

# 人工表面等离激元馈电的 宽带低旁瓣全角度波束扫描天线

范智博, 周永金

(上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网重点实验室, 上海, 200444)

**摘要** 提出了一款人工表面等离激元馈电的宽带全角度低旁瓣波束扫描天线。采用人工表面等离激元馈电卵圆形辐射贴片阵列和对跖 Vivaldi 辐射器, 在快波区激发高次谐波实现漏波辐射, 在慢波区呈现低损耗能量传输效果激励对跖 Vivaldi 的端射模式, 从而实现了在 4~12 GHz(相对带宽 100%) 内全角度(180°) 波束扫描。进一步, 通过对卵圆形辐射贴片进行锥形排布降低了天线在漏波辐射时的旁瓣水平。仿真结果表明, 所设计的全角度波束扫描天线能够在 4~12 GHz 内旁瓣水平均在 -10 dB 以下。该天线在雷达探测、目标跟踪等应用场景具有重要应用潜力。

**关键词** 人工表面等离激元; 频率扫描天线; 全角度; 对跖 Vivaldi 天线; 低旁瓣

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.06.004

**中图分类号** TN822<sup>+</sup>.6 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)06-0029-07

## A Wideband Full-Angle SSPP-Fed Beam-Scanning Antenna with Low SLL

FAN Zhibo, ZHOU Yongjin

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks,  
School of communication and information engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract** A wideband and wide-angle beam-scanning antenna with low sidelobe levels (SLL) fed by spoof surface plasmon polaritons (SSPP) is designed. The SSPP feeding lines are adopted to excite the oval radiating patch array in the fast wave zone, whereas its low loss transmission in the slow wave zone is used to excite the spoof plasmonic antipodal Vivaldi antenna (AVA), realizing the beam scanning angle of 180° within 4~12 GHz (a relative bandwidth of 100%). And by arranging the oval radiating patches in a tapered way, the SLL during leaky-wave radiation is effectively reduced. The simulation results show that the SLL of the designed full-angle beam-scanning antenna is below -10 dB within the 4~12 GHz frequency band. Such antenna has considerable potential in application under condition of radar detection and target tracking.

**Key words** spoof surface plasmon polariton (SSPP); frequency scanning antenna; full-angle; antipodal Vivaldi antenna (AVA); low side-lobe levels (SLL)

近年来, 各种飞行器的探测需求越来越高, 天线 作为雷达系统中的关键设备面临着更加苛刻的性能

收稿日期: 2023-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(61971469)

作者简介: 范智博(1998—), 女, 河南商丘人, 硕士生, 研究方向为天线设计。E-mail: fzbyuuna@shu.edu.cn

通信作者: 周永金(1982—), 男, 山东荣成人, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能超表面、新型天线与传感系统。E-mail: yjzhou@shu.edu.cn

**引用格式:** 范智博, 周永金. 人工表面等离激元馈电的宽带低旁瓣全角度波束扫描天线[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(6): 29-35. FAN Zhibo, ZHOU Yongjin. A Wideband Full-Angle SSPP-Fed Beam-Scanning Antenna with Low SLL[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(6): 29-35.

要求。在雷达应用中,天线的波束扫描角度范围需要尽可能宽,以便于雷达使用较少天线在较宽的空间区域内跟踪目标。漏波天线(leaky wave antenna, LWA)作为一种频率扫描天线<sup>[1]</sup>能够实现大角度波束扫描。近年来,人们利用人工表面等离激元(spoof surface plasmon polariton, SSPP)进一步提高 LWA 的波束扫描角度<sup>[2]</sup>。基于 SSPP 的漏波天线主要可分为 2 种,一种是对 SSPP 传输线本身进行周期性调制<sup>[3-5]</sup>,文献[5]在 10.6~11.6 GHz 带宽内实现了一 60°~63°的扫描范围;另一种是利用 SSPP 传输线对辐射贴片阵列进行耦合馈电实现漏波辐射<sup>[6-8]</sup>,文献[6]提出的漏波天线在 9.9~12.25 GHz 内实现了 167°扫描范围。还有一些其他方法用于扩展漏波天线的扫描角度。文献[9]通过激发高阶模态实现了在 11.7~50 GHz 频段内 129°的广角度波束扫描。文献[10]采用 Goubou 线在 5.5~20 GHz 范围内实现了 155°的扫描范围。以上漏波天线能够满足在宽带范围内覆盖较大波束扫描角度范围的要求,但还无法扫描到端射方向,因而在端射方向产生了扫描盲区。文献[11]提出了一种双频带双模式频扫天线,在 3~9 GHz 和 13~34 GHz 内实现 180°扫描范围,但扫描过程中旁瓣水平高达约 -5 dB,且占用频带过宽,难以实际应用于雷达探测。

