



基于共面波导的全角度频率波束扫描天线

王 俊, 孔祥林, 徐若锋, 赵 雷

Full-angle frequency beam scanning antenna based on the coplanar waveguide

WANG Jun, KONG Xianglin, XU Ruofeng, and ZHAO Lei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.cjors.20222081>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于人工表面等离激元的天线研究进展

Recent progresses of antennas based on spoof surface plasmon polaritons

电波科学学报. 2018, 33(3): 279–286

共面波导差分馈电频率可重构天线

A CPW differentially-fed frequency reconfigurable antenna

电波科学学报. 2018, 33(3): 343–349

基于频率选择表面的宽角扫描阵列

Wide-angle scanning array based on frequency selective surface

电波科学学报. 2018, 33(3): 301–310

基于数字超表面的低剖面波束控制天线

A low profile beam controlling antenna based on digital metasurface

电波科学学报. 2021, 36(6): 938–946

侧馈偏置卡塞格伦天线的波束扫描特性研究

Beam scanning characteristics of side-feed offset cassegrain antenna

电波科学学报. 2019, 34(5): 628–632

宽角扫描的圆极化相控线阵

Wide-angle scanning circularly polarized phased array antenna

电波科学学报. 2019, 34(5): 552–557



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王俊, 孔祥林, 徐若锋, 等. 基于共面波导的全角度频率波束扫描天线[J]. 电波科学学报, 2023, 38(2): 261-267. DOI: 10.12265/j.cjors.2022081
WANG J, KONG X L, XU R F, et al. Full-angle frequency beam scanning antenna based on the coplanar waveguide[J]. Chinese journal of radio science, 2023, 38(2): 261-267. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2022081

基于共面波导的全角度频率波束扫描天线

王俊^{1,2*} 孔祥林¹ 徐若锋¹ 赵雷^{1*}

(1. 中国矿业大学信息与控制工程学院, 徐州 221116; 2. 东南大学信息科学与工程学院 毫米波国家重点实验室, 南京 211189)

摘 要 为满足平面集成系统、雷达等领域对宽角度频率波束扫描天线的要求, 提出了一种低剖面、小型化、全角度频扫天线的设计方案. 天线通过在共面波导上刻蚀周期性孔阵列, 形成人工表面等离子体激元结构, 利用其高次模辐射的特性产生频率扫描波束. 通过在共面波导一侧金属地上刻蚀周期性的梳状结构, 并由共面波导为其馈电, 产生低频反向端射波. 仿真结果表明, 天线在 9.1~53 GHz 频带内平均增益为 12.75 dBi, 频率波束扫描范围为 180°. 由于矢量网络分析仪频率量程限制, 实测结果在 9.1~40 GHz 与仿真结果具有较好的一致性. 该天线具有加工易、剖面低、成本低、全角度扫描的特点, 为平面集成系统、雷达等领域宽角度频扫天线提供了一种新的设计思路.

关键词 共面波导; 人工表面等离子体激元; 高次模; 端射天线; 频率波束扫描天线

中图分类号 TN822

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2023)02-0261-07

DOI 10.12265/j.cjors.2022081

Full-angle frequency beam scanning antenna based on the coplanar waveguide

WANG Jun^{1,2*} KONG Xianglin¹ XU Ruofeng¹ ZHAO Lei^{1*}

(1. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory of Millimeter-Waves, School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract In order to meet the requirements of wide-angle frequency beam scanning antenna in planar-integrated communication and radar field, a design method for low-profile, miniaturized, full-angle frequency beam scanning antenna is proposed. The antenna is constructed by hole arrays etched on the coplanar waveguide, which forms spoof surface plasmon polariton structure and the frequency beam scanning wave is generated by using its high-order radiation modes. The periodic comb structures are etched on the one side of the coplanar waveguide metal ground, which fed by coplanar waveguide and generated the low frequency reverse end-fire waves. The simulated results show that, within 9.1–53 GHz, the frequency beam scanning angle of the antenna can cover 180° with an average gain level of 12.75 dBi. Due to the limitation of frequency range of vector network analyzer, the measured results within 9.1–40 GHz are in good agreement with the simulation ones. The antenna has the characteristics of easy fabrication, low profile, low cost and full frequency scanning angle, which provides a new idea for wide-angle antenna design in planar integrated system and radar field.

