

基于基片集成波导馈电的Ka波段渐变缝隙天线设计

郝宏刚 李 江* 张 婷 阮 巍

(重庆邮电大学光电工程学院 重庆 400065)

摘 要: 在被动毫米波 (PMMW) 成像焦平面阵列 (FPA) 馈源的天线中, 直线渐变缝隙天线 (LTSA) 相对于传统的喇叭天线、介质棒天线具有其独特的优势。该文优化设计了一种新型的对跖直线渐变缝隙天线 (ALTSA), 通过加载超材料结构使天线的增益得到了改善, 天线采用基片集成波导 (SIW) 技术进行馈电。通过仿真与测试分析, 该天线在较宽的频带内具有良好的阻抗特性、较低的副瓣电平及较高且平稳的增益, 所设计的天线具有较小的口径宽度, 在焦平面中易于组成较为密集的馈源阵列, 以提高被动毫米波成像的空间分辨率。

关键词: 天线; 被动毫米波成像; 对跖直线渐变缝隙天线; 基片集成波导

中图分类号: TN823

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)03-0582-07

DOI: 10.11999/JEIT190218

Design of Ka-band Linear Tapered Slot Antennas Based on Substrate Integrated Waveguide Feed

HAO Honggang LI Jiang ZHANG Ting RUAN Wei

(College of Electronics Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Linear Tapered Slot Antennas (TSA) have significant advantages over traditional horn antennas, dielectric rod antenna when used as feed elements in Focal Plane Arrays (FPA) of Passive MilliMeter Wave(PMMW) imaging. In this paper, a novel Antipodal Linear Tapered Slot Antenna(ALTSA) is designed and optimized. The proposed antenna, the gain of which is improved by loading metamaterial structure, is fed by the Substrate Integrated Waveguide(SIW). Simulation and measure analysis show that the good impedance characteristics, low sidelobe levels, high and smooth gain are all achieved in a wide frequency band. Meanwhile, the designed antenna has a smaller aperture width and is easier to form a denser feed array in the focal plane to improve the spatial resolution of passive millimeter wave imaging.

Key words: Antenna; Passive MilliMeter Wave(PMMW) imaging; Antipodal Linear Tapered Slot Antenna(ALTSA); Substrate Integrated Waveguide(SIW)

1 引言

根据黑体辐射理论, 自然界中所有温度高于绝对零度的物体都能向外辐射电磁波, 而被动毫米波成像则正是利用物体在毫米波频段的热辐射特性差异来实现成像。由于毫米波可以穿透衣物、沙尘、烟雾等遮挡物, 毫米波被动成像技术在安全检查、场景监控等场合具有广泛的应用前景^[1,2]。焦平面

阵列成像是目前被动毫米波成像系统所使用的主要体制。

为了提高其空间分辨率, 在透镜或者反射面天线的焦平面处需要使用排列较为密集的馈源阵列, 故必须使用口径较小的馈源天线^[3]; 此外, 由于环境中物体所辐射的毫米波能量极其微弱, 因而馈源天线必须具有较高的增益, 这样才能保证天线可以更多地接受环境当中辐射的毫米波能量。所以, 设计一种口径较小且具有高增益的天线对被动毫米波成像具有重要的现实意义。喇叭天线是目前成像系统中最常用的馈源天线^[4], 它作为一种口径天线, 要提高其增益则必须要增加其口径尺寸, 对于低频段的毫米波成像系统来说, 其口径面积相对较大, 与焦平面阵列中需要密集的馈源阵列相矛盾。

渐变缝隙天线结构简单, 增益主要由渐变缝隙

收稿日期: 2019-04-04; 改回日期: 2019-08-02; 网络出版: 2019-08-28

*通信作者: 李江 s170401025@stu.cqupt.edu.cn

基金项目: 重庆市自然科学基金(cstc2018jcyjAX0508), 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201800639)

Foundation Items: The Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2018jcyjAX0508), The Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJQN201800639)

的长度决定,易于实现高增益、小型化及超宽带功能。渐变缝隙天线主要有非线性槽线天线(Vivaldi)^[5,6]、线性渐变缝隙天线(Linearly Tapered Slot Antenna, LTSA)^[7,8]与费米结构(Fermi-Tapered Slot Antenna, Fermi-TSA)^[9] 3种。为了在毫米波频段内实现宽带特性,文献[7]提出了一种使用基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)与规则共面波导(CoPlanar Waveguide, CPW)结合馈电的渐变缝隙天线结构,所提出的天线在整个频带内具有很好的阻抗特性、稳定的增益及较低的交叉极化水平;文献[10]利用SIW技术对天线进行馈电,并在天线前端使用介质加载以改善天线的方向性及增益;文献[11]提出了一种应用于微波/毫米波成像的Vivaldi天线,通过在天线两臂引入太阳形状的狭缝改善了天线的方向性,并在天线前端使用介质加载,提高了天线的增益。以上所提出的渐变缝隙天线虽然其带宽及增益性能都比较好,但往往结构尺寸较大,尤其是天线的口径宽度不能满足焦平面阵列中对馈源小口径的要求。

