

# 基于特征模的宽带高增益超表面天线设计

李佩弦, 顾鹏飞\*, 包华广, 何 姿, 樊振宏, 丁大志

(南京理工大学微系统集成技术系, 江苏南京 210094)

**摘要:** 为了满足 C 波段军事设备对高性能天线的需求, 提出了一款宽带高增益超表面天线. 该天线将超表面直接作为辐射器, 并将超表面与高阻抗表面结构相结合, 在低剖面、小型化的前提下, 实现了宽带高增益的高性能; 提出了超表面天线的等效电路模型; 运用特征模分析, 展示了一款天线从“零”到“一”的设计过程. 分析了天线工程师关心的加工成本问题, 并进行了天线样机的加工与测试. 实测结果表明, 在 5~7.5 GHz (40%) 的频段, 反射系数小于 -10 dB, 峰值增益 9.9 dBi, 实测结果与仿真结果具有较好的一致性.

**关键词:** 特征模; 超表面天线; 宽带; 高增益; C 波段

**基金项目:** 国家自然科学基金 (No.62271256, No.62025109, No.62231016, No.32261133623, No.61931021); 江苏省重点研发计划 (No.BE2022070, No.BE2022070-1)

**中图分类号:** TN823

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2024)12-3931-10

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20231107

## Design of Broadband and High Gain Metasurface Antenna Based on Characteristic Mode Analysis

LI Pei-xian, GU Peng-fei\*, BAO Hua-guang, HE Zi, FAN Zhen-hong, DING Da-zhi

(Department of Microsystems Integration Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract:** In the paper, a broadband and high gain metasurface antenna is proposed for meeting the demand of high performance antenna for C-band military equipment. The antenna uses the metasurface directly as the radiator and combines with the high-impedance-surface to achieve the high performance of broadband high gain with low profile and miniaturization. The equivalent circuit of the metasurface antenna is proposed. Characteristic mode analysis is applied to demonstrate the design process of an antenna. The processing cost, which antenna engineers concerned, is analyzed. The prototype antenna is processed and tested. The measured results show that the reflection coefficient is less than -10 dB and the peak gain is 9.9 dBi in the band from 5 GHz to 7.5 GHz (40%), and the measured results are in good agreement with the simulation results.

**Key words:** characteristic mode; metasurface antenna; broadband; high gain; C band

**Foundation Item(s):** National Natural Science Foundation of China (No.62271256, No.62025109, No.62231016, No.32261133623, No.61931021); Primary Research and Development Plan of Jiangsu Province (No.BE2022070, No.BE2022070-1)

### 1 引言

超表面作为一种二维结构的超材料, 在过去数十年内吸引了很多专家和学者的注意. 因为与体积庞大的超材料相比, 它具有很明显的优势, 如低剖面、低损耗、轻重量、易于加工等特点<sup>[1-3]</sup>. 基于超表面有许多应用, 这些应用的思路都是通过加载超表面, 使得天线可以获得更好性能表现, 如扩展带宽<sup>[4-7]</sup>、改善方向图<sup>[8,9]</sup>、

实现隐身<sup>[10-13]</sup>等. 虽然超表面具有吸波、透波、极化转换等调控电磁波的优异性能, 如果在天线结构上方加载超表面, 则不可避免地提高了天线的剖面高度, 同时会使得结构和加工变得复杂; 如果在天线四周直接组合超表面, 则会扩大天线的横向尺寸, 减小效率. 而超表面天线对超表面结构进行精心设计, 继而直接在超表面上添加激励结构, 从而可以使得超表面本身便能

作为一种天线来发射电磁波。其简单易加工、低剖面、高效率的优点不言而喻。传统解析方法难以解决的大量天线问题可以通过商用仿真软件(如 CST、HFSS、FEKO、XFDTD、IE3D 等)进行处理。通过商用电磁仿真软件,可以对天线的性能进行优化和预测。但是,由于商业软件只能提供天线模型最终的设计结果,而不能揭示天线工作的内在机理,导致天线设计仍然十分依赖于天线工程师的经验和设计者不断的尝试。这种情况下,天线的优化具有盲目性。随着电子计算机技术和计算电磁学理论的蓬勃发展,使用商业仿真软件进行辅助的天线设计成为主流,商业仿真软件也开始嵌入特征模分析的模块,这使得特征模分析的过程得到了简化,因此特征模理论渐渐得到了天线工程师的重视和青睐,并在最近二十多年内发展迅速。将特征模分析方法与超表面天线结合,具有物理机制明晰、可以避免依赖经验的盲目调参的优点。基于特征模理论,文献[14]首次设计了一款宽带超表面天线,其阻抗带宽达到 25.4%,文献[15]基于特征模设计了一款枝节容性加载的圆极化小型化超表面天线,其阻抗带宽为 21%、3 dB 阻抗带宽为 8.5%。文献[16]基于不规则圆形单元设计了一种可穿戴圆极化天线,该天线可以用于 5G WLAN 频段,通过平均吸收率证明了其对人体无害,文献[17]利用非均匀激励的基底集成间隙波导(Substrate Integrated Gap Waveguide, SIGW)馈电超表面天线阵列,实现了 Ka 波段的宽带和低副瓣电平设计。针对电子战对天线提出宽带高增益的需求,文献[18,19]分别采用谐振腔和超透镜提高增益,文献[20]采用截断阻抗表面实现 45% 的宽工作频带。基于超表面的天线有许多应用,这些应用的思路都是通过加载超表面,使得天线可以获得更好性能表现,如扩展带宽、改善方向图、实现隐身等。但缺点是应用时如果在天线结构上方直接加载超表面,则不可避免地提高了天线的剖面高度,同时会使得结构和加工变得复杂;如果在天线四周直接组合超表面,则会扩大天线的横向尺寸,降低效率。面对现在通信系统对天线提出的宽带、高增益、小型化以及低成本需求,现有的超表面天线无法同时兼顾,具有局限性。

