

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2212512

## 基于开口谐振环的三层高效电小天线设计\*

李江伟 李相强 张健穹 王庆峰

(西南交通大学物理科学与技术学院 成都 610031)

**摘要:** 为提高电小天线的辐射效率,提出一款基于开口谐振环结构的3层小型化环形天线。天线的3层结构分为中间的馈电层和两侧的耦合层,采用电磁耦合方法实现激励。在馈电层设计了一种倒“山”形匹配网络,弥补了传统耦合馈电SRR天线存在部分反向电流的缺陷;通过加载耦合环结构实现强磁耦合,降低天线的金属损耗;在耦合层与馈电层间设计支柱固定的空气间隙,有效地降低介质损耗,从而提高辐射效率。采用电磁仿真软件对天线进行设计,并分析了介质基板对天线性能的影响。对设计的天线进行了实物研制与测试。结果表明,实测结果与仿真结果基本吻合,天线的中心频率为50.03 MHz,电尺寸为 $0.045\lambda_0 \times 0.045\lambda_0 \times 0.01\lambda_0$  ( $\lambda_0$ 为工作波长),其在水平面内具有良好的全向性,辐射效率大于41%。

**关键词:** 电小天线;开口谐振环;高辐射效率;全向天线

**中图分类号:** TN823<sup>+</sup>.15 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

## Design of three-layer high-efficiency electrically small antenna based on split resonance ring

Li Jiangwei Li Xiangqiang Zhang Jianqiong Wang Qingfeng

(Faculty of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In order to improve the radiation efficiency of the electrically small antenna, a three-layer miniaturized loop antenna based on split resonance ring structure is proposed. The antenna consists of a feeding layer and two coupling layers and is excited by electromagnetic coupling. An E-shaped matching network is designed in the feeding layer to reduce the reverse current, which is the shortcoming of traditional coupling feeder SRR antenna. The coupling ring structure is used to realize strong magnetic coupling and reduce the metal loss. A fixed air gap between the coupling layer and the feeding layer is introduced to effectively reduce the dielectric loss and improve the radiation efficiency. The influence of dielectric substrate on the antenna performances is analyzed by electromagnetic simulation. The proposed antenna is fabricated and measured. The experiment shows that the measured results are basically consistent with the simulated results. The center frequency of the antenna is 50.03 MHz, and the electrical size is  $0.045\lambda_0 \times 0.045\lambda_0 \times 0.01\lambda_0$  ( $\lambda_0$  is the working wavelength). The antenna has good omnidirectional performance in the horizontal plane, and the radiation efficiency is more than 41%.

**Keywords:** electrically small antenna; split resonance ring; high radiation efficiency; omni-directional antenna

## 0 引言

超短波的传播及绕射能力强,在复杂地形环境以及远距离通信中发挥着重要作用。但超短波的波长可达数米,导致通常情况下其天线的物理尺寸庞大,需要进行小型化设计,特别在背负式通信和无人机通信等应用场景中,天线的尺寸受到了严格的限制,要求设计为电小天线。电小天线的尺寸受到了严格的限制,要求设计为电小天线。电小天线因其体积小、易于集成等优势具有重要的工程应用价值,

是无线电通信系统小型化的关键环节,受到大量学者的关注,一直是天线领域的研究热点。

通常将电尺寸小于 $\lambda/2\pi$  ( $\approx 0.16\lambda$ )的天线称为电小天线<sup>[1]</sup>,其中 $\lambda$ 为天线工作频率的波长。目前,超短波电小天线的研究多数为单极子类天线<sup>[2]</sup>,表现为垂直极化全向辐射,但具有较高的剖面,无法满足低剖面平台应用场景的需求<sup>[3]</sup>。环形天线具有水平极化全向辐射特性,且剖面较低,为超短波小型化水平全向天线提供了一种有效的途径<sup>[4]</sup>,

收稿日期:2022-12-29

\* 基金项目:四川省科技厅重点研发项目(2022YFG0248)、中央高校基本科研业务费项目(2682021GF016)资助

但目前缺少电尺寸小于  $\lambda/20$  的环形天线研究。天线的小尺寸造成其辐射电阻通常比损耗电阻小,辐射效率较低,在限制尺寸条件下的电小天线的增益无法满足应用需要,导致超短波通信出现信号质量差或信号中断等情况<sup>[5-6]</sup>。因此,在保证天线电尺寸满足应用场景空间要求的前提下,如何提高其辐射效率成为电小天线设计中急需解决的难题。

