1, 2, 3, \cdots)$$

(4)

式中: n 为模式阶数,基频谐振对应 $n = 1, P = \lambda_1$, 对应天线频响最低频点,多阶谐振($n > 1$)产生多个谐振点。为验证上述多谐振现象,采用 ANSYS HFSS 对经典环形探针天线进行仿真,结构如图 2 所示。该仿真环形探针天线采用单层介质基板构造,基板材料为 FR4, $\varepsilon_r = 4.4$, 厚度 $h = 1.2$ mm, 其余参数如表 1 所示。

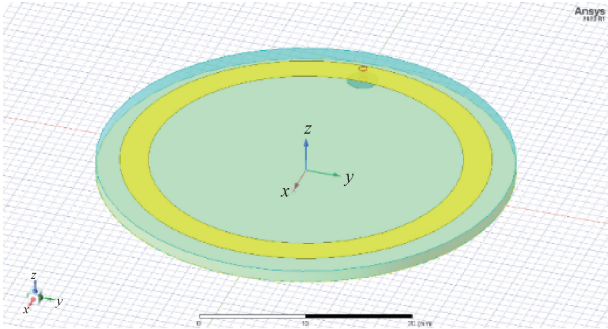


图 2 探针式环形天线仿真结构图

Fig. 2 Simulated structure of a loop probe antenna

仿真得到的 S_{11} 如图 3 所示,环形探针天线出现了多频点谐振现象,且在多处高频点产生优异的频响点。为

便于比较各谐振点的频率选择性,本文以 -25 dB 作为带宽判据统计各谐振点的带宽参数,如表 2 所示。表 2 表明,各谐振点的相对带宽均 $< 1\%$,呈现典型窄带特征。其中,23.92 GHz 处绝对带宽最大(0.139 GHz),而 16.70 GHz 频段带宽最窄。窄带响应有利于提高系统的频率选择性并降低邻频干扰,但多谐振将增加系统响应的不确定性,因此需要进一步抑制非目标谐振点。

表 1 环形探针天线仿真参数

Table 1 Simulation parameters of the loop probe antenna

参数	取值/mm	参数	取值/mm
μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ H/m	ε_0	8.864×10^{-12} F/m
R_0	17.695	r_0	14.96
r_{avg}	2.735	x_0	16.327 5
w_0	1	G_0	20

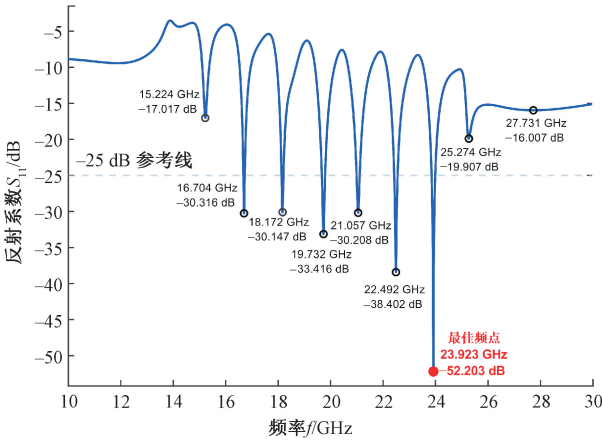


图 3 环形探针天线仿真 S_{11} 数据分析

Fig. 3 Analysis of S_{11} data for simulated loop probe antenna

进一步基于式(1)~(3)计算该结构的等效参数与理论谐振频率:

$$\left\{ \begin{aligned} L &\approx \mu_0 r_{avg} \left(\ln \frac{8r_{avg}}{w_0} - 2 \right) \approx 15.2 \text{ nH} \\ C &\approx \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{h} \approx 0.102 \text{ pF} \\ f_{res} &= \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \approx 22.5 \text{ GHz} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

该计算结果与表 2 中 22.49 GHz 高频谐振点吻合,偏差约为 0.045%,验证了环形探针天线的谐振原理。

表 2 探针圆环天线各谐振频点带宽 (-25 dB 带宽)

Table 2 Bandwidth of each response frequency point of the probe circular antenna (-25 dB bandwidth)

中心频点 f_{mid} /GHz	频率下限 f_{min} /GHz	频率上限 f_{max} /GHz	绝对带宽 ABW /GHz	相对带宽 $FBW/\%$
18.172	18.131	18.203	0.072	0.396
19.732	19.664	19.790	0.126	0.639
21.057	20.990	21.109	0.119	0.565
22.492	22.424	22.555	0.131	0.582
23.923	23.851	23.990	0.139	0.581

2 截断式环形探针嵌套收发天线的设计与分析

2.1 截断式环形探针嵌套收发天线的设计与优化

环形探针天线可在较小体积内实现有效辐射,通常具备较高增益;但其固有的多谐振特性在对频率纯度要求较高的窄带场景中可能引发频谱泄露与杂散响应,从而降低系统稳定性。所设计的环形探针嵌套收发天线结构通过对环形辐射体进行截断,在缩小物理尺寸的同时抑制非目标谐振,并在中心区域内嵌圆形探针接收单元,实现收发一体化与紧凑布局。天线结构演变过程如图 4 所示。图 4(a) 为传统探针环形天线,图 4(b) 为单扇形天线单元,外半径为 R_1 , 内半径为 r_1 以及馈电点与天线中心的距离为 x_1 , 图 4(c) 为四元扇形天线,外半径为 R_2 , 内半径为 r_2 以及各扇形单元馈电点与中心的距离 x_2 , 图 4(d) 为在图 4(c) 基础上嵌入圆形探针接收单元形成嵌套结构,外半径为 R_3 , 内半径为 r_3 以及各扇形单元馈电点距离 x_3 , 中心圆极化接收天线的尺寸为 R_4 , 馈电点与中心距离为 x_4 。

