

基于特征模分析的开槽超宽带偶极子天线设计

刘 伟¹
LIU Wei

摘 要

为满足现代通信系统对宽带、高性能天线的需求,利用特征模式分析方法,设计了一款由偶极子和寄生振子构成的开槽超宽带偶极子天线。利用特征模分析方法,通过对偶极子天线本身进行切角操作扩展带宽,后续通过加载两个长短不一的寄生偶极子谐振结构以及开槽来创造新的特征模式。加工制作了天线样品并完成了测试,该天线印刷在介电常数为 2.2、厚度为 1.524 mm 的 Rogers5880 上。仿真和测试表明,该宽带偶极子谐振寄生天线的相对带宽为 96.6% (1.47 GHz~4.22 GHz)。其电尺寸为 $0.350\lambda_0 \times 0.160\lambda_0 \times 0.007\lambda_0$,良好的带宽性能能够为多频段通信提供稳定支持。

关键词

超宽带; 特征模; 寄生单元; 开槽; 谐振偶极子

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.05.021

0 引言

在现代通信系统中,宽带天线扮演着极为重要的“角色”,而偶极子天线作为天线基本的形式之一,同样运用广泛,特别是在无线局域网(WLAN)、卫星导航和通信基站等关键领域中,发挥着至关重要的作用。

而将天线设计成超宽带可以缓解无线通信系统的信道压力,同时提升频谱效率,此类天线有较大发展前景。文献[1]提出了一种共面波导馈电的共形纺织环天线,运用特征模设计一种反向部分接地天线,该方法将天线带宽提高到了 1 560 MHz,与无部分接地天线相比,天线带宽提高了 11.61% (约 370 MHz)。文献[2]通过对矩形贴片进行特征模分析,采用在贴片上开槽引入第二目标模式,再通过在不同位置加载分支,分别展示不同模式下的带宽,实现了相对带宽为 35% 的微带天线。文献[3]对一款窄宽带单极子印刷天线进行特征模分析,分别在原结构电流密集处引入渐变结构,让模式 1、2 可以有效激励起来。再通过开槽使得模式 4、5 被下方的矩形条有效激励,实现工作频段内较好的阻抗匹配。文献[4]利用特征模理论设计了一款三模宽带天线,天线由两个振子谐振器和一个环形谐振器组成,实现了 56.9% 的阻抗带宽。文献[5-6]利用特征模理论构造了宽带超表面,进一步提升了天线的性能。

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,其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,给天线设计人员提供一个初始的设计方案,

在一定程度上克服了设计天线的盲目性。

本文通过特征模分析方法,结合特征电流分布和特征电流幅值进行调整,并对偶极子天线本身进行切角操作来增加其成为宽带模式的潜力,后续通过加载两个额外长短不一的寄生偶极子谐振结构来进一步拓宽天线的带宽,最后进行开槽来创造新的特征模式,实现一款超宽带的偶极子天线。

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。理想电导体(PEC)上的感应电流可由特征电流的叠加来表征^[7]:

$$J = \sum_n a_n J_n \quad (1)$$

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:

$$a_n (1 + j\lambda_n) = \langle E_{\text{tan}}^i(r), J_n \rangle \quad (2)$$

简化则有:

$$a_n = \frac{\langle E_{\text{tan}}^i(r), J_n \rangle}{1 + j\lambda_n} \quad (3)$$

式中: a_n 被称为模式权重系数(MWC)。

模式显著性则定义为:

$$MS = \left| \frac{1}{1 + j\lambda_n} \right| \quad (4)$$

2 天线结构与模式分析

2.1 天线结构

在金属矩形片的基础上,通过裁角、边缘加载以及开槽 3 种方法,逐步增加新的谐振模式来拓宽带宽。

1. 中国兵器装备集团上海电控研究所 上海 200092

天线的具体结构如图 1 所示,该天线主要由两部分组成:(1)顶部经过切角以及开槽的偶极子;(2)两侧长短不一的寄生振子。

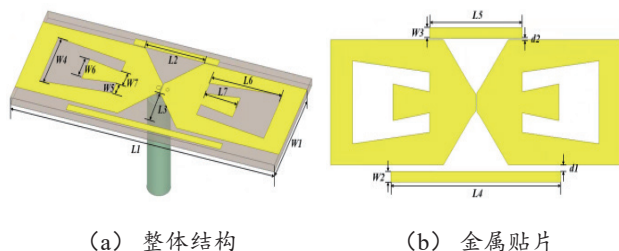


图 1 天线结构图

详细几何参数数据如表 1 所示。

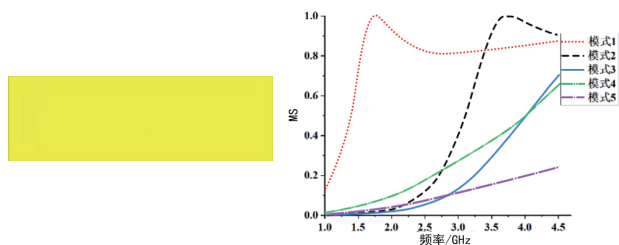
表 1 天线结构相关几何参数值

单位: mm

参数	数值	参数	数值	参数	数值
L1	73.8	L2	16.8	L3	8.2
L4	44.0	L5	24.0	L6	20.0
L7	9.5	W1	24.0	W2	2.0
W3	2.3	W4	16.0	W5	4.0
W6	7.3	W7	3.8	d1	1.5
d2	0.5				

2.2 模式分析

结构简单的金属矩形片结构如图 2 (a) 所示,为说明偶极子天线的工作原理,对其进行特征模式分析。相关特征模式分析仿真数据均来自商业仿真软件 CST。图 2 (b) 为该结构的模式显著性 MS 曲线,其中模式 1 对应的谐振频点为 1.80 GHz,为谐振模式;模式 2 对应的谐振频点为 3.74 GHz,为谐振模式;模式 3 为显著模式;模式 4、模式 5 为非显著模式。在此仅对谐振模式进行分析,其他高次模式不予考虑。



(a) 金属矩形片结构 (b) 模式显著性系数曲线

图 2 金属矩形片

模式 1、2 在 2 个谐振模式下的特征电流与特征远场分布结果见图 4。因为模式 1 与模式 2 的特征电流分布区域相反,故难以同时激励。从图 2 (b) 中可以看出,模式 1 的模式显著性 MS 大于 0.707 的带宽,明显大于模式 2 的带宽,故选择模式 1 作为激励的主模。

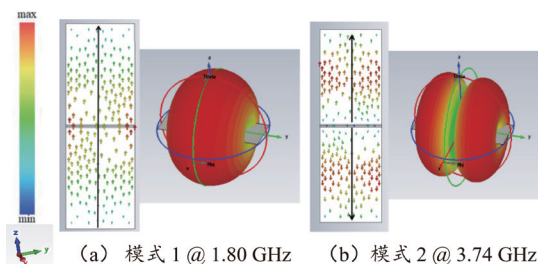


图 3 特征电流与特征远场

由图 3 可知,矩形金属片中心处为最大电流所在,故在中心处进行裁角处理,通过延长模式 1 特征电流的路径,使天线的工作频带向低频偏移,如图 4 所示。

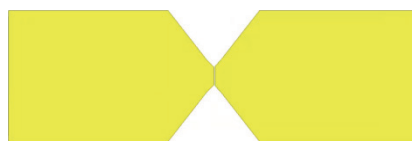
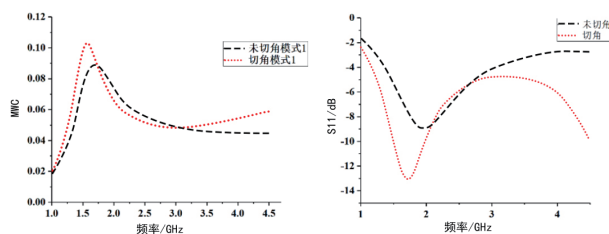


图 4 裁角矩形金属片

对于裁角的矩形金属板,其主要模式(即模式 1)展现出明显的模式权重系数,而其他模式则几乎可忽略不计,因此未予展示。图 5 (a) 描绘了裁角与未裁角矩形金属片在模式 1 的权重系数对比趋势。从图中可观察到,裁角后,模式 1 在低频及高频区域的权重得到增强,而在中频区域则有所减弱。另外,图 5 (b) 展示了两种金属片在反射系数上的对比,明显看出裁角后的天线在低频与高频区域的反射特性有显著改善。