本文从圆形超表面出发,通过特征模分析,首先得到超表面的固有模式,然后在适当位置引入缝隙和容性短路钉,在低频段引入了新的谐振模式,通过合理的激励结构同时激发起了低频模式和超表面固有的高频模式,使超表面天线实现了宽带特性;分析了孔径耦合馈电型超表面天线的等效电路模型和各个参数对于阻抗匹配的影响;进行了高阻抗超表面的单元和阵列设计,达到了抑制表面波,缩小天线尺寸,提高带宽和效率的效果。

## 2 特征模分析理论

特征模分析(Characteristic Mode Analysis, CMA)指出导体表面电流由模式电流加权构成,各个模式之间互相正交,其表达式为

$$\mathbf{J} = \alpha_n \mathbf{J}_n \quad (1)$$

式中,  $\alpha_n$  为模式权重系数;  $\mathbf{J}_n$  为模式电流。模式电流只与导体结构、材料、边界有关,与外加激励无关。

在特征模分析中,模式重要性(Modal Significance, MS)表示该模式被激励的难易程度,该值趋近于 1,则表示该模式更易于实现。一般来说,当模式重要性值大于 0.707 时,即可以认为该模式是易于实现的,其表达式为

$$MS = \left| \frac{1}{1 + j\lambda_n} \right| \quad (2)$$

式中,  $\lambda_n$  为对应各个模式的特征值。

特征模分析将最终天线呈现的电流、磁场、电场、远场方向图等分解成各种频率下的分析结果。天线设计中,可以通过特定频率的特征值、模式重要性、模式电流和模式方向图等特征模分析的结果,来对超表面单元形状、大小和激励的方式、位置进行辅助设计。商用软件 FEKO、HFSS 和 CST 均可用来进行特征模分析。为了清晰地阐释所提出的超表面天线的物理本质,本节基于特征模理论,研究了这款超表面天线所利用的特征模式。本节采用 CST Studio Suite 2021 中的多层求解器进行特征模分析。对于天线的特征模分析流程图如图 1 所示。从最基础的超表面出发,阐述了如何借助模式重要性、模式电流和模式方向图来选择意图激发和抑制的模式,进而决定如何有理有据地对超表面天线的单元形状、大小、馈电方式、加载方式进行改进,以此扩展超表面天线的阻抗带宽、提高增益,展示了一款天线从“零”到“一”的完整设计过程。

## 3 超表面天线的设计与分析

### 3.1 天线结构设计

初始超表面由 Rogers 4003C 介质基板和印制在其上的 3 行 3 列的 9 个圆形金属贴片组成,其几何图形如图 2 所示。圆形贴片的直径为 8.5 mm,介质基板的边长为 40 mm,厚度为 3.454 mm,贴片阵列放置在介质基板的中央。

### 3.2 面阵设计

#### 3.2.1 初始超表面的特征模分析

初始超表面由 Rogers 4003C 介质基板和印制在其上的 3 行 3 列的 9 个圆形金属贴片组成,其几何图形和在仿真软件中的边界设置如图 3 所示。圆形贴片的直径为 8.5 mm,介质基板的边长为 40 mm,厚度为 3.454 mm,贴片阵列放置在介质基板的中央。设置

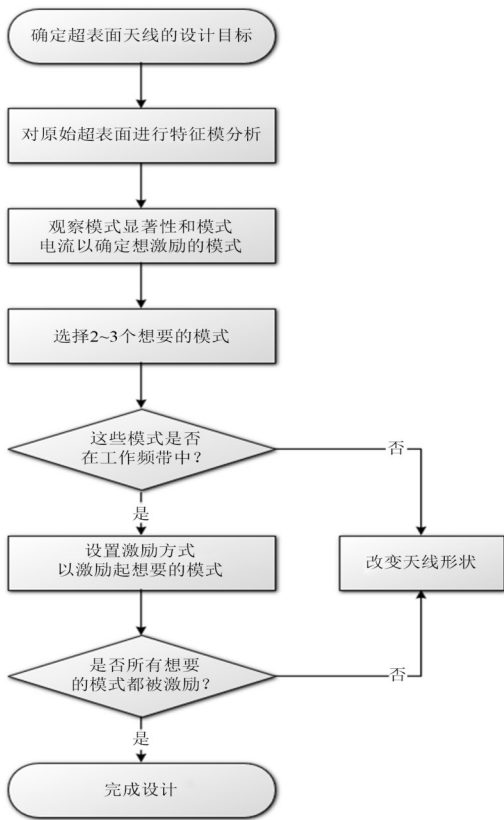


图1 天线的特征模分析流程图

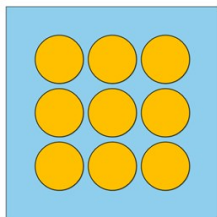


图2 天线结构图

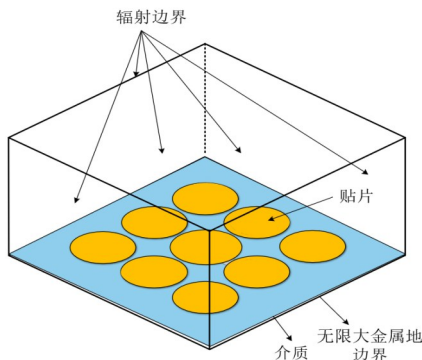


图3 初始超表面在特征模分析下的边界设置

6 GHz 为求解频率,对其进行特征模分析.

图4为前八个模式的模式重要性图.其中,模式一与模式二是一对简并模,表现在模式一和模式二具有非常相似的模式重要性曲线;模式三与模式五具有相

近的谐振频率;模式七与模式八具有相近的谐振频率.

