

基于人工表面等离子体激元的毫米波高扫描率四波束漏波天线

彭臻¹, 翟国华^{1*}, 黄代鑫¹, 任继山², 高建军¹

(1. 华东师范大学通信与电子工程学院, 上海 200000;
2. 上海航天研究院第八设计部, 上海 201109)

摘要:为灵活控制波束以增强多目标探测和跟踪功能, 研制了基于人工表面等离子体激元(SSPP)的毫米波四波束高扫描率漏波天线(LWA)。根据正弦电抗调制叠加理论, 对基片集成波导(SIW)槽缝形成的SSPP结构进行多周期性叠加调控, 实现四波束扫描LWA。为改善天线的法向辐射性能, 在SIW下表面周期性开槽, 消除LWA的阻带效应。对设计的LWA进行加工和测试, 结果表明在29 GHz~30.2 GHz的频带内, 该天线的四个波束能从-52°连续扫描到+22°, 扫描率达到18%/BW, 节约了频谱资源, 并提高了多目标探测效率。

关键词:多波束; 人工表面等离子体激元(SSPP); 漏波天线; 毫米波天线
中图分类号: TN822+.6; TN814+.5 **文献标识码:** A

Millimeter wave high scanning rate quad-beam leaky wave antenna based on spoof surface plasmon polaritons (SSPP)

PENG Zhen¹, ZHAI Guo-Hua^{1*}, HUANG Dai-Xin¹, REN Ji-Shan², GAO Jian-Jun¹

(1. School of Physics and Electronic Science, East China Normal University, Shanghai 200000, China;
2. 8th Institute of Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to enhance the multi-object detecting and tracking capability, a four-beam millimeter wave frequency scanning leaky wave antenna (LWA) based on spoof surface plasmon polaritons (SSPP) has been proposed. According to the theory of sinusoidally modulated reactance superposing surface (SMRSS), Quad-beam LWA is realized by etching periodical slots on the top surface of substrate integrated waveguide (SIW), and uniform slots etched on the bottom layer is used to eliminate the open-stopband effect. The measurement shows that the four beams can scan from -52° to 22° within the frequency band from 29 GHz to 30.2 GHz, achieving a total of 74° scanning range, and the beam scanning is up to 18%/BW, which not only saves the spectrum source but improves the multi-target detection efficiency.

Key words: multi-beam, spoof surface plasmon polariton (SSPP), leaky wave antenna, millimeter wave antenna

引言

相对于机械扫描和相控阵扫描天线, 基于频率扫描的漏波天线(Leaky Wave Antenna, LWA)可以通过改变馈电频率来实现天线波束的定向辐射与扫描^[1], 具有成本低、定向性高和馈电简单等优点, 因此可以应用于雷达探测、卫星导航和无线移动通信等领域。

周期性LWA中的主模工作在慢波模式($k > k_0$, k_0 是自由空间波数), 在周期性调制激发无限次谐波的情况下, 位于快波区间的谐波可以向外辐射能量($|k_n| < k_0$, k_n 是 n 次谐波波数), 以实现周期性LWA的前向和后向扫描^[2]。表面等离子体激元(Surface Plasmon Polaritons, SPP)是一种电磁波和金属中的自由电子发生相互作用, 从而使电磁波被紧密束缚

收稿日期: 2022-08-06, 修回日期: 2022-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(62034003)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (62034003)

作者简介(Biography): 彭臻(1999-), 男, 贵州贵阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为平面集成天线设计, E-mail: zhenpeng98312@163.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: ghzhai@ee.ecnu.edu.cn

Received date: 2022-08-06, revised date: 2022-12-28

在金属表面的现象。SPP结构能使电磁波沿着金属表面传播,具有慢波色散特性($k > k_0$)。2014年, Ma等人提出一种在金属条上刻槽的结构,实现了微波频段的人工表面等离子体激元(SpooF SPP, SSPP)传输线^[3]。2016年, Kong等人基于刻槽金属条的SSPP结构,采用正弦调制电抗表面技术设计了一款LWA^[4]。其通过控制SSPP单元的槽缝长度来调控表面电抗,从而实现漏波辐射,在8.4~9.9 GHz的频带内,实现从 -10° 到 $+8^\circ$ 的扫描。2019年, Xu等人通过在基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)上刻蚀正弦调制的槽缝^[5],利用负一次谐波辐射产生定向辐射,并通过在SIW下表面开槽,有效地抑制了阻带效应,实现了在10.6~12.0 GHz频带内,从 -63° 到 $+56^\circ$ 的单波束扫描^[7]。

