

基于双层人工表面等离子激元的高扫描率漏波天线

张程浩, 贺遥, 彭祥飞

(中国电子科技集团公司第二十九研究所, 成都, 610036)

摘要 针对传统人工表面等离子激元(SSPPs)漏波天线扫描速率低的现象,提出了一种新型双层SSPPs单元,并基于此实现了拥有高扫描率特征的漏波天线。所提出的双层SSPPs单元由具有“H”形的顶层SSPPs单元和具有“I”形的底层SSPPs单元组成。所提出的单元通过分别控制顶层和底层SSPPs单元的色散特性,能够实现对色散曲线的截止频率和斜率的独立控制。所提出的漏波天线的辐射是通过顶层的“H”形单元进行正弦表面阻抗调制来实现的。由于底层“I”形的SSPPs单元的存在,引入了强色散特性,提高了周期相移的增长速率,从而实现了高扫描速率。此外,通过在周期辐射结构上引入短路枝节,该漏波天线的开阻带(OSB)现象被几乎完全抑制。通过对所提出的漏波天线的原型进行仿真、加工和测量,该漏波天线能够在8.8~10.8 GHz之间的窄频段实现从后向-63°到正向63°的大角度连续扫描。测试结果与仿真结构一致证明了提出双层SSPPs单元与设计理论的正确性。

关键词 双层人工表面等离子激元;高扫描速率;色散分析;漏波天线

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.06.005

中图分类号 TN811 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)06-0036-06

A High-Scanning-Rate Leaky-Wave Antenna Based on Double Layer Spoof Surface Plasmon Polaritons

ZHANG Chenghao, HE Yao, PENG Xiangfei

(The 29 Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Chengdu 610036, China)

Abstract With the scanning rate of traditional spoof surface plasmon polaritons (SSPPs) leaky-wave antenna being low, a novel double layer SSPPs element is proposed, and a leaky-wave antenna with high scanning rate is realized on the basis of this. The proposed double layer SSPPs element consists of a top SSPPs element with a “H” cell and a bottom SSPPs element with a “I” element. The proposed element is characterized by independently controlling the cut-off frequency and slope of the dispersion curve, realizing the cut-off frequency and slope of dispersion curve to be controlled independently by controlling the dispersion property of the top and bottom SSPPs elements respectively. The radiation of the proposed leaky-wave antenna is realized by sinusoidal surface impedance modulation of the “H” elements on the top layer. Due to the existence of the bottom “I” SSPPs elements, the strong dispersion property is introduced to improve the growth rate of period phase shift, thus achieving the high scanning rate. In addition, the open stopband (OSB) phenomenon of the leaky-wave antenna is almost completely suppressed by introducing short open-ended stubs in the periodic radiation structure. The prototype of the proposed leaky-wave an-

收稿日期: 2023-06-02

作者简介: 张程浩(1997-),男,甘肃永靖人,硕士生,研究方向为相控阵超材料。E-mail: chzhang97@163.com

引用格式: 张程浩,贺遥,彭祥飞.基于双层人工表面等离子激元的高扫描率漏波天线[J].空军工程大学学报,2023,24(6):36-41. ZHANG Chenghao, HE Yao, PENG Xiangfei. A High-Scanning-Rate Leaky-Wave Antenna Based on Double Layer Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(6): 36-41.

tenna is simulated, machined and measured. The leaky-wave antenna is capable of achieving continuous wide-angle scanning from -63° to 63° at a narrow band between 8.8 GHz and 10.8 GHz. The consistency between the experimental and the simulated results proves the correctness of the proposed double-layer SSPPs element and the design theory.

Key words double layer spoof surface plasmons polaritons (SSPPs); leaky-wave antenna; high scanning rate; dispersion analysis

漏波天线是一种行波天线,相比于其他类型的天线有着频率扫描高增益和低剖面等独特的优势^[1]。漏波天线按照辐射机理可以分为均匀、准均匀和周期漏波天线 3 种类型。相较于均匀和准均匀漏波天线,周期漏波天线拥有额外的优点,比如从后向扫描到前向空间,稳定的增益变化。周期漏波天线可以在不同种类的传输线上引入周期性的扰动实现,例如微带线^[2]、复合左右手传输线^[3]、基片集成波导^[4]等。基于不同的传输线类型,周期漏波天线展现出不同的辐射性能。为了探索周期漏波天线辐射性能新的可能性,研究者们将新型的传输线和其在漏波天线领域的应用作为周期漏波天线的研究重点。

