

DOI: 10.13382/j.jemi.B2206111

宽带多谐振偶极子天线设计*

杨国肖如奇 沈飘飘 李梦洁 吴文

(南京理工大学电子工程与光电技术学院 南京 210094)

摘要:根据目前无线通信系统发展小型化与宽带化的趋势,设计了一款具有多谐振点的宽带偶极子辐射天线。首先通过特征模理论分析倒T型导体结构得到两个谐振模式;然后在不影响倒T型导体结构谐振特性的前提下,引入寄生谐振偶极子单元;最后在3个谐振模式的电流共同最大处添加集总端口,同时激励3个谐振模式,得到3个谐振点的宽带谐振天线。天线的仿真与实测结果基本吻合,最终的工作带宽为1.8~2.56 GHz(相对带宽为34.9%)。由此,所设计的天线不仅结构简单,且性能方面良好,可广泛应用于无线通信系统中。

关键词:谐振天线;宽带天线;偶极子天线;特征模理论

中图分类号: TN821+.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6020

Design of wideband and multi-resonant dipole

Yang Guo Xiao Ruqi Shen Piaopiao Li Mengjie Wu Wen

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technique, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: According to the current trend of miniaturization and broadband development of wireless communication systems, a broadband dipole with multiple resonant modes is designed. First of all, the resonant modes of the inversed T-shaped conductor are analyzed by the theory of characteristic mode and the first two resonant modes are chosen; then a parasitic resonant dipole element is introduced without affecting the resonant characteristics of the inversed T-shaped conductor; finally, a lumped port is placed at the place that the three resonant modes have common maximum current value, these three resonant modes are excited simultaneously, and a wideband resonant antenna with three resonant modes is obtained. The simulated and measured results are in good agreement, with the final operating bandwidth of the antenna ranging from 1.8 to 2.56 GHz (34.9% relative bandwidth). As a result, the designed antenna is not only simple in structure, but also good in performance and can be widely used in wireless communication systems.

Keywords: resonant antenna; wideband antenna; dipole; theory of characteristic mode

0 引言

随着无线通信技术和进步,无线通信系统对通信前端设备的性能提出了很高的要求,通信前端器件朝着小型化、宽频段、多功能化、易集成等性能发展。在宽带MIMO^[1-2],平面宽带倒F天线^[3]和谐振偶极子^[4]等传统天线设计中,通常需要借助商业仿真软件冗长的优化和试错,而忽略了天线工作的物理意义。为了更全面

直观的解释天线的工作机制,特征模理论(theory of characteristic mode)广泛的运用到指导天线的设计研究。特征模理论兼具解析法和数值法的优势,可对任意导体在其表面进行电流正交展开,并且这些特征电流在无限远处产生的特征电场也是相互正交的。特征模式理论最早由Garbacz博士^[5]于1968年在其博士论文中提出,后来由Harrington等^[6-7]在1971年进一步改进了金属特征模理论,得到经典特征模理论。随着计算水平的不断提升,特征模相关的实际应用也进入蓬勃发展的新阶段。

收稿日期: 2022-12-12 Received Date: 2022-12-12

* 基金项目: 国家自然科学基金(62071235)项目资助

近年来,特征模理论由于其清晰的谐振机理在指导宽带天线设计方面掀起了一波研究热潮^[8-15]。文献[8]首先通过特征模理论分析金属环的特征模的多个模式,然后根据金属环的谐振模式分布加载感性耦合单元并选择合适的馈电位置设计了一款多谐振宽带天线。文献[9-11]利用特征模理论分析超表面的特征模式来设计多款具有宽带特性的天线。文献[12]设计了一款 2.4 GHz 可穿戴宽带按钮天线,首先利用特征模理论分析了纺织天线地面的模式,并在地面选择合适位置放置按钮来激发地面的模式。在宽带天线设计中,槽线相比微带贴片天线具有更高的带宽特性。文献[13-15]利用特征模理论分析了槽线谐振器的模式,激发槽线谐振器的多个谐振模式得到宽带天线。文献[15]利用特征模分析从耦合模式理论的角度解释 U 型槽贴片的较大阻抗带宽性能,并提出一种特征模理论与耦合模式理论相结合的天线设计方法,可以快速有效地计算宽带 U 型槽贴片的尺寸结构。虽然上述文献在一定程度上实现了小型化和宽带特性,但在天线结构简易程度方面仍有待提高。

