

文章编号:1007-5321(2021)06-0020-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2021-035

一种宽带反射型极化旋转器

刘小明^{1,2}, 齐涛¹, 甘露¹

(1. 安徽师范大学 物理与电子信息学院, 芜湖 241002; 2. 北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876)

摘要: 为满足极化旋转器件在通信、雷达以及遥感领域的应用, 基于周期性结构的设计方法, 采用斜排列的正方形裂环和正方形贴片单元结构, 设计了一款覆盖频率为 22.5 ~ 50 GHz 的反射型极化旋转器, 该器件的 -3 dB 相对带宽达到了 75.86%。极化转换效率在 24 ~ 47.8 GHz 内达到了 0.8, 角度稳定性达到了 30°。测试结果与仿真结果具有较好的吻合度。

关键词: 极化旋转器; 周期性结构; 宽带; 反射型

中图分类号: TN911.22

文献标志码: A

A Broadband Reflective Polarization Rotator

LIU Xiao-ming^{1,2}, QI Tao¹, GAN Lu¹

(1. School of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China;

2. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: To promote the application of polarization rotational devices in the fields of communication, radar and remote sensing, a polarization rotator based on periodical structure is designed. This design uses the skewed array consisting of split rectangular ring and rectangular patch, so that a reflective polarization rotator that can cover the frequency range of 22.5 ~ 50 GHz is realized. This device provides -3 dB fractional bandwidth up to 75.86%. The polarization conversion ratio reached 0.8 in the range of 24 ~ 47.8 GHz over an angular range of 30°. The measured results demonstrate satisfactory agreement with simulation.

Key words: polarization rotator; periodical structure; broadband; reflective type

在通信、雷达和遥感系统中,极化处理器是十分重要的功能器件。利用极化处理器可以实现极化分集^[1]、收发隔离^[2]或者分极化接收^[3]。极化旋转器是可将入射或出射波的极化方向旋转一定角度(通常为 90°)的功能器件^[4]。在现有的极化旋转技术中,适用于毫米波频段的有法拉第旋转器^[5]、屋顶形反射面^[6]、双折射器件^[7]以及基于周期性结构的极化旋转器^[8]。

法拉第旋转器的主要缺点在于需要高性能旋磁材料,成本较高;屋顶形反射面需要表面精度达到

1%的波长,同时尺寸要求较大;双折射率器件更适用于远红外以上的频段。而基于周期性结构的极化旋转器具有单元结构灵活多样、加工成本低等优点,因此受到越来越广泛的关注。基于周期性结构的极化旋转器可分为透射型和反射型两大类。目前,国内外学者对 2 种类型都进行了大量的研究。从研究结果看,透射型极化旋转器的带宽相对较窄^[9],并且在很多情况下其插入损耗较大^[10-12],不适用于需要较大带宽和较低损耗的情形。

反射型极化旋转器具有结构简单、频段宽的优

收稿日期: 2021-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(61871003); CEMEE 国家重点实验室开放课题(CEMEE2021Z0201B)

作者简介: 刘小明(1983—), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: xiaoming.liu@ahnu.edu.cn.

点. 在大量的研究中,裂环谐振单元是常用的设计之一. 在文献[13]中,单个正方形裂环谐振器结合圆形贴片实现了极化旋转,但该设计的有效带宽仅有 55%;Khan 等^[14] 采用了正方形裂环谐振器镶嵌十字偶极子,但是该设计的极化转换效率(PCR, polarization conversion ratio)不高;Khan 等^[15] 采用了双环结构,但是其 PCR 并未见明显改进;另外一种采用双开口谐振环的设计^[16],PCR 和带宽都未有改善;Ghosh 等^[17] 采用的是圆形裂环谐振器,以实现有源型极化旋转,但是谐振器的带宽只有 35%;Zhang 等^[18] 设计的结构实现带宽为 65%,PCR 为 0.65;Zheng 等^[19] 设计的谐振器带宽超过 90%,但是角度稳定性只有 10°;此外,Cerveny 等^[20] 和 Zhang 等^[21] 设计的谐振器带宽都在 25% 以内,并且未报道角度稳定性.