近年来,人工表面等离激元 (spoof surface plasmon polaritons, SSPPs) 传输线^[5]作为一种新型传输线已经被广泛研究。相较于传统类型的传输线,SSPPs 传输线拥有强慢波特性的、高的场限制性和易于调节色散特性的优点。SSPPs 传输线自然的周期特性为设计周期漏波天线提供了一种新的方案与视角^[6-9]。文献[6]在 SSPPs 传输线附近放置圆形耦合贴片,将 SSPPs 线作为馈电线,实现了漏波模式的辐射。Du 等^[7]将经典的正弦阻抗调制技术引入 SSPPs 传输线,对传输线的表面阻抗进行周期的调制,从而实现漏波模式辐射。此外,此天线通过引入不对称结构,对开阻带现象进行了抑制。Xu 等^[8]将相位反转结构引入到 SSPPs 传输线中,构建出垂直于纵向的电流分布,形成从漏波模式辐射。在之前的工作中^[9],笔者团队利用“H”形 SSPPs 单元的双模特性,以创新性方法实现了双波束漏波天线。

扫描速率是漏波天线的重要特征。高扫描速率可以在窄频带内获得更多的信息,提高频谱效率,减轻射频收发器的压力。虽然大多数已经报道的基于 SSPPs 传输线的漏波天线有良好的辐射性能,但是很少的漏波天线能实现高扫描率性能。Guan 等^[10]将 SSPPs 的低通特性与基片集成波导的高通特性结合起来,实现周期相移的快速增长从而提高了漏波天线的扫描率。此外,基于文献[10]所提的结构,

文献[11]引入上层与下层的不对称性实现了开阻带的抑制,进一步优化了漏波天线的扫描率。文献[12]利用 SSPPs 传输线的色散特性随频率越来越强的特性,通过缩短椭圆形耦合贴片之间的距离提升了工作频段内的周期相移增长速率,从而实现了高扫描率。

在大部分周期漏波天线波束扫描的过程中,开阻带与闭阻带经常会出现并打断连续的扫描。开阻带一般会出现发生在边射频率附近,造成反射系数的突然增长并无法形成有效的辐射方向图。闭阻带一般出现在前向扫描过程中,通常情况下也会造成反射系数的突然增长。当闭阻带出现,负二次空间谐波也会出现并阻碍负一次谐波引起的单谐波辐射。针对于抑制周期漏波天线开阻带现象,总的来说有 2 种方法被应用^[13-14]。一种方法从阻抗匹配概念出发,通过引入在周期结构中引入短路枝节实现更好的阻抗匹配^[13],实现阻带的抑制;另一种方法从电场角度出发,通过在周期结构中引入不对称的结构破坏宽边辐射时完全对称的辐射场^[14],实现抑制阻带。针对于闭阻带的现象,Zhang 等^[15]采用高介电常数的介质板提升介质中电磁波的相速度从而将闭阻带与负二次谐波的辐射移出负一次谐波工作的快波区,从而实现纯净的负一次谐波辐射。

为了解决 SSPPs 漏波天线扫描速率低的问题,本文提出了一种新型的双层 SSPPs 单元,并基于此设计了一款高扫描率漏波天线。

1 单元分析

大多数基于慢波线的周期性深度调制 SSPPs 漏波天线仅显示低扫描速率,这是因为周期深度调制不能充分利用传统慢波线路的慢波特性的。为了解决这种情况,本文提出了一种新型的双层 SSPPs 单元,它由一个“H”形 SSPPs 单元和一个“I”形 SSPPs 单元组成,如图 1 所示。同时,为了展示所提出单元的性能优势,将仅由一个“H”形单元组成的经典 SSPPs 单元作为比较。