本文针对目前被动毫米波成像对馈源天线小口径、高增益的性能需求,引入超材料结构,设计了一种新型的对跖直线渐变缝隙天线(Antipodal Linearly Tapered Slot Antenna, ALTSA)。天线采用SIW馈电方式,其结构简单,整体尺寸仅为 $12 \times 55 \times 0.508 \text{ mm}^3$,具有较小的口径宽度。仿真与测试结果表明,本文天线在频带内回波损耗均大于10 dB,并且在整个频带内具有稳定且较高的增益及较好的方向性。本文所提出的天线可以满足焦平面对馈源天线的需求,非常适合应用于被动毫米波成像系统当中。

2 ALTSA结构分析与设计

2.1 理论分析

渐变缝隙天线是通过在介质层的接地板上刻蚀出渐变缝隙形成的,其性能类似于行波天线。该天线本身为平面结构,易于射频电路集成,且具有适中的增益、较宽的频带以及在E面和H面上可以形成对称的波束。

对跖直线渐变缝隙天线是将渐变缝隙部分的左右两边分别印刷于介质基板的上下两侧,并在缝隙末端有一小部分重叠,形成对称的对跖结构。文献[7]研究表明,使用对跖式结构可以获得更好的带宽、更高的增益及更低的交叉极化水平。渐变缝隙天线有几个重要的技术参数,包括:有效厚度 t_{eff} 、天线长度 L 、口径宽度 W 等。天线的有效厚度定义为

$$t_{\text{eff}} = \frac{(\sqrt{\varepsilon_r} - 1)t}{\lambda_0} \quad (1)$$

其中, ε_r 为基板介电常数, t 为基板厚度, λ_0 为自由空间中的中心波长, t_{eff} 取值范围为0.005~0.030。

天线的长度 L 取值范围为 $4\lambda_0 \sim 10\lambda_0$,此时其特性与行波式端射天线近似,其口径宽度 $W \geq \lambda_0/2$,太小会导致天线无法有效向外辐射能量。

传统的渐变缝隙天线通常采用微带线到槽线过渡的馈电方式,但在毫米波频段具有较大的损耗。由于基片集成波导(SIW)具有低损耗,可以实现良好的回波损耗的特点,被广泛用于天线的馈电结构。SIW由介质基板上下面的金属层和两侧的金属化通孔构成,SIW与传统的矩形波导类似,只能传输 TE_{10} 模式的电磁波,其传输的截止频率由等效的矩形波导宽度来确定^[12]

$$a_e = \frac{c}{2f_c \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2)$$

c 代表真空中光速, f_c 表示其截止频率, ε_r 为介质基板的介电常数。当通孔直径 d 与通孔间距 p 之间满足 $d \leq \lambda_g/5$ 且 $d/p \geq 0.5$ 时,电磁波通过SIW结构时所带来的泄露损耗可忽略不计。

2.2 结构设计

根据上一节中对渐变缝隙天线的理论推导,确定天线渐变缝隙的长宽以及SIW金属通孔的直径、间距和宽度,并在ANSYS软件中进行优化调整,最终确定的对跖直线渐变缝隙天线结构如图1所示,其中红色部分为顶层金属,蓝色部分为底层金属,灰色部分为介质基板。天线由上下两侧的渐变缝隙形成一个对称的结构,并在天线上下两侧设计了一个重叠部分 $2W_1$ 以改善天线的失配问题。天线长度 L 取 $4\lambda_0$,由于长度较小,在天线辐射贴片两侧增加一排规则的矩形开口以改善天线的阻抗特性与增益,实现天线的小型化。在天线辐射单元上添加两排金属化通孔,可以提高天线的增益及降低旁瓣电平^[10]。

本文设计所使用的介质基板是厚度为0.508 mm的RT/Duroid 5880材料,其介电常数为2.2,损耗正切值为0.0009,金属部分采用厚度为0.018 mm的铜箔。在ANSYS软件中对天线尺寸进行优化,最终确定天线尺寸如表1所示。

在ANSYS软件中对所设计的天线进行仿真,图2所示为天线的 S_{11} 及增益曲线。由图2可以看出,所设计的天线在Ka频段具有良好的回波损耗特性,在30~40 GHz频段内其 S_{11} 均小于-10 dB,且大部分都低于-15 dB;同时从图2增益曲线可以看出,在整个频带内都具有平稳且较高的增益。

