

任杰,张丽娜,梁仙灵,等.一种低剖面宽带二维宽角扫描圆极化阵列天线[J].电波科学学报,2017,32(6):694-701. DOI: 10.13443/j.cjors.2017092901

REN J, ZHANG L N, LIANG X L, et al. A low profile and wideband circularly-polarized array antenna with 2D wide-angle scanning [J]. Chinese journal of radio science, 2017, 32(6): 694-701. (in Chinese). DOI: 10.13443/j.cjors.2017092901

一种低剖面宽带二维宽角扫描圆极化阵列天线

任杰¹ 张丽娜² 梁仙灵¹ 耿军平¹ 朱卫仁¹ 金荣洪¹

(1. 上海交通大学电子工程系, 上海 200240; 2. 上海航天电子通讯设备研究所, 上海 201109)

摘要 针对现有圆极化平面阵列的扫描角受限和三维宽角扫描阵列体积大的问题,设计了一种基于阵因子方向图和单元因子方向图互补的低剖面宽角扫描圆极化阵列天线。该阵列单元采用新型圆极化正交偶极子天线,并由其组成多个圆环子阵,每一子阵内单元的法向均偏离阵列法向一个固定倾角并等间距排布在“涟漪”状金属地板上。这种阵列排布方式使得在主波束扫描至大角度时天线单元因子增益可以补偿阵因子的增益下降。设计的一个64元阵列天线的实测结果表明:在8~9 GHz工作带宽内,且波束扫描覆盖 $0^\circ \sim \pm 62^\circ$,各阵元的有源驻波比均小于2.1,中心频点扫描增益起伏小于1.71 dB,扫描波束的圆极化轴比小于2 dB。

关键词 宽带;圆极化;二维宽角扫描;低剖面;增益起伏

中图分类号 TN822+.8

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2017)06-0694-08

DOI 10.13443/j.cjors.2017092901

A low profile and wideband circularly-polarized array antenna with 2D wide-angle scanning

REN Jie¹ ZHANG Lina² LIANG Xianling¹ GENG Junping¹ ZHU Weiren¹ JIN Ronghong¹

(1. Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Research Institute of Shanghai Aerospace Electronic Communication Equipment, Shanghai 201109, China)

Abstract In order to overcome scanning angle limitation of planar array and bulky volume of three-dimensional wide-angle scanning array, we propose a low profile ripple-shaped wide-angle scanning circularly-polarized array based on the compensation method of array factor pattern and element factor pattern. This array is composed of several ring subarrays, which include different numbers of novel circularly-polarized crossed dipoles, and the element normal of each ring subarray deviates from array normal with a fixed angle. These ring subarrays are aligned on the surface of a ripple-shaped ground plate. Based on this array structure, the element gain can compensate the array gain degradation when array main-beam steers to a large angle. An array with 64 elements is designed and fabricated, and the measured results show that the active voltage standing wave ratio (VSWR) of the array elements are less than 2.1, the scanning gain fluctuation of center frequency is less than 1.71 dB, and the axial ratio (AR) is less than 2 dB, when the operation frequency range is 8–9 GHz and scanning angle is from 0° to $\pm 62^\circ$.

收稿日期: 2017-09-29

资助项目: 国家自然科学基金(61571298, 61671416, 61471240, 61571289, 51777168, 61701303);上海市自然科学基金(17ZR1414300);上海市浦江人才计划(17PJ1404100)

联系人: 梁仙灵 E-mail: liangxl@sjtu.edu.cn

Keywords wideband; circularly polarized; 2D wide-angle scanning; low profile; gain fluctuation

引言

相控阵因可实现波束指向的灵活性、快速捷变性,在通信、军事等领域得到了广泛的应用.其中圆极化相控阵更是具有线极化相控阵所不具有的特点,如更大的天线放置取向自由度,可减小电磁波传播过程中多径效应及电磁波穿过电离层时法拉第旋转效应带来的损耗等,这些优势使得对圆极化相控阵的需求变得更为迫切.此外,为了获得更大的空间扫描范围,如何扩展阵列天线的扫描角受到了越来越多的关注.然而,由于阵列波束在大角度扫描时,阵元之间互耦及传统的平面阵列几何结构的限制给展宽阵列天线扫描角带来了很大的挑战.一种常用的扩展阵列波束扫描角的方法是利用宽波束天线单元技术:通过向天线单元加载高阻抗表面^[1-2]、像素块状寄生层^[3]及利用单元之间的强耦合^[4]来展宽阵列单元波束宽度;使用新型磁电偶极子^[5]及利用磁流源带来的宽波束特性^[6-7]也可获得宽波束单元;文献[8]则利用人工磁导体结合镜像理论展宽阵列波束宽度.以上这些实现方式均基于宽波束阵列单元及较窄的单元间距来达到阵列宽扫描角的目的.但是,由于单元所占面积及阵元间距的限制,采用该方式的阵列均适合在一维方向上实现较大的扫描角且多为线极化.而且阵元之间过小的间距及天线单元的宽波束特性会使得阵元之间的互耦增强,从而使得阵列的端口阻抗匹配变得困难.解决这一问题的方法是利用去耦网络^[9-10],但是这种去耦网络设计和调试复杂,对于大型阵列增加了设计周期和制造成本.

