



·高功率微波技术·

## 切比雪夫馈电网络开口谐振环天线阵列\*

范银玲, 卢萍, 黄卡玛

(四川大学 电子信息学院, 成都 610065)

**摘 要:** 提出了一种基于切比雪夫馈电网络的  $13 \times 14$  开口谐振环天线阵列。该天线阵列由天线单元和切比雪夫馈电网络组成。根据八木天线原理, 该天线阵列设计的辐射贴片作为天线单元的引向器, 金属地面作为反射器; 辐射贴片由开口谐振环结构以及 I 型谐振结构组成, 增强天线单元的辐射能力并提高增益; 天线单元的馈电端由圆弧单极子组成, 提高调节天线单元阻抗匹配的灵活性; 电流矩阵指导非均匀电流分布切比雪夫馈电网络的设计, 减小天线阵列的旁瓣; 天线单元垂直插入馈电网络的基板, 减少带有馈电网络阵列的口径大小。通过实物加工后, 测试结果表明, 该天线阵列在工作频率点 10.1 GHz 处实现了 22.3 dBi 的增益,  $E$  面和  $H$  面旁瓣电平分别为 -16 dB 和 -17.66 dB, 具有高增益、低副瓣的特点。

**关键词:** 切比雪夫平面阵; 开口谐振环; 高增益; 低旁瓣电平

中图分类号: TN827

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220401

## A planar split ring resonator antenna array fed by Chebyshev network

Fan Yinling, Lu Ping, Huang Kama

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** A  $13 \times 14$  planar split ring resonator (SRR) antenna array with the Chebyshev feed network is proposed. This antenna array consists of antenna elements and a Chebyshev feed network. Based on the principle of the Yagi antenna, the radiating patch is designed as an antenna element of the director with the metal ground being the reflector. The radiating patch is composed of three SRRs, an I-shaped resonator and two circular monopoles to enhance the radiation capability of the antenna element and improves the antenna gain. The feed of the antenna element is composed of arc monopoles, which improves the flexibility of adjusting the impedance matching. Furthermore, the calculation of the current matrix is used to guide the design of the Chebyshev feed network, and the non-uniform current distribution is used to reduce the side lobes. Moreover, the antenna element substrate is vertically erected on the substrate of the feed network to reduce the aperture size of the array with the feed network. Finally, the antenna array achieves a high gain of 22.3 dBi and low sidelobe level of -16 dB and -17.66 dB in  $E$ -plane and  $H$ -plane respectively.

**Key words:** Chebyshev planar array, split ring resonator, high gain, low sidelobe level

天线作为无线通信和雷达系统的关键辐射部件, 随着通信技术的快速发展, 对天线的性能提出了更高的要求。其中, 高增益天线具有良好的发射或接收无线信号的能力, 低旁瓣的天线具有较强的抗干扰能力。因此, 在无线通信和雷达系统中, 天线需要具有高增益和低旁瓣的性能。

均匀激励和等间距的阵列通常具有 -14 dB 以上的旁瓣电平<sup>[1]</sup>, 这不足以满足通信的辐射性能需求。而之后的研究发现, 非均匀电流分布可以降低旁瓣电平。在文献 [2] 中, 提出了一种  $4 \times 4$  的 X 波段开槽微带贴片天线阵列, 该阵列由非均匀电流分布馈电网络以抑制旁瓣电平, 实现旁瓣电平约 18 dB, 比均匀电流分布的贴片天线阵列优化了 5 dB。为了进一步降低旁瓣, 对另外一些经典的非均匀激励幅度分布进行了更深入的研究, 已经广泛应用于控制旁瓣电平, 如二项式分布<sup>[3-4]</sup>、泰勒分布<sup>[5-7]</sup>、切比雪夫分布等。

\* 收稿日期: 2022-11-29; 修订日期: 2023-01-18

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51907130)

联系方式: 范银玲, 1019079189@qq.com。

通信作者: 卢萍, pinglu90@scu.edu.cn。

通过二项分布、泰勒分布、切比雪夫分布对阵列单元的激励,都可减小旁瓣电平。其中,二项分布的系数权重变化太大<sup>[8]</sup>,随着单元数量的增加方向性变差,不适用于大阵列。泰勒分布辐射方向图产生了一个内部小旁瓣保持在恒定水平<sup>[8]</sup>,虽然随着单元数量的增加方向性变好,但切比雪夫对旁瓣抑制能力更强<sup>[9]</sup>,并且切比雪夫分布阵列能以较低的旁瓣电平提供较好的方向性,在相同的阵列尺寸和旁瓣电平下提供最窄的波束宽度。