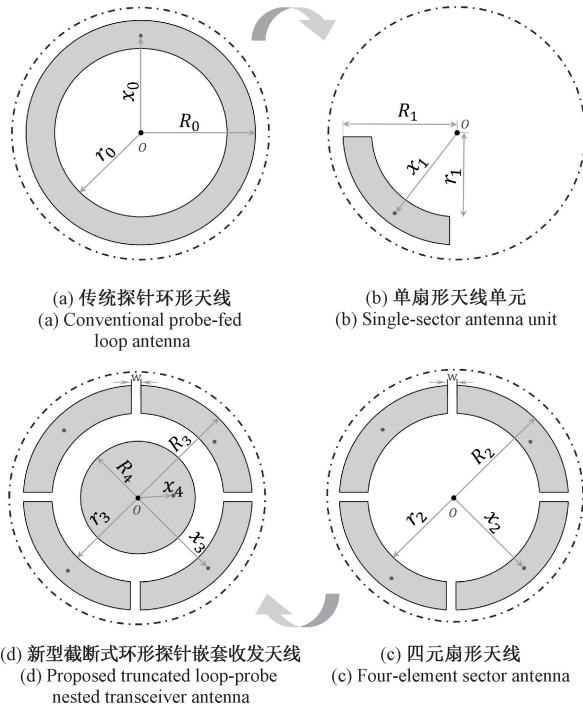


图 4 截断式环形探针嵌套收发天线演变过程

Fig. 4 Evolution of the truncated loop-probe nested transceiver antenna

与经典环形探针天线相比,所提截断结构在保留有效辐射特性的基础上降低多谐振带来的潜在干扰,并通过四元扇形天线形成稳定的辐射场,有效提高了发射信

号的圆极化纯度、扩展了其接收角度,并抑制了多径干扰,从而进一步提升了接收效率。

经典环形天线的多频谐振与闭合边界条件相关,其谐振频率为:

$$f_n = \frac{nc}{2\pi r_{\text{avg}} \sqrt{\epsilon_e}} \quad (6)$$

式中: c 表示光速; ϵ_e 表示有效介电常数。

四元扇形结构具有对称性,属于 C_{4e} 对称群,辐射模式满足该群的不可约表示,而对于高阶模式(如 $n = 2, 3$ 的环模式),由于其电磁场分布不满足对称性边界条件,在对称馈电下会被抑制。对于单个 $1/4$ 扇形单元,其有效电长度约为圆环的 $1/4$,基模谐振频率为:

$$f_1 = \frac{4c}{(2\pi r_{\text{avg}} + \Delta l) \sqrt{\epsilon_e}} \quad (7)$$

式中: Δl 表示馈电间隙引入的等效长度补偿。

高阶模式($n \geq 2$)存在相位矛盾,以 $n = 2$ 模式为例,环上电流需呈现正负分布,而对称馈电下各单元电流相位将产生抵消,导致该模态难以形成有效辐射,从而实现高阶谐波的抑制。假设 4 个扇形单元的电流分布为 $I_k(\theta)$ ($k = 1, 2, 3, 4$), 其相位关系为:

$$I_1(\theta) = I_2\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) = I_3(\theta + \pi) = I_4\left(\theta + \frac{3\pi}{2}\right) \quad (8)$$

对 n 阶模式,环上电流为 $e^{jn\theta}$, 则联合电流为:

$$I_{\text{total}} = \sum_{k=1}^4 e^{jn(\theta + (k-1)\frac{\pi}{2})} = \sum_{k=1}^4 e^{jn(k-1)\frac{\pi}{2}} \quad (9)$$

当且仅当 n 为 4 的整数倍时,式(9)的求和项非 0; 否则各项相位相消趋于 0, 因此:

$$I_{\text{total}} = \begin{cases} 4e^{jn\theta}, & n = 4m, m \in \mathbf{N}^* \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

由此可见,四元扇形结构可在对称馈电条件下选择性抑制部分高阶模态,减少杂散谐振,并在一定程度上兼顾方向性与紧凑化设计。

2.2 四元扇形探针天线的理论验证与仿真结果

为验证模式抑制方法的有效性,四元扇形截断发射辐射体由 4 个相同的单扇形天线单元组成,结构如图 4(b) 所示,经过 3 次旋转形成的对称群,中心对称排布,四元扇形探针天线的理论拓扑结构如图 4(c) 所示,采用 ANSYS HFSS 对四元扇形探针天线进行建模与仿真分析,三维仿真模型参数如表 3 所示,其结构如图 5 所示,主要由扇形辐射体、馈电探针、介质基底与金属接地板组成。

仿真结果如图 6 所示。结果表明,四元扇形探针天线最佳谐振频点出现在 24.03 GHz,与目标频点 24 GHz 的相对偏差仅为 0.125%,频率选择性优异,虽然四元扇形天线反射系数削减了 13.288%,依旧保持极佳的匹配性能。

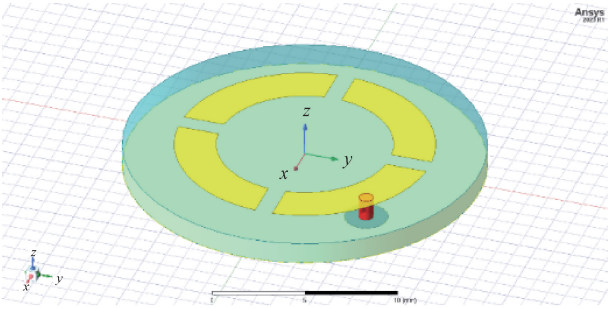


图 5 四元扇形探针天线仿真结构图

Fig. 5 Simulated structure of the four-element sectorial slot probe antenna

表 3 四元扇形探针天线尺寸仿真参数

Table 3 Simulated geometric parameters of the four-element sectorial slot probe antenna

参数	取值/mm	参数	取值/mm
R_1	3.5	r_1	4.88
R_2	8.32	x_1	5.14
x_2	1.68	w_1	1
G_2	8.8	h_1	1.2