本文设计了一种人工表面等离激元馈电的宽带低旁瓣全角度波束扫描天线,能够在 4~12 GHz 频带内实现 180°扫描角度覆盖。所设计天线的工作模式分别是端射模式和频扫模式 2 种。在端射模式时,天线的半功率波瓣宽度能够达到 126°;在频扫模式时的扫描范围达到 121°,实现了 180°扫描范围,覆盖到了传统频率扫描天线的辐射盲区。进一步,通过对卵圆形辐射贴片进行锥形排布降低了天线在漏波辐射时的旁瓣水平。

## 1 宽带低旁瓣全角度波束扫描天线结构

该宽带低旁瓣全角度扫描天线结构如图 1 所示。天线主要包括 SSPP 馈电的漏波波束扫描天线和对跖 Vivaldi 辐射器。天线中间的介质基板材料为 F4B(介电常数为 2.65,损耗角正切为 0.001),厚度为 0.508 mm,其余结构均为金属。在慢波区,SSPP 馈电线有效地将电磁能量传输给末端 Vivaldi 辐射器,可以在 4.0~5.3 GHz 频段内以端射模式进行辐射。在快波区,SSPP 馈电的卵圆形贴片阵列表现为漏波天线,在 5.7~12 GHz 频段内实现漏波波束扫描。因而,所设计天线可以在 4~12 GHz 内以端射模式和漏波辐射模式实现 180°波束扫描。

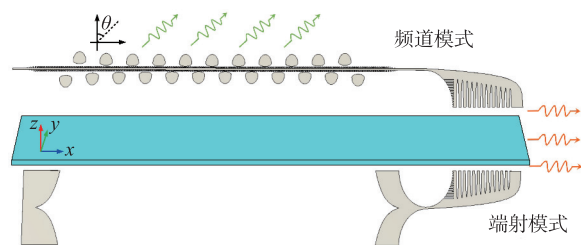


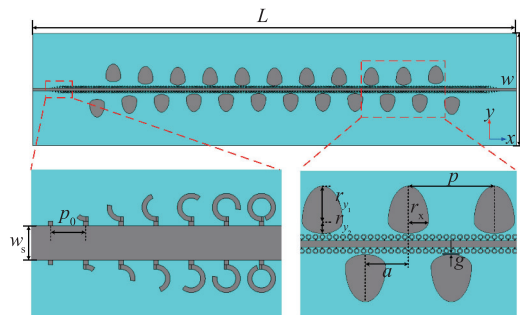
图 1 低旁瓣全角度波束扫描天线 3D 视图

### 1.1 SSPP 馈电的频扫漏波天线设计

SSPP 馈电的频扫漏波天线如图 2(a)所示,在介质基板上表面沿中心线的 SSPP 微带线是天线的馈电结构,辐射贴片等间隔排布于馈线两侧。周期性辐射贴片被 SSPP 线激励后,耦合的能量可以从空间谐波中产生辐射。图 2(a)中放大的局部图分别是微带线到 SSPP 线的模式转换部分,以及中间 SSPP 馈电线和辐射贴片的具体结构示意图。采用卵圆形辐射贴片,贴片沿  $x$  方向上的半径为  $r_x$ ,沿  $y$  轴方向上的半径分别为  $r_{y_1}$  和  $r_{y_2}$ 。SSPP 单元周期为  $p_0$ ,2 个辐射贴片单元间距为  $p$ ,贴片和单元顶部之间相距为  $g$ 。图 2(b)为天线背面,天线背面金属地结构边缘满足渐变曲线,该曲线遵从以下函数公式:

$$f(x) = q(e^{xc/l_g} - 1)/(e^c - 1) \quad (1)$$

式中: $q$ 、 $l_g$ 、 $c$  分别为金属地的高度、长度和弯曲系数。



(a) 正面



(b) 背面

图 2 SSPP 馈电频扫漏波天线结构

首先对 SSPP 单元进行色散分析。图 3(a)为 SSPP 单元,它由一个宽度为  $w_{\text{stub}}$  高度为  $h_{\text{stub}}$  的小方形贴片以及该方形贴片所连接的中心馈点条带和 2 个开口谐振环组成。外侧的开口谐振环是由 2 个外半径  $r_1$ 、内半径  $r_2$  和间隙角为  $\varphi$  的开口谐振环中心对称组成。单元周期沿  $x$  方向为  $p_0$ 。利用 CST 微波工作室的本征模求解器仿真了其色散特性,色散曲线如图 3(b)所示,其中  $\varphi = 15^\circ, 75^\circ, 135^\circ, 195^\circ, 255^\circ, 315^\circ$ 。可以看到对应的截止频率分别为 15.06

