

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.04.011

基于特征模分析的菱形宽带天线设计

计方正¹, 姜兆能², 聂丽瑛², 宣晓峰¹

(1. 合肥工业大学 微电子学院, 安徽 合肥 230601; 2. 合肥工业大学 计算机与信息学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:文章通过特征模分析提出一种结构简单的菱形超表面天线, 天线沿Y轴对称, 由6个菱形贴片和2个修改后的菱形贴片组成。修改后的菱形天线增强所需水平方向的宽边辐射, 减弱垂直方向的电流强度。电场耦合槽为馈电部分并且本身可以看作半波缝隙天线引入新谐振点增加天线带宽; 天线结构紧凑, 尺寸仅为 $0.60\lambda_0 \times 0.55\lambda_0$ (λ_0 为中心频率对应的空间自由波长)。仿真结果表明, 该天线频率在4.5~6.2 GHz范围内能够实现-10 dB带宽, 相对带宽达到31.8%, 高低频中心的谐振点分别为4.78、5.88 GHz。天线工作时的辐射性能良好, 在方向图带宽内增益大于6 dB。

关键词:特征模分析; 超宽带; 低剖面; 微带天线; 菱形贴片

中图分类号: TN822.3

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2024)04-0502-06

Design of diamond-shaped wideband antenna based on characteristic mode analysis

JI Fangzheng¹, JIANG Zhaoneng², NIE Liying², XUAN Xiaofeng¹

(1. School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: A kind of diamond-shaped metasurface antenna with simple structure is proposed through characteristic mode analysis (CMA). The antenna is symmetrical along the Y-axis and composed of six diamond-shaped patches and two modified diamond-shaped patches. The modified diamond-shaped antenna enhances the required broadside radiation in the horizontal direction and weakens the current intensity in the vertical direction. The electric field coupling slot is the feeding part and can be regarded as a half-wave slot antenna introducing a new resonance point to increase the antenna bandwidth. The antenna has a compact structure and the size is only $0.60\lambda_0 \times 0.55\lambda_0$ (λ_0 is the free space wavelength corresponding to the center frequency). The simulation results show that the antenna can achieve a -10 dB bandwidth at 4.5-6.2 GHz, and a relative bandwidth of 31.8%. The resonance points of the high and low frequency centers are 4.78 GHz and 5.88 GHz, respectively. The radiation performance of the antenna is good, and the gain is greater than 6 dB in the pattern bandwidth.

Key words: characteristic mode analysis (CMA); ultra-wideband; low profile; microstrip patch antenna; diamond-shaped patch

传统微带天线具有低剖面、易共形、加工方便等优点, 但其物理特性也决定了其带宽窄、效率

低, 因此具有固有的窄带特性。近年来有研究表明, 超表面在控制电磁波方面具有丰富的潜力, 将

收稿日期: 2022-01-14; 修回日期: 2022-03-03

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(1608085MF124); 合肥工业大学产学研校企合作资助项目(W2021JSKF0153; W2020JSFW0112)和合肥工业大学教师计划资助项目(JZ2019HGTTB0093)

作者简介: 计方正(1997—), 男, 安徽合肥人, 合肥工业大学硕士生;

姜兆能(1985—), 男, 江苏连云港人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: jiangzhaoneng@hfut.edu.cn.

超表面应用于微带天线,可以在保持天线低剖面特性的基础上,增加天线带宽。特征模理论因其对天线结构的独特分析理论,从本质上解释了天线的辐射机理,为天线设计领域开辟了一条新的道路。近年来,应用特征模理论进行天线设计的研究层出不穷,不少研究者以此来发现天线结构的潜在模式,以寻找最佳激励位置,从而设计宽带^[1-2]、全向^[3]、多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)天线^[4-6]、圆极化^[7-9]、超表面^[10-14]等类型的天线。