(a) 模式 1 的权重系数曲线 (b) 反射系数曲线

图 5 裁角与未裁角金属矩形片

图 6 进一步呈现了裁角与未裁角矩形金属片在模式 1 上的模式显著性(MS)对比曲线。可以看出,裁角后,模式 1 的谐振频率向低频方向偏移,这一现象归因于裁角后模式 1 的特征电流路径得以延长。

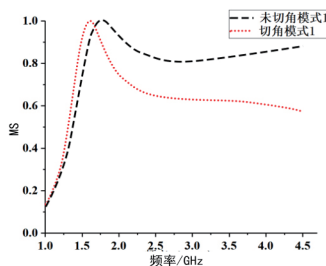
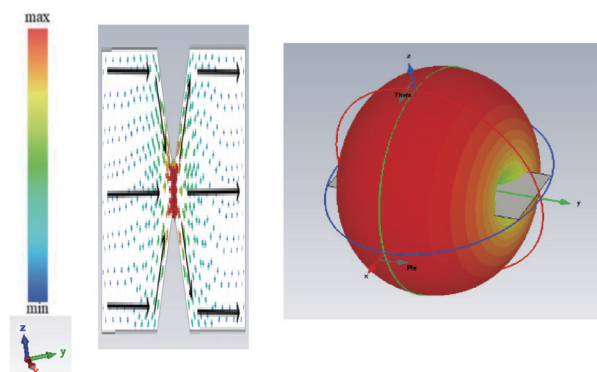


图 6 裁角与未裁角矩形金属片的模式 1 的 MS 对比曲线

至于模式 1 的详细特征, 包括其特征电流分布与特征远场图, 则如图 7 所示。



模式 1 @ 1.60 GHz

图 7 裁角矩形金属片模式 1 的特征电流与特征远场

历经裁角处理后, 反射系数曲线中频段内 $S_{11} < -10$ dB 的部分近乎缺失, 为达成宽带特性的实现, 额外增设了较长的寄生单元, 同时对侧又增加了一个短寄生单元, 用以优化高频区域反射系数的恶化状况。图 8 展示了双寄生单元天线模型。

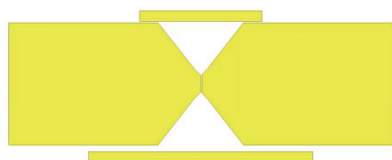
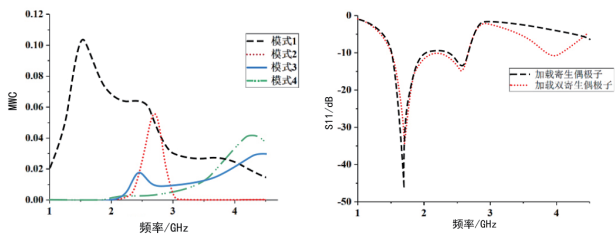


图 8 加载双寄生偶极子

图 9 (a) 显示了其模式权重系数, 与仅加载一寄生单元相比, 模式 1、2 曲线基本稳定; 模式 3、4 为新模式, 主要集中于中高频。图 9 (b) 为反射系数曲线, 因模式 1、2 权重系数未变, 且作用频段为中低频, 反射系数曲线保持稳定; 高频段变化与整体趋势相符。结果显示, 天线带宽增加, 高频处的反射系数曲线得到明显的改善。



(a) 模式权重系数

(b) 反射系数曲线

图 9 加载双寄生偶子

图 10 为加载双寄生单元的模式显著性 MS 曲线, 图 11 为各模式的特征电流与特征远场。从 MS 曲线图中观察到, 在指定频段的高频区域, 模式 1 与模式 2 的显著性均有降低; 模式 3 呈现显著特性, 而模式 4 为非显著模式。对比加载寄生单元前后的情况, 模式 1 与模式 2 的特征电流及远场特性

