光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022052101

基于环形极子的太赫兹超宽带圆极化阵列天线

王树奇*，张浩楠

（西安科技大学 通信与信息工程学院，西安 710054）

摘　要： 以方环单极子天线为基础，设计了一种太赫兹频段超宽带圆极化微带阵列天线。提出的新型低剖面环形天线单元由 C 型结构和改进后的接地结构组成，实现了天线表面电流不对称流动以及电流的最优纵横比，辐射圆极化波；采用 2×4 天线阵列不仅提高了天线增益，而且增强了其方向特性。仿真结果表明，该阵列天线的阻抗带宽为 67.42%（193.86～391.02 GHz），圆极化轴比带宽可完全包含该频段，且在该频段内峰值增益为 15 dBi，在太赫兹通信设备中具有广阔的应用前景。

关键词： 太赫兹；超宽带；圆极化；微带阵列天线

中图分类号： TN822　**文章编号：** 1001－5868(2022)05－0881－05

Terahertz UWB Circularly Polarized Array Antenna Based on Ring Monopole

WANG Shuqi，ZHANG Haonan

（School of Communication and Information Engineering，Xi'an University of Science and Technology，Xi'an 710054，CHN）

Abstract： Based on the square ring monopole antenna element，an ultra wideband circularly polarized microstrip array antenna in terahertz band was designed. By changing the structure of the ring antenna element，the current on the antenna surface could flow asymmetrically，and the circularly polarized wave radiation could be realized by changing the aspect ratio of the current using triangular perturbation. Using 2×4 antenna array not only increased the gain of the antenna，but also optimized the directional characteristics of the antenna. The simulation results show that the antenna array operates at 193.86～391.02 GHz，the relative bandwidth is 67.42%，and the maximum gain can reach 15 dBi. It has a good application prospect in terahertz communication.

Key words： terahertz；ultra-wide band；circular polarization；microstrip array antenna

0　引言

太赫兹通信具有传输速率高、容量大、方向性强及穿透性好等优势，为未来无线通信带来了新的机遇和挑战[1]。太赫兹频段圆极化天线设计对于提高通信质量具有重要意义。

太赫兹频段天线包括线极化天线和圆极化天线两类。在线极化天线设计中，李佳宁等基于石墨烯设计了分布在 2.652～4.565 THz 频段的具有 6 种可调模式的频率可重构太赫兹微带天线，在每个频率可调模式内阻抗带宽均大于 10%[2]；此外，设计了频率可重构石墨烯线极化贴片天线，该天线有 26 GHz 的频率可调范围[3]。董耘琪等设计了 520 GHz（508～532 GHz）和 680 GHz（581～766 GHz）2 个工作频段的太赫兹双频微带天线，680 GHz 频段的相对带宽达到 27.5%[4]。

和线极化天线相比，圆极化天线具有抗多径衰落等特点[5]，Le 等设计了一种太赫兹圆极化漏波天线，其阻抗带宽达到 41.1%（145～220 GHz），轴比带宽为 9%（162～179 GHz）[6]。Warmowska 等设计了太赫兹圆极化天线阵列，其阻抗带宽与轴比带

收稿日期：2022－05－21.

基金项目：国家自然科学基金项目(61901357).

* 通信作者：王树奇　E-mail：wangshuqi@xust.edu.cn

宽分别为 8.57%(335～365 GHz)和 8.45%(340～370 GHz)[7]。Wu 等设计了太赫兹频段圆极化菲涅尔透镜天线,其阻抗带宽为 18.8%(265～320 GHz),该频段内轴比(AR)小于 3 dB[8]。Zhao 等设计了一种太赫兹圆极化双扇形槽天线,实现了左旋和右旋两种极化方式,其阻抗带宽为 2%(490～500 GHz),在该频段内轴比小于 1.5 dB[9]。Shu 等设计了一种工作在 80～110 GHz 的圆极化喇叭天线[10],但是其剖面较高,不适合集成于设备中。

