

基于特征模的多频电小近场谐振天线设计

周毅江¹ 陈 星¹

ZHOU Yijiang CHEN Xing

摘 要

利用特征模式分析方法,设计了一款多频电小近场谐振天线。其为近场谐振天线,由容性加载环和偶极子驱动单元构成。结合天线模式分析,通过在容性加载环上刻蚀矩形槽,引入新的谐振模式,同时对驱动单元进行向下折弯的改进,实现一只具有三谐振频点的电小天线设计。加工制作了尺寸为400 mm×196 mm×60 mm的天线样品并完成了测试。仿真和测试表明,天线 $S_{11} < -10$ dB频段包括85.92 ~ 86.31 MHz (0.5%)、245.48 ~ 270.27 MHz (9.6%)和300.11 ~ 324.09 MHz (7.7%);天线呈定向方向图,3个频段的最大增益分别为4.1、9.5、9.2 dBi;天线为电小天线,其电尺寸为 $0.125\lambda \times 0.06\lambda \times 0.019\lambda$,其中 λ 为天线工作频段低端频率85.92 MHz对应波长。

关键词

近场谐振;电小;特征模;多频带

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.04.038

0 引言

天线是无线通信系统中必要的信号收发单元,在无线通信系统中是必不可少的一环。在一些通信应用场景中,比如卫星通信系统、雷达系统等中,由于天线的安装空间受到严格的限制,要求天线在具有良好辐射性能的同时还需要满足有较小的尺寸。电小天线因其结构紧凑,尺寸远小于对应工作频率的波长一直有着巨大的应用前景。但是根据天线理论,电小天线不仅存在工作频带狭窄的缺点,而且存在辐射效率低的缺陷^[1-2],这是因为一般的电小天线^[3-4]阻抗特性为电阻较小、电抗较大,电小天线与常用的信号源的阻抗匹配较难,因此需要引入阻抗匹配网络来解决这种问题。2008年,Ziolkowski等人^[5]提出了近场谐振理论,该理论主要通过偶极子天线外面放置负介电常数(ENG)、负磁导率特异材料(MNG)或双负特异材料(DNG)来说明此时偶极子天线不需要额外的匹配电路,就能实现良好的阻抗匹配、较高的辐射效应和电尺寸极大减小的特性,很好地解决了传统电小天线的缺点,这种特性在其他多种近场谐振天线中得到了印证^[6-7]。特征模理论能够较为直观、清晰地显示出天线本身的工作原理,它的核心是寻找或者创造出一个或多个模式,这些新的模式的谐振频率、增益、方向图和电流分布等能够满足天线设计的要求,可以极大程度上给天

线设计人员提供一个初始的设计方案,在很大程度上克服了设计天线的盲目性^[8-12]。文献[8-10]通过对偶极子电流的分析,在偶极子电流较强处增加无功负载来提高天线的带宽。文献[11]运用特征模通过采用加载枝节和开槽线的方式分别设计了一个环状的四频天线和一个共面波导的五频天线。文献[12]运用特征模同对金属环与地板连接点的调节,使用结构具有新特点的谐振模式,设计了一款具有七频段的手机天线。

本文利用特征模式分析方法,通过加载刻蚀矩形凹槽环,引入新的谐振模式,同时对驱动结构做向下延伸改进,实现工作在超短波频段的3频带近场谐振天线。

1 特征模理论

特征模理论在任意形状金属结构表面定义了一组基础电流,这组在辐射上具有正交性的基础电流可由电场积分方程推导的广义特征值方程定义:

$$XJ_n = \lambda_n R J_n \quad (1)$$

其辐射正交性可由以下公式验证:

$$\langle J_m, R \cdot J_n \rangle = \delta_{mn} \quad (2)$$

$$\langle J_m, X \cdot J_n \rangle = \lambda_n \delta_{mn}$$

$$\langle J_m, Z \cdot J_n \rangle = (1 + j\lambda_n) \delta_{mn}$$

因此,理想电导体(PEC)上的感应电流可由特征电流的叠加来表征:

$$J = \sum_n a_n J_n \quad (3)$$

通过特征场来扩展感应电流的远场,结合电场积分方程可以得到:

1. 四川大学电子信息学院 四川成都 610065

[基金项目] 中国电波传播研究所稳定支持科研经费资助项目 (No.WBC2312008)

$$a_n(1+j\lambda_n)=\left\langle E_{\tan}^i(r),J_n\right\rangle \quad (4)$$

简化则有：

$$a_n=\frac{\left\langle E_{\tan}^i(r),J_n\right\rangle}{1+j\lambda_n} \quad (5)$$

式中： a_n 也被称为模式权重系数（MWC）。

模式显著性则定义为：

$$MS=\left|\frac{1}{1+j\lambda_n}\right| \quad (6)$$

2 天线结构与模式分析

2.1 天线结构

天线由三个部分组成：（1）刻蚀矩形容性加载环；（2）偶极子驱动振子单元；（3）地板。天线具体结构如图 1 所示，具体尺寸如表 1 所示。

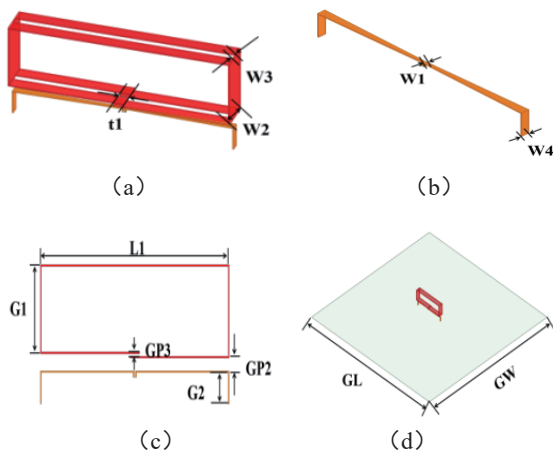


图 1 多频近场谐振寄生天线结构

表 1 多频近场谐振天线的结构参数/mm

参数	数值	参数	数值	参数	数值
G_1	132	G_{p3}	4	W_4	14
G_2	45	L_1	400	G_w	2100
t_1	40	W_1	5	G_l	2100
W_2	60	W_3	140		

2.2 模式分析

首先对偶极子驱动单元进行了特征模式分析，其结构如图 1（b）所示，水平偶极子长度为 L_1 ，垂直枝节为 G_2 。使用数值分析软件 CST 对其进行特征模式分析。图 2 为其在 70 ~ 600 MHz 频段内的前 10 个模式的模式显著性曲线，只有模式 1 为谐振模式，谐振频率为 280 MHz。模式 2 为显著模式，其 M_s 在 280 MHz 大于 0.707。图 3 是模式 1 对应谐振频点的特征电流与特征方向图，其特征电流分布呈现为常规的偶极子电流模式。

