

基于人工表面等离激元的天线赋能技术

姚大悦^{1,2,3}, 何沛航^{1,2}, 张浩驰^{1,2*}, 范轶^{1,2}, 崔铁军^{1,2*}

(1. 东南大学毫米波国家重点实验室, 南京, 210096; 2. 东南大学电磁空间科学与技术研究院, 南京, 210096; 3. 东南大学微电子学院, 南京, 210096)

摘要 针对现有天线尺寸对材料属性的过度依赖、天线隐身与辐射性能的固有矛盾、以及天线波束可重构方式和性能受限等瓶颈问题, 着重讨论了利用人工表面等离激元场增强、场束缚及慢波效应对天线进行赋能的技术, 包括基于人工表面等离激元的天线小型化技术、雷达散射截面抑制技术、以及波束重构技术, 为新型天线的研究提供新的思路 and 选择。

关键词 人工表面等离激元; 天线小型化技术; 雷达散射截面抑制技术; 波束重构技术

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2022.01.002

中图分类号 TN8 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2022)01-0012-11

An Antenna Enabling Technology Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons

YAO Dayue^{1,2,3}, HE Peihang^{1,2}, ZHANG Haochi^{1,2*}, FAN Yi^{1,2}, CUI Tiejun^{1,2*}

(1. The State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. Institute of Electromagnetic Space, Southeast University, Nanjing 210096, China;
3. School of Microelectronics, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract Aimed at the problems that existing antenna size is excessively dependent on material properties, there are in contradictions between antenna stealth and radiation performance, and the antenna beam reconfigurable method and the performance are limited, this paper mainly discusses the antenna enabling technology based on field enhancement, the field confinement and slow wave effect of spoof surface plasmon polariton (SSPPs), including the antenna miniaturization technology, the radar cross section (RCS) suppression technology, and the beam reconfigurable technology. And the above-mentioned provides the research of novel antennas with innovative ideas and options.

Key words spoof surface plasmon polariton; antenna miniaturization technology; radar cross section suppression technology; beam reconfigurable technology

近年来,随着信息科学的不断发展,无线传输设备在导航、电子对抗、雷达、遥控、物联网设备及移动通信等领域被大规模使用^[1-3]。而天线作为无线传输

设备中不可或缺的部分,承担着辐射和接收电磁波的功能,被学术界和工程界广泛关注与研究^[3-6]。但是,由于传统天线存在着尺寸和增益相互制约、高性能辐

收稿日期: 2021-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(62101122); 江苏省自然科学基金(BK20210212)

作者简介: 姚大悦(1998—),女,山西运城人,博士生,研究方向为微波集成电路方面的研究。E-mail: yaodayue@seu.edu.cn

通信作者: 张浩驰(1991—),男,浙江嘉兴人,副研究员,研究方向为人工表面等离激元。E-mail: hc Zhang@etnws.com

崔铁军(1965—),男,河北承德人,院士,教授,研究方向为信息超材料。E-mail: tjcui@seu.edu.cn

引用格式: 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.
YAO Dayue, HE Peihang, ZHANG Haochi, et al. An Antenna Enabling Technology Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2022, 23(1): 12-22.

射与低雷达散射截面(radar cross section, RCS)的固有矛盾、以及宽带广角的波束可重构困难等问题,已成为制约以上应用的进一步发展的关键因素。

表面等离激元(SPPs)是一种存在于光波频段的特殊表面电磁波模式,可将电磁能量强束缚于金属-介质分界面的亚波长范围内,其沿着分界面切线方向传播,而在法线方向呈指数衰减^[7-8]。然而,电子在金属中运动所造成的固有传播损耗限制了表面等离激元器件和系统的发展。虽然降低频率可有效解决损耗问题,但由于金属在微波和太赫兹频段呈现的完美导体特性,表面等离激元模式无法存在于微波及太赫兹频段。

为了解决这一问题,学者们提出在低频下用狭缝、孔或块的一维或二维阵列的金属结构,模拟表面等离激元模式的想法^[9]。这种人工设计的周期性金属结构被称为人工表面等离激元(SSPP)结构,是表面等离激元在微波频段应用的延伸和拓展。利用人工设计排列的周期性金属结构单元,可在微波频段模拟金属的等离子体特性^[10-12],产生类似于光波频段的表面等离激元电磁波模式,并且可以通过调节金属结构尺寸实现对电磁波的调控。

由于独特的强场束缚、低损耗、可调控、小型化、易集成等优点,人工表面等离激元模式可被广泛应用于微波集成电路、隐身材料、天线等领域^[13-23]。例如,人工表面等离激元模式的低损耗特性可用于实现各种高品质因子的亚波长器件^[24],如长距波导、低串扰互连^[25]、和高灵敏度探测器^[26]等。与相同空间尺寸的传统微带器件比较,新型的基于人工表面等离激元的无源和有源器件,如天线^[27-38]、滤波器^[39-40]、功率分配器^[41]、放大器^[42]、可调谐器件和可编程器件^[43]等,具有许多如抑制相邻耦合^[44]、减小介质损耗^[45]和减小屏蔽盒体积^[46-47]等卓越特性。

本文讨论了基于人工表面等离激元的天线赋能技术。针对现有天线存在的尺寸对材料属性过度依赖、低 RCS 天线辐射性能低、以及波束可重构方式少和范围小等瓶颈问题,着重讨论了基于人工表面等离激元的天线赋能技术,包括基于人工表面等离激元的天线小型化技术、RCS 抑制技术、以及波束重构技术,为新型天线的研究提供新的思路 and 选择。

1 基于人工表面等离激元的天线小型化技术

随着无线便携设备的发展,小型化天线受到越来越多学者的关注。实现小型化天线最直接的方法包括使用高介电常数的基板^[48],但此类基板往往价

格较为昂贵且具有信号完整性等方面的劣势。此外还可利用电容贴片或短路引脚实现天线小型化设计^[49-50]。文献[51]中采用弯曲槽方式,降低了天线谐振频率,减小了天线尺寸。就上述方法来说,天线尺寸和增益之间的相互制约关系以及小型化天线带来的窄带宽问题都限制了小型化高性能天线的发展。而利用人工表面等离激元模式的慢波特性与高相位常数,基于人工表面等离激元的天线可在保持良好的辐射特性的同时减小尺寸,可在常规介电常数基板上实现天线的小型化。

由于人工表面等离激元模式具有良好的慢波传输特性,文献[52]提出了一种利用人工表面等离激元结构减小非辐射边长度的方法来减小物理面积,从而实现小型化天线的设计,天线结构如图 1 所示。该天线在 9 GHz 下的有效尺寸为 $0.16\lambda_0 \times 0.16\lambda_0 \times 0.04\lambda_0$,远小于同性能下传统天线,而且实现了良好的辐射特性,具有低轮廓、紧凑设计和宽辐射角等特点,可用于未来无线通信系统。