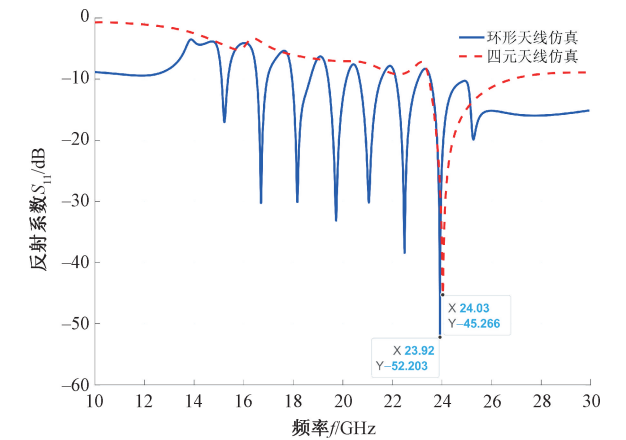


图 6 四元扇形探针天线 S_{11} 仿真优化结果对比

Fig. 6 Comparison of S_{11} simulation and optimization results of four-element sectorial slot probe antenna

2.3 新型截断式环形探针嵌套收发天线的仿真实验验证

在四元扇形发射单元的基础上,为实现收发一体化并提升结构紧凑性,在其中心嵌入圆形探针接收单元,形成截断式环形探针嵌套收发天线,如图 7 所示。

由于新增接收天线改变了原有电流分布并引入等效电抗变化,可能导致谐振频率偏移等问题。为保证收、发单元在目标频点附近稳定工作,对天线的关键几何尺寸参数进行优化,最优结构参数如表 4 所示。

进行 HFSS 全波仿真,结果如图 8 所示,优化后的嵌

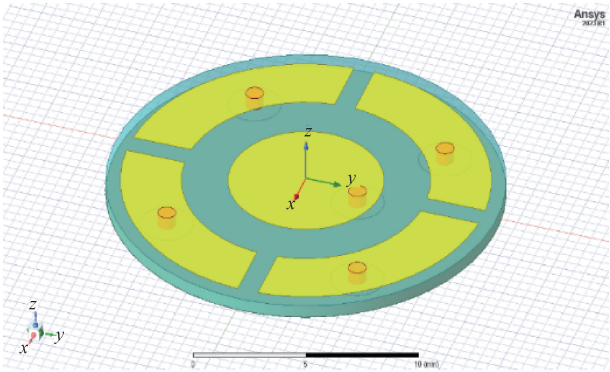


图 7 截断式环形探针嵌套收发天线仿真结构图

Fig. 7 Simulated structure of a truncated loop probe nested transceiver antenna

表 4 截断式环形探针嵌套收发天线尺寸仿真参数

Table 4 Simulated geometric parameters of the novel truncated loop-probe integrated nested transceiver antenna

参数	取值/mm	参数	取值/mm
R_4	4.32	r_2	4.86
R_3	8.28	x_2	5.22
x_3	2.44	w_2	0.96
G_3	9	h_2	0.508

注:目标工作频点保持 24 GHz 附近,后文不再重复说明

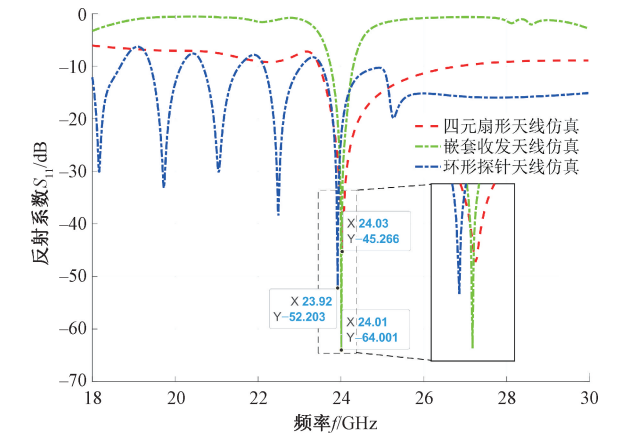


图 8 截断式环形探针嵌套收发天线迭代性能对比

Fig. 8 Iterative performance comparison plot for a novel truncated loop probe nested transceiver antennas

为验证截断式环形探针嵌套收发天线的辐射与收发工作特性,采用表 4 最优参数进行 HFSS 全波仿真。图 9(a)

为 3D 辐射方向图,结果表明,通过模式抑制以及四元扇形单元构建稳定辐射场后,辐射分布具有良好对称性,最大辐射增益达 11.028 dBi。为量化发射端圆极化性能,给出辐射单元轴比曲线如图 9(b) 所示,图 9(b) 表明在 23.95 GHz 处轴比最低为 1.555 dB,并在 23.74 ~ 24.23 GHz 范围内保持轴比小于 3 dB。

图 10 给出了嵌套收发天线的方向图对比。发射端具有较宽的波束覆盖 ($0^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 、 $240^{\circ} \sim 360^{\circ}$),接收端主瓣与发射端在目标角域内保持较高重合度 ($0^{\circ} \sim 32^{\circ}$ 、 $328^{\circ} \sim 360^{\circ}$),且方向图对称性良好,有助于增强目标方向信号接收并抑制非目标方向干扰。

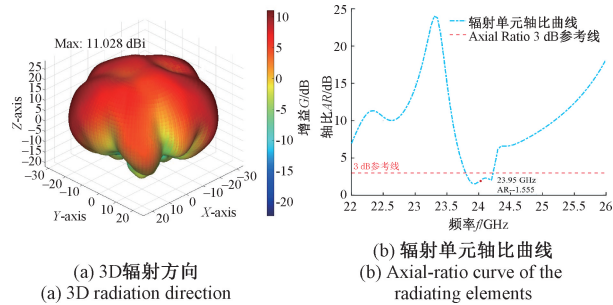


图 9 截断式环形探针嵌套天线仿真结果
Fig. 9 Simulation results of the proposed truncated loop-probe nested antenna