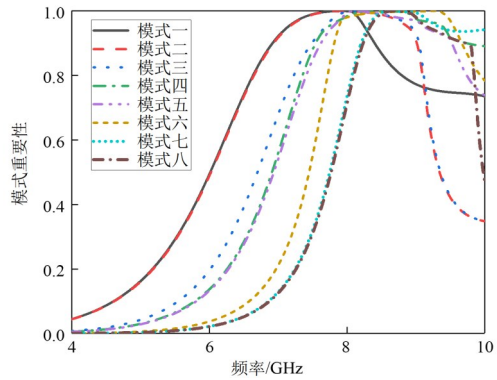
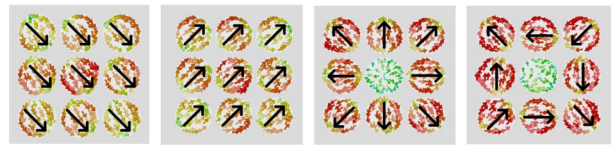


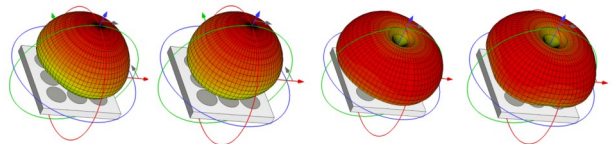
图4 初始超表面前八个模式的模式重要性曲线

图5和图6分别显示了前四个模式的模式电流分布图和模式方向图.可以看出,模式一与模式二的模式电流同向且相互正交,模式一与模式二的模式方向图在Z轴正方向均具有汇聚性,法线方向辐射最强.



(a) 模式一 (b) 模式二 (c) 模式三 (d) 模式四

图5 初始超表面前四个模式的模式电流



(a) 模式一 (b) 模式二 (c) 模式三 (d) 模式四

图6 初始超表面前四个模式的模式方向图

由于良好的谐振和模式方向图特性,模式一或模式二是设计中期望被激励起来的模式,如果模式一或模式二被成功激励,那么初始超表面可以工作在目标频带的高频部分.

### 3.2.2 双模超表面特征模分析

接着引入一个新的特征模式构成双模天线扩展带宽.其思路是延长电流路径,增加感性,获得CMA中低频的新模式.

为了提高设计效率,并对高次模影响最小,首先选择在模式一的模式电流最大,而其余模式电流最小的中心贴片处开槽和加入短路柱.如图7所示,可以看出模式一向低频移动,如果其继续移动到4 GHz左右,同时激励起模式一、模式二则可以实现双模宽带天线.

但是继续扩大短路柱半径和增添短路柱的方法,均无法产生一个显著的低频模式.于是,进一步地对四

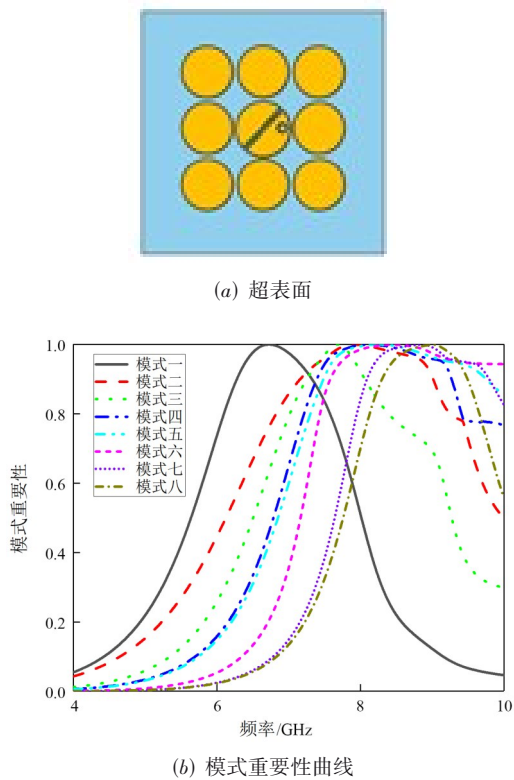


图7 开槽、加短路柱和扩大中心贴片后的超表面

周的8个单元进行调整。

对四周超表面进行米字形增强感性修改,它们在低频处都出现了一个很明显的新模式.为了证明对于中间单元修改的必要性,对中间单元也进行了米字形修改,但其没有带来新模式,如图8和图9所示.从图9可以得出,引入“米字形”超表面形状的改动后,在低频处出现了一个很明显的新模式,对于米字形超表面来说是模式五.而“全米字形”则没有这种特性,因此,选择对中心贴片保留图9(a)的设计。

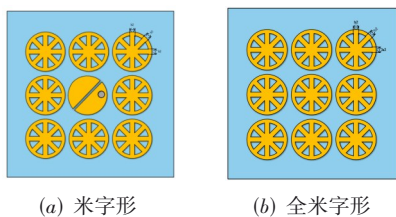


图8 对四周单元进行修形后的超表面

继续通过CMA发现新模式的方向图具有法向辐射特性,可以被视作一个期望模式,将其称为低频模式.由于米字形超表面单元具有更大的潜在带宽和辐射面积,因此,以其为例进行激励设计.至此,我们很快基于CMA完成了无激励的双模超表面的设计.通过以上的特征模分析,我们已经可以在添加馈电结构前得出判

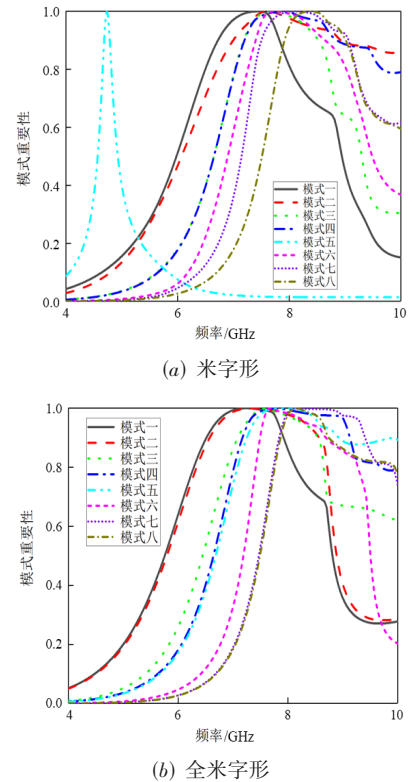


图9 模式重要性曲线

断:米字形超表面具有在4.7~7.6 GHz之间的潜在宽带特性。

### 3.2.3 超表面天线的等效电路与激励结构设计

图10显示了前8个模式的模式磁场.很显然,模式一、模式二和模式五模式磁场最大而其余模式的模式磁场较小处为超表面的横向对称轴处.如果同时激励双模,那么天线就可以获得预估的宽带特性.CMA激励分为容性和感性耦合激励.此处选择在模式电流最大处激励,从电流强度图可以看出,该处为超表面的横向对称轴处.因此,感性耦合激励可以在对其余模式的激励影响最小的前提下,激励起期望模式。