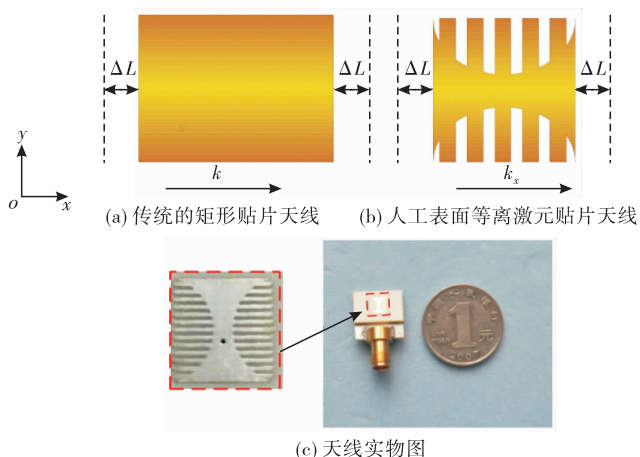


图 1 天线对比图

文献[53]利用人工表面等离激元的慢波特性,提出一种具有普通介电常数小型圆极化天线的设计,天线结构如图 2 所示,相比于传统的方形结构,该结构不仅可以减小尺寸,而且可以使 TM_{10} 和 TM_{01} 模式之间产生电磁耦合,实现良好的圆极化特性。辐射贴片的整体尺寸为 $0.17\lambda_0 \times 0.17\lambda_0$,面积约为常规贴片 ($0.5\lambda_0 \times 0.5\lambda_0$) 的 1/10。此外,该方法与现有天线设计相兼容,可促进圆极化天线的小型化发展。

准八木天线具有结构简单、方向性强、易于实现高增益等优点,但是也存在增益和结构尺寸之间的相互制约关系。文献[54]探索了一种新的准八木天线设计,天线结构如图 3 所示。天线主要由馈电结构和准八木结构组成。其中,人工表面等离激元馈电结构由过渡结构和人工表面等离激元巴伦组成。准八木结构比传统的结构长度分别减少了 32% 和 27%,整体天线的尺寸为 $0.43\lambda_0 \times \lambda_0 \times 0.0157\lambda_0$ 。

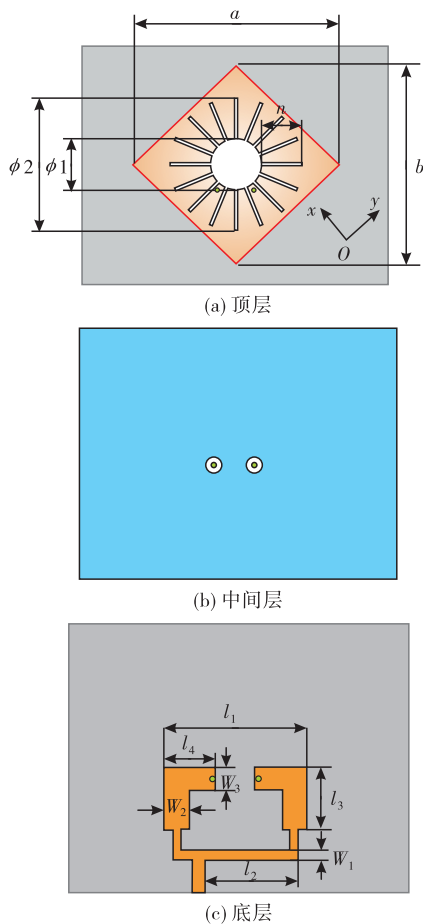


图 2 小型圆极化天线

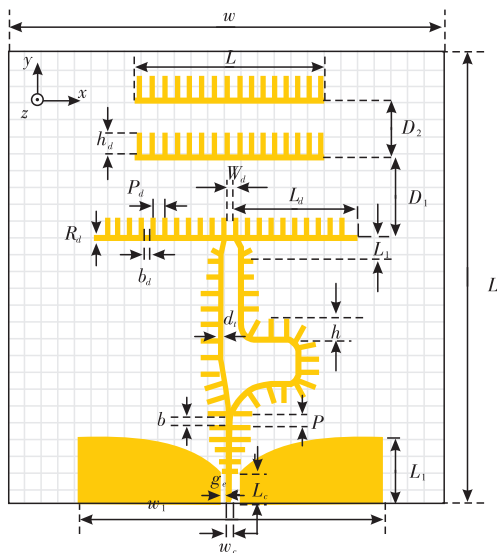


图 3 天线的原理图

微带网格阵列天线以其高增益、宽带宽、易于配置等优点备受关注。文献[55]提出一种基于人工表面等离激元的微带网格阵列天线,和传统天线结构的对比如图 4 所示。传统结构如图 4(a)所示,长边作为传输线,长度为 λ_g ,短边作为传输线和辐射元件,长度为 $\lambda_g/2$ 。基于人工表面等离激元的天线结构如图 4(b)所示,在保持良好辐射性能的同时,用

人工表面等离激元结构代替长边微带线,该天线的有效尺寸为 $1.08\lambda_0 \times 2.07\lambda_0 \times 0.07\lambda_0$,与传统天线相比减小了 36.3%。此外,该天线的 10 dB 阻抗带宽为 12.5%,比传统天线(2.4%)性能优越,体现了其在毫米波无线系统中的应用潜力。

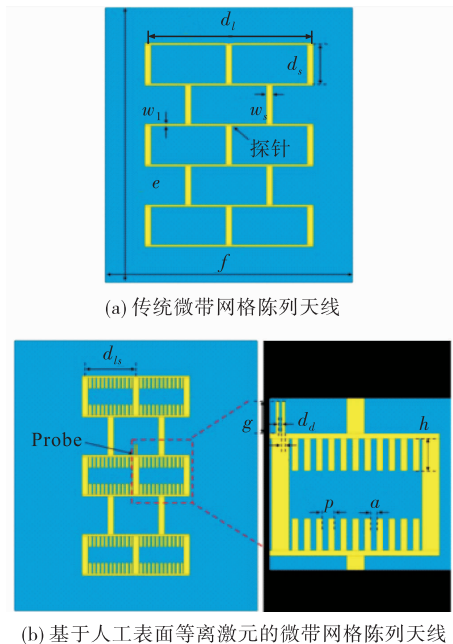


图 4 微带网格阵列天线对比图

可见,利用人工表面等离激元具有慢波特性和高相位常数,可以解决传统小型化天线过度依赖高介电常数材料的问题,在常规介质基板上实现具有宽带高辐射特性的小型化天线,在无线通讯系统中有巨大的应用前景。