相对于单波束扫描天线,多波束扫描天线能够进行多个波束的同时扫描,通过灵活控制波束,可以拓展无线通信的空间信道,实现多目标探测与跟踪^[6-7]。文献[6]首次报道了四波束LWA结构,但是该结构是由多个漏波天线组合而成,需要多个端口馈电。本文设计了一款具有法向辐射和连续扫描功能的高扫描率四波束频率扫描LWA。该天线基于SIW-SSPP结构,利用正弦调制电抗叠加表面理论在波导金属上表面进行周期性开槽,激发电磁波的负一次谐波,同时SIW的金属下表面槽缝与上表面的缝隙错位分布以消除阻带效应,最终实现连续扫描的四波束LWA。为有效表征多波束LWA的扫描特性,定义多波束扫描率(ΔR)为总扫描角度($\Delta\theta$)除以相对工作带宽($BW\%$)($\Delta R = \Delta\theta / BW\%$)。该多波束天线具有连续扫描和高扫描率优点。

1 设计原理

1.1 正弦调制电抗表面理论

图1所示为周期漏波天线的工作原理图。当波导表面电抗以正弦条件调制时,能激发高次谐波以实现漏波辐射特性^[8-9]。当表面波沿 z 方向传播时,正弦调制表面电抗为:

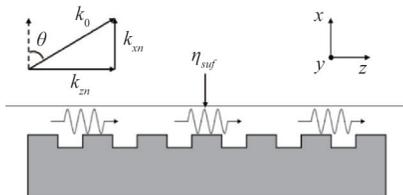


图1 电磁波沿波导表面传输模型

Fig. 1 The wave propagation along waveguide surface

$$\eta_{surf}(z) = jX_s [1 + M \cos(\frac{2\pi}{d}z)] \quad (1)$$

其中, X_s 为平均表面电抗, M 为调制因子, d 为调制周期。此时电磁波所激发出来的高次谐波满足下式

$$k_{zn} = k_{z0} + \frac{2\pi n}{d} \quad (2)$$

其中, k_{z0} 是基波波数, k_{zn} 为第 n 次谐波的波数。令 $X'_s = \frac{X_s}{\eta_0}$, X'_s 为归一化平均表面电抗。根据式(1),可以推导出表面波数的色散关系^[9]。当调制因子 M 等于0时,简化色散关系式而得到表面波波数与平均表面电抗之间的关系为:

$$k_{z0} = k_0 \sqrt{1 + (X'_s)^2} \quad (3)$$

当波导激发的高次谐波位于快波区间,即表面波数 k_{zn} 小于自由空间中的波数 k_0 时,电磁波向外辐射的角度 θ 满足:

$$\sin \theta = \frac{k_{zn} + \frac{2\pi n}{d}}{k_0} = \frac{k_{z-1}}{k_0} (n = -1) \quad (4)$$

根据式(4)可知,天线的辐射波束角度随工作波数变化而变化,实现了频率扫描功能。同时同一频点处,不同的调制周期 d 也能够使天线实现不同的辐射波束指向。同时, k_{z-1} 的变化范围越大,扫描 θ 越大。但是随着负一次谐波在正向扫描角度逐渐增大时,负二次谐波也会开始从后向辐射^[10],导致正向辐射的波束衰减很大。因此天线的辐射范围会受到限制。

1.2 四波束电抗调制理论

当波导表面为多个具有不同调制周期的正弦电抗分布叠加时,天线能够实现多波束辐射。根据式(1),当表面电抗由4个不同调制周期的正弦电抗叠加时,即可产生四波束的辐射,叠加后的表面电抗为

$$\begin{aligned} \eta_{surf}(z) = & j\alpha_1 X_s [1 + M \cos(\frac{2\pi}{d_1}z)] \\ & + j\alpha_2 X_s [1 + M \cos(\frac{2\pi}{d_2}z)] \\ & + j\alpha_3 X_s [1 + M \cos(\frac{2\pi}{d_3}z)] \\ & + j\alpha_4 X_s [1 + M \cos(\frac{2\pi}{d_4}z)] \end{aligned} \quad (5)$$