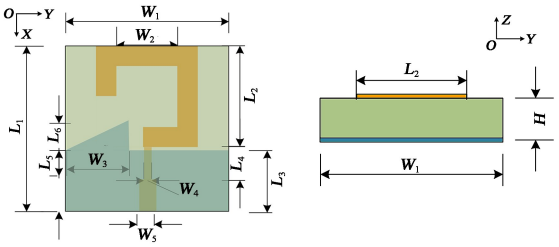
为了降低天线尺寸及剖面厚度,在单极子方环天线[11]的基础上,通过改变天线环形的结构,使天线表面电流形成不对称流动,在带有缝隙的长方形地板边缘加载小型三角形微扰结构,调控天线表面金属部分的横纵向电流大小以及方向,实现宽带圆极化辐射。在此基础上,将天线组成 2×4 天线阵列,不仅提高了天线的增益,而且增强了方向特性。

1 天线结构设计

1.1 天线单元设计

在单极子天线设计中,天线的环形部分周长比拟于中心频率的波长,因此辐射部分的方环的边长约等于 $0.25\lambda_0$,小于圆环[12]的直径($0.32\lambda_0$),和圆环相比可以实现天线的小型化。

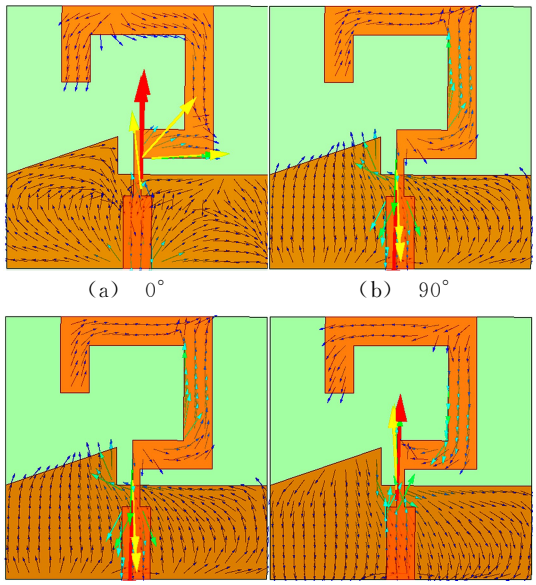
一种新型的超宽带低剖面圆极化天线单元如图 1 所示,介质板上层为"?"型非闭合方环形状天线,位于介质板下层为带三角形微扰结构的长方形金属片,使用阶梯式馈电方式。介质板选用高频性能良好[13]的 Rogers5880,其相对介电常数为 2.2,损耗角正切为 0.000 9。利用 HFSS 进行仿真并优化得到该天线的参数为:$W_1=0.612$ mm,$W_2=0.22$ mm,$W_3=0.26$ mm,$W_4=0.018$ mm,$W_5=0.066$ mm。$H=0.05$ mm,$L_1=0.612$ mm,$L_2=0.352$ mm,$L_3=0.206$ mm,$L_4=0.09$ mm,$L_5=0.17$ mm,$L_6=0.1$ mm,天线总体尺寸为 0.612 mm×0.612 mm×0.05 mm。



(a) 俯视图 (b) 侧视图

图 1 超宽带圆极化天线单元

当天线的工作频率为 340 GHz 时,馈电相位分别为 0°,90°,180°和 270°时,该天线的表面电流分布如图 2 所示。电流矢量总方向在馈电端口相位为 0°时指向 $+Y$,90°时转向 $-X$,在 180°时则变为 $-Y$ 方向,270°时又朝向 $+X$ 方向。如沿 $+Z$ 方向观测,天线电流总矢量方向的旋转变化符合右手螺旋规则;如沿 $-Z$ 方向观测,则符合左手螺旋规则。因此该微带单极子天线分别在 $+Z$ 方向和 $-Z$ 方向辐射右旋圆极化波和左旋圆极化波。