由此可见,基于裂环谐振器的反射型极化旋转器的带宽和 PCR 都有进一步改善的空间,值得深入研究. 此外,角度稳定性也是研究的重要指标. 笔者在前人工作的基础上,提出将斜排列的正方形裂环谐振器与正方形贴片作为单元结构的极化旋转器,单元内嵌结构为正方形贴片,单元全部斜 45° 排列. 这种结构的优点在于不论是 x 极化还是 y 极化入射,都能实现极化转换. 此外,该结构的带宽相对于其他裂环谐振器的带宽有所提高. 同时,该结构的 PCR 也优于其他裂环谐振器.

1 宽带反射型极化旋转器

1.1 结构与基本原理

当一列电磁波入射到一表面时,入射电磁波的电场为 \boldsymbol{E}_i ,而出射电磁波的电场为 \boldsymbol{E}_o ,那么出射电场与入射电场之间的关系式为

$$\boldsymbol{E}_o = \begin{bmatrix} E_{o,V} \\ E_{o,H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{V,V} & R_{V,H} \\ R_{H,V} & R_{H,H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i,V} \\ E_{i,H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{V,V} & R_{V,H} \\ R_{H,V} & R_{H,H} \end{bmatrix} \boldsymbol{E}_i \quad (1)$$

其中:下标 V 表示垂直极化,H 表示水平极化, R 表示反射系数. 当入射波仅为垂直极化时($E_{i,H} = 0$),要实现极化旋转,则要求

$$\left. \begin{aligned} E_{o,V} &= R_{V,V}E_{i,V} + R_{V,H}E_{i,H} = R_{V,V}E_{i,V} = 0 \\ E_{o,H} &= R_{H,V}E_{i,V} + R_{H,H}E_{i,H} = R_{H,V}E_{i,V} = E_{i,V} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

即要求 $R_{H,V}$ 尽量接近 1,而 $R_{V,V}$ 尽量接近 0. 进一步讲,如果单元结构对于水平入射和垂直入射具有对称性,那么 $|R_{H,V}| = |R_{V,H}|$, $|R_{H,H}| = |R_{V,V}|$,亦即单元结构还具备对入射极化不敏感的特性.

极化旋转器单元结构如图 1 所示. 单元结构包含了正方形裂环谐振器,谐振器内部镶嵌了正方形贴片. 正方形裂环谐振器与正方形贴片构成了周期性结构的单元. 与其他裂环谐振器设计不同的是,单元采用斜排列. 单元结构采用金属材料,通过蚀刻技术加工在介质基底上,介质基底底部为金属,产生全反射效果. 该结构具有对称特性,具备了对入射极化不敏感的优点.

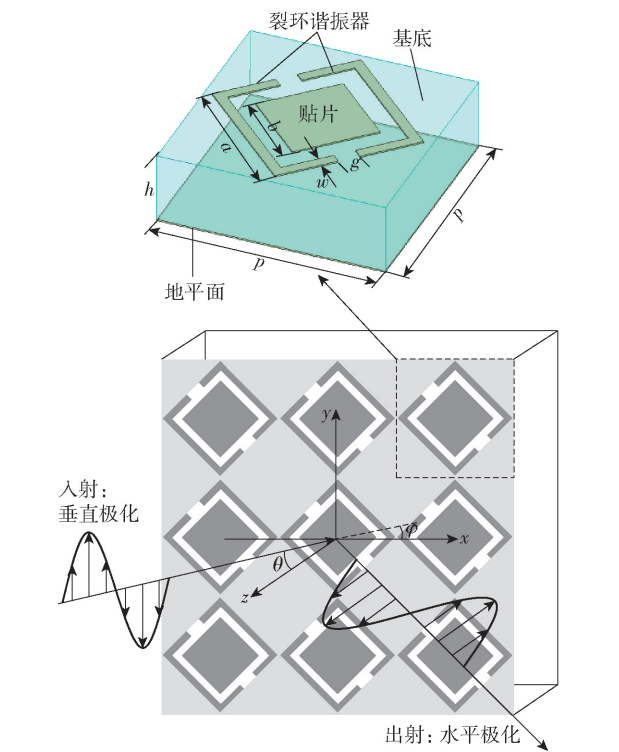


图 1 极化旋转器单元结构

1.2 仿真分析

单元结构的主要参数如表 1 所示,介质基板由相对介电常数为 4.4 的 FR4 材料构成. 利用全波分析方法进行仿真,得到该结构的演进过程,如图 2 所示. 在 (x, y, z) 坐标系下,入射波垂直于样品表面(入射方向与 z 轴重合或 $\varphi = 0^\circ, \theta = 0^\circ$),且电场沿 x 方向. 因此 R_{xx} 表示电场反射到 x 方向分量的反射系数,而 R_{yx} 表示电场反射到 y 方向分量的反射系