GHz、17.42 GHz、21.56 GHz、27.03 GHz、35.15 GHz、48.43 GHz,表明间隙角越小,截止频率越低。为了实现微带线和 SSPP 线的高效转换,二者之间存在渐变段,该部分渐变是通过改变间隙角  $\varphi$  呈现梯度变化,实现了从微带线到 SSPP 传输线有效的模式转换。如图 3(c)所示,仿真得到的 SSPP 馈电线 S 参数性能良好,反射系数在 6~15 GHz 频段内小于 -10 dB,传输系数在 0~-4 dB 之间,证明该 SSPP 线具有良好的传输特性。

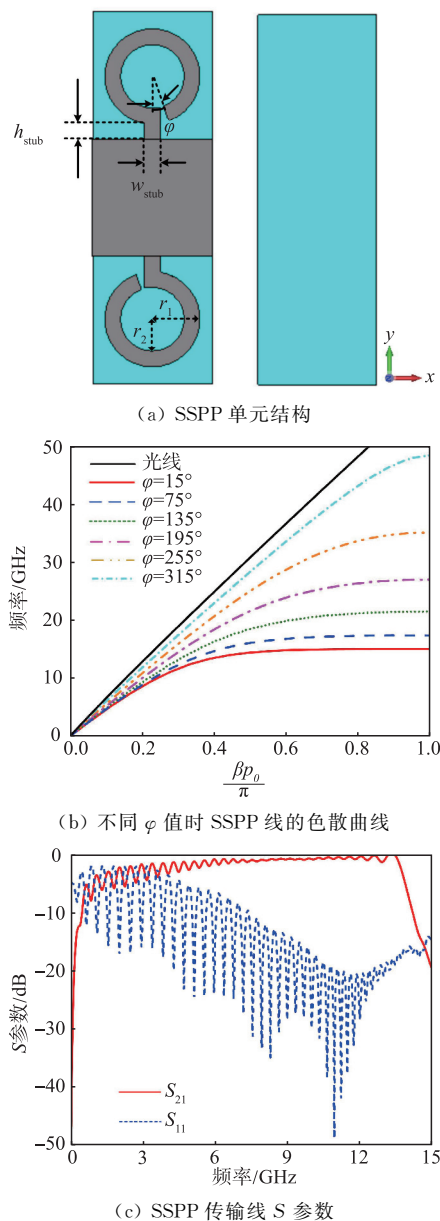


图 3 SSPP 单元结构及相关参数仿真结果

接下来进行辐射贴片的设计。为了得到工作频段在 5.7~12 GHz 的漏波天线的周期  $p_0$ ,需要分析空间谐波的波数  $k_{-1}$  与频率  $f$  之间的关系。漏波天线的辐射条件可以写为:

$$-k_0 < k_{-1} - \frac{2\pi}{p_0} < k_0 \quad (2)$$

即周期  $p_0$  的范围为:

$$\frac{1}{k_{-1}/2\pi + f/c_0} < p_0 < \frac{1}{k_{-1}/2\pi - f/c_0} \quad (3)$$

式中:  $c_0$  为自由空间中的光速。通过将起始频率和终止频率  $f$  及其对应的传播常数  $k_{-1}$  即  $\beta_{-1}$  代入式 (3),就可以得到  $p_0$  的范围  $19.8 < p_0 < 21.6$ 。这里选择  $p_0 = 20$  mm。由于对称的周期性调制导致天线沿  $x$  方向反射增大,从而使天线在边射方向上 ( $\theta = 90^\circ$ ) 的辐射效率显著降低,即开阻带效应 (open stop band, OSB)。在辐射贴片的设计中,控制贴片的形状可以有效消减开阻带效应。这里辐射贴片被设计成卵圆形,由 2 个半椭圆形构成。使用 CST 的时域求解器对天线进行求解,图 4 给出该频扫天线采用圆形贴片和卵圆形贴片时的 S 参数。可以看出在天线工作频段 5.7~14 GHz,使用卵圆形贴片时,天线的 S 参数在 8~12 GHz 频段内明显比采用圆形辐射贴片的要低,能够显著改善漏波天线的开阻带效应,有利于辐射效率的提升并改善  $0^\circ$  附近的波束增益。