其中, α_i 为表面电抗调制系数,可以通过调整 α_i 值来控制天线分配在各个波束的辐射能量,以此调控每个波束的增益大小,但实际每个波束之间会有相互的影响,使得四个波束的增益会有差别。此外,当天线的波束靠近法向时,由于阻带效应没有被完全

抑制,此时波束的增益会降低,导致四个波束的幅度不能完全一致。如果要使四个波束增益接近,需要采用优化算法对调制因子 M 、电抗调制系数 α_i 和调制周期 d_i 进行调控优化。本文采用 $\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=\alpha_4=0.25$ 。

2 天线结构与与设计

SIW 集合了微带线和金属波导的优点,可以通过 PCB 工艺加工实现,具有低剖面、低损耗、低成本和易于集成等优点^[10-11]。本文通过在 SIW 的上下表面刻蚀槽缝形成 SSPP 特性,并采用多周期性叠加正弦调制电抗表面,实现多波束漏波天线。

2.1 单元结构

图 2 所示为设计的 SSPP 单元结构,该结构通过在 SIW 的上层金属表面刻蚀横向槽缝构建而成。介质基板采用 Rogers RO4003C 板材,其介电常数为 3.55,损耗角正切为 0.002 7,厚度 $t=0.813$ mm。槽缝长为 b ,宽为 a ,单元周期为 p 。首先借助全波电磁仿真软件 Ansys-HFSS 的本征模求解器获取所设计 SSPP 单元的色散特性,结果如图 3 所示。其中黑线为电磁波在真空的色散曲线,虚线为单元不同长度槽缝对应的色散曲线。可以看到,单元的色散曲线始终位于光线右侧,因此表面单元呈现了慢波色散特性($k>k_0$)。此外,随着槽缝长度的增加,单元色散曲线的截止频率向低频移动,即在同一频点处,不同槽缝长度对应不同的表面波数 k 。因此,可以通过改变 b 来调控单元的电抗特性。

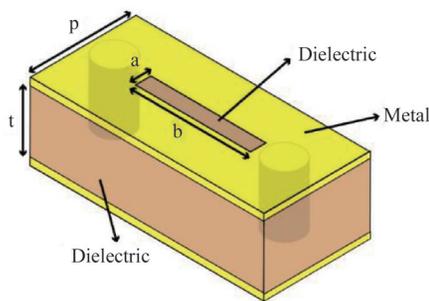


图 2 正弦电抗调制单元结构

Fig. 2 Sinusoidal impedance modulation unit structure

2.2 天线结构设计

本文的设计目标是工作频率在 30 GHz 处,辐射角分别 -45° 、 -30° 、 -15° 和 0° 的四波束漏波天线。具体的设计流程如下:

1) 在 30 GHz 处,当波束 1 的辐射角度为 $\theta_1=-30^\circ$ 时,选择调制周期 $d_1=3.2$ mm. 因此根据式(4)

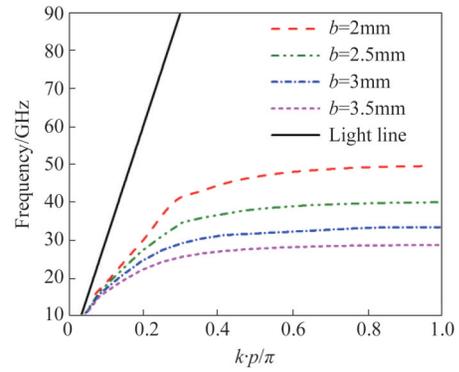


图 3 单元结构电磁仿真色散图

Fig. 3 Dispersion diagram of the proposed SSPP unit

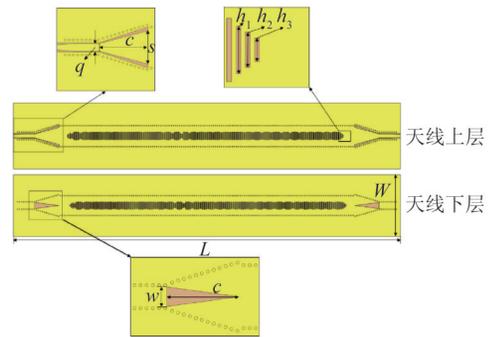


图 4 天线上下层结构图

Fig. 4 The antenna structure

和式(3)计算得到 $k_{z0}=1650$, $X_s=2.43$;