分析其在32 GHz, 35 GHz, 38 GHz处的辐射

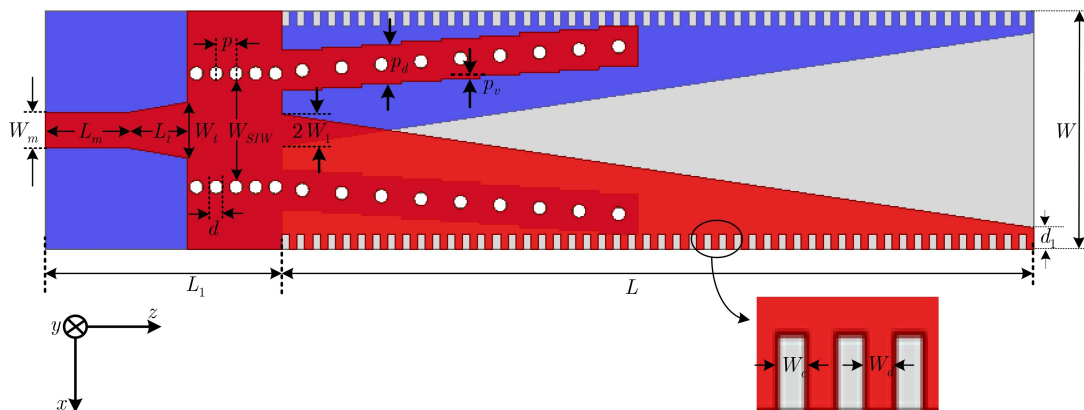
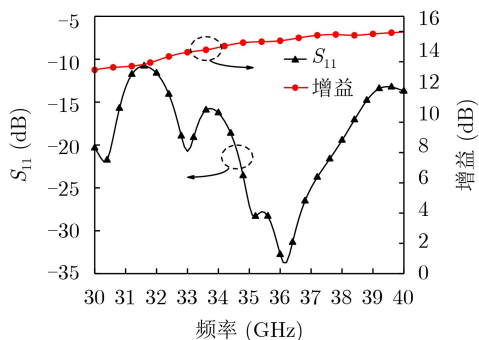
图1 基于SIW馈电的对距直线渐变缝隙天线 W

表1 天线结构尺寸(mm)

L	L_1	L_m	L_t	W	W_m	W_t	W_{SIW}
34	12	4	2.8	12	1.7	2.8	5
W_c	W_d	W_1	p	d	d_1	p_v	p_d
0.34	0.34	0.7	1	0.7	1.3	0.15	2

图2 ALTSA结构 S_{11} 及增益曲线

方向图，仿真结果如图3所示。从图3中可以看出，所设计的天线具有较好的方向性、较窄的波瓣宽度以及较低的副瓣，尤其是E面表现更为明显。

2.3 加载超材料单元的ALTSA

超材料具有自然界中现有材料所不具备的特

性，可以通过改变其结构尺寸来调节其电磁特性。近年来，很多学者提出将超材料引入到天线当中来改善其增益及方向性^[13-15]，本文根据文献[16]所提出超材料单元，设计了一种非谐振的平行线结构人工电磁材料，其中 $u_1=u_2=0.2$ mm, $u_L=1.1$ mm, $u_x=1.5$ mm, $u_y=u_z=2$ mm。上下表面设为PEM，前后表面设为PEC，电磁波沿 y 轴正入射。由于超材料单元是放置在天线口面附近，天线辐射缝隙部分长度为34 mm，根据天线的远场计算公式 $r=2D^2/\lambda$ ，超材料单元距离天线的相位中心已大致接近天线的远场条件。尽管如此，但电磁波激励不可能完全满足平面波激励条件，会对其入射角有一定的影响，故仿真了电磁波在 xoy 平面以一定角度入射时对 S 参数的影响，如图4(b)所示，从中可以看出，当以不同角度入射时，其透射系数基本没发生太大变化，都接近于0，而反射系数的谐振频点虽然会随着角度的增大而往高频方向移动，但在本文所需的频段内其反射系数变化不是很大，所以该结构在所需频段内对入射角度具有一定的不敏感性。提取入射角度为 0° 时的 S 参数，并利用K-K关系在Matlab中进行反演得到其等效电磁参数^[17]，其计算结果结果如图4(c)及图4(d)所示。