表 1 单元结构的主要参数 mm

参数	数值	参数	数值
p	2.60	g	0.250
a	1.70	h	0.800
b	1.00	t	0.017
w	0.12		

数. 从图 2 中可见,单纯的正方形裂环结构也具有极化转换功能,但是在某些频点同极化反射系数过大,大于 -10 dB ;而单纯的贴片并不能产生极化旋转;将正方形裂环结构贴片结合后,不仅能产生极化旋转,带内同极化的反射系数也能达到小于 -10 dB 的指标. 从仿真结果看,带内出现 3 个极点,分别为 $25.6, 35.1$ 和 45.9 GHz ,从而在 $22.5 \sim 50\text{ GHz}$ 范围内实现了 3 dB 带宽. 绝对带宽为 27.5 GHz ,相对带宽为 75.86% .

3 个谐振点所对应的单元结构表面电流分布如图 3 所示. 对于第 1 个谐振点,从电流分布可以看出,电流对应的波长大约等于谐振环的周长,且有

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} = \frac{c}{f_0 \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (3)$$

其中 ϵ_{eff} 为等效介电常数^[22]. 另外,正方形环上的

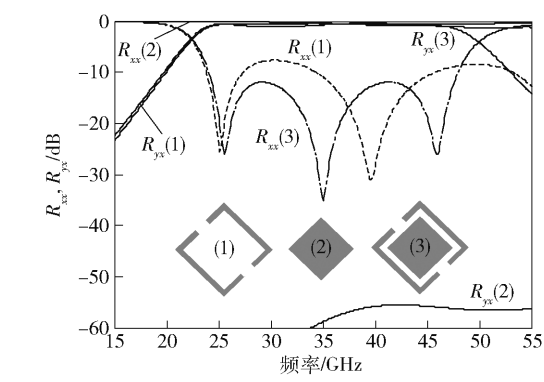
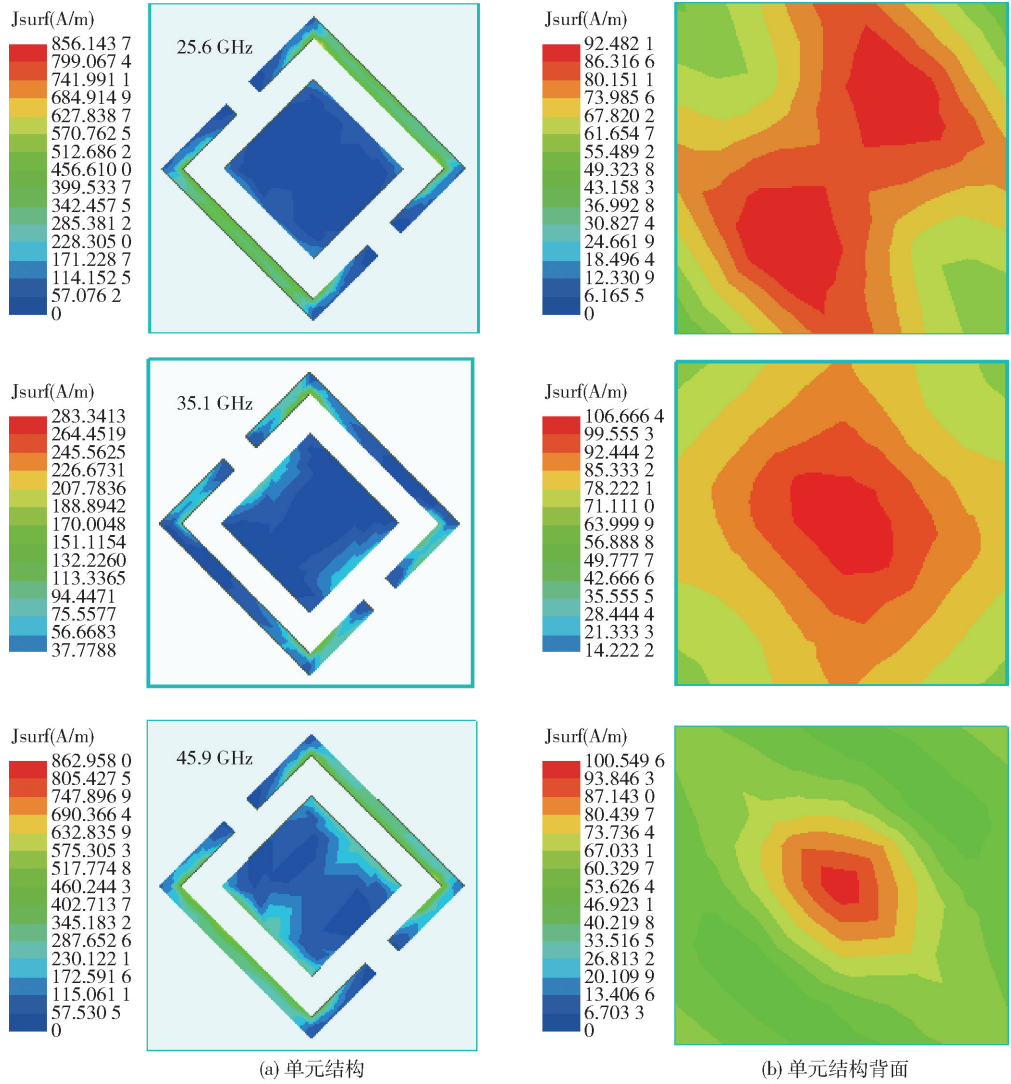


