

文章编号: 2095-4980(2023)08-1007-07

## 基于尺寸渐变超表面宽带高增益低剖面天线

师伟春<sup>1,2</sup>, 王宏建<sup>\*1,2</sup>

(1. 中国科学院国家空间科学中心 微波遥感技术重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 设计了一种基于尺寸渐变超表面的宽带高增益低剖面天线, 该天线由双层超表面和一层微带缝隙组合而成。双层超表面由分别印刷在 2 个介质板上的尺寸渐变六边形阵列贴片组成, 贴片之间存在非等距间隙。超表面单元尺寸渐变设计能够使天线产生多个邻近的谐振点, 从而展宽带宽。通过改变超表面天线尺寸结构, 分析天线的宽带辐射特性。为获得最佳宽带性能, 采用遗传算法优化天线几何参数。制作并测试了一款边长为 43.3 mm, 厚度为 4.853 mm 的样本天线用于验证仿真结果。实测结果显示, 该天线 -10 dB 阻抗带宽达到了 54% (3.99~6.93 GHz), 最高增益达到 12.05 dB, 在 4~6 GHz 范围内增益保持在 8 dB 以上。该天线实现了宽频带、高增益、低剖面的特点, 适用于宽带高速率无线通信的诸多领域。

**关键词:** 超表面; 宽频带; 高增益; 低剖面; 非均匀分布; 尺寸渐变; 遗传算法

中图分类号: TN823+.24

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021101

## Broadband high-gain low-profile antenna based on gradient size metasurface

SHI Weichun<sup>1,2</sup>, WANG Hongjian<sup>\*1,2</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A broadband high-gain low-profile antenna based on gradient size metasurface is proposed. The antenna is composed of a double-layer metasurface and a layer of microstrip slot. The double-layer metasurface is composed of gradient size hexagonal array patches printed on two dielectric plates respectively. There are non-equidistant gaps between these patches. This gradient design of the metasurface unit size can generate multiple adjacent resonance points to broaden the bandwidth. The antenna's bandwidth radiation characteristics are analyzed by changing the size and structure of the metasurface antenna. In order to obtain the best broadband performance, genetic algorithms are employed to optimize the antenna geometric parameters. To verify the simulation results, a sample antenna with a side length of 43.3 mm and a thickness of 4.853 mm is fabricated and tested. The actual measurement results show that the -10 dB impedance bandwidth of the antenna reaches 54% (3.99~6.93 GHz), the highest gain reaches 12.05 dB, and the gain remains above 8 dB in 4~6 GHz range. Therefore, the antenna realizes the characteristics of wide frequency band, high gain and low profile, and can be applied to many fields of wireless communication.

**Keywords:** metasurface; broadband; high-gain; low-profile; non-uniform distribution; gradient size; genetic algorithm

随着现代无线通信技术的快速发展, 移动通信系统、雷达、卫星通信等对高速率数据传输和大信道容量的需求日益增长, 宽带、高增益天线得到了快速发展<sup>[1-3]</sup>。波导天线、透镜天线、微带天线等都是高增益天线, 但是高增益波导和透镜天线体积庞大, 不适用于小型化和系统集成; 微带天线由于其外型小巧, 易于集成, 制造成本低, 已被广泛用于各种无线通信系统中<sup>[4]</sup>。然而传统的微带天线增益和带宽是有限的, 并且微带阵列天线介质损耗随着天线频率的增加而增加, 限制了它们的实际应用。

近年来超材料得到了广泛关注, 超表面是一种二维超材料结构, 具有低剖面、设计简单、低损耗等特性,

收稿日期: 2021-03-08; 修回日期: 2021-04-26

\*通信作者: 王宏建 email:wanghongjian@mirslab.cn

在极化控制和提高增益方面有许多显著优点<sup>[5-7]</sup>。超表面已被用于天线领域,用以改善天线性能,如提高辐射增益,实现极化转换,改善阻抗带宽,以及减小天线尺寸等<sup>[8-15]</sup>。文献[8]提出了一种基于缝隙耦合馈电的超表面天线,利用单层周期分布的超表面单元实现阻抗带宽为 28%,增益达到 9.8 dB。文献[9]利用非均匀超表面单元实现了天线的小型化,阻抗带宽达到 21%,最高增益为 7.2 dB。综上所述,一般的单层超表面带宽不会超过 30%。文献[10]中提出利用双层超表面提高增益和展宽天线带宽,阻抗带宽可以达到 44%,最高增益达到 11.5 dB。文献[11]在双层超表面的基础上,利用非等尺寸超表面单元和特殊缝隙耦合提高增益并增加阻抗带宽,天线带宽达到 54.9%。虽然文献[10-11]提高了阻抗带宽,但这 2 款天线的增益平坦度并不好,在整个频段范围内出现了较大的增益变化,并且谐振效果较差,部分频段驻波较大。