2) 根据式(4),当其他波束的角度 $\theta_2=-45^\circ$, $\theta_3=-15^\circ$, $\theta_4=0^\circ$ 时,对应的调制周期分别为 $d_2=3.01$ mm, $d_3=3.47$ mm, $d_4=3.81$ mm;

3) 考虑到波数与表面电抗的近似关系,取调制因子 $M=0.4$;

4) 根据式(5)得到了四波束的表面电抗分布;

5) 根据表面电抗与槽长度 b 的关系,获取天线表面槽的分布。

图 4 为天线的结构示意图,尺寸为 113.2×25 mm,介质厚度为 1.5 mm。图 4(a)为天线正面结构示意图,左右两端为天线的馈电结构。馈电部分采用共面波导 CPW 馈电,在 CPW 与 SIW 的连接处,采用了梯形渐变微带线实现 50Ω 微带馈线与 SIW 之间的阻抗匹配^[9-10]。梯形结构的高 $c=10$ mm,梯形上底为 $q=1.5$ mm,下底 $s=6.5$ mm。在馈电区域的底部,设置有等腰三角形槽缝,底 $w_1=2.5$ mm,高 $c=10$ mm。此外,在梯形渐变微带线四周布置了金属通孔以减小 CPW 与 SIW 过渡段的损耗。电抗调制的槽缝两边各设有三个渐变槽,长度依次为 $h_1=0.5$ mm、 $h_2=0.75$ mm、 $h_3=1.0$ mm,以实现 SIW 电磁

波模式向 SSPP 模式的逐渐转换。天线中间部分为 265 个槽缝,其长度根据四波束的正弦调制电抗表面分布得到。图 4(b)为天线底部结构。为了抑制漏波天线的阻带效应,在底部也刻蚀与顶部相同长度的槽缝。并且将底部和顶部槽缝沿传播方向错开 $\Delta l = 1.2 \text{ mm}$ 的距离,实现了非对称的结构以消除阻带效应。

3 仿真测试结果分析

3.1 天线 S 参数

根据四波束的设计原理,首先对天线进行全波仿真及优化,随后采用 PCB 工艺加工,最后在微波暗室完成天线的 S 参数、增益和方向图的测试。

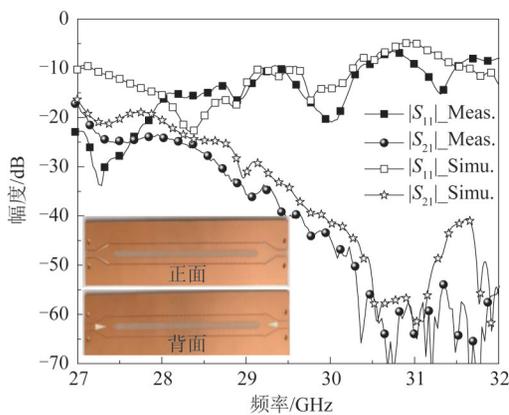


图5 四波束漏波天线实物及仿真和测试 S 参数
Fig. 5 Quad-beam LWA photos, simulated and measured S-parameters

图 5 给出了设计天线的加工实物图以及 S 参数的仿真和测试比较。可以看到,相对仿真结果,天线的测试 S 参数向高频偏移了大约 0.1 GHz。在 29~30.2 GHz 的频带范围内,天线的 $|S_{11}|$ 低于 -10 dB,表明天线具有良好的阻抗匹配,大部分能量都能馈入天线中。同时, $|S_{21}|$ 在此频段内也低于 -10 dB,表明能量在传输过程中逐渐向外辐射,即天线具有良好的辐射特性。

3.2 天线方向图

图 6 给出了天线在 28.9 GHz、29.5 GHz 和 30.1 GHz 三个频点处的仿真 E 面方向图。仿真结果表明天线在其工作频段内实现了从后向前连续的波束扫描。在 28.9 GHz 到 30.1 GHz 的频带内,第一个波束能实现 -60° 到 -33° 的波束扫描;第二个波束可以 -39° 到 -16° 的波束扫描;第三个波束可以 -20° 到 -2° 的波束扫描;第四个波束能实现 -3° 到 $+17^\circ$ 的波

束扫描。因此,实现了 80° 的空间扫描范围。由于在天线底部引入错位槽缝抑制阻带效应,同时改变了天线表面的色散特性,因此仿真结构与设计目标的频段存在一定偏差。同时各波束的增益差在 2.5 dB 以内。