另一种实现方式是共形天线,共形阵列天线^[11-12]可实现很宽范围的波束覆盖及更平坦的增益滚降.文献[11]利用由7个六边形子阵结合各自的波束成形网络组成的截顶圆锥形阵列天线,实现了波束覆盖96%的半球空间,且增益大于11.5 dBi.文献[12]在保持主波束增益起伏小于3 dB的前提下,利用一种三面的共形阵列天线,实现了一维方向

上圆极化波束覆盖 $\pm 69^\circ$.传统的宽角扫描共形阵列天线往往由于体积过大,剖面过高限制了其应用场合.针对上述问题,本文设计了一种宽带圆极化低剖面阵列天线,该天线具有二维宽角扫描的能力.

1 圆极化阵列单元设计

二维宽带宽角扫描圆极化阵列的一个关键部分是其单元圆极化的宽波束、恒波束性能,即要求天线单元在工作频率范围内波束宽度尽可能宽且方向图和轴比性能受频率变化影响小,以使得阵列天线在频带范围内具有稳定的宽角扫描能力.现有一般的圆极化单元,如微带天线、正交带线偶极子天线^[13]等,由于两个主面波束宽度的不同,导致单元圆极化波束宽度受限且在两个维度方向的不均匀.基于以上考虑,本文首先设计了一种低剖面圆极化阵列单元,其具有近似恒定波束宽度及旋转对称波束.

圆极化单元结构如图1所示.该单元辐射部分采用四个呈连续旋转的C型振子组成,并两两一组与一对长度约 $\lambda_0/4$ (λ_0 为中心频率所对应的自由空间波长)的环形带线相连接,分布在介质板的上下表面.介质板厚度为 $h_s=0.508$ mm,相对介电常数为4.5.该单元采用同轴线进行激励,其中同轴线的导体连接介质板下表面的环形带线,而同轴线的内导体连接介质板上表面的环形带线.由于同轴线的内外导体电流具有 180° 的相位差,再各自经过两条长度约 $\lambda_0/4$ 的环状带线,使得四个C型振子获得 $0^\circ, -90^\circ, -180^\circ, -270^\circ$ 的连续旋转相位差,产生了右旋圆极化特性.为减少背向辐射,提高天线增益,将辐射单元置于一个深度 $h=9$ mm,厚度 $t=2$ mm的金属腔上.此外,利用C型振子可以使每个振子获得近似旋转对称的E面和H面方向图,从而使其组成的正交偶极子单元方向图对称.通过仿真优化设计得到单元的关键参数为: $W=23$ mm, $W_1=0.2$ mm, $W_2=0.2$ mm, $L_1=1.62$ mm, $L_2=0.9$ mm, $d=1.35$ mm, $R=1.4$ mm, $W_r=0.2$ mm.