2 基于人工表面等离激元的 RCS 抑制技术

雷达散射截面(RCS)是目标在雷达接收方向上反射雷达信号能力的度量。随着现代战争雷达攻防博弈的不断发展,在不影响天线辐射性能的前提下减小天线的 RCS 越来越受到人们的关注。降低天线 RCS 的方法主要有以下 4 种:

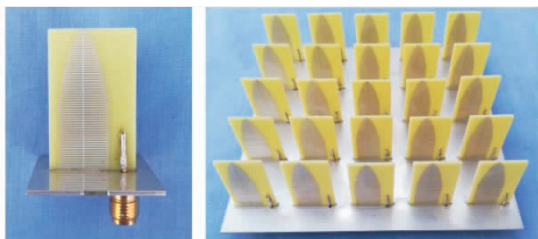
- 1)在天线的接地面放置特殊吸收器或者亚波长散射阵列^[56],用以产生强吸收,改变散射波的主瓣方向或极化状态。但是这种方法仅适用于接地面积大的天线。
- 2)将部分反射面放置在天线上方,可吸收入射波或改变散射波的极化,从而降低天线的 RCS^[57]。但这种天线只能作为发射天线使用,且带宽狭窄。
- 3)改变辐射源和接地面的形状,例如采用分形结构^[58]或几何成形方法^[59],通过去除表面电流较小的金属区域,降低金属部分的使用率,改变散射

场,从而降低 RCS。但是这种缺陷结构可能会影响天线与下层电路的隔离。

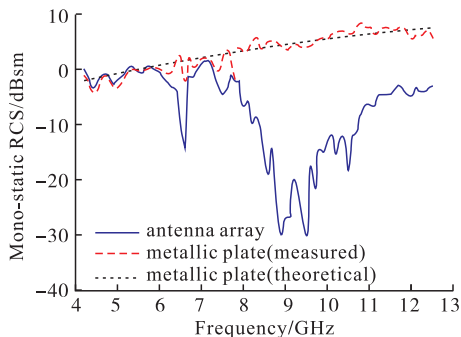
4)通过添加电阻或铁氧体磁性材料^[60]可降低天线的 RCS。但是此类损耗材料的引入会明显降低天线的效率。

当天线辐射器具有低带内损耗和高的带外吸收特性时,可作为带外吸收器使用。但如果工作频带和 RCS 减小频带非常接近,则要求材料处于吸收特性时候是强色散的。传统的雷达吸波材料虽然是色散的,但当天线的工作频带接近于吸波材料时,会在频带内产生大吸收特性^[61]。人工表面等离子激元的色散曲线位于光线下方,具有丰富的色散特性,存在线性的弱色散区,非线性的强色散区,可用于低 RCS 天线设计。

文献[61]提出了基于人工表面等离子激元模式色散特性的低 RCS 天线,天线结构如图 5(a)所示。天线由馈电单极子和垂直放置在金属地上的人工表面等离子激元导向结构组成。通过设计可以使人工表面等离子激元模式的截止频率接近馈电单极子的工作频率上限,从而使人工表面等离子激元结构同时充当带内辐射器和宽带带外吸收器。仿真结果如图 5(b)所示,和一个 5×5 的天线阵列的单元相比,在整个 X 波段(8.0~12.5 GHz)内,单元 RCS 降低 10 dB 以上,最大降低 30 dB 以上。该设计方法为低 RCS 天线提供了一种可行的替代方案。



(a) 天线原理图

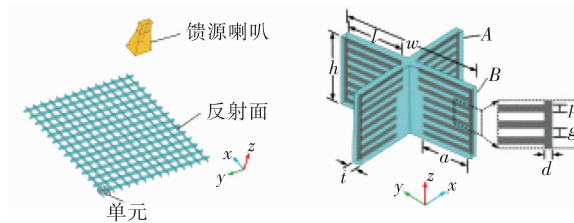


(b) 正入射下,天线的RCS减小的性能

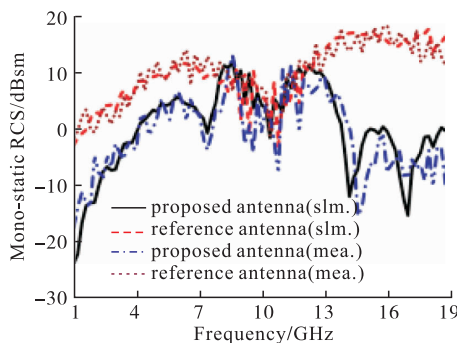
图 5 基于人工表面等离子激元的 RCS 天线

文献[62]介绍了一种网状低 RCS 反射阵列天线。如图 6(a)所示,天线由馈电喇叭和反射器组成。反射器可以在工作频带内将球面波转换为平面

波,并传输带外入射波,从而获得低 RCS 特性。仿真结果如图 6(b)所示,与参考天线相比,该天线在 1.0~8.5 GHz 和 12.0~19.0 GHz 频率范围内的 RCS 明显减小。



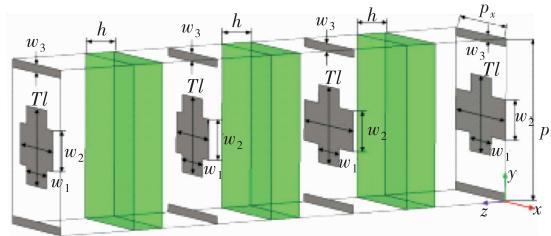
(a) 天线单元的原理图



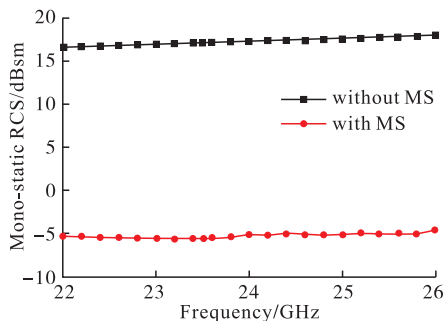
(b) 仿真和实测的x极化正入射波下的单元RCS结果

图 6 网状化 RCS 反射阵列天线

文献[63]提出一种利用人工表面等离子激元降低高增益辐射和 RCS 的各向异性超表面,可用于辐射和散射的独立波操纵。各向异性超表面由各向异性单元组成,如图 7 所示,可分别表现出 x 偏振和 y 偏振的反射模式和透射模式。通过改变单元的结构参数,可以实现宽范围内变化的 x 偏振反射相位和 y 偏振透射相位。通过与传统微带天线的集成,在 23.5 GHz 下获得了 8.84 dB 的高增益波束,并且在 22~26 GHz 范围内将 RCS 降低了 10 dB 以上。