(a) 0° (b) 90°

(c) 180° (d) 270°

图 2 340 GHz 天线在不同馈电相位下的表面电流分布

1.2 天线阵列设计

为了提高增益和方向性能指标,设计的 2×4 天线阵列结构如图 3 所示,在阵元间距计算中,以 340 GHz 频段的圆极化轴比低于 3 dB,S_{11} 低于 −10 dB 为目标,通过优化可得阵元横向间距 $D_1=v\times\lambda_0$,纵向间距 $D_2=u\times\lambda_0$(λ_0 为工作波长,$v=0.95$,$u=0.72$)。该阵列天线的方向特性如图 4 所示,增益曲线如图 5 所示。

天线阵列主瓣最大辐射位于 0°和 180°方向,工作频段内峰值增益可达 15 dBi,然而此天线阵列在圆极化轴比低于 3 dB 时,会产生部分旁瓣。

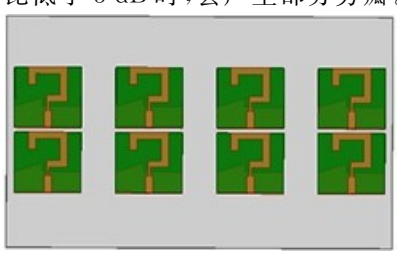
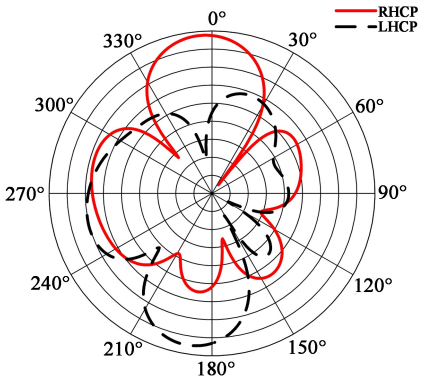
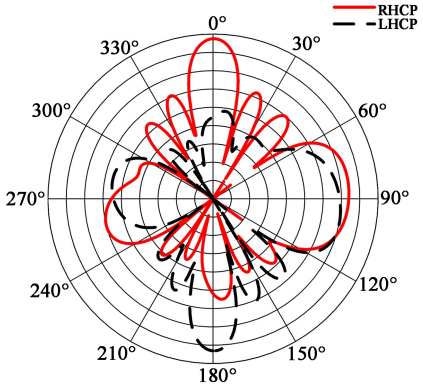


图 3 2×4 阵列天线结构



（a）　340 GHz，*XOZ* 面



（b）　340 GHz，*YOZ* 面

图 4　阵列天线方向图

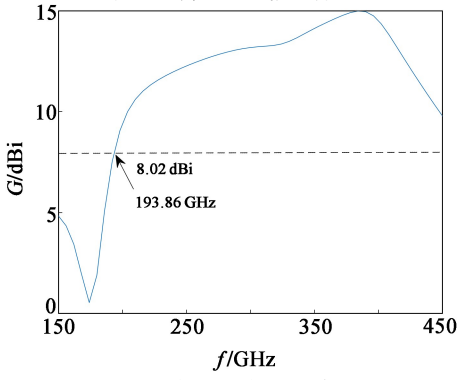
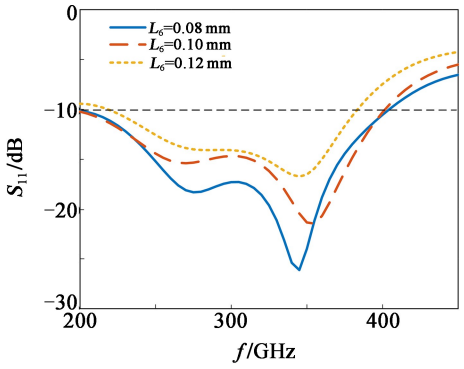