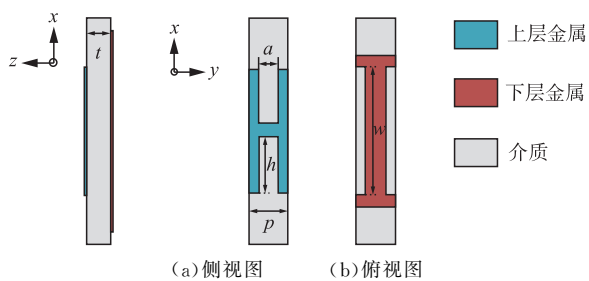


图1 本文 SSPPs 单元结构

设置单元的尺寸参数 $p = 1 \text{ mm}$, $a = 0.5 \text{ mm}$, $w = 7.5 \text{ mm}$, $h = 3.25 \text{ mm}$, $t = 0.813 \text{ mm}$ 。采用的介质板为罗杰斯 4003, 介电常数为 3.55。上述 2 种单元在 CST Microwave Studio 里的本征模式求解器中进行仿真, 获得它们的色散曲线。根据文献[9], 对于“H”形单元来说, 枝节长度 h 会影响单元的截止频率和色散曲线的斜率; 对于“I”形单元, 槽的长度 w 会影响单元的截止频率和色散曲线的斜率。经典的单层“H”形单元随枝节长度 h 变化和双层 SSPPs 单元的色散曲线见图 2。单元相移 β 被定义为沿着 y 方向的相位常数。同时, 由上述单元组成的波导是一种低通滤波结构, 它的截止频率会出现在色散曲线中的 $\beta = \pi / p$ 附近。可以发现, 单层 SSPPs 色散曲线的截止频率随枝节长度 h 的不断增加而逐渐降低, 慢波特性和逐渐提升。

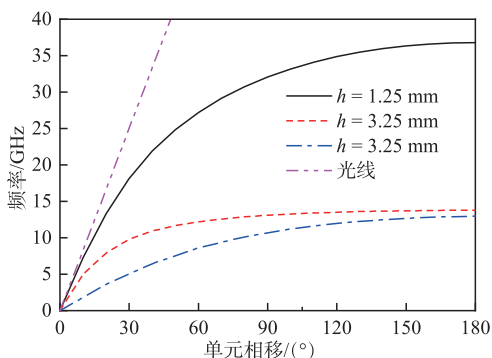


图2 经典 SSPPs 单元的色散曲线

相较于单层单元, 双层单元展示出更强的慢波特性和。双层单元的上层和下层单元的参数可以实现独立控制, 从而引入额外的自由度去控制色散。

双层 SSPPs 单元随上层和下层单元参数变化的色散曲线见图 3 和图 4。可以发现, 当 w 较小而 h 发生变化时, 曲线的变化趋势和单层的 SSPPs 单元十分相似, 只是由于引入了下层单元, 双层单元展示出更强的慢波特性和。如图 4 所示, 当 w 较大而 h 发生变化时, 则截止频率相同, 曲线的斜率变化不同。上述现象说明, 双层单元可以实现对色散曲线更好的控制。这是由于色散曲线的截止频率能够被上层单元与下层单元中慢波特性和更强的单元决定。当慢波特性和更强的一层 SSPPs 单元截止频率被决定后, 色散曲线的斜率能够被另外一层的慢波特性和改变。该现象证明了提出的双层 SSPPs 单元可以

