

用于提升有限口径辐射功率的紧耦合相控阵天线的设计

童三强 王秉中 王任

A tightly coupled dipole array used for radiation power improvement on finite radiation aperture

Tong San-Qiang Wang Bing-Zhong Wang Ren

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 204101 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210309

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210309>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于宽波束磁电偶极子天线的宽角扫描线性相控阵列

Wide-angle scanning linear phased arrays based on wide-beam magneto electric dipole antenna

物理学报. 2021, 70(1): 014101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201104>

利用Ag@SiO₂纳米粒子等离子体共振增强发光二极管辐射功率的数值研究

Numerical research of emission properties of localized surface plasmon resonance enhanced light-emitting diodes based on Ag@SiO₂ nanoparticles

物理学报. 2017, 66(23): 237801 <https://doi.org/10.7498/aps.66.237801>

平面相控阵超大角度扫描的阵因子分析

Array factor analysis for ultra-wide-angle scanning performance of planar phased arrays

物理学报. 2021, 70(9): 098401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201850>

非规则形状介质内辐射-导热耦合传热的间断有限元求解

Discontinuous finite element solutions for coupled radiation-conduction heat transfer in irregular media

物理学报. 2020, 69(3): 034401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191185>

光纤相控阵稀疏排布优化算法对比

Comparison between optimal configuration algorithms of fiber phased array

物理学报. 2021, 70(8): 084205 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201768>

三维浅海下弹性结构声辐射预报的有限元-抛物方程法

Acoustic radiation from a cylinder in shallow water by finite element-parabolic equation method

物理学报. 2019, 68(2): 024301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181452>

用于提升有限口径辐射功率的紧耦合相控阵天线的设计*

童三强 王秉中[†] 王任

(电子科技大学, 应用物理研究所, 成都 611731)

(2021年2月9日收到; 2021年4月21日收到修改稿)

电磁波的辐射功率对其传输距离起着决定性作用. 传统上, 可以通过增大辐射口径或增加天线单元输入功率来提升电磁波的辐射功率. 但辐射口径由于受装配空间限制而无法持续增大, 天线单元输入功率的增大也因信号源功率提升困难而难以实现. 因此, 在有限口径下, 如何提升电磁波的辐射功率成了迫切需要解决的问题. 通过在有限口径下布置更多单元进行功率合成、改善单元的阻抗匹配和减小损耗以增加天线阵的辐射效率均可提升有限口径辐射功率. 基于此, 本文设计了一个可用于提升有限口径辐射功率的紧耦合相控阵天线, 一方面采用高介电常数的介质基板使阵列小型化, 同时使用紧凑型巴伦进行馈电, 从而天线单元具有很小的尺寸, 最终天线单元周期为 $0.144\lambda_{\text{high}} \times 0.144\lambda_{\text{high}}$ (λ_{high} 为自由空间中最高工作频率对应的波长); 另一方面通过改善巴伦和天线阵的阻抗匹配, 使用频率选择表面匹配层改善天线阵和自由空间的阻抗匹配, 以及使用低损耗的介质基板, 从而提升天线阵的效率. 仿真和测试结果表明, 在 1.7—5.4 GHz 内天线阵具有宽角扫描性能并且保持高辐射效率. 经过对比分析, 本文设计的天线阵能够提高有限口径的辐射功率.

关键词: 辐射功率, 有限口径, 相控阵天线, 宽带宽角扫描**PACS:** 41.20.Jb, 42.25.Bs, 42.60.Da**DOI:** 10.7498/aps.70.20210309

1 引言

随着军事和民事上对遥感、空间探测的需求日益增大, 对电磁波的传输距离提出了很高的要求. 提升电磁波的辐射功率, 可以增加电磁波的传输距离. 近年来, 科研人员对提升电磁波的辐射功率进行了广泛研究^[1-4].

天线的作用是将电磁波辐射进入自由空间. 传统上, 可以通过增大信号源功率以提升天线的辐射功率, 然而受物理机制、加工工艺等因素影响, 信号源功率增幅有限^[5]; 也可以通过增大天线的辐射口径以增大辐射功率, 然而由于装配环境的限制,

辐射口径不可能无限制增大, 因此对有限口径的利用就显得尤为重要.