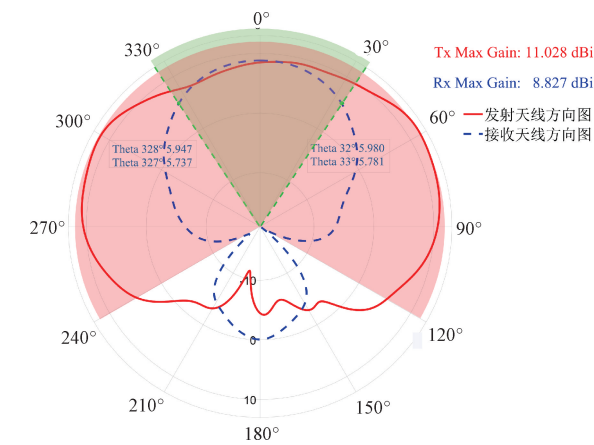


图 10 截断式环形探针嵌套天线发射及接收天线方向图
Fig. 10 Radiation pattern of transmitting and receiving antennas for a novel truncated circular probe nested antenna

2.4 截断式环形探针嵌套收发天线与同类型天线的尺寸以及性能对比

为清晰展示本文所提新型截断式环形探针嵌套收发天线在结构与性能方面的优势,选取高效电小环形天线^[22]、多环形天线^[23]、共面条形馈电多频带环形天线^[24]

作为对比对象,从结构尺寸与频率响应两方面进行对比分析。

1) 结构尺寸对比:在毫米级近距离测量系统中,天线尺寸直接影响近场耦合效应与测量精度。表 5 列出了图 11 所示 4 种天线的最大径向尺寸及对应理论面积。结果表明,本文设计的环形探针嵌套收发天线径向尺寸最小,理论面积为 81 mm²,相较于对比天线中面积最小者(234 mm²),面积进一步缩减约 65.385%。

表 5 同类型环形天线结构尺寸参数对照表		
Table 5 Comparison table of structural dimensions of homogeneous loop antennas		
天线名称	最大径向尺寸/mm	面积/mm ²
高效电小环形天线	L-270 W-151	40 770
多环形天线	L-46.216 W-45	2 079.72
共面条形馈电多频带环形天线	L-18 W-13	234
截断式环形探针嵌套收发天线	R-9	81

2) 频率响应对比:表 6 为 4 种天线的目标频点反射系数与相对带宽的对比结果。本文所设计的天线在 24.01 GHz 处反射系数达到 -64.001 dB,优于高效电小环形天线(-27 dB)和共面条形馈电多频带环形天线(-35 dB),略低于多环形天线(-73.440 dB),表明本文方案具备更深的阻抗匹配特征与更突出的窄带工作特性。

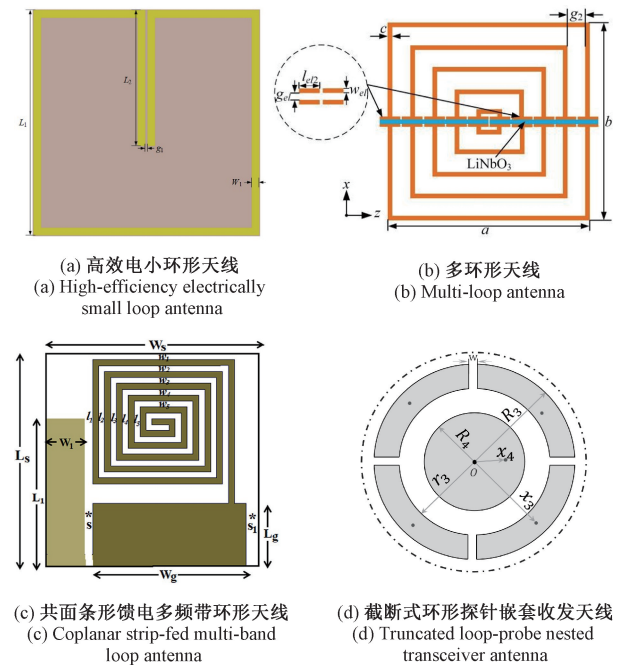


图 11 同类型环形天线结构示意图
Fig. 11 Schematic comparison of homogeneous loop antenna structures

表 6 同类型环形天线频率性能对照表

Table 6 Comparison of frequency performance of homogeneous loop antennas

天线名称	目标频点@ 反射系数	相对带宽
高效电小环形天线	50.03 MHz@ -27 dB	0.140%
多环形天线	500 MHz@ -73.44 dB	/
共面条形馈电多频带环形天线	11.7 GHz@ -17 dB ~ 17.4 GHz@ -35 dB	0.32% ~ 24.00%
截断式环形探针嵌套收发天线	24 GHz@ -64.001 dB	0.004%

3 尺寸参数对天线性能的影响

3.1 截断宽度 w 的影响

对截断宽度 w 进行参数扫描,结果如图 12 所示,当 w 取最优值时,发射端主谐振点位于 24.01 GHz,且反射系数最低可达-64.001 dB。接收端匹配结果如图 13 所示,在该参数下反射系数为-39.807 dB。同时, w 对高频匹配具有较高敏感性;在其他参数保持不变时, w 仅发生 0.08 mm 的变化即可导致发射端反射系数由-64.001 dB 增加至-23.471 dB,该结果表明截断宽度是影响发射端阻抗匹配与目标频点定位的关键参数。