图 2 极化旋转器的演进过程

电流强度比较小,说明正方形贴片的出现对低频点的影响比较小. 这一点可以由图 2 所示的结果得到印证. 无论有无正方形贴片,第 1 谐振点的变化都不大. 对于第 2 谐振点,在无正方形贴片时,



(a) 单元结构

(b) 单元结构背面

图 3 3 个谐振点对应的单元结构表面电流分布

谐振频点位于 40 GHz 左右. 但是正方形贴片的出现,使得部分电流耦合到贴片上,相当于加长了电流路径,因此谐振频率下降到 35.1 GHz. 同样,第 3 谐振点从大于 55 GHz 偏移到 45.9 GHz,贴片上的电流密度有所增强,且底部电流集中在贴片中心.

2 参数分析

2.1 几何参数敏感性

为分析各参数对该极化旋转器的性能影响,对单元参数进行了全面分析,根据金属线宽和介质高度,仿真步进设为 10 μm ,分析结果如图 4 所示.

从仿真结果可以看出,参数 a 主要影响的是低

频部分,因为参数 a 决定了谐振环的长度,它的变化会引起第 1 谐振点的变化;而参数 b 主要影响的是高频部分,因为参数 b 决定了贴片的大小,而贴片影响第 2 和第 3 谐振点,这些结论与图 2 和图 3 中的现象一致. 参数 g 和 h 对整体性能的影响不大,原因是参数 g 处于电流末端,电流比较小,而参数 h 只影响等效相对介电常数,其权重有限^[23]. 单元周期长度(p)影响整体性能,这是周期性结构的一般特性. 而线宽(w)对谐振频率影响不大,因为线宽不影响电流路径长度,但是影响谐振特性. 总体而言,在加工精度范围内,参数的变化对整体性能影响不大,能满足大带宽和高极化转换率的要求.