相控阵天线能够充分利用辐射口径. 一方面, 通过将天线单元组成阵列, 天线阵有更好的辐射方向性; 另一方面, 相控阵天线波束可以灵活偏转, 使得辐射电磁波可以覆盖更多区域.

目前对相控阵天线的研究主要集中在带宽提升和扫描范围扩大上. Munk^[6] 在 2003 年提出的紧耦合天线阵在近 20 年得到了巨大发展, 和传统相控阵天线相比, 紧耦合天线阵具有很宽的带宽和较大的扫描范围. 文献^[7]中设计的紧耦合天线阵利用馈线地板带过孔的 Marchand 巴伦和频率选择表面匹配层, 在 6.2:1 (0.5—3.1 GHz) 的带宽内、

* 国家自然科学基金 (批准号: 61731005, 61901086)、博士后创新人才支持计划 (批准号: BX20180057)、四川省应用基础研究项目 (批准号: 2021YJ0100) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: ZYGX2019J101) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: bwzhang@uestc.edu.cn

天线单元有源驻波比小于 3.2 的标准下, 实现了 E 面 75° 和 H 面 60° 的扫描性能. 文献 [8] 中设计的紧耦合天线阵利用微带-槽线的馈电结构和多层频率选择表面匹配层, 在 5:1 (1—5 GHz) 的带宽内、天线单元有源驻波比小于 3 的标准下, 实现了 E 面 70° 和 H 面 70° 的扫描性能.

然而, 关于有限口径辐射功率的提升很少有学者进行研究. 本文从影响有限口径辐射功率的因素进行分析, 设计了一个可用于提升有限口径辐射功率的紧耦合相控阵天线, 并对天线阵进行了加工和测试. 仿真和测试结果表明, 在 1.7—5.4 GHz 的带宽内、天线单元有源驻波比小于 2 的标准下, 天线阵能实现 E 面 65° 、H 面 45° 和 D 面 60° 的扫描性能, 测试结果和仿真结果具有良好的一致性. 和文献中的其他设计相比, 按相同辐射口径面积换算, 本文设计的天线阵具有更高辐射功率.

2 有限口径下提升辐射功率的天线单元设计和仿真

假设一个辐射口径面积为 S 的相控阵天线, 每个单元分配的面积为 A , 总的单元个数为 S/A . 每个单元的输入功率 (从发射机经过功率放大器等器件到天线端口的功率) 为 P_{in} , η 为天线阵的辐射效率 (包含回波损耗、介质损耗和欧姆损耗), 则该天线阵的辐射功率为 $P_{in}\eta(S/A)$. 由此可见, 有限口径下, 天线阵的辐射功率和单元输入功率、单元个数、辐射效率等因素密切相关. 由于天线单元输入功率受限, 通过不断增加单元输入功率存在困难, 因此, 在有限口径下布置更多单元、同时提高天线阵的辐射效率成了现实可行的提升有限口径辐射功率的选择. 通过在有限口径下布置更多单元, 一方面, 输入功率平均分配到每个单元, 使得每个单元的输入功率更小, 能够有效避免单元因为输入功率过大引起介质击穿、接头击穿等现象; 另一方面, 由于单元个数增加, 通过功率合成, 易于实现更高的辐射功率. 通过提升天线阵辐射效率, 能将输入功率更大程度转化成辐射功率.

在有限口径下布置更多单元, 意味着单元尺寸要尽量小. 紧耦合天线阵的单元间距小于 $0.5\lambda_{high}$ [9], 便于紧凑化设计. 同时, 可以采用高介电常数介质基板和紧凑型微带-共面带线的巴伦使得天线单元小型化 [10].

天线阵辐射效率的提高, 意味着损耗要减小.

采用低损耗的介质基板减小介质损耗, 采用两层双面的频率选择表面匹配层改善天线阵和自由空间的阻抗匹配 [7], 通过参数调整改善巴伦和天线的阻抗匹配, 从而提升天线阵的辐射效率.

2.1 天线单元设计

紧耦合天线阵利用临近单元的电容耦合, 抵消低频时来自地板的电感, 天线阵低频的性能表现得到改善, 从而具有较宽的阻抗带宽. 紧耦合天线单元一般由三个部分组成: 宽带巴伦、偶极子辐射单元和宽带宽角匹配层. 其中, 宽带巴伦起着平衡馈电的作用, 同时也起着馈电端和偶极子辐射单元的阻抗匹配的作用; 宽带宽角匹配层主要用于改善天线阵在大角度扫描时的性能表现.