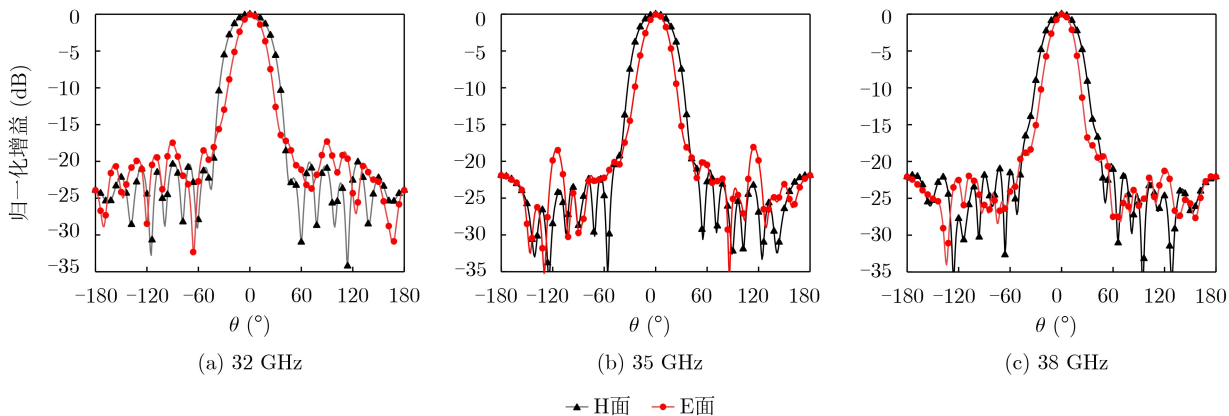


图3 天线辐射方向图

从图4(c)可以看出, 在天线工作的频带内单元的等效折射率实部小于所使用的介质基板, 而虚部近似为零, 根据折射定律, 电磁波从折射率大的介质向折射率小的介质传播时, 电磁波方向会向法线方向偏移, 故而电磁波经过前端超材料结构后波束会更趋近于平面波, 因此增益会将会得到提升。为了验证这一结论, 仿真了在35 GHz处原始天线与加载超材料单元后天线的电场分布图, 如图5所示。可以看出, 相比于原始ALTSA结构, 加载超材料单元后, 天线的电场能量可以更有效地朝前方汇聚, 超材料单元也相当于起到一个引向器的作用, 可以有效改善天线的辐射特性。

将超材料单元引入所设计的天线中, 在ANSYS软件中对其进行仿真, 仿真结果如图6所示。由图6(a)可知, 天线的回波损耗都大于10 dB, 证明超材料单元与天线能形成较好的匹配; 从图6(b)可以看

出, 在整个频带内, 天线的增益都有较大的提升; 对比加载超材料结构前后35 GHz处方向图的仿真结果可知, 加载超材料结构后, 天线的波束宽度有明显的降低, 验证了该结构可以有效地提升天线的增益及降低主瓣宽度。

3 测试结果

对所设计的超材料加载的天线进行实物加工, 加工实物如图7所示。并在标准微波暗室中使用AV3672D矢量网络分析仪对其 S_{11} 及辐射方向图进行了测试。

天线的仿真和实测 S_{11} 曲线如图8所示。可以看出, 天线在30~40 GHz频带范围回波损耗均大于10 dB, 具有良好的驻波特性。仿真与测试的结果基本吻合, 测试的增益略低于仿真值, 造成误差的原因主要是焊接所带来的阻抗损耗。