应用特征模理论分析设计微带天线时,首先通过对微带天线结构的特征模式进行分析,了解其辐射原理,最重要的是根据特征电流或特征电场分布修改贴片形状和优化馈电位置,以此实现天线最佳性能。文献[15]研究电感耦合激励(inductively coupled excitation, ICE),激励结构通过挖槽实现,同样在电流最强处(磁场最强处)挖去一个细长的窄缝,在窄缝的下边沿放置一个 1 V 的电压源作为激励,因为只在贴片的一侧设置了 ICE 激励结构,所以激励的总体程度不高;文献[16]研究一种探针馈电超表面天线,利用 3 个特征模式提出减少背面辐射的操作,但馈电网络需要特殊定制导致结构复杂;文献[17]研究利用激励 2 种不同的模式实现圆极化辐射,达到 53.25% 的相对带宽,由于加入空气层导致天线整体的剖面较高;文献[18]利用几个具有相同中心的椭圆,馈电采用类似偶极子的方式实现阻抗匹配,相对带宽为 21%,同样馈电结构较复杂。

本文提出一种结构简单的新型菱形超表面天线,在所激励的菱形贴片模式磁场(电流)最大处通过缝隙耦合馈电引入一个低频的辐射模式,即新的低频谐振点成功增加天线的带宽。同时,修改的贴片在不影响所需模式的前提下减弱不需要方向上辐射的强度,改善高频方向图。

1 天线结构设计

设计的宽带天线结构共有 5 层,分别是 2 层介质板和 3 层金属层,天线外形视图如图 1 所示,天线的缝隙耦合层和底部的 Y 型馈电层如图 2 所示。上层采用的介质板材料为 FR4,介电常数为 4.4、介质高度为 3.5 mm,下层材料为罗杰斯 5880,介电常数为 2.2、介质高度为 0.4 mm;金属层从上到下依次为超表面层、金属地板、微带馈线。优化后的超表面由 6 个大小相等的菱形贴片和 2 个三角形贴片构成,尺寸已优化,每个菱形贴

片短半轴 $a=4.5$ mm,长半轴 $b=5.0$ mm,馈线部分为 50Ω ,等功分器部分馈线特征阻抗为 100Ω ,天线设计均采用 CST 2021 进行仿真,天线整体尺寸为 $32.5 \text{ mm} \times 30.0 \text{ mm} \times 3.9 \text{ mm}$,优化后的天线参数见表 1 所列。

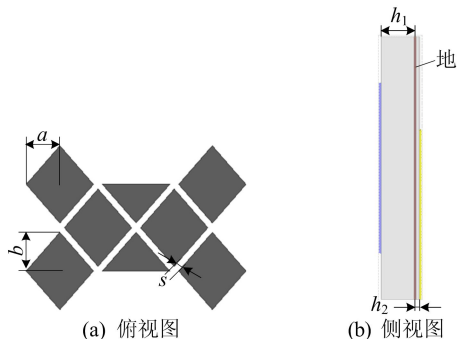


图 1 天线外形视图

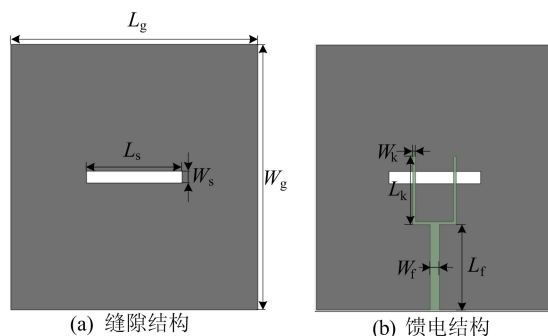


图 2 天线的缝隙耦合层和底部的 Y 型馈电层

表 1 天线结构参数 单位:mm

参数	数值	参数	数值
a	4.5	L_k	10.0
b	5.0	L_s	11.6
s	0.4	W_s	1.5
h_1	3.5	W_f	1.2
h_2	0.4	W_k	0.3
L_f	10.5	W_g	32.5
L_g	30.0		