通过分别控制上层单元与下层单元的参数实现对色散曲线截止频率与色散曲线的独立控制。这是本文实现高扫描率的基础与关键。

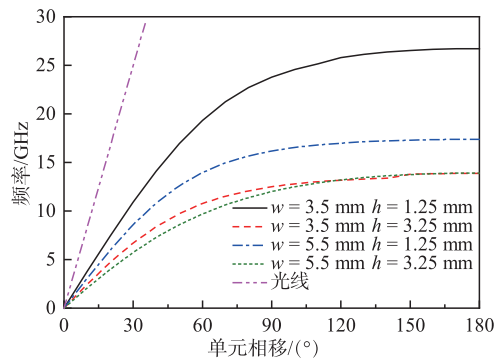


图3 双层 SSPPs 单元随上层参数变化的色散曲线

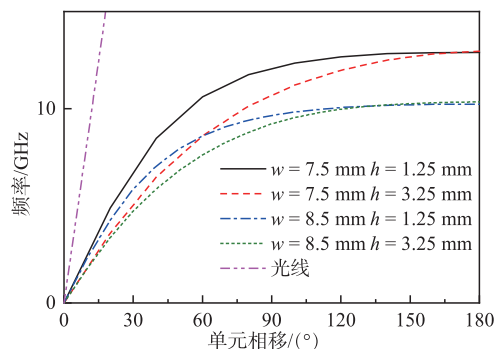


图4 双层 SSPPs 单元随下层参数变化的色散曲线

为了进一步表明和验证所提单元的特性, 在 CST Microwave Studio 中对上述 2 种单元组成的波导进行仿真。图 5 为 8 GHz 时不同枝节长度 h 的 2 种单元组成的波导的电场图。可以看出基于双层 SSPPs 单元的波导电场展示出更强的场束缚性, 且波导波长更短。此外, 当 h 变化时, 所提的双层 SSPPs 单元组成的波导依旧拥有强场束缚性, 而传统的单层 SSPPs 单元随着直接深度变短电场束缚性和场的慢波特性和下降明显。波导仿真与单元仿真之间的一致性证明了所提出的双层 SSPPs 的设计的正确性。

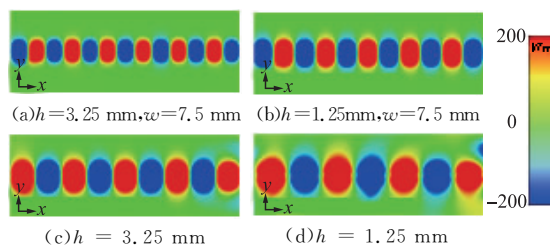


图5 双层 SSPPs 单层 SSPPs 波导电场图

2 辐射原理

根据 Floquet 理论, 在周期漏波天线中, 空间谐波能够通过引入周期性的干扰被激励起来。空间谐波的表达式为:

$$\beta_n = \beta_0 + \frac{2\pi n}{d}, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

式中: β_n 为第 n 个空间谐波的相位常数; d ($d = m \times p$) 是由 m 个单元组成的周期。负一次谐波引起的辐射的辐射角度计算式为:

$$\theta_{-1} = \sin^{-1}(\beta_{-1}/k_0) \quad (2)$$

文中引入周期性干扰的方法为正弦表面阻抗调制的方法。根据正弦表面阻抗调制理论,如果表面的辐射波转化为空间谐波,表面波阻抗沿传播方向作正弦调制。首先引起的辐射为负一次谐波的辐射,其辐射角度随频率增高逐渐从后向到前向空间。其辐射角计算式:

$$\theta_{-1} = \arcsin\left(\sqrt{1+X'^2} - \frac{2\pi}{k_0 d}\right) \quad (3)$$

式中: X' 为归一化平均表面电抗; k_0 为在自由空间中的波数; d 为调制周期。如果 X 固定,则辐射角只与 d 有关。假设 y 方向为传播方向,沿着传输线的方向其表面阻抗可表示为:

$$Z(y) = jX_s [1 + M \cos(2\pi y/d)] \quad (4)$$

式中: $X_s = \eta_0 X'$ 为平均表面电抗; M 为调制因子; η_0 为自由空间中的波阻抗。表面阻抗可以用波数表示:

$$Z = j\eta_0 \sqrt{(k_y/k_0)^2 - 1} \quad (5)$$

式中: k_y 为沿 y 方向的波数,可以是近似为 SSPPs 波的相位常数。假设调制周期内的最大值和最小值阻抗分别为 Z_{\max} 和 Z_{\min} ,则 X_s 和 M 能够被 Z_{\max} 和 Z_{\min} 近似表示为:

$$\begin{cases} X_s = \text{Im}\left(\frac{Z_{\max} + Z_{\min}}{2}\right) \\ M = \left|\frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{Z_{\max} + Z_{\min}}\right| \end{cases} \quad (6)$$

通过求解上述方程可得到阻抗 4 个联立方程。最后,表面的表达阻抗可以简化为传播常数,可通过上层的十字形单元的枝节长度 h 来控制。因此,正弦阻抗调制理论可以通过级联所提出的双层 SSPPs 单元实现。

扫描率是漏波天线的重要特征,高扫描速率可以在窄频带内获得更多的信息,从而提高频谱效率,减轻射频收发器的压力。根据式(2),扫描率可以表示为:

$$S_{\text{rate}} = \frac{\left(\sin^{-1}\left(\frac{\beta_b}{k_2 d}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{\beta_a}{k_1 d}\right)\right)}{R_B} \quad (7)$$