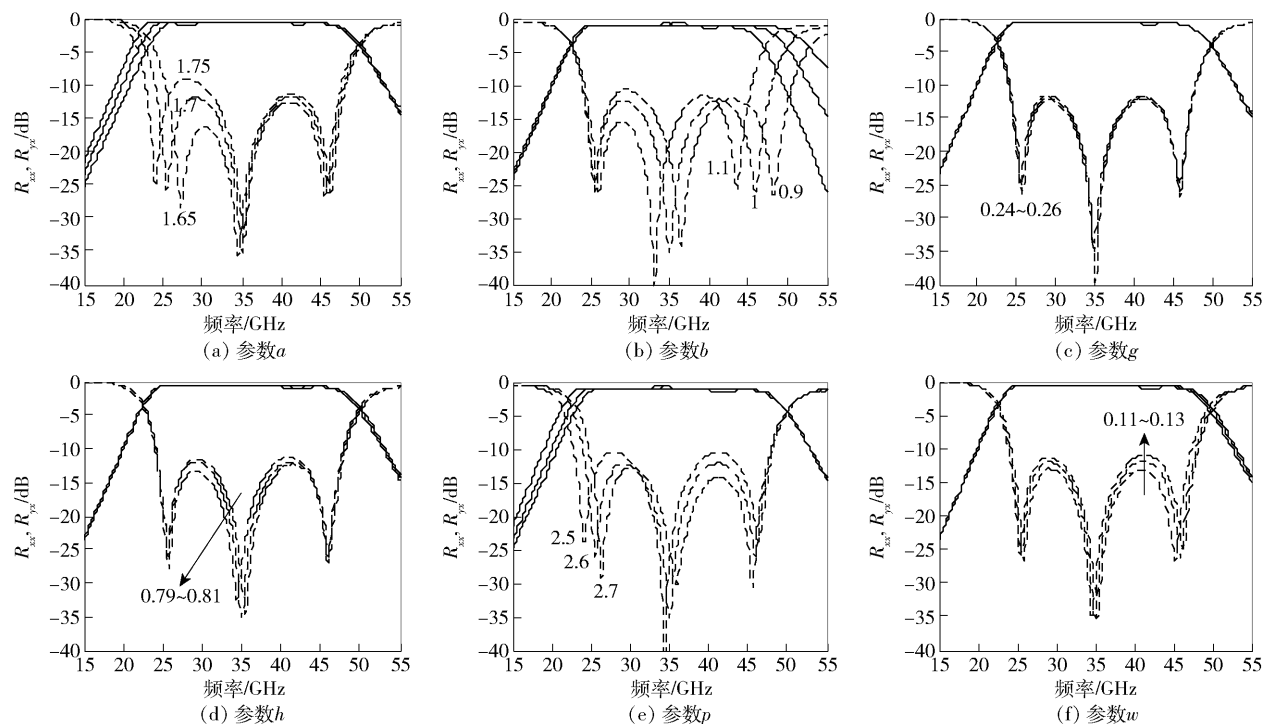


图4 各参数对极化旋转器性能的影响

2.2 角度稳定性

极化旋转器具有结构对称性,无论电磁波以垂直极化入射还是水平极化入射,极化旋转器的性能是对称的,因此这里只展示了水平极化入射的结果. 但是,当入射角度与反射平面的法向具有一定的偏差时,极化旋转器的性能也会有偏差,这一特性称为角度稳定性.

如图 1 所示,保持 φ 不变,把入射角 θ (与 z 轴夹角) 分别设置为 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$, 并且以 PCR

作为研究标准,极化转化率 PCR 的定义式为

$$P_{\text{PCR}} = \frac{|R_{yx}|^2}{|R_{xx}|^2 + |R_{yx}|^2} \quad (4)$$

以 x 极化入射为例进行仿真,结果如图 5 所示. 从图 5 可以看出,如果以 PCR 等于 0.5 为评判标准,那么该极化转换器在 22.5 ~ 50 GHz 范围内的角度稳定性能达到 45° ; 如果以 0.8 为评判标准,则该极化转换器在 24 ~ 47.8 GHz 范围内的角度稳定性为 30° ,说明该设计具有很好的角度稳定性.

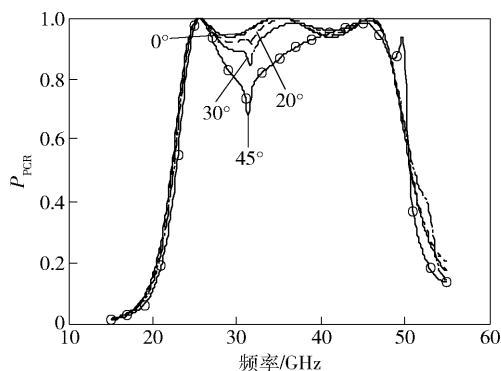


图5 入射角度对极化旋转器性能的影响

3 加工与测试

3.1 样品加工

采用高精度蚀刻工艺加工样品,样品的长、宽均为 150 mm,厚度为 0.8 mm. 介质基板采用相对介电常数为 4.4 的 FR4 板材. 介质基板四周预留定位孔,以便于在测试过程中固定. 加工的样品在工业显微镜下进行检视,显微镜经过校准后测试的各参数精度都在 10 μm 以内,如图 6 所示.