紧耦合天线阵在 E 面扫描时具有较宽的阻抗带宽, 在 H 面扫描时的阻抗带宽较窄. 因此, 在设计时, 先优化天线阵在 E 面扫描时的性能, 再加上宽带宽角匹配层改善天线阵在 H 面扫描时的性能. 天线单元设计的具体步骤如下:

- 1) 根据设计天线的最高工作频率和介质基板相关参数 (介电常数和厚度), 确定天线单元间距;
- 2) 根据天线单元间距, 设计出满足宽带馈电和阻抗变换需求的紧凑型巴伦;
- 3) 调节耦合贴片宽度和偶极子辐射单元离地板的高度, 改善天线阵在 E 面宽角扫描时的性能;
- 4) 加载两层双面的匹配层, 经过参数优化, 改善天线阵在 H 面宽角扫描时的性能.

本文设计的天线单元结构如图 1 所示, 由微带-共面带线的巴伦、偶极子单元、两层双面的匹配层共三部分组成. 介质基板型号为 Rogers 6110, 介电常数 10.2, 损耗正切 0.0023, 厚度 0.64 mm. 偶极子两臂印制在介质基板的两面, 便于临近单元进行电容耦合. 天线单元相关的参数在图 1(a) 中标示, 具体数值为: $A = 29.3$ mm, $B = 8$ mm, $C = 3.7$ mm, $D = 0.8$ mm, $E = 3.2$ mm, $F = 4.2$ mm, $G = 3$ mm, $H = 2.5$ mm, $I = 2.2$ mm, $J = 2.2$ mm, $K = 3.7$ mm, $L = 0.8$ mm, $W_1 = 0.4$ mm, $W_2 = 0.3$ mm, $W_3 = 0.2$ mm, $W_4 = 0.6$ mm, $W_5 = 0.6$ mm, $L_1 = 3.5$ mm, $L_2 = 3.5$ mm, $L_3 = 1.8$ mm, $L_4 = 2$ mm, $L_5 = 2.5$ mm, Gap=0.8 mm. 天线单元在 x 和 y 方向周期均为 $0.144\lambda_{high}$, 高度为 29.3 mm (约为 $0.166\lambda_{low}$, 其中 λ_{low} 为自由空间中最低工作频率对应的波长).

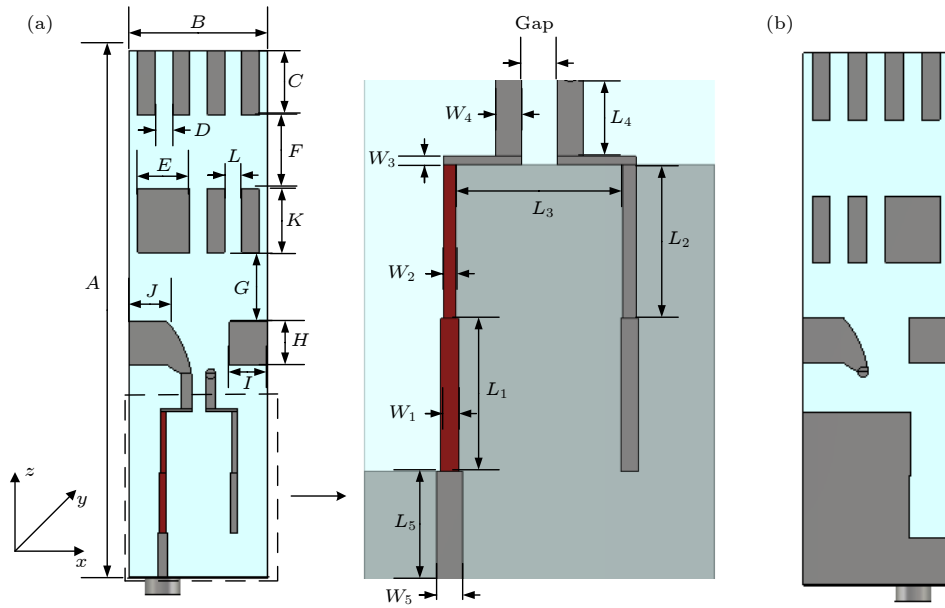


图1 天线单元结构 (a) 前视图 (红色馈线下方的地板被移除); (b) 后视图

Fig. 1. Unit Cell of the TCDA: (a) Front view of the unit cell (the ground of the red parts is etched); (b) back view of the unit cell.