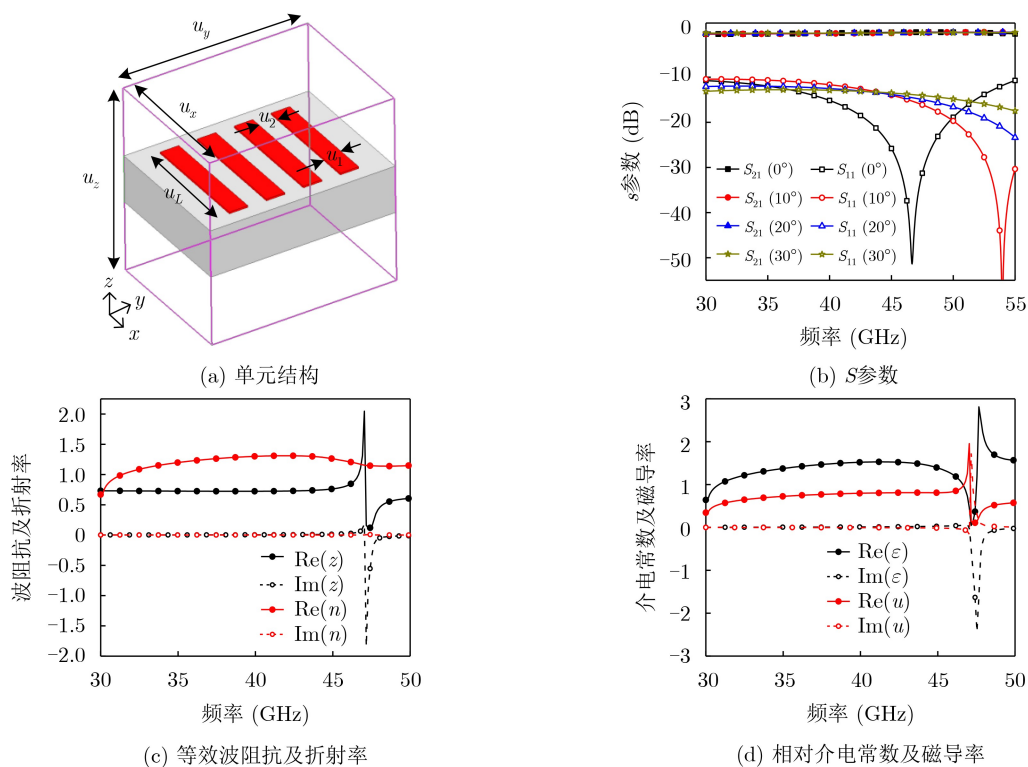


图4 超材料结构及S参数曲线

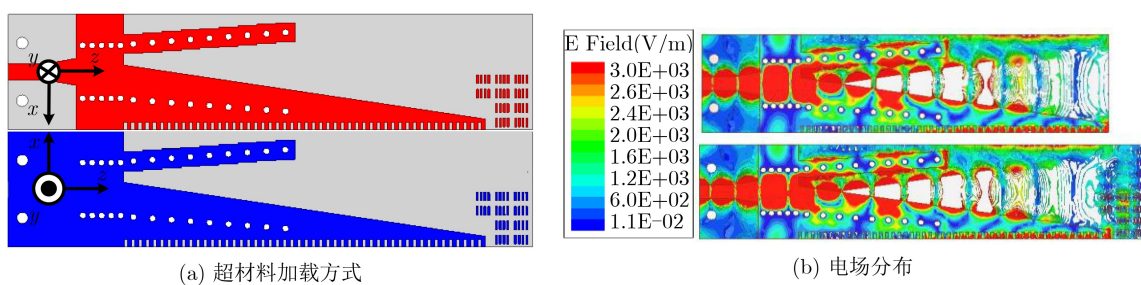


图5 加载超材料单元前后电场分布比较

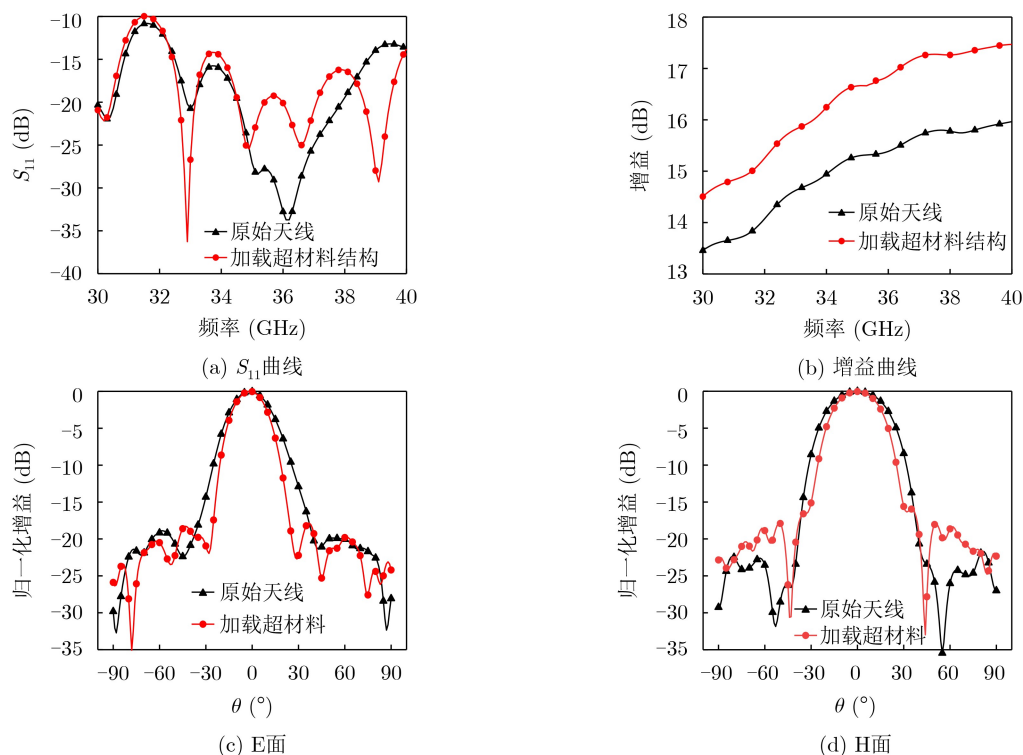


图6 加载超材料结构天线仿真结果

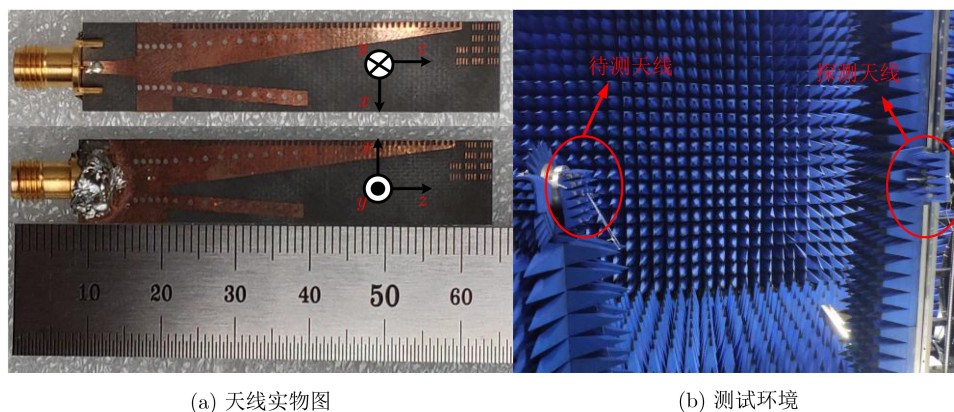
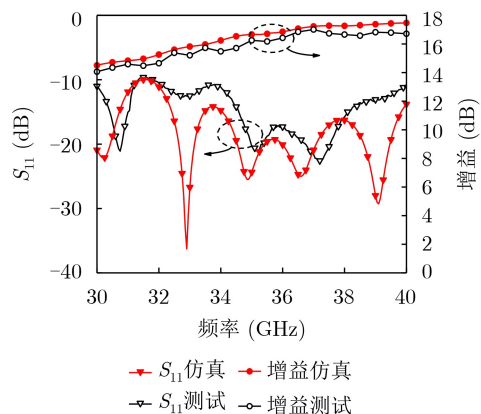


图7 天线测试

图8 超材料加载天线仿真及实测 S_{11} 与增益曲线

天线在工作频带内的E面(xoz 面)和H面(yo

面)的仿真和实测2维辐射方向图,如图9所示。分别对比了32 GHz, 35 GHz, 38 GHz 3个频点处的主极化和交叉极化方向图,从图9中可以看出,天线具有较好的方向性及较低的副瓣电平;同时,天线的交叉极化电平都小于-17 dB,具有较好的交叉极化性能,天线的仿真与测试结果基本吻合,验证了设计的可靠性。仿真与测试的方向图有微小的误差主要是由于微波暗室中待测天线固定时与接收天线对准存在一定的偏差。