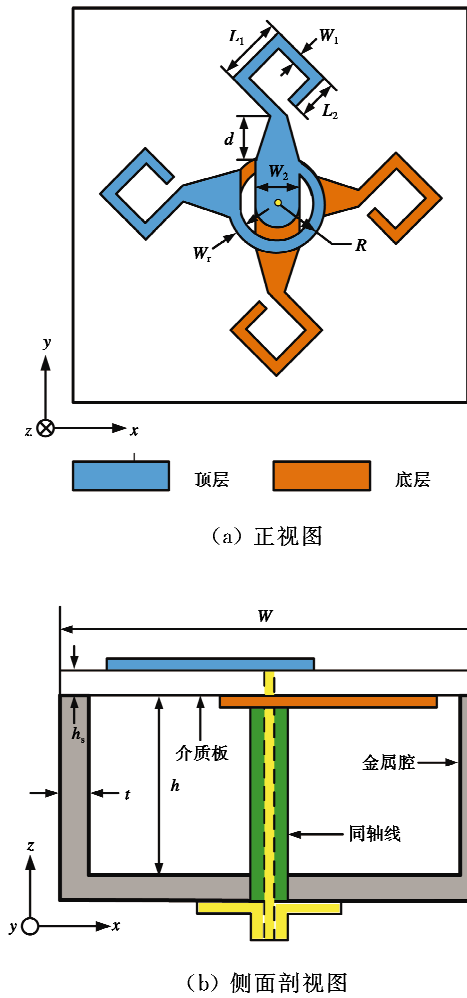


图1 阵元结构示意图

图2给出了阵列单元的端口驻波比. 该单元在8~9 GHz(相对工作带宽为11.7%)内的端口仿真驻波比小于1.35. 良好的端口阻抗匹配将有助于提高阵列的馈电效率. 图3和图4给出了该单元在8、8.5、9 GHz三个主要频点的主平面(xoz/yoz 平面)辐射方向图和轴比曲线(xoz 平面即为 $\varphi=0^\circ$ 平面). 可以看出,在工作频带内,天线单元波束宽度变化很小,约 75° . 表明该天线单元在工作频带内具有恒定宽波束性能. 这一稳定方向图的辐射特性有助于改善阵列天线宽角扫描时波束的稳定性. 图5给出了该单元的轴比随频率变化曲线. 在工作频带内,圆极化轴比小于2.5 dB.