Keywords coplanar waveguide; spoof surface plasmon polaritons; higher-order modes; end-fire antenna; frequency beam scanning antenna

引 言

随着信息技术的快速发展, 移动终端对无线信

号覆盖范围和无线数据传输速率的要求越来越高, 而可利用的频谱资源却越来越少. 频率波束扫描天线是一种主波束指向随着工作频率改变而发生偏转

收稿日期: 2022-04-25

资助项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (2022QN1050)

通信作者: 王俊 E-mail: jun-wang@cumt.edu.cn; 赵雷 E-mail: leizhao@cumt.edu.cn

的天线,它具有高增益、窄波束且辐射方向可变的特点,能有效增加无线信号的覆盖范围,提高频率空间复用效率,是雷达系统的核心技术^[1-8]。如何设计出小型化、超宽波束扫描角度的频率波束扫描天线已成为国内外研究者们关注的重点。

传统实现频率波束扫描天线的方法有使用人工电磁结构、基片集成波导、波导缝隙阵列和表面等离子体结构等^[5-21]。文献[5-8]提出了基于人工电磁结构、波导缝隙阵列与基片集成波导等结构的频率波束扫描天线,但它们的尺寸以及波束扫描角度都受到结构的限制。近些年,随着人工表面等离子体激元(spoof surface plasmon polaritons, SSPPs)的发展,慢波结构已被广泛应用于各种微波器件的设计中,如滤波器、天线、环形器等^[9-22],频率波束扫描天线就是 SSPPs 在天线设计中的典型应用。文献[14-17]提出利用梯度渐变细槽 SSPPs 结构和扩口地结构阵列贴片来实现频率波束扫描天线,最大波束扫描范围可以达到 83°。文献[19]提出基于 SSPPs 和超表面结构的频率扫描天线,利用 SSPPs 结构激励超表面结构,产生梯度相位变化,实现频率扫描波束,但其波束扫描范围需要进一步提升。文献[20]提出一种基于扩口地和高保线结构的宽角度波束扫描天线,利用扩口地结构馈电激励起高保线上的空间谐波,使得频率波束扫描范围达到 155°。目前,大多数频率波束扫描天线结构中 SSPPs 作为馈电结构来激励相关的辐射体,很少有结构直接研究 SSPPs 的高次辐射模式。文献[21]提出一种基于共面波导 SSPPs 高次模辐射特性的新型频率波束扫描天线,频率扫描范围为 129°。设计出紧凑的 180°频率波束扫描范围天线始终是科学研究的难点。

本文提出一种基于 SSPPs 的小型化、全角度(180°)频率波束扫描天线的设计方法。该天线采用标准的 50 Ω 共面波导结构,并在其金属线上刻蚀周期性的孔阵列,利用 SSPPs 高次模来产生频率扫描波束。同时,在频率波束扫描天线上进一步引入连续弯曲结构来增加相位变化实现高频端射的效果。为了补足频率波束扫描天线在低频无法实现端射的缺陷,在共面波导结构上引入反向梳状行波天线,实现反向端射的性能。仿真结果表明,该天线的百分比带宽约为 141.3%(9.1~53 GHz),频率波束扫描角度范围可达 180°(-90°~90°),其平均峰值增益为 12.75 dBi。测试结果与仿真结果吻合较好,表明该天线在未来的雷达、平面集成系统等通信领域具有潜在的应用前景。

1 基于共面波导的全角度频率波束扫描天线设计

本文利用在共面波导上集成 SSPPs 高次模辐射天线与反向梳状端射天线,实现小型化、180°频率波束扫描天线设计。全角度频扫天线利用在共面波导 SSPPs 结构中引入连续弯曲结构增加相位变化,实现 -75°~90°的频率波束扫描效果,并结合基于共面波导的反向梳状端射行波天线(实现 -90°反向端射性能),设计出全角度(180°)频率波束扫描天线,天线设计原理如图 1 所示。