4 结论

本文将一种非谐振的超材料单元与直线对跖渐变缝隙天线 (ALTSA) 相结合,提出了一种具有高增益的新型平面端射天线结构,分析了超材料单元

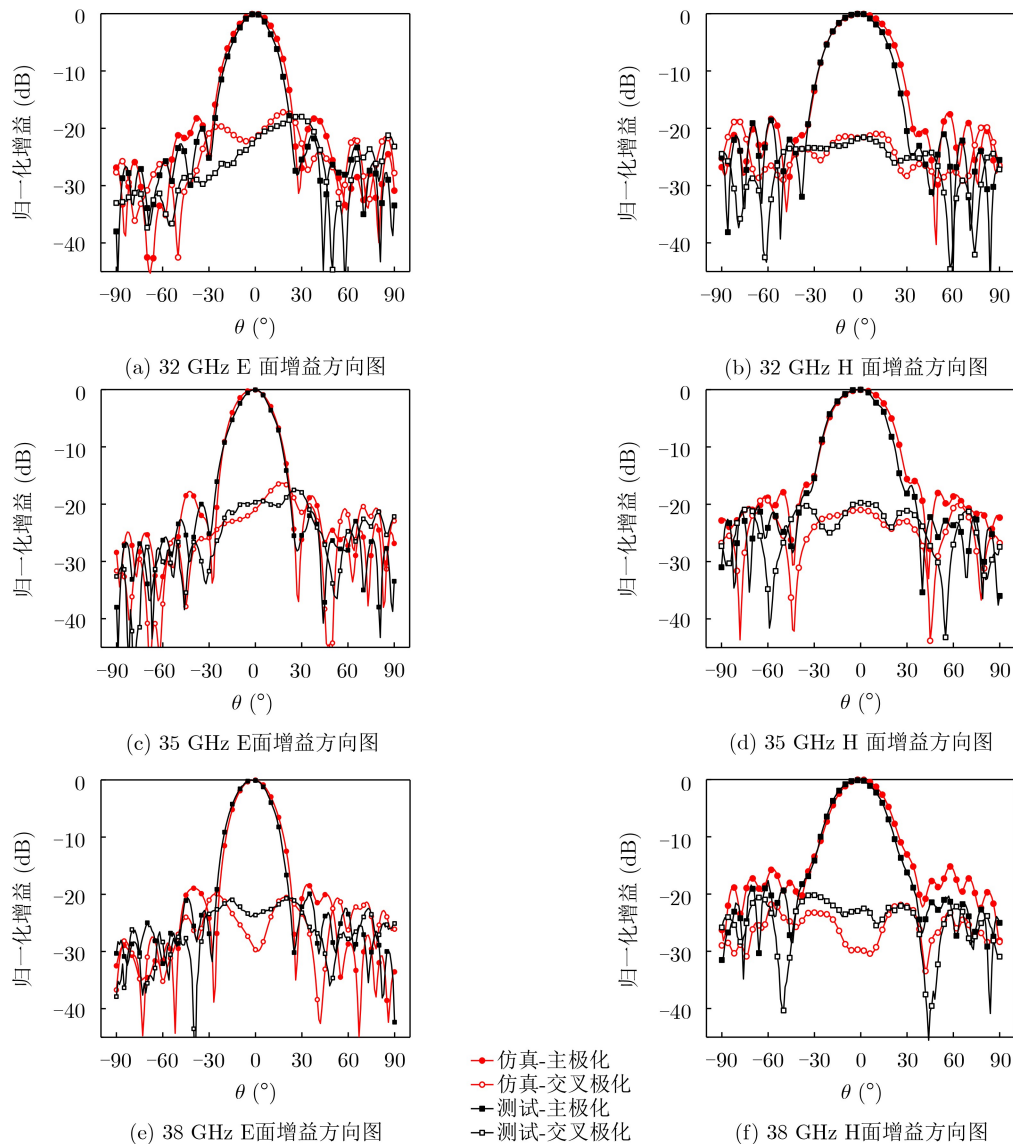


图9 仿真与测试天线辐射方向图

对天线性能提升的作用机理。整个天线结构简单，尺寸仅有 $12 \times 55 \times 0.508 \text{ mm}^3$ ，其仿真与测试结果表明，该天线在30~40 GHz频带内回波损耗均大于10 dB，有良好的阻抗特性，并且在整个频带内具有较高的增益、较低的副瓣以及较窄的波瓣宽度。这种天线口径较小，可以满足焦平面阵列对馈源天线小截面的要求，在被动毫米波成像方面具有重要的实用价值。

参考文献

- [1] CHENG Yayun, HU Fei, WU Hongfei, *et al.* Multi-polarization passive millimeter-wave imager and outdoor scene imaging analysis for remote sensing applications[J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 20145–20159. doi: [10.1364/OE.26.020145](https://doi.org/10.1364/OE.26.020145).
- [2] SALMON N A. Outdoor passive millimeter-wave imaging: Phenomenology and scene simulation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(2): 897–908. doi: [10.1109/TAP.2017.2781742](https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2781742).
- [3] 王楠楠, 邱景辉, 李高飞, 等. Ka频段介质棒天线优化设计[J]. *电波科学学报*, 2010, 25(1): 161–166.
WANG Nannan, QIU Jinghui, LI Gaofei, *et al.* Optimal design of Ka-band dielectric rod antenna[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2010, 25(1): 161–166.
- [4] 陈其科, 樊勇, 张永鸿, 等. 用于近程被动成像的3 mm波准光介质透镜天线设计[J]. *电子科技大学学报*, 2016, 45(2): 168–173. doi: [10.3969/j.issn.1001-0548.2016.03.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0548.2016.03.002).
CHEN Qike, FAN Yong, ZHANG Yonghong, *et al.* Design of quasi-optical lens antenna for 3 mm band near range passive MMW imaging[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2016, 45(2): 168–173. doi: [10.3969/j.issn.1001-0548.2016.03.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0548.2016.03.002).
- [5] WANG Nannan, FANG Mu, CHOU H T, *et al.* Balanced antipodal Vivaldi antenna with asymmetric substrate cutout