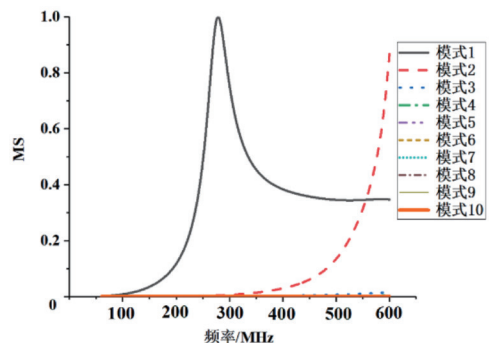


图 2 偶极子天线模式显著性曲线

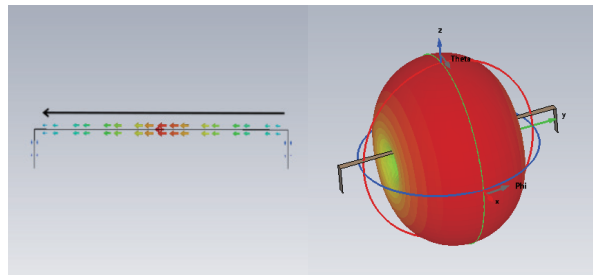


图 3 偶极子天线模式 1 的特征电流与特征方向图

为了进一步提升天线的辐射性能，采用近场谐振技术，在驱动振子上方 GP_2 处加载刻蚀矩形凹槽环。图 4 给出了加载刻蚀矩形凹槽环后天线前 10 个模式的模式显著性曲线变化结果，其中模式 1、模式 2、模式 3、模式 4、模式 5 和模式 6 的模式显著性分别在 96.49、256.32、317.50、348.00、348.00、572.00 MHz 达到 1.0，所以这 6 个模式在对应的频点下认为是谐振的，而其他高次模在此频带内的模式显著性都小于 0.707，所以认为这些高次模在此频带内是非谐振的。对比偶极子驱动单元的模式分析结果，优化后天线的谐振模式显著增加。

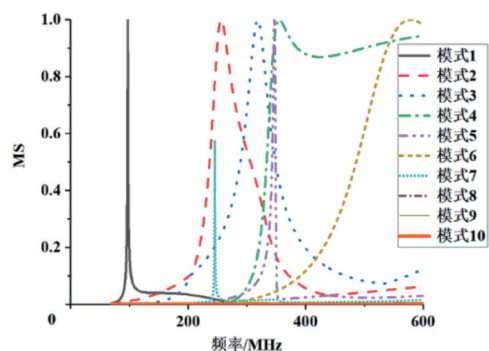
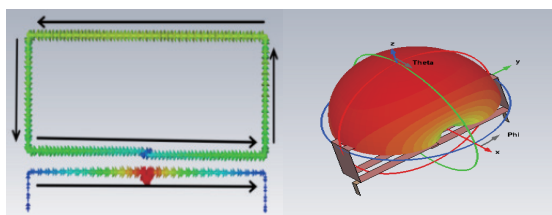


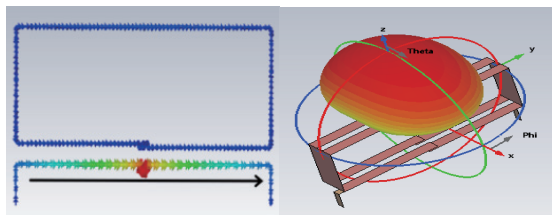
图 4 加载刻蚀矩形凹槽环的模式显著性曲线

图 5 为前 6 个谐振模式对应谐振频点的模式电流分布，由于需要得到一个定向天线，从模式 1、模式 2、模式 4、模式 5 各自的谐振频率下的特征远场图可以看出，这 4 个模式都向上半空间定向辐射，再结合模式 1、模式 2 和模式 4 在各自的谐振频率下，偶极子驱动单元的中间处具有最大模式电流分布，而其他模式的最大模式电流分布主要

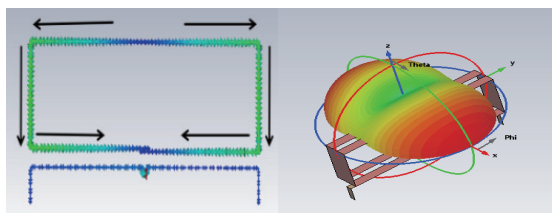
集中在偶极子驱动单元水平臂的两侧。这说明如果在此处设置激励, 就可以很好地激励模式 1、模式 2 和模式 4, 而抑制其它模式。