切比雪夫分布被广泛用于线阵设计<sup>[10-15]</sup>。一些研究将切比雪夫运用在线性阵列功分器<sup>[10-11]</sup>的设计。在文献[10]中,线性阵列采用多层介质结构,并且利用切比雪夫分布设计功分器并单独印刷在基板上,它实现了约 20 dB 的旁瓣电平抑制,阵列的测量增益为 11.39 dBi。但是,它采用并联馈电网络和多层覆盖层设计,结构略显复杂。为了简化结构,研究者提出了将切比雪夫分布运用在梳状阵列天线<sup>[12-15]</sup>。其中,文献[12]提出一种用于 24 GHz 雷达的紧凑型微带梳状阵列,通过对相邻单元的馈线调整实现非均匀电流切比雪夫分布,实现了天线增益为 12.2 dBi,旁瓣电平为 -28.2 dB,具有高旁瓣抑制作用。

在切比雪夫分布运用于线性阵列天线设计时,对旁瓣抑制能力较强,但不能实现高增益,将其扩展到平面阵列<sup>[16-20]</sup>应用中,提高增益,并且使波束更集中。在文献[16]中,设计了一个 8×4 的平面天线阵列,采用切比雪夫分布设计功分器,达到非均匀电流分布的目的,实现了阵列的增益为 21 dBi,  $E$  面和  $H$  面的旁瓣电平分别为 -19 dB 和 -17 dB,但该阵列设计运用多级 T 型功分器,导致馈线损耗较高。后续研究将一分  $N$  串联功分器并联构成  $N \times M$  的平面阵列馈电网络<sup>[18-20]</sup>,有效提高增益,降低旁瓣。文献[18]提出了一种双端口网络 4×14 平面阵列,其设计可以减少辐射贴片和传输线之间不连续造成的误差,在 77 GHz 时旁瓣电平小于 -18.6 dB,天线增益达到 22 dBi。

本文设计了一个切比雪夫馈电网络的 13×14 开口谐振环天线阵列,由天线单元和切比雪夫馈电网络组成。采用开口谐振环和 I 型谐振结构设计天线单元,提高天线的增益;切比雪夫分布指导非均匀电流分布馈电网络的设计,减小天线阵列的旁瓣;此外,天线单元垂直插入馈电网络的基板,减少阵列的口径大小。测试结果表明,该阵列具有高增益、低副瓣的特点,增益达到 22.3 dBi,旁瓣电平低于 -16 dB。

## 1 天线单元设计与分析

本文设计天线单元结构如图 1 所示,天线单元由辐射结构、介质基板、金属地组成。辐射结构印刷在介质基板上,介质基板采用 Rogers RO4003,介电常数  $\epsilon_r=3.55$ ,基底厚度  $H=1.524$  mm,损耗正切  $\tan\delta=0.0027$ 。如图 1 所示,天线单元的辐射结构由 3 个开口谐振环、1 个 I 型谐振结构和 2 个圆弧单极子组成。3 个开口谐振环均采用相同的内径  $R_1$  以及外径  $R_2$ ,区别在于最下方开口谐振环开口宽度  $G_1$ ,上方两个开口谐振环开口宽度  $G_2$ ,I 型谐振结构位于上面两个谐振环的中心。两个圆形单极子内径为  $R_3$  并且环宽度为  $S_1$ ,弧度为  $\theta$ 。此外,天线单元垂直插入馈电网络的基板上,插入部分是天线单元下方延长介质基板,延伸长度  $H_s$ 。天线单元主要参数尺寸如表 1 所示。