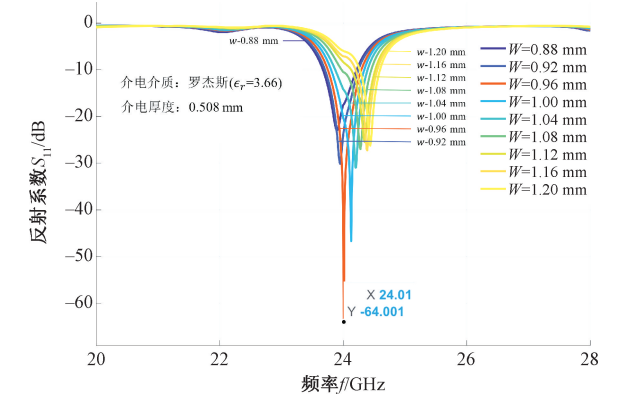


图 12 不同截断宽度 w 下天线 S_{11} 曲线

Fig. 12 S_{11} curves of the antenna for different truncation width parameters w

3.2 接地尺寸 G 的影响

对接地尺寸在 8.8~9.2 mm 范围内以 0.05 mm 步进扫描,结果如图 14、15 所示。随着接地尺寸 G 的增大,辐射单元的匹配特性逐步下降,在 $G = 9$ mm 时达到最佳匹配性能。

对接收端而言, $G = 8.90$ mm 时 S_{22} 最优,其对应频点与目标频率偏差约为 0.012 GHz。综合结果表明,接地尺寸对接收端谐振频点影响相对有限,但会对收发端匹配状态产生一定调制作用。

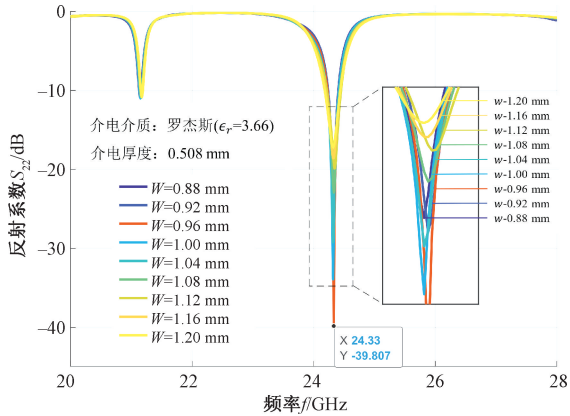


图 13 不同截断宽度 w 下天线 S_{22} 曲线

Fig. 13 S_{22} curves of the antenna for different truncation width parameters w

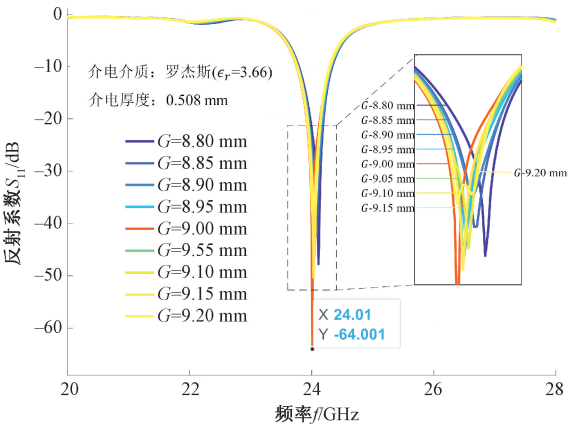


图 14 不同接地尺寸 G 下天线的 S_{11} 曲线

Fig. 14 S_{11} curves of the antenna with different ground size G

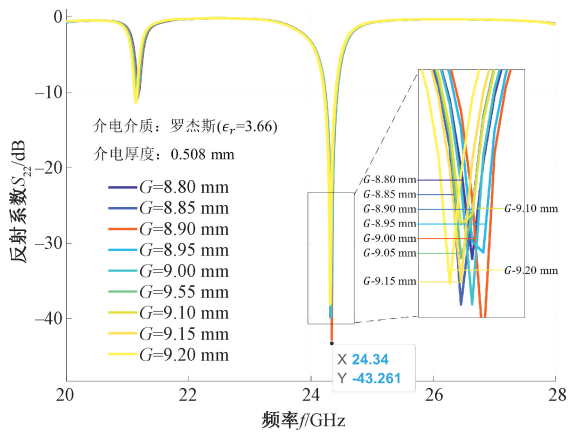


图 15 不同接地尺寸 G 下天线的 S_{22} 曲线

Fig. 15 S_{22} curves of the antenna with different ground size G

3.3 扇形平均环宽 r_{avg} 的影响

四元扇形辐射单元的平均环宽为 $r_{\text{avg}} = (R_2 - r_2)/2$, 为评估其影响, 设置 r_{avg} 在 $1.94 \sim 2.04$ mm 范围内按 0.02 mm 步进进行扫描, 仿真结果如图 16 所示。图 16 表明, 辐射单元的主谐振频点位于 24 GHz 附近 ($23.98 \sim 24.09$ GHz) 频点偏移范围约 0.12 GHz, 说明该对称辐射结构在目标频段具有较稳定的谐振特性。

然而, 环宽变化会改变辐射单元与中心接收天线之间的等效耦合距离, 导致接收端匹配频点出现明显漂移, 如图 17 所示。在扫描范围内, 接收端反射系数最小点由 23.85 GHz 变化至 24.88 GHz, 最大偏移约 1.03 GHz, 表明该参数对接收端匹配具有显著影响。不同 r_{avg} 下的方向图对比如图 18 所示, 峰值增益为 11.028 dBi。

