

# 一种基于频率选择表面的高增益超宽带单陷波天线

武广乾<sup>1,2</sup>, 牛旭印<sup>1,2</sup>, 王少锋<sup>1,2\*</sup>

(1. 山西大学 物理电子工程学院, 山西 太原 030006;

2. 山西大学 无线通信与检测山西省重点实验室, 山西 太原 030006)

**摘要:** 为增强一种具有WLAN抑制特性的超宽带陷波天线的增益, 设计了一种以FR4为介质基板的单层频率选择表面。所设计的频率选择表面由印刷在基板上的 $5 \times 5$ 圆形周期金属单元排列而成, 每个周期单元包含两个半径不同的圆形环, 整体尺寸为 $75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ ; 通过优化圆形环的结构和尺寸可以得到所需的传输特性, 与天线集成后可以在不影响陷波性能的前提下提高天线增益。仿真结果表明, 天线的工作频段为 $2.5 \sim 11 \text{ GHz}$ , 陷波频段为 $5.08 \sim 6.1 \text{ GHz}$ 。加载频率选择表面后, 实测的 $S_{11}$ 曲线与仿真结果吻合良好, 陷波性能未受影响, 主要工作频段内的平均增益提高了 $3.96 \text{ dBi}$ , 呈现较好的定向辐射效果, 验证了所设计的频率选择表面的有效性。

**关键词:** 超宽带天线; WLAN陷波; 频率选择表面; 增益提升

**中图分类号:** TN823+.24

**文献标识码:** A

**doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025048

**引用格式:** 武广乾, 牛旭印, 王少锋. 一种基于频率选择表面的高增益超宽带单陷波天线[J]. 测试技术学报, 2025, 39(4): 483-490.

WU Guangqian, NIU Xuyin, WANG Shaofeng. A high-gain ultra-wideband single-notch antenna based on frequency selective surfaces[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(4): 483-490.

## A High-Gain Ultra-Wideband Single-Notch Antenna Based on Frequency Selective Surfaces

WU Guangqian<sup>1,2</sup>, NIU Xuyin<sup>1,2</sup>, WANG Shaofeng<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Wireless Communication and Detection, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** To enhance the gain of an ultra-wideband notch antenna with WLAN inhibition characteristics, a single-layer frequency-selective surface (FSS) was designed using FR4 as the dielectric substrate. The FSS was composed of a  $5 \times 5$  array of printed circular periodic metal units on the substrate and each unit contained two circular rings of different radii. The overall size was  $75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ . By optimizing the structure and dimensions of the circular rings, the desired transmission properties were achieved. When integrating with the antenna, the gain was improved without affecting the notch performance. Simulation results show that the antenna operates in the frequency band of  $2.5 \text{ GHz}$  to  $11 \text{ GHz}$ , with a notched band from  $5.08 \text{ GHz}$  to  $6.1 \text{ GHz}$ . After integrating FSS, The measured  $S_{11}$  curve matches well with the simulation results, indicating that the notch performance remains unaffected. The average gain in the main

收稿日期: 2024-08-26

基金项目: 山西省基础研究计划资助项目(202303021212002)

作者简介: 武广乾(1996-), 男, 硕士生, 主要从事超宽带天线研究。E-mail: 269791704@qq.com。

\* 通信作者: 王少锋(1989-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光电探测、超宽带天线研究。E-mail: wangshaofeng@sxu.edu.cn。

operating band increases by 3.96 dBi, showing good directional radiation and suggesting the effectiveness of the designed FSS.

**Key words:** ultra-wideband; WLAN band-notch; frequency selective surfaces; gain enhancement

## 0 引言

超宽带天线在短距离和高速通信系统中应用广泛<sup>[1]</sup>,根据美国联邦通信委员会,超宽带许可频段被分配为3.1~10.6 GHz,但该频段会受到其它窄带信号的干扰,如WiMAX 3.5 GHz (3.3~3.8 GHz)、WLAN 5.8 GHz (5.15~5.85 GHz)等,为避免频段重叠对通信造成的影响,设计具有陷波特性的超宽带天线具有重要意义。目前常见方法包括在辐射贴片、馈线或接地板上引入缝隙槽或缺陷地结构,添加寄生结构如分环谐振器等<sup>[2-3]</sup>。