2.1.1 宽带巴伦的设计

本文设计的天线单元采用了加载空气补偿的微带-共面带线的巴伦, 结构如图 1(a) 所示. 巴伦的红色馈线部分下方地板被移除, 通过这种空气补偿的方式, 可以产生新的谐振点, 新的谐振点和原来的谐振点离得很近时, 可以拓宽巴伦的工作带宽^[11]. 从图 2 中的仿真结果可以看出, 采用空气补偿的巴伦相比于未采用空气补偿的巴伦具有更宽的工作带宽. 此外, 由于天线单元要求占据较小的口径面积, 经优化设计, 减小 L_3 的值, 使得巴伦结构更为紧凑.

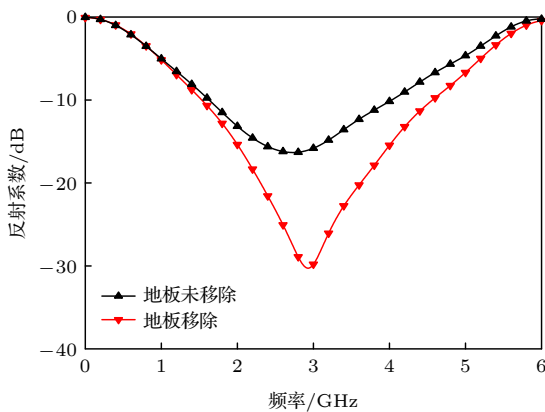


图2 红色馈线下方地板未移除和地板移除时巴伦的反射系数

Fig. 2. Reflection coefficients of the balun with and without the etched ground of the red feeding parts.

2.1.2 宽带宽角匹配层的设计

相控阵天线扫描时, 天线单元的辐射电阻随着扫描角度的变化而变化. 一般在天线上方放置一块介质匹配层, 使得天线阵和自由空间有更好的阻抗匹配^[12], 以改善天线阵的宽角扫描性能. 周期结构的频率选择表面匹配层可以替代传统的笨重且昂贵的介质匹配层. 周期结构的频率选择表面可视为超材料的一种, 其等效相对介电常数和相对磁导率可以根据文献^[13] 计算求得. 从图 3 可以看出, 天线阵加载两层双面的频率选择表面匹配层,

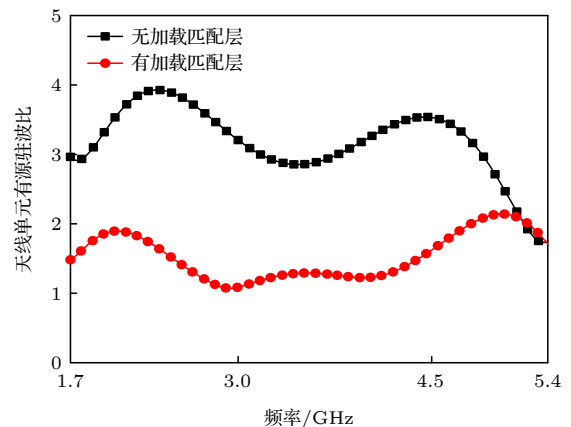


图3 无限大阵列有加载和无加载匹配层在 H 面 45° 扫描时, 天线单元有源驻波比

Fig. 3. Active VSWRs of the unit cell at 45° scanning in the H plane in infinite array simulation with and without frequency selective surfaces.

和无匹配层加载时相比,在 H 面扫描时具有更好的阻抗匹配表现.

2.2 无限大阵列仿真结果

2.2.1 交叉极化比

图 4(a) 是无限大阵列在不同平面不同角度扫描时的交叉极化比. 可以看出,在边射和 H 面 45° 扫描时,在大多数频段,交叉极化比均小于 -15 dB; 在 E 面 65° 扫描时,在大多数频段,交叉极化比均小于 -20 dB. 同时也注意到,在边射、 E 面 65° 、 H 面 45° 和 D 面 60° 扫描时,随着频率的升高,交叉极化变差. 这是因为: 1) 偶极子的两臂印制在介质基板的两面,电场和天线所在的平面不平行,垂直于天线所在平面存在电场分量,频率越高,交叉极化恶化越严重,antipodal Vivaldi 天线也有类似表现 [14]; 2) 天线单元之间间距较小,导致沿着