电小天线的辐射方向图非常接近球面  $TE_{01}$  或  $TM_{01}$  模的辐射方向图,因此,它们的方向性系数约为  $1.5^{[7]}$ 。为了提高电小天线的性能,对天线结构进行了大量的研究与设计。李荣政等<sup>[8]</sup>介绍一种高效率堆叠贴片天线,通过引入空气腔结构提高辐射效率,但其剖面高度为  $0.13\lambda$ ,不利于天线的小型化。Jadid 等<sup>[9]</sup>设计了加载变容二极管寄生元件的小环天线,辐射效率达  $34\%$ ,但加载集总元件会增加额外的损耗,且存在工艺困难。研究表明,采用磁性超材料开口谐振环(split resonance ring, SRR)结构<sup>[10-14]</sup>,可以提高天线的整体性能。其中,Zuffanelli 等<sup>[10]</sup>提出一种边缘耦合 SRR 电小天线,天线的电尺寸为  $0.09\lambda$ ,辐射效率可达  $65\%$ 。Peng 等<sup>[11]</sup>通过多层电磁耦合设计了一种六层 SRR 高效电小天线,天线的电尺寸为  $0.05\lambda$ ,辐射效率达  $41\%$ ,并验证通过多层堆叠强磁耦合提高辐射效率的方法达到极限。Sarrazin 等<sup>[12]</sup>提出一种降低损耗电阻提高电小天线效率的方法,并设计了天线原型,其电尺寸为  $0.07\lambda$ ,辐射效率达  $53\%$ ,验证通过改变线条宽度提高辐射效率的方法达到极限。这些研究中,提高无源电小天线辐射效率的方法已经达到极限,难以在保持高辐射效率情况下进一步小型化。

为满足天线小型化和高辐射效率的需求,本文提出一款基于 SRR 结构的 3 层高效电小环形天线,设计了一种倒“山”形匹配网络,减少了天线的反向电流分布。采用电磁耦合激励将 3 层结构分为馈电层和耦合层,它们采用相同的 SRR 结构,实现了强磁耦合,从而降低天线的金属损耗;在馈电层与耦合层间引入介质支柱固定的空气间隙结构,调节间隙距离可以降低介质损耗,从而增强辐射,有效地提高辐射效率。最终设计了中心频率为  $50\text{ MHz}$  的电小天线模型,其整体尺寸为  $270\text{ mm}\times 270\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ ,具有良好的水平全向辐射特性。

## 1 天线工作原理与设计

电磁耦合 SRR 天线由一种负磁导率超材料开口谐振环结构发展而来,并在开口处延伸了平行枝节。电小环天线具有较大的电感  $L$ ,负磁导率结构具有等效电容  $C$ ,整个天线系统构成  $LC$  振荡器,与谐振频率  $f_0$  有如下关系:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

通过调节枝节的长度  $L_2$  和缝隙间距  $g$ ,改变等效电容  $C$ ,可以降低谐振频点,实现 SRR 天线的小型化。

本设计为提高电小天线的辐射效率,提出并进行了如下 3 个方面的改进:

1) 提出并设计了倒“山”形匹配网络。受倒 F 天线的启发,在 SRR 结构中设计一种倒“山”形匹配网络实现阻抗匹配,弥补了耦合馈电结构存在部分反向电流的缺陷。

2) 采用了加载耦合 SRR 结构。通过加载多层堆叠耦合 SRR 结构,可以实现强磁耦合,降低天线整体的金属损耗,但多层介质基板增加了介质损耗。

3) 采用了加载介质支柱固定的空气间隙。通过空气间隙的引入,基板的有效介质损耗降低,减少了采用多层 SRR 结构带来的额外介质损耗,从而提高辐射效率。

最终设计的 3 层 SRR 电小环形天线结构如图 1 所示,主要组成结构包括:介质基板、馈电环、耦合环、空气间隙、介质支柱和固定螺栓。

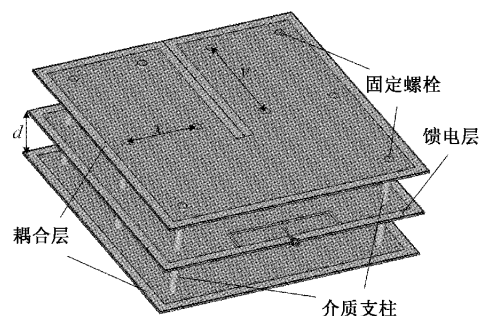


图 1 3 层 SRR 电小环形天线结构示意图

### 1.1 倒“山”形匹配网络

传统电磁耦合的 SRR 天线由馈电小环耦合激励,但馈电环与耦合环之间存在反向电流分布,部分辐射场相互抵消,会明显降低 SRR 天线的辐射效率。倒 F 天线可以等效为一种一端开路,另一端短路的振荡器,通过调整馈电点的位置和天线的尺寸,可以在工作频段获得理想的匹配特性<sup>[15]</sup>。因此,本文受倒 F 天线的启发,在 SRR 结构中设计一种倒“山”形匹配网络实现阻抗匹配,弥补耦合馈电结构存在部分反向电流的缺陷,馈电层天线结构如图 2 所示。介质基板选用  $2\text{ mm}$  的聚四氟乙烯材料(PTFE),其相对介电常数为  $2.2$ ,损耗角正切为  $0.0009$ 。

倒“山”形匹配网络由短路枝节、开路枝节、馈电线和 SMA 连接器构成。在 SRR 的中心处开槽,用于连接匹配网络,SMA 的外导体与环路开槽处两端相连,内导体与馈电线相连。通过恰当地调节匹配网络结构参数,可以使天线具有良好的匹配特性。基于该匹配网络首先设计了中心谐振频率为  $50\text{ MHz}$  的单层 SRR 电小天线,其最大电尺寸为  $0.045\lambda_0$ , $\lambda_0$  为工作波长。通过电磁仿真模拟,单层 SRR 天线的辐射效率为  $24\%$ 。

### 1.2 加载耦合 SRR 结构

为提高电小天线的辐射效率,本设计在上述馈电层天线的上下层分别加载耦合 SRR 结构,使其印刷在 PTFE 介质基板上,与馈电层结构紧密堆叠形成 3 层 SRR 电小环形

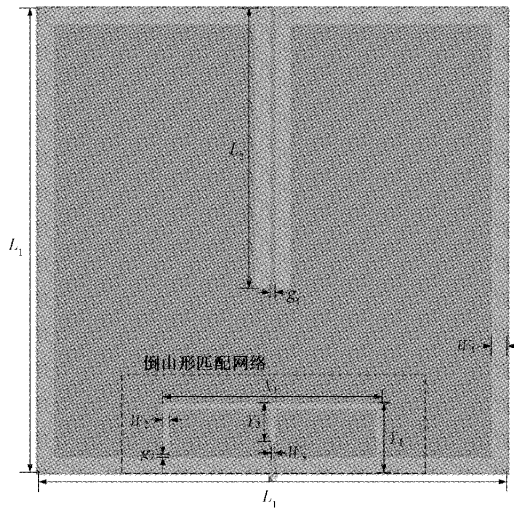


图 2 馈电层结构示意图

天线。为了实现强磁耦合，耦合层与馈电层采用相同的 SRR 结构，如图 3 所示。它们的 SRR 具有相似的电流分布，这有助于降低金属损耗<sup>[17]</sup>，天线的表面电流如图 4 所示，系统整体电流保持同向分布。根据电小环天线的工作原理，同向的电流分布使天线具有全向辐射特性。