2 天线设计过程和特征模分析

初始菱形超表面贴片如图 3 所示。首先对由 8 个相同大小的间隔为 s 菱形单元构成的超表面进行模式分析,模式显著性(modal significance, MS)曲线如图 4 所示,其中占主要作用的谐振模式有模式 1、模式 2、模式 3、模式 4。频率为 5.5 GHz 时各模式电流分布如图 5 所示,由图 5a 可知:模式 1 是期望激励的宽边辐射模式,模式 1 电流沿 Y 轴纵向分布,模式 2 沿 X 轴分布,为模式 1 的正交模式;虽然模式 3 电流方向沿 Y 轴,但

左右两侧电流流向相反,相反电流的交界处会形成电场零点;同样模式 4 是电流沿 X 轴,左右两侧流向也是相反的模式。模式 1 的 MS 值在 0.7 以上覆盖的潜在工作频率为 5.25~7.00 GHz,需要更进一步地观察该模式在各个频率处电流的分布,分析电流变化的趋势。

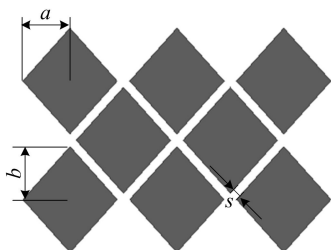


图 3 初始菱形超表面贴片

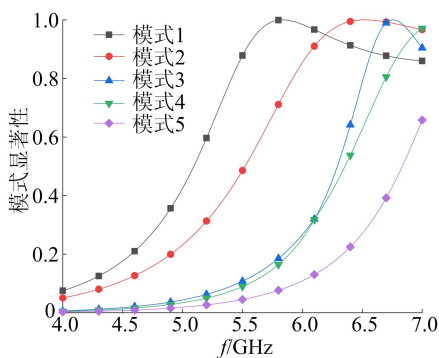


图 4 模式显著性曲线

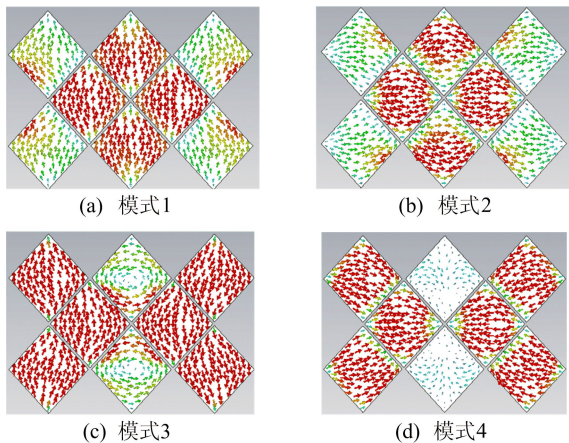


图 5 频率为 5.5 GHz 时各模式电流分布

模式 1 下不同频率的电流分布如图 6 所示,由图 6 可知,在各个频率处电流主要集中在中间 4 个贴片上,此外水平相邻的 2 个贴片电流最强,因为等幅同相激励 4 个贴片的电流馈电网络设计难度太大,可以考虑耦合激励这 2 个贴片将天线的潜在带宽激励出来,所以势必要将高、低频电流均集中在水平相邻的 2 个贴片上,这样考虑实际

情况天线才容易被激励,因此需减弱垂直相邻的 2 个贴片的电流强度,使得起到向外辐射作用的主要为水平相邻的 2 个贴片。

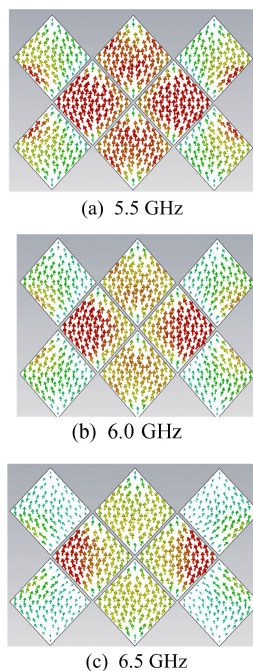


图 6 模式 1 下各频率的电流分布

改进后天线贴片主要将中间垂直相邻的 2 个菱形贴片减小,Y 轴方向上贴片长度减小可以减弱其上的电流分布,馈电网络的位置会更容易激发模式 1,同时还抑制了模式 2、模式 4,模式 3 两边的电流相反也不容易被激励。改进后贴片的模式显著性曲线如图 7 所示。