综合上述考虑,同时为了保持低剖面特性,对于这款米字形超表面天线选择感性耦合激励,即在地板上开横向窄槽后利用平面微带线进行孔径耦合激励.开槽位置选择在与模式一、模式二和模式五的模式电流平行,并且模式磁场最大处,以此来得到最大的孔径耦合效率。

超表面天线馈电结构分层示意图如图11所示.结合天线馈电结构分层示意图,提出孔径耦合超表面天线的等效电路,得出此类超表面天线的输入阻抗与缝隙长度、缝隙宽度、介质板厚度、馈线宽度、工作频率有关,对于其逐一进行讨论.考虑进缝隙和微带馈线,超表面天线完整的等效传输线模型如图12所示.其中,

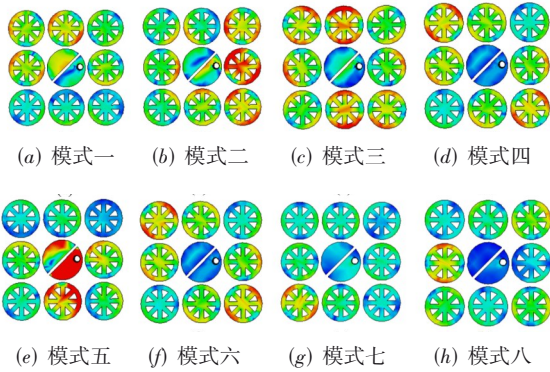


图 10 米字形超表面前八个模式的模式电流强度

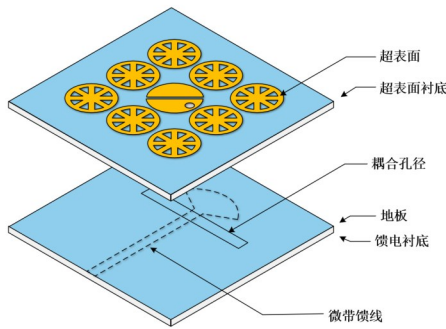


图 11 天线馈电结构分层示意图

缝隙等效为电容和电感的并联电路,微带馈线和馈线终端的用于改善阻抗匹配的扇形贴片等效为电容、电感、电阻的串联。

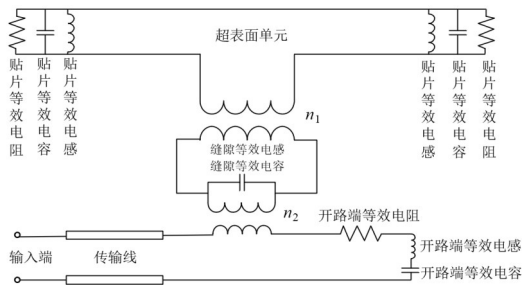


图 12 孔径耦合型超表面天线的传输线模型

馈线的宽度可由微带线特性阻抗公式计算得出,此类 C 波段超表面天线的介质厚度经验值为上层超表面衬底为 3.048 mm 或 3.454 mm 的 Rogers 4003C 介质板,下层馈电结构衬底为 0.508 mm 的 Rogers 4003C 介质板。

接着分析两层介质板的厚度分别为 3.048 mm 和 0.508 mm、3.454 mm 和 0.508 mm 两种组合下,微带馈线宽度为 1.1 mm 时,在工作频段内,史密斯圆图中的曲线随缝隙长度的变化。

如图 13 所示,随着缝隙长度的增加,阻抗匹配曲线逐渐外扩,低频处感性增强,高频处容性增强,先接近最佳匹配点,随后远离。确定了缝隙长度后,对缝隙宽

度进行以 0.2 mm 为步进的微调,曲线变化如图 14 所示。可见,当缝隙宽度过小时,会造成失配,随着缝隙宽度的增加,会对曲线与最佳匹配点的距离产生影响,但是这只是影响了谐振点的谐振程度,对于阻抗匹配带宽影响很小。

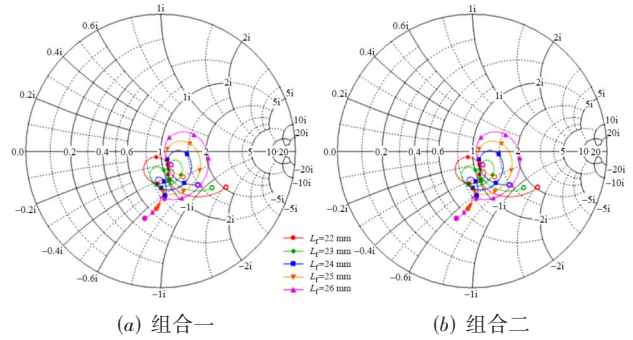


图 13 缝隙长度对阻抗匹配的影响

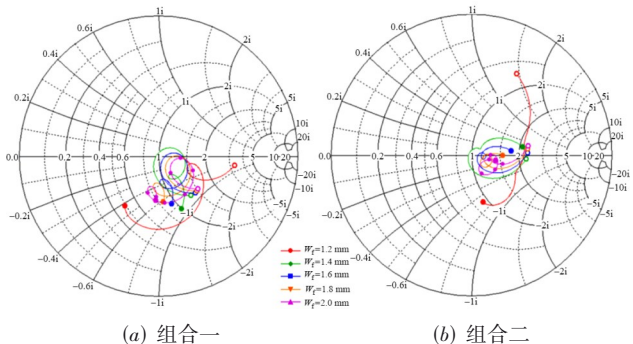


图 14 缝隙宽度对阻抗匹配的影响

可见,当缝隙宽度过小时,会造成失配,随着缝隙宽度的增加,会对曲线与最佳匹配点的距离产生影响,但是这只是影响了谐振点的谐振程度,对于阻抗匹配带宽影响很小。最终取得此类 3×3 的工作在 C 波段的孔径耦合馈电型超表面天线中,在缝隙宽度为 1.6 mm 处具有最佳阻抗匹配。