本文提出一种新型六边形超表面单元结构,利用六边形贴片单元尺寸渐变,改善超表面的辐射特性;并设计相应的分支型耦合缝隙,增强天线的稳定性。该天线实物测试的阻抗带宽范围为 3.99~6.93 GHz,相对带宽达到 54%。相比文献[10],阻抗带宽扩展了 10%,并且天线的增益平坦度较文献[11]中三段阶梯式变化改善为更加平稳的增益变化,即天线在 4.1~5.9 GHz 范围内增益范围为 9~12 dB,从而改善了天线的稳定性。此外该天线的剖面尺寸相比文献[10-11],缩减了 1 mm。该超表面天线是一款宽带、高增益、低剖面天线,可用于更加广泛的无线通信系统中。

## 1 天线结构设计

设计的宽带、高增益、低剖面超表面天线的结构如图 1(a)所示。该天线由 3 层型号为 Rogers RO4003、介电常数  $\epsilon_r=3.55$ 、损耗角正切  $\delta=0.0027$ 、高度  $L=75$  mm、边长  $W_a=43.3$  mm 的正六边形介质板组成,分别是厚度为  $H=1.52$  mm,堆叠在一起的 2 块相同大小超表面层和厚度为  $H_1=0.813$  mm 厚的馈电接地层,超表面结构层和馈电接地层隔着厚度为  $H_{air}=1$  mm 的空气腔。天线的超表面单元结构如图 1(b)所示,非均匀尺寸的正六边形金属贴片印制在介质基板上,正六边形金属贴片的尺寸由基板中心向边缘依次减小,基板对角线上的相邻贴片间隙为  $g$ ,相同尺寸的贴片几何中心分布在较小的六边形边界上。金属贴片向上的 2 层相同大小的介质板紧贴在一起组成超表面结构层,这种结构的非均匀分布可以产生多个相邻谐振点,从而展宽天线阻抗带宽,并且不同的间隙也可以使天线的整个频带增益变化幅度变小。采用遗传算法优化得到贴片及缝隙的最佳尺寸分别为: $W_1=11$  mm、 $W_2=10$  mm、 $W_3=9$  mm、 $W_4=8$  mm、 $g=1$  mm。如图 1(c)所示,天线的馈电介质板结构上层是开有特殊结构缝隙的接地金属板,下层是末端开扇形的馈电微带线。馈电微带线的长度为  $L_f=37.5$  mm、宽度为  $W_f=2$  mm,末端扇形张角  $\theta=120^\circ$ 、扇形半径  $R=2.5$  mm。根据文献[6-10]中的设计经验,接地面上的缝隙只有与超表面贴片之间的缝隙重合才能达到最好的耦合效果,因此利用超表面和一个长为  $L_s=27$  mm、宽为  $W_s=10$  mm 的矩形进行布尔运算相减得到接地板耦合缝隙图案。