本文设计了一款具有多谐振点的宽带偶极子辐射天线。首先分析了倒 T 型导体结构的多个模式和电流分布;然后在不影响倒 T 型导体结构特征模式情况下,引入寄生谐振偶极子;再重新对整体结构进行特征模分析,最后在 3 个谐振模式电流共同最大处添加集总端口,同时激励 3 个谐振模式。最后天线的阻抗带宽为 34.9% (1.8~2.56 GHz),测试结果与仿真结果吻合较好,可应用在无线 Wi-Fi 发射和接收等无线通信设备中。

1 天线的结构参数与模式分析

本文多谐振宽带偶极子天线结构如图 1 所示。该天线采用厚度为 0.508 mm,介电常数为 2.2 的 F4BM220 作为介质基板,介质基板的上层印刷倒 T 型导体结构以及加载的寄生谐振偶极子。天线最终在倒 T 型导体结构中心处通过同轴线馈电。天线详细设计参数如表 1 所示。

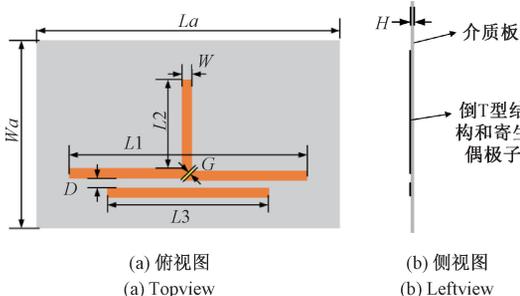


图 1 多谐振宽带偶极子天线结构

Fig. 1 Geometry of the multi-resonant wideband dipole

表 1 多谐振宽带偶极子天线参数尺寸

Table 1 Parameters of the multi-resonant mode wideband dipole (mm)

参数	L_a	W_a	L_1	L_2	L_3	W	D	G	H
尺寸	90	56	70	28	48	3	2	1	0.508

1.1 倒 T 型导体结构特征模式分析

为了更清晰的理解该天线的辐射机理,首先对倒 T 型导体结构进行特征模式分析。图 2(a)中,水平偶极子长度为 70 mm,垂直枝节长度为 28 mm,两者宽度均为 3 mm。需要指出的是,下面利用商业软件 CST 仿真的过程暂时不考虑介质板的影响。图 2(b)为倒 T 型导体结构的前 8 个特征模式对应的模式显著性曲线。如图 2(b)所示,在 0.5~3.5 GHz 频带内,模式 1 和模式 2 的模式显著性分别在 2.02 和 2.48 GHz 处达到 1.0,所以这两个模式在这两个频率点认为是谐振的。其他高次模对应模式显著性在频带内都小于 0.2,所以其他高次模在此频段内是不谐振。

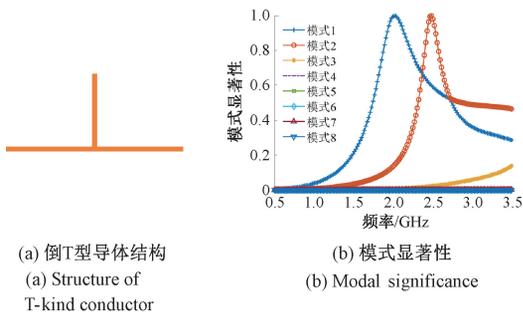


图 2 倒 T 型导体结构及其模式显著性曲线
Fig. 2 Geometry of the inverted T-shape conductor and its modal significance

图 3 是倒 T 型导体的两个谐振模式对应特征电流和特征电场。图 3(a)中,模式 1 的电流主要分布在倒 T 型结构的水平方向偶极子,垂直方向枝节上电流几乎为 0,所以模式 1 对应特征远场方向图而且与常规偶极子的方向图一致。图 3(b)中,模式 2 的电流对称地分布在倒 T 型结构,且有两条电流路径,一条是从垂直枝节流向水平偶极子的左侧,另一条是从垂直枝节流向水平偶极子的右端。

1.2 加载寄生偶极子的倒 T 型导体天线特征模式分析

为了进一步拓展带宽,在倒 T 型导体结构的下方 3 mm 处加载寄生偶极子,长度为 48 mm,宽度与倒 T 型导体的宽度相同。由于寄生单元的引入,天线整体结构发生了改变,所以需要对新结构再次进行特征模式分析。图 5 为加载寄生偶极子后的天线结构及其模式显著性曲线。在 0.5~3.5 GHz 频段,天线的前 8 个特征模式