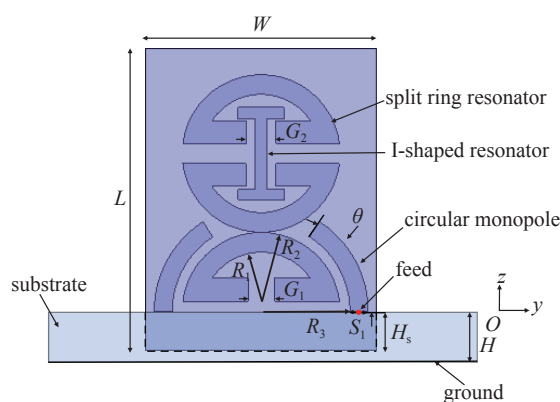


Fig. 1 Structure of antenna element  
图 1 天线单元结构

表 1 天线单元主要参数尺寸  
Table 1 Size of main parameters

$L/\text{mm}$	$W/\text{mm}$	$H/\text{mm}$	$H_s/\text{mm}$	$R_1/\text{mm}$	$R_2/\text{mm}$	$R_3/\text{mm}$	$S_1/\text{mm}$	$G_1/\text{mm}$	$G_2/\text{mm}$	$\theta/(\circ)$
9.2	7	1.524	1.2	1.82	2.4	2.7	0.6	0.8	1	55

天线单元的设计基于八木天线的工作原理,地平面作为反射器,辐射结构作为导向器来提高天线的增益。此外,辐射结构的 3 个开口谐振环之间的相互耦合也提高了增益。同时,圆形单极子用来激励辐射贴片,通过改变圆形单极子的长度来改变天线单元输入阻抗。其中,开口谐振环在天线单元设计中有着重要作用。文献[21]研究表明开口谐振环的电场在开口侧强,在远离开口侧磁场强,在该理论基础上进行了天线单元辐射贴片的设计,并对其进行仿真,其电场分布如图 2 所示。

图 3 为天线单元的仿真结果的  $S$  参数和辐射方向图。如图 3(a)所示,天线单元在 10.1 GHz 处谐振,谐振点处  $S$  参数为 -18 dB。图 3(b)显示了在 10.1 GHz 时  $E$  面(图 1 的  $yOz$  面)和  $H$  面(图 1 的  $xOz$  面)的仿真辐射方向图。在

工作频率下,所提出的天线单元在  $z$  方向有一个稳定的增益,约为 7 dBi。

## 2 切比雪夫平面阵列设计

将设计的天线单元扩展组成平面阵列,使获得更高的天线增益。此外,若不对天线单元的激励端进行非均匀电流比加权,旁瓣电平通常高于  $-14$  dB。因此为了减少旁瓣电平,采用非均匀电流分布的切比雪夫馈电网络为天线单元进行馈电。

### 2.1 馈电网络设计

第一类切比雪夫多项式为

$$T_m(x) = \cos(mu) \quad (1)$$

式中:  $T_m(x)$  表示为以  $x$  为自变量的  $m$  次切比雪夫多项式,其中,  $x$  与  $u$  的关系为  $x = \cos u$ 。

将三角函数恒等式  $\cos[(m+1)u] + \cos[(m-1)u] = 2\cos m\cos u$  代入公式(1),得到切比雪夫多项式的递推公式为

$$T_{m+1}(x) = 2xT_m(x) - T_{m-1}(x) \quad (2)$$

根据公式(1)~(2),编写切比雪夫阵列综合算法,得到每个单元贴片的电流激励振幅比为  $0.229:0.313:0.478:0.65:0.811:0.933:1:1:0.933:0.811:0.65:0.478:0.313:0.229$ 。此外,串联馈电网络的优点是损耗低,结构简单,辐射效率高。因此,根据得到的电流激励振幅比,将  $1 \times 14$  线性阵列设计成串联馈电网络。