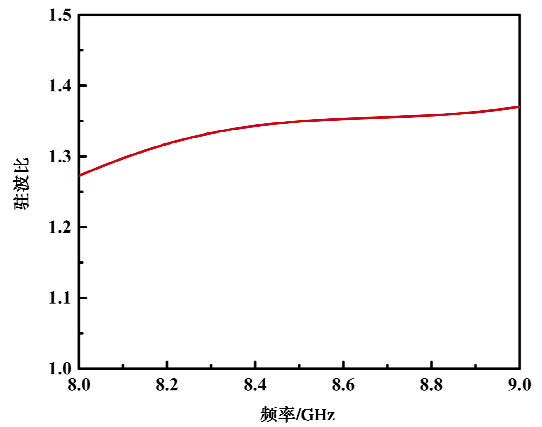


图2 阵列单元端口驻波比

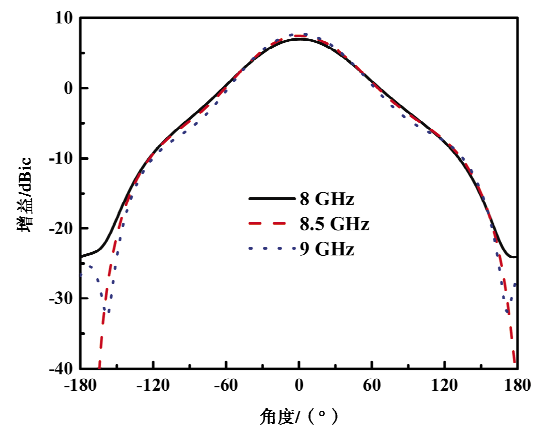


图3 天线单元不同频点方向图比较

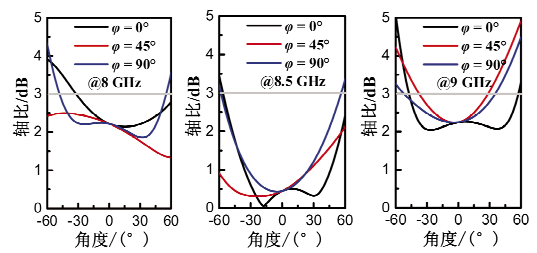


图4 天线单元不同频点轴比曲线

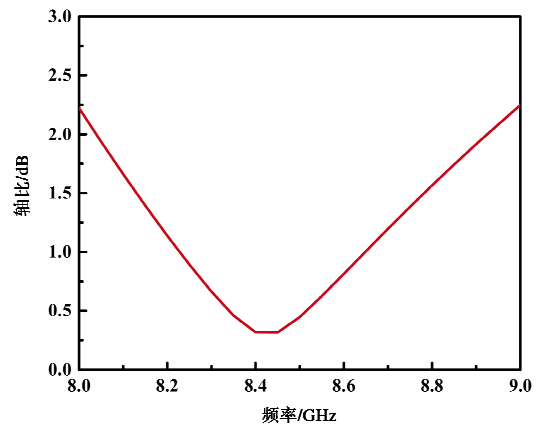


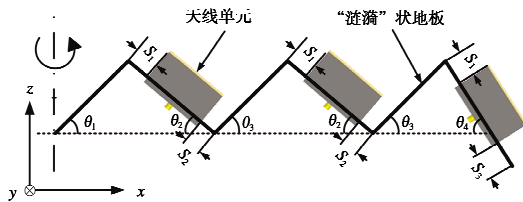
图5 天线单元轴比随频率变化曲线

2 圆极化阵列天线设计

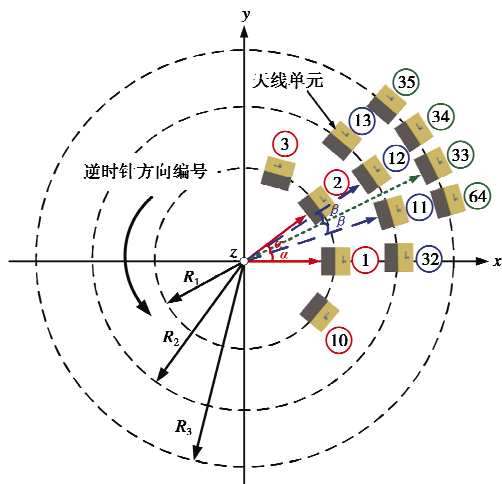
传统的宽角扫描阵列天线通过在扫描不同的区域时将阵列工作扇区切换到对应于该方向的子扇区而获得很宽的波束覆盖范围. 其中每一个子扇区只需要扫描一个较小的范围, 这使得对于每一个子阵的波束覆盖性能要求降低, 但这也带来了传统宽角扫描天线阵(如半球阵, 圆锥阵及圆柱形阵列)体积过大的问题. 为了实现阵列天线在二维空间内宽角扫描并且具有低剖面的特性, 本文设计了一种采用新型单元布局的“涟漪”状阵列天线.

2.1 阵列布局与结构

该阵列天线的布局如图 6 所示. 阵列由三个圆环子阵构成, 每个圆环子阵由若干个阵列单元组成, 第一环 10 个、第二环 22 个、第三环 32 个; 每个圆环上的单元法向均偏离阵列法向(z 轴方向)一个固定角度, 并等间距排布在与之相对应的“涟漪”状金属架上. 图 6(a)给出了阵列的单元排布示意图, 其中第一圆环和第二圆环阵列中的单元设有相同的倾角 θ_2 , 第三圆环(最外环)的单元倾角为 θ_4 . 与第一圆环相对应的“涟漪”部分的倾角为 θ_1 , 而与第二圆环、第三圆环相对应的“涟漪”部分的倾角为 θ_3 . S_1, S_2, S_3



(a) 阵元位置关系示意图



(b) 阵元编号

图 6 阵列天线排布方式示意图

S_3 为各环单元与顶部、底部的间距. 图 6(b)给出了阵列单元位置排布及编号规则: 由内而外, 每一圆环子阵的单元编号逆时针依次增大; 每一圆环子阵中编号最小的单元位于相邻、靠内侧的圆环子阵前两个单元的角平分线上. R_1, R_2, R_3 对应各圆环子阵的半径.

该阵列天线的独特之处在于通过阵因子方向图与单元因子方向图互补实现宽角平坦增益扫描性能. 如图 7 所示, 三个等幅激励的单元排布在一条直线上. 其中, d_1, d_2 代表单元间距, θ 代表扫描角. 则线阵方向图函数表达式为

$$f(\theta) = (1 + e^{-jk_1 d_1 \sin \theta + \phi_1} + e^{-jk_2 d_2 \sin \theta + \phi_2}) \cdot f_e(\theta_2) = f_a(\theta, \phi_1, \phi_2) \cdot f_e(\theta). \tag{1}$$

式中: ϕ_1, ϕ_2 代表从左到右第二、三个单元的激励相位; θ_2 对应图 6 中单元倾角; $f_a(\theta, \phi_1, \phi_2)$ 和 $f_e(\theta)$ 分别代表阵因子及单元方向图函数. $|f_a(\theta, \phi_1, \phi_2)|$ 的最大值出现在线阵法向(z 轴方向), 且随着扫描角 θ 的增大而逐渐减小, 而 $|f_e(\theta)|$ 最大值方向出现在单元法向, 所以通过阵因子 $f_a(\theta, \phi_1, \phi_2)$ 与单元因子 $f_e(\theta)$ 的方向图互补, 可以实现阵列波束宽角度扫描, 并保持较小的增益起伏.