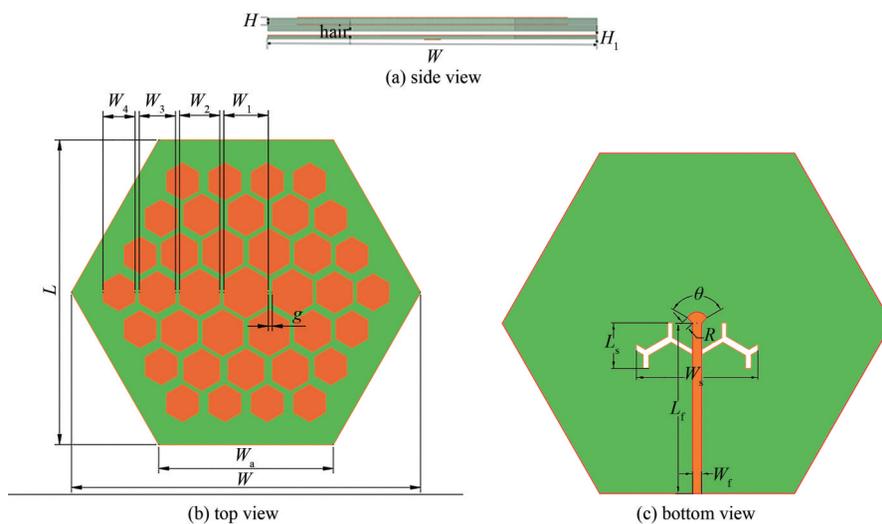


Fig.1 Geometry of the proposed antenna

图 1 天线结构图

天线的立体结构如图 2 所示,从上到下依次为超表面第 1 层、超表面第 2 层、附在馈电层上表面的开缝金属层、附在馈电层下表面的微带馈线。天线的整体尺寸为  $1.25\lambda_0 \times 1.44\lambda_0 \times 0.08\lambda_0$  ( $\lambda_0$  为中心频率在自由空间中的波长)。

## 2 天线优化仿真结果分析

### 2.1 尺寸渐变超表面设计

传统的缝隙耦合超表面天线都采用均匀分布的等尺寸贴片单元和缝隙，文献[7-10]中的超表面有单层结构，也有双层结构，它们都有一个共同点就是超表面贴片单元是等尺寸均匀分布的矩形贴片。本文所设计的超表面由2层大小相同的六边形贴片堆叠构成，为了研究超表面单元非均匀分布和尺寸渐变对天线性能的影响，利用电磁仿真软件设计如图3所示的2种超表面结构。图3(a)为等尺寸均匀分布的超表面结构，图3(b)为尺寸渐变非均匀分布的超表面结构。

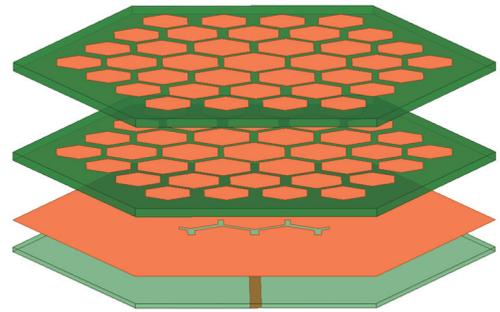


Fig.2 Stereo structure of antenna  
图2 天线分层结构立体图

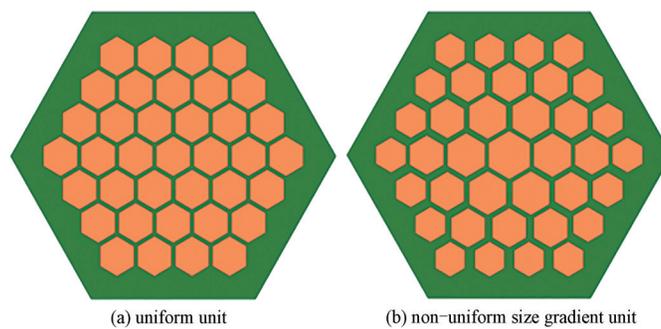


Fig.3 Different meta-surface structures  
图3 两种不同超表面结构

为比较2种结构的电磁辐射特性，2种超表面金属贴片总面积轮廓大小相等，超表面贴片单元尺寸渐变关系为：

$$W_{n+1} = W_n + d \tag{1}$$

式中： $W_n$ 为从基板中心  $n=1$  处向外扩散的单元贴片尺寸； $d$ 为相邻单元贴片尺寸差，即均匀分布时  $d=0$ ，非均匀分布时  $d \neq 0$ 。

2种超表面结构的仿真结果对比如图4所示。从图中可以明显看出，非均匀超表面阻抗带宽和增益都优于均匀超表面。文献[8]中提到周期性网格排列组成的超表面通过传输线模型分析等效于电容特性的辐射表面，可以使天线产生2个相邻的谐振频率，并在这2个频点以不同的传输模式达到谐振，从而展宽带宽。本文提出的周期性六边形超表面单元，也可以等效为电容特性的辐射表面，并且均匀和非均匀分布都能产生3个谐振点。通过分析仿真结果发现，非均匀超表面天线在低频处产生谐振点，这是因为贴片尺寸的渐变改变了整个辐射表面的阻抗特性，基板中心较大的贴片对应的低频波长长，基板边缘小尺寸贴片对应的高频波长短，并且这种通过缝隙耦合的馈电方式也使得处在基板中心处的较大尺寸贴片的表面电流高于边缘处小尺寸贴片，导致天线低频增益大于高频增益。