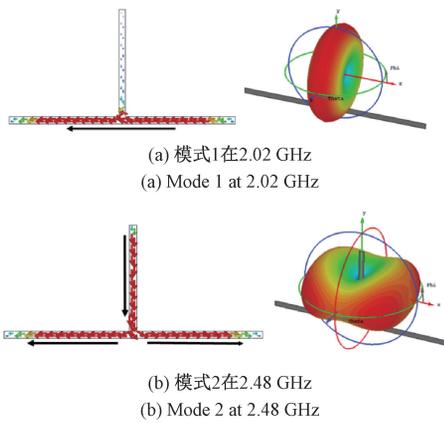


图 3 倒 T 型导体两个谐振模式的电流分布和辐射方向图
 Fig. 3 Current distributions and radiation patterns of the two resonant modes for the inversed T-shape metal

中,前 3 个模式的模式显著性曲线接近 1,对应频率分别为 2.01、2.47 和 2.94 GHz。对比图 2(b) 和图 4(b) 发现,加载寄生偶极子的倒 T 型导体结构的前两个谐振频率即倒 T 型导体的谐振模式。图 4(b) 中模式 3 是一个新谐振模式,为加载寄生偶极子的谐振模式。

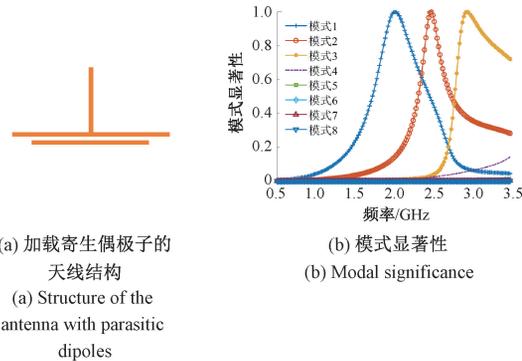


图 4 加载寄生偶极子的天线结构及其模式显著性曲线
 Fig. 4 Geometry of the antenna with parasitic dipoles and its modal significance

图 5 为加载寄生偶极子的天线结构对应 3 个谐振模式的电流分布和远场方向图。对比图 5 和图 3,加载寄生偶极子的天线结构的谐振模式 1 和 2 的电流分布与倒 T 型导体的两个谐振模式对应电流分布一致。从图 5(c) 可以看出,加载寄生偶极子的天线的谐振模式 3 对应电流分布主要分布在加载的寄生偶极子上,且 T 型结构的横向偶极子也存在部分耦合电流。由上述分析可知,模式 1 的谐振频率主要由倒 T 型导体结构的水平方向偶极子的参数决定,模式 2 的谐振频率由倒 T 型导体结构中水平偶极子以及垂直枝节参数共同决定,而模式 3 的谐振频率主要由加载的寄生偶极子的尺寸决定。

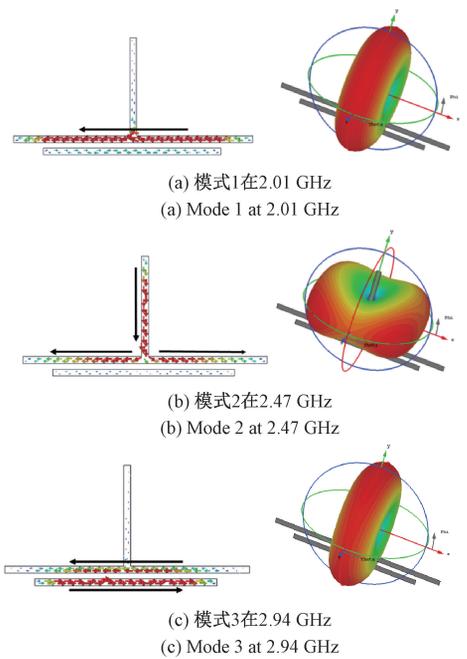


图 5 加载寄生偶极子天线的 3 个谐振模式对应的电流分布及方向图

Fig. 5 Current distributions and radiation patterns of the three resonant modes of the loaded parasitic dipole antenna