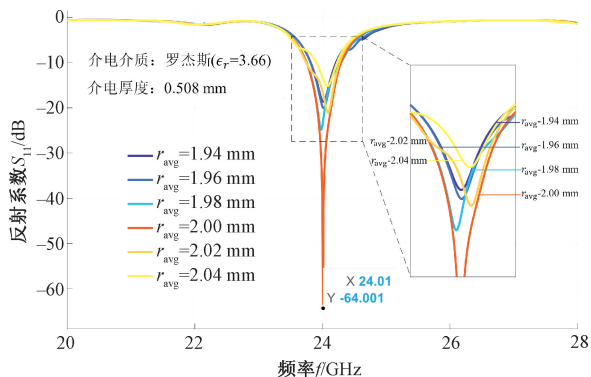


图 16 不同环形宽度 r_{avg} 下辐射单元 S_{11} 曲线

Fig. 16 Radiation cell S_{11} profiles for different loop widths r_{avg}

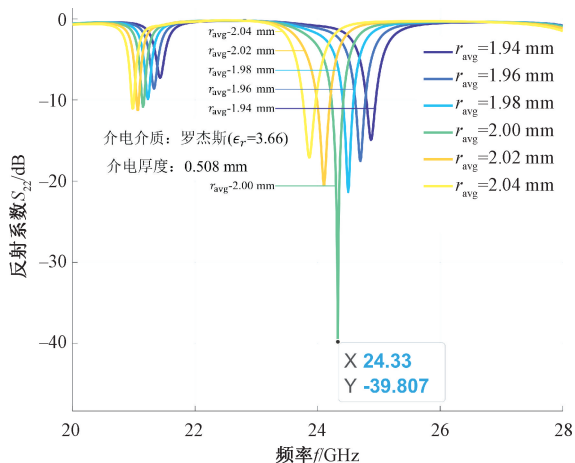


图 17 不同环形宽度 r_{avg} 下辐射单元 S_{22} 曲线

Fig. 17 Radiation cell S_{22} profiles at different loop widths r_{avg}

3.4 圆形天线半径 R_4 的影响

对圆形天线半径 R_4 在 $4.00 \sim 4.40$ mm 范围内以 0.04 mm 步进进行扫描, 具体仿真结果如图 19 示。

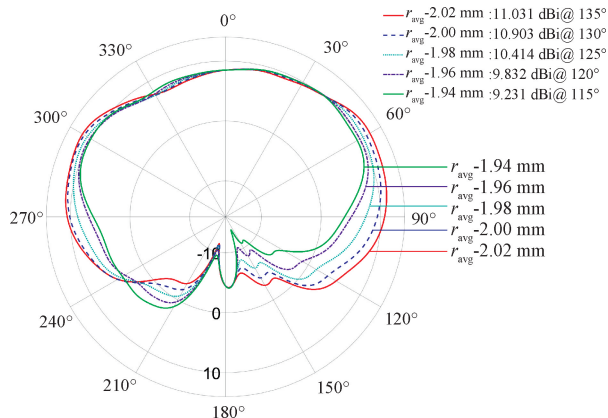


图 18 不同环形宽度 r_{avg} 下辐射单元方向对比

Fig. 18 Comparison of radiation cell direction maps for different loop widths r_{avg}

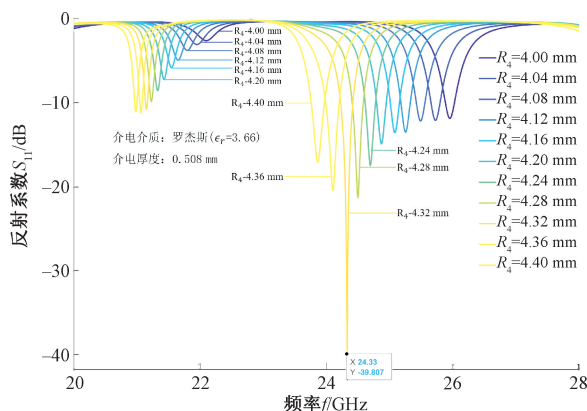


图 19 不同半径 R_4 下圆形天线 S_{11} 曲线

Fig. 19 S_{11} curve of circular loop antenna under different radius R_4

仿真结果表明, 圆形探针天线半径 R_4 是决定其性能的关键参数, 其变化会引起明显的频点漂移, 最大偏移量超过 2.09 GHz。

4 实物制作与测试

4.1 截断式环形探针嵌套天线实物制作

为验证所设计的新型截断式环形探针嵌套天线的实际性能效果, 依据表 4 最优仿真参数进行天线加工制作, 基板选用罗杰斯 RO 4350B (DK) 高频覆铜板, 该材料在 24 GHz 附近具有较低损耗, 标称介电常数设计值为 3.66 ± 0.05 , 天线实物如图 20 所示。

4.2 截断式环形探针嵌套天线实物性能测试

使用 Keysight N5247B PNA-X 矢量网络分析仪对样板进行测试, 并与 HFSS 仿真结果进行对比, 结果如图 21



图 20 截断式环形探针天线实物图

Fig. 20 Physical diagram of truncated loop probe antenna

所示。实物天线测试结果与仿真结果基本吻合,最佳工作频点位于 ISM 频段附近 (24 ~ 24.14 GHz)。在 24.14 GHz 处,发射端反射系数为-42.807 dB,以该频点为中心,绝对带宽为 0.027 GHz,相对带宽为 0.116%,接收端反射系数为-49.594 dB,绝对带宽为 0.164 GHz,相对带宽为 0.681%,两端相对带宽均小于 1%,满足窄带测量系统对频率选择性的要求,验证了所设计嵌套天线结构的可行性。

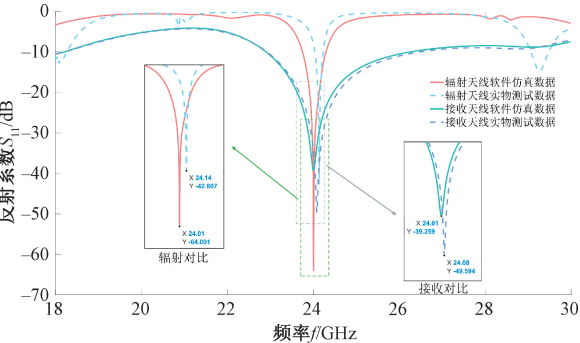


图 21 截断式环形探针天线实际测试结果对比

Fig. 21 Comparison of actual test results of truncated loop probe antennas

4.3 截断式环形探针嵌套天线结果偏差分析

实物天线加工与测试后,实测结果相较仿真出现一定偏差,主要表现为关键尺寸存在微小偏离以及中心频率产生约 0.13 GHz 的偏移。该类偏差通常与制造装配公差、材料参数偏差及仿真模型理想化等因素相关。加工与装配误差、介质材料参数偏差、仿真模型理想化与测试因素均可能影响实测-仿真差异来源,鉴于第 3 个因素难以在本文条件下进行精确建模与量化分离,本文重点对前两项相对可控且影响显著的因素开展敏感性仿真分析。

