

# 基于分形超表面的小型化宽带高透射率 平面透镜天线

马丽娜<sup>1,2</sup>, 顾昌展<sup>1,2</sup>, 周凌云<sup>3</sup>, 毛军发<sup>1,2</sup>

(1. 上海交通大学高速电子系统设计与电磁兼容教育部重点实验室, 上海 200240; 2. 上海交通大学人工智能教育部重点实验室, 上海 200240; 3. 中国科学院电磁空间信息重点实验室, 安徽合肥 230027)

**摘 要:** 本文提出了一种基于分形透射超表面的 X 波段小型化宽带高透射率平面透镜天线. 单元设计依照天线-滤波-天线的设计思想, 满足巴特沃斯响应, 实现单元宽带和高透射率特性. 利用分形和堆栈结构, 进一步扩大天线带宽, 同时实现单元小型化. 基于上述设计思想, 设计了两种同时具有小型化、宽带、高透射率特性的三层透射超表面单元, 单元周期仅为 4.5 mm ( $0.15\lambda_0$ ). 为验证单元特性, 设计、仿真、加工、测试了基于两种设计单元的频率选择表面. 仿真和测试结果表明, 提出的两种频率选择表面带宽分别为 40% 和 64%, 与入射角在  $60^\circ$  以内条件下的反射系数 ( $S_{11}$ ) 和透射系数 ( $S_{21}$ ) 的 3 dB 带宽对应. 此外, 为了实现透射相位在满足要求特性的尺寸可变范围内的相位  $360^\circ$  覆盖, 并进一步提高平面透镜天线效率, 本文对第二种超表面结构进行改进, 提出了一种基于七层透射超表面单元的平面透镜天线, 并给出等效电路模型辅助验证. 仿真结果表明, 本文提出的平面透镜天线的法向最大增益为 12.5 dBi, 相比馈源高 5.25 dB, 且具有 20% 的相对带宽, 口径效率高达 78%, 证明了该天线具有良好的辐射特性.

**关键词:** 宽带; 小型化; 高透射率; 平面透镜天线; 分形; 超表面

中图分类号: TN82

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)12-3003-11

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

DOI: 10.12263/DZXB.20211605

## A Miniaturized Broadband Planar Lens Antenna with High Transmittance Based on Fractal Metasurface

MA Li-na<sup>1,2</sup>, GU Chang-zhan<sup>1,2</sup>, ZHOU Ling-yun<sup>3</sup>, MAO Jun-fa<sup>1,2</sup>

(1. MoE Key Laboratory of High-Speed Electronic Systems, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. MoE Key Laboratory of Artificial Intelligence, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. Key Laboratory of Electromagnetic Spatial Information, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230027, China)

**Abstract:** In this paper, a miniaturized broadband planar lens antenna (PLA) with high transmittance based on fractal transmissive metasurface elements is proposed at the X band. In order to achieve the characteristics of broadband and high transmission, units of PLA are designed based on the concept of antenna-filter-antenna (AFA) which satisfies butterworth response. Fractal geometries and stacked structures are used to expand bandwidth as well as realize miniaturization. Two kinds of structures are designed combining patches back-to-back and a cross-shaped slot or a double cross-shaped slot etched on the common ground plane. The unit-cell periodicity is just 4.5 mm ( $0.15\lambda_0$ ). In order to validate features of units, prototypes of two kinds of frequency selective surfaces (FSSs) which consist of the same proposed units are designed, simulated, manufactured and measured. Presented FSSs possess bandwidths of 40% and 64%, which are corresponding to 3 dB bandwidths for both reflection ( $S_{11}$ ) and transmission coefficients ( $S_{21}$ ) at an incident angle within  $60^\circ$ . To satisfy the transmission phase of the unit whose range is from  $0^\circ$  to  $360^\circ$  within the variable size and further enhance the efficiency of the PLA, a seven-layer element based on the improved abovementioned unit is proposed. Equivalent circuits are calculated and simulated to verify the correctness of the structure. A prototype of the proposed PLA is designed and simulated. The simulation results show that the PLA provides a maximum gain of 12.5 dBi, which is 5.25 dB higher than the feeding antenna over a wide bandwidth (20%) and a high aperture efficiency (up to 78%). These show that the PLA has good radiation characteristics.

Key words: broadband; miniaturized; high transmittance; planar lens antenna; fractal; metasurface

## 1 引言

随着无线电技术的迅猛发展,现代无线通信系统要求天线向小尺寸、宽频带、高效率、易于集成等方向发展,且在工程上往往需要天线同时具备上面的两种或多种特性。工程中,透镜天线作为最常使用到的高增益天线之一,被广泛应用于军事和民用生活中,特别是空间高分辨率成像系统、飞行器盲着陆以及防碰撞雷达等特定场合。

Luneburg 等人于 1944 年首先提出了龙伯透镜天线<sup>[1]</sup>,但由于传统的龙伯透镜制作工艺复杂、重量大、造价贵,并没有得到大范围使用。在实际当中,曲面透镜天线由于加工难度较高,体积很大,不能适应天线小型化的发展趋势。为了解决这一问题,平面透镜天线的概念应运而生,透镜的平面化设计成为研究的热点。

在早期,平面透镜天线主要采取的方案是基于耦合贴片和相位延迟线<sup>[2,3]</sup>。此外,基于变换光学<sup>[4,5]</sup>以及基于左手媒质和复折射率材料<sup>[6,7]</sup>的平面透镜天线设计方式也层出不穷。但由于本身结构的限制,早期透镜天线工作频段窄,尺寸较大,透镜的辐射效率低。

近年来,随着电磁超材料、超表面成为热门技术,超表面在平面透镜天线的设计中得到了广泛应用<sup>[8-12]</sup>。然而,虽然经过多年对透镜天线的研究,国内外学者提出了许多性能优越的透镜天线结构,但是仍旧有许多问题亟待解决,如带宽窄、辐射效率低、结构尺寸大、各性能不能同时兼顾等,现有的技术手段有时无法同时满足上述新型天线的各项指标要求。

为此,针对以上在透镜天线的结构设计上存在的问题,本文提出了两种新型的同时具有宽带化、小型化、高透射率特性的基于分形结构的多层透射超表面单元。利用分形本身具有的空间填充性实现单元的小型化(单元周期仅为  $0.15\lambda_0$ ),利用自相似结构特性及堆栈结构实现宽透射频带(带宽分别为 40% 和 64%)。并通过改进单元结构,实现透射相位在满足要求特性的尺寸可变范围内的相位  $360^\circ$  周期性覆盖,从而满足在考虑路径补偿等因素条件下的各单元相位精确调控。通过设计和仿真,组阵后的超表面平面透镜天线同时具有宽带化(20%)、小型化(单元周期  $0.15\lambda_0$ )和辐射效率高(78%)的特点,验证了该天线具有良好的辐射特性。

## 2 宽带小型化超表面频率选择表面

### 2.1 基于分形结构的单枝节型宽带小型化透射超表面单元设计及仿真

在基于多层频率选择表面单元的设计方法中,平面透镜天线单元一般为透射式频率选择表面单元。这

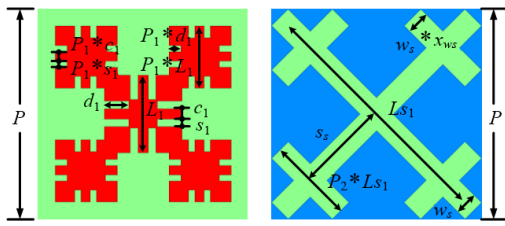
种阵列单元通常采用多层的结构形式,通过改变其物理尺寸或旋转角度的方式实现对透射相位的控制。