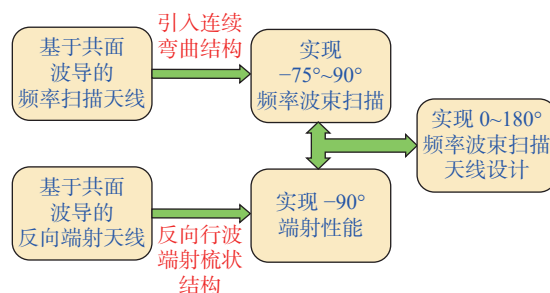


图 1 基于共面波导的全角度频率波束扫描天线设计原理示意图

Fig. 1 Schematic of full-angle frequency beam scanning antenna based on coplanar waveguide

1.1 共面波导孔阵列结构高次模辐射机理

图 2 为基于共面波导打孔的 SSPPs 结构,尺寸参数如下: $w = 10 \text{ mm}$, $r = 4.8 \text{ mm}$, $d = 13 \text{ mm}$ 和 $g = 0.2 \text{ mm}$ 。基于共面波导 SSPPs 的单元结构如虚线框内所示,本文通过商业软件 CST 本征模式仿真了单元结构的色散曲线,结果如图 3 所示。通过研究该 SSPPs 的色散关系发现,共面波导本身为准 TEM 模式,并无截止效应的出现;而 SSPPs 的基模色散曲线处于光线以下,位于慢波区域,是传输模式,且其频率随波矢的增加而逐渐截止。另外,SSPPs 的高次模处于光线以上,位于快波区域,是辐射模式(SSPPs 有若干高次模,此处只选择 15 GHz 以下两个模式来说明)。色散曲线的基模截止频率在 7.3 GHz 左右,辐射模式从 8.5 GHz 左右开始。为了更清晰地看到基于共面波导 SSPPs 的传输辐射特性,图 4 给出 S 参数图。从 $|S_{11}|$ 与对应的 $|S_{21}|$ 可以看出,该结构在 7.3 GHz 以内有很好的传输特性,7.3~8.5 GHz 出现了带阻现象,8.5 GHz 后能量开始往自由空间辐射,与色散曲线具有很好的对应关系。

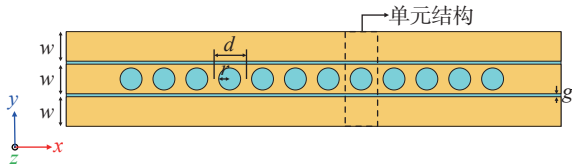


图 2 基于共面波导的 SSPPs 结构

Fig. 2 Structure of SSPPs based on coplanar waveguide

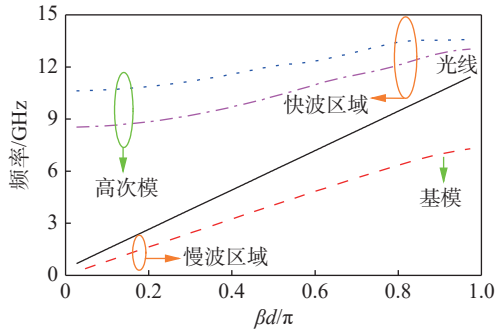


图 3 单元结构色散曲线

Fig. 3 Dispersion curves of unit cell

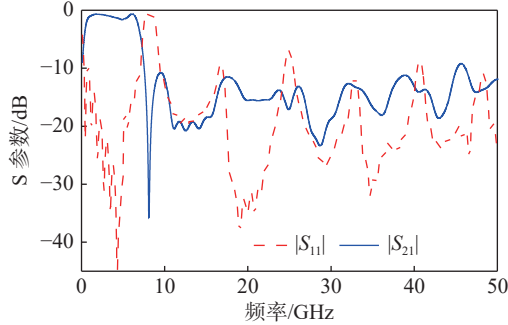


图 4 基于共面波导的 SSPPs 仿真 S 参数

Fig. 4 S simulation parameters of CPW-based SSPPs

通过图 3~4 可以看出, 基于共面波导的 SSPPs 结构在高次模有很好的辐射特性. 天线的主波束辐射方向可以表示为^[21]