图 7 为远场辐射方向图的测试结果,其工作频率为 29~30.2 GHz,相比仿真结果,工作带宽与工作频率存在大约 0.1 GHz 的偏移。当频率从 29 GHz 变化到 30.2 GHz 时,四波束总扫描范

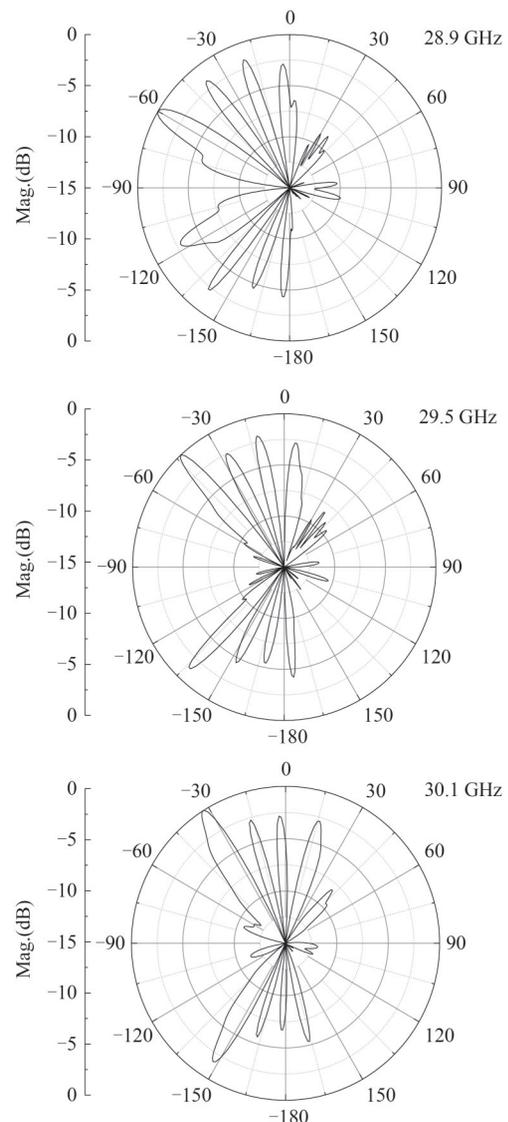


图6 天线在不同频点的归一化远场辐射仿真结果
Fig. 6 Simulated normalized far-field radiation patterns

围是从 -52° 到 22° 。其中,第一个波束能实现从 -52° 到 -25° 的扫描范围;第二个波束能实现从 -37° 到 -11° 的扫描范围;第三个波束能实现从 -22° 到 $+1^\circ$ 的扫描范围;第四个波束能实现从 0° 到 $+22^\circ$ 的

扫描范围,实现了共 74° 的扫描范围。可以发现测试方向图与仿真方向图之间存在一定偏差,这主要是由于加工误差以及测试误差导致的。根据本文定义多波束扫描率(ΔR),该天线的扫描率为 $18^\circ/\text{BW}\%$ 。各波束的测试增益差在 2.6 dB 以内。