式中: β_b 和 β_a 分别为极限的扫描角度处的负一次谐波相移常数; k_2 和 k_1 分别为极限的扫描角度处的自由空间的相移常数; R_B 为扫描过程的相对带宽。

通过分析式(7)可知,决定扫描速率的就是负一次谐波的相移常数和周期长度 2 个因素。所以,快

速增长的相位常数将导致高的扫描速率。本文所提出的双层 SSPPs 单元与经典的单层 SSPPs 单元相比,展现出更强的慢波特性和能够实现更高的扫描率。当单元被确定之后,周期长短影响工作频率,周期长度越短,频率越高,这是因为双层 SSPPs 单元的色散特性随频率的增加而逐渐增大。在此基础上,选择较短的周期长度能够提升工作波段内的慢波特性和慢波特性。更重要的是,所提出的双层 SSPPs 单元具有相同的截止频率特性,能进一步缩短周期长度和增加周期相移的增长速率。

3 天线结构

基于所提出的 SSPPs 单元和正弦表面阻抗调制理论,设计了一个具有高扫描率性能的漏波天线。图 6 为所提出天线的结构示意图,该天线由 3 部分组成。第 1 部分采用微带线渐变形式构成渐变巴伦连接 SMA 接头,实现由微带线模式向双线模式的平滑转换。上层金属宽度由 1.5 mm 逐渐减小为 0.5 mm,下层金属宽度由 10 mm 减小为 6 mm。第 2 部分是一个模式过渡结构,将双线模式转换为 SSPPs 模式,引入更多的过渡单元可以实现更好的模式匹配和阻抗匹配,其轮廓方程可以表示为 $y = ax + b$,代入起点与终点坐标 $(0, 0.5)$ 和 $(10, 3)$,可解得 $a = 0.25, b = 0.5$ 。按周期 $p = 1$ mm 进行离散取点,即可得到过渡结构的每个槽深。第 3 部分是天线的辐射周期结构,上层的十字形单元以正弦表面阻抗调制方式进行深度调制,下层槽形单元不进行调制,保留强的慢波特性和慢波特性以实现 SSPPs 单元相同截止频率和不同斜率的特性,从而实现高扫描率的性能。此外,由于上下 2 层结构的不同引入了不对称性,一定程度上削弱了宽边辐射时完全对称的场,一定程度抑制了开阻带现象。为了进一步抑制开阻带现象,在周期结构中横向引入不对称性,即短的枝节,进一步破坏完全对称的场。此天线关键的参数见表 1。

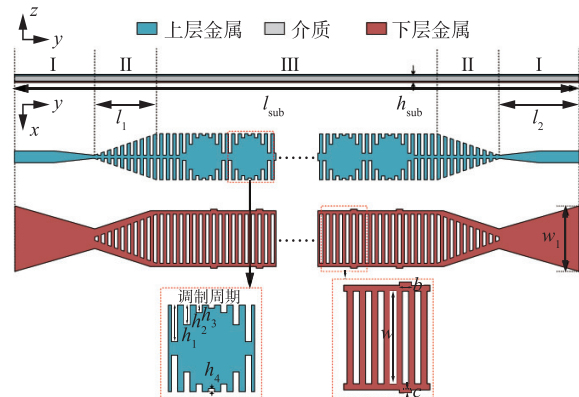


图 6 SSPPs 漏波天线结构图

表 1 所提出的天线的关键参数

参数	数值/mm	参数	数值/mm
l_{sub}	261	b	1
h_{sub}	0.813	c	0.5
l_1	10	h_1	2.95
l_2	12	h_2	1.6
τ	7.5	h_3	0.61
τ_1	10	h_4	0.25

4 仿真与测试结果分析

为了验证所设计 SSPPs 漏波天线的性能,在 CST Microwave Studio 中进行仿真。图 7 为仿真的反射系数 S_{11} 与传输系数 S_{21} 。通过观察图 7 中的曲线,可以分析此漏波天线的各个工作频段及其工作性能。第 1 个闭阻带出现在 5.5~6.4 GHz。随着频率的逐渐增加,负一次谐波在 8.6 GHz 附近进入快波区实现向自由空间的辐射。在 8.3 GHz 处,存在一个过渡段,衰减常数突然增加和传输系数突然下降。造成这样现象的原因是此频段是快波与慢波的模式转换频段,即处于快波区的边界。负一次谐波工作的频段为 8.6~11.2 GHz,在此频段内主波束从后向逐渐辐射到前向空间实现波束扫描性能。在 9.8 GHz 附近,天线达到宽边辐射频率,在此频率的开阻带现象通过引入上下 2 层与左右两侧的不对称性进行抑制。第 2 个闭阻带在 11.7 GHz 附近出现,负二次谐波在 11.8 GHz 附近进入快波区开始辐射。天线的截止频率出现在 13 GHz。