超宽带贴片天线具有体积小、剖面低、功耗低等优点,但这类天线的增益低、方向性较差。在一些应用场景,例如医学成像与隔墙探测中,都要求天线具有高增益和高方向性。目前提高天线增益的方法常有设置金属反射板、添加寄生贴片、电磁带隙结构,以及使用频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)等<sup>[4-6]</sup>。其中,FSS是一种金属或缝隙的周期结构,在一定的频带内表现出带通或带阻特性,其传输特性主要取决于周期单元的尺寸和几何形状<sup>[7]</sup>。Kundu等<sup>[8]</sup>设计了由两种不同的FSS组成的双层结构,将天线增益提高了约4.2 dBi;Kumar等<sup>[9]</sup>与Parchin等<sup>[10]</sup>分别设计了一种以FR4为衬底的单层表面,前者将天线的增益提高了4.0 dBi,最大达到7.84 dBi,后者提高了6.5 dBi,最高达到9.2 dBi;Al-Gburi等<sup>[11]</sup>设计了一种尺寸更小的单层FSS,将天线的增益提高了约6.2 dBi;Hasan等<sup>[12]</sup>为一种多端口宽带天线设计了以罗杰斯RT5880为衬底的单层FSS,将增益提升了2.9 dBi,同时还为多端口天线提供了一定的隔离度。以上设计均适用于一般的超宽带天线,但对于具有窄带陷波特性的超宽带天线却并未涉及。由于加载FSS表面会对天线阻抗匹配造成影响从而干扰其陷波性能,因此,设计一种FSS以针对性地提高陷波天线的增益具有一定的研究意义。

本文设计了一种适用于具备5.8 GHz WLAN抑制特性的超宽带单陷波天线的FSS,可以有效

提高天线工作频段内的增益,并且对天线的陷波特性的影响没有影响。

## 1 天线结构设计

### 1.1 超宽带陷波天线结构设计

所设计的结构由微带天线与FSS两部分组成。天线结构如图1所示,辐射贴片与接地板分别印刷在基板两侧,优化后的天线整体尺寸30 mm×40 mm,其它参数见表1。

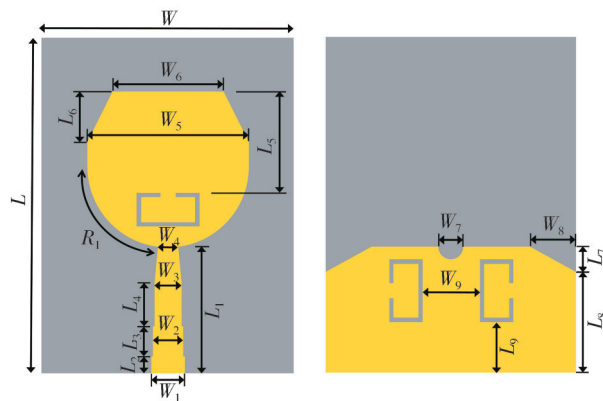


图1 天线结构

Fig. 1 Structure of antenna

基板采用介电常数为4.4,厚度为1.6 mm的FR4材料。辐射贴片由矩形与半圆形组合而成,并通过切角操作将其中的矩形部分改为梯形,与阶梯形馈线相连后可以共同改善天线的阻抗匹配。对天线接地板的两端进行切角,形成一对 $W_8 \times L_7$ 的三角形开槽,并添加一个直径为 $W_7$ 的半圆槽,拓展天线的带宽。

为实现对WLAN信号的抑制,选择在辐射贴片与接地板上分别刻蚀半波长的C型结构槽,形成谐振结构,如图2所示。它的尺寸应满足<sup>[13]</sup>

$$2A_1 + 2A_2 - g_1 - 4d_1 \approx \frac{c}{2f_n \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}, \quad (1)$$

$$2B_1 + 2B_2 - g_2 - 4d_2 \approx \frac{c}{2f_n \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}, \quad (2)$$

式中: $c$ 为光速; $f_n$ 为陷波中心频率; $\epsilon_{\text{eff}}$ 为相对介电常数。当C型槽尺寸满足上式时,天线在 $f_n$ 处阻抗失配,反射系数明显增大,形成陷波。经过仿真优化后的尺寸参数见表1。

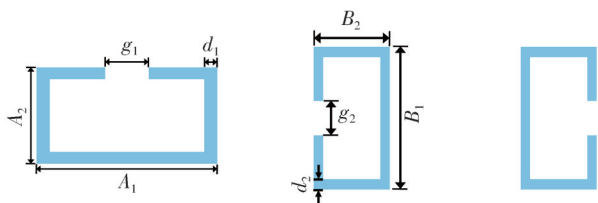


图 2 陷波结构

Fig. 2 Structure of band-notch

表 1 天线各部分尺寸

Tab. 1 Parameters of antenna

参数	值/mm	参数	值/mm	参数	值/mm
$L$	40	$W$	30	$L_1$	15
$L_2$	2	$L_3$	3.6	$L_4$	5.2
$L_5$	12	$L_6$	6	$L_7$	3
$L_8$	12	$L_9$	6	$R_1$	9.5
$W_1$	4	$W_2$	3.6	$W_3$	5.2
$W_4$	2.4	$W_5$	19.2	$W_6$	13.2
$W_7$	3	$W_8$	5.5	$W_9$	6.8
$A_1$	7.5	$g_1$	0.5	$A_2$	4
$B_1$	7.5	$B_2$	4	$d_1$	0.55
$d_2$	0.5	$g_2$	1.8		