(a) 单元透视图



(b) 正入射下天线的RCS减小的性能^[63]

图 7 基于人工表面的等离子激元的各向异性超表面

人工表面等离子激元用于频率选择结构中,可实现高性能传输和散射偏转功能,降低阻带内的RCS^[64-65]。文献[66]提出一种基于人工表面等离子激元模式的频选结构,利用金属鱼骨结构,可在截止频率以下实现基于人工表面等离子激元模式耦合的高效传输。

如图8(a)所示,在14.5~18.0GHz,设计了反射相位差在180°左右的2种不同的金属鱼骨结构。频选结构由具有0101/1010编码序列的1位编码超材料组成,每个编码元素由一个3×3排列的金属鱼骨结构组成。如图8(b)所示,和等尺寸金属板的理论RCS相比,在x极化波正入射下RCS减小的效果,可以看出RCS降低了10dB以上。与其他基于吸收材料的低RCS结构相比,基于人工表面等离子激元的频选结构的通带性能更好,过渡区更窄,且灵活性更高。

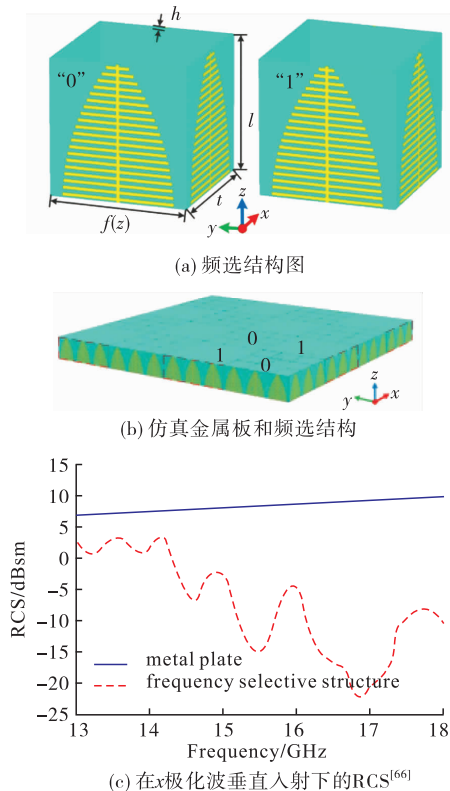


图8 基于人工表面等离子激元模式的频选结构

综上所述,由于人工表面等离子激元结构丰富的色散特性,可在不影响天线辐射性能的前提下减小天线的RCS,可广泛应用于隐身雷达系统的设计中。

3 基于人工表面等离子激元的波束重构技术

波束重构技术指的是波束随着天线工作条件改变而发生变化的技术。波束重构可以通过天线阵列或者附加机械转向结构来实现,但是分别存在系统

复杂昂贵及扫描速度慢等问题^[67-68]。人工表面等离子激元结构的特性随着尺寸的变化而变化,为设计结构紧凑、超宽带、广角的波束可重构天线提供一种新的可能方案。下面分别介绍基于人工表面等离子激元的频率扫描波束重构技术、模式切换波束重构技术、以及电控波束重构技术。

3.1 频率扫描波束重构

频率扫描天线是指天线主波束方向随着频率变化而变化的天线。传统的频率扫描天线实现方法有使用天线阵列周期结构的漏波天线,具有结构紧凑,制作简单等优点,但是带宽和波束扫描角还有很大的进步空间^[69]。

文献[70]提出了一种基于贴片阵列实现的频率扫描天线的方法,由具有梯度波纹槽和扩口地面的人工表面等离子激元结构馈电,最大扫描角度可达到83°。此外,学者们还提出基于人工表面等离子激元和透射相位梯度超表面的频率波束扫描天线的设计方法,但是该天线的工作带宽仍然很窄,结构也较为冗余^[71]。

前述方法受到尺寸,扫描角度和多层设计复杂等方面的限制,文献[69]提出了一种平面人工表面等离子激元结构天线,可实现高阶模态的广角频率波束扫描天线,可用于平面集成通信系统。该天线采用在标准50Ω共面波导中线上蚀刻的孔阵列来产生人工表面等离子激元模式,并利用其高阶模式辐射电磁波。同时,为了提高天线的阻抗匹配性,提出了一种正弦孔设计,如图9所示。波束扫描可以在11.7~50GHz的宽带范围内工作,扫描范围可达129°,平均增益水平为10.92dBi。

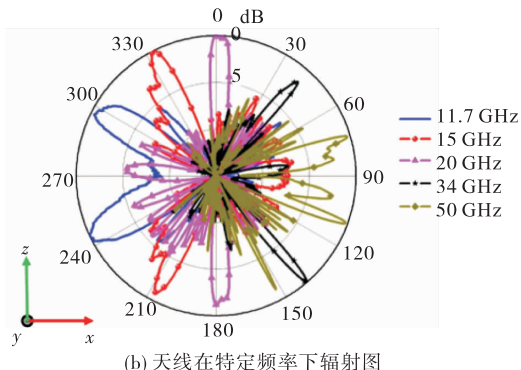
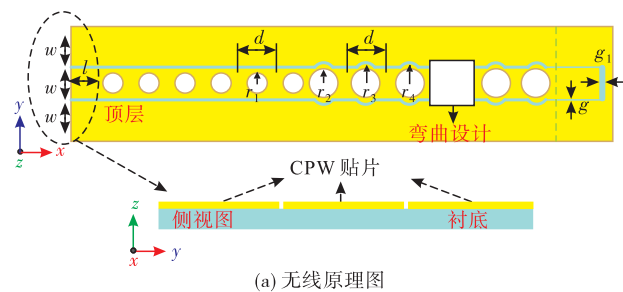
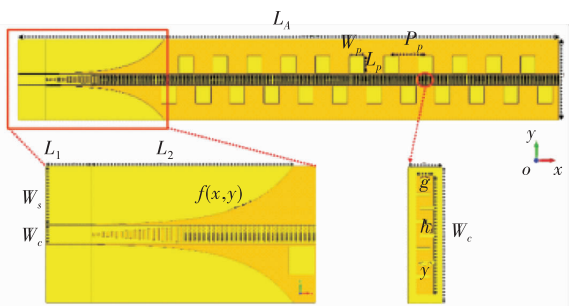
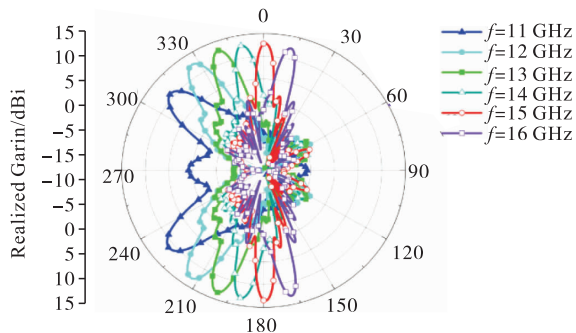