图 5　阵列天线增益特性

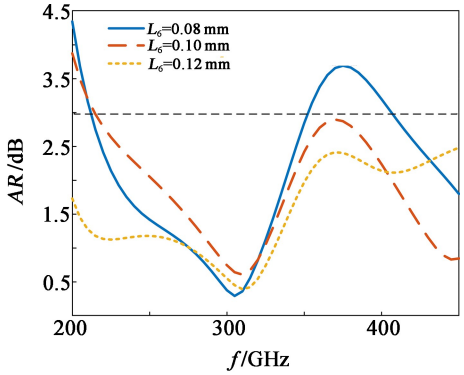
2　单元天线分析与优化

为了实现圆极化辐射，将环形天线单元设计为 C 字形，实现了电流的不对称流动；三角形微扰结构调节了天线表面的横纵电流比例，为天线的圆极化起到了重要的作用。

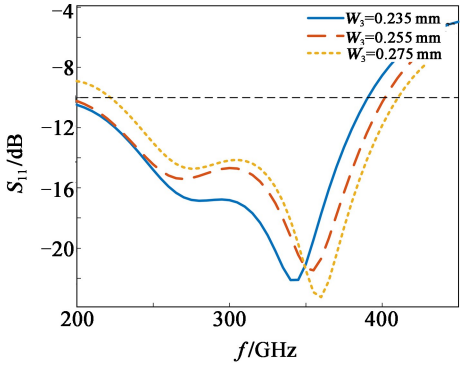
微扰结构的边长对天线单元的 S_{11} 和圆极化轴比特性的影响如图 6 所示。其中图 6(a)和 6(b)为短板 L_6 不同时 S_{11} 和圆极化轴比特性，当短边 L_6 为 0.08 mm 时阻抗带宽较宽，但圆极化轴比在 370 GHz 附近大于 3 dB；当短边 L_6 取 0.12 mm 时轴比带宽虽宽，但阻抗带宽却受限，优化后 L_6 选择 0.1 mm。图 6(c)～(d)为长边 W_3 不同时的 S_{11} 和圆极化轴比特性，当长边 W_3 取 0.235，0.255 和