根据天线理论,一般来说,具有带通型的天线-滤波-天线基本型结构通常由三层金属层构成。上层和下层为贴片层,等效为容性表面,储存电场能;中间共地层为耦合槽结构,等效为感性表面,储存磁场能;公用金属地板用于保证定向辐射,减小两个贴片之间的互耦。当入射波到达第一层贴片时,引起金属贴片上电流的变化,贴片接收到能量后就会作为一个天线,向外辐射能量。部分能量通过介质到达第二层金属面,中间层的开槽结构可以起到一个滤波器的作用,将部分频段的能量耦合到底层的贴片。底层贴片因耦合过来的能量激励起新的辐射场,最终将能量辐射出去。

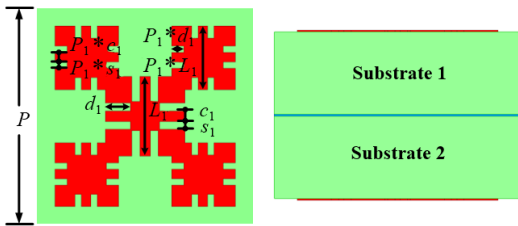
根据电磁学理论,天线的辐射特性和对应的尺寸与工作波长存在严格的关系。通常情况下,天线设计的工作频段相对较窄,天线尺寸约为四分之一波长或者半波长。虽然在单元尺寸一定的前提下,可通过增加等效电长度来延长电流传输路径,调谐天线谐振频率,实现天线单元小型化,但是工作频段难以拓宽。拓展天线带宽的本质在于采用何种方法,使天线在带宽范围内谐振点的阻抗发生改变。为了同时实现单元小型化和宽带化,这里,引入分形概念<sup>[13]</sup>,利用分形本身具有的空间填充性实现单元的小型化,利用自相似结构特性引入多谐振点和宽匹配效应,实现天线宽带或非频变特性。自相似结构导致非频变特性的原因可由天线的相似原理得以解释:若天线的所有尺寸和工作频率(或波长)按相同比例变化,则天线的特性保持不变。换句话说,当分形天线的相邻工作频带彼此重叠时,多个谐振频段连成一个很宽的频段,从而产生宽带。

基于上述思想,依托天线-滤波-天线基本结构,本文设计了一种由两层基片和三层金属层组成的三层透射超表面单元<sup>[14]</sup>,设计单元上层和下层为具有相同结构的贴片层,耦合槽腐蚀在中间共地层。

为了同时实现单元小型化和宽带化,本文将单贴片修改为蜿蜒型分形结构,旨在利用空间填充性,通过增加等效电长度的方式来减小单元尺寸,同时提供多谐振点。同样,槽单元采用分形结构实现小型化和宽带化。且为了提高耦合强度,进一步均匀磁电流分布,本文将刻蚀在公共接地面上的槽单元设为分形十字形结构,其谐振频率与金属贴片层的形状有关。为了进一步简化单元尺寸的设计,这里将蜿蜒型贴片作为结构的起始单元,按比例缩放分至蜿蜒型贴片结构的四角。单元结构具体模型如图 1 所示,对应具体尺寸如表 1 所示。天线单元周期为 4.5 mm ( $0.15\lambda_0$ ),介质基板材料为 F4B,其介电常数为 2.2,损耗正切角为 0.000 7,基板总厚度为 2 mm。



(a) 上层蜿蜒贴片型分形结构 (b) 共地层单枝节十字形槽分形结构



(c) 下层蜿蜒贴片型分形结构 (d) 双层结构侧视图

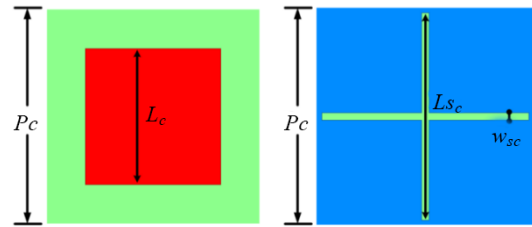
图1 单枝节分形结构多层透射超表面单元示意图

表1 单枝节分形结构多层透射超表面单元的具体参数值

参数	值	参数	值
$P$	4.5 mm	$c_1$	0.1 mm
$L_1$	1.85 mm	$d_1$	0.48 mm
$L_{s1}$	3.7 mm	$s_p$	$q_1 * L_1 / 3$
$w_s$	0.4 mm	$s_s$	$q_2 * L_{s1} / 3$
$s_1$	0.2 mm	$q_1$	0.5
$x_{ws}$	1	$q_2$	0.32

作为对比,本文对传统的由单贴片和十字槽构成的透射型单元进行了分析,基础模型如图2所示.通过调节单元尺寸至工作频率和带宽基本相似,本文对两种结构的尺寸进行了对比,主要对比参数如表2所示.对单元设置无限周期边界并用HFSS(High Frequency Structure Simulator)在5~15 GHz工作频带内对两种结构单元进行仿真,结果如图3所示.从对比结果可以看出,在相同工作频率下,传统单元的单元周期为本文设计单元周期的3倍以上.且可以很明显地看出,共面地上分形槽的大小会影响两个介电基板上下分形贴片之间的耦合水平.因此,与传统多层透射单元相比,本文提出的由蜿蜒型分形贴片和分形十字形槽构成的单元可以在保证等效电长度和耦合强度的前提下,最大化地实现结构小型化和宽带化.

图4所示为本章设计并描述的单枝节型带通型FSS(Frequency Selective Surface)模型示意图.FSS由多个相同的多层透射型超表面单元组成,考虑实际加工情况,粘合两层基板的pp片也考虑进模型设计中.同时,为了更好地理解这种结构的工作原理,其简化等效电路模型如图5所示.该等效电路为二阶耦合谐振器带通滤波器,为了获得最大平坦度,这里设计FSS满足



(a) 上层矩形贴片型分形结构 (b) 共地层十字形槽分形结构

图2 传统矩形贴片和十字槽组成的多层透射超表面单元示意图

表2 传统矩形贴片和十字槽组成的多层透射超表面单元的具体参数值

参数	值
$P_c$	15 mm
$L_c$	7.7 mm
$L_{s_c}$	8.5 mm
$w_{s_c}$	0.3 mm

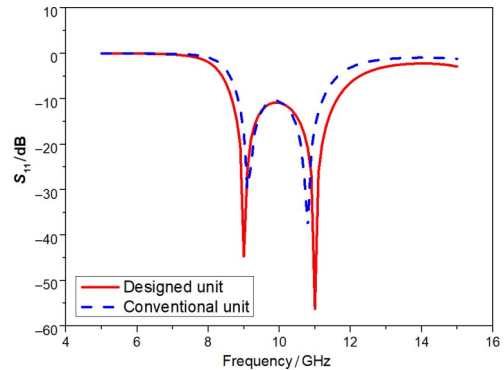


图3 本文提出的单枝节型带通型多层透射单元和传统多层透射单元 $S_{11}$ 仿真对比

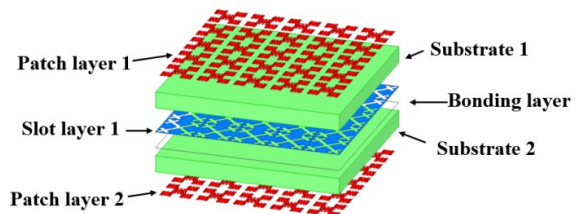


图4 单枝节型带通型FSS模型及等效电路示意图

butterworth响应类型.为了更好地理解传输机理,从简化等效电路的角度来看,每个分形结构等效为一个LC并联谐振电路,有损基片由一系列串联LC组成,且每个贴片谐振边缘通过电容和下一层耦合,等效电路的具体设计参数列于表3.