1) 加工与装配误差敏感性分析:以中间介质层半径为关键尺寸,对其进行微调扫描 (8.95 ~ 9.05 mm,步长 0.01 mm) 以获得频移随尺寸变化的趋势与灵敏度,仿真结果如图 22 所示。结果表明,该尺寸在上述范围内变化

将引起中心频率约±0.15 GHz 的偏移并伴随增益波动,说明该毫米波天线对加工精度较为敏感。结合样品实测中心频率偏移约 0.13 GHz,可认为其与加工装配公差导致的频移趋势一致,且处于该敏感性分析所覆盖的变化范围内。

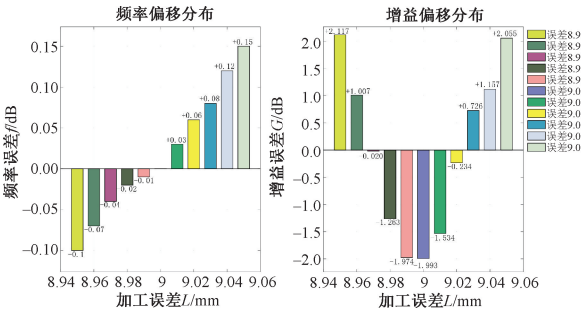


图 22 基于加工与装配误差的频点和增益偏移分析

Fig. 22 Frequency and gain deviation analysis based on machining and assembly errors

2) 介质材料参数偏差敏感性分析:为模拟材料介电常数公差对性能的影响,仅改变中间介质层的介电常数并保持其余参数不变,对其进行扫描 (3.61 ~ 3.71,步长 0.01),结果如图 23 所示。仿真表明,介电常数的微小变化同样会引起中心频点与增益的系统性漂移,说明材料参数偏差亦是造成实测与仿真差异的重要来源之一。

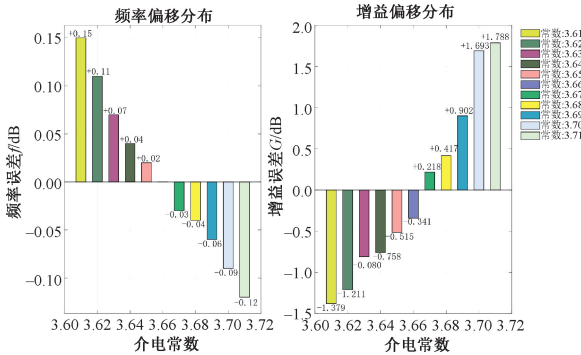


图 23 基于介质材料参数偏差的频点和增益偏移分析

Fig. 23 Frequency and gain deviation analysis based on dielectric material parameter variations

5 结 论

针对环形探针天线在小型化条件下面临的尺寸与性能平衡及固有多谐振问题,提出一种由扇形结构演化的截断式环形探针嵌套收发天线。利用四元对称结构的模式抑制机制抑制非目标谐振,并通过辐射-接收嵌套布局实现集成,从而在满足窄带工作需求的同时改善天线的方向性与匹配性能。仿真结果与理论分析表明,与同类典型环形天线相比,所提结构面积缩减约 65.384%,绝对

带宽为 0.139 GHz,反射系数为-64.001 dB,中心频点增益达 11.028 dBi。实物天线测试结果显示其最佳频点在 24.14 GHz 处,反射系数为-42.807 dB,绝对带宽为 0.027 GHz,尺寸半径为 8.995 mm,满足近距离小型天线设计需求。研究结果为近距离高精度雷达系统提供了有效解决方案。