- and dual-scale slotted edges for ultrawideband operation at millimeter-wave frequencies[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(7): 3724–3729. doi: [10.1109/TAP.2018.2820422](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2820422).
- [6] 王友成, 董明宇, 张锋, 等. 渐变槽天线端射特性优化设计[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(1): 124–128. doi: [10.11999/JEIT160203](https://doi.org/10.11999/JEIT160203).
- WANG Youcheng, DONG Mingyu, ZHANG Feng, *et al.* Design of tapered-slot antenna with optimized end-fire characteristics[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(1): 124–128. doi: [10.11999/JEIT160203](https://doi.org/10.11999/JEIT160203).
- [7] TARINGOU F, DOUSSET D, BORNEMANN J, *et al.* Broadband CPW feed for millimeter-wave SIW-based antipodal linearly tapered slot antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(4): 1756–1762. doi: [10.1109/tap.2012.2232270](https://doi.org/10.1109/tap.2012.2232270).
- [8] RAO T and TIWARI N. SIW based antipodal linear tapered slot antenna for inter-satellite communication links at 60 GHz[J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 96(3): 3403–3419. doi: [10.1007/s11277-017-4063-0](https://doi.org/10.1007/s11277-017-4063-0).
- [9] MOHAMED I, BRIQECH Z, and SEBAK A. Antipodal fermi tapered slot antenna for 60-GHz band applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 96–99. doi: [10.1109/LAWP.2014.2356137](https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2356137).
- [10] GHASSEMI N and WU Ke. Planar high-gain dielectric-loaded antipodal linearly tapered slot antenna for E- and W-Band gigabyte point-to-point wireless services[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(4): 1747–1755. doi: [10.1109/TAP.2012.2232269](https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2232269).
- [11] MOOSAZADEH M, KHARKOVSKY S, CASE J T, *et al.* Improved radiation characteristics of small antipodal Vivaldi antenna for microwave and millimeter-wave imaging applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 1961–1964. doi: [10.1109/LAWP.2017.2690441](https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2690441).
- [12] KUMAR M N and SHANMUGANANTHAM T. Microstrip fed SIW slot antenna backed with cavity for millimeter wireless communication applications[C]. 2017 IEEE International Conference on Antenna Innovations & Modern Technologies for Ground, Aircraft and Satellite Applications, Bangalore, India, 2017: 1–4. doi: [10.1109/IAIM.2017.8402531](https://doi.org/10.1109/IAIM.2017.8402531).
- [13] 刘红喜, 高军, 曹祥玉, 等. 一种基于开口谐振环的高增益端射天线设计[J]. 物理学报, 2015, 64(23): 234101. doi: [10.7498/aps.64.234101](https://doi.org/10.7498/aps.64.234101).
- LIU Hongxi, GAO Jun, CAO Xiangyu, *et al.* A design of high-gain end-fire antenna based on split-ring resonator structures[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(23): 234101. doi: [10.7498/aps.64.234101](https://doi.org/10.7498/aps.64.234101).
- [14] 任宇辉, 丁君, 郭陈江. 一种基于开口谐振环的高增益宽带双极化天线设计[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(11): 2790–2794. doi: [10.11999/JEIT170111](https://doi.org/10.11999/JEIT170111).
- REN Yuhui, DING Jun, and GUO Chenjiang. Design of a high-gain wideband dual-polarized antenna based on split ring resonators[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(11): 2790–2794. doi: [10.11999/JEIT170111](https://doi.org/10.11999/JEIT170111).
- [15] CUO Linyan, YANG Helin, ZHANG Qisheng, *et al.* A compact antipodal tapered slot antenna with artificial material lens and reflector for GPR applications[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 44244–44251. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2864618](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2864618).
- [16] LI Xiangxiang, ZHOU Hao, GAO Zhiming, *et al.* Metamaterial slabs covered UWB antipodal Vivaldi antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 2943–2946. doi: [10.1109/LAWP.2017.2754860](https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2754860).
- [17] SZABO Z, PARK G H, HEDGE R, *et al.* A unique extraction of metamaterial parameters based on kramers-kronig relationship[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, 58(10): 2646–2653. doi: [10.1109/TMTT.2010.2065310](https://doi.org/10.1109/TMTT.2010.2065310).
- 郝宏刚: 男, 1977年生, 博士, 教授, 研究方向为射频微波电路、电磁理论及应用.
- 李 江: 男, 1995年生, 硕士, 研究方向为被动毫米波成像研究.
- 张 婷: 女, 1995年生, 硕士, 研究方向为编码超材料.
- 阮 巍: 男, 1982年生, 硕士, 讲师, 研究方向为电磁场与无线技术.