为了进一步分析提出的FSS的带宽、透射率、入射角不敏感等性能,本文对单元进行仿真,并与ADS仿真结构进行对比,对比及仿真结果如图6、图7所示.并在ADS中对提出的等效电路进行建模分析,将计算出的反射系数( $S_{11}$ )和传输系数( $S_{21}$ )进行分析对比,结果如图6所示.从图中可以看出,该结构展现出最大平坦响

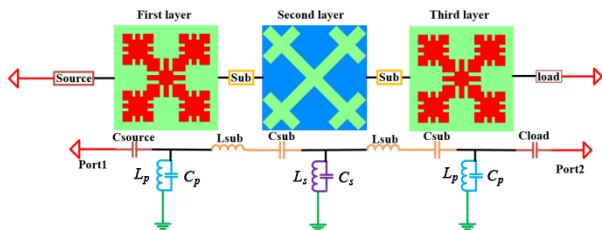


图5 单枝节型带通型FSS等效电路示意图

表3 单枝节型带通型FSS等效电路的具体参数值

参数	值
$L_p$	15.72 nH
$C_p$	0.283 pF
$L_s$	4.53 nH
$C_s$	0.448 pF

应,其传输系数为平滑的顶部,而反射系数显示出两个极点的频率响应. 仿真结果和等效电路模型计算结果非常接近,进一步证明了等效电路的正确性.

图7为仿真结果,可以看出,在正常入射角平面波入射条件下,FSS具有40%的分数带宽(8~12 GHz),与3 dB带宽4 GHz相对应. 为了验证该FSS对入射角的极

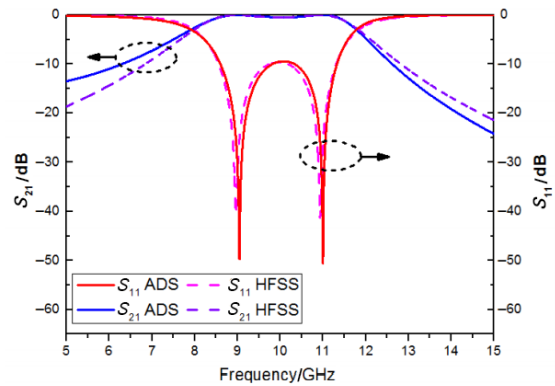


图6 单枝节型带通型FSS仿真频率响应和ADS等效电路响应对比

化不敏感特性,本文以两种极化方式(TE和TM)在0~60°的斜入射条件下对该FSS进行仿真. 仿真结果表明,对于TE极化,FSS的反射/传输系数在0~60°范围内不会发生明显变化,基本保持不变. 对于TM极化,入射角的增大使通带插入损耗略有增加,工作频带略有移动. 但是仿真结果仍旧表明所设计的FSS在60°范围内的斜入射条件下有较宽的工作频带,具有良好的透射特性和较大的入射角不敏感度.

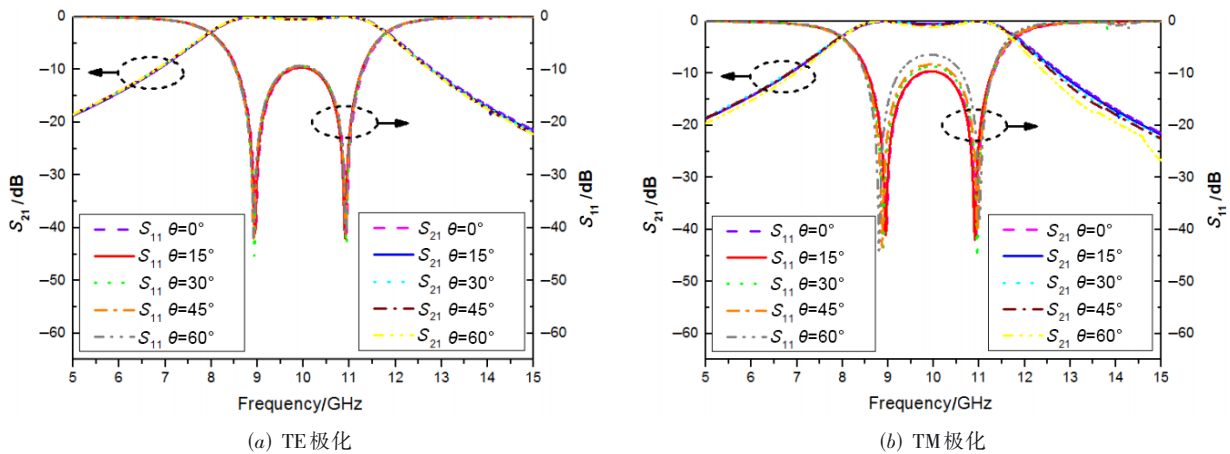


图7 对于不同入射角下的单枝节型带通型FSS频率响应仿真结果图

## 2.2 基于分形结构的双枝节型宽带小型化透射超表面单元设计及仿真

为了进一步扩大单元工作带宽,本文对提出的单枝节型单元结构进行改进.

从上节的分析中得到,分形本身具有的自相似结构特性可以引入多谐振点和宽匹配效应,实现天线宽带或非频变特性. 从设计原理和仿真过程可以看出,单元的工作带宽同耦合效果有关,即耦合作用越明显,带宽内各谐振点附近的匹配效果越好,谐振点越密集,工作带宽越大. 由于耦合强度主要取决于中间共地层的槽结构,因此,为了进一步提高耦合强度,均匀磁电流分布,将刻蚀在公共接地面上的槽单元修改为双枝节

十字形槽分形结构,相比单枝节分形,它具有更精细的局部结构,能够对电流分布进一步产生扰动,在某种程度上优化了电流分布,从而产生了更均匀的多谐振阻抗、更好的匹配、更宽的带宽和更高的透射效率. 结合蜿蜒贴片型分形结构和双枝节十字形槽分形结构的设计实现了单元小型化.

蜿蜒贴片型分形结构相比前面提出的结构不变,仅调节贴片参数,槽结构由单枝节变为双枝节,槽结构具体模型如图8所示,对应具体尺寸如表4所示. 同样,天线单元周期及介质基板材料与单枝节型相同,基板总厚度为3 mm.

双枝节型带通型FSS模型与单枝节型类似,对应的

简化等效电路模型如图 9 所示. 等效电路的具体设计参数列于表 5.

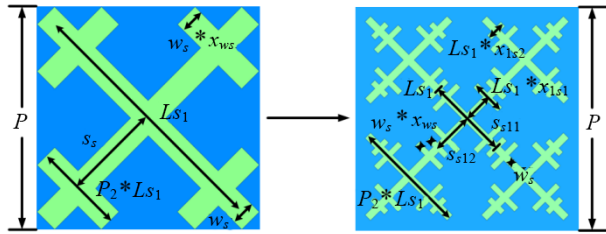


图 8 共地层双枝节十字形槽分形结构示意图

表 4 双枝节分形结构多层透射超表面单元的具体参数值

参数	值	参数	值
$P$	4.5 mm	$s_{i12}$	$q_4 * Ls_1 / 3$
$Ls_1$	2.92 mm	$s_8$	$q_2 * Ls_1 / 3$
$w_s$	0.15 mm	$s_{i11}$	$q_3 * Ls_1 / 3$
$s_1$	0.1 mm	$q_1$	0.41
$c_1$	0.13 mm	$q_2$	0.32
$d_1$	0.5 mm	$q_3$	0.33
$L_1$	1.7 mm	$q_4$	0.47
$s_p$	$q_1 * L_1 / 3$	$x_{ics}$	0.8
$x_{ls2}$	0.16	$x_{ls1}$	0.24