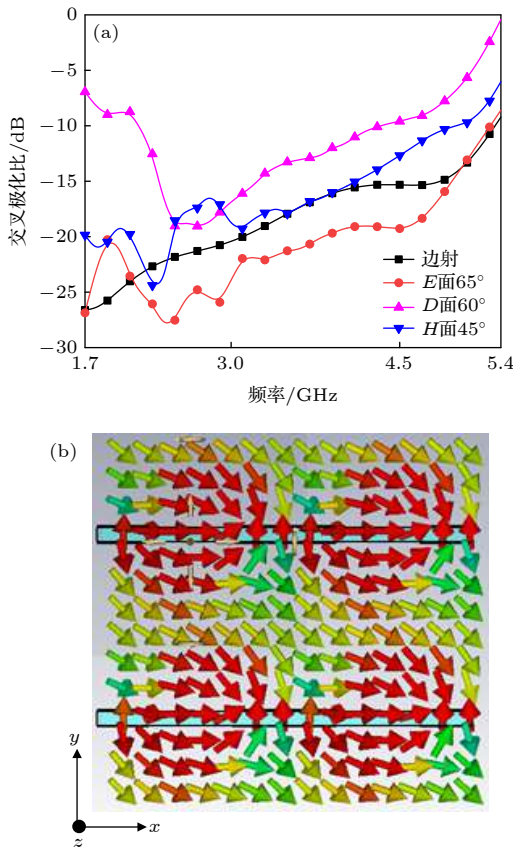


图 4 无限大阵列交叉极化水平 (a) 在不同面不同角度扫描时的交叉极化比; (b) 在 3 GHz 边射时,天线口径面电场分布

Fig. 4. Cross polarization level in infinite array simulation: (a) Cross polarization ratio at different angles scanning in different planes; (b) electric field on radiation aperture at 3 GHz.

H 面的临近单元 (y 方向) 会产生强耦合,如图 4(b) 所示,这些强耦合会恶化交叉极化水平,频率越高,耦合越强,交叉极化恶化越严重.

2.2.2 辐射效率

图 5 给出了无限大阵列在不同平面不同角度扫描时的辐射效率. 在边射时,阵列效率最低值为 67%,在大多数频段,效率均大于 75%; 在 E 面 65° 扫描时,在大多数频段,效率均大于 70%; 在 H 面 45° 扫描时,在大多数频段,效率均大于 75%; 在 D 面 60° 扫描时,在大多数频段,效率均大于 65%. 然而,在高频情况下,在 H 面 45° 和 D 面 60° 扫描时,天线阵辐射效率变低,这是由于在高频时巴伦的阻抗匹配变差所致.

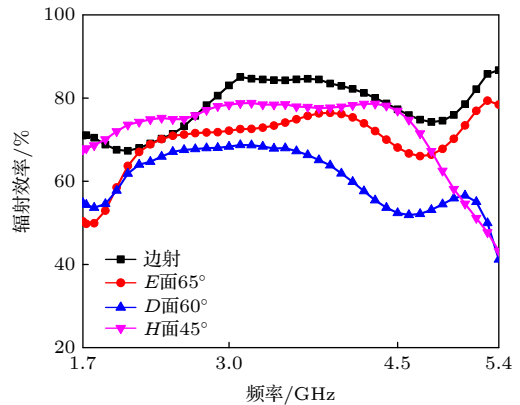


图 5 无限大阵列在边射、 E 面 65° 、 D 面 60° 和 H 面 45° 扫描时,天线阵的辐射效率

Fig. 5. Radiation efficiency of the proposed antenna array at broadside, 65° scanning in the E plane, 45° scanning in the H plane and 60° scanning in the D plane.

2.2.3 天线单元有源驻波比

从图 6 可以看出,无限大阵列在边射、 E 面 65° 、 H 面 45° 和 D 面 60° 扫描时,在 1.7—5.4 GHz 的频段内,天线单元有源驻波比均小于 2,说明该阵列具有宽带宽角扫描性能,同时保持良好的阻抗匹配.