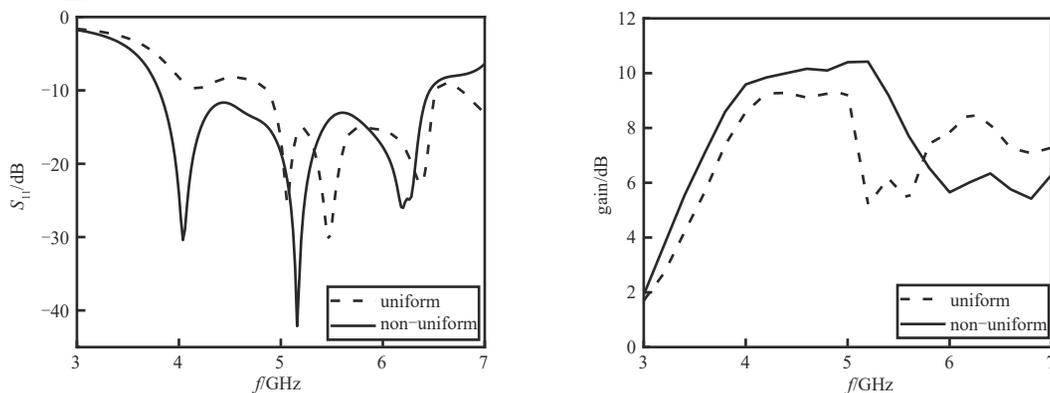


Fig.4 Simulation results of uniform and non-uniform metasurface antenna  
图4 均匀非均匀超表面天线仿真结果

## 2.2 天线参数分析

通过对 2 种超表面结构的分析, 可以得出非均匀超表面结构天线带宽更宽, 增益更高, 因此需要对非均匀超表面天线的结构参数做进一步分析, 深入研究超表面结构参数对天线性能的影响。在仿真过程中发现, 影响天线性能的主要参数有单元贴片尺寸  $W_n$ 、相邻贴片尺寸差  $d$ 、贴片间隙  $g$ 、空气腔高度  $H_{\text{air}}$ 、以及不同尺寸贴片单元数量  $n$ 。

图 5 为贴片单元尺寸  $W_n$  对阻抗性能的影响。设中心贴片尺寸  $W_1=9\sim 12$  mm, 根据式(1)约束关系,  $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$  也随之改变。可以看出, 随着贴片单元尺寸的变大, 谐振点向低频偏移; 当  $W_1=10$  mm 时, 天线具有最宽的阻抗带宽。因此, 设置中心贴片尺寸初始值  $W_1=10$  mm。研究相邻贴片尺寸差  $d$  对天线带宽的影响, 图 6 为贴片尺寸差  $d$  对超表面天线带宽的影响。可以看到,  $d$  越小, 谐振点越往低频偏移。这是因为  $d$  的大小决定了贴片尺寸大小,  $d$  越小, 基板中心贴片单元尺寸越大。 $d=1$  mm 时, 天线带宽最宽, 因此选择 1 mm 为  $d$  初始尺寸。图 6 为贴片间隙  $g$  对天线带宽的影响, 从图 7 可以看出, 当  $g$  增加时, 第一谐振点向高频偏移, 这是因为随着贴片间隙  $g$  的增大, 贴片间等效电容减小。 $g=1$  mm 时, 天线达到最宽的阻抗带宽。该超表面天线由微带线馈电, 通过接地面上开缝形成对空气腔上层超表面耦合馈电结构, 因此空气腔的高度  $H_{\text{air}}$  对天线的性能也有一定的影响。如图 8 所示, 可以看出,  $H_{\text{air}}=1$  mm 时, 天线阻抗带宽最宽。