$$\theta = \begin{cases} \arcsin(\beta_{-1}/k_0) \\ \pi - \arcsin(\beta_{-1}/k_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中: β_{-1} 为 -1 阶空间谐波波矢. 从式 (1) 可知, 频率波束扫描角度 θ 与 β_{-1}/k_0 有关, β_{-1}/k_0 范围越大, 得到越宽的频率波束扫描范围. 由式 (1) 还可知, $\beta_{-1}=0$ 以及 $\beta_{-1}d=0$ 时可以得到向两侧辐射的方向图 (即 $\theta=0$ 或 π). 根据 $\beta_{-1}d=\beta_{\text{基模}}d-2\pi$, 可以得到 $\beta_{\text{基模}}d=2\pi$. 从图 3 可以看出, 第一个高阶模式 (辐射模式) 从 8.5 GHz 开始, 即 $\beta_{\text{基模}@8.5\text{GHz}}d=\pi$; 当 $\beta_{\text{基模}}d=2\pi$ 时, 该结构对应的侧向辐射频率应该是 17 GHz, 即 $\beta_{\text{基模}@17\text{GHz}}d=2\pi$, 说明该结构的波束扫描角在 17 GHz 时向两侧方向辐射.

1.2 超宽角度频扫天线结构设计

基于共面波导的 SSPPs 结构在高次模有很好的辐射特性, 但该结构在某些频点的 $|S_{11}|$ 高于 -10 dB. 为了改善天线的辐射性能, 本节给出了引入连续弯曲结构的共面波导频率波束扫描天线结构 (图 5), 并利

用 CST 仿真了其相关性能参数. 天线由基于共面波导的 SSPPs 结构与引入连续弯曲设计结构组成, 且两者具有相同的周期单元长度. 天线尺寸参数如下: $w=10\text{ mm}$, $r=4.8\text{ mm}$, $r_1=5.5\text{ mm}$, $d=13\text{ mm}$ 和 $g=0.2\text{ mm}$. 图 6(a) 给出了基于共面波导频率波束扫描天线的仿真 S 参数, 可以看出, 天线在 9.1~53 GHz 频段内, $|S_{11}|$ 基本小于 -10 dB. 图 6(b) 给出了不同频率基于共面波导频率波束扫描天线的辐射方向图, 可以看出频率为 17 GHz 时向两侧辐射, 这与计算结果有很好的 consistency. 在基于共面波导的 SSPPs 结构中引入连续的弯曲结构并延长中间金属结构, 增加了整个结构的相位变化率, 从而使工作频段内波束扫描范围增大, 拓宽波束扫描角度, 可以从后向前扫描 (高频端射), 扫描角度范围为 $-75^\circ\sim 90^\circ$, 达到 165° .

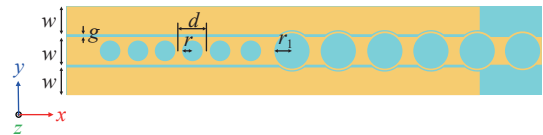
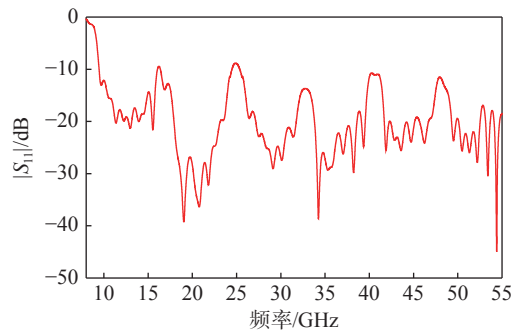
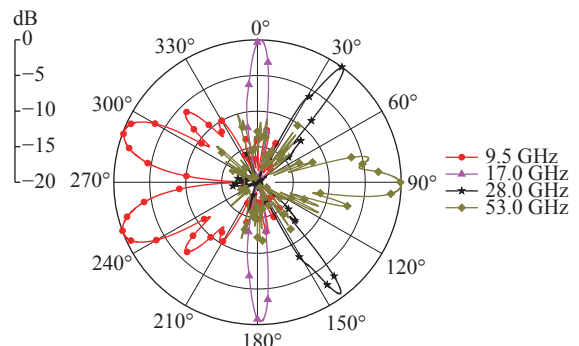


图 5 超宽角度频率波束扫描天线结构

Fig. 5 Structure of ultra-wide angle frequency beam scanning antenna



(a) S 参数
(a) S parameter



(b) 归一化辐射方向图
(b) Normalized radiation pattern

图 6 超宽角度频率波束扫描天线的 S 参数和归一化天线辐射方向图

Fig. 6 S parameter of ultra-wide angle frequency beam scanning antenna and normalized radiation pattern