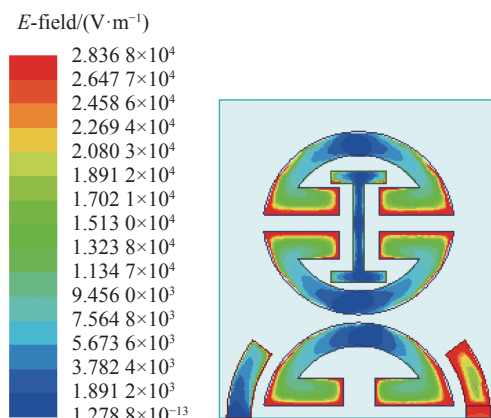


Fig. 2 Electric field distribution

图 2 电场分布

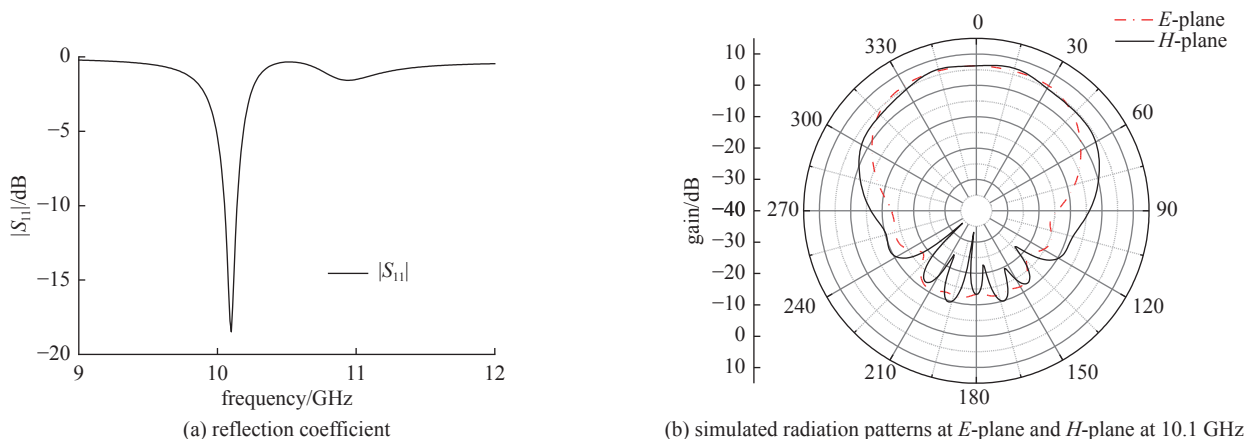


Fig. 3 Simulation results of the antenna element

图 3 天线单元仿真结果

如图 4 所示,该结构是串联馈电网络的一个阻抗匹配结构。阻抗匹配结构的电流分布是通过改变矩形微带的长度和宽度来调整的,可以实现电流的不均匀分布。此外,该阻抗匹配结构由三条不同尺寸的矩形微带组成,图中显示了阻抗匹配结构的相关参数。图 4 中:  $L_0$  是阻抗匹配结构的总长度,它决定了天线单元之间的距离,是工作频率对应波长的 0.6 倍;  $W_1$  是天线单元馈电端微带线的宽度;  $W_2$  是实现不均匀电流分配的微带线的宽度;  $W_3$  是调整前后阻抗匹配结构的阻抗微带线的宽度。

在阻抗匹配结构的基础上,采用高低特性阻抗的阶梯式阻抗结构传输线进行阻抗变换,实现非均匀电流分布的馈电网络。设计的串联馈电网络如图 5 所示。

串联馈电网络设计完成后,采用具有阶梯阻抗结构的传输线作为主支路,将串联馈电网络并联。主分支部分的电流分布也采用切比雪夫非均匀分布馈电进行设计。此外,从中

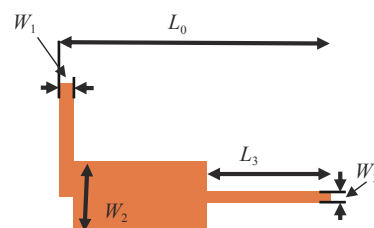


Fig. 4 Impedance matching structure

图 4 阻抗匹配结构



Fig. 5 Model of series feed network

图 5 串联馈电网络

心向外的电流激励振幅比为 1:0.909:0.747:0.548:0.349:0.222, 根据电流比计算主分支部分的宽度完成馈电网络设计。最后, 通过仿真对馈电网络进行优化设计, 如图 6 所示。在 10.1 GHz 的工作频率下, 阵列馈电网络上的电流分布如图 7 所示。正如预期的那样, 馈电网络贴片表现出不均匀分布, 越靠近中心其电流越强。