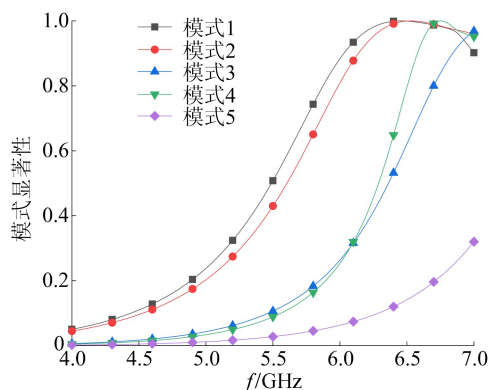


图 7 改进后模式显著性曲线

由图 7 可知,改进后的贴片模式 1 的谐振频段略向高频偏移,MS 值 0.7 以上覆盖的潜在带宽为 5.75~7.00 GHz,其模式电流分布如图 8 所示。由图 8 可知,中间垂直相邻的 2 个贴片电流在各个频率处都很微弱,不起辐射作用,电流此时主要集中在水平相邻的 2 个贴片上,因而设置合

适的激励结构耦合起水平贴片上的电流便可激励起该模式。

采用耦合馈电的方法,在正对着贴片下方的地板中心开槽,槽两端的电流分布恰好可以耦合出上层贴片的模式电流分布,通过在地板的下方引入一分为二的馈电网络,缝隙受到微带传输线中的能量激励不仅可以形成槽两端沿 Y 轴的电流分布,进而可以耦合激励贴片上的模式,采用这种地板开槽耦合馈电的另一个原因是地板上开缝隙只要尺寸合适(槽长约为半个波长),本身就是一个半波缝隙天线,现对开槽后的地板进行特征模式分析,模式显著性曲线如图 9 所示。

由图 9 可知,这种半波缝隙辐射模式谐振的潜在工作频率为 4.0~6.0 GHz,通过地板开槽可以很好地引入一个低频模式,这种地板缝隙模式是双向辐射的。

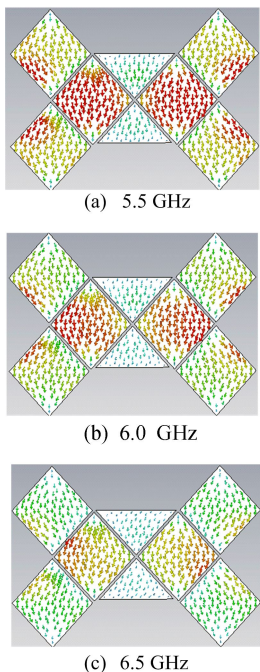


图 8 改进后模式 1 下各频率的电流分布

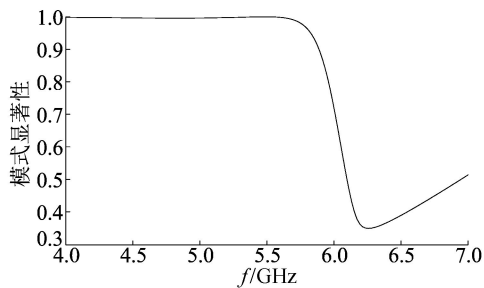


图 9 缝隙模式显著性曲线

因为地板开了缝隙,所以需要整体结构进行特征模分析,模式显著性曲线如图 10 所示。

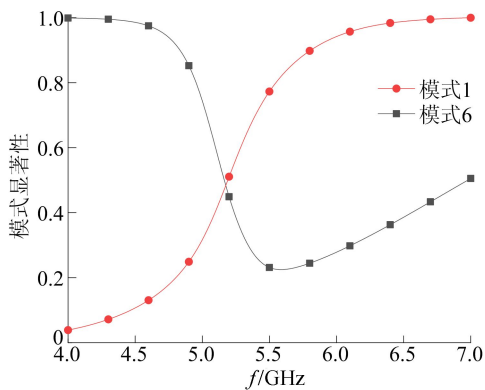
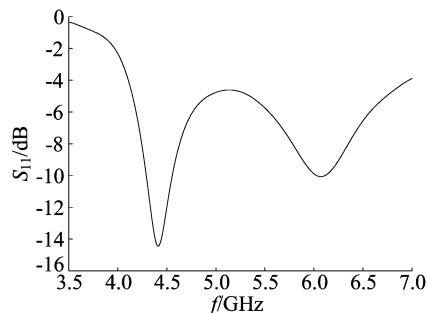