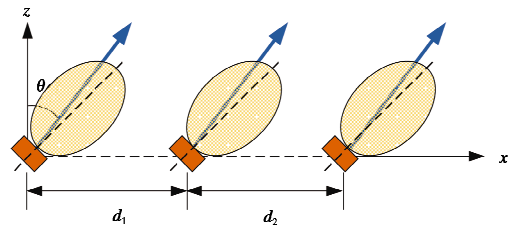


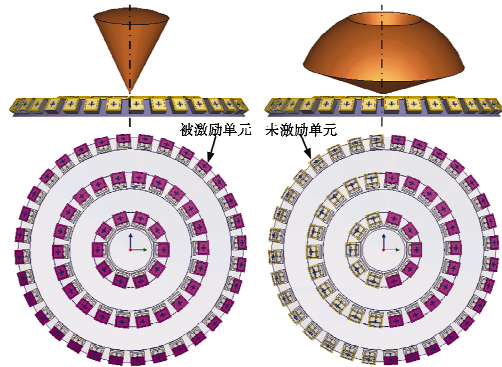
图 7 三单元线阵示例

在阵列设计中, 各个参数的优化主要基于如下准则: 1) 各环单元的倾角 (θ_2, θ_4) 主要以阵列宽角扫描增益的平坦度为优化目标; 2) θ_1, θ_3 , 以及 S_1, S_2, S_3 是以阵中单元波束方向图的稳定性为优化目标; 3) 各环单元分配数目、单元间距, 以及环距是以阵列的栅瓣抑制为优化目标. 在该阵列设计中, 由于最外侧圆环子阵单元数目占了全阵单元数目的一半, 所以在阵列设计中需要重点考虑该环单元的倾角 (θ_4) 来获得更平坦的增益起伏. 通过仿真优化设计, 各项优化参数如下: $\theta_1 = 33^\circ, \theta_2 = 40^\circ, \theta_3 = 30^\circ, \theta_4 = 55^\circ, S_1 = 5 \text{ mm}, S_2 = 6 \text{ mm}, S_3 = 5 \text{ mm}, R_1 = 55 \text{ mm}, R_2 = 121 \text{ mm}, R_3 = 185 \text{ mm}.$

2.2 阵元激励与选择

阵元激励主要基于阵列的扫描增益和副瓣、栅

瓣进行考虑. 为简单起见, 本阵列中主要采用两种激励模式, 如图 8 所示. 由于阵列天线结构的旋转对称性, 该阵列在各方位面具有相似的波束扫描性能. 当阵列主波束锥形扫描角在 $0^\circ \sim \theta_s$ 时 (θ_s 代表区分两种激励模式的临界扫描角), 全部阵列单元激励, 如图 8(a) 所示. 当阵列主波束锥形扫描角超过 θ_s 时, 对应波束指向的一半扇区单元被激励, 如图 8(b) 所示. θ_s 的选择标准以天线的平坦增益为目标, 通过仿真得到: 当 $\theta_s = \pm 10^\circ$ 时, 所有单元被等幅激励与对应的一半扇区单元被等幅激励, 两者具有相近的辐射增益, 表明此时另外一半激励的单元更多贡献于栅瓣和旁瓣辐射.