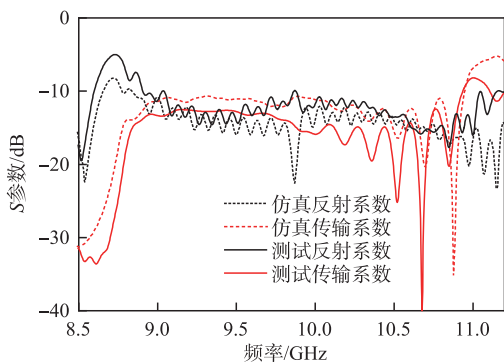


图 7 SSPPs 漏波天线的仿真 S 参数图

为了进一步验证天线的性能,对所提出的天线被加工和测试。图 8 为所提出的 SSPPs 漏波天线的实物图。天线的 S 参数被矢量网络分析仪测量,图 9 为工作在负一次谐波快波频段的测试和仿真的 S 参数,可以看出测试结果与仿真结果有着很好的一致性。测试的传输系数略小于仿真的传输系数,测试的反射系数略高于仿真的反射系数。这样现象的原因可能是因为加工误差和 SMA 接头造成的额外损耗与匹配变差。为了获得天线的远场辐射信息,本文提出的天线在一个微波暗室中的远场条件

下进行测试。图 10 为仿真与测试的归一化辐射方向图,可以看到天线在 8.8~10.8 GHz 范围内主波束可以实现从后向 63° 到正向 63° 的大角度连续扫描。天线的副瓣效果也维持在 -10 dB 左右,这表明天线可以实现良好的方向图性能。扫描速率被定义为扫描角度范围除以相对带宽。在本文中,扫描速率的计算结果为 6.12。图 11 为天线仿真和测试的增益可以看到,天线在整个扫描过程中,增益变化非常稳定,同时,在宽边频率,所提出 SSPPs 漏波天线的增益也能维持相对稳定。