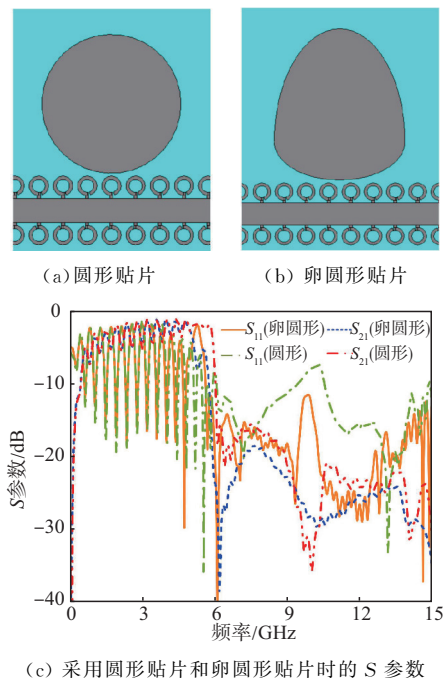


图 4 圆形贴片和卵圆形贴片及相关参数仿真结果  
天线各个参数的值如表 1 所示。

表 1 天线尺寸

| 参数    | 尺寸/mm | 参数                | 尺寸/mm |
|-------|-------|-------------------|-------|
| $L$   | 300   | $w_s$             | 1.4   |
| $W$   | 70    | $r_{y_1}$         | 8.3   |
| $p$   | 20    | $r_{y_2}$         | 2.8   |
| $p_0$ | 1.6   | $r_x$             | 4.7   |
| $a$   | 8     | $h_{\text{stub}}$ | 0.22  |
| $g$   | 1.66  | $w_{\text{stub}}$ | 0.22  |
| $l_m$ | 10    | $r_1$             | 0.64  |
| $l_g$ | 32    | $r_2$             | 0.44  |

图 5 为天线在不同频点的方向图,可以看到在 5.7~14 GHz 波束扫描范围为  $-42^\circ \sim 90^\circ$ , 即  $132^\circ$ , 体现了该 SSPP 天线的大范围扫描优势。天线馈电线两侧中心对称的单层 SSPP 单元结构使天线呈现双波束辐射以及端射方向 ( $90^\circ$ ) 开始扫描的能力。从仿真结果可以观察到:波束在 12~14 GHz 的频带范围内分为 2 个波瓣,它们分别由  $n = -1$  和  $n = -2$  空间谐波产生,因为  $n = -2$  谐波的辐射效率相对于  $n = -1$  空间谐波更低,所以在远场方向图上,  $n = -2$  谐波产生的旁瓣相对于主瓣也较低。可以看到在频率扫描过程中,各个频点的旁瓣水平还较高,12 GHz 时最高达到  $-5$  dB。

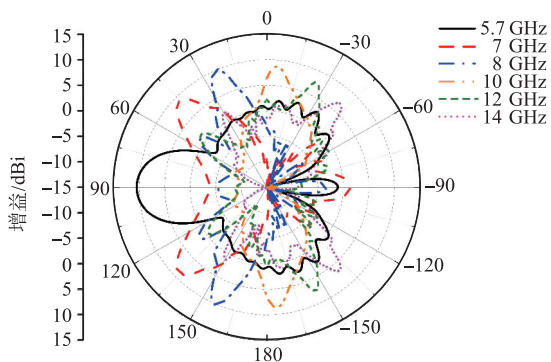


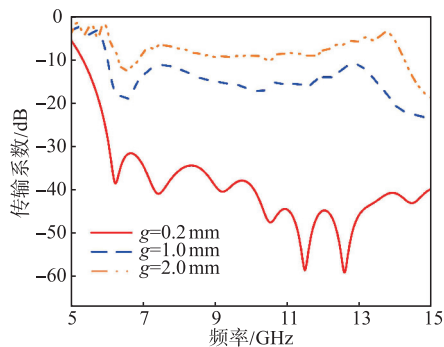
图 5 SSPP 频扫天线不同频点方向图

## 1.2 低旁瓣设计

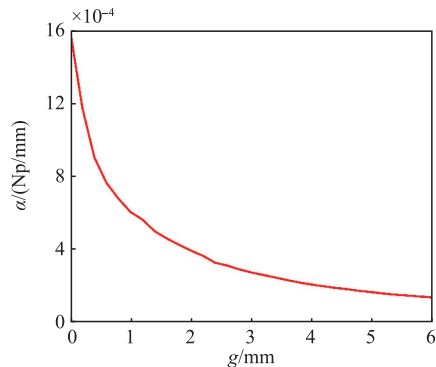
通过调整贴片和开口谐振环的顶部之间的距离  $g$ , 可以控制漏波天线泄漏量的分布,从而可以控制漏波天线的旁瓣水平。图 6 分析了间距  $g$  改变对  $S_{21}$  的影响,可以看到随着  $g$  的增加,  $S_{21}$  明显增加,说明此时馈电线和卵圆形贴片间的耦合强度明显减弱,更多的能量传输到了天线末端。对于均匀的行波结构,衰减常数可以从该结构的  $S_{21}$  中计算出衰减常数<sup>[12]</sup>:

$$\alpha = -|S_{21}|/L \quad (4)$$

根据式(4)可以得到 9 GHz 时衰减常数  $\alpha$  随  $g$  的改变而变化的曲线,如图 6(b)所示。



(a) 天线传输系数



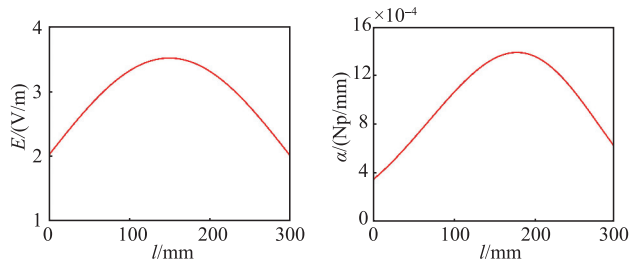
(b) 衰减常数  $\alpha$

图 6 不同  $g$  对应的天线传输系数及衰减常数

对于漏波天线低旁瓣水平的设计,需要调整天线表面的孔径场使其呈现出低旁瓣辐射。由于设计过程中难以直接确定耦合距离与孔径场分布之间的关系,可以计算孔径场分布对应的衰减因子  $\alpha(l)$  来间接地确定耦合距离。孔径场分布  $E(l)$  和衰减常数分布  $\alpha(l)$  具有以下关系<sup>[12]</sup>:

$$\alpha(l) = \frac{(1/2) |E(l)|^2}{(1/(1-R)) \int_0^L |E(\zeta)|^2 d\zeta - \int_0^l |E(\zeta)|^2 d\zeta} \quad (5)$$

式中:  $l$  为从原点到天线孔径中所考虑的点的距离,  $L$  为天线整体长度,即 300 mm;  $R$  为终端负载所吸收的功率之比,这里取平均值 0.5。



(a) 孔径场强度  $E(l)$  分布 (b) 衰减常数  $\alpha(l)$  分布

图 7 天线沿  $l$  方向的孔径强度  $E(l)$  及衰减常数  $\alpha(l)$  分布

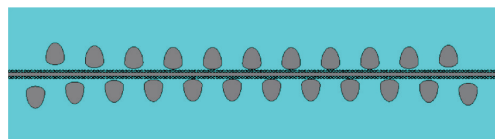


图 8 低旁瓣设计之后的天线辐射贴片分布

图 7(a) 为天线长度内所设定的孔径场分布,依照余弦公式:

$$E(l) = 1.5 \times \cos\left(\frac{\pi}{300}l - \frac{\pi}{2}\right) + 2 \quad (6)$$

联立式(5)和式(6)可以得到沿天线长度上的衰减因子  $\alpha(l)$  的分布,见图 7(b)。根据该曲线,可以确定每一个辐射贴片在其位置上分别对应的衰减因子的值,从而确定所对应的耦合距离  $g$ 。最终通过所生成的锥形分布设计出来的频扫天线如图 8 所示,天线两端的辐射贴片距离中心线较远,中间的辐

射贴片距离中心线较近,两侧的贴片阵列各形成U型分布。

经过低旁瓣设计后的 SSPP 馈电频扫天线的远场方向图仿真结果如图 9 所示。以 8 GHz、11GHz 频点处的降旁瓣水平前后方向图为例进行对比,8 GHz 处天线的旁瓣水平从  $-9$  dB 降至  $-20$  dB;12 GHz 处旁瓣水平从  $-12$  dB 降至  $-18.8$  dB。

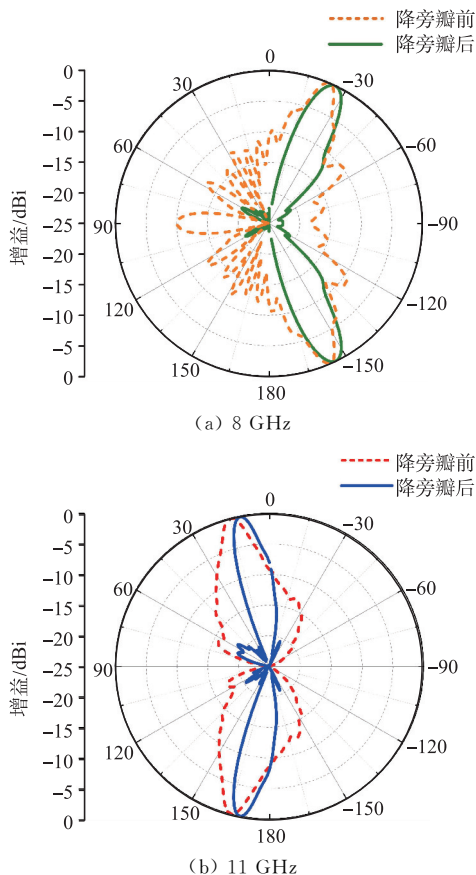


图9 不同频点处低旁瓣设计前后对比

## 2 宽带对跖 Vivaldi 端射辐射器

本文采用的小型化、宽带对跖 Vivaldi 天线作为端射辐射器<sup>[13]</sup>,如图 10 所示,其中金属辐射层位于厚度同样为  $0.508$  mm 的 F4B 介质基板的上下两侧,顶层的金属结构由微带线和渐变式辐射器构成,下层的金属结构由巴伦和渐变式辐射器组成。辐射器上开槽形成人工表面等离激元结构,展开天线工作带宽。该 Vivaldi 辐射器上下两层分别与漏波天线的 SSPP 过渡段和渐变金属地结构相连接。