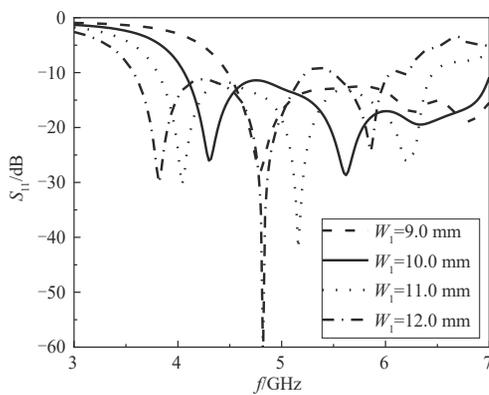


Fig.5 Effect of  $W_1$  on the proposed antenna bandwidth  
图 5  $W_1$  对天线带宽的影响

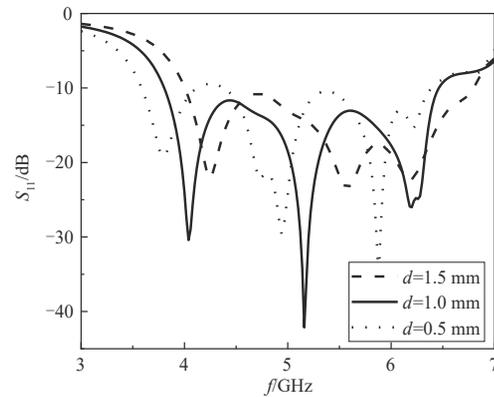


Fig.6 Effect of  $d$  on the proposed antenna bandwidth  
图 6  $d$  对天线带宽的影响

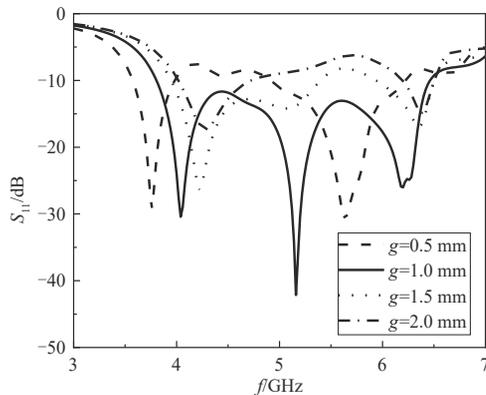


Fig.7 Effect of  $g$  on the proposed antenna bandwidth  
图 7  $g$  对天线带宽的影响

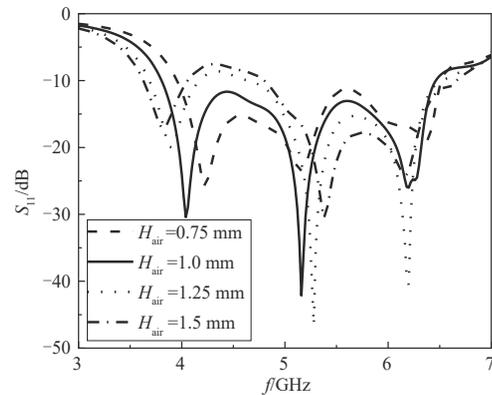


Fig.8 Effect of  $H_{\text{air}}$  on the proposed antenna bandwidth  
图 8  $H_{\text{air}}$  对天线带宽的影响

## 2.3 遗传算法优化设计分析

在保持其他参数不变的情况下, 研究天线单一参数变化对天线性能的影响, 可得到天线所有参数粗略的最优结果, 但并不能实现多参数同时改变来观察天线的性能。为得出该超表面天线最佳性能, 采用遗传算法对天线部分参数进行优化。利用由 Fortran 语言编写的遗传算法与时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)电磁仿真算法嵌套, 实现遗传算法每次迭代的目标函数都来自 FDTD 对超表面电磁仿真的结果。遗传算法优化的参数包括: 中心贴片尺寸  $W_1$ 、贴片尺寸差  $d$ 、贴片间隙  $g$ 、空气腔高度  $H_{\text{air}}$ 。同时, 为了获得最宽阻抗带宽和高增益平坦度, 设置目标函数为:

$$fitness\_function = 2 - (w_1 S_{11,BW} + w_2 G_{BW}) \tag{2}$$

式中：

$$S_{11,BW} = \frac{2(f_{b2} - f_{b1})}{f_{b2} + f_{b1}} \tag{3}$$

$$G_{BW} = \frac{2(f_{G2} - f_{G1})}{f_{G2} + f_{G1}} \tag{4}$$

式中： $f_{b2}$ 和 $f_{b1}$ 分别为 $S_{11}$ 小于-13 dB时的高频和低频点； $f_{G1}$ 和 $f_{G2}$ 分别为比峰值增益低了3 dB频带范围内的高频和低频点。由于阻抗带宽和增益平坦度同等重要，因此设权重参数 $w_1=w_2=0.5$ 。值得注意的是，为了使天线达到更好的谐振效果，本文使用了更严格的反射系数条件，即 $S_{11} \leq -13$  dB，而不是 $S_{11} \leq -10$  dB的优化目标。为了得到最优结果，遗传算法目标函数最优解为求最大值。表1为遗传算法中的其他参数设置。天线参数最终优化结果为： $W_1=11$  mm、 $d=1$  mm、 $g=1$  mm、 $H_{air}=1$  mm，优化后天线最佳带宽和增益如图9所示，天线阻抗带宽范围3.81~6.47 GHz，相对带宽达到52%，最高增益为10.5 dB。