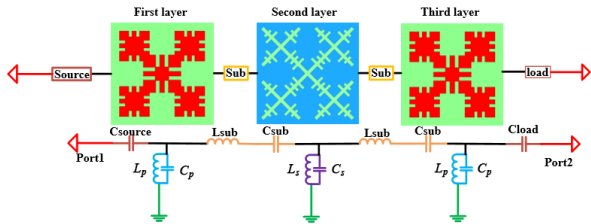


图 9 双枝节型带通型 FSS 等效电路示意图

表 5 双枝节型带通型 FSS 等效电路的具体参数值

参数	值
$L_p$	5.02 nH
$C_p$	0.073 pF
$L_s$	4.46 nH
$C_s$	0.448 pF

本文在 HFSS 中对单元进行仿真, 仿真结果如图 10 和图 11 所示, 并在 ADS 中对提出的等效电路进行建模分析, 将计算出的  $S_{11}$  和  $S_{21}$  进行分析对比. 对比结果如图 10 所示. 从图中可以看出, 仿真结果和等效电路模型计算结果相比第一种结构更加接近, 进一步证明了等效电路的正确性.

由图 11 的仿真结果可以看出, 在正常入射角平面波入射条件下, FSS 具有 64% 的分数带宽 (6.8~13.2 GHz), 与 3 dB 带宽 6.4 GHz 相对应. 为了验证该 FSS 对入射角的极化不敏感特性, 本文在 0~60° 的斜入射

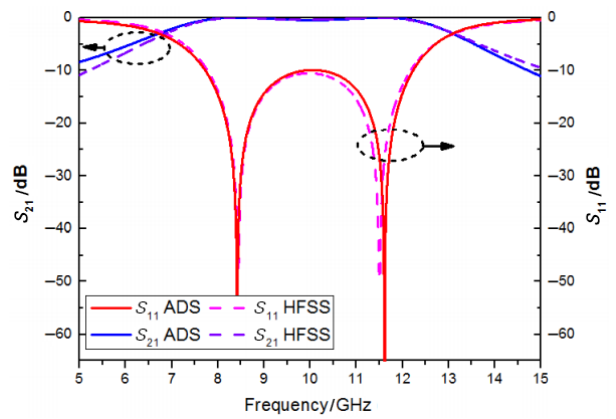
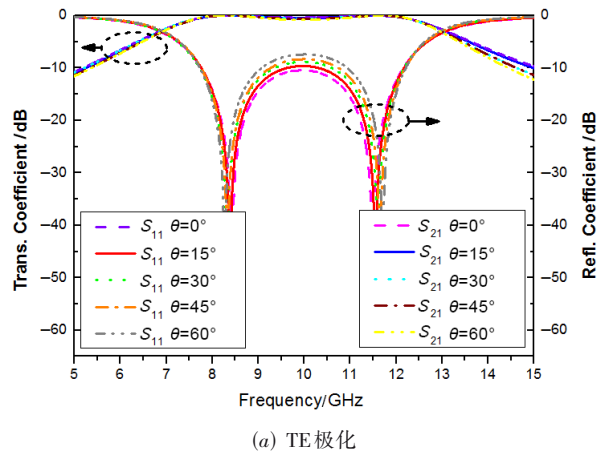
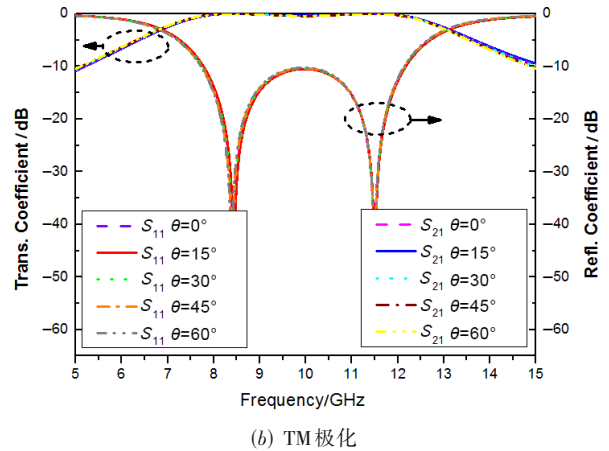


图 10 双枝节型带通型 FSS 仿真频率响应和 ADS 等效电路响应对比



(a) TE 极化



(b) TM 极化

图 11 对于不同入射角下的双枝节型带通型 FSS 频率响应仿真结果图

条件下对该 FSS 进行仿真. 仿真结果表明, 对于 TE 极化, FSS 的反射/传输系数在 0~60° 范围内不会发生明显变化, 基本保持不变. 对于 TM 极化, 入射角的增大使通带插入损耗略有增加, 工作频带略有移动. 但是仿真结果仍旧表明所设计的 FSS 在一定角度的斜入射条件下有较宽的工作频带, 具有良好的透射特性.

### 3 两类宽带小型化带通型超表面频率选择表面实验验证

为了进一步验证宽带小型化带通型频率选择表面的辐射和带宽特性,本文对两类宽带小型化带通型频率选择表面模型进行了仿真,并进行了实物制作和测试.实验装置和微波暗室测试场景如图12所示,不同工作频率下的波前相位仿真(Sim.)和实测结果(Mea.)

如图13所示.仿真和实测结果表明,两类宽带小型化高透射率频率选择表面分别在8~12 GHz和6.8~13.2 GHz大带宽范围内保持良好的频率响应特性,带宽分别为40%和64%.由于近场实测环境的限制,部分频点处存在一定的抖动,仿真结果与实测结果存在些许差异.但是测试得到的频率响应与仿真结果基本一致(幅度及带宽),进一步证明了提出的设计方法具有可行性和实用性.