结合上述 SSPP 馈电频扫天线和对跖 Vivaldi 端射辐射器,将频扫天线的其中一个端口作为馈电端,另一个端口直接和对跖 Vivaldi 辐射器连接。在慢波区,频扫天线结构中的 SSPP 馈线可以有效地将电磁能量传输到 Vivaldi 结构,此时是端射模式;在快波区,SSPP 馈线和卵圆形贴片间产生能量

耦合,泄露出去的电磁波波束随频率变化而产生角度扫描,此时是漏波辐射模式。因此,所设计天线可以在  $4\sim 12$  GHz 内以端射模式和频率扫描模式进行  $180^\circ$  辐射。

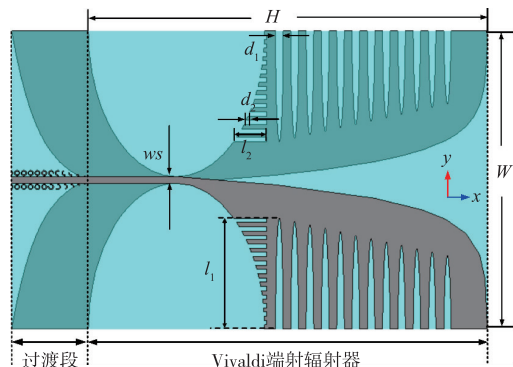


图10 Vivaldi 端射辐射器( $H=94$  mm,  $W=70$  mm,  $l_1=26$  mm,  $l_2=8$  mm,  $d_1=1.25$  mm,  $d_2=0.8$  mm)

## 3 仿真与测试结果

为了验证上述分析以及仿真结果的正确性,我们制作并测试了所提出的 SSPP 馈电宽带全角度低旁瓣波束扫描天线。天线实物图如图 11 所示。该天线的反射系数  $S_{11}$  如图 12 所示,其中  $4\sim 5.4$  GHz 时,该天线工作于端射模式;在  $5.4\sim 5.6$  GHz 出现了一个较窄的盲区频带,该频带内  $S_{11}$  较高;在  $5.7\sim 14$  GHz 的频段内,该天线工作于频扫模式,通过漏波辐射实现了波束扫描。

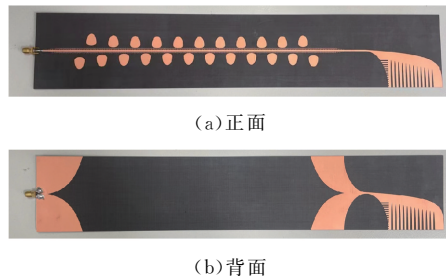


图11 天线实物图

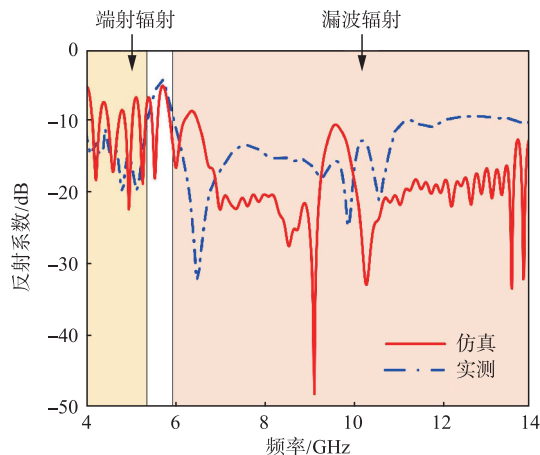


图12 低旁瓣全角度波束扫描天线反射系数

使用 CST 微波工作室仿真了该全角度波束扫描天线在不同频率下的电场分布,结果如图 13 所示。在慢波区,见图 13 (a)~(c),SSPP 馈线展现了强的场束缚特性,产生较少的能量泄露,大部分能量到达对跖 Vivaldi 辐射器。在快波区,如图 13(d)~(f)电场强度逐渐变弱,说明电磁波泄露到了自由空间。从电场图中还可以观察到,在漏波辐射模式下,随着频率增加,天线的辐射波束从后向扫描逐渐转变为前向扫描。