图9 人工表面等离子激元结构天线

文献[72]介绍了一种基于人工表面等离激元的广角扫描增益一致的宽带漏波天线,如图 10 所示。通过在单元结构中引入叉指金属条,可以在相同的截止频率下实现更小的传输线宽度,利用人工表面等离激元模式的慢波特性和有效拓宽漏波天线的光束扫描范围。在 11~16 GHz(37%)的带宽内,测量波束范围为 $-54^\circ \sim +6^\circ$,在火控雷达、成像雷达等应用中具有一定的实用价值。



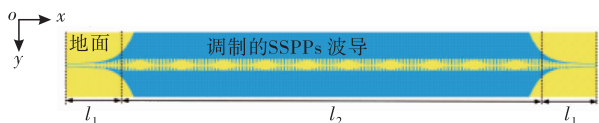
(a) 天线原理图



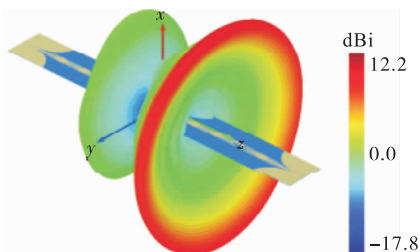
(b) 天线在特定频率下辐射图

图 10 宽带漏波天线

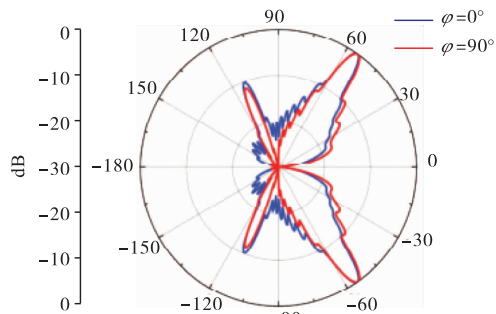
文献[73]介绍了一种基于人工表面等离激元的周期性调制的方位面上全向天线,可在俯仰面上实现频率扫描的波束重构,如图 11 所示。天线在 9.3 GHz 上与 z 轴成 55° 角辐射,方向性系数为 12.2 dBi,见图 11(b)。在俯仰面上,当频率从 8.4 GHz 改变到 10.2 GHz 时,波束改变范围从 $67.7^\circ \sim 35.6^\circ$,见图 11(c)。



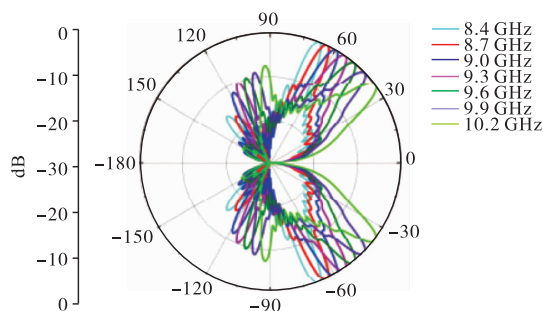
(a) 无线原理图



(b) 天线三维辐射图



(c) 归一化二维辐射方向图



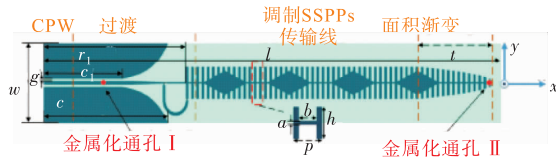
(d) 天线波束变化

图 11 基于人工表面等离激元的调制方位面上的全向天线

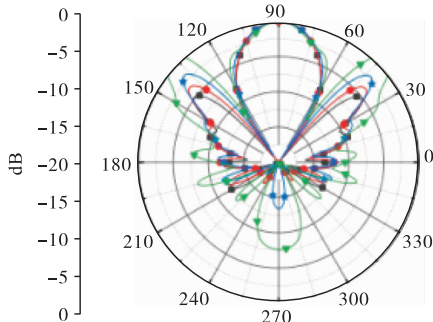
3.2 模式切换波束重构

人工表面等离激元传输线中支持奇模和偶模两种基础模式的传播,通过特殊设计的结构,可实现人工表面等离激元奇偶模切换,为宽角度波束重构天线提供一种新思路。

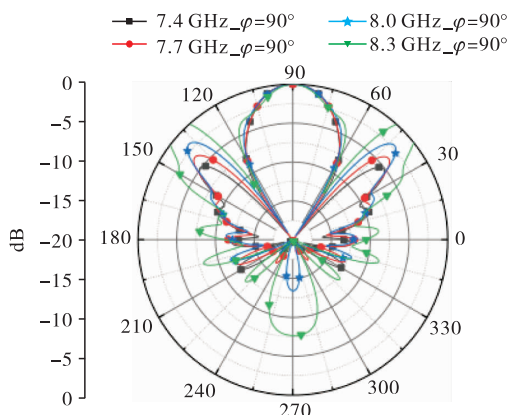
基于此原理,文献[74]提出了一种基于人工表面等离激元模式切换的波束重构天线,如图 12 所示。在天线中引入了 3 个 PIN 二极管控制的可重构电路,通过加载正向或反向偏置电压,该天线可以在人工表面等离激元传输线上激励奇偶模,实现传输模式转换,进而实现奇模的端射辐射波束和偶模的横向扫描波束。



(a) 模式切换天线原理图



(b) 端射辐射图



(c) 侧射辐射图

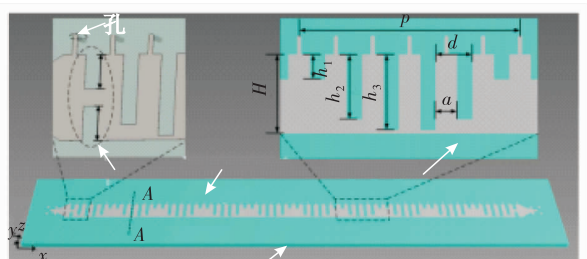
图 12 波束重构天线

天线在 7.37~8.33 GHz 范围内,端口 1 和 2 都具有 12.23% 的阻抗带宽,且两端口之间的隔离度为 24.9 dB,通过切换天线的工作状态,该天线可以在 4.85 GHz 下实现近 84°波束切换,是 WLAN 和卫星通信应用的理想候选天线。但是此结构频带较窄,可以通过多端口的波导馈电加以改进,实现宽频带的可重构天线。