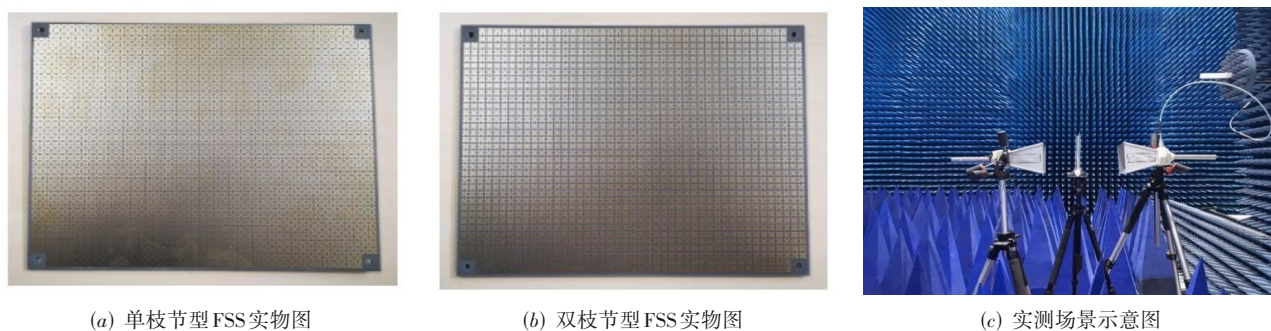


图12 实验装置及实测场景示意图

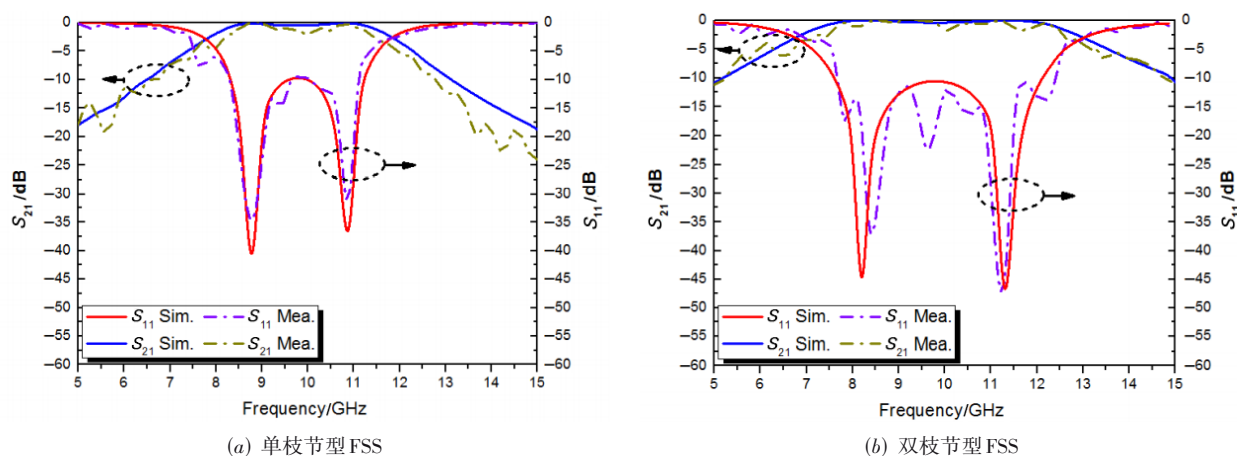


图13 宽带小型化FSS频率响应仿真和实测结果

### 4 宽带小型化平面超表面透镜天线

本节设计了一款同时具有宽带化、小型化、高辐射效率的超表面平面透镜天线,并进行了仿真实验验证.

首先,虽然前文提出的两种多层透射超表面单元具有小型化宽带的特性,但是由于该单元的透射相位在满足该特性的尺寸可变范围内无法覆盖 $360^\circ$ ,无法作为组成平面透镜天线的单元.为了解决这一问题,本节对上述第二种单元进一步改进,通过堆栈的方式在满足一定小型化、宽带和高透射率的情况下扩大透射相位覆盖范围,设计出可作为天线阵元的多层透射超表面单元.

其次,基于选定的多层透射超表面单元幅相特性,本文对由 $15 \times 15$ 个反射超表面单元组成的宽带小型化平面超表面透镜天线进行了设计和仿真.

#### 4.1 基于分形结构的七层宽带小型化透射超表面单元设计

依照天线-滤波-天线高频率选择和低剖面的设计思想,本文设计多层透射超表面单元作为天线阵元——多层透射超表面单元由四层基片和七层金属层组成,并结合蜿蜒贴片型分形结构和双枝节十字形槽分形结构的设计实现单元小型化.为了使单元满足butterworth响应类型,设计单元对称层具有相同结构的贴片或槽.

单元结构如图 14 所示. 同样, 天线单元周期为 4.5 mm ( $0.15\lambda_0$ ), 介质基板材料为 F4B, 其介电常数为 2.2, 损耗

正切角为 0.000 7, 每层基板厚度为 1.5 mm. 适合实际加工的设计参数值如表 6 所示.

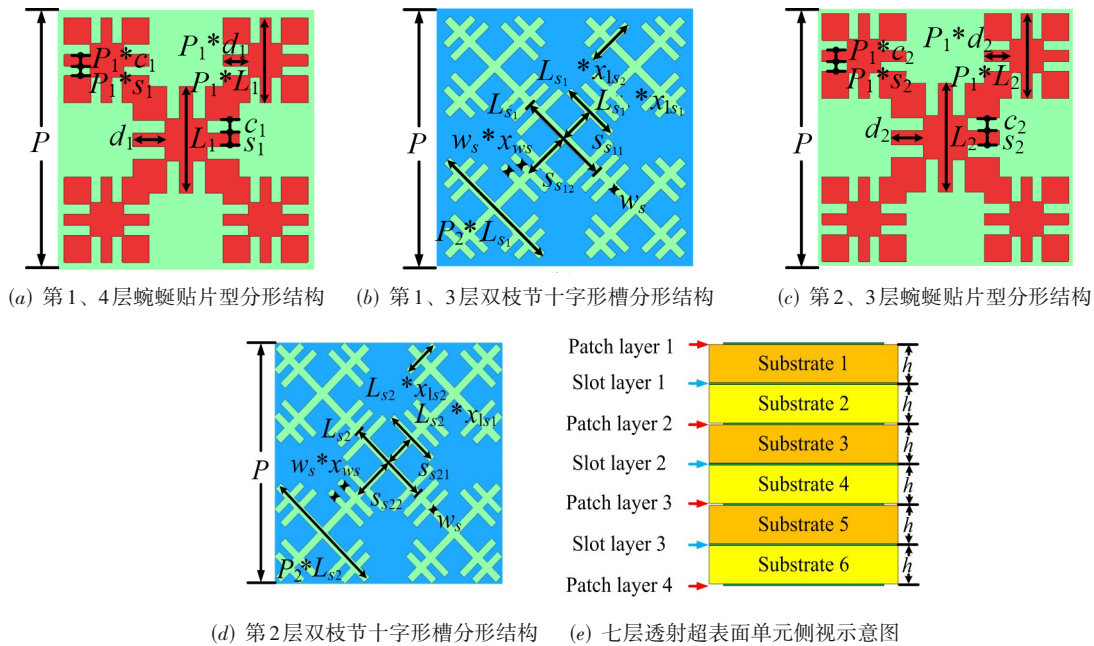


图 14 七层透射超表面单元示意图

表 6 七层透射超表面单元的具体参数值

参数	值	参数	值
$P$	4.5 mm	$s_{s12}$	$q_4 * L_{s1} / 3$
$h$	1.5 mm	$s_s$	$q_2 * L_{s1} / 3$
$L_{s1}$	2.92 mm	$s_{s11}$	$q_3 * L_{s1} / 3$
$w_s$	0.15 mm	$q_1$	0.41
$s_1$	0.1 mm	$q_2$	0.32
$c_1$	0.13 mm	$q_3$	0.33
$d_1$	0.5 mm	$q_4$	0.47
$L_1$	1.7 mm	$x_{ws}$	0.8
$s_p$	$q_1 * L_1 / 3$	$x_{ks1}$	0.24
$x_{ks2}$	0.16		

表 7 七层透射超表面单元的具体参数值

参数	值	参数	值
$L_{p1}$	4.57 nH	$L_{s2}$	9.57 nH
$C_{p1}$	34.3 pF	$C_{s2}$	37 pF
$L_{s1}$	11.3 nH	$L_{s2}$	4.59 nH
$C_{s1}$	23 pF	$C_{s2}$	34.4 pF

### 4.2 基于分形结构的七层宽带小型化透射超表面单元仿真

同样, 为了更好地理解这种结构的工作原理, 其简化等效电路模型如图 15 所示. 该等效电路为三阶耦合谐振器带通滤波器, 并满足 butterworth 响应类型获得最大平坦度. 从简化等效电路的角度来看, 每个分形结构等效为一个 LC 并联谐振电路, 有损基片由一系列串联 LC 组成, 且每个贴片谐振边缘通过电容和下一层耦合, 等效电路的具体设计参数列于表 7, 仿真结果如图 16 所示.

图 17 所示为不同尺寸下七层透射超表面单元幅度和相位随频率变化仿真结果图. 从图中可以看出, 不同

尺寸的透射单元均具有高透射率 ( $|S_{21}| > -0.45$  dB) 和宽带特性 (带宽约为 50%), 且透射相位覆盖  $360^\circ$ , 不同尺寸单元在不同频率下的透射相位近乎平行, 反映单元具有大带宽和高透射性, 可以作为平面透镜天线单元.