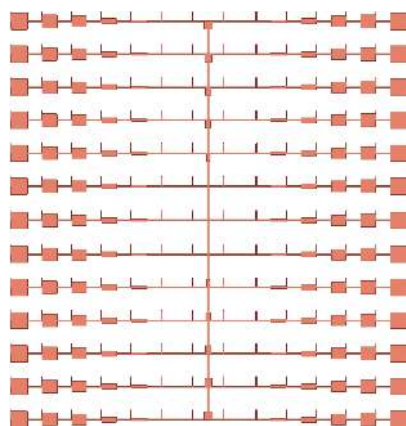


Fig. 6 Feed network  
图 6 馈电网络

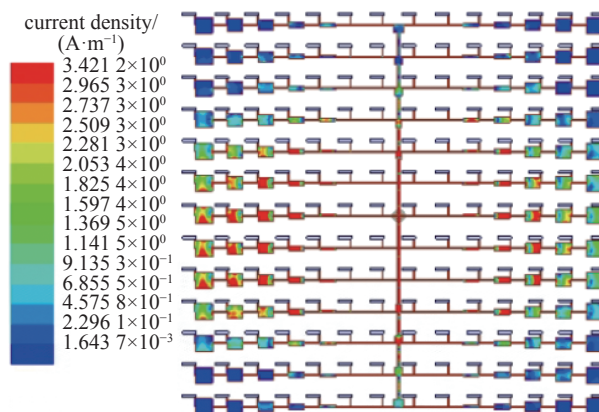


Fig. 7 Surface current distribution on the antenna array  
图 7 阵列电流分布

### 2.2 切比雪夫平面阵列设计

切比雪夫平面阵列结构如图 8 所示, 13×14 平面天线阵列由切比雪夫馈电网络、天线单元、介质基板和金属地组成。馈电网络的介质基板选取与天线单元介质基板一致。切比雪夫馈电网络、天线单元辐射结构以及金属地仿真时设定为理想导体。为保证馈电端一致, 统一选取天线单元中的右边位置圆弧单极子进行馈电, 最终阵列天线为不对称结构。其中, 天线单元间距设定为 0.6 倍波长, 天线单元采用垂直竖立插入在馈电网络的介质基板上。此外, 采用同轴接头在馈电网络中心对其进行馈电。

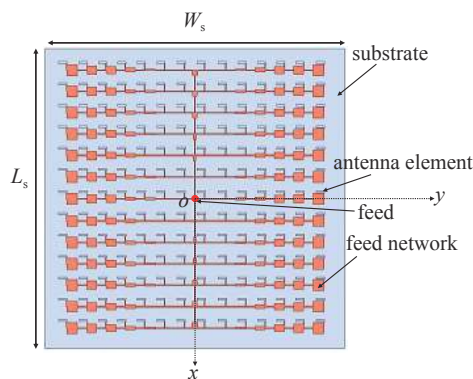


Fig. 8 Chebyshev planar array  
图 8 切比雪夫平面阵列

### 3 仿真测试结果与分析

利用电磁仿真软件 (Ansoft HFSS) 对天线阵列建模并进行仿真优化, 制作实物如图 9 所示, 其中, 切比雪夫馈电网络开口谐振环天线阵列尺寸为 250 mm×250 mm。本设计天线阵列  $S$  参数的测量是使用安捷伦矢量网络分析仪。仿真和测量的  $S$  参数与频率的关系图如图 10 所示。天线阵列仿真和测量的  $S$  参数在工作频率 (10.1 GHz) 时,  $|S_{11}| \leq -10$  dB。此外, 仿真结果谐振频率为 9.84 GHz 和 10.18 GHz, 测量谐振频率为 9.81 GHz 和 10.33 GHz。从以上分析得到仿真和测量的  $S$  参数有所误差以及第二谐振点频率偏移 150 MHz, 原因分析如下: (1) 将天线单元插入到馈电网络介质基板中需进行挖槽, 加工时采用圆头铣刀进行挖槽, 而在仿真设计中设定的是直角长方体的槽, 使得