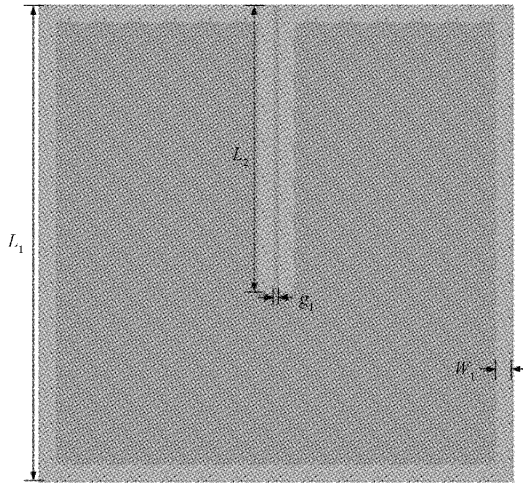


图 3 耦合层结构示意图

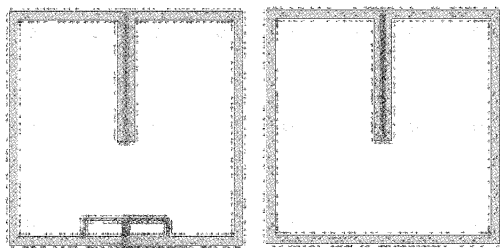


图 4 天线的表面分布电流

此外，加载耦合 SRR 结构引入了多层介质基板，增加了天线整体的介质损耗。通过电磁仿真分析了加载多层耦

合结构前后的天线能量分布，如表 1 所示。仿真结果表明，加载双层耦合 SRR 结构后，金属损耗的减少量大于介质损耗的增加量，即可以增强辐射，因此，紧密堆叠的 3 层 SRR 电小天线辐射效率提升至 30%。

表 1 加载耦合 SRR 的能量分布 %

耦合 SRR 数目	介质损耗	金属损耗	辐射功率
未加载	22.35	53.11	24.54
单层加载	34.66	36.97	28.37
双层加载	36.63	32.81	30.56

### 1.3 加载介质支柱固定的空气间隙

为降低天线整体的介质损耗，进一步提高辐射效率。本设计在馈电层与耦合层之间加载介质支柱固定的空气间隙结构，如图 5 所示。介质支柱选用 PTFE 材料，采用螺栓将其固定，使天线结构具有良好的稳定性。

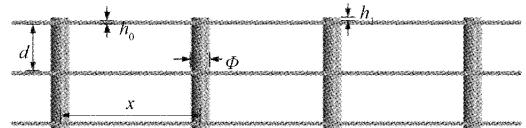
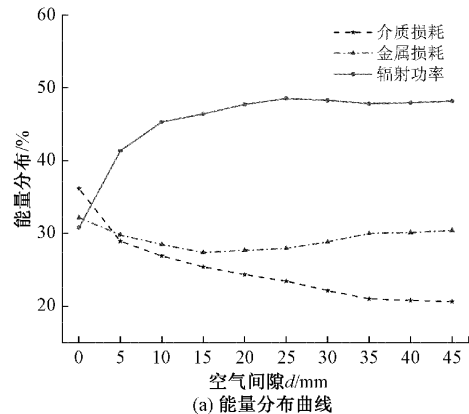


图 5 3 层 SRR 天线侧视图

仿真研究表明，通过改变空气间隙  $d$ ，可以明显地降低介质损耗，从而增强辐射。同时，空气间隙的增加会使谐振频率点向高频移动，本设计只需改变 SRR 的平行枝节参数  $L_2$  以及微调匹配网络参数  $X_1$  和  $Y_1$ ，即可使该天线在 50 MHz 产生良好的谐振特性。

本节分别模拟了不同空气间隙  $d$  的天线模型，通过仿真分析得到加载不同空气间隙结构 3 层 SRR 天线的介质损耗、金属损耗和辐射功率的能量分布关系，如图 6 (a) 所示。结果表明，加载空气间隙结构可有效地提高天线的增益和辐射效率，如图 6 (b) 所示，随间隙距离的增加，其辐射效率与增益达到极限。最终，为实现天线的最优性能，空气间隙距离  $d$  取 25 mm，辐射效率提升至 46%。天线整体的输入阻抗特性如图 7 所示，在谐振点与 50  $\Omega$  同轴线实现良好匹配，其主要结构参数如表 2 所示。