### 1.2 FSS 单元设计

FSS 的周期单元结构和 ANSYS HFSS 仿真模型如图 3(a) 所示, 每个单元的尺寸为  $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ , 由两条宽度分别为  $F_1$  与  $F_2$  的金属圆环以间隔  $F_3$  进行嵌套而成。

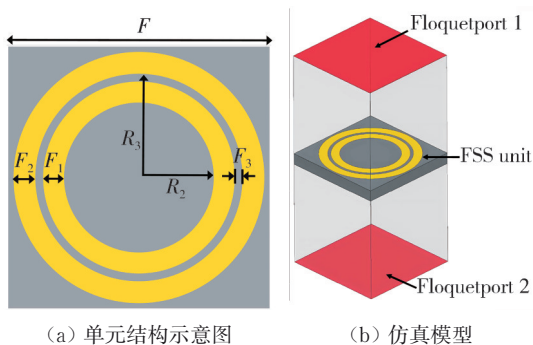


图 3 FSS 的单元结构

Fig. 3 Structure of FSS unit

将该单元以周期阵列的形式进行排列, 组合为  $5 \times 5$  的 FSS, 并以高度为  $H$  的间隔平行加载于天线之下, 如图 4 所示, 具体参数见表 2。

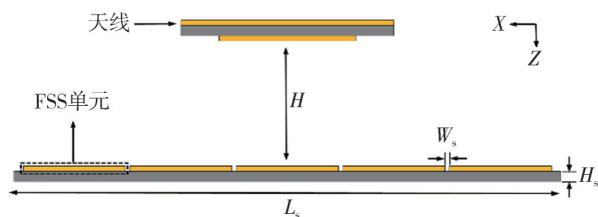


图 4 天线整体结构

Fig. 4 Structure of complete antenna

表 2 整体结构尺寸

Tab. 2 Parameters of complete structure

参数	值/mm	参数	值/mm	参数	值/mm
$F$	15	$F_1$	1.2	$F_2$	1.3
$F_3$	0.4	$R_2$	4.3	$R_3$	5.9
$H_s$	1.6	$L_s$	75	$W_s$	0.6

## 2 天线性能分析

使用 HFSS 将 FSS 单元仿真模型的左右边界分别设置为主从边界条件, 上下边界设置为 Floquet 端口, 得到的 S 参数仿真结果如图 5 所示。

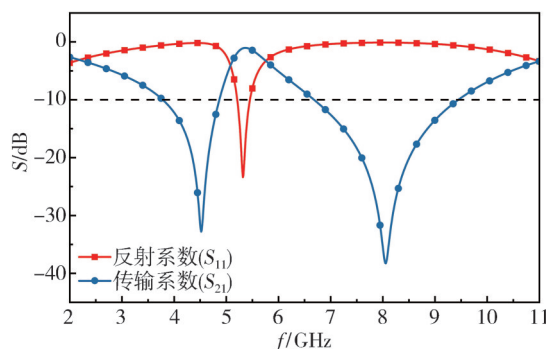


图 5 FSS 的 S 参数

Fig. 5 S parameter of FSS

由图 5 可知, 该表面在  $5.08 \sim 6.61\text{ GHz}$  频段内(含陷波段), 其传输系数  $S_{21} > -10\text{ dB}$ , 并且在其中  $5.20 \sim 5.62\text{ GHz}$  的一段范围内, 反射系数  $S_{11} < -10\text{ dB}$ , 因此在上述频段, 该表面会表现出带通滤波响应特性, 不会对信号进行反射。相反, 在除上述频段以外的  $3.80 \sim 4.94\text{ GHz}$  与  $6.68 \sim 9.55\text{ GHz}$  两个频段内, 该表面的传输系数  $S_{21} < -10\text{ dB}$ , 同时反射系数  $S_{11}$  始终大于  $-10\text{ dB}$ 。因此, 在正常入射情况下, 该表面会在上述两个频段内表现出带阻滤波响应特性, 对天线信号产生反射。

另外, 由 FSS 所产生的天线反射波应与天线的辐射波同相, 目的是在空间中产生相干叠加以实现较好的增益提升效果<sup>[14]</sup>。该频率反射表面的反射相位曲线如图 6 所示。