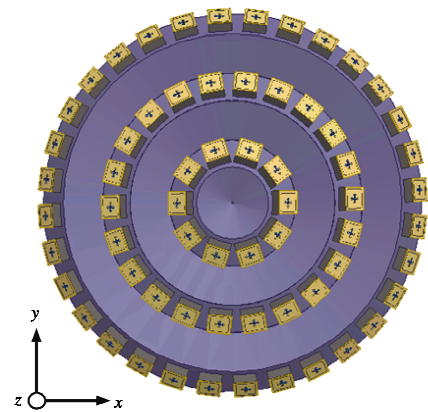


(a) 扫描角为 $0^\circ \sim \pm 10^\circ$ (b) 扫描角大于 $\pm 10^\circ$

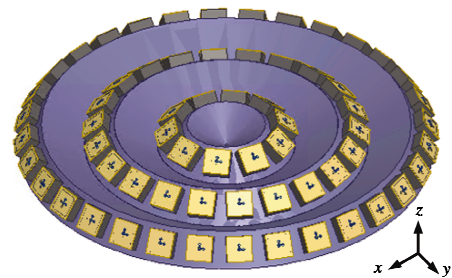
图 8 两种阵元激励模式

2.3 阵元性能与分析

通过 HFSS 仿真软件设计并分析了 64 单元阵列, 仿真模型如图 9 所示. 本文所设计的阵元具有良好的阻抗匹配, 由于该阵列独特的结构, 阵元之间的间距无需像传统宽角扫描阵列那样紧密, 从而使得阵元之间的耦合较小, 这从一定程度上增加了阵列排布的自由度. 图 10 给出了几个代表性单元之间的耦合情况, 可见单元之间的耦合小于 -32 dB. 因为阵列天线每一圆环子阵具有对称性且子阵间距较大, 每一子阵单元的有源驻波具有很好的一致性. 为简洁起见, 选取每一圆环子阵的前两个单元给出相应的仿真有源驻波比. 图 11 给出了阵列天线有源驻波比随波束扫描角的变化曲线. 可见, 随着阵列天线波束扫描角的改变, 阵列的有源驻波比均小于 1.7.



(a) 俯视图



(b) 3D 视图



(c) 侧视图

图 9 阵列天线仿真模型

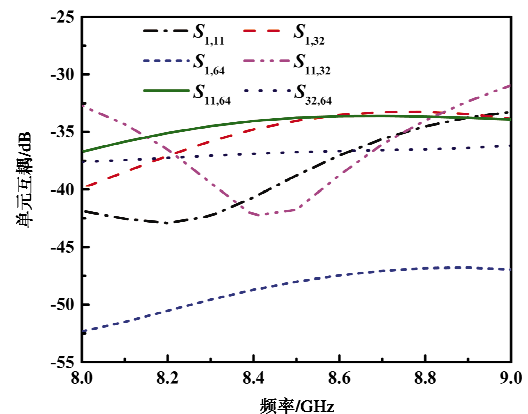


图 10 阵列单元互耦仿真结果

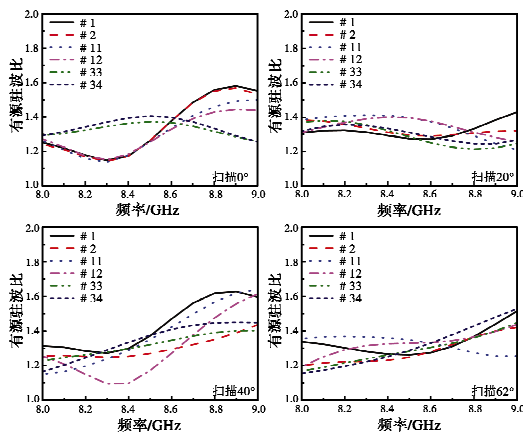
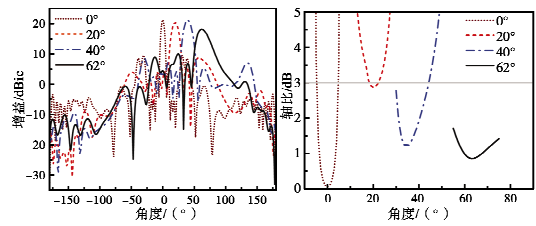
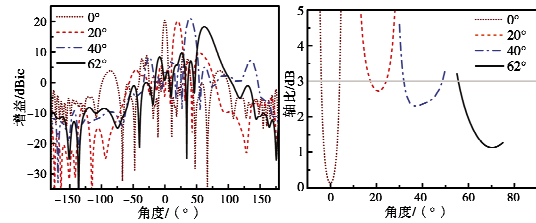


图 11 阵列天线有源驻波比随波束扫描变化情况

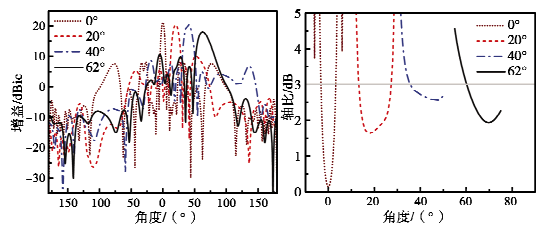
由于阵列天线结构的旋转对称性,因此在二维空间任一截面具有相近的扫描性能.图 12 给出了阵列天线在三个重要频率点(8 GHz、8.5 GHz、9 GHz)的波束扫描方向图(xoz 平面),以及对应主波束内的圆极化轴比曲线.可以看到,在工作频带内,主波束扫描至 $0^\circ \sim \pm 62^\circ$ 时增益变化 $18 \sim 21.2$ dBic,最大起伏约 3.2 dB,圆极化轴比均小于 3 dB.值得注意的是阵列在波束扫描 20° 时轴比相对较差,这是因为阵列在圆周方向采用了圆极化相位补偿,当扫描波束偏离阵列法向时阵列只有一半的单元在工作,这使得圆极化补偿的效果减弱;另一方面是波束扫描至 $10^\circ \sim 30^\circ$ 时,最外侧的圆环子阵单元在该方向上的轴比本身较差.可见,通过阵因子方向图与单元因子方向图互补实现了宽角度扫描能力.同时可以看到,在频带范围内最大副瓣电平发生在波束扫描到最大角度时,此副瓣相比主瓣幅度低约 10 dB.该副瓣的抑制可从三个方面考虑,一是多环形不等间距阵列为非周期性结构,所以环数越多,对栅瓣抑制越有效;二是通过更合理地选择激励单元可以有效地降低阵列天线的副瓣电平;三是若对阵列单元激励幅值进行加权优化,阵列天线的副瓣电平可以进一步降低.