为了实现快速设计,在此类 3×3 的工作在 C 波段的孔径耦合馈电型超表面天线的后续设计中,当下层介质板厚度为 0.508 mm 时,缝隙长度可以考虑在  $0.75\lambda_d$  至  $0.9\lambda_d$  之间进行参数调整;缝隙宽度可以考虑在  $0.07\lambda_d$  至  $0.12\lambda_d$  之间进行参数调整,其中  $\lambda_d$  为介质中的等效波长。

### 3.2.4 高阻抗表面设计

通过特征模分析加入馈电结构后的超表面天线,分析地板边缘的模式电流较大,思考其原因是产生了表面波。由于地板尺寸有限,当地板上的表面电流传播到地板边缘时,由于截断效应,表面波将在远场对天线辐射的电磁波产生多径干扰,从而影响天线的辐射性能。Sievenpiper 曾提出抑制表面波的高阻抗表面(High Impedance Surface, HIS)<sup>[21]</sup>,其结构示意图如图 15 所示。

高阻抗表面结构包括金属贴片、嵌入金属通孔的介质基板和金属地板.

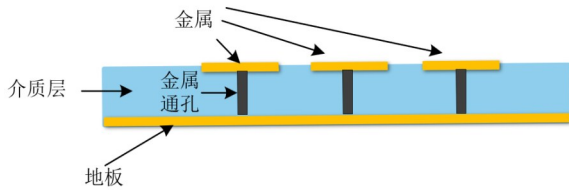


图15 高阻抗结构示意图

由高阻抗表面的理论可知高阻抗表面是一种带隙结构,进行了高阻抗设计的超表面贴片与电磁波相互作用,形成电流,电荷在超表面贴片边缘聚集,相邻贴片之间形成的电压可等效为电容 $C$ .超表面贴片上电荷沿金属通孔流动至金属地板形成电流,激发的磁场可等效成电感 $L$ .该结构可等效为并联LC谐振模型,其等效电容、等效电感近似式可由式(3)和式(4)表示<sup>[21]</sup>:

$$L = \mu_0 \mu_r t \quad (3)$$

$$C = \frac{w \varepsilon_0 (1 + \varepsilon_r)}{\pi} \cosh^{-1} \frac{a}{g} \quad (4)$$

其谐振频率为

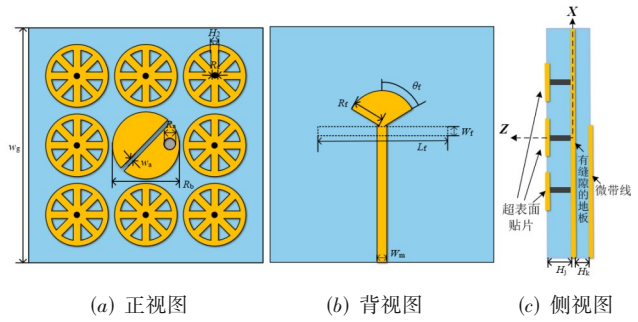
$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (5)$$

其中, $w$ 是表面金属贴片边长; $a$ 是超表面的周期长度, $g$ 是超表面贴片间的缝隙距离; $\mu_r$ 和 $\varepsilon_r$ 分别是介质层的相对磁导率和相对介电常数; $t$ 是介质层的厚度.

工作在带隙内的高阻抗表面具有对表面波的抑制作用.经过公式计算,将HIS与3.2.3节提出的超表面天线结合,可以获得4.6~7.6 GHz的电磁带隙频段.

进行高阻抗表面设计后的超表面天线如图16所示.此款超表面天线分为五层,从上往下观察,依次是超表面单元、带有金属柱的3.454 mm的Rogers 4003C介质板、中间开有对称矩形馈电槽的PEC板、厚度为0.508 mm的Rogers 4003C介质板和扇形微带馈线.超表面层一共有9个圆形单元,这些单元按3×3的方式排列.中心单元的尺寸直径为9 mm,其余单元具有相同的尺寸,直径为8.5 mm.中心单元上开了一道斜向上45°的窄缝隙,并打有直径为1.6 mm的金属柱.周围8个单元呈“米”字形,超表面贴片和地板之间有8个直径1 mm的短路金属柱.

图17是通过仿真软件得到的天线单元进行高阻抗表面设计前后的反射系数和增益的对比图.进行高阻抗表面设计后,由于减弱了地板边缘的表面波,抑制了互耦,在缩小天线口径面的情况下,超表面天线的带宽



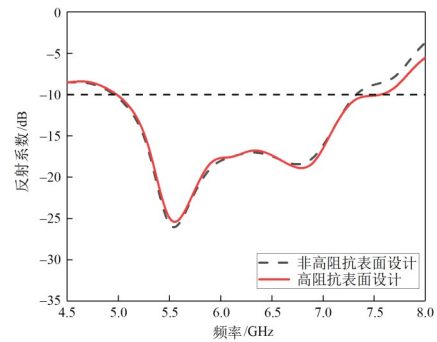
(a) 正视图

(b) 背视图

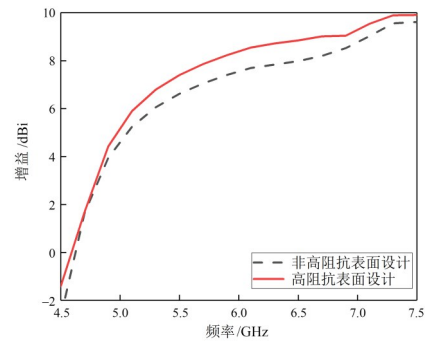
(c) 侧视图

图16 超表面天线的结构

仍然得到了扩展,达到了40%;增益在全频段内提高了0.3~0.8 dBi,峰值增益达到了9.9 dBi.