图 10 整体模式显著性曲线

由图 10 可知,这 2 种模式相互耦合相较于单独分析时频率有些偏移。2 种模式的结合使上层贴片有 2 种沿 Y 轴纵向的电流分布,超表面本身谐振在高频段,由于地板开槽模式的加入,2 种模式的相互作用使得超表面在低频段也可以产生谐振,低频段的谐振主要是地板缝隙模式贡献的结果,耦合的效果使水平相邻的 2 个贴片的电流谐振路径变长,于是出现了低频处的谐振点,可以将低频模式(模式 6)命名为槽模式,高频模式(模式 1)命名为超表面模式。

3 天线仿真结果分析

贴片未修改和修改后的 S_{11} 曲线如图 11 所示,由图 11b 可知,天线最终实现的 -10 dB 带宽的频率范围为 4.5~6.2 GHz,相对带宽 31.8%,成功将 2 个模式激励形成宽带。通过对比图 11a、图 11b 可知,若不修改贴片尺寸,其低频处是可以激励起来的,但高频处的激励效果远远不如修改尺寸后的结果,原因是高频时电流集中在中间 4 个贴片,只激励水平相邻的 2 个贴片导致激励程度不够高,这一点也显示出特征模分析过程中,利用模式电流随频率的变化趋势进而修改贴片形状的有效性。地板槽长 L_s 和上层菱形贴片长半轴 b 扫描结果分别如图 12 所示。



(a) 贴片未修改

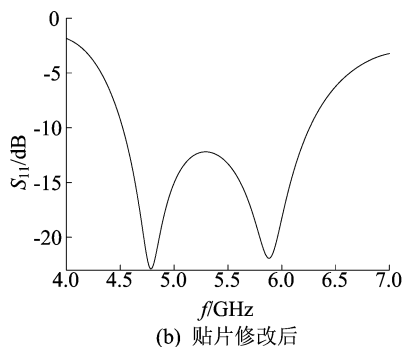


图 11 贴片未修改和修改后的 S_{11} 曲线

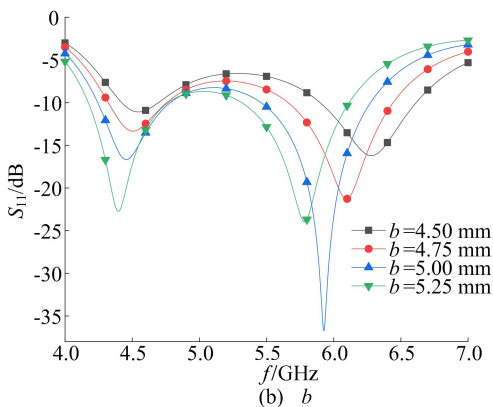
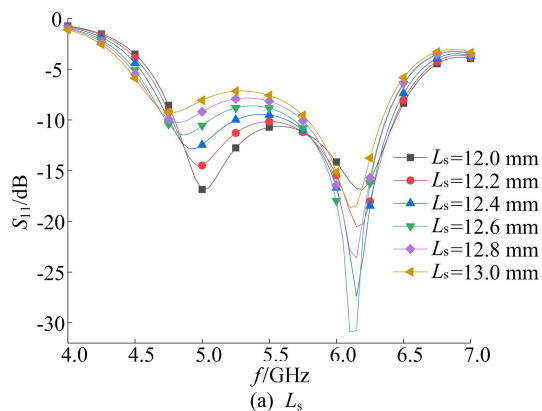