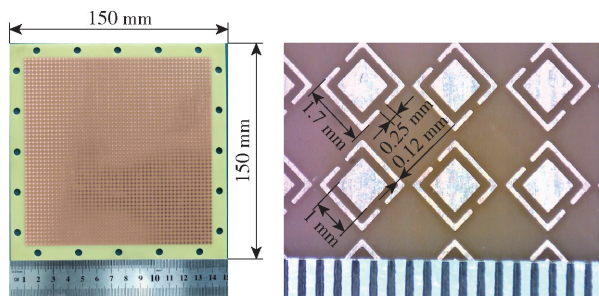


图6 加工样品及工业显微镜表征

3.2 测试结果

采用自由空间法进行测试,测试结构如图 7 所示. 将样品固定在样品支架上,样品周围铺设吸波材料,以减少杂波干扰. 将矢量网络分析仪 (AV3672D) 连接到发射喇叭和接收喇叭 (工作频率为 18 ~ 40 GHz),实验步骤如下:

- 1) 采用标准 SLOT(short load open thru) 方法校准连接喇叭的同轴线;
- 2) 将样品的背面对准喇叭天线作为背景进行测量 (样品背面为金属,可以作为全反射测量),将背景测量的信号记为 S_{21_air} ;
- 3) 将样品正面对准喇叭天线进行测量,得到样品的信号记为 $S_{21_sample_x}$;
- 4) 将接收喇叭旋转 90° 进行测量,得到样品的

信号记为 $S_{21_sample_y}$;

5) 计算反射系数, $R_{xx} = S_{21_sample_x} - S_{21_air}$, 以及 $R_{yx} = S_{21_sample_y} - S_{21_air}$.

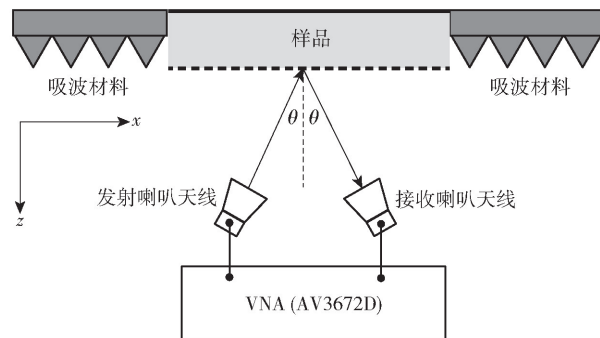
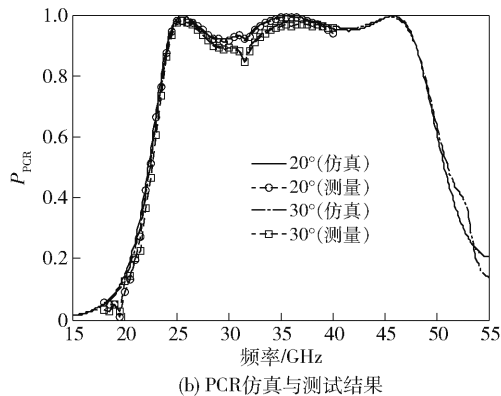
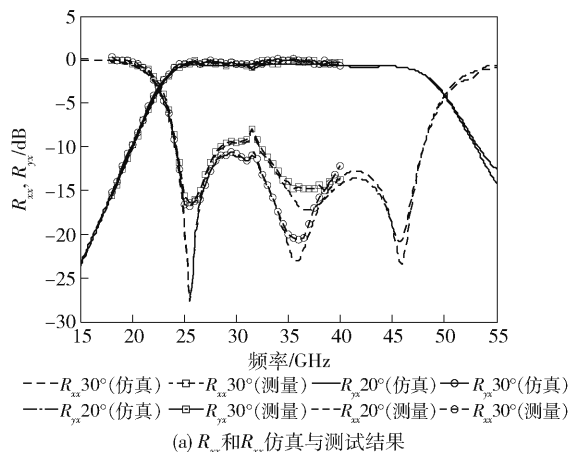


图7 测试结构

在整个测试过程中,应用了时域门技术以进一步减小杂散信号的干扰. 此外,喇叭天线具有一定的物理尺寸,因此无法测试 0° 和 10° 的情形下的反射系数,主要测试了 20° 和 30° 的情形下的反射系数,测试结果如图 8 所示.