图 8 SSPPs 漏波天线加工实物图

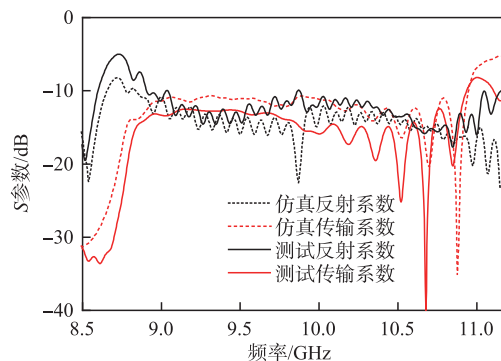


图 9 SSPPs 漏波天线仿真与实测的反射系数与传输系数

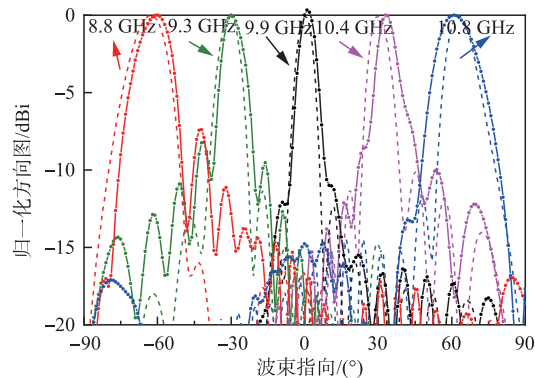


图 10 SSPPs 漏波天线归一化的仿真与实测的辐射方向图

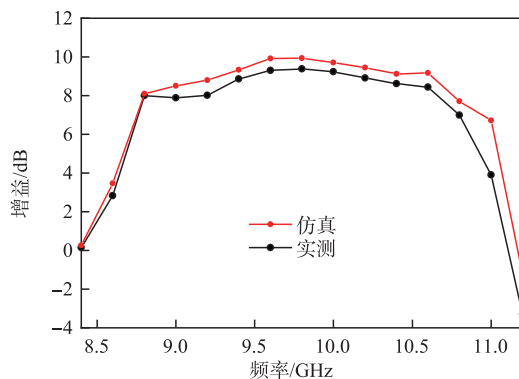


图 11 SSPPs 漏波天线的仿真与实测的增益

在之前文献之中,研究者在提升 SSPPs 漏波天线的扫描率方面做了一些工作。朱傲琪等^[11]利

用 SSPPs 的低通特性与基片集成波导的高通特性,提升了通带内的相移增长效率,从而实现高扫描率。文献[12]利用 SSPPs 传输线的慢波特性和随频率逐渐增强的特性,通过调整耦合贴片之间的距离使天线工作于较高频段,从而实现高扫描特性。本文提出了一种新的方法来实现高扫描率特征,利用上层单元与下层单元之间的共同作用,从单元的色散曲线出发,实现了更快的相移增长速率,进而实现了高扫描率的特征。

5 结语

在本文中,基于所提出的双层 SSPPs 单元,设计了一个具有高扫描率和较大扫描角度的漏波天线,详细分析和讨论了所提出双层 SSPPs 单元的工作原理。SSPPs 单元的色散曲线中的截止频率与斜率可以实现独立控制,这是设计高扫描率天线的基础与关键。本文也详细介绍了应用所提出的单元结合正弦表面阻抗调制理论设计高扫描率漏波天线的过程。通过对所提出的天线仿真、加工和测试,所得的仿真与测试结果之间有着非常好的一致性。相较于已存在文献中的天线,本文所提出的天线有着低成本、高扫描率、宽扫描角和增益稳定等优势。该双层 SSPPs 单元和天线为高扫描率漏波天线的实现提供了一个新的方案。

参考文献

- [1] 龙云亮,刘菊华,李元新.平面漏波天线综述[J].微波学报,2013,29(5-6):49-54.
- [2] 左丽,李元新,陶锐,等.异形单元周期性微带漏波天线设计[C]//2019年全国微波毫米波会议论文集(下册).广州:中国电子学会,2019:47-49.
- [3] 陈晚,傅佳辉.一种新型复合左右手圆极化电扫漏波天线[J].微波学报,2012,28(S1):76-78.
- [4] 刘菊华,陈锡伦,殷淑芬,等.一种利用高次模提高基片集成波导缝隙漏波天线增益的方法[C]//2021年全国天线年会论文集.宁波:中国电子学会,2021:2551.
- [5] 姚大悦,何沛航,张浩驰,等.基于人工表面等离激元的天线赋能技术[J].空军工程大学学报(自然科学版),2022,23(1):12-22.
- [6] YIN J Y. Frequency-Controlled Broad-Angle Beam Scanning of Patch Array Fed by Spoof Surface Plasmon Polaritons[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2016,64(12):5181-5189.
- [7] DU X,REN J,LI H,et al. Design of a Leaky-Wave Antenna Featuring Beam Scanning from Backfire Utilizing Odd-Mode Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(10): 6971-6976.
- [8] XU J J,JIANG X,ZHANG H C,et al. Diffraction Radiation Based on an Anti-Symmetry Structure of Spoof Surface-Plasmon Waveguide[J]. Applied Physics Letters,2017,110(2):021118.
- [9] ZHANG C,REN J,DU X,et al. Dual-Beam Leaky-Wave Antenna Based on Dual-Mode Spoof Surface Plasmon Polaritons[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2021,20(10):2008-2012.
- [10] GUAN D F,ZHANG Q,YOU P,et al. Scanning Rate Enhancement of Leaky-Wave Antennas Using Slow-Wave Substrate Integrated Waveguide Structure[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018,66(7): 3747-3751.
- [11] 朱傲琪,姜兴,廖欣,等.基于三角调制 SSPP 缝隙的窄带宽扫描角漏波天线[J].微波学报,2020,36(S1):83-86.
- [12] JI 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.
- [13] WANG M,MA H F,ZHANG H C,et al. Frequency-Fixed Beam Scanning Leaky-Wave Antenna Using Electronically Controllable Corrugated Microstrip Line [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018,66(9):4449-4457.
- [14] XU S D. 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.
- [15] 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.

(编辑:徐楠楠)