(a) 8 GHz



(b) 8.5 GHz



(c) 9 GHz

图 12 阵列天线波束扫描方向图及轴比

为验证该设计,对上述阵列进行了加工及测试,图 13、图 14 给出了阵列在中心频点(8.5 GHz)对应不同波束扫描角的方向图、轴比的仿真及实测结果.实测结果显示:该阵列天线可以实现波束覆盖 $0^\circ \sim \pm 62^\circ$ 且保持波束增益起伏小于 1.71 dB,主波束范围内轴比小于 2 dB.

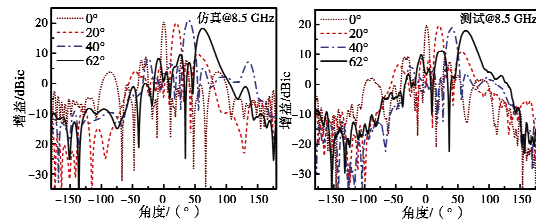


图 13 阵列天线波束扫描仿真及实测方向图

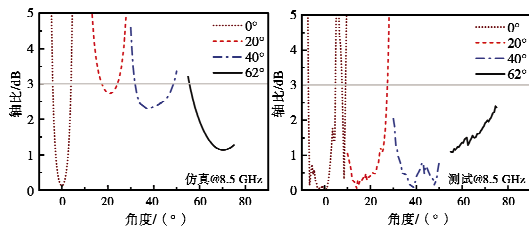


图 14 阵列天线波束扫描仿真及实测轴比

图 15 给出了阵列天线实测的单元有源驻波比。可以看到,在 8~9 GHz 工作带宽内,该阵列天线随着波束扫描角的变化,单元有源驻波比基本保持在 2.1 以下。

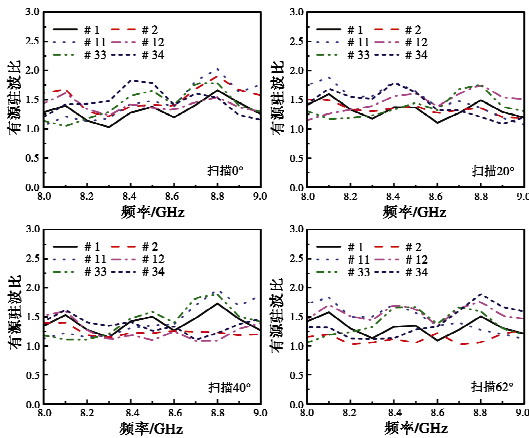


图 15 阵列天线对应不同扫描角的实测有源驻波比

表 1 将该阵列与传统的共形天线阵做了对比(文献[11]、[12]均为仿真结果,其中 λ 为对应工作频率自由空间波长)。由表 1 可知,本文提出的阵列相比传统的阵列天线具有较低的剖面,且可以保持宽角度扫描时较高的增益。

表 1 共形天线阵扫描性能对比

文献	扫描范围/(°)	剖面	增益起伏/dB	最小增益
[11]	0~±90	~2 λ	5	9.5 dBi
[12]	0~±69	0.82 λ	3	< 9 dBic
本文	0~±62	0.94 λ	1.71	17.96 dBic

3 结 论

本文提出了一种新型的“涟漪”状阵列天线,该阵列天线具有宽频带、宽角度扫描、低剖面的特点。不同于传统阵列天线单纯依赖宽波束天线单元或者单纯依靠改变阵面形态来实现宽角波束扫描,本文所提出的“涟漪”状阵列天线采用了阵因子方向图及