表1 遗传算法参数设置

Table1 Parameter setting of genetic algorithm

GA parameter	value
population	200
number of generations	50
selection mechanism	Tournament
cross rate/%	95
mutation rate	5

### 3 实测结果分析

加工并组装了一个尺寸渐变超表面天线实物，图10为天线实物顶面及底面照片，以及天线在暗室的测试场景。利用尼龙钉和垫片组装天线，并焊接50 Ω SMA(SubMiniature version A connector)接头用来连接测试线。使用Agilent Technologies N5244A型号矢量网络分析仪测量天线的反射系数 $S_{11}$ ，天线的增益和辐射方向图在无反射波的暗室中采用NSI2000近场测试系统进行测试。

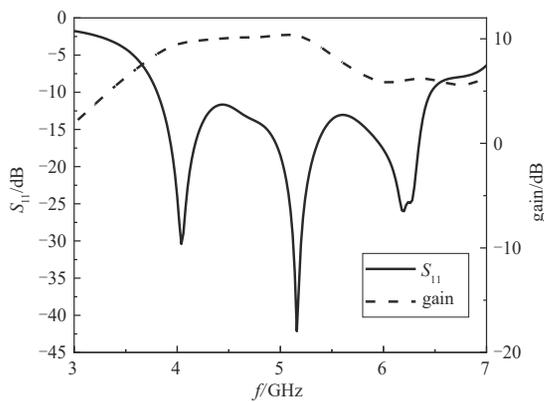


Fig.9 Optimization results of genetic algorithm  
图9 遗传算法优化结果

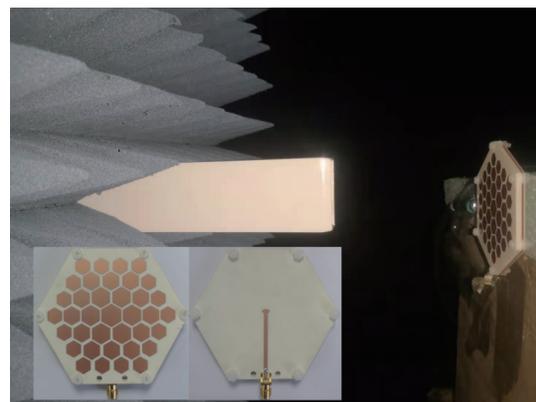


Fig.10 Antenna and testing environment  
图10 天线实物及测试场景

超表面天线仿真和测量的反射系数 $S_{11}$ 结果对比如图11所示，可以看出，仿真结果阻抗带宽范围为3.81~6.47 GHz，相对带宽为52%；实测结果阻抗带宽范围为3.99~6.93 GHz，相对带宽为54%，测量和仿真结果大致相同。实物测量向高频偏移，造成差异的原因有焊接SMA接口对天线阻抗匹配改变，组装时贴片间隙改变了天线的耦合效果。

超表面天线增益的仿真和测量结果对比如图12所示，可以看出，测量和仿真结果有较好的一致性。天线的峰值增益为12.02 dB，并拥有良好的增益平坦度，即天线在4.1~5.9 GHz范围内增益范围为9~12 dB。相较于文献[10]中超表面天线增益从7 dB逐渐升高到11.5 dB，然后迅速降到7.5 dB，增益平坦度改善了很多。验证了该天线拥有宽带、高增益的性能。

超表面天线阻抗带宽范围内3个代表性频点的E面和H面方向图如图13所示，方向图测量结果由于场地原因限制，只测了±60°范围。4.2 GHz天线E面方向图3 dB波束宽度为46°，H面方向图3 dB波束宽度为64°，测量和仿真结果基本一致。5.2 GHz天线E面方向图3 dB波束宽度为30°，H面方向图3 dB波束宽度为42°，测量和仿真

结果基本一致。6.2 GHz 天线 *E* 面方向图 3 dB 波束宽度为 33°, *H* 面方向图 3 dB 波束宽度为 47°, 测量和仿真结果基本一致。可以看出, 高频时天线出现多波束形状方向图, 这是由于非均匀超表面单元以及耦合缝隙共同对天线辐射特性的影响。综上所述, 该超表面天线在 3 个频点都显示出较宽的波束宽度辐射特性。