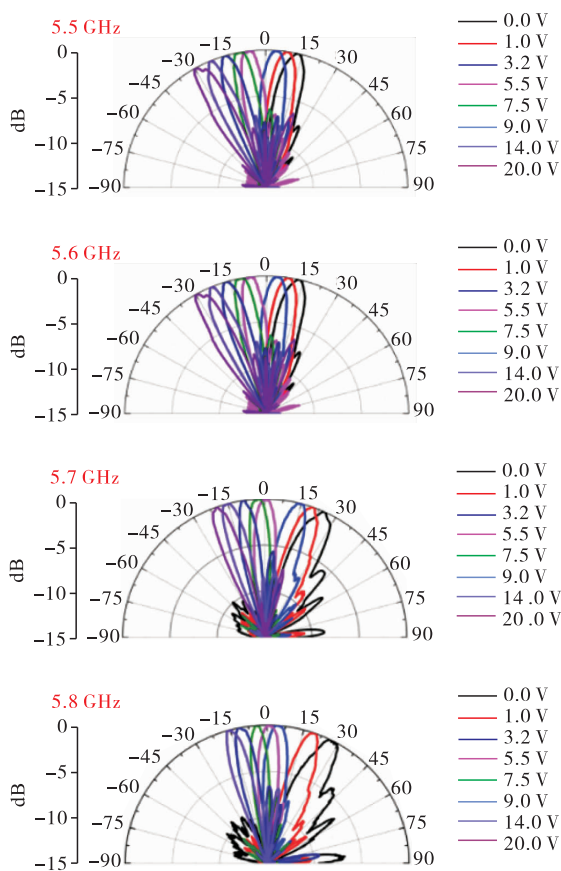
3.3 电控波束重构

在实际应用中,定频波束重构天线一直是一个重要的研究热点。一维法布里-珀罗漏波天线通过使用可调谐高阻抗表面^[75-76]可实现定频波束扫描,但是扫描角度范围较小,只有 21°左右。

人工表面等离子激元和变容管的组合可以实现对天线表面阻抗的调控,进而实现定频下的天线波束可重构。文献[77]提出一种电控基于人工表面等离子激元的固定频率波束扫描的漏波天线,如图 13 所示。通过改变人工表面等离子激元结构沟槽深度对表面阻抗进行周期性调制,导波可转换为具有频率扫描特性的漏波辐射。此外,通过直流偏置电压改变变容二极管的电容,可以重新调制天线的表面阻抗,从而使辐射光束以固定频率在大角度范围内转向。仿真实测结果表明,改变直流偏置电压 0~20 V,可以控制辐射波束在 5.5~5.8 GHz 的频率范围内连续转向,扫描角可达 45°。



(a) 天线原理图



(b) 不同偏压时的远场辐射方向图

图 13 定频波束扫描漏波天线

文献[78]提出一种基于人工表面等离子激元的双频固定频率波束扫描漏波天线,如图 14 所示。由电容器和变容二极管交替放置的均匀波纹状微带线,其单元在 2 个不同的频带上支持 2 种模式。在每个频带中,改变变容管的偏置电压可以实现对微带的表面特性阻抗的调控,以实现波束的调控。在 4.25 GHz 和 5.75 GHz 下,通过改变偏置电压从 0~10 V,天线可调节的波束角度范围为 80°和 22°。该天线具有低成本、低剖面、双频和多功能固定频率扫描等优点,在雷达和卫星通信系统中具有潜在的应用前景。

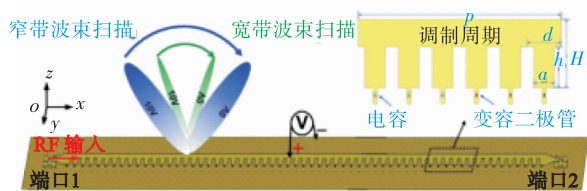


图 14 电控双频波束可重构天线原理图^[78]

总的来说,得益于人工表面等离子激元结构的慢波特性,可以为设计结构紧凑、超宽带、广角的波束扫描天线提供新的可能方案。由于人工表面等离子激元传输奇偶模呈现的不同辐射特性,可外加控制电路实现波束切换的功能。此外,人工表面等离子激元结构和变容管结合,可实现大扫描范围的定频波束扫描。

4 结语

针对传统天线的一些痛点问题,例如小型化天线对材料过度依赖、高性能辐射和低 RCS 特性不可兼得、天线波束可重构方式少且范围小等问题,本文详细介绍了几种具有代表性的人工表面等离子激元天线赋能技术,包括基于人工表面等离子激元的天线小型化技术、RCS 抑制技术以及波束重构技术。由此可见,人工表面等离子激元高相位常数特性可在常规材料上实现具有宽带高辐射特性的天线,其灵活的色散特性可在不影响天线辐射性能的前提下减小天线的 RCS。此外,人工表面等离子激元的引入可以为实现结构紧凑,超宽带,广角的扫频或定频波束可重构天线提供新的可能方案。事实上,除本文着重介绍的 3 种天线赋能技术外,人工表面等离子激元独特而丰富的物理特性还可为天线赋予更多维度的新能力,从深度与广度上进一步扩展天线的应用范围。

同时也需要认识到,基于人工表面等离子激元的天线赋能技术目前仍处于初级阶段,尚存在包括以下方面在内的问题:①人工表面等离子激元天线赋能技术的定量分析理论尚未成熟,其设计过程较多地依赖仿真软件;②结构较为复杂,设计过程较为繁琐,不便于科研与工程人员学习与应用;③人工表面等离子激元技术在复杂甚至极端情境下工作的相关资料及数据不足,其在天线赋能方面的实用效果尚未被广泛证明。