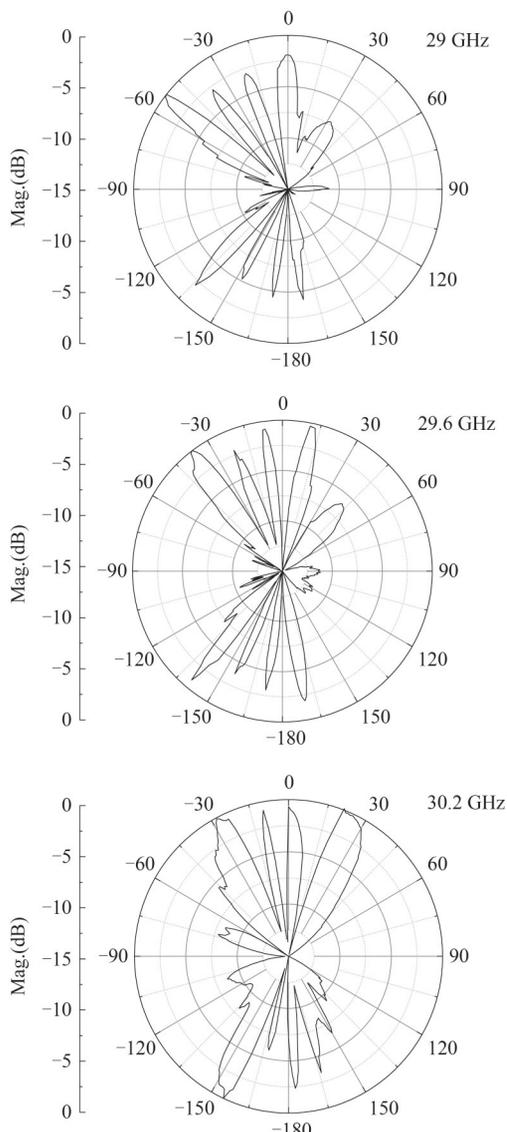


图7 天线在不同频点的归一化远场辐射测试结果
Fig. 7 Measured normalized far-field radiation patterns

3.3 天线增益

图8为天线最高增益的仿真与测试比较结果。仿真结果表明,在 28.9~30.1 GHz 的频带内,天线增益从 6.75 dBi 变化到 8.55 dBi;测试结果表明,天线在 29~30.2 GHz 的频带内,增益从 6.2 dBi 变化到 7.9 dBi。测试和仿真的差异主要由测试接头和介质误差导致。

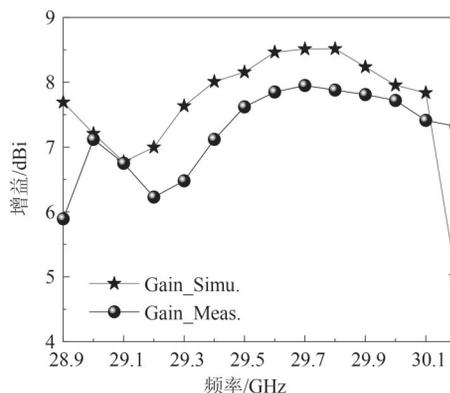


图8 天线最高增益的测试与仿真比较结果

Fig. 8 The comparison of the measured and simulated antenna peak gain

4 结论

本文设计了一款工作在毫米波段的四波束高扫描率LWA。结合正弦调制电抗叠加表面理论与SIW-SSPP技术,通过在SIW上表面周期叠加调制开槽,激发传输电磁波的高次谐波以进行定向辐射。并在SIW下表面刻蚀均匀周期缝隙以克服阻带效应,以使得天线实现了在 29~30.2 GHz 频带内,从 -52° 到 $+22^\circ$ 的四波束连续性扫描特性,扫描率可以达到 $18^\circ/\text{BW}\%$ 。因此,该天线是具有高扫描率、易加工和多波束优势的连续扫描LWA,可推广应用于未来5G通信和雷达系统,增强多目标探测与跟踪能力。

References

- [1] Jackson D R, Caloz C, Itoh T. Leaky-wave antennas [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, **100**(7):2194-2206.
- [2] Li Y, Xue Q, Yung E K N, et al. The periodic half-width microstrip leaky-wave antenna with a backward to forward scanning capability [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, **58**(3):963-966.
- [3] Ma H F, Shen X, Cheng Q, et al. Broadband and high-efficiency conversion from guided waves to spoof surface plasmon polaritons [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, **8**(1):146-151.
- [4] Kong G, Ma H, Cai B, et al. Continuous leaky-wave scanning using periodically modulated spoof plasmonic waveguide [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**:29600.
- [5] Xu S, Guan D, Zhang Q, 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] Sarkar A, Mukherjee S, Sharma A, et al. SIW-based quad-beam leaky-wave antenna with polarization diversity for four-quadrant scanning applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, **66**(8):3918-

- 3925.
- [7] 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.
- [8] Patel A M, Grbic A. A printed leaky-wave antenna based on a sinusoidally-modulated reactance surface [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, **59**(6): 2087-2096.
- [9] Oliner A, Hessel A. Guided waves on sinusoidally-modulated reactance surfaces [J]. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 1959, **7**(5):201-208.
- [10] Xu F, Wu K. Understanding leaky-wave structures: A special form of guided-wave structure [J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2013, **14**(5):87-96.
- [11] TANG Hong-Jun, HONG Wei. Novel millimeter wave substrate integrated waveguide filter with compact configuration [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (汤红军, 洪伟. 一种紧缩结构的新型毫米波基片集成波导滤波器。红外与毫米波学报), 2006, **25**(2):139-142.