1.3 全角度频扫天线结构与性能

本文在图 5 结构上设计了反向端射行波结构, 来弥补超宽角度频扫天线在低频无法实现端射的缺陷, 天线结构如图 7 所示. 基于共面波导的全角度频率波束扫描天线由超宽角度频率波束扫描天线与基于共面波导的反向端射行波天线组成, 天线总长度 l_1 为 165 mm. 反向端射行波结构主要由导向区域和反向尖端区域组成, 梳状结构深度 $h=6$ mm, 周期 $p=3.5$ mm, 总长度 $l=130.5$ mm, 梳状金属宽度为 2.2 mm. 梳状结构反向尖端区域渐变部分深度从 6 mm 依次递减 0.4 mm 直至 2 mm, 然后保持不变. 尖端区域为天线与自由空间提供好的阻抗匹配, 能有效抑制波的尾端反射, 实现能量向自由空间辐射.

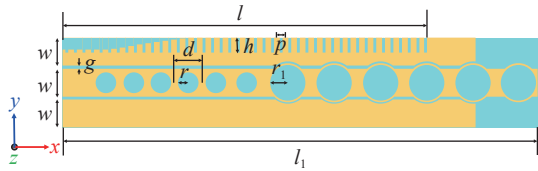
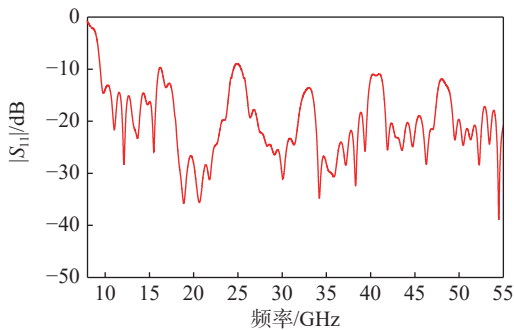
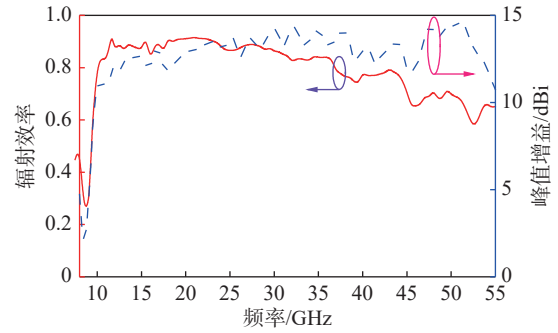


图 7 基于共面波导的全角度频率波束扫描天线结构
Fig. 7 Structure of full-angle frequency beam scanning antenna based on coplanar waveguide

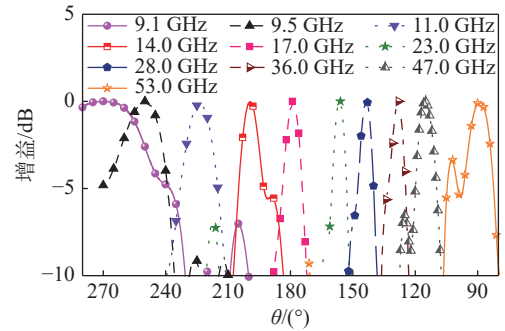
天线共面波导开孔结构主要用来实现 $-75^\circ \sim 90^\circ$ 的频率波束扫描性能, 共面波导给反向端射梳状结构馈电, 实现低频 -90° 反向端射性能. 天线 S 参数如图 8(a) 所示, 阻抗带宽为 9.1~53 GHz, 相对带宽为 141.3%, 天线在工作频带内有个别点略高于 -10 dB, 这是由于 SSPPs 结构本身的带阻效应引起的. 图 8(b) 为天线的峰值增益与辐射效率, 天线在阻抗带宽范围内的平均增益约为 12.75 dBi, 平均辐射效率约为 80%. 图 8(c) 为天线在半空间上多频点扫描的方向图, 随着频率的增大, 天线的方向图可以从后往前辐射, 实现了上半空间 180° 频率波束扫描的特性 ($-90^\circ \sim 90^\circ$), 并且在 17 GHz 处辐射方向为法向. 由于天线结构在 z 轴方向上几乎为对称结构, 在下半空间也可以实现 180° 的频率波束扫描.