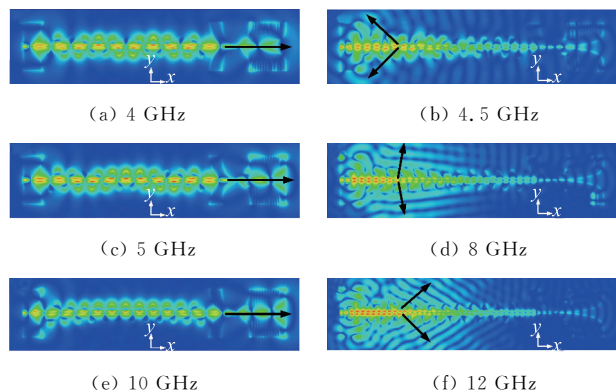


图 13 不同频点时天线表面电场强度分布

该全角度波束扫描天线的二维远场方向图仿真与实测结果如图 14 所示,分别对应 4 GHz、5 GHz、5.7 GHz、8 GHz、10 GHz、以及 12 GHz 的方向图。4 GHz 和 5 GHz 时为端射模式,半功率波瓣宽度达到  $126^\circ$ ,5.7 GHz 开始进入漏波辐射模式,随着频率增加,辐射波束分裂成 2 束,主波束方向从  $-90^\circ$  变化到  $\pm 31^\circ$ ,波束扫描范围为  $121^\circ$ ,这样,在 4~12 GHz 内波束已经能够完全覆盖  $180^\circ$ 。与未进行低旁瓣设计时的方向图相比,经过低旁瓣设计的天线在频扫模式时的旁瓣水平得到显著降低,在 5.7~12 GHz 内均小于  $-10$  dB。

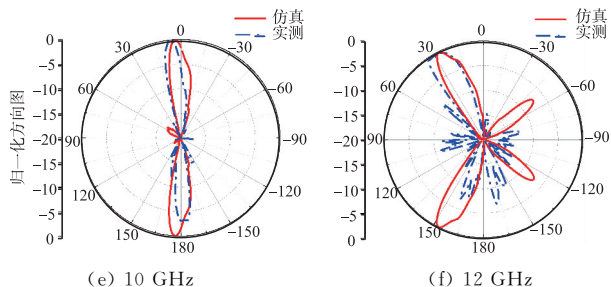
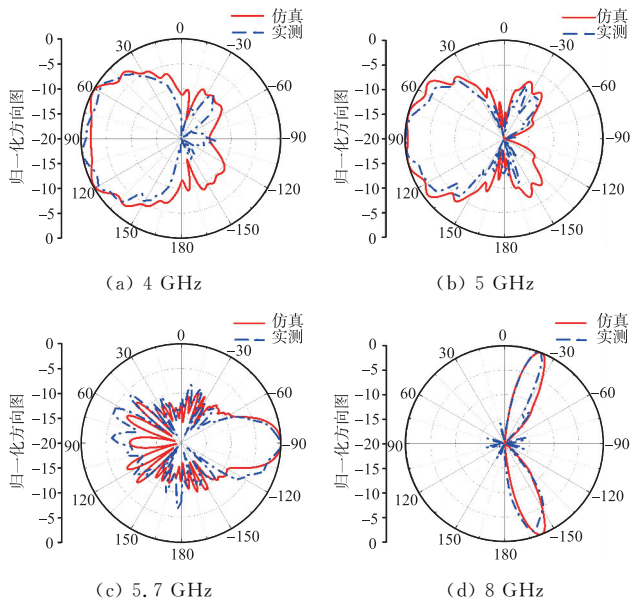


图 14 低旁瓣全角度波束扫描天线远场方向图仿真与实测结果 3D 远场方向图仿真结果如图 15 所示。图 15(a)、(b)分别对应 4 GHz 和 5 GHz 处天线端射模式下的辐射方向图,主波束方向指向  $90^\circ$  并且具有较大的半功率波瓣宽度。图 15(c)~(f)分别对应 5.7 GHz、8 GHz、10 GHz 以及 12 GHz 处的漏波模式辐射方向图。因此,所提出天线可以同时辐射 SSPP 波的慢波能量和快波能量,在这两种模式的辐射下覆盖了  $180^\circ$  波束扫描范围。