(a) 能量分布曲线



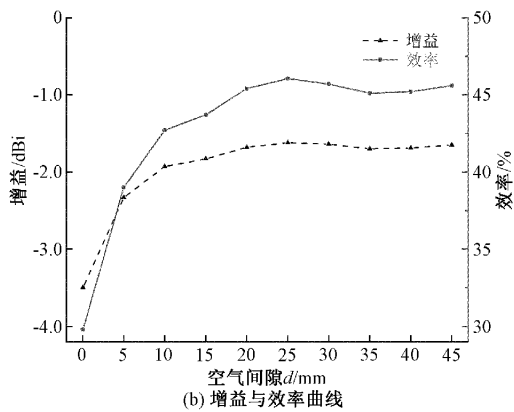


图 6 加载空气间隙对天线性能的影响

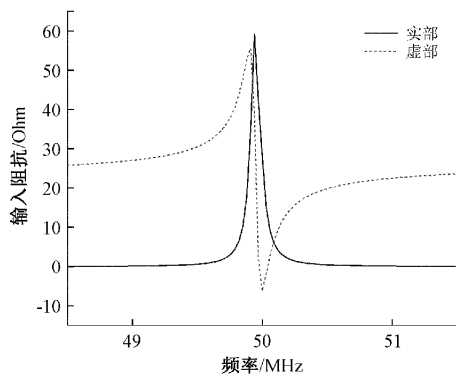


图 7 天线整体的输入阻抗特性

表 2 三层 SRR 电小天线结构参数 mm

参数	数值	参数	数值	参数	数值
$L_1$	270	$g_1$	0.5	$X_1$	96
$L_2$	151	$g_2$	1	$Y_1$	31
$W_1$	10	$x$	75	$Y_2$	16
$W_2$	3	$y$	110	$h_0$	2
$W_3$	1.5	$\Phi$	10	$h_1$	2

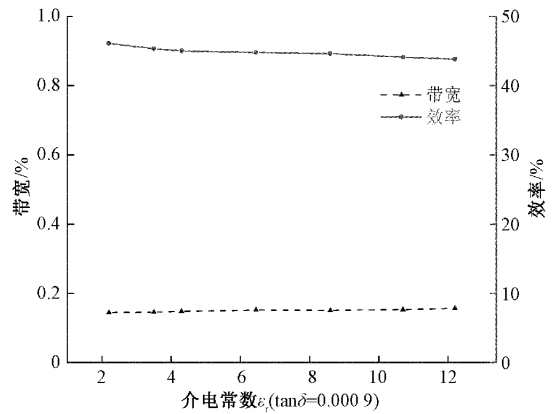
## 2 天线仿真与实验测试

### 2.1 基板材料对 SRR 天线性能的影响

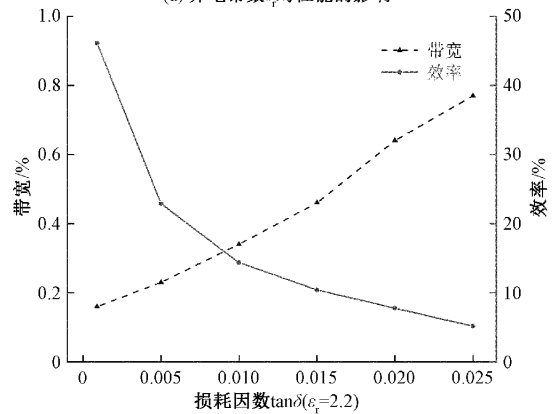
基板材料的参数主要表征为相对介电常数  $\epsilon_r$  和介质损耗因数  $\tan\delta$ , 在保持天线整体尺寸与谐振频率不变的前提下, 分别研究了  $\epsilon_r$  和  $\tan\delta$  对 SRR 电小天线的带宽和辐射效率的影响。

仿真结果表明, 高介电常数  $\epsilon_r$  基板使天线的谐振频率向低频移动, 有利于实现小型化, 本设计通过调节 SRR 平行枝节  $L_2$  使其均在 50 MHz 产生谐振。由于天线的基板厚度相对于馈电层与耦合层之间的空气间隙小得多, 因此整个天线辐射体的等效介电常数变化不大, 其带宽和辐射效率基本保持不变, 即  $\epsilon_r$  对 3 层 SRR 天线的整体性能影响是有限的, 如图 8(a) 所示。但基板的损耗因数  $\tan\delta$  增加,

导致介质损耗增加, 天线的 Q 值降低, 相应地带宽增加, 辐射效率降低, 即  $\tan\delta$  对电小天线的辐射效率具有较大的影响, 如图 8(b) 所示。因此, 为了实现高辐射效率的电小天线, 本文选用了低损耗因数的 F4BM220 介质基板进行天线的加工制作。



(a) 介电常数  $\epsilon_r$  对性能的影响



(b) 损耗因数  $\tan\delta$  对性能的影响

图 8 介质基板对天线性能的影响

此外, 还选用 RO4003C 介质基板(相对介电常数  $\epsilon_r$  为 3.55, 损耗因数  $\tan\delta$  为 0.0027)与上述采用 F4BM 基板实现的 3 层 SRR 电小天线进行性能比对。由于基板介质损耗增加, 天线的相对带宽为 0.21%, 3 层 SRR 紧密堆叠时辐射效率仅为 14%, 通过加载介质支柱固定的空气间隙结构, 并保持相同间隙距离, 辐射效率提升至 29%。进一步证明, 通过加载空气间隙结构, 有效地降低介质损耗, 从而提高了辐射效率。