(a) S 参数
(a) S parameter



(b) 峰值增益与辐射效率
(b) Peak gain and radiation efficiency

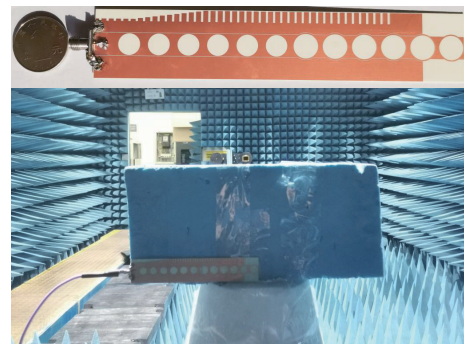


(c) 半空间天线归一化方向图
(c) Half-space normalized antenna radiation pattern

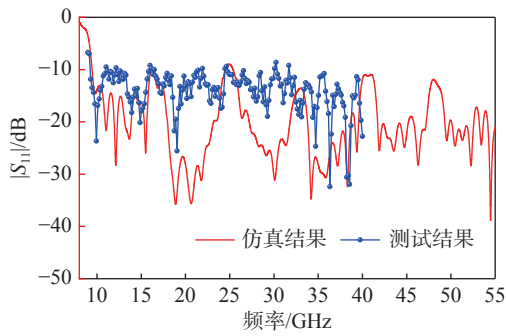
图 8 基于共面波导的 180° 频率波束扫描天线性能
Fig. 8 Performance of 180° frequency beam scanning antenna based on coplanar waveguide

2 加工测试验证

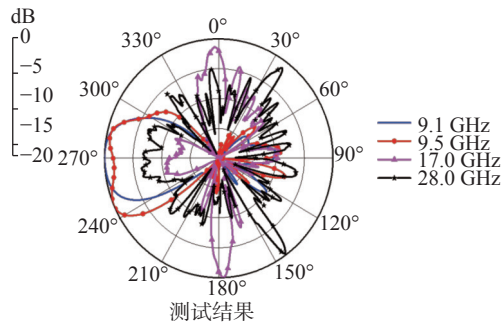
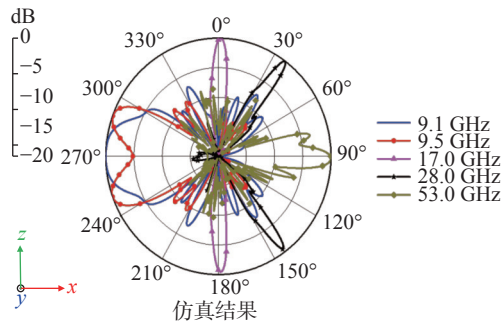
为了验证仿真结果的正确性, 将设计的模型采用标准 PCB 工艺进行加工, 天线印刷在介电常数为 3.66、损耗正切为 0.003 7、厚度为 0.5 mm 的 Rogers 4350 介质基板上, 通过矢量网络分析仪 (vector network analyzer, VNA) 和远场微波暗室对加工的天线实物进行测量. 图 9(a) 为天线的加工实物与测试环境; 图 9(b) 和 (c) 分别为天线的 S 参数和不同频率方向图测试与仿真结果对比.



(a) 天线实物与测试环境
(a) Photograph of fabrication antenna and measurement environment



(b) S 参数测试与仿真结果
(b) S parameter between measured results and simulation results



(c) 归一化天线辐射方向图
(c) Normalized antenna radiation pattern

图 9 天线实物及测试结果

Fig. 9 Photograph of the fabrication antenna and its measurement result

天线方向图测试结果上半空间增益略低于下半空间, 主要是由天线背面的泡沫板支撑材料损耗引起, 方向图中的其他差异主要由微波暗室测试环境误差所引起. 从图 9 可以看出天线的 S 参数和方向图测试结果与仿真结果有很好的 consistency, 验证了仿真设计结果的正确性. 测试结果表明, 天线在 9.1~53 GHz 具有良好的阻抗匹配带宽, 频率波束扫描范围为 0~180°, 工作频带内平均增益为 12.75 dBi, 说明天线在相关领域具有很好的应用潜力.