从图 8 可以看出,测试结果和仿真结果的吻合度比较高,除了在谐振点处的谐振深度有所偏差,其他频率的偏差基本在 1 dB 范围内. 从 PCR 的结果

图8 仿真与测试结果在 θ 为 20° 和 30° 时的对比

可以看出,测试的 PCR 略低于仿真的 PCR,这是由于测试的 PCR 受到测量误差等诸多因素影响,但是在 24 ~ 47.8 GHz 范围内基本能达到 0.8,表面加工精度和测量精度都满足要求.

表 2 所示为带宽和 PCR 设计结果的对比. 从对比结果可以看到,要同时保障大带宽、高 PCR 和角度稳定性是一个具有挑战性的工作. PCR 比较高时,带宽较窄;角度稳定性较好时,PCR 和带宽却不足. 笔者所提的方法在 24 ~ 47.8 GHz 范围内的 PCR 能达到 0.8,角度稳定性能达到 30°,因此综合性能较好.

表 2 极化旋转器与其他样品的性能对比

文献	频率/GHz	-3 dB/%	PCR	角度/(°)
[13]	5.5 ~ 10.5	62.50	0.88	30
[14]	5 ~ 9.7, 11.2 ~ 15	63.50, 29.00	0.5	45
[15]	5 ~ 10.8	73.00	0.6	45
[16]	5.6 ~ 11.4	66.00	0.75	-
[17]	2.42 ~ 3.52	37.00	-	-
[18]	8 ~ 18	76.00	0.68	30
[19]	8 ~ 23	96.80	0.9	10
[20]	4.8 ~ 6.4	25.00	0.8	-
[21]	Ku 波段	20.00	0.8	-
本例	22.5 ~ 50	75.86	0.8	30

4 结束语

设计了一款采用正方形裂环和正方形贴片作为单元结构的宽带极化旋转器. 从仿真结果看,该极化旋转器具备了宽频带的工作特性,可工作在 22.5 ~ 50 GHz,并且具备较高的极化转换效率和角度稳定性. 即便以 0.8 的极化转换率为标准,在 24 ~ 47.8 GHz 该设计仍具有 30° 的角度稳定性. 基于矢量网络分析仪的自由空间测量方法,对极化旋转器进行了测试. 测试结果与仿真结果具备较好的吻合度. 与其他同类型极化旋转器的性能对比结果表明,该极化旋转器较好地兼顾了带宽、极化转换效率以及角度稳定性.

参考文献:

[1] 张新勋,周生华,刘宏伟. 目标极化散射特性对极化分集雷达检测性能的影响[J]. 雷达学报,2019, 8(4): 510-518.
Zhang Xinxun, Zhou Shenghua, Liu Hongwei. Influence of target polarization scattering characteristics on the detection performance of polarization diversity radar[J].