2 谐振模式的激励与天线的实现

2.1 谐振模式的激励与结果分析

从图 5 中 3 个谐振模式对应的电流分布看出,3 个谐振模式的电流分布均在倒 T 型结构中水平偶极子和竖直枝节的交界位置处的呈红色,所以在该处引入宽度为 1 mm 的缝隙,并利用 CST 中集总端口进行馈电,具体馈电位置如图 6(a) 所示。为了比较,在未加载寄生的倒 T 型导体天线结构的相同位置引入相同的馈电。值得注意的是,引入馈电尺寸不能过大,否则会影响天线的固有特征模式。图 6(b) 分析了加载寄生偶极子的宽带天线的模式权重系数随频率变化趋势,在 0.5 ~ 3.5 GHz 频段内,存在 3 个谐振模式(3 个峰值),对应的谐振频率分别为 2.05、2.43 和 2.78 GHz,与引入馈电前天线的谐振频率保持一致。

图 7 为倒 T 型导体天线加载寄生偶极子与未加载两种情况的反射系数曲线对比图。在图 7 中,未加载寄生偶极子的倒 T 型导体天线有两个谐振点,分别位于 2.01 和 2.45 GHz;加载寄生偶极子的倒 T 型导体天线有 3 个明显的谐振点,分别是 2.05、2.43 和 2.78 GHz。图 8 是加载寄生偶极子的天线实际激励出的 3 个谐振模式的电流分布及方向图。图 8(a) 中,第一谐振点的电流分布和方向图与图 5(a) 中结构特征模分析(没有考虑馈电)的结果保持一致。图 8(b) 为天线实际激励出的第 2 个谐

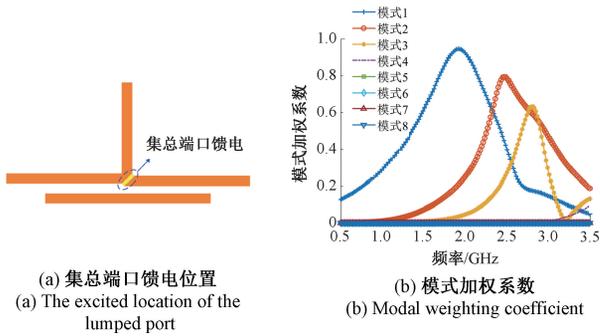


图6 加载寄生偶极子的倒T型导体结构的馈电位置及对应模式加权系数

Fig. 6 Feeding scheme and modal weighting coefficient of the loaded parasitic dipole antenna

振模式。在图8(b)中,鉴于馈电激励的方向,所以天线实际第二谐振模式的电流方向沿着 x 正方向(即倒T型结构中水平偶极子的右端),而不再如图5(b)中对称分布,因此第二谐振模式的方向图也不再对称。根据上述特征模分析已知第三谐振模式主要是由寄生的偶极子决定,但由于图8(c)中集总端口馈电在倒T型结构中,所以实际激励的电流分布结果中倒T型结构水平偶极子上的电流强度要高于加载的寄生偶极子。

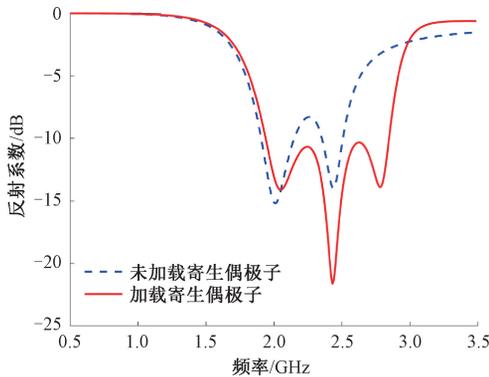
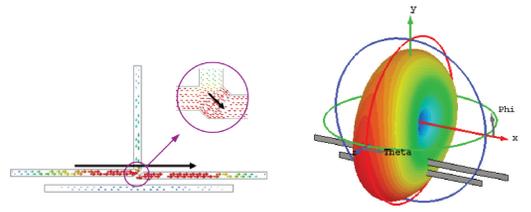


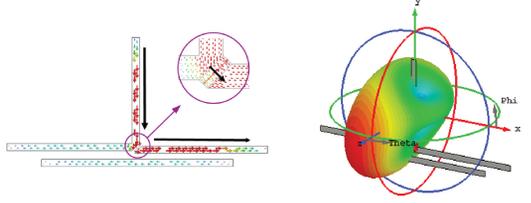
图7 加载偶极子前后的倒T型导体天线的反射系数曲线
Fig. 7 Comparisons of the reflection coefficients between the inverted T-shape metal with or without loaded parasitic dipole