(a)  $S_{11}$



(b) 增益

图17 反射系数和增益的对比

## 4 天线加工与测试

### 4.1 加工成本分析

标准Rogers 4003C板材厚度为0.203 mm、0.305 mm、0.406 mm、0.508 mm、0.813 mm和1.524 mm.为了满足工作频段要求,应用于C波段超表面天线的上层超表面Rogers 4003C介质衬底厚度需要在3 mm以上.因此,实际加工中,为了获得相应厚度的介质衬底,需要对两到三层标准厚度的板材进行压合,而介质板和介质板的压合加工费是此款超表面天线样机加工成本的主要部分.在仿真设计中不能随意设定介质板厚度,以免设

设计出特殊尺寸给后续加工带来不便。

厚度大的基板会带来更高的带宽,但是耦合效果会变差,同时备板成本也会提高。在厚度、增益和加工成本之间做出权衡,是天线工程师在设计天线的过程中应该考虑的问题。

天线设计中常用的 3.048 mm 的介质板由两块 1.524 mm 介质板压合一次得到;3.454 mm 的介质板由 2 块 1.524 mm 介质板和 1 块 0.406 mm 介质板压合一次得到;4.572 mm 的介质板由 3 块 1.524 mm 的介质板压合一次得到。从成本来说,越厚的板材用料越多,也越贵。对于工作在 C 波段的此类超表面天线来说,除去必要的板材损耗,一块标准板材可以加工数个天线样机。

将上层超表面衬底介质和下层馈线衬底介质组合有两种方法。一种是采用多层板压合技术。这种方法涉及对齐工艺,对于加工精度要求高,价格、工期成本也均较高,适用于要求较高的加工工艺需求。另一种方法是在天线每一层的四周都打上孔,分层加工,最后采用尼龙螺丝固定。这种方法对加工精度要求降低了,同时加工成本大大降低,适用于要求一般的加工工艺需求。

针对这三种上层介质板厚度的米字形超表面天线,表 1 进行了带宽、增益、加工成本的对比。

表 1 带宽、增益、加工成本对比

厚度/mm	带宽	最大增益	加工成本
3.048	相对最窄	相对最低	相对最低
3.454	相对中等	相对中等	相对中等
4.572	相对最宽	相对最高	相对最高

因此,如果对于低剖面要求不高,对于带宽和效率要求较高,同时预算较高,可以选择 4 mm 以上的介质板,并采用多层板压合技术;如果预算不高,对低剖面又有要求,并且带宽已经满足了实际需求,那么可以采用 3.048 mm 的介质板选择单层板加工,采用尼龙螺丝自行组装;如果要取得带宽、增益和加工成本的折中,则可以选择 3.454 mm 厚的介质板,并根据实际应用场景的需求选择单层板组装或多层板压合。

## 4.2 测试结果与分析

为验证天线性能,加工了天线样机并在暗室中对其进行测量,如图 18 所示。

天线反射系数和增益的仿真与测试对比如图 19 所示。天线单元的测试与仿真结果基本吻合,验证了仿真的正确性,测试与仿真的差异主要来源于组装误差。

其单元的增益测试值整体略低于仿真值,而阵列的增益测试值在工作频带的低频和高频处低于仿真值较多,其误差原因来自于测试时地板效应带来的

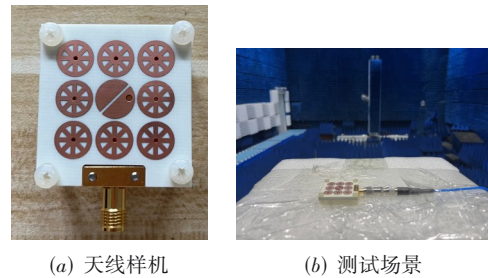
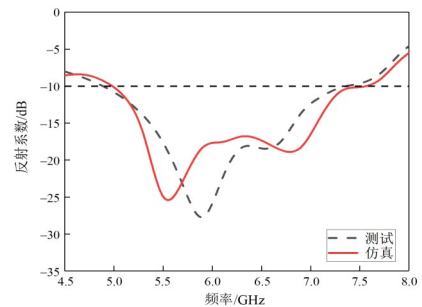
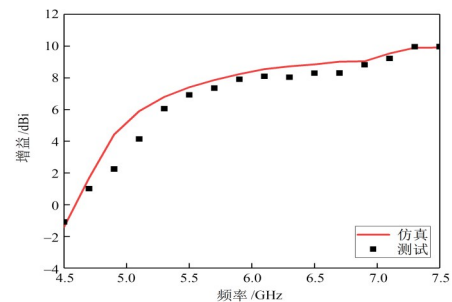


图 18 加工与测试



(a)  $S_{11}$



(b) 增益

图 19 仿真和测量结果

方向图畸变。

天线阵列的方向图的 E 面和 H 面的主极化和交叉极化的仿真与测试对比如图 20 所示。从测试结果可以看出,天线具有在频带内稳定、定向辐射波束的功能,交叉极化小于 -20 dB。E 面方向图在全频段内保持了方向图一致性,测试与仿真结果基本吻合,验证了仿真的正确性。天线阵列的谐振点均向高频移动,测试与仿真的差异主要来源于组装误差。其单元的增益测试值整体略低于仿真值,而阵列的增益测试值在工作频带的低频和高频处低于仿真值较多,其误差原因来自于测试时地板效应带来的方向图畸变。