表 1 为现有的频率波束扫描天线性能对比. 可以看出, 由梯度渐变和特定扩口地 SSPPs 馈电的贴片阵列频率波束扫描天线的扫描角度范围为 83°^[14, 16]. 文献 [1] 和 [18] 中均提出了基于微带 SSPP 的贴片阵列与传输线结构的频率波束扫描天线, 实现了利用微带结构 SSPP 实现高扫描率的特性, 但受到带宽和波束扫描角度的限制. 文献 [19] 提出了一种基于 SSPPs 和透射相位梯度超表面的多层结构, 实现了较高的平均增益值 (定向辐射), 但制造成本昂贵, 结构笨重. 文献 [20] 提出了一种宽带、宽波束扫描角天线, 可以实现 155° 的波束扫描范围, 但扩口地结构不利于进一步小型化. 文献 [21] 提出了基于共面波导结构的小型化设计, 其波束扫描范围为 129°. 相对于其他频率波束扫描天线的设计, 本文提出的方法能够有效地解决频率波束扫描天线在波束扫描范围、成本等方面的问题, 可以实现 180° 频率波束扫描性能.

表 1 现有频率波束扫描天线性能对比

Tab. 1 Performance comparison of the existing frequency beam scanning antennas

参考文献	工作带宽	频率波束扫描范围/(°)	频率波束扫描比(扫描角度/带宽)	平均增益/dBi	成本
[1]	5.0~7.0 GHz (33.30%)	81.0	2.43	15.90	低
[14]	4.5~6.5 GHz (34.48%)	43.0	1.24	-	高
[16]	9.2~16.0 GHz (53.97%)	83.0	1.53	-	低
[17]	5.0~7.0 GHz (33.33%)	15.0	0.45	10.00	低
[18]	11.0~15.0 GHz (30.77%)	66.0	2.14	-	低
[19]	7.0~10.0 GHz (35.29%)	28.9	0.81	14.42	高
[20]	5.5~20.0 GHz (113.72%)	155.0	1.36	11.00	低
[21]	11.7~50.0 GHz (124.15%)	129.0	1.04	10.92	低
本文	9.1~53.0 GHz (141.30%)	180.0	1.27	12.75	低

3 结论

本文针对雷达、平面集成系统等通信领域对宽

角度频率波束扫描天线的需求, 提出基于共面波导的 180° 频率波束扫描天线, 集成了共面波导 SSPPs 结构与反向端射天线结构, 通过在共面波导上蚀刻

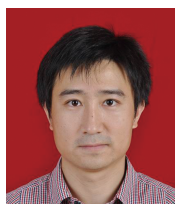
周期性孔阵列结构以及周期性梳状结构,实现了小型化、180°频率波束扫描性能。天线的阻抗带宽为9.1~53 GHz,频率波束扫描范围覆盖了180°,工作频带内的平均增益为12.75 dBi。基于共面波导的180°频率波束扫描天线在尺寸和扫描角度上有很大的优势,为通信系统进一步提升监测范围提供了一种可行的新思路。