2.2 天线的实现

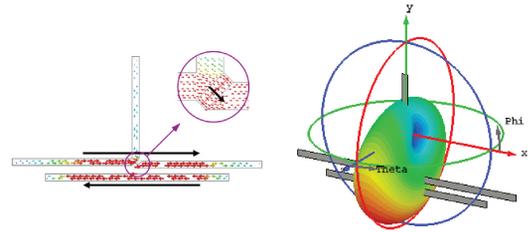
以上所有分析过程均在商业软件 CST 完成,其中并未考虑介质板对天线的影 响。为了考虑后续加工测试,这里进一步对加入介质板后的天线进行分析。本文介质板采用厚度为 0.508 mm、介电常数为 2.2 的 F4BM220。图9为天线有无介质板对应反射系数的仿真结果对比。从图9可以看出,加入介质板后,整体工作频带整体向低频偏移。图10为图9中天线(有介质板)的3个谐振频率对应的电流分布和方向图。对比图10和图8发现,介质板的引入对倒T型导体天线以及加载的寄生偶极子的



(a) 电流分布和辐射方向图在2.05 GHz
(a) Current distribution and radiation pattern at 2.05 GHz



(b) 电流分布和辐射方向图在2.43 GHz
(b) Current distribution and radiation pattern at 2.43 GHz



(c) 电流分布和辐射方向图在2.78 GHz
(c) Current distribution and radiation pattern at 2.78 GHz

图8 天线实现的3个谐振电流分布和辐射方向图
Fig. 8 Current distributions and the radiation patterns of the three resonant modes for the realization of the antenna

电流分布没有影响。

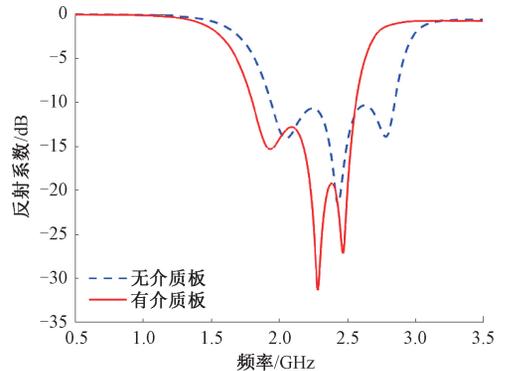


图9 有无介质板反射系数曲线仿真结果对比
Fig. 9 Comparison of the simulated results of the reflection coefficients with or without substrate

3 天线的仿真与测试分析

3.1 带宽和辐射结果分析

图11是天线加工测试的反射系数测试结果与仿真

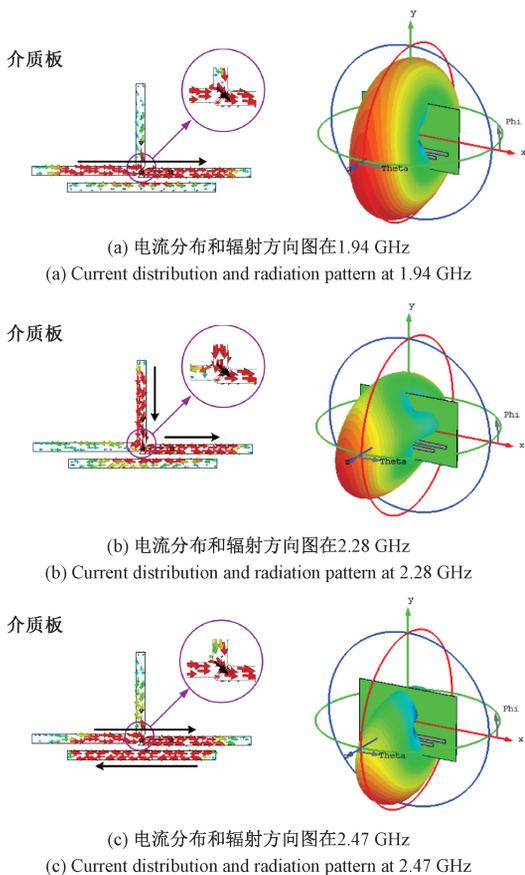


图 10 引入介质板后天线的 3 个谐振电流分布和辐射方向
Fig. 10 Current distributions and the radiation patterns of the three resonant modes for the antenna with the introduction of the substrate