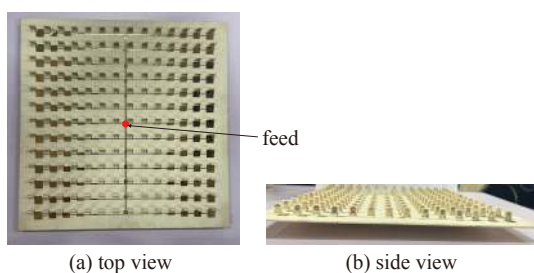


Fig. 9 Photographs of the proposed antenna  
图 9 天线阵列实物图

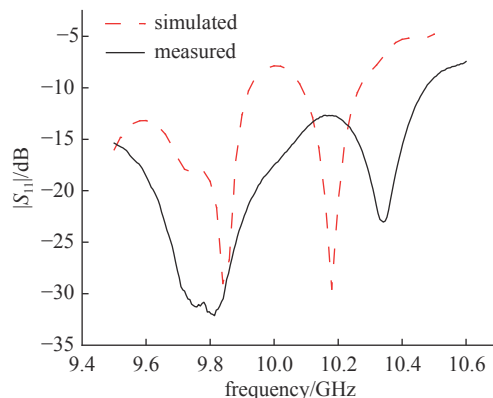


Fig. 10 Simulated and measured  $S$ -parameter  
图 10  $S$  参数仿真测试结果

实物与仿真结果有所误差；(2)天线单元馈电端微带线的长度对阵列  $S$  参数影响较大，加工制作时有所误导致频偏；(3)实际使用的同轴接头内导体长度比仿真设计的内导体长度长，在实物加工焊接时需对同轴接头内导体进行截断处理，当截断后的同轴接头内导体长度与仿真设定长度有所偏差时，也会导致  $S$  参数有所误差。

该天线阵列的辐射方向图在微波暗室中进行测量。对仿真与测试的  $S$  参数进行分析得到第二谐振点频率偏移 150 MHz，测试时工作频率点 10.1 GHz 偏移到 10.25 GHz，考虑到加工后的阵列不方便对馈电端微带线的长度进行调节，所以在进行辐射方向图测试时，选取的是 10.1 GHz 频偏后的频率点 10.25 GHz 进行方向图测量。图 11 为在工作频率点时的仿真和测量辐射方向图，其中图 11(a)为  $E$  面(图 8 的  $yoZ$  面)辐射方向图，图 11(b)为  $H$  面(图 8 的  $xoz$  面)辐射方向图。仿真结果的最大增益是 22.5 dBi，而测量的增益是 22.3 dBi，由于仪器和天线阵列之间的连接损耗，测量增益小于仿真增益。此外，该阵列在  $E$  面和  $H$  面的 HPBW 分别为  $10.8^\circ$  和  $11.1^\circ$ ， $E$  面和  $H$  面的实测旁瓣电平分别小于  $-16$  dB 和  $-17.66$  dB。

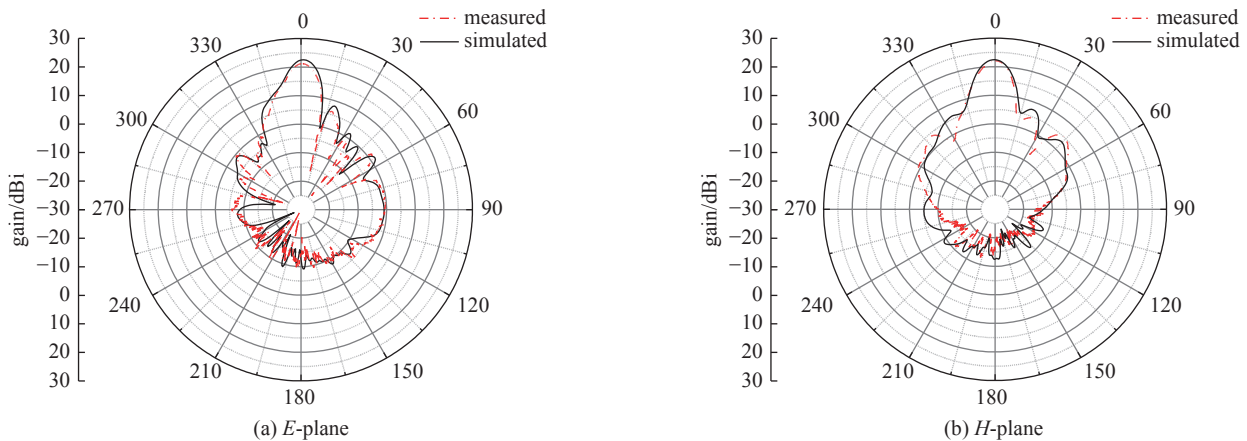


Fig. 11 Simulated and measured radiation patterns at  $E$ -plane and  $H$ -plane

图 11  $E$  面和  $H$  面仿真测试辐射方向图

## 4 结论

本文提出了一个工作频率在 10.1 GHz 的  $13 \times 14$  切比雪夫馈电网络开口谐振环天线阵列，该阵列具有高增益和低旁瓣的性能。引入了开口谐振环和 I 型谐振结构来改善天线单元辐射特性，提高天线增益。此外，本文采用切比雪夫馈电网络减少天线阵列旁瓣。最终实验测试表明，该天线阵列具有良好的辐射性能，其峰值增益为 22.3 dBi，旁瓣电平低于  $-16$  dB， $E$  面和  $H$  面的 HPBW 分别为  $10.8^\circ$  和  $11.1^\circ$ 。该平面开口谐振环天线阵列可用于无线通信和雷达系统。