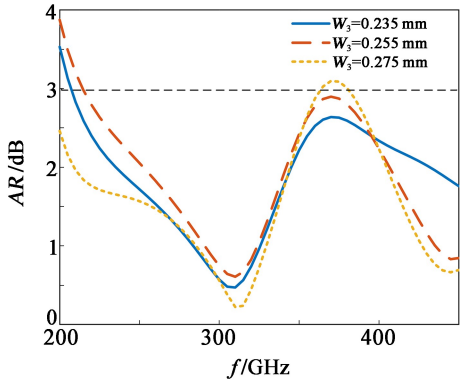
（a）　L_6 对 S_{11} 的影响



（b）　L_6 对轴比带宽的影响



（c）　W_3 对 S_{11} 的影响



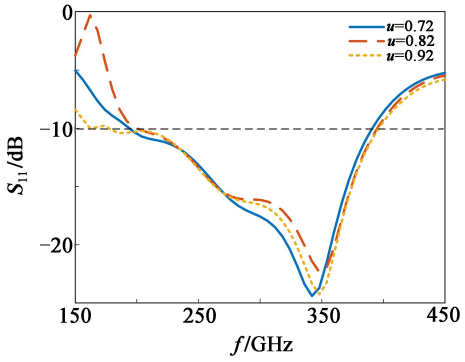
（d）　W_3 对轴比带宽的影响

图 6　微扰结构对天线 S_{11} 和轴比带宽的影响

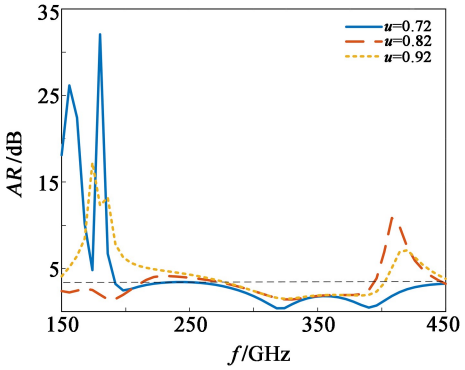
0.275 mm 时，阻抗带宽保持稳定，但轴比带宽变化较大，当 $W_3=0.275$ mm 或 0.255 mm 时，阻抗带宽变化很小，轴比带宽基本不变，但 $W_3=0.275$ mm 时天线的工作带宽较窄，因此最终选取 $W_3=0.255$ mm。

3 天线阵列分析与优化

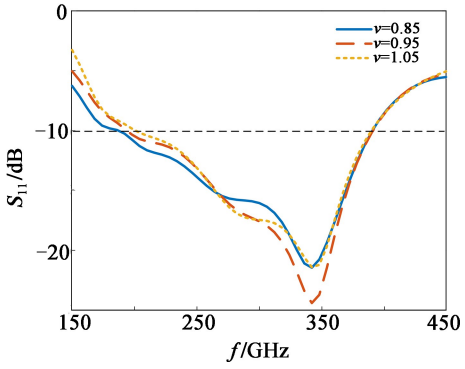
天线阵列的性能取决于单元间距，2×4 阵列天线不同单元间距对 S_{11} 以及圆极化轴比性能影响如图 7 所示。当 u 分别为 0.72，0.82 和 0.92 时，天线的阻抗带宽保持稳定，但轴比带宽受到较大影响，为了使轴比在 $S_{11}<-10$ dB 的条件下小于 3 dB，选取 u 为 0.72。当 v 分别为 0.85，0.95 以及 1.05 时，



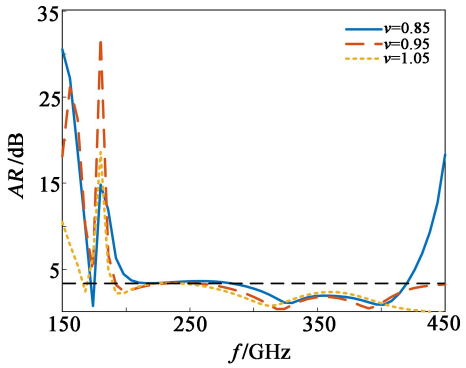
(a) u 对 S_{11} 的影响



(b) u 对轴比带宽的影响



(c) v 对 S_{11} 的影响



(d) v 对轴比带宽的影响

图 7 阵列结构对天线 S_{11} 和轴比带宽的影响

天线的阻抗带宽逐渐变宽，当 v 为 0.95 和 1.05 才能同时满足 S_{11} 和轴比的要求，然而 v 取 1.05 时阻抗带宽较窄，所以选取 v 为 0.95；该天线阵列在 193.86～391.02 GHz 有着良好的超宽带圆极化性能，相对带宽达到 67.42%。

圆极化阵列天线与现有文献中天线的性能对比如表 1 所示，文献[6,8]阻抗带宽性能良好，但轴比带宽较窄；文献[7,9,11]天线阻抗带宽和轴比带宽均较窄；本文设计的天线阻抗带宽和轴比带宽均达到 67.42%，峰值增益为 15 dBi，不仅性能良好，且结构简单易于集成。

表 1 天线性能对比

文献	阻抗带宽/%	轴比带宽/%	峰值增益/dBi
[6]	41.09	9	16
[7]	8.57	8.45	18.4
[8]	>40	18.8	27.4
[9]	>2	>2	12.5
[11]	8	<8	2.2
本文	67.42	>67.42	15

4 总结

本文设计了一款太赫兹频段的超宽带圆极化微带天线阵列。通过将方环辐射单元设计为不对称的 C 字形，以改变天线表面电流的流向；以及在接地板加载三角结构调控横纵电流比，实现圆极化波辐射；设计并优化了 2×4 天线阵列，该天线工作在 193.86～391.02 GHz 频段，在 $+Z$ 和 $-Z$ 方向分别辐射右旋圆极化波和左旋圆极化波，与目前太赫兹圆极化天线相比具有更宽的工作带宽，且该天线阵列设计简单，剖面低，在太赫兹通信设备中具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] Song H J, Nagatsuma T. Present and future of terahertz communications[J]. IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1): 256-263.