### 2.2 实验测试

图 9 为本文采用 F4BM220 介质基板设计的 3 层高效电小环形天线实物加工图。采用 Agilent 公司的矢量网络分析仪 E5061B 对该天线进行测量, 仿真及测试的  $S_{11}$  曲线如图 10 所示。

结果表明, 测试曲线的中心频点为 50.03 MHz, 向高频略微偏移, 应该由于加工与焊接造成的误差, 天线的相对带宽为 0.14% ( $S_{11} < -10$  dB), 实测匹配特性与仿真曲线基本吻合。

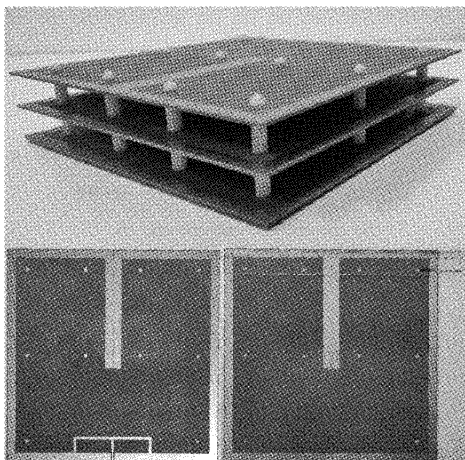
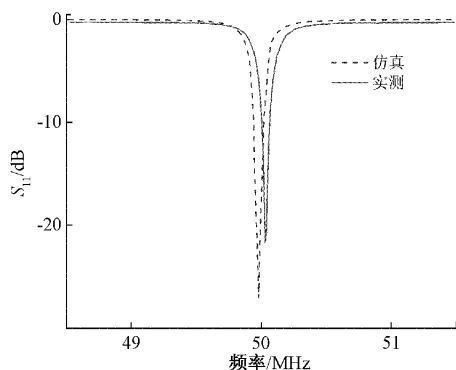


图 9 电小环形天线实物加工图

图 10 天线  $S_{11}$  曲线实测与仿真对比

采用两相同天线法<sup>[16]</sup>测量天线的辐射特性,图 11 为天线测试图,发射天线与接收天线之间的水平距离为 15 m<sup>[17-18]</sup>,两天线的架高距离为 1.8 m。根据弗里斯传输公式,天线的增益表达式为:

$$G = \frac{1}{2} \left[ 20 \lg \left( \frac{4\pi r}{\lambda} \right) - 10 \lg \left( \frac{P_t}{P_r} \right) \right] \quad (2)$$

式中: $\lambda$  为测试波长, $r$  为两天线间距离, $P_r$  为接收天线的最大接收功率, $P_t$  为发射天线的输入功率。

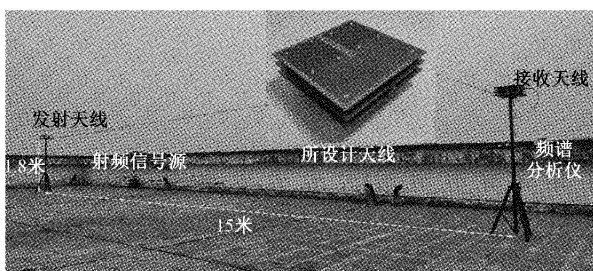


图 11 天线测试图

天线在中心频点 50.03 MHz 测试的 E 面辐射方向图如图 12 所示。测试结果表明,天线的峰值增益为  $-2.1$  dBi,不圆度为 1 dB,辐射效率为 41.5%,增益测试结果略低于仿真结果,主要应是由天线的测试环境以及实验误差造成。