基本保持不变。新形成的模式 3, 其特征电流分布近似于模式 2, 主要集中在短寄生单元、紧邻其边缘的矩形金属片部分以及长寄生单元上, 但其特征远场与模式 2 存在差异, 不属于同类偶极子模式范畴。至于模式 4, 其特征电流主要沿中间裁角矩形片的边缘分布, 同时在两个寄生单元上也有显著分布, 导致其在 xoy 平面的辐射电场呈现分裂状。

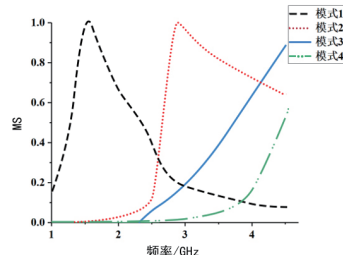


图 10 加载双寄生偶极子模式显著性曲线

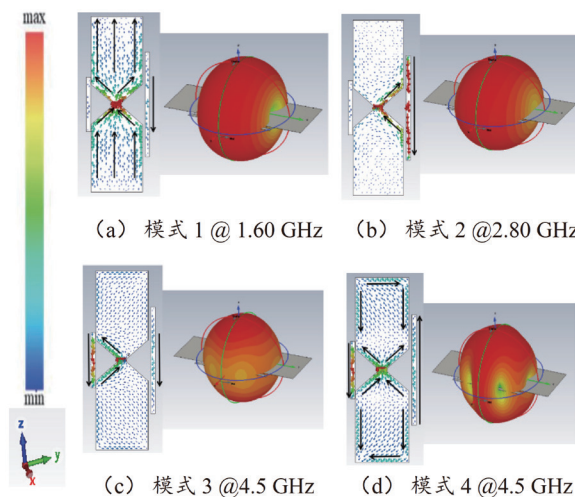


图 11 加载双寄生偶极子特征电流与特征远场

鉴于金属偶极子两臂中部电流较弱, 为拓宽带宽, 进一步在该区域开设槽口, 以激发新模式, 具体结构如图 12 所示。



图 12 开槽结构

图 13 (a) 展示了开槽后天线的模式权重系数分布情况, 在该频段范围内, 成功激励了 4 个主要模式。与未开槽情况相比, 模式 1 和模式 2 的权重系数保持稳定, 几乎未发生变动; 而模式 3 和模式 4 的权重系数则发生了较为显著的变化。图 13 (b) 描绘了开槽后天线的反射系数曲线, 鉴于模式 1 和模式 2 的权重系数保持稳定, 反射系数曲线在中低频段也相应保持稳定, 未出现明显变化。整体来看, 反射系数曲线的变化趋势与 4 个被激发模式共同作用下的整体变化趋势基本保持一致。

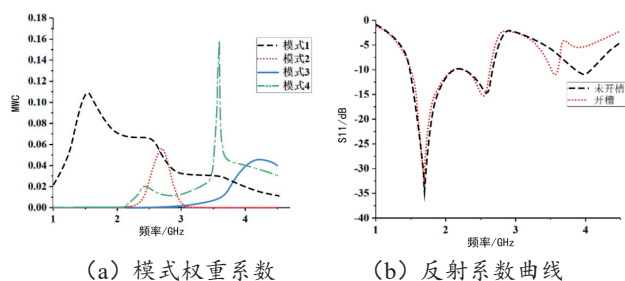


图 13 加载双寄生偶子开槽天线

图 14 展示了各个模式的模式显著性 MS 曲线，而图 15 则呈现了各模式的特征电流与特征远场分布。观察 MS 曲线图可以发现，模式 1 与模式 3 的显著性曲线保持相对稳定，未出现明显波动；在高频区域，模式 2 的显著性大于 0.707 的带宽有所缩减；此外，模式 4 则是一个由开槽操作新引入的模式。

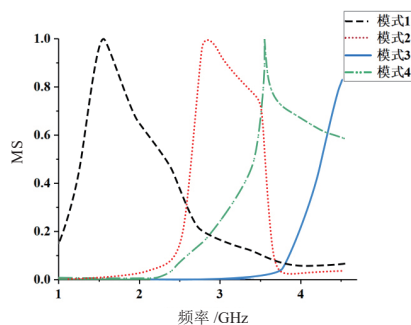


图 14 加载双寄生偶子开槽天线的模式显著性曲线

图 15 为各模式的特征电流与特征远场分布图，可以看出，模式 1 和模式 2 开槽前后的特征电流与特征远场分布几乎一致，开槽前后的模式 1、2 未发生改变，为同一模式；开槽前的模式 3 仍存在水平方向的电流分布，开槽截断了该方向电流，故该模式特征电流发生变化，开槽前后的模式 3 不是同一个模式；模式 4 与模式 3 同理。