图 18 所示为工作频率下七层透射超表面单元幅度和相位随尺寸变化仿真结果图. 从图中可以更加直观地看出, 在工作频率下不同尺寸的透射单元均具有高透射率 ( $|S_{21}| > -0.15$  dB), 且透射相位覆盖  $360^\circ$ , 进一步说明可以作为平面透镜天线单元.

为了进一步说明单元的宽带特性, 图 19 所示对不同工作频率下七层透射超表面单元幅度和相位随尺寸变化进行了仿真. 从图中本文可以得出和图 17 一样的结论, 即不同尺寸的透射单元均具有高透射率 ( $|S_{21}| > -0.45$  dB) 且透射相位覆盖  $360^\circ$ , 不同尺寸单元在不同频率下的透射相位近乎平行, 反映单元具有较大的带宽, 进一步说明可以作为平面透镜天线单元.

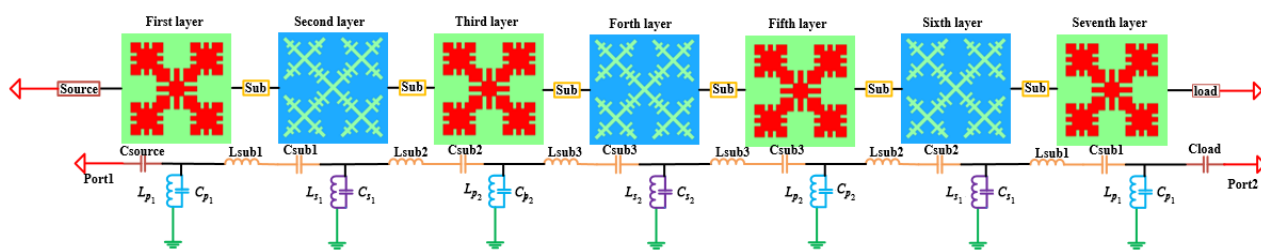


图 15 七层透射超表面单元等效电路模型示意图

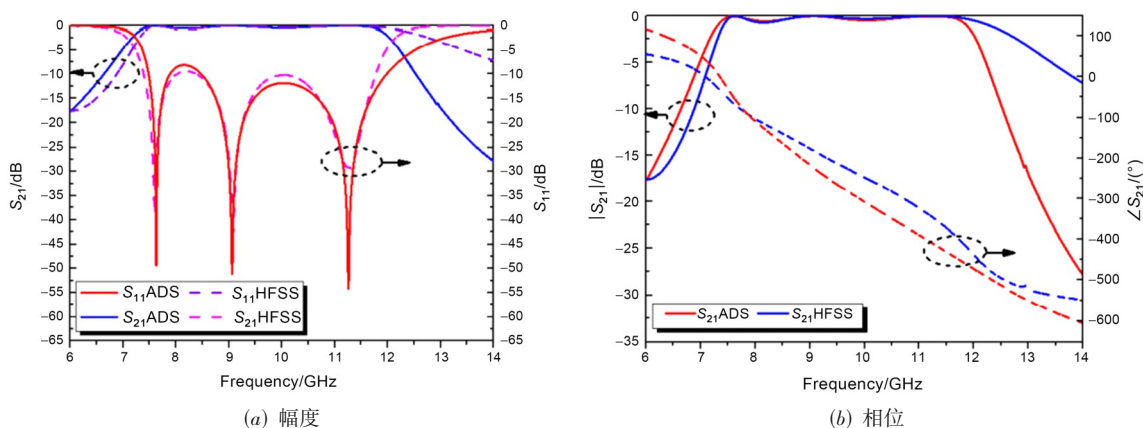


图 16 七层透射超表面单元  $S_{11}$  和  $S_{21}$  幅度与相位仿真结果和 ADS 等效电路响应对比

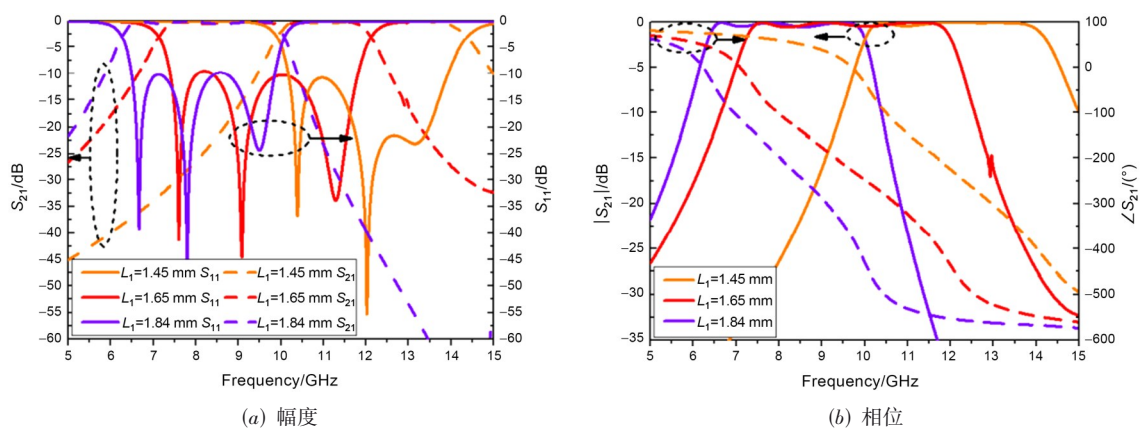


图 17 不同尺寸下七层透射超表面单元  $S_{11}$  和  $S_{21}$  幅度与相位随频率变化仿真结果

接着,分析单元对入射角的极化敏感特性,在中心频率处对入射角  $0\sim 60^\circ$  范围内 TE、TM 两种极化下的七层透射超表面单元随尺寸变化的幅度与相位进行仿真,仿真结果如图 20 所示.从图中可以看出,对于 TE 极化,单元的反射/传输系数(幅度和相位)在  $0\sim 60^\circ$  范围内不会发生明显变化,基本保持不变.对于 TM 极化,入射角的增大使通带插入损耗略有增加,工作频带略有移动.但是仿真结果仍旧表明所设计的透射超表面单元在一定角度的斜入射条件下有较宽的工作频带,且具有良好的透射特性,单元具有较高的极化不敏感特性.

### 4.3 宽带小型化平面超表面透镜天线设计

宽带小型化平面超表面透镜天线包括馈源和反射阵面,具体结构如图 21 所示.

为了产生完美的远场辐射特性,在阵面各单元相位分布设计中要考虑路径补偿及远场相位特性,在一定的焦径比下计算阵面各单元所需相位.

基于射线理论,各单元补偿相位可计算如下:

$$\Phi_{mn} = -k_0 |\mathbf{r}_{mn} - \mathbf{r}_f| \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{r}_{mn}$  表示第  $mn$  个单元的矢量位置,  $\mathbf{r}_f$  表示馈源和阵面中心间的矢量距离,  $k_0$  表示真空中的传播常数,  $\Phi_{mn}$  表示第  $mn$  个单元的补偿相位.