[2] 李佳宁，李春树，程朝阳，等. 基于石墨烯的多模式可重构太赫兹微带天线[J]. 激光与光电子学进展，2022，59(3)：239-246.
Li Jianing, Li Chunshu, Cheng Zhaoyang, et al. Multi-mode reconfigurable terahertz microstrip antenna based on graphene [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(3): 239-246.

[3] 李佳宁，李春树，刘　煜，等. 基于石墨烯材料的太赫兹波段频率可重构天线[J]. 传感器与微系统，2021，40(7)：70-73.
Li Jianing, Li Chunshu, Liu Yu, et al. Reconfigurable antenna in THz band frequency based on grapheme material [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(7): 70-73.

[4] 董耘琪，黄　波，赵欣悦，等. 基于缺陷接地结构的太赫兹双频微带天线[J]. 强激光与粒子束，2018，30(7)：81-85.
Dong Yunqi, Huang Bo, Zhao Xinyue, et al. Terahertz dual band microstrip antenna based on defected grounding structure [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(7): 81-85.

[5] Ellis M S, Zhao Z, Wu J, et al. A novel simple and compact microstrip-fed circularly polarized wide slot antenna with wide axial ratio bandwidth for C-band applications[J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2016, 64(4): 1552-1555.

[6] Le Z Q, Chen B J, Chan K F, et al. Terahertz circularly-and linearly polarized leaky-wave antennas based on spin-orbit interaction of spoof surface plasmon polaritons [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2021, 69(8): 4347-4358.

[7] Warmowska D, Abdalmalak K A, Munoz L E G, et al. High-gain, circularly-polarized THz antenna with proper modeling of structures with thin metallic walls[J]. IEEE Access, 2020, 8: 125223-125233.

[8] Wu G B, Zeng Y S, Chan K F, et al. 3-D printed circularly polarized modified Fresnel lens operating at terahertz frequencies[J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2019, 67(7): 4429-4437.

[9] Zhao P, Liu Y, Lu H, et al. Experimental realization of terahertz waveguide-fed circularly polarized double-fan-shaped slot antenna [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett., 2017, 16: 2066-2069.

[10] Shu C, Hu S, Cheng X, et al. Wideband dual-circular-polarization antenna with high isolation for millimeter-wave wireless communications[J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2022, 70(3): 1750-1765.

[11] Pazoki R, Kiaee A, Naseri P, et al. Circularly polarized monopole L-shaped slot antenna with enhanced axial-ratio bandwidth [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett., 2015, 15: 1073-1076.

[12] 李振亚，竺小松，张建华，等. 新型超宽带圆极化印刷天线[J]. 系统工程与电子技术，2019，41(1)：9-13.
Li Zhenya, Zhu Xiaosong, Zhang Jianhua, et al. New type ultra-wideband circularly polarized printed antenna[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(1): 9-13.

[13] 庄建兴，成　立，洪　伟，等. 基于时域光谱技术的材料特性研究[J]. 微波学报，2016，32(2)：6-10，20.
Zhuang Jianxing, Cheng Li, Hong Wei, et al. Study of material property based on time-domain spectroscopy[J]. J. of Microwaves, 2016, 32(2): 6-10, 20.

作者简介：

王树奇(1974—)，男，陕西省大荔县人，博士，副教授，硕士生导师，主要从事复杂电磁环境数值模拟、微波射频电路与天线设计等方面的研究。