图 12 参数 L_s 、 b 扫描结果

由图 12 可知:槽的长度主要影响低频谐振点,槽越长其半波谐振模式对应的谐振频点越低,槽长对高频谐振点并没有很大的影响,与之前槽模式的分析结果一致;长半轴 b 主要影响菱形贴片纵向尺寸,从而影响电流路径的长短,从优化结果可知,随着贴片纵向尺寸的增大,高低频谐振点均有向低频移动的趋势,但高频影响更为显著,因此纵向尺寸主要影响高频谐振点。

天线 E 面和 H 面的增益方向图如图 13、图 14 所示。图 13、图 14 中, φ 为天线切向角。由图 13、图 14 可知,天线的最大增益方向基本沿 Z 轴,且天线辐射比较均匀,此外在低频时天线的后瓣比高频的大许多,主要原因是低频时天线地板缝

隙模式做了很大的贡献,地板模式的激发是双向辐射的,因而后瓣稍大。天线的峰值增益曲线如图 15 所示,频率在 5.0~6.5 GHz 范围内,增益均大于 6 dB。

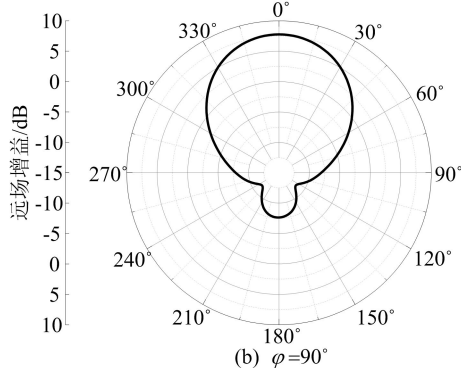
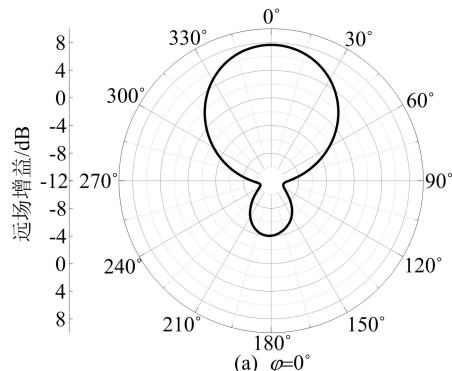


图 13 4.6 GHz 时增益方向图

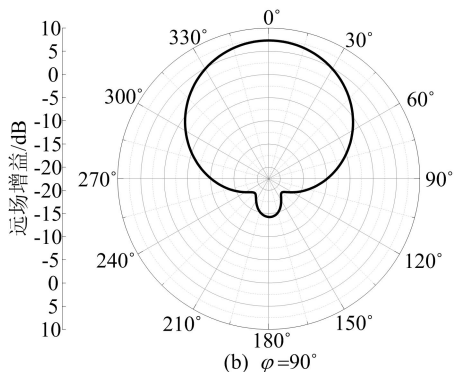
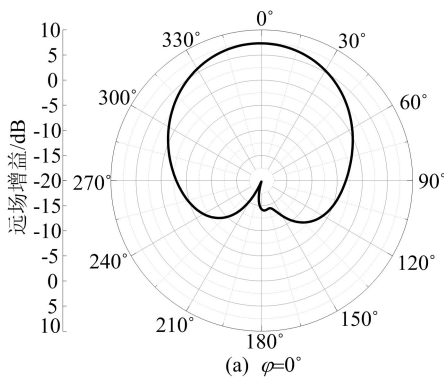