由图 6 可知, 该表面的反射相位在除陷波段以外均保持线性减小。这一特性一方面表明该表面的滤波响应特性在天线工作频段内不会发生显著变化, 另一方面也表明本文所提出的 FSS 易于对反射波的相位进行调控, 使得反射波与天线辐射波产生相干叠加, 在提升增益的同时增强天线辐射的方向性。

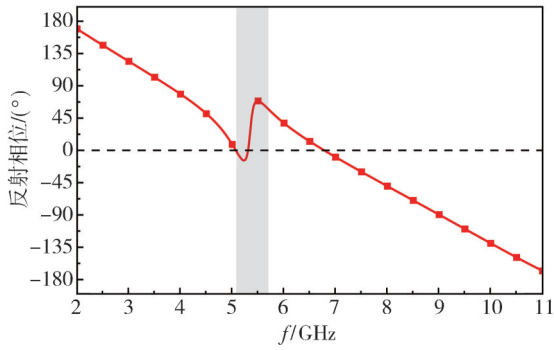


图6 FSS的反射相位

Fig. 6 Reflection phase of FSS

为达到较好的效果,需要调整与优化FSS与天线之间的距离,它对天线的阻抗匹配与增益均有影响。在自由空间中,该距离 $H$ 与FSS的反射相位相关,满足以下关系式<sup>[15]</sup>

$$\varphi_{\text{FSS}} - 2\beta H = 2n\pi, \quad (n = \dots, -1, 0, 1, \dots), \quad (3)$$

式中: $\varphi_{\text{FSS}}$ 为FSS的反射相位, $H$ 为FSS与天线之间的距离, $\beta$ 为自由空间的传播常数。当 $H = \lambda/2$ 时,等式(3)两侧相等。讨论不同 $H$ 对天线 $S_{11}$ 与增益的影响,结果如图7所示。

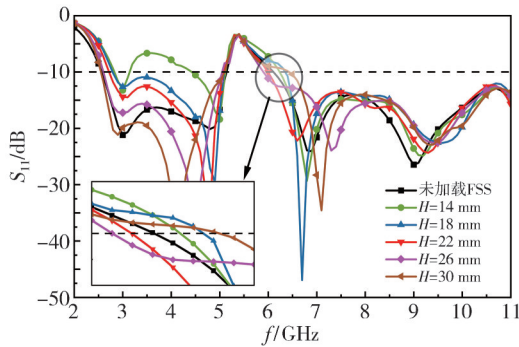
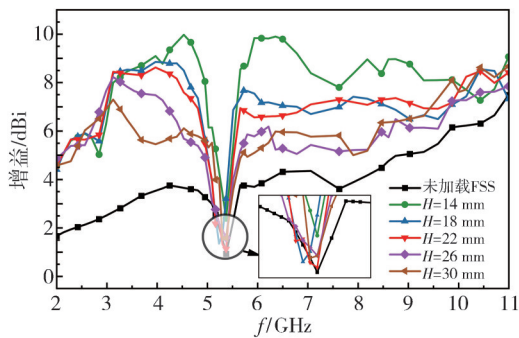
(a) 不同 $H$ 对天线 $S_{11}$ 的影响(b) 不同 $H$ 对天线增益的影响

图7 距离参数分析

Fig. 7 Distance analysis for antenna

其中, $\lambda/2$ 是频率反射表面反射相位为零的频点,即5.5、5.5与6.7 GHz所对应的半波长,计算的 $H$ 值分别为30、27.2与22.3 mm,但该距离仍需

根据实际情况进行调整与优化。

由图7(a)可知,未加载FSS表面时,天线在2.5~11 GHz内 $S_{11} < -10$  dB,其工作频段覆盖超宽带频段,其中陷波段为5.1~6.1 GHz,包含WLAN频段在内,符合设计要求。

当加载FSS表面时,距离 $H$ 会对天线阻抗匹配产生影响。当 $H$ 为14 mm时, $S_{11}$ 在3.1~4.5 GHz内大于-10 dB,天线与FSS会因较近的距离而发生强耦合,导致阻抗匹配恶化,不符合超宽带通信要求。随着距离增加,天线低频处的阻抗匹配下降到-10 dB以下,但陷波频段的带宽发生变化。当距离为30 mm与18 mm时,陷波频段的截止频点分别从6.1 GHz拓展至6.5 GHz与6.4 GHz,浪费了带宽资源;当距离为22 mm与26 mm时,虽然陷波频段的截止频点分别向左缩窄至6 GHz与5.9 GHz,但仍包含WLAN抑制频段在内。由上可知,距离对天线 $S_{11}$ 曲线的影响主要表现在天线低频处的阻抗匹配与陷波频段的宽度变化。为保证天线性能,可选择22 mm或26 mm作为加载距离,并且该值与式(3)中 $H$ 值计算结果相近,为确定最优的距离,讨论其对增益的影响。