如表 2 所示,将本文提出的超表面天线与其他同类型天线进行了对比,可知,本文提出的天线单元和阵列具有较小的尺寸,较宽的带宽,以及较高的增益。

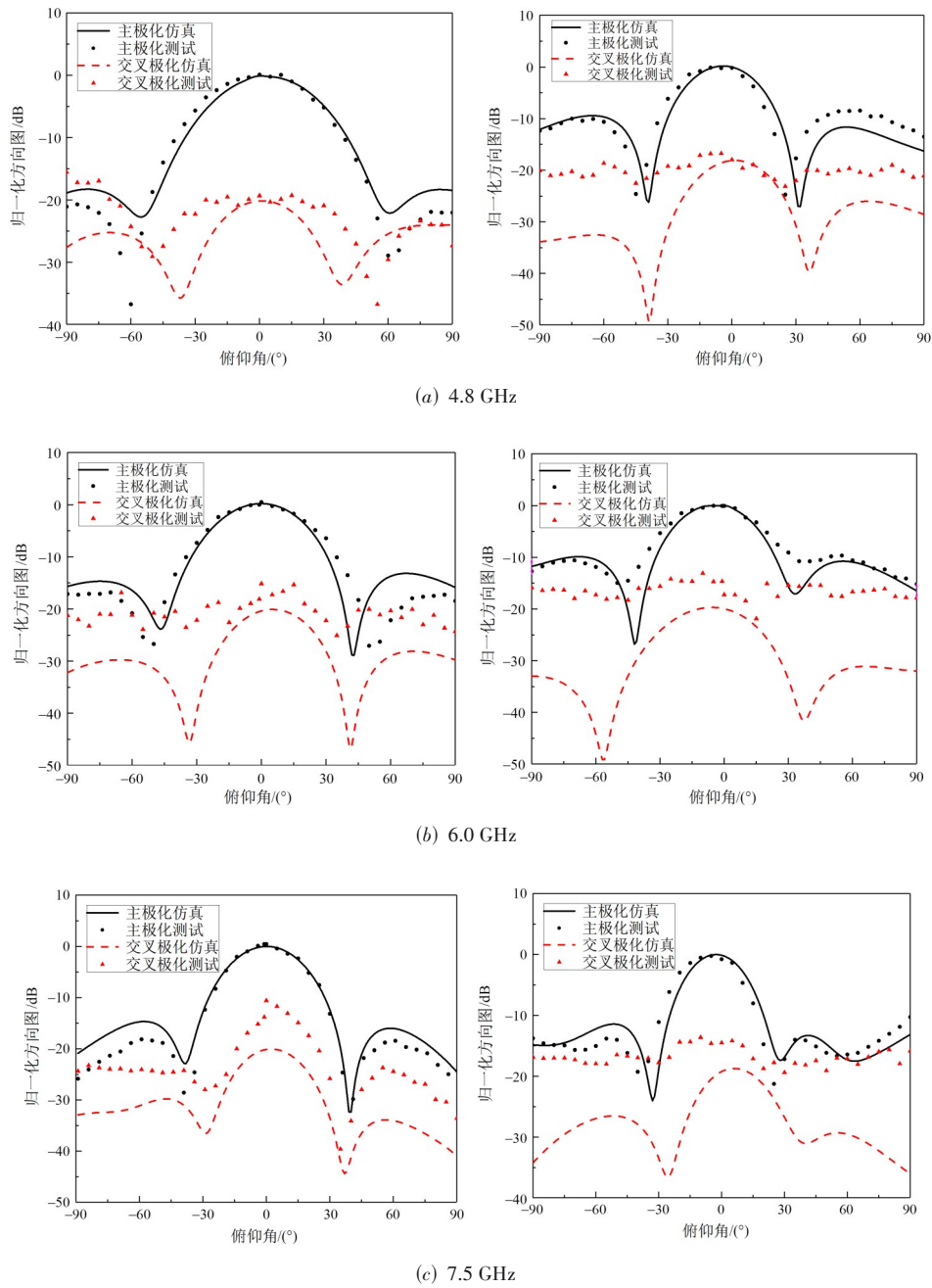


图20 不同工作状态下的归一化方向

表2 本文天线单元与其他天线的对比

对比文献	天线尺寸( $\lambda_0$ )	带宽/%	法向增益/dBi	峰值辐射效率/%
本文	0.72×0.72×0.07	40	5.7~9.9	99
文献[18]	1.13×1.13×0.09	44	7.9~11.6	82
文献[19]	1.20×1.20×0.68	21.4	10.5~12.7	92
文献[14]	1.00×1.00×0.07	25.4	7.7~10.3	—
文献[22]	2.60×3.80×0.50	39.3	9.0~12.0	—
文献[20]	1.02×1.02×0.11	45	8.5~11.6	—
文献[23]	1.01×1.61×0.08	40	7.0~10.4	—
文献[24]	1.00×1.00×0.10	32.4	—	—

## 5 结论

本文基于特征模理论,呈现了一款超表面天线完整的设计过程.首先,对 $3\times 3$ 的圆形超表面进行了特征模分析辅助下的宽带设计,通过对修形后获得的超表面进行合理的激励,实现了天线的宽带性能;为了实现孔径耦合馈电型的超表面天线的快速设计,提出了孔径耦合型馈电的超表面天线的等效模型,阐述了各个参数对于超表面天线输入阻抗的影响,给出了对匹配效果影响最大的地板上缝隙的尺寸设计范围.接着,对超表面天线进行高阻抗表面设计,高阻抗表面抑制了表面波,进一步提高了天线的带宽、增益和效率.然后,分析了工程应用中关心的带宽、效率与加工成本的关系.最后,通过加工与测试验证了仿真结果的正确性.