单元因子方向图互补的方法来展宽波束扫描角。实测的 64 元阵列天线结果表明,该阵列在 8~9 GHz,二维空间区域波束扫描角达到±62°,均保持有源驻波比小于 2.1。中心频点波束增益起伏小于 1.71 dB,轴比小于 2 dB。本文中采用的“涟漪”状组阵形式使得阵列天线可以在展宽波束扫描角的同时利用单元方向图来达到抑制副瓣电平的效果。此外,该阵列天线独特的“涟漪”状组阵形式使得其相比于传统的共形阵列天线具有很大的低剖面优势且只需要通过简单地调整便可扩展其阵列规模。

参 考 文 献

- [1] LI M, XIAO S Q, WANG B Z. Investigation of using high impedance surfaces for wide-angle scanning arrays[J]. IEEE transactions on antennas propagation, 2015, 63(7): 2895-2901.
- [2] YANG G W, LI J Y, XU R, et al. Improving the performance of wide-angle scanning array antenna with a high-impedance periodic structure[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2016, 15: 1819-1822.
- [3] CHENG Y F, DING X, SHAO W, et al. 2-D planar wide-angle scanning-phased array based on wide-beam elements[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2017, 16:876-879.
- [4] WEN Y Q, WANG Z B, DING X. A wide angle scanning and low sidelobe level microstrip phased array based on genetic algorithm optimization[J]. IEEE transactions on antennas propagation, 2016, 64(2): 805-810.
- [5] WEN Y Q, WANG Z B, DING X. Wide-beam circularly polarized microstrip magnetic-electric dipole antenna for wide-angle scanning phased array[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2017, 16: 428-431.
- [6] WEN Y Q, WANG Z B, DING X. Wide-beam SIW-slot antenna for wide-angle scanning phased array[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2016, 15:1638-1641.
- [7] WANG R, WANG Z B, DING X, et al. Planar phased array with wide-angle scanning performance based on image theory[J]. IEEE transactions on antennas propagation, 2015, 63(9): 3908-3917.
- [8] LIU C M, XIAO S Q, TU H L, et al. Wide-angle scanning low profile phased array antenna based on a novel magnetic dipole[J]. IEEE transactions on antennas propagation, 2017, 65(3): 1151-1162.

- [9] XIA R L, QU S W, LI P F, et al. Wide-angle scanning phased array using an efficient decoupling network[J]. IEEE transactions on antennas propagation, 2015, 63(11): 5161-5165.
- [10] ARAND B A, BAZRKAR A, ZAHEDI A. Design of a phased array in triangular grid with an efficient matching network and reduced mutual coupling for wide-angle scanning[J]. IEEE transactions on antennas propagation, 2017, 65(6): 2983-2991.
- [11] WANG W Z, YE S, LIANG X L, et al. Design of a passive multifaceted phased array for hemisphere coverage[C]//IEEE international Symposium on Antennas and Propagation. Chicago, July 8-14, 2012.
- [12] NOORDIN N H, ARSLAN T, FLYNN B, et al. Low-cost antenna array with wide scan angle property [J]. IET microwaves, antennas & propagation, 2012, 6(15): 1717-1727.
- [13] BAIK J W, LEE K J, YOON W S, et al. Circularly polarized printed crossed dipole antennas with broadband axial ratio [J]. Electronics letters, 2008, 44(13): 785-786.

作者简介



任杰 (1993—),男,山西人,硕士研究生,主要研究方向为宽角扫描阵列天线,宽带圆极化天线技术等。



张丽娜 (1983—),女,河南人,高级工程师,上海航天通讯设备研究所天线事业部副主任,主要研究方向为阵列天线、反射面天线等。

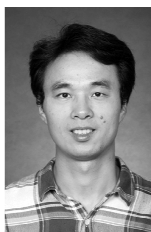


220 多篇。

梁仙灵 (1978—),男,浙江人,副教授,IEEE 高级会员,主要研究方向为现代天线理论与技术,当前方向如时间维调制阵列天线,涡旋电磁波天线,抗干扰阵列天线,可重构网络,大角度扫描阵列,有源阵列天线等。已发表相关学术论文



耿军平 (1972—),男,陕西人,副教授,主要研究方向为电磁场理论、电磁计算方法、现代天线技术、信号处理等。



朱卫仁 (1983—),男,浙江人,特别研究员,博士生导师,主要研究方向为人工电磁超材料的理论及实现、基于超材料的天线及射频器件、表面等离子体激元等。



金荣洪 (1963—),男,江苏人,教授、博士生导师,IEEE Fellow,主要研究方向为电磁场理论、现代天线技术、电磁计算方法、天线信号处理、智能天线及相控阵天线等。