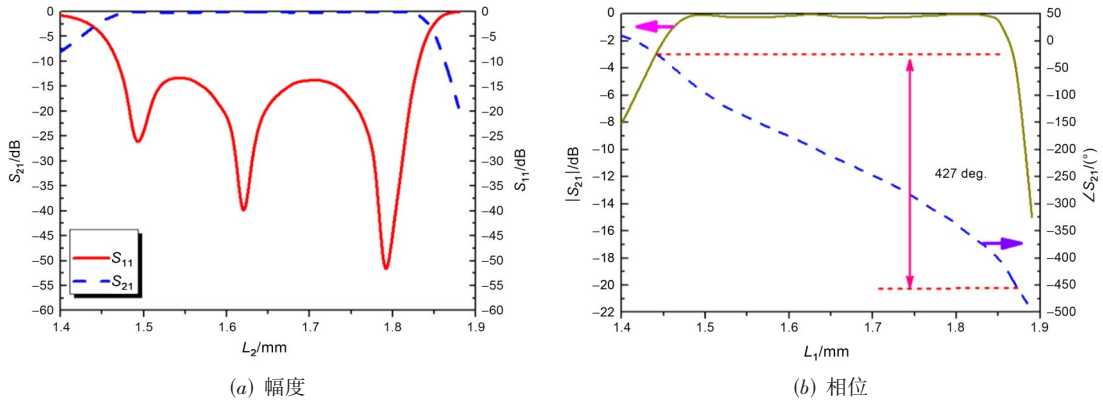


图 18 七层透射超表面单元 $S_{11}$ 和 $S_{21}$ 幅度与相位随尺寸变化仿真结果

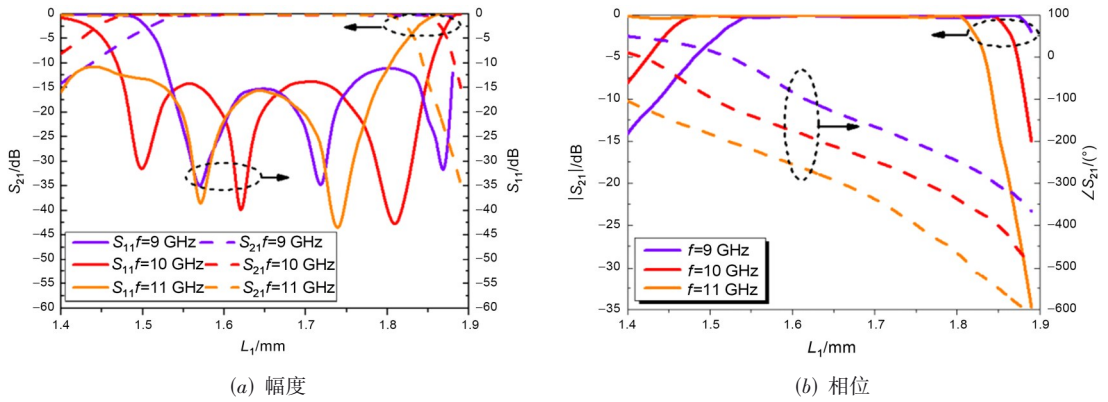


图 19 不同频率下七层透射超表面单元 $S_{11}$ 和 $S_{21}$ 幅度与相位随尺寸变化仿真结果

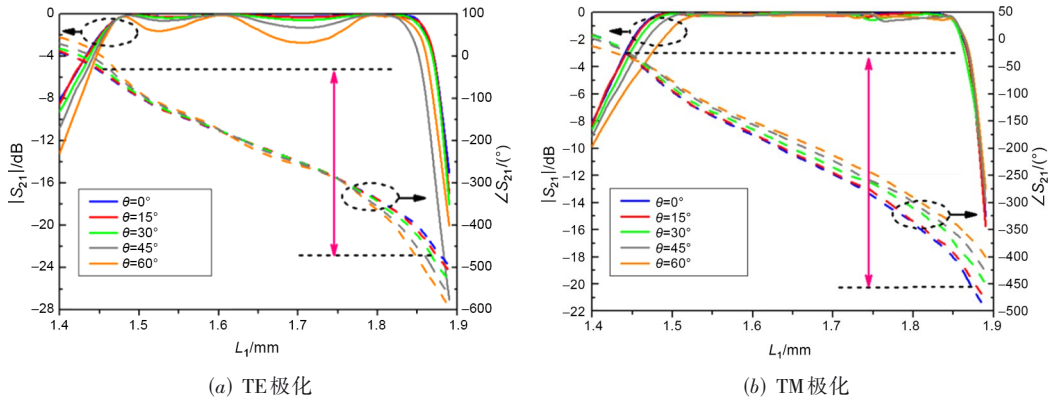


图 20 不同入射角度下七层透射超表面单元 $S_{21}$ 幅度与相位随尺寸变化仿真结果

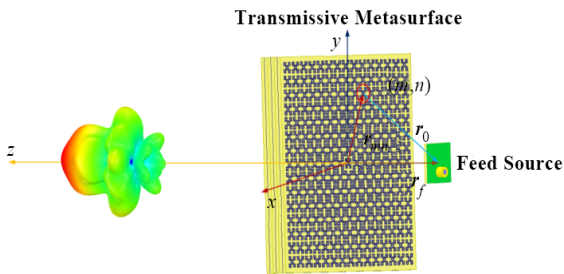


图 21 宽带小型化平面超表面透镜天线装置示意图

从加工成本的角度考虑,本文设计天线由 $15 \times 15$ 个单元组成,构成一个 $67.5 \times 67.5 \text{ mm}^2$ 的方形阵列.各单元满足的相位可由式(1)计算得到.从装置小型化的角度考虑,出于实际加工便利的需要,本文馈源采用圆形微带贴片天线,满足馈源的辐射特性.介质基片材料为F4B,介电常数为2.2,厚度为3 mm.从普遍性且满足远场条件的角度考虑,本文设计馈源距阵列中心为一个自由波长,即 $r_f=30 \text{ mm}$ .

#### 4.4 宽带小型化平面超表面透镜天线仿真

根据上述具体参数,本文对馈源和透镜天线进行建模仿真.圆形微带贴片天线结构及仿真结果及超表面天线单元分布(以第一层为例)如图22所示.

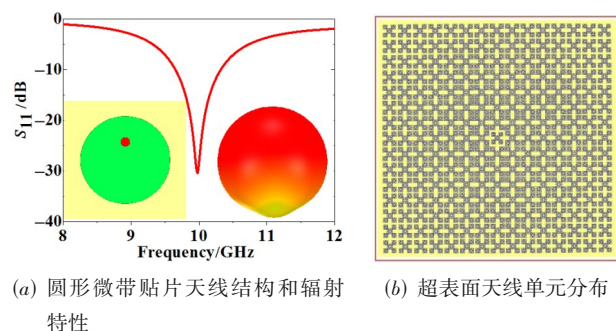


图22 馈源天线及阵面分布

为了证明本文所提出的超表面透镜天线的波束汇聚特性,这里对工作在中心频率10 GHz处的天线的E面和H面电场分布进行仿真和分析,仿真结果如图23所示.仿真结果表明,贴片天线产生的球面波在经过超表面平面透镜天线后被调制成平面波.通过将微带贴片天线和聚焦的超表面天线组合,可设计一个具有高增益的超表面平面透镜天线,辅助证明本文提出的方法的正确性.

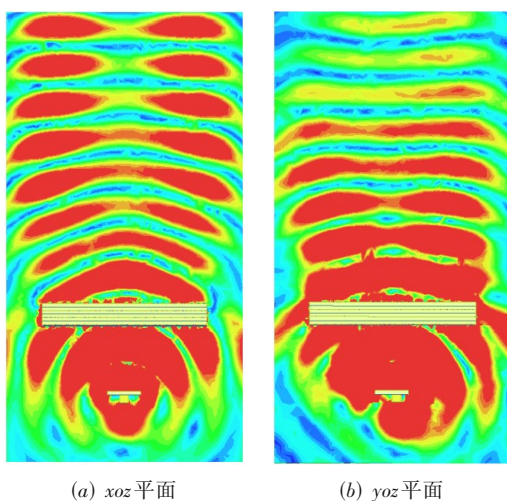


图23 超表面平面透镜天线在10 GHz处的电场分布

为了更清楚地证明本文提出的天线的性能,超表面平面透镜天线在中心频率10 GHz处的两个正交平面的归一化远场二维辐射方向图仿真结果如图24所示.仿真结果表明,设计的超表面平面透镜天线最大增益为12.5 dBi,相比馈源天线,其增益提高了5.25 dB.