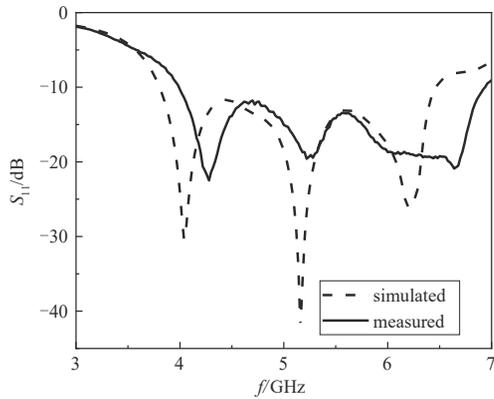


Fig.11 Measurement and simulation results of  $S_{11}$   
图 11  $S_{11}$  测试和仿真结果

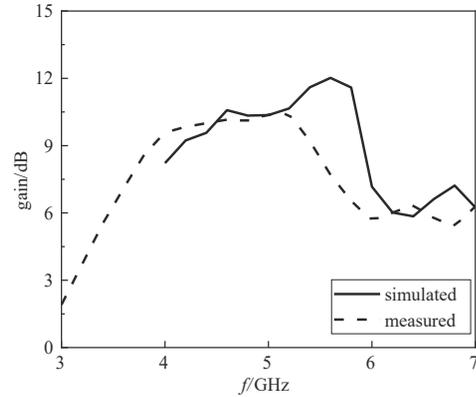


Fig.12 Measurement and simulation results of gain  
图 12 增益测试和仿真结果

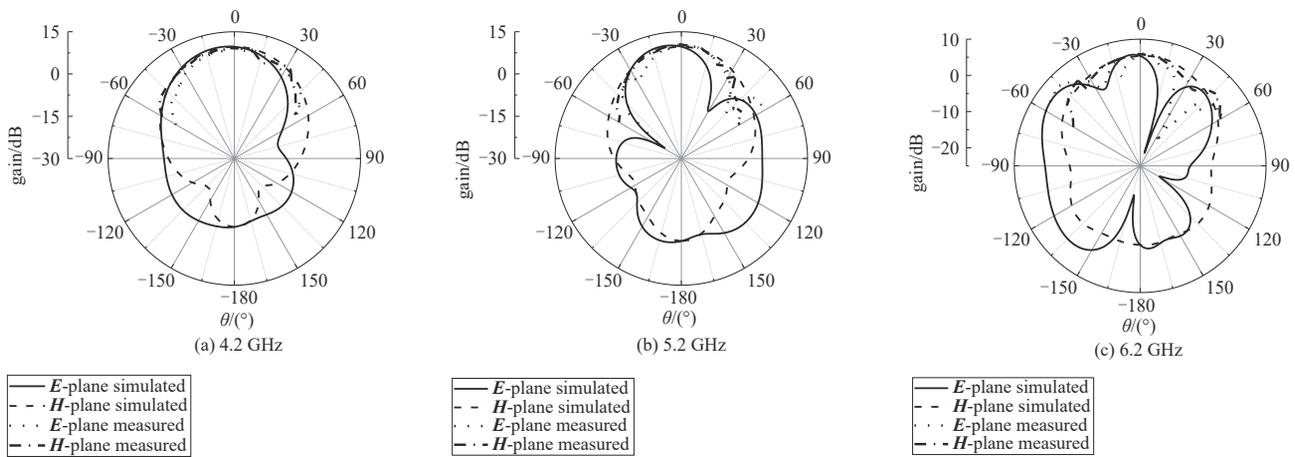


Fig.13 Measurement and simulation of antenna pattern at different frequencies  
图 13 不同频点测试和仿真天线方向图

表 2 为本文设计的超表面天线和其他宽带天线的性能比较。文献[7-9]中天线都采用单层均匀分布超表面, 天线带宽低于 30%, 增益低于 10 dB, 文献[10]中天线采用双层均匀等尺寸超表面, 并且利用空气腔来提高天线的增益, 可以达到较高的增益。本文提出的非均匀尺寸渐变超表面天线不仅提高了天线的增益, 天线阻抗带宽展宽 10%, 而且降低了天线的剖面尺寸, 使天线得到更加广泛的应用。