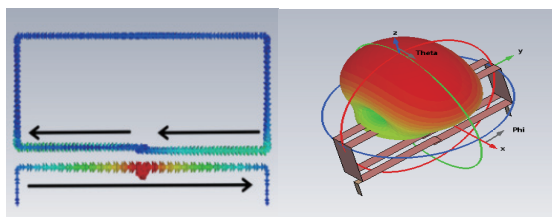
(a) 模式 1 @96.49 MHz



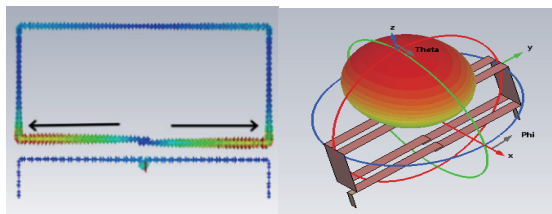
(b) 模式 2 @256.32 MHz



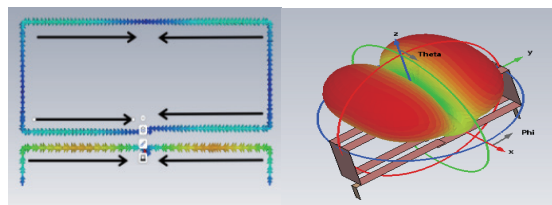
(c) 模式 3 @317.50 MHz



(d) 模式 4 @348.00 MHz



(e) 模式 5 @348.00 MHz



(f) 模式 6 @572.00 MHz

图 5 优化后天线谐振模式模式电流及远场分布

为了验证所选取的馈电位置的合理性, 研究者进行了模式权重系数分析。图 6 为前 10 个模式的模式权重系数分析结果, 可以看到施加激励后, 模式 1、模式 2 和模式 4 被有效激励。这表明馈电位置的选取是合理的。

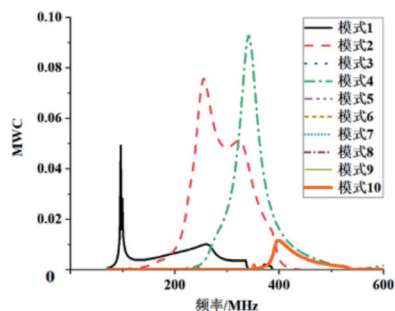


图 6 前 10 个混合模式的加权系数 (MWC) 曲线

3 天线的仿真与测试分析

图 7 是加工的近场谐振天线实物。



图 7 天线实物图

图 8 为天线的反射系数测试与仿真对比图, 可以看出天线加馈电之后, 谐振点较特征模分析的频点有所偏移, 其主要原因是: 在加馈电仿真时考虑到加工, 给天线加了聚乙烯来加固天线, 而在 CST 软件中进行特征模分析没有加聚乙烯, 从而导致频偏。也可以看到天线实现了三个频段 ($S_{11} < -10$ dB): 85.92 ~ 86.31 MHz、245.48 ~ 270.27 MHz 和 300.11 ~ 324.09 MHz, 且仿真与测试结果具有较好的一致性。