参考文献

- [1] OCH A, HÖLZL P A, SCHUSTER S, et al. High-resolution millimeter-wave tomography system for nondestructive testing of low-permittivity materials[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, 69(1): 1105-1113.
- [2] ANTOLINOS E, GRAJAL J. Comprehensive comparison of continuous-wave and linear-frequency-modulated continuous-wave radars for short-range vital sign monitoring[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2023, 17(2): 229-245.
- [3] SONG D, MA T, LI Y, et al. Data and decision level fusion-based crack detection for compressor blade using acoustic and vibration signal[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(12): 12209-12218.
- [4] CHEN S, ZHOU T, FAN W, et al. A novel microwave-based dynamic measurement method for blade tip clearance through nonlinear I/Q imbalance correction[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2025, 224: 112138.
- [5] NIU G, LI S, FU X, et al. A novel resonator cavity microwave sensor for high-temperature blade tip clearance measurement[J]. *Measurement*, 2024, 234: 114798.
- [6] MA H, WANG X, ZHANG X, et al. Research on tip clearance measurement technology of aero-engine blade based on optical fiber sensing system[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2428(1): 012032.
- [7] 易亮,薛志飞,郑芳芳,等.航空发动机碳纤维复合材料风扇叶片叶尖间隙测量研究[J].*传感技术学报*, 2023,36(5)673-679.
YI L, XUE ZH F, ZHENG F F, et al. Research on tip clearance measurement of carbon fiber composite fan blades for aero-engines[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2023, 36(5): 673-679.
- [8] ZHAO L, LIU F, LYU Y, et al. Numerical investigation on the influence of turbine rotor parameters on the eddy current sensor for the dynamic blade tip clearance measurement[J]. *Sensors*, 2024, 24(18): 5938.
- [9] 段发阶,牛广越,周琦.航空发动机叶尖间隙在线测量技术研究综述[J].*航空学报*, 2022, 43(9): 82-108.
- DUAN F J, NIU G Y, ZHOU Q. Review of on-line measurement technology for aero-engine tip clearance[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(9): 82-108.
- [10] FENG K, XIAO Y, LI Z, et al. Gas turbine blade fracturing fault diagnosis based on broadband casing vibration[J]. *Measurement*, 2023, 214: 112718.
- [11] 秦瑶,吴艳丽,刘潇.基于电流探头的标准场法环天线校准及不确定度分析[J].*仪器仪表学报*,2020,41(9) 37-44.
QIN Y, WU Y L, LIU X. Calibration and uncertainty analysis of loop antenna based on standard field method with current probe[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(9): 37-44.
- [12] 黄云志,王蕾,韩亮.微带天线设计及在局部放电检测中的应用[J].*电子测量与仪器学报*,2024,38(8) 95-102.
HUANG Y ZH, WANG L, HAN L. Design of microstrip antenna and its application in partial discharge detection[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(8): 95-102.
- [13] 张辉,陈宝权,汪业龙,等.毫米波动态调谐反射面天线研究[J].*电子测量技术*,2025,48(7)1-8.
ZHANG H, CHEN B Q, WANG Y L, et al. Research on millimeter wave dynamically tuned reflector antenna[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2025, 48(7): 1-8.
- [14] 霍兰兰,马照瑞.基于后向散射调制指数选择的 RFID 系统工作范围提高[J].*国外电子测量技术*,2022, 41(7):166-172.
HUO L L, MA ZH R. Improving the working range of RFID system based on backscatter modulation index selection[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2022, 41(7): 166-172.
- [15] 李江伟,李相强,张健穹,等.基于开口谐振环的三层高效电小天线设计[J].*电子测量技术*,2023,46(19): 8-13.
LI J W, LI X Q, ZHANG J Q, et al. Design of three-layer high-efficiency electrically small antenna based on split-ring resonator[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(19): 8-13.
- [16] 朱熙铨,陶正壮,肖凌峰.一种宽带圆极化环形天线[J].*电子元件与材料*,2022,41(11):1215-1221.
ZHU X CH, TAO ZH ZH, XIAO L F. A broadband circularly polarized annular antenna[J]. *Electronic Components and Materials*, 2022, 41(11): 1215-1221.
- [17] SAGAR N T, MEENA M L, SHUKLA P. Design and performance analysis of UWB circular ring antenna with defected ground structure[J]. *ICTACT International*

Journal on Communication Technology, 2017, 8(4): 1656-1663.

- [18] ASLINEZHAD M, HEJAZI M A. Turbine blade tip clearance determination using microwave measurement and k-nearest neighbour classifier [J]. Measurement, 2020, 151: 107142.
- [19] CAO Y. Near-field probing array for enhancing 5G Mm-wave beamforming transmitter performance [D]. Waterloo: University of Waterloo, 2021.
- [20] MA Z, ZHENG Y, GAO M, et al. Assessing the size effect on microwave fracturing of diorite using a dielectric-loaded converging waveguide antenna [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(8): 5677-5691.
- [21] 刘文进, 潘佳欣, 南敬昌, 等. 基于复合去耦结构的小型化 UWB-MIMO 天线设计[J/OL]. 中国舰船研究, 1-8[2025-12-21]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04479>.
- LIU W J, PAN J X, NAN J CH, et al. Design of a miniaturized UWB-MIMO antenna based on a composite decoupling structure [J/OL]. Chinese Journal of Ship Research, 1-8[2025-12-21]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04479>.
- [22] 李江伟. 用于机载平台通信的水平全向环形天线研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- LI J W. Research on horizontally omnidirectional loop antenna for airborne platform communication [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023.
- [23] 陈志炎. 环形天线加载铌酸锂晶体磁场传感器研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2024.
- CHEN ZH Y. Research on magnetic field sensor of loop antenna loaded with lithium niobate crystal [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2024.
- [24] DANIEL S R. Asymmetric coplanar strip-fed multiband loop antenna with FSS cover for gain improvement [J].

Optik, 2025, 323: 172230.

作者简介



蒋旭中, 2023 年于浙江传媒学院获得电子科学与技术学士学位。现在江苏大学机械工程学院攻读硕士学位, 主要研究方向为 RF 射频电路、高速信号电路。

E-mail: jxz1206942134@163.com

Jiang Xuzhong received the B. Sc. degree in Electronic Science and Technology from Zhejiang University of Media and Communications in 2023. He is currently pursuing the M. Sc. degree at the School of Mechanical Engineering, Jiangsu University. His research interests include RF circuits and high-speed signal circuits.



冷开茂, 2024 年于江苏大学获得测控技术与仪器学士学位, 现在江苏大学机械工程学院攻读仪器仪表工程硕士学位, 主要研究方向为信号处理、RF 射频电路。

E-mail: 2111312742@qq.com

Leng Kaimao received the B. Sc. degree in Measurement, Control Technology and Instruments from Jiangsu University in 2024. He is currently pursuing a M. Sc. degree in Instrumentation Engineering at the School of Mechanical Engineering of Jiangsu University, with a main research focus on signal processing and RF circuits.



樊薇(通信作者), 2012 年和 2015 年于苏州大学分别获学士和硕士学位, 2018 年于香港城市大学获博士学位。现为江苏大学机械工程学院教授, 主要研究方向为信号处理和机械故障诊断。

E-mail: weifan@ujs.edu.cn

Fan Wei (Corresponding author) received her B. Sc. and the M. Sc. degree from Soochow University in 2012 and 2015, respectively, and the Ph. D. degree from City University of Hong Kong in 2018. She is currently a professor with the School of Mechanical Engineering, Jiangsu University. Her research interests include signal processing and machinery fault diagnosis.