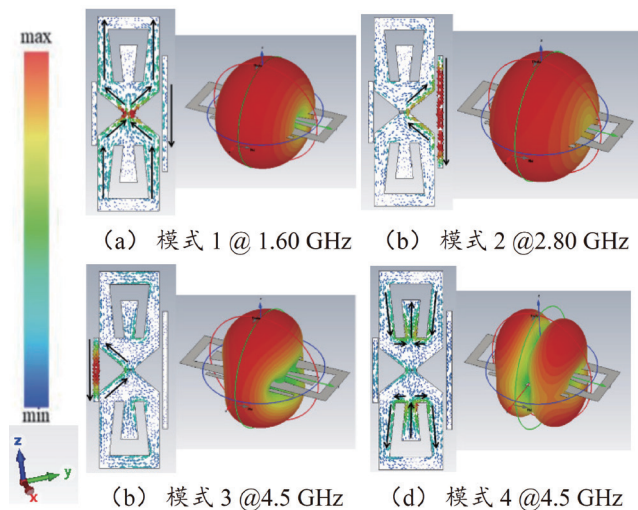


图 15 加载双寄生偶极子特征电流与特征远场

选择 Rogers5880 为介质基板，在商业电磁软件 HFSS 进行参数优化仿真。得到反射系数曲线，如图 16 所示。最终该天线的 $S_{11} < -10$ dB 相对带宽为 95.3% (1.49 GHz ~ 4.20 GHz)。

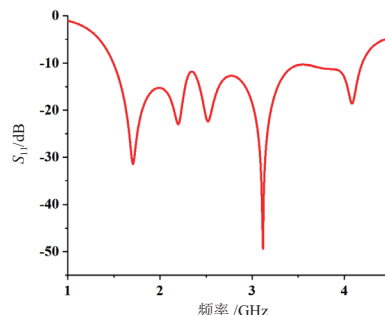


图 16 仿真优化后反射系数曲线

3 天线的仿真与测试分析

图 17 为加工的宽带偶极子谐振寄生天线实物，该天线印刷在介电常数为 2.2、厚度为 1.524 mm、损耗正切为 0.000 9 的 Rogers5880 上，天线采用 50 Ω 的 SMA 同轴连接器进行馈电。

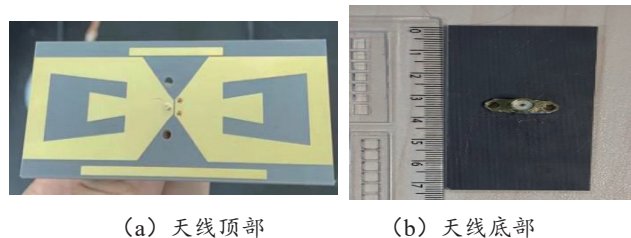


图 17 天线加工实物图

该天线的仿真与实测反射系数对比曲线如图 18 所示，可看出实测 $S_{11} < -10$ dB 的带宽为 1.47 GHz ~ 4.22 GHz，相对带宽为 96.6%，与仿真反射系数结果相比，曲线整体变化趋势基本上一致。天线仿真与测试的误差在可接受的范围内，主要来源于加工以及测试误差。

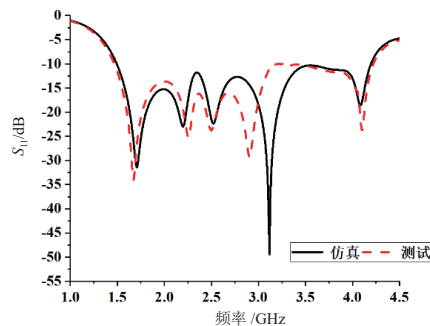


图 18 仿真与测试反射系数曲线

为了更好地说明所设计的宽带偶极子谐振寄生天线的优势，把该天线和其他传统谐振寄生偶极子进行比较，结果如表 2 所示，其中 λ_0 为各天线 $S_{11} < -10$ dB 最低截止频率对应