参考文献

- [1] SINGH G, SINGH U. Triple Band-Notched UWB Antenna Design Using a Novel Hybrid Optimization Technique Based on DE and NMR Algorithms [J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 184: 115299.
- [2] DANIE R S. A CPW-Fed Rectangular Nested Loop Antenna for Penta Band Wireless Applications [J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2021, 139(4): 153891.
- [3] AMIT K S, MAHESH P A, SHIBAN K K. *Metamaterials for Antenna Applications* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2021.
- [4] PENG S, ZHANG A, WU W, et al. Plasma Simulation and Optimization for a Miniaturized Antenna ECR Ion Source [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section a Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, 2021, 1011(19): 165586.
- [5] 孙雷,韩峰. 便携式 ULF/VLF 机械通信天线技术的研究进展[J]. *电讯技术*, 2021, 61(3): 384-390.
- [6] 孙英,刘乃源,余臻伟,等. 基于 NFC 的可穿戴传感器中柔性/可拉伸天线的研究进展[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(12): 122-137.
- [7] 张浩驰,何沛航,牛凌云,等. 人工表面等离子激元超材料[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 372-391.
- [8] 汤文轩,张浩驰,崔铁军. 人工表面等离子激元及其在微波频段的应用[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(1): 231-239.
- [9] HE P H, FAN Y, ZHANG H C, et al. Characteristic Impedance Extraction of Spoof Surface Plasmon Polariton Waveguides [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54: 385102.
- [10] GAO X X, ZHANG H C, HE P H, et al. Crosstalk Suppression Based on Mode Mismatch between Spoof SPP Transmission Line and Microstrip [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2019, 9(11): 2267-2275.
- [11] ZHANG H C, HE P H, LIU Z X, et al. Dispersion Analysis of Deep-Subwavelength-Decorated Metallic Surface Using Field-Network Joint Solution[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(6): 2923-2933.
- [12] ZHANG H C, HE P H, GAO X X, et al. Loss Analysis of Plasmonic Metasurfaces Using Field-Network-Joint Method [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(5): 3521-3526.
- [13] ZHOU Y J, ZHANG C, YANG L, et al. Electronically Switchable and Tunable Bandpass Filters Based on Spoof Localized Surface Plasmons [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(7): D9-D12.
- [14] HE P H, ZHANG H C, TANG W X, et al. A Multi-Layer Spoof Surface Plasmon Polariton Waveguide with Corrugated Ground [J]. *IEEE Access*, 2017(5): 25311.
- [15] ZHANG H C, LIU L, HE P H, et al. A Wide-Angle Broadband Converter: From Odd-Mode Spoof Surface Plasmon Polaritons to Spatial Waves [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(12): 7425-7432.
- [16] 权家琪,圣宗强,吴宏伟. 基于人工表面等离子激元结构的全向隐身[J]. *物理学报*, 2019, 68(15): 212-218.
- [17] 蔺炜. 全向及定向圆极化天线的小型化研究[J]. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2019, 11(1): 1-7.
- [18] MA H F, SHEN X, QIANG C, et al. Broadband and High-Efficiency Conversion from Guided Waves to Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. *Laser and Photonics Reviews*, 2014, 8(1): 146-151.
- [19] XU J J, ZHANG H C, ZHANG Q, et al. Efficient

- Conversion of Surface-Plasmon-Like Modes to Spatial Radiated Modes [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(2): 021102.
- [20] YIN J Y, CUI T J. 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.
- [21] 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: 29600.
- [22] KANDWAL A, ZHANG Q, TANG X L, et al. Low-Profile Spoof Surface Plasmon Polaritons Traveling-Wave Antenna for Endfire Radiation [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 17(2): 185-187.
- [23] HAO Z, ZHANG J, ZHAO L. A Compact Leaky-Wave Antenna Using a Planar Spoof Surface Plasmon Polariton Structure [J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2019, 29(5): 1-7.
- [24] LIU X, ZHU L, WU Q, et al. Highly-Confined and Low-Loss Spoof Surface Plasmon Polaritons Structure with Periodic Loading of Trapezoidal Grooves [J]. *AIP Advances*, 2015, 5(7): 077123.
- [25] LIU J F, ZHANG H C, TANG W X, et al. High Performance Transmission Lines Using the Spoof Surface Plasmon Polaritons [C]// *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and Thz Applications*. Chengdu, China; IEEE, 2016.
- [26] XIE Z P, SUN L G, WU F, et al. Applying Spoof Surface Plasmons to Non-Destructive Testing [C]// *2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*. Chongqing, China; IEEE, 2018: 330-334.
- [27] HAN Y J, LI Y F, MA H, et al. Multibeam Antennas Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons Mode Coupling [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(3): 1187-1192.
- [28] KIANINEJAD A, CHEN Z N, QIU C W. A Single-Layered Spoof-Plasmon-Mode Leaky Wave Antenna with Consistent Gain [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(2): 681-687.
- [29] KIANINEJAD A, CHEN Z N, ZHANG L, et al. Spoof Plasmon-Based Slow-Wave Excitation of Dielectric Resonator Antennas [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(6): 2094-2099.
- [30] XU J J, YIN J Y, ZHANG H C, et al. Compact Feeding Network for Array Radiations of Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 22692.
- [31] 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.
- [32] YIN J Y, REN J, ZHANG H C, et al. Broadband Frequency-Selective Spoof Surface Plasmon Polaritons on Ultrathin Metallic Structure [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8165.
- [33] YIN J Y, CUI T J. Frequency-Controlled Beam Scanning Array Fed by Spoof Surface Plasmon Polaritons [C]// *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting*. San Diego, CA; IEEE, 2017.
- [34] YIN J Y, BAO D, REN J, et al. Endfire Radiations of Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 597-600.
- [35] YIN J Y, CUI T J. Leaky Wave Antennas Based on Spoof SPP Along Metallic Wire with Gradient Radial Grooves [C]// *Progress in Electromagnetic Research Symposium*. Shanghai, China; IEEE, 2016.
- [36] KONG G S, WANG M, MA H F. Low Sidelobe Leaky-Wave Antenna Based on Spoof Plasmonic Waveguide [C]// *2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*. Shanghai, China; IEEE, 2016.
- [37] WANG M, MA H F, TANG W X, et al. Leaky-Wave Radiations with Arbitrarily Customizable Polarizations Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12: 014036.
- [38] WANG M, WANG H C, TIAN S C, et al. Spatial Multi-Polarized Leaky-Wave Antenna Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(12): 8168-8173.
- [39] ZHU D W, ZENG R M, TANG Z T, et al. Design of Multiband Filter Based on Spoof Surface Plasmon Polariton [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2020, 57(17): 172401.
- [40] ZHANG H C, HE P H, GAO X X, et al. Pass-Band Reconfigurable Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2018, 30: 134004.
- [41] FENG W J, CHE W Q. Wideband Filtering Power Dividers Using Single and Double-Layer Periodic Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2019, 29: e21706.
- [42] ZHANG H C, LIU S, SHEN X P, et al. Broadband Amplification of Spoof Surface Plasmon Polaritons at