由图7(b)可知,增益提升的效果主要集中在3~5 GHz与5.7~9.6 GHz两个频段内,且会随着距离的增大而减弱。当 $H=14$  mm时效果最好;当 $H=18$  mm与22 mm时效果有所下降,且两者提升的幅度相似;当 $H=26$  mm与30 mm时效果最差。并且在上述距离中,除 $H=14$  mm以外,天线的增益均在陷波段内下降到与原天线相同的程度,避免了对陷波性能的损害。通过比较以上两种仿真结果,最终选择22 mm作为加载距离,并且为突出本文所设计的FSS的特点,在22 mm的基础上对比了天线分别加载一般金属表面与加载FSS时对增益的不同影响,结果如图8所示。

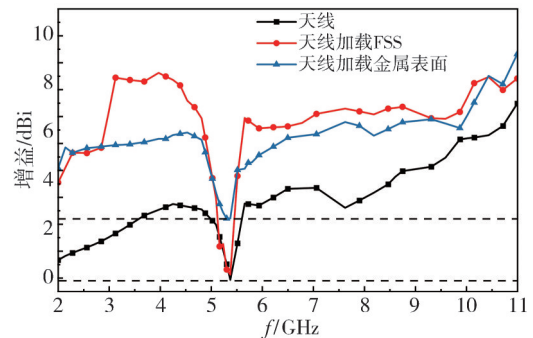


图8 天线加载不同表面增益对比

Fig. 8 Gain analysis with different surfaces

当金属表面用作反射器时,同样可以对天线辐射进行反射。由图 8 可知,金属表面在 5.4 GHz 频点处将 0.96 dB 的微小增益提高到了 3.3 dB,对陷波性能产生了不利影响;而加载本文所设计的 FSS 时,在陷波段内增益曲线的下降趋势与原天线基本保持一致,并在 5.45 GHz 处与原天线一同达到最低点,因此可以在提升天线工作频段内增益的同时,保证天线陷波性能不受影响,符合设计目标。

### 3 天线实测结果

根据设计制作的天线实物如图 9 所示。

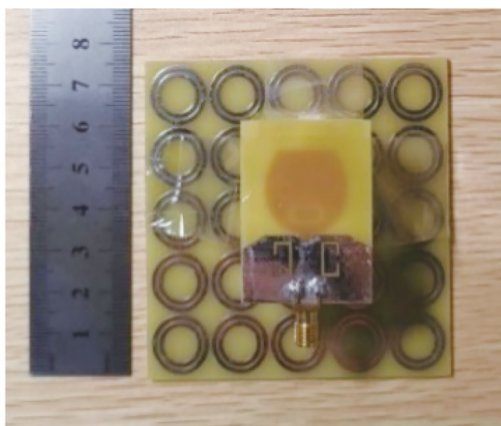


图 9 天线实物图  
Fig. 9 Photo of antenna

在工作宽带范围内,天线的  $S_{11}$ 、增益曲线以及在 4.5、6.5 与 9 GHz 频点处的方向图的实测与仿真的对比结果分别如图 10~图 12 所示。

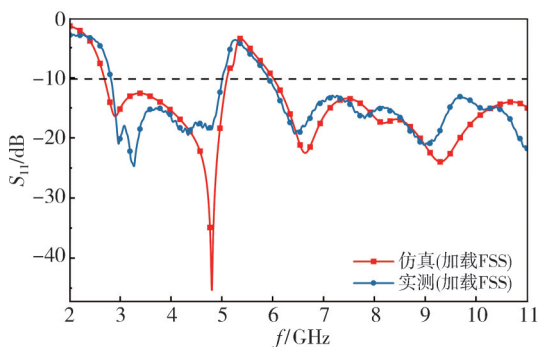


图 10 天线  $S_{11}$  实测结果与仿真对比  
Fig. 10 Measured and simulated  $S_{11}$  of antenna

由图可知:

1) 加载 FSS 后,天线的实测  $S_{11}$  曲线在 2.7~5.0 GHz 与 5.9~10.6 GHz 的频段内均小于 -10 dB,阻抗匹配良好;在 5.0~5.9 GHz 内  $S_{11}$  大于 -10 dB,陷波中心频率为 5.5 GHz,陷波频段覆盖 WLAN 信号,满足超宽带单陷波天线的工作