### 参考文献

- [1] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.
- [2] SMITH D R, PENDRY J B, WILTSHIRE M C K. Metamaterials and negative refractive index[J]. *Science*, 2004, 305(5685): 788-792.
- [3] PENDRY J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(18): 3966-3969.
- [4] 孙建旭,李杰超,张涛,等.基于超表面的超宽带低剖面宽角扫描相控阵天线[J]. *电波科学学报*, 2023, 38(3): 382-392.  
SUN J X, LI J C, ZHANG T, et al. Ultra-wideband, low-profile and wide-scanning phased array antenna based on meta-surface[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2023, 38(3): 382-392. (in Chinese)
- [5] KEDZE K E, WANG H, PARK I. A metasurface-based wide-bandwidth and high-gain circularly polarized patch antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(1): 732-737.
- [6] CHEN D X, YANG W C, XUE Q, et al. Miniaturized wideband planar antenna using interembedded metasurface structure[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(5): 3021-3026.
- [7] 马丽娜,顾昌展,周凌云,等.基于分形超表面的小型化宽带高透射率平面透镜天线[J]. *电子学报*, 2022, 50(12): 3003-3013.  
MA L N, GU C Z, ZHOU L Y, et al. A miniaturized broadband planar lens antenna with high transmittance based on fractal metasurface[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(12): 3003-3013. (in Chinese)
- [8] ADAM SALIH A, CHEN Z N, MOUTHAN K. Characteristic mode analysis and metasurface-based suppression of higher order modes of a  $2\times 2$  closely spaced phased array[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(3): 1141-1150.
- [9] GAO K, CAO X Y, GAO J, et al. Low-RCS metasurface antenna array design with improved radiation performance using odd- and even-mode analysis[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2022, 21(2): 421-425.
- [10] XU J, XU H X, LUO H L, et al. A low-RCS folded reflectarray combining dual-metasurface and absorber[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2022, 21(12): 2462-2466.
- [11] 涂建军,马丁.基于粒子群结构寻优的电磁隐身微网格超表面[J]. *电子学报*, 2023, 51(11): 3262-3270.  
TU J J, MA D. Electromagnetic stealth micro-grid metasurface based on particle swarm structure optimization[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2023, 51(11): 3262-3270. (in Chinese)
- [12] LI T, YANG H H, LI Q, et al. Broadband low-RCS and high-gain microstrip antenna based on concentric ring-type metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(9): 5325-5334.
- [13] 房欣宇,朱泳庚,赖梓扬,等.低复杂度时空调制超表面设计方法与应用[J]. *电波科学学报*, 2022, 37(6): 992-999.  
FANG X Y, ZHU Y G, LAI Z Y, et al. Low complexity design method of space-time modulated metasurface and its applications[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2022, 37(6): 992-999. (in Chinese)
- [14] LIN F H, CHEN Z N. Low-profile wideband metasurface antennas using characteristic mode analysis[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(4): 1706-1713.
- [15] JUAN Y, YANG W C, CHE W Q. Miniaturized low-profile circularly polarized metasurface antenna using capacitive loading[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(5): 3527-3532.
- [16] GAO G P, ZHANG R F, GENG W F, et al. Characteristic mode analysis of a nonuniform metasurface antenna for wearable applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(8): 1355-1359.
- [17] LI T, CHEN Z N. Wideband sidelobe-level reduced ka-band metasurface antenna array fed by substrate-integrated gap waveguide using characteristic mode analysis[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(3): 1356-1365.
- [18] YANG Z Z, LIANG F, YI Y, et al. Metasurface-based

wideband, low-profile, and high-gain antenna[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2019, 13(4): 436-441.

- [19] SALEH C M, ALMAJALI E, JARNDAL A, et al. Wideband 5G antenna gain enhancement using a compact single-layer millimeter wave metamaterial lens[J]. IEEE Access, 2023, 11: 14928-14942.
- [20] LIN F H, CHEN Z N. Truncated impedance sheet model for low-profile broadband nonresonant-cell metasurface antennas using characteristic mode analysis[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(10): 5043-5051.
- [21] SIEVENPIPER D, ZHANG L J, BROAS R F J, et al. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11): 2059-2074.
- [22] WANG J X, LI Y J, GE L, et al. Wideband dipole array loaded substrate integrated H-plane horn antenna for millimeter waves[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(10): 5211-5219.
- [23] CAO Y F, CAI Y, CAO W Q, et al. Broadband and high-gain microstrip patch antenna loaded with parasitic mushroom-type structure[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(7): 1405-1409.
- [24] SHENG H W, CHEN Z N. Metasurface-loaded off-center monopoles with wideband radiation performance using characteristic mode analysis[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(11): 10660-10668.

#### 作者简介



**李佩弦** 男, 1989年5月出生于重庆市. 现为南京理工大学电子工程与光电技术学院电子科学与技术专业博士生. 主要研究方向为频率选择表面、超表面天线以及低散射天线等.

E-mail: 821631439@qq.com



**顾鹏飞** 男, 1990年11月出生于江苏省泰州市. 现为南京理工大学微电子学院(集成电路学院)副教授. 主要研究方向为计算电磁学、天线与阵列优化设计. 中国电子学会会员编号: E190027633S.

E-mail: pengfeigu@njust.edu.cn



**包华广** 男, 1987年2月出生于河北省邢台市. 现为南京理工大学微电子学院(集成电路学院)副教授. 主要研究方向为射频集成电路与EDA设计. 中国电子学会会员编号: E190033448M.

E-mail: hgbao@njust.edu.cn



**何姿** 女, 1988年12月出生于河北省石家庄市. 现为南京理工大学微电子学院(集成电路学院)教授、博士生导师. 主要研究方向为计算电磁学及工程应用. 获国家优秀青年基金. 在国内外期刊发表学术论文90余篇. 中国电子学会会员编号: E190023902S.

E-mail: 15850554055@163.com



**樊振宏** 男, 1978年2月出生于江苏省泰州市. 现为南京理工大学微电子学院(集成电路学院)教授、博士生导师. 主要研究方向为计算电磁学、天线与阵列优化设计.

E-mail: zhfan@njust.edu.cn



**丁大志** 男, 1979年1月出生于江苏省盐城市. 现为南京理工大学微电子学院(集成电路学院)教授、博士生导师. 主要研究方向为微波电路与天线、雷达成像与目标识别、电磁兼容分析与设计、目标电磁散射分析. 在国内外期刊发表学术论文120篇. 中国电子学会会员编号: E190014223M.

E-mail: dzding@njust.edu.cn