结果对比图。天线的加工实物如图 10 所示。天线反射系数使用 AGILENT E5071C 矢量网络分析仪进行测试。由图 11 可知,仿真和测试的反射系数谐振点基本吻合,仿真的阻抗带宽为 34.9% (1.8~2.56 GHz),与最终测试的阻抗带宽为 33.4% (1.82~2.55 GHz)。两者之间的误差主要是由于加工过程中缝隙大小的误差导致以及同轴线缆的焊接问题导致的测量误差。

由于实验室暗室条件限制,没有 2 GHz 以下的发射喇叭天线,对于 2 GHz 以下的低频谐振点没有进行远场测试。图 12 是微波暗室天线测试的增益曲线与仿真结果的对比图。图 13 给出了天线在 2.23、2.47 GHz 的仿真与测试的归一化辐射方向图。从图 12 观察可知,天线第二谐振模式(2.28 GHz)对应方向图中交叉极化较大,这是由于倒 T 型结构的第二谐振电流分布在垂直枝节和水平枝节右端均存在电流,两区域电流分布相互垂直,所以在该频率点交叉极化性能较差。这里垂直的电流分布的特性下一步可以用来设计圆极化天线^[16-17]。从上述分析可以看出特征模理论可以直接地指导天线设计,而避

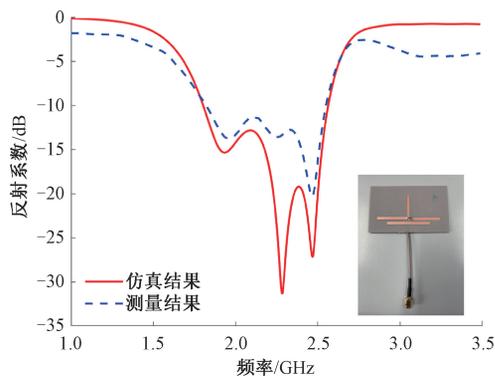


图 11 反射系数仿真及测试数据
Fig. 11 Simulated and measured results of reflection coefficient

免大量冗长的软件优化和试错过程。

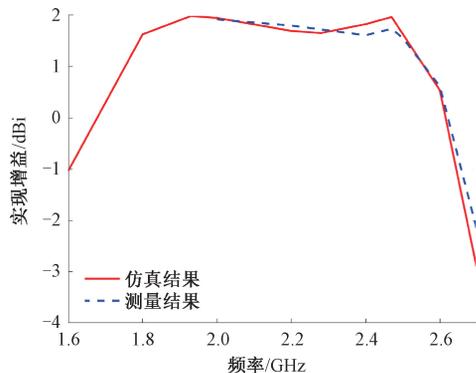


图 12 仿真与测试的增益曲线
Fig. 12 Simulated and measured gain

3.2 天线带宽比较

表 2 列出了所提出的多谐振宽带偶极子天线与部分文献之间的比较, λ_0 表示对应天线中心频率对应的波长。本文设计的宽带多谐振偶极子天线相对带宽可达到 34.9%。对比参考文献[4]、[18]和[19]尺寸在与参考文献相当的情况下,本文设计的宽带多谐振偶极子天线具有更宽的相对带宽。对比参考文献[20],本文在保持一定的带宽性能的基础上,具有更小的尺寸。综上所述,本文设计的宽带多谐振偶极子天线不仅结构简单,且性能方面良好,可广泛应用于无线通信系统中。

表 2 多谐振宽带偶极子天线性能对比

Table 2 Performance comparison of multi-resonant broadband dipole antennas

文献	天线单元	相对带宽	天线尺寸
[4]	偶极子	34.5%	$2.03 \times 0.76 \times 0.203 \lambda_0^3$
[18]	偶极子	11.2%	$1.04 \times 0.83 \times 0.015 \lambda_0^3$
[19]	偶极子	27.8%	$0.45 \times 0.17 \times 0.01 \lambda_0^3$
[20]	偶极子+环	44.2%	$0.63 \times 0.32 \times 0.06 \lambda_0^3$
本文	T 型枝节+偶极子	34.9%	$0.51 \times 0.24 \times 0.004 \lambda_0^3$