要求。

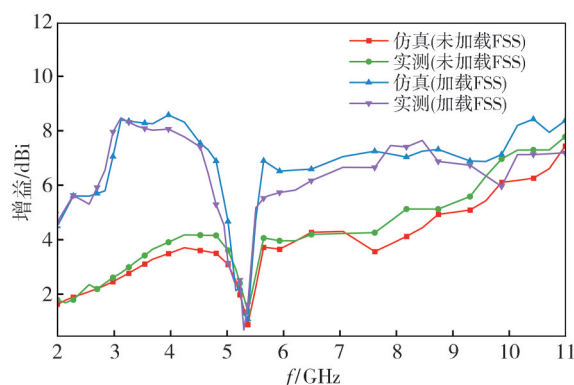


图 11 天线实测增益与仿真对比

Fig. 11 Measured and simulated gain of antenna

2) 天线实测的增益提升效果在 3.0~5.0 GHz 与 5.7~9.6 GHz 两个频段内较为明显,与仿真结果基本一致。若将陷波频段计算在内,实测的平均增益从 3.65 dBi 提高到 6.36 dBi,提高了约 2.71 dBi;若只计算工作频段,实测的平均增益则从 3.39 dBi 提高到 7.35 dBi,提高了约 3.96 dBi。同时,实测的增益曲线在 5.45 GHz 频点下降到了最低点 0.92 dB,表明该 FSS 可以在不影响陷波性能的前提下增强天线工作频段内的增益。

3) 未加载 FSS 时,在各个频点上,天线方向图的 H 面具有全向的辐射特性,E 面则呈“8”字;加载 FSS 后,由于其在非陷波频段会对天线辐射的信号产生反射,因此天线方向图的 H 面与 E 面呈现出定向的辐射特性。实测结果在低频与中频处与仿真结果吻合较好,但在高频处存在较大偏差。

4) 由于本文所选用的低成本 FR4 基板的高频性能不佳,并且在实测过程中,存在测试环境的不理想与天线加工误差的问题,使天线实际测量的阻抗匹配和辐射特性与仿真结果存在偏差。例如,天线的陷波频段的相对带宽从 19.52% 变为 20.18%,但与仿真结果差异较小。

而随着频率增加,波长变短,由实物加工的微小误差所带来的影响会在高频处变得显著,这导致实测的方向图与仿真结果存在较大偏差。针对以上问题,可以通过选用材料参数较好的高频基板,或选用工艺与焊接质量良好的实物,并在条件相对理想的天线暗室内对方向图进行测量从而加以改进。