表 2 不同宽带天线性能比较

Table 2 Antenna performance comparison

Ref.	$S_{11} < -10$ dB, BW/%	peak gain/dB	thickness/mm	aperture/mm
[7]	25.0	9.90	4.063	60×60
[8]	28.0	9.80	4.063	60×60
[9]	21.6	7.70	4.063	26.4×25.0
[10]	44.0	11.50	5.310	65×65
proposed	54.0	12.05	4.853	70×70

#### 4 结论

本文设计了一种非均匀分布尺寸渐变六边形超表面天线, 该天线由双层超表面和缝隙耦合馈电层组成。通过对非均匀超表面辐射特性的研究, 分析天线结构对辐射特性的影响, 利用遗传算法优化出超表面天线最优性能尺寸, 最后加工并测试天线实物, 实测结果与仿真结果基本一致。测试数据显示该非均匀尺寸渐变超表面天线阻抗带宽达到 54%(3.99~6.93 GHz), 最高增益达到 12.05 dB, 天线整体厚度只有 4.853 mm。相较于相同口径大小的均匀等尺寸超表面天线, 阻抗带宽展宽了 10%, 增益提高了 1 dB, 实现了宽频带、高增益以及低剖面的特

点。该天线可用于移动通信系统、雷达导航、卫星通信等诸多宽带高速率无线通信领域。

#### 参考文献：

- [ 1 ] 刘士杰,陈星. 基于多层介质覆盖层的高增益 Fabry-Perot 天线设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(3):486-489. (LIU Shijie, CHEN Xing. Design of a high gain Fabry-Perot resonant antenna by using a multi-layer dielectric superstrate[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(3):486-489.)
- [ 2 ] WANG N Z, LIU Q, WU C Y, et al. Wideband Fabry-Perot resonator antenna with two complementary FSS layers[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014,62(5):2463-2471.
- [ 3 ] NIAZ M W, YIN Y Z, BHATTI R A, et al. Wideband Fabry-Perot resonator antenna employing multilayer partially reflective surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021,69(4):2404-2409.
- [ 4 ] YANG W C, CHEN S, CHE W Q, et al. Compact high-gain metasurface antenna arrays based on higher-mode SIW cavities[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018,66(9):4918-4923.
- [ 5 ] SYED NASSER S S, LIU W, CHEN Z N. Wide bandwidth and enhanced gain of a low-profile dipole antenna achieved by integrated suspended metasurface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018,66(3):1540-1544.
- [ 6 ] LIU W E I, CHEN Z N, QING X M, et al. Miniaturized wideband metasurface antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017,65(12):7345-7349.
- [ 7 ] LIU W, CHEN Z N, QING X M. Metamaterial-based low-profile broadband mushroom antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014,62(3):1165-1172.
- [ 8 ] LIU W, CHEN Z N, QING X M. Metamaterial-based low-profile broadband aperture-coupled grid-slotted patch antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015,63(7):3325-3329.
- [ 9 ] LIU W E I, CHEN Z N, QING X M. Miniature wideband non-uniform metasurface antenna using equivalent circuit model[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020,68(7):5652-5657.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] BAI H, WANG G M, WU T. High-gain wideband metasurface antenna with low profile[J]. IEEE Access, 2019(7):177266-177273.
- [ 12 ] 刘长青,张量,万志伟,等. 基于超表面的低剖面高增益圆极化天线[J]. 电波科学学报, 2021,36(1):96-100. (LIU Changqing, ZHANG Liang, WAN Zhiwei, et al. A low profile high gain circularly polarized antenna based on metasurface[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021,36(1):96-100.)
- [ 13 ] CHEN Z N, LI T, LIU W E I. Microwave metasurface-based lens antennas for 5G and beyond[C]// 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP). Copenhagen, Denmark:IEEE, 2020:1-4.
- [ 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(6):3512-3516.
- [ 15 ] CHEN S, YANG W C, CHE W Q, et al. Novel compact high-gain wideband filtering metasurface antenna[C]// 2018 Asia-Pacific Microwave Conference(APMC). Kyoto, Japan:IEEE, 2018:1393-1395.

#### 作者简介：

师伟春(1996-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为宽带超表面微波无源器件设计. email:2320509770@qq.com.

王宏建(1969), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为星载天线理论与工程、高精度天线近场测量研究、计算电磁学、微波、太赫兹器件研究等.