波长，可以看出本文所设计天线较文献 [8-9] 在相对带宽有了明显的增加；相较于文献 [10-11]，不仅相对带宽明显增加，电尺寸也明显减小，故本文所设计的天线具有一定的优势。

表 2 本章所设计天线与其他谐振寄生偶极子的比较

天线	相对带宽 /%	天线电尺寸
文献 [8]	34.9	$0.42\lambda_0\times0.20\lambda_0\times0.003\lambda_0$
文献 [9]	44.2	$0.49\lambda_0\times0.25\lambda_0\times0.05\lambda_0$
文献 [10]	34.5	$1.68\lambda_0\times0.63\lambda_0\times0.168\lambda_0$
文献 [11]	11.2	$0.98\lambda_0\times0.79\lambda_0\times0.014\lambda_0$
本文	96.6	$0.35\lambda_0\times0.16\lambda_0\times0.007\lambda_0$

4 结论

本文利用特征模式分析法，设计了一种结构简单的开槽超宽带偶极子天线。该天线由偶极子和两侧长短不一的寄生单元组成。通过对偶极子进行裁角增加其宽带模式潜力，又加载两个长短不一的寄生谐振结构来进一步拓宽带宽，最后进行开槽来创造新的特征模式。经过加工测试验证，测试结果表明该宽带偶极子谐振寄生天线的相对带宽为 96.6%（1.47 GHz~4.22 GHz）。其电尺寸为 $0.35\lambda_0\times0.16\lambda_0\times0.007\lambda_0$ 。相较于传统的多谐振偶极子天线带宽提升了 50% 以上，且该天线的电尺寸也小于传统的多谐振偶极子天线。

参考文献：

[1] ELIAS B B Q, SOH P J, AL-HADI A A, et al. A wideband wearable antenna using inverse partial ground designed using characteristic mode analysis[C/OL]//2020 IEEE International RF and Microwave Conference (RFM).Piscataway:IEEE,2021[2024-06-11].https://ieeexplore.ieee.org/document/9344791.DOI:10.1109/RFM50841.2020.9344791.

[2] QI J Q, WANG Y X, NIE L Y, et al. Design of wideband microstrip antenna based on characteristic mode analysis[C/OL]//2023 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China). Piscataway:IEEE,2023[2024-09-12].https://ieeexplore.ieee.org/document/10249820.DOI:10.23919/ACES-China60289.2023.10249820.

[3] 王岩, 李奕欣, 王昊, 等. 基于特征模理论的超宽带单极子天线设计[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(11): 3078-3085.

[4] WEN D L, HAO Y, WANG H Y, et al. Design of a triple-

mode wideband antenna using theory of characteristic modes[C/OL]//2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting.Piscataway:IEEE,2018[2024-09-25].https://ieeexplore.ieee.org/document/8608607. DOI: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8608607.

[5] XIONG X L, LIU Y J, XIAO D, et al. Miniaturized broadband metasurface antenna using characteristic mode analysis[C/OL]//2023 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS).Piscataway:IEEE,2023[2024-05-11].https://ieeexplore.ieee.org/document/10222275.DOI:10.1109/IWS58240.2023.10222275.

[6] ZHANG Z M, CHENG Y Z, Luo H, et al. Low-profile wideband circular polarization metasurface antenna with characteristic mode analysis and mode suppression[J]. IEEE antennas and wireless propagation Letters, 2023,22(4): 898-902.

[7] 周毅江, 陈星. 基于特征模的多频电小近场谐振天线设计[J]. 信息技术与信息化, 2023(4):166-169.

[8] 杨国, 肖如奇, 沈飘飘, 等. 宽带多谐振偶极子天线设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(5): 136-142.

[9] WEN D L, HAO Y, WANG H Y, 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.

[10] 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.

[11] LUO Y, CHEN Z N, MA K X. 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.

【作者简介】

刘伟（1974—），男，四川德阳人，本科，高级工程师，研究方向：5G 自组网、战术末端跨域通信网络。
（收稿日期：2024-12-25 修回日期：2025-04-29）