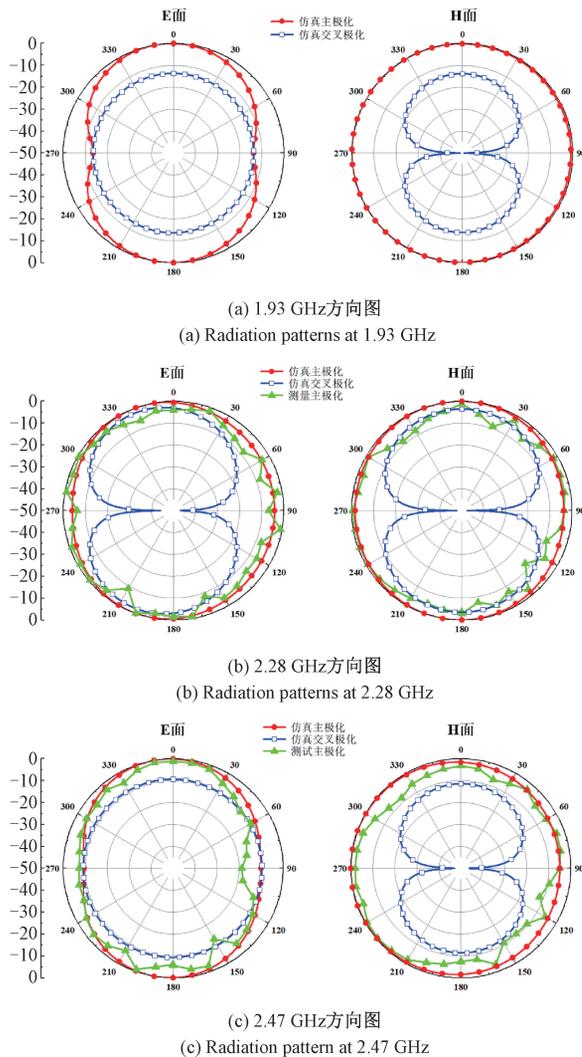


图 13 仿真与测试的辐射方向图

Fig. 13 Simulated and measured results of radiation patterns

4 结论

区别于传统利用商业软件进行冗余的优化设计和试错的天线设计方法,本文借助特征模理论,可以更直接地指导天线设计者利用任意结构的谐振特性来设计天线。本文借助特征模理论分析设计了一款多谐振宽带偶极子天线。首先理论分析倒 T 型导体结构的多个模式,得到两个谐振模式;然后通过加载寄生谐振偶极子再次进行特征模理论分析,引入一个新的谐振模式;在 3 个谐振模式电流共同最大处添加集总端口可以同时激励 3 个谐振模式。最后加工测试,采用简单的同轴线进行馈电,测试结果与仿真结果吻合较好。最终设计的多谐振宽带偶极子天线的阻抗带宽可达 34.9%,可应用在无线 Wi-Fi 发射和接收等设备中。

参考文献

- [1] 高明明,宋杨,南敬昌,等. 紧凑型超宽带 MIMO 天线的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(1): 149-156.
GAO M M, SONG Y, NAN J CH, et al. Research of a compact UWB-MIMO antenna with X band-rejected [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(1): 149-156.
- [2] 南敬昌,韩欣欣,高明明,等. 基于 DGS 的小型化 UWB-MIMO 天线的设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(5): 89-95.
NAN J CH, HAN X X, GAO M M, et al. Design of miniaturized UWB-MIMO antenna based on DGS [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(5): 89-95.
- [3] 陈鸿海,孙学良,赵鹤鸣,等. 高增益蓝牙天线的设计与应用[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 197-206.
CHENG H H, SUN X L, ZHAO H M, et al. Design and application of high gain bluetooth antenna [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 197-206.
- [4] 冯建杰,龚大勇,邓杰,等. 一种紧凑型低成本宽带高增益偶极子天线[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版), 2022, 42(6): 10-14.
FENG J J, GONG D Y, DENG J, et al. A compact low-cost wideband and high-gain dipole antenna [J]. Journal of Hangzhou Dianzi University (Natural Sciences), 2022, 42(6): 10-14.
- [5] GARBACZ R J. Modal expansions for resonance scattering phenomena [J]. Proceedings of the IEEE, 1965, 53(8): 856-864.
- [6] HARRINGTON R, MAUTZ J. Theory of characteristic modes for conducting bodies [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1971, 19(5): 622-628.
- [7] HARRINGTON R, MAUTZ J. Computation of characteristic modes for conducting bodies [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1971, 19(5): 629-639.
- [8] WEN D L, YANG H, WANG H Y, et al. Design of a wideband antenna by manipulating characteristic modes of a metallic loop [J]. Microwave Optical Technology Letter, 2019, 61: 513-518.
- [9] LIN F H, CHEN ZH N. Resonant metasurface antennas with resonant apertures: Characteristic mode analysis and dual-polarized broadband low-profile design [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(6): 3512-3516.
- [10] HAN L P, LI ZH, HAN G R, et al. Wideband metasurface

antenna using characteristic mode analysis [C]. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. IEEE, 2021.