实验结果表明,该天线在水平面内具有良好的全向辐射特性。

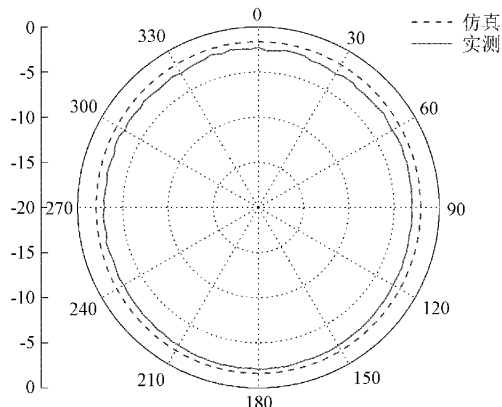


图 12 E 面辐射方向图

### 3 结 论

本文对电磁耦合 SRR 天线进行结构改进,设计了倒“山”形匹配网络进行馈电,较传统的耦合馈电结构减少了反向电流的分布。同时,加载了双层耦合 SRR 和空气间隙结构,既保证天线的小型化,又降低了介质损耗和金属损耗,提高了辐射效率,最终实现一种 3 层 SRR 高效电小环形天线。该天线实测中心频率为 50.03 MHz,整体尺寸仅为  $270 \text{ mm} \times 270 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ ,辐射效率大于 41%,具有较为稳定的水平全向辐射特性。此外,还仿真分析了介质基板对电小天线性质的影响,验证了加载空气间隙结构对多层电小天线提升辐射效率的可行性,为实现高辐射效率的超短波电小天线提供了新的设计思路。

### 参 考 文 献

- [1] BEST S R. Electrically small resonant planar antennas: Optimizing the quality factor and bandwidth [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2015, 57(3): 38-47.
- [2] 刘芸,孙红兵. 垂直隐蔽式超短波全向天线的一体化设计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(7): 59-63.
- [3] 华厚强. 模块化低空长航时无人机的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2021, 44(9): 13-21.
- [4] ZHANG Z Y, ZHAO Y, ZUO S, et al. A broadband horizontally polarized omnidirectional antenna for VHF application [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 56(5): 2229-2235.
- [5] CHOI J, DAGEFU F T, SADLER B M, et al. Electrically small folded dipole antenna for HF and Low-VHF bands [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 718-721.
- [6] 陈永锋,吴波涛,赵孟轩,等. 船舶超短波对空电台信道分析与使用策略研究[J]. 电子测量技术, 2019,

- 42(5): 95-98.
- [7] MANTEGHI M. A wideband electrically small transient state antenna [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(4): 1201-1208.
- [8] 李荣政,王沛. 低成本宽带高效率堆叠贴片天线[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(2): 26-30.
- [9] JADID M, BORIES S, DELAVEAUD C, et al. Parasitic based frequency-agile electrically small antenna design[C]. 2022 16th European Conference on Antenna and Propagation(EuCAP), 2022:1-4.
- [10] ZUFFANELLI S, ZAMORA G, AGUILA P, et al. Analysis of the split ring resonator antenna applied to passive UHF-RFID tag design[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(3): 856-864.
- [11] PENG L, CHEN P, WU A, et al. Efficient radiation by electrically small antennas made of coupled split-ring resonators [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:33501.
- [12] SARRAZIN F, PFLAUM S, DELAVEAUD C. Radiation efficiency improvement of a balanced miniature IFA-Inspired circular antenna [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 1309-1312.
- [13] 李亚靖,孙浩,杨雪霞,等. 带 CSRR 结构的 28 GHz 微带阵列天线[J]. *电子测量技术*, 2018, 41(18): 80-84.
- [14] LEE Y H, LIM E H, BONG F L, et al. Bowtie-shaped folded patch antenna with split ring resonators for UHF RFID tag design[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(6):4212-4217.
- [15] 严冬,汪朋,李帅永,等. 2.45 GHz 印刷倒 F 天线的研究与实现 [J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36 (10): 2372-2380.
- [16] 王一柯. 超短波天线增益的精确测量[D]. 西安:西安电子科技大学, 2021.
- [17] CHOI J H, DAGEFU F T, SADLER B M. An efficient low-profile low-VHF antenna for small unmanned ground vehicles[C]. 2020 14th European Conference on Antenna and Propagation (EUCAP), 2020:1-4.
- [18] SANTOS J P, FERREDOONY F, HEDAYATI M, et al. High efficiency bandwidth electrically small antennas for compact wireless communication systems[C]. 2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), 2019:83-86.

#### 作者简介

李江伟, 硕士研究生, 主要研究方向为天线设计。

E-mail: ljw9802@163.com

李相强(通信作者), 教授, 主要研究方向为天线设计、智能检测与电磁兼容技术研究。

E-mail: xiangqiang\_li@163.com