图 14 5.9 GHz 时增益方向图

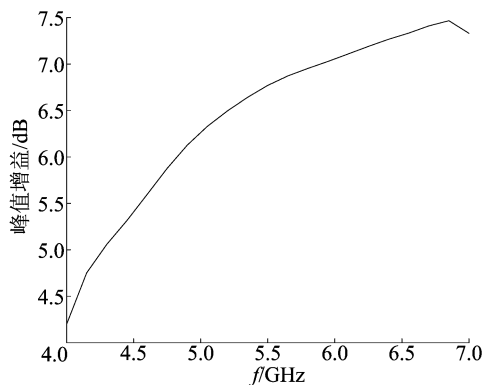


图15 峰值增益曲线

4 结 论

本文提出一种结构简单的新型菱形超表面天线,首先分析基本菱形周期天线特征模式,进行贴片形状的修改并有效选择激励位置和方式,将期望模式1的潜在带宽拓宽,该天线频率在4.5~6.2 GHz范围内能够实现-10 dB带宽,相对带宽达到31.8%,高低频中心的谐振点分别为4.78、5.88 GHz。天线工作时的辐射性能良好,在方向图带宽内增益大于6 dB,实现高增益定向、宽带、结构紧凑的性能要求。

[参 考 文 献]

[1] 付蓉. 基于特征模理论的宽带天线设计[D]. 西安:西安电子科技大学,2017.

[2] 李腾, 窦文斌. 基于特征模分析的宽带双频毫米波天线设计[C]//2019年全国天线年会论文集(中册). 西安:西安电子科技大学出版社,2019:240-242.

[3] YANG X, LIU Y, GONG S. Design of a wideband omnidirectional antenna with characteristic mode analysis [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17:993-997.

[4] 吕爱波. 基于特征模理论的高隔离度 MIMO 天线的设计[D]. 西安:西安电子科技大学,2017.

[5] 王晓. 特征模理论及其在 UWB MIMO 天线设计中的应用[D]. 成都:电子科技大学,2017.

[6] SINGH H V, TRIPATHI S, VADDI R. Systematic design of dual-band MIMO antenna using characteristic mode analysis[C]//2018 5th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical Proceedings. [S. l.]: IEEE, 2018:1-6.

[7] 汪承慧, 陈益凯, 杨仕文. 基于特征模理论的带宽增强型平台集成天线设计[C]//2019年全国微波毫米波会议论文集:下册. 上海:中国电子学会微波分会,2019:432-434.

[8] DONG J, WANG S, MO J. Design of a twelve-port MIMO antenna system for multi-mode 4G/5G smartphone applications based on characteristic mode analysis [J]. IEEE Access, 2020, 8:90751-90759.

[9] 陶醉. 基于超材料与超表面的新型天线研究[D]. 南京:东南大学,2018.

[10] 梁志鹏. 基于特征模理论的天线及阵列优化设计研究[D]. 成都:电子科技大学,2019.

[11] LIN F H, CHEN Z N. Low-profile wideband metasurface antennas using characteristic mode analysis [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2017, 65:1706-1713.

[12] LIN F H, LI T, CHEN Z N. Recent progress in metasurface antennas using characteristic mode analysis[C]//2019 13th European Conference on Antennas and Propagation Proceedings. [S. l.]: IEEE, 2019:1-5.

[13] LIANG Z, OUYANG J, FENG Y. Design and characteristic mode analysis of a low-profile wideband patch antenna using metasurface [J]. Journal of Electromagnetic Waves & Applications, 2018, 6:1-10.

[14] LIN F H, CHEN Z 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, 69:3512-3516.

[15] MARTENS R, SAFIN E, MANTEUFFEL D. Inductive and capacitive excitation of the characteristic modes of small terminals [C]//2011 Loughborough Antennas & Propagation Conference Proceedings. [S. l.]: IEEE, 2011:1-4.

[16] LIN F H, CHEN Z L. Probe-fed broadband low-profile metasurface antennas using characteristic mode analysis [C]//2017 IEEE 6th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation Proceedings. [S. l.]: IEEE, 2017:1-3.

[17] LIU M, LU Z L, PENG Q. Metasurface broadband circularly polarized antenna with characteristic mode theory [C]//2021 IEEE 3rd International Conference on Communications Proceedings. [S. l.]: IEEE, 2021:100-104.

[18] ZHANG Q Y, MA R, SU W, et al. Design of a multimode UWB antenna using characteristic mode analysis [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2018, 66:3712-3717.

(责任编辑 张 镝)