- [11] 韩国瑞,田凯,裴立力. 基于特征模分析的宽带全向天线设计[J]. 测试技术学报,2020,34(2): 159-162.
HAN G R, TIAN K, PEI L L. Design of broadband omni-directional antenna based on characteristic mode analysis [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2020,34(2):159-162.
- [12] YAN S, VANDENBOSCH G. Design of wideband button antenna based on characteristic mode theory [J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2018, 12(6):1383-1391.
- [13] LIN J F, CHU Q X. Increasing bandwidth of slot antennas with combined characteristic modes [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(6):3148-3153.
- [14] 王友保,张宥诚,郑大鹏. 基于特征模理论的缝隙宽带天线设计[J]. 电子元件与材料,2021,40(1): 85-92.
WANG Y B, ZHANG Y CH, ZHENG D P. Design of a slot broadband antenna by the characteristic mode theory [J]. Electronic Components and Materials, 2021, 40(1): 85-92.
- [15] BORCHARDT J J, LAPOINTE T C. U-slot patch antenna principle and design methodology using characteristic mode analysis and coupled mode theory [J]. IEEE Access, 2019, 7: 109375-109385.
- [16] XIAO R Q, WEN G Y, WU W. Theory of resonant modes and its applications [J]. IEEE Access, 2021, 9: 114945-114956.
- [17] BOLSTER M F. A new type of circular polarizer using crossed dipoles [J]. Microwave Theory & Techniques International Transactions on, 1961, 9(5):385-388.
- [18] LUO Y, CHEN ZH N, MA K. Enhanced bandwidth and directivity of a dual-mode compressed high-order mode stub-loaded dipole using characteristic mode analysis [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(3):1922-1925.
- [19] ZHANG W, LI Y, ZHOU Z, et al. Dual-mode compression of dipole antenna by loading electrically small loop resonator [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(4):3243-3247.
- [20] WEN D, HAO Y, WANG H, et al. Design of a wideband antenna with stable omnidirectional radiation pattern using the theory of characteristic modes [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2017, 65(5): 2671-2676.

作者简介



Yang Guo received his B. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 1999, M. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2002 and Ph. D. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2007, respectively. Now he is a research associate in Nanjing University of Science and Technology. His main research interests include microwave millimeter wave near-range detection and communication technology.



Xiao Ruqi (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Binjiang College of Nanjing University of Information Science and Technology in 2015. Now he is a Ph. D. candidate at Nanjing University of Science and Technology. His main research interests include the theory of resonant mode and passive filter.



Shen Piaopiao received her B. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2020. Now she is a M. Sc. candidate at Nanjing University of Science and Technology. Her main research interest includes the wearable antenna.



Li Mengjie received her B. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2019 and M. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2022. Her main research interest includes the wideband antenna.



Wu Wen is a level-2 professor in Nanjing University of Science and Technology. His main research interests include microwave millimeter wave near-range detection and satellite communication technology.

杨国,1999 年于南京理工大学获得学士学位,2002 年于南京理工大学获得硕士学位,2007 年于南京理工大学获得博士学位,现为南京理工大学副研究员,主要研究方向为微波毫米波近程探测与通信技术。

E-mail: yangguo@njust.edu.cn

肖如奇(通信作者),2015 年于南京信息工程大学滨江学院获得学士学位,现为南京理工大学在读博士研究生,主要研究方向为天线谐振理论和无源滤波器。

E-mail: Xiaoruqi_ee@njust.edu.cn

沈飘飘,2020 年于南京理工大学获得学士学位,现为南京理工大学在读硕士研究生,主要研究方向为可穿戴天线。

E-mail: spp123456@njust.edu.cn

李梦洁,2019 年于南京理工大学获得学士学位,2022 年于南京理工大学获得硕士学位,主要研究方向为宽带天线。

E-mail: limengjie@njust.edu.cn

吴文,现为南京理工大学二级教授,主要研究方向为微波毫米波近程探测与卫星通信技术。

E-mail: wuwen@mail.njust.edu.cn

Wu Wen is a level-2 professor in Nanjing University of Science and Technology. His main research interests include microwave millimeter wave near-range detection and satellite communication technology.