Journal of Radars, 2019, 8(4): 510-518.
[2] 杨洋,刘元安,吴帆. 一种非对称馈电的小型化高隔离度分集天线[J]. 北京邮电大学学报,2019, 42(3): 51-57.
Yang Yang, Liu Yuan'an, Wu Fan. An asymmetric feed compact high isolation diversity antenna[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019, 42(3): 51-57.
[3] 翟计全,马林,杨文军. 全极化雷达极化标校技术研究[J]. 电波科学学报,2019, 34(6): 806-813.
Zhai Jiquan, Ma Lin, Yang Wenjun. Polarization calibration technique of fully polarimetric radar[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2019, 34(6): 806-813.
[4] Liu Xiaoming, Qi Tao, Wang Chen, et al. A broadband ultra-thin polarization rotator using periodically loaded parallel strip-lines[J]. IEEE Access, 2021, 9: 25450-25457.
[5] Erickson N R, Grosslein R M. A low-loss 74-110 GHz faraday polarization rotator[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007, 55 (12): 2495-2501.
[6] Goldsmith P F. Quasioptical systems: Gaussian beam quasioptical propagation and applications [M]. New York: IEEE Press, 1998.
[7] 韩晓晓,童元伟. 基于 π 型结构双折射超表面的设计与应用[J]. 激光技术,2020, 44(1): 42-49.
Han Xiaoxiao, Tong Yuanwei. Design and application of birefringent metasurface based on π -shape structure[J]. Laser Technology, 2020, 44(1): 42-49.
[8] Liu Xiaoming, Cao Xiaohang, Yu Junsheng, et al. Polarization rotator of arbitrary angle based on simple slot-array[J]. AIP Advances, 2015, 5(12): 127142.
[9] Varikuntla K K, Singaravelu R. Ultrathin design and implementation of planar and conformal polarisation rotating frequency selective surface based on SIW technology[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2018, 12(12): 1939-1947.
[10] Arnieri E, Greco F, Boccia L, et al. A SIW-based polarization rotator with an application to linear-to-circular dual-band polarizers at K-/Ka-band [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(5): 3730-3738.
[11] Garcia-Marin E, Masa-Campos J L, Sanchez-Olivares P, et al. Bow-Tie-shaped radiating element for single and dual circular polarization[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(2): 754-764.

- [8] Liu Xiaolan, Gao Yue, Hu Fengye. Optimal time scheduling scheme for wireless powered ambient backscatter communications in IoT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 2264-2272.
- [9] Ye Yinghui, Shi Liqin, Chu Xiaoli, et al. Throughput fairness guarantee in wireless powered backscatter communications with HTT[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(3): 449-453.
- [10] Chen Yunfei, Zhao Nan, Alouini M S. Wireless energy harvesting using signals from multiple fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(11): 5027-5039.
- [11] Grant M, Boyd S. CVX: matlab software for disciplined convex programming accessed[EB/OL]. (2017-12-06) [2021-03-23]. Http://cvxr.com/cvx.
- [12] Boyd S, Vandenberghe L. Convex optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 5-14.

(上接第25页)

- [12] Mollaei M S M. Narrowband configurable polarization rotator using frequency selective surface based on circular substrate-integrated waveguide cavity[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1923-1926.
- [13] Zhao Jingcheng, Cheng Yongzhi. A high-efficiency and broadband reflective 90° linear polarization rotator based on anisotropic metamaterial[J]. Applied Physics B, 2016, 122(10): 1-7.
- [14] Khan M I, Tahir F A. An angularly stable dual-broadband anisotropic cross polarization conversion metasurface[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 122(5): 053103.
- [15] Khan M I, Fraz Q, Tahir F A. Ultra-wideband cross polarization conversion metasurface insensitive to incidence angle[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(4): 045103.
- [16] Meraj-E-Mustafa, Izhar R, Wahidi M S, et al. A broadband polarization rotator metasurface[C] // 2019 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Guangzhou: IEEE Press, 2019: 1-2.
- [17] Ghosh S, Saikia M, Srivastava K V. Switchable reflective metamaterial polarisation rotator[J]. Electronics Letters, 2016, 52(12): 1030-1032.
- [18] Zhang Linbo, Zhou Peiheng, Lu Haipeng, et al. Ultra-thin reflective metamaterial polarization rotator based on multiple plasmon resonances[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 1157-1160.
- [19] Zheng Qi, Guo Chenjiang, Vandenbosch G A E, et al. Ultra-broadband and high-efficiency reflective polarization rotator based on fractal metasurface with multiple plasmon resonances[J]. Optics Communications, 2019, 449: 73-78.
- [20] Cervený M, Ford K L, Tennant A. Reflective switchable polarization rotator based on metasurface with PIN diodes[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(3): 1483-1492.
- [21] Zhang Zongtang, Luyen H, Booske J H, et al. A dual-band, polarization-rotating reflectarray with independent phase control at each band[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(9): 5546-5558.
- [22] Pozar D M. Microwave engineering, third edition, Chapter 3[M]. New York: John Wiley, 2005.
- [23] Munk B A. Frequency selective surfaces, chapter 2[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2000: 26-62.