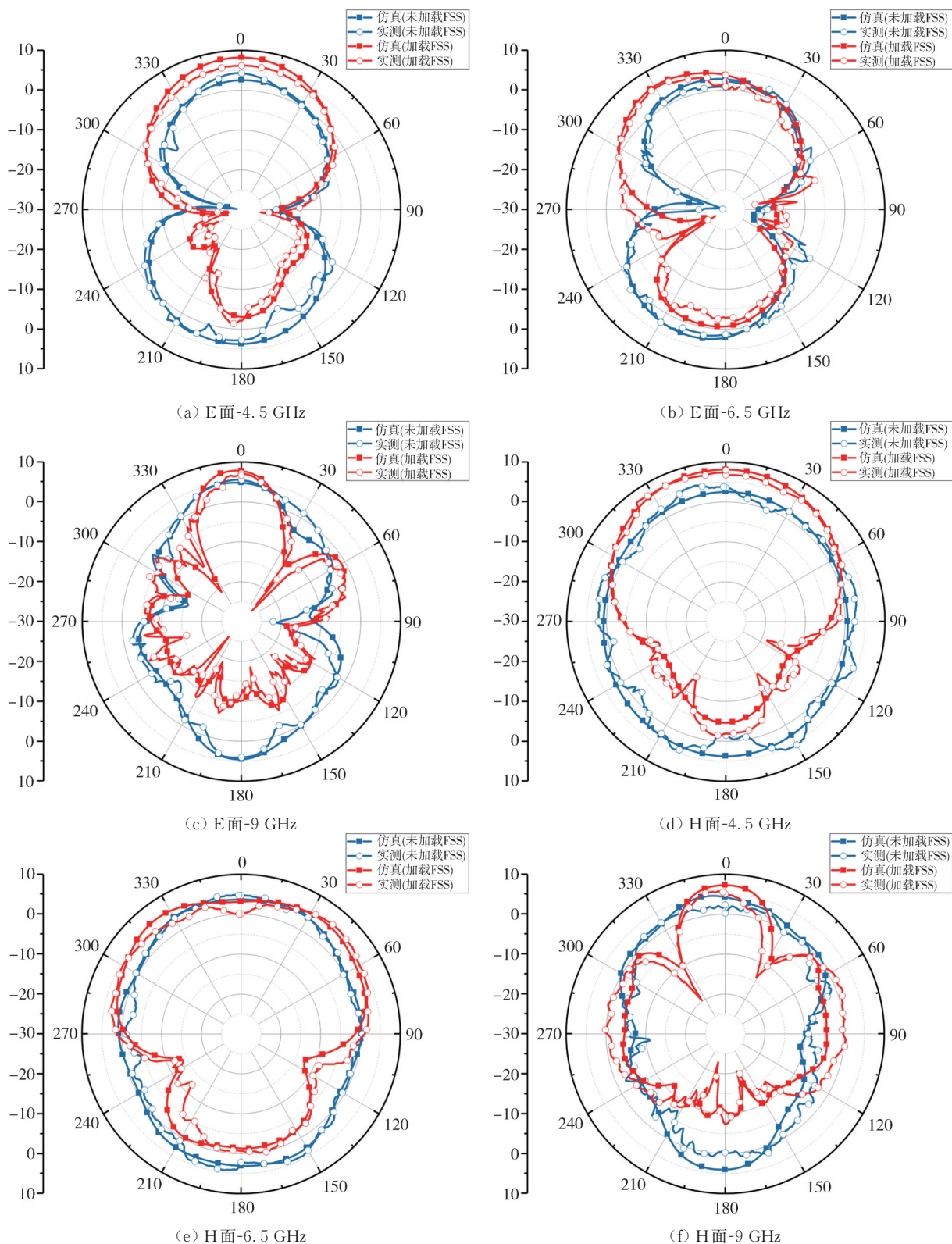


图 12 天线典型频点处的方向图实测结果与仿真对比

Fig. 12 Comparison of measured and simulated radiation patterns of antenna

#### 4 对比分析

表 3 为本文所提出的 FSS 与相似文献的对比。由表可知,与文献[8]方法相比,本文设计只使用了

单层表面就达到了相近的提升效果;其次与文献[9],文献[12]方法相比,在提升效果相近的情况下,本文在天线带宽和 FSS 尺寸方面存在优势,更宽的相对带宽使其更加适用于超宽带通信系统;与文献[10]

与文献[11]方法进行比较,本文的FSS针对WLAN波段进行了设计和优化,经过仿真与实测试验,可在不影响陷波特性的前提下,提高天线工作带宽内

的增益。因此,在同为高增益的情况下,本设计可在需要陷波特性的应用场景,如室内定位、交通安全监测等中更好地满足需求。

表 3 对比分析

Tab. 3 Contrastive analysis

来源	天线尺寸/mm	FSS尺寸/mm	天线带宽(相对带宽)/GHz	有无陷波(陷波段)/GHz	FSS层数	增益提升/dBi	最大增益/dBi
文献[8]	44×44×1.6	44×44×1.6	3.05~13.4(125%)	否	2	2~4	8.50
文献[9]	30×30×1.6	98×98×1.6	3.6~6.1(51%)	否	1	4	7.87
文献[10]	34×34×1.6	135×135×1.6	3.2~10.8(108%)	否	1	6.5	9.50
文献[11]	26×26×1.6	61×61×1.6	3.05~11.9(118%)	否	1	6.2	9.68
文献[12]	80×80×1.6	80×80×1.6	3.08~7.7(85%)	否	1	2.9	8.30
本文	40×30×1.6	75×75×1.6	2.6~11.0(123.5%)	是(5.1~6.1)	1	3.96	8.61

### 5 结 论

本文设计了一种基于FSS的高增益超宽带WLAN陷波天线。通过在天线辐射贴片与接地面分别刻蚀半波长的C形槽,在优化阻抗匹配的同时实现了对5.08~6.10 GHz频段的陷波,可对WLAN信号进行抑制。为了提升其增益,同时设计了一种5×5阵列的单层FSS,以22 mm的空气层为间隔加载于上述天线。实测结果与仿真基本一致,该FSS可以在不影响陷波性能的前提下,将天线工作频段内的平均增益从3.39 dBi提高到了7.35 dBi,最高在3.12 GHz频点处从2.82 dBi提高到了8.61 dBi,有效增强了工作频段内的增益。从方向图可知,天线在中低频点处具有定向辐射的特性,满足一些特定场景的工作需求。

#### 参考文献:

[ 1 ] YADAV R, MALVIYA L. UWB antenna and MIMO antennas with bandwidth, band-notched, and isolation properties for high-speed data rate wireless communication: a review [J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2020, 30(2): e22033.

[ 2 ] JAYANT S, SRIVASTAVA G. Close-packed quad-element triple-band-notched UWB MIMO antenna with upgrading capability [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(1): 353-360.

[ 3 ] 令狐暑暑, 逯暄, 彭甫镛, 等. 一种具有 5.8 GHz WLAN 深度抑制特性的超宽带全向天线[J]. 测试技术学报, 2022, 36(6): 543-548.