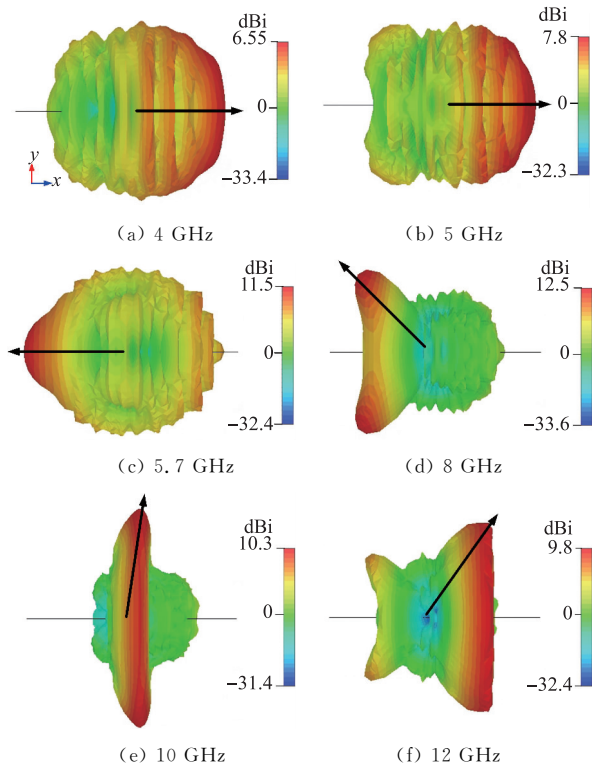


图 15 全角度波束扫描天线 3D 远场方向图

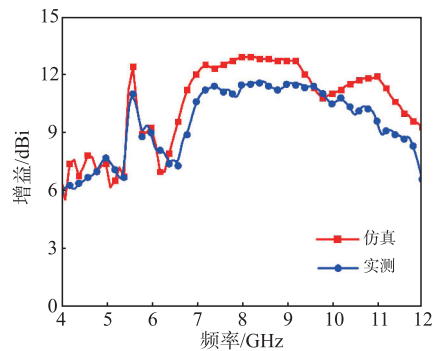


图 16 低旁瓣全角度波束扫描天线仿真与实测增益曲线

图 16 为该低旁瓣全角度波束扫描天线的仿真

和实测增益曲线,测试结果与仿真较吻合。实际测试时,在端射模式和频扫模式时的增益波动幅度分别为 5.96~7.84 dBi 和 6.13~11.9 dBi。

## 4 结语

本文提出了一种人工表面等离激元馈电的宽带全角度低旁瓣波束扫描漏波天线。采用人工表面等离激元馈电卵圆形辐射贴片阵列和对跖 Vivaldi 辐射器,在快波波段激发高次谐波进行漏波辐射,在慢波波段呈现低损耗能量传输效果激励对跖 Vivaldi 的端射模式,实现一种宽带(4~12 GHz)、全角度(180°)覆盖的波束扫描天线。通过改变卵圆形贴片到馈电线的耦合距离来调整了锥形衰减常数的分布,实现 4~12 GHz 内旁瓣水平均在 -10 dB 以下。所设计的人工表面等离激元馈电的宽带全角度低旁瓣波束扫描漏波天线为雷达探测、目标跟踪等应用提供了支持。

## 参考文献

- [1] JACKSON D R, CALOZ C, ITOH T. Leaky-Wave Antennas [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(7): 2194-2206.
- [2] PENDRY J B, MARTIN-MORENO L, GARCIA-VIDAL F J. Mimicking Surface Plasmons with Structured Surfaces[J]. *Science*, 2004, 305: 847-848.
- [3] KONG G S, MA H F, CAI B G, et al. Continuous Leaky-Wave Scanning Using Periodically Modulated Spoof Plasmonic Waveguide[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 29600.
- [4] WANG M, WANG H, TIAN S, et al. Spatial Multi-Polarized Leaky-Wave Antenna Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(4): 2531-2540.
- [5] XU S D, MA H F, TIAN S, et al. A Wide-Angle Narrowband Leaky-Wave Antenna Based on Substrate Integrated Waveguide-Spoof Surface Plasmon Polariton Structure[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(7): 1386-1389.
- [6] JIDI L, CAO X, GAO J, et al. Ultrawide-Angle and High-Scanning-Rate Leaky Wave Antenna Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(3): 2312-2317.
- [7] GUAN D F, YOU P, ZHANG Q, et al. A Wide-Angle and Circularly Polarized Beam-Scanning Antenna Based on Microstrip Spoof Surface Plasmon Polariton Transmission Line [J]. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 2538-2541.
- [8] ZHANG G, ZHANG Q, CHEN Y, et al. High-Scanning-Rate and Wide-Angle Leaky-Wave Antennas Based on Glide-Symmetry Goubau Line [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(4): 2531-2540.
- [9] WANG J, ZHAO L, HAO Z C, et al. Wide-angle Frequency Beam Scanning Antenna Based on the Higher-Order Modes of Spoof Surface Plasmon Polariton[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(11): 7652-7657.
- [10] RUDRAMUNI K, REZAEI M, ELEFTHERIADES G V. Goubau-Line Leaky-Wave Antenna for Wide-Angle Beam Scanning from Backfire to Endfire[J]. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(8): 1571-1574.
- [11] ZU H R, WU B, ZHAO Y T, et al. Dual-Band Antenna with Large Beam Steering Angle Incorporating Endfire and Frequency Scanning Modes Using Double-Layer SSPPs Structure [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(1): 46-55.
- [12] DAI L H, TAN, C, ZHOU Y J. Ultrawideband Low-Profile and Miniaturized Spoof Plasmonic Vivaldi Antenna for Base Station [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(7): 2429.
- [13] OLINER A A, JACKSON D R. Leaky-Wave Antennas[M]//VOLAKIS J L. *Antenna Engineering Handbook*. New York: McGraw-Hill, 2007.

(编辑:徐楠楠)