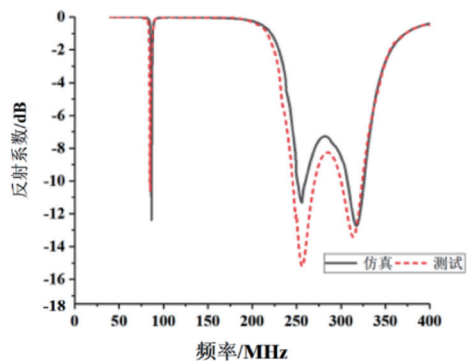


图 8 天线仿真与测试反射系数图

分别比较了 86 MHz、253 MHz、317.2 MHz 的仿真 XOZ 面和 YOZ 面仿真与测试的方向图, 如图 9, 可以看出仿真与测试结果基本一致。

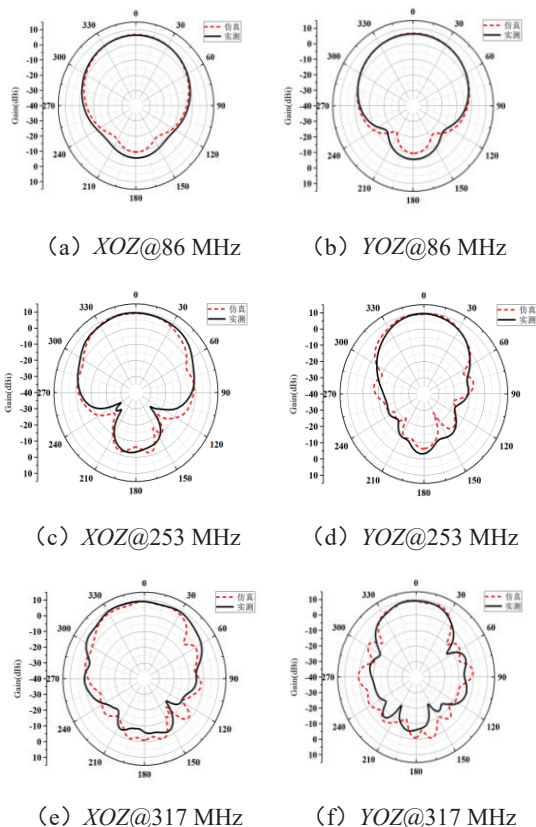


图 9 天线 XOZ 和 YOZ 面仿真与实测方向图

4 结论

本文提出了一种结构简单的电小多频近场谐振天线, 通过特征模式分析对天线的辐射机理进行了清晰的物理解释。该天线由容性加载环与驱动振子单元组成, 通过下面的驱动振子单元耦合上面的容性加载环, 实现了谐振频点的增加。实际加工天线, 经过测试验证, 本文所提出的近场谐振天线实现了三个谐振频段的工作带宽, 该天线 ($S_{11} < -10\text{ dB}$) 频段包括: $85.92 \sim 86.31\text{ MHz}$ (0.5%)、 $245.48 \sim 270.27\text{ MHz}$ (9.6%) 和 $300.11 \sim 324.09\text{ MHz}$ (7.7%), 且方向图具有良好的定向性, 在 86、253、317 MHz 的最大增益分别为 4.1、9.5、9.2 dBi。

参考文献:

- [1]IGNATENKO M, FILIPOVIC D S. On the design of vehicular electrically small antennas for NVIS communications[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2016, 64(6): 2136-2145.
- [2]FRANCIS E P. An electrically small loop antenna with usefully

isotropic radiation and common mode feed[C]// 2016 IEEE International Conference on Identity, Security and Behavior Analysis. Piscataway: IEEE, 2016: 95-98.

- [3]PARSCHE F E. Anelectrically small loop antenna with usefully isotropic radiation and common mode feed[C]// 2016 International Workshop on Antenna Technology (iWAT). Piscataway: IEEE, 2016: 95-98.
- [4]ANTONIADES M A, REZAEIEH S A, ABBOSH A M. Bandwidth and directivity enhancement of metamaterial-loaded loop antennas for microwave imaging applications[C]// 2017 International Workshop on Antenna Technology (iWAT). Piscataway: IEEE, 2017: 249-252.
- [5]ROWJS A. Compact design of single feed circularly polarized patch antenna[J]. Electronics letter, 2004, 40(18): 1093-1094.
- [6]TANG M, WANG H, ZIOLKOWSKI R W. Design and testing of simple, electrically small, low-profile, huygens source antennas with broadside radiation performance[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2016, 64: 4607-4617.
- [7]TANG M, ZHOU B, DUAN Y, et al. Pattern-reconfigurable, flexible, wideband, directive, electrically small near-field resonant parasitic antenna[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2018, 66: 2271-2280.
- [8]SAFIN E, MANTEUFFEL D. Manipulation of characteristic wave modes by impedance loading[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2015, 63: 1756-1764.
- [9]ELGHANNAI E A, RAINES B D, ROJAS R G. Multiport reactive loading matching technique for wide band antenna applications using the theory of characteristic modes[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2015, 63: 261-268.
- [10]OBEIDAT K A, RAINES B D, ROJAS R G. Application of characteristic modes and non-foster multiport loading to the design of broadband antennas[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2010, 58: 203-207.
- [11]曹霞. 小型化多频段 MIMO 天线的设计与去耦方法研究 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2023.
- [12]鄢羿. 基于特征模的终端天线设计研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.

【作者简介】

周毅江 (1999—), 男, 四川绵阳人, 硕士研究生, 研究方向: 特征模法在天线设计中的运用。

陈星 (1970—), 男, 四川巴中人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 天线设计、电磁场与微波技术、并行设计。

(收稿日期: 2024-01-15)