## 参考文献：

- [1] Mailloux R J. Phased array antenna handbook [M]. 3rd ed. Boston: Artech House, 2017.
- [2] Munir A, Saputra Y P, Maulana Y Y. Experimental approach of X-band slotted microstrip patch antenna array with non-uniform current distribution [C]//Proceedings of 2016 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). 2016: 764-767.
- [3] Varum T, Matos J N, Pinho P, et al. Nonuniform broadband circularly polarized antenna array for vehicular communications [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(9): 7219-7227.
- [4] Kalva N, Kumar B M. Feed-line design for a series-fed binomial microstrip antenna array with no sidelobes [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2022: 3221662.
- [5] Cao Jie, Liu Yuanyun, Wang Yuejuan, et al. Design of a new microstrip antenna array with high gain and low side-lobe [C]//Proceedings of 2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). 2018: 1-3.
- [6] Cao Weiping, Ma Lingzhi, Li Simin, et al. Conformal multi-beam directional array antenna [C]//Proceedings of the 11th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). 2016: 315-317.
- [7] Wu Wenjing, Guan Boran. Design and implementation of a X-band dual-polarization phased-array antenna [C]//Proceedings of the 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). 2018: 1-4.
- [8] Khasim N S, Krishna Y M, Thati J, et al. Analysis of different tapering techniques for efficient radiation pattern [J]. *e-Journal of Science & Technology*, 2013, 8(5): 47-53.
- [9] Abed A T. Study of radiation properties in Taylor distribution uniform spaced backfire antenna arrays [J]. *American Journal of Electromagnetics and Applications*, 2014, 2(3): 23-26.

- [10] Saputra Y P, Oktafiani F, Wahyu Y, et al. Side lobe suppression for X-band array antenna using Dolph-Chebyshev power distribution[C]//Proceedings of the 22nd Asia-Pacific Conference on Communications (APCC). 2016: 86-89.
- [11] Toan T T, Tran N M, Giang T V B. A feeding network with Chebyshev distribution for designing low side-lobe level antenna arrays[J]. VNU Journal of Science: Computer Science and Communication Engineering, 2017, 33(1): 16-21.
- [12] Qian Jiawei, Zhu Haoran, Tang Min, et al. A 24 GHz Microstrip comb array antenna with high sidelobe suppression for radar sensor[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(7): 1220-1224.
- [13] Lee J H, Lee J M, Hwang K C, et al. Capacitively coupled microstrip comb-line array antennas for millimeter-wave applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(8): 1336-1339.
- [14] Afoakwa S, Jung Y B. Wideband microstrip comb-line linear array antenna using stubbed-element technique for high sidelobe suppression[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(10): 5190-5199.
- [15] Chen Zhichao, Otto S. A taper optimization for pattern synthesis of microstrip series-fed patch array antennas[C]//Proceedings of 2009 European Wireless Technology Conference. 2009: 160-163.
- [16] Wahid M S A, Sreenivasan M, Rao P H. Design optimization of low sidelobe level microstrip array[C]//Proceedings of 2013 IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC). 2013: 1-2.
- [17] Mahatmanto B P A, Apriono C. Planar microstrip array antenna with rectangular configuration fed with Chebyshev power distribution for C-band satellite application[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD). 2019: 1-4.
- [18] Fang Cong, Su Ming, Liu Yuanan. A low side lobe level microstrip antenna array for 77 GHz automotive radar[C]//Proceedings of the IEEE 6th International Conference on Computer and Communications (ICCC). 2020: 448-452.
- [19] Zhang Yuwei, Lin Shu, Liu Ling, et al. The simulation design of a low-side lobe level high gain and broadband microstrip patch antenna array[C]//Proceedings of 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). 2016: 742-743.
- [20] Liu Lu, Lin Shu, Wang Jun, et al. Simulation and analysis of an X-band low sidelobe and high gain microstrip antenna array[C]//Proceedings of 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). 2017: 1-2.
- [21] Hong Jiasheng, Lancaster M J. Couplings of microstrip square open-loop resonators for cross-coupled planar microwave filters[J]. *IEEE Transactions on Microwave theory and Techniques*, 1996, 44(11): 2099-2109.