参考文献

- [1] WEI D J, LI J Y, YAN J J, et al. Wide scanning angle leaky-wave array antenna based on microstrip SSPPs-TL[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2018, 17(8): 1566-1570.
- [2] MELEZHIK P N, RAZSKAZOVSKIY V B, REZNICHENKO N G, et al. High-efficiency millimeter wave coherent radar for airport surface movement monitoring and control[C]// Proceedings of the 8th European Radar Conference. Manchester, 2011: 361-364.
- [3] YANG S T, LING H. Application of a microstrip leaky wave antenna for range-azimuth tracking of humans[J]. *IEEE geoscience and remote sensing letters*, 2013, 10(6): 1384-1388.
- [4] POLLARD B D, SADOWY G. Next generation millimeterwave radar for safe planetary landing[C]// The IEEE Aerospace Conference. Big Sky, 2005: 1213-1219.
- [5] 赵晖, 崔铁军. 基片集成波导中的混合左右手结构及其应用[J]. *电子学报*, 2007, 35(6A): 108-111.
ZHAO H, CUI T J. Hybrid right-handed structure in substrate integrated waveguide and its application[J]. *Acta electronica sinica*, 2007, 35(6A): 108-111. (in Chinese)
- [6] 马文字, 曹文权, 曾志远. 加载人工电磁结构的增益增强型圆极化频扫天线[J]. *微波学报*, 2018, 34(S1): 163-166.
MA W Y, CAO W Q, ZENG Z Y. Gain-enhanced circularly polarized frequency scanning antenna loaded with artificial electromagnetic structure[J]. *Journal of microwave*, 2018, 34(S1): 163-166. (in Chinese)
- [7] XU S D, GUAN D F, ZHANG Q F, 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.
- [8] 李世超, 侯培培, 屈检, 等. 基于波导缝隙阵列的新型太赫兹频率扫描天线[J]. *雷达学报*, 2018, 7(1): 119-126.
LI S Y, HOU P P, QU J, et al. A novel Terahertz frequency scanning antenna based on waveguide slot array[J]. *Journal of radars*, 2018, 7(1): 119-126. (in Chinese)
- [9] RAETHER H. Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings[J]. Springer tracts in modern physics. Berlin: Springer, 1988, 111: 4-39.
- [10] JIANG B T, SHEN L F, ZHANG X F, et al. Higher-order modes of spoof surface plasmon polaritons on periodically corrugated metal surfaces[J]. *Progress in electromagnetics research M*, 2009, 8: 91-102.
- [11] LIAO Z, ZHAO J, PAN B C, et al. Broadband transition between microstrip line and conformal surface plasmon waveguide[J]. *Journal of physics D: applied physics*, 2014, 47(31): 315103.
- [12] WANG J, ZHAO L, HAO Z C, et al. An ultra-thin coplanar waveguide filter based on the spoof surface plasmon polaritons[J]. *Applied physics letters*, 2018, 113(7): 071101.
- [13] OIU T S, WANG J F, LI Y F, et al. Circulator based on spoof surface plasmon polaritons[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2017, 16: 821-824.
- [14] ZHANG Q L, ZHANG Q F, CHEN Y F. 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.
- [15] YIN J Y, ZHANG Q, ZHANG H C, et al. 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.
- [16] 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.
- [17] ZHANG Q L, ZHANG Q F, CHEN Y F. High-efficiency circularly polarised leaky-wave antenna fed by spoof surface plasmon polaritons[J]. *IET microwaves antennas and propagation*, 2018, 12(10): 1639-1644.
- [18] GUAN D F, YOU P, ZHANG Q F, et al. A wide-angle and circularly polarized beam-scanning antenna based on microstrip spoof surface plasmon polariton transmission line[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2017, 16: 2538-2541.
- [19] CHEN H Y, MA H, LI Y F, et al. Wideband frequency scanning spoof surface plasmon polariton planar antenna based on transmissive phase gradient metasurface[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2018, 17(30): 463-467.
- [20] RUDRAMUNI K, KANDASAMY K, ZHANG Q F, et al. Goubau-line leaky-wave antenna for wide-angle beam scanning from backfire to endfire[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2018, 17(8): 1571-1574.
- [21] 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.

- [22] XU K D, ZHANG F, GUO Y, et al. Spoof surface plasmon polaritons based on balanced coplanar stripline waveguides[J]. *IEEE photonics technology letters*, 2020, 32(1): 55-58.

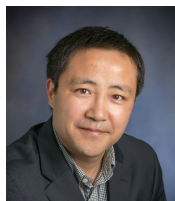


徐若锋 (1982—),男,江苏人,中国矿业大学信息与控制工程学院讲师,硕士生导师.本科毕业于苏州大学电子与科学技术专业,硕士和博士毕业于英国 University of Kent. 目前主要研究方向为微波技术及应用. E-mail: xuruofeng@cumt.edu.cn

作者简介



王俊 (1992—),男,江苏人,中国矿业大学信息与控制工程学院讲师. 2015年至2016年,于新加坡南洋理工大学电子电气工程系访问研究一年; 2021年于东南大学电磁场与微波技术专业获得博士学位. 研究方向为射频/微波器件、天线与传播和表面等离子激元器件等. E-mail: jun-wang@cumt.edu.cn



赵雷 (1974—),男,中国矿业大学信息与控制工程学院教授,博士生导师,IEEE高级会员,中国电子学会天线分会委员,IEEE AP-S Chapter Xuzhou 主席,主要研究方向为射频微波器件、新型电磁材料、涡旋波通信、计算电磁学等. E-mail: leizhao@cumt.edu.cn



孔祥林 (1995—),男,山东人,中国矿业大学信息与工程学院博士研究生,主要研究方向为超材料吸波体、编码超表面等. E-mail: xlkong@cumt.edu.cn