- Microwave Frequencies [J]. *Laser and Photonics Reviews*, 2014, 9(1): 89-90.
- [43] GAO X X, ZHANG H C, WU L W, et al. Programmable Multifunctional Device Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(5): 3770-3779.
- [44] ZHANG H C, CUI T J, ZHANG Q, et al. Breaking the Challenge of Signal Integrity Using Time-Domain Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. *ACS Photonics*, 2015, 2: 1433-1340.
- [45] ZHANG H C, ZHANG Q, LIU J F, et al. Smaller-Loss Planar SPP Transmission Line than Conventional Microstrip in Microwave Frequencies [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23396.
- [46] ZHANG H C, TANG W X, XU J, et al. Reduction of Shielding-Box Volume Using SPP-Like Transmission Lines [J]. *IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology*, 2017, 7(9): 1486-1492.
- [47] HE P H, ZHANG H C, TANG W X, et al. Shielding Spoof Surface Plasmon Polariton Transmission Lines Using Dielectric Box [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2018, 28(12): 1077-1079.
- [48] GAUTHIER G P, COURTAY A, REBEIZ G M. Microstrip Antennas on Synthesized Low Dielectric-Constant Substrates [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1997, 45(8): 1310-1314.
- [49] WANG Z D, ZENG Y, WU J J, et al. A Miniaturized CPW-Fed Antipodal Vivaldi Antenna with Enhanced Radiation Performance for Wideband Applications [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 15: 16-19.
- [50] YANG M, CHEN Z N, LAU P Y, et al. Miniaturized Patch Antenna with Grounded Strips [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(2): 843-848.
- [51] BONG F L, LIM E H. Miniaturized Dipolar Patch Antenna with Narrow Meandered Slotline for UHF Tag [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(9): 4435-4442.
- [52] LU J Y, ZHANG H C, HE P H, et al. Design of Miniaturized Antenna Using Corrugated Microstrip [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(3): 1918-1924.
- [53] LU J Y, ZHANG H C, WEI C, et al. Design of Compact Circularly Polarized Antenna Using Sunshine-Shaped Slotted Patch [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(9): 6800-6805.
- [54] YANG Y, LI Z, WEI B, et al. A Compact Quasi-Yagi Antenna Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons [C]// 2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). Hangzhou, China: IEEE, 2018.
- [55] ZHAO B, TANG M, SHAO Z, et al. Miniaturization of Grid Array Antenna Using Spoof Surface Plasmon Polaritons [C]// 2020 Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference (CSR-SWTC). 2020.
- [56] WANG J, QU S, YANG Y, et al. Multiband Left-Handed Metamaterials [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(1): 2075.
- [57] CHENG H, PAN W, MA X, et al. A Frequency Reconfigurable Directive Antenna with Wideband Low-RCS Property [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(3): 1173-1178.
- [58] THAKARE Y B, RAJKUMAR. Design of Fractal Patch Antenna for Size and Radar Cross-Section Reduction [J]. *IET Microwaves Antennas and Propagation*, 2010, 4(2): 175-181.
- [59] DIKMEN C M, CIMEN S, CAKIR G. Planar Octagonal-Shaped UWB Antenna with Reduced Radar Cross Section [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(6): 2946-2953.
- [60] POZAR D M. RCS Reduction for a Microstrip Antenna Using a Normally Biased Ferrite Substrate [J]. *Microwave and Guided Wave Letters IEEE*, 1992, 2(5): 196-198.
- [61] HAN Y, WANG J, GONG S, et al. Low RCS Antennas Based on Dispersion Engineering of Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(12): 7111-7116.
- [62] JIANG P, JIANG W, GONG S. A Mesh-Type Low RCS Reflectarray Antenna Based on Spoof Surface Plasmon Polariton [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 20(2): 224-228.
- [63] LV Y H, WANG R, DING X, et al. Anisotropic Metasurface for High-Gain Radiation and Low RCS by Spoof Surface Plasmon Polariton [C]// 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting. [S.l.]; IEEE, 2020.
- [64] LI Y, HUA M, WANG J, et al. High-Efficiency Tri-Band Quasi-Continuous Phase Gradient Metamaterials Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 40727.
- [65] JIE Y, WANG J, LI Y, et al. Broadband Planar Achromatic Anomalous Reflector Based on Dispersion Engineering of Spoof Surface Plasmon Polariton [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(21): 333.

- [66] WANG C, LI Y, FENG M, et al. Frequency-Selective Structure with Transmission and Scattering Deflection Based on Spoof Surface Plasmon Polariton Modes [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(10): 6508-6514.
- [67] MANSUTTI G, CARLO P D, HANNAN M A, et al. Modeling and Design of a Plasma-Based Transmit-Array with Beam Scanning Capabilities [J]. *Results in Physics*, 2020, 16: 102923.
- [68] ZHANG Z, HUNG L Y, BOOSKE J H, et al. X-Band, Mechanically-Beam-Steerable Lens Antenna Exploiting the Risley Prism Concept [J]. *The Institution of Engineering and Technology Microwaves Antennas and Propagation*, 2020, 14(14): 1902-1908.
- [69] WANG J, ZHAO L, ZHANG H 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.
- [70] ZHANG Q L, ZHANG Q, CHEN Y. Spoof Surface Plasmon Polariton Leaky-Wave Antennas Using Periodically Loaded Patches above PEC and AMC Ground Planes [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 3014-3017.
- [71] LIAO D S, ZHANG Y F, WANG H G. Wide-Angle Frequency-Controlled Beam-Scanning Antenna Fed by Standing Wave Based on the Cutoff Characteristics of Spoof Surface Plasmon Polaritons [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(7): 1238-1241.
- [72] ZHU A Q, LIAO X, WANG B, et al. Compact Spoof Surface Plasmon Polariton Leaky-Wave Antenna with Consistent Gain [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021, 63(6): 2430-2435.
- [73] KONG G S, MA H F. Omnidirectional Antenna Based on Modulated Spoof Surface Plasmon Polaritons Waveguide [C]// 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). Nanjing, China: IEEE, 2016.
- [74] ZHUANG K J, GENG J P, WANG K, et al. Pattern Reconfigurable Antenna Applying Spoof Surface Plasmon Polaritons for Wide Angle Beam Steering [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 15444-15451.
- [75] GUZMAN-QUIROS R, GOMEZ-TORNERO J L, WEILY A R, et al. Electronically Steerable 1-D Fabry-Perot Leaky-Wave Antenna Employing a Tunable High Impedance Surface [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(11): 5046-5055.
- [76] CHE B J, MENG F Y, LIU Y L, et al. Reconfigurable Dual-Band Metamaterial Antenna Based on Liquid Crystals [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, 51: 185102.
- [77] 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.
- [78] WANG M, MA H F, TANG W X, et al. A Dual-Band Electronic-Scanning Leaky-Wave Antenna Based on a Corrugated Microstrip Line [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 66(5): 3433-3438.

(编辑:徐楠楠)