为了进一步验证超表面平面透镜天线的带宽特性,本文对设计的超表面平面透镜天线模型在9~11 GHz频率范围内进行了仿真,其增益和口径效率

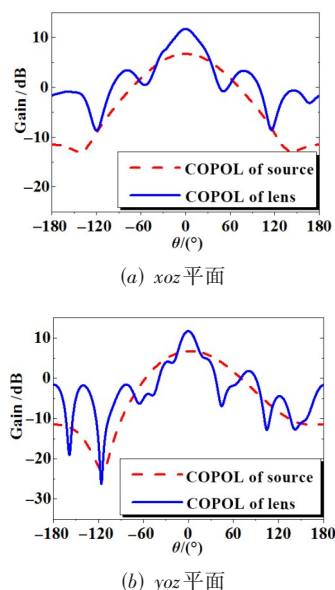


图24 超表面平面透镜天线在10 GHz处的归一化远场二维辐射方向图

如图25所示.仿真结果表明,该超表面平面透镜天线在9~11 GHz大带宽范围内保持良好的辐射特性,带宽约20%,最大增益波动小于1 dB,口径效率高达78%,进一步证明了本文提出的设计方法在宽频带内实现高增益汇聚波束的可行性.

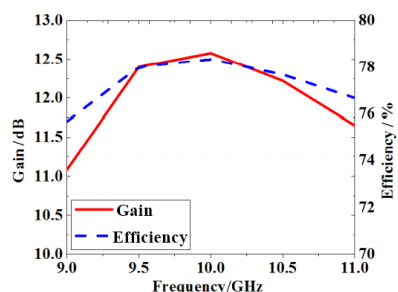


图25 超表面平面透镜天线在不同频率处的增益和口径效率

## 5 总结

本文研究了一种带宽大于20%、口径效率高达78%、单元周期为 $0.15\lambda_0$ 的平面超表面透镜天线.首先设计了两种基于分形结构的具有小型化、宽带、高透射率特性的三层透射超表面单元,单元依照天线-滤波-天线高频率选择和低剖面的设计思想,满足butterworth响应类型,然后采用堆栈结构扩大单元带宽,采用分形结构实现单元小型化(周期为 $0.15\lambda_0$ ,总高度分别为2 mm和3 mm),并提出等效电路模型辅助验证.

将两种结构应用在频率选择表面中进行仿真、加工和测试.仿真结果说明设计的两种FSS单元分别具有40%(8~12 GHz)和64%的分数带宽(6.8~13.2 GHz),与3 dB带宽4 GHz和6.4 GHz相对应,且在两种极化

(TE 和 TM 极化)方式、 $0\sim 60^\circ$  的斜入射条件下仍保持较宽的工作频带,具有良好的透射特性. 实测结果与仿真结果基本一致,进一步证明了本文设计的方法具有可行性和实用性.

为了设计出具有小型化、宽带特性的平面透镜天线,进一步改进第二种透射超表面单元,使设计的七层透射超表面单元其透射相位在满足要求特性(周期为  $0.15\lambda_0$ , 总高度为 9 mm)的尺寸可变范围内实现相位  $360^\circ$  的覆盖,并提出等效电路模型辅助验证.

仿真结果说明设计的七层透射超表面单元具有 50% (7.2~12.2 GHz) 的 3 dB 带宽,不同尺寸单元在不同频率下的透射相位近乎平行,在整个带宽内具有高透射性 ( $|S_{21}| > -0.45$  dB),且在两种极化(TE 和 TM 极化)方式、 $0\sim 60^\circ$  的斜入射条件下仍保持较好的性能,反映了单元具有大带宽、高透射性和较高的极化不敏感性,可以作为小型化宽带平面透镜天线的阵列单元.

将本文设计的七层透射超表面单元作为阵列单元进行组阵和优化,并在 HFSS 中对超表面平面透镜天线性能进行仿真与分析. 仿真结果表明,该平面透镜天线具有良好的波束汇聚特性,在 9~11 GHz 大带宽范围内保持良好的辐射特性,带宽约 20%,最大增益波动小于 1 dB,口径效率高达 78%,证明了本文提出的方法在宽频带内实现高增益汇聚波束的可行性.

#### 参考文献

- [1] LUNEBURG R K, HERZBERGER M. Mathematical Theory of Optics[M]. Berkeley: University of California Press, 1964.
- [2] KWON D H, WERNER D H. Flat focusing lens designs having minimized reflection based on coordinate transformation techniques[J]. Optics Express, 2009, 17(10): 7807-7817.
- [3] ZHANG Y, MITTRA R, HONG W. A zoned two-layer flat lens design[C]//2011 International Workshop on Antenna Technology (iWAT). Hong Kong: IEEE, 2011: 412-415.
- [4] AGHANEJAD I, ABIRI H, YAHAGHI A. Design of high-gain lens antenna by gradient-index metamaterials using transformation optics[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(9): 4074-4081.
- [5] SU Y Y, CHEN Z N. A radial transformation-optics mapping for flat ultra-wide-angle dual-polarized stacked GRIN MTM Luneburg lens antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(5): 2961-2970.
- [6] SINGH A K, ABEGAONKAR M P, KOUL S K. Wide angle beam steerable high gain flat top beam antenna using graded index metasurface lens[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(10): 6334-6343.
- [7] ZHANG N, JIANG W X, MA H F, et al. Compact high-performance lens antenna based on impedance-matching gradient-index metamaterials[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(2): 1323-1328.
- [8] ZHOU Y H, DUAN X, ZHOU L, et al. An axial compression planar lens antenna based on discrete transformation electromagnetics using high-impedance surface cells[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(8): 1606-1610.
- [9] ABDELRAHMAN A H, ELSHERBENI A Z, YANG F. Transmitarray antenna design using cross-slot elements with no dielectric substrate[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13: 177-180.
- [10] SÁNCHEZ-ESCUDEROS D, MOY-LI H C, ANTONINO-DAVIU E, et al. Microwave planar lens antenna designed with a three-layer frequency-selective surface [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 904-907.
- [11] AHMED A, ROBEL M R, ROWE W S T. Transmitarray based metasurface lens antenna[C]//2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. Atlanta: IEEE, 2019: 1195-1196.
- [12] LI H P, WANG G M, LIANG J G, et al. Single-layer focusing gradient metasurface for ultrathin planar lens antenna application[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(3): 1452-1457.
- [13] COHEN N. Fractal antennas part 1: Introduction and the fractal quad[J]. Communications Quarterly, 1995, 7: 7-22.
- [14] MA L N, ZHOU L Y, CHEN C. Broadband miniaturized bandpass frequency selective surfaces based on fractal transmissive metasurface elements[C]//2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications. Chengdu: IEEE, 2018: 336-340.

#### 作者简介



马丽娜 女,安徽淮南人. 现为上海交通大学电子信息与电气工程学院博士研究生. 主要研究方向为微波毫米波天线和同时同频全双工系统.

E-mail: lnma11@sjtu.edu.cn



顾昌展(通讯作者) 男,浙江台州人. 现为上海交通大学电子信息与电气工程学院副教授. 主要研究方向为射频/微波/毫米波电路与系统,毫米波系统一体化集成,近距雷达感知及在人机交互、物联网、生物医学等方面的应用.

E-mail: changzhan@sjtu.edu.cn