LINGHU Shushu, LU Xuan, PENG Furong, et al. An ultra-wideband ozhouxmndirectional antenna with deep suppression characteristics at 5.8 GHz WLAN [J]. Journal of Test and Measurement Technology,

2022, 36(6): 543-548. (in Chinese)

[ 4 ] MEKKI A S, HAMIDON M N, ISMAIL A, et al. Gain enhancement of a microstrip patch antenna using a reflecting layer [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2015, 2015: 975263.

[ 5 ] SOWE M, KONDITI D B O, LANGAT P K. A compact high-gain microstrip patch antenna with improved bandwidth for 5G applications [J]. International Journal of Electrical and Electronics Research, 2022, 10(2): 196-201.

[ 6 ] SINGH A, KUMAR A, KANAUIA B K. High gain and enhanced isolation MIMO antenna with FSS and metasurface [J]. Optik, 2023, 286: 170982.

[ 7 ] AL-GBURI A J A, IBRAHIM I M, ZAKARIA Z, et al. Enhancing gain for UWB antennas using FSS: a systematic review [J]. Mathematics, 2021, 9(24): 3301.

[ 8 ] KUNDU S, CHATTERJEE A, JANA S K, et al. A compact umbrella-shaped UWB antenna with gain augmentation using frequency selective surface [J]. Radio-engineering, 2018, 27(2): 448-454.

[ 9 ] KUMAR A, DE A, JAIN R K. Gain enhancement using modified circular loop fss loaded with slot antenna for sub-6 GHz 5G application [J]. Progress in Electromagnetics Research Letters, 2021, 98: 41-48.

[10] PARCHIN N O, ULLAH A, SANTOS H M D, et al. Gain enhancement of diversity slot antenna using FSS with metamaterial unit cells for UWB systems [C]//2022 IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium (WAMS), 2022: 1-4.

[11] AL-GBURI A J A, BIN MOHD IBRAHIM I, ZEAIN M Y, et al. Compact size and high gain of CPW-fed UWB strawberry artistic shaped printed monopole antennas using FSS single layer reflector [J]. IEEE Access, 2020, 8: 92697-92707.

[12] HASAN M M, ISLAM M T, SAMSUZZAMAN

- M, et al. Gain and isolation enhancement of a wide-band MIMO antenna using metasurface for 5G sub-6 GHz communication systems [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 9433.
- [13] SADINENI R B, P D. A compact highly isolated UWB-MIMO diversity antenna with quad band Notch characteristics [C]//2022 IEEE International Symposium on Smart Electronic Systems (ISES), 2022: 331-336.
- [14] KOCAKAYA A, ÇAKIR G, DIKMEN C. A novel single layer frequency selective surface design for ultra-wide band antenna gain enhancement [C]//2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2017: 1075-1078.
- [15] PANDHARE R A, ABEGAONKAR M P. Design of UWB antenna for high gain using FSS reflector [C]//2021 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP), 2021: 867-870.
- 
- (上接第 482 页)
- [18] STROGATZ S H. Exploring complex networks [J]. *Nature*, 2001, 410(6825): 268-276.
- [19] 俞帆, 陈格格, 沈明威. 基于双通道复数卷积神经网络的 DOA 估计算法 [J]. *现代雷达*, 2022, 44(12): 81-86.  
YU Fan, CHEN Gege, SHEN Mingwei. DOA estimation algorithm based on dual-channel complex-valued convolutional neural network [J]. *Modern Radar*, 2022, 44(12): 81-86. (in Chinese)
- [20] CHEN Y, HE H, LIU S, et al. Physical layer authentication for industrial control based on convolutional denoising autoencoder [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(9): 15633-15641.
- [21] WANG J, XIE X, SHI J, et al. Denoising autoencoder, a deep learning algorithm, aids the identification of a novel molecular signature of lung adenocarcinoma [J]. *Genomics, Proteomics & Bioinformatics*, 2020, 18(4): 468-480.
- [22] BANK D, KOENIGSTEIN N, GIRYES R. Autoencoder [M]//*Machine Learning for Data Science Handbook*. Cham: Springer International Publishing, 2023: 353-374.
- [23] 吴昊昊, 王方石. 多尺度膨胀卷积在图像分类中的应用 [J]. *计算机科学*, 2020, 47(S1): 166-171.  
WU Haohao, WANG Fangshi. Application of multi-scale dilated convolution in image classification [J]. *Computer Science*, 2020, 47 (S1): 166-171. (in Chinese)

---

## 声 明

本刊已许可中国知网、万方数据知识服务平台、超星网等多家单位以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述各家网络著作权使用费，所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议，请在投稿时说明，本刊将按作者说明处理。

---