3 实验结果及性能对比

实际加工的包含 256 个单元的 16×16 天线阵如图 7(a) 所示. 5 mm 厚的铜板作为天线阵的地板,地板上蚀刻 16 条缝隙用于竖直放置 16 块 Rogers 6110 的介质基板,地板四个角上添加了四个过孔,方便天线阵安装在测试的支架上. 天线阵

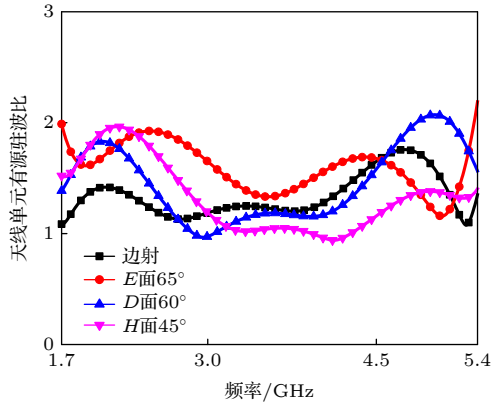


图6 无限大阵列在边射、 E 面 65° 、 H 面 45° 和 D 面 60° 扫描时, 天线单元有源驻波比
 Fig. 6. Active VSWRs of the unit cell in infinite array simulation at broadside, 65° scanning in the E plane, 45° scanning in the H plane and 60° scanning in the D plane.

的总尺寸为 $12.8\text{ cm} \times 12.8\text{ cm} \times 2.93\text{ cm}$. 测试装置和暗室环境如图7(b)所示, 测试装置包括: 128根由功分器到天线单元的等相位线缆, 19个1分8的功分器(工作频段为1—6 GHz, $S_{11} < -10\text{ dB}$), 16根延时线. 其中, 延时线起相位延时作用, 替代昂贵的移相器. 天线阵 E 面和 H 面测试

时, 测试方案如图8(a), (b)所示, 位于第1, 2, 3, 4, 15, 16, 17, 18排的单元接 $50\ \Omega$ 匹配负载, 中间8排的单元馈电. 天线阵 D 面测试时, 测试方案如图8(c)所示, 中间128个单元馈电, 四周128个单元接匹配负载. 四周单元接匹配负载可以有效减缓有限阵列的边界截断效应^[15].

3.1 远场测试结果

在3和5 GHz时, 天线阵 E 面、 D 面、 H 面在不同角度扫描时的测试和仿真的归一化方向图如图9—图11所示. 可以看出, 在低频时, 天线阵的主波束较宽; 在高频时, 天线阵的主波束较窄, 这是由于低频时天线阵辐射口径电尺寸较小、高频时天线阵辐射口径电尺寸变大所致. 同样地, 由于天线阵辐射口径的电尺寸较小, 在低频时, 阵列的主波束扫描角度未能到达最大扫描角度. 采用更大的阵列结构, 会改善这种情况.

随着扫描角度的增大, 主波束增益遵循 $\cos\theta$ 的变化规律, 因此在大角度扫描时, 主波束增益有一定的下降^[16]. 从图9—图11也可以看出, 天线阵

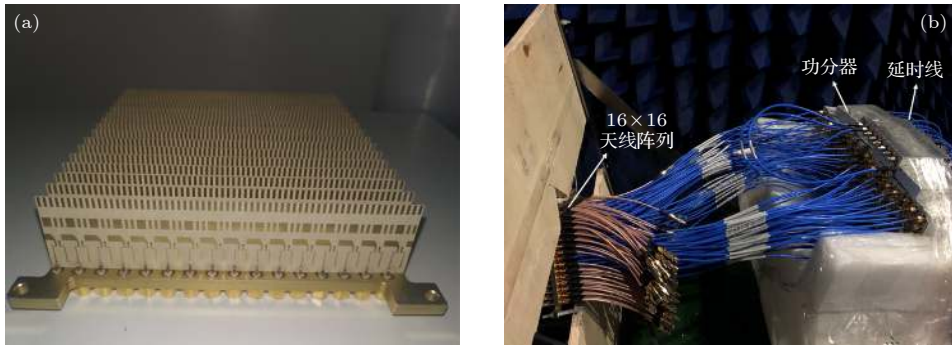


图7 天线阵加工和测试 (a) 实际加工的 16×16 阵列; (b) 测试装置和测试环境

Fig. 7. Antenna array fabrication and measurement: (a) Fabricated prototype of 16×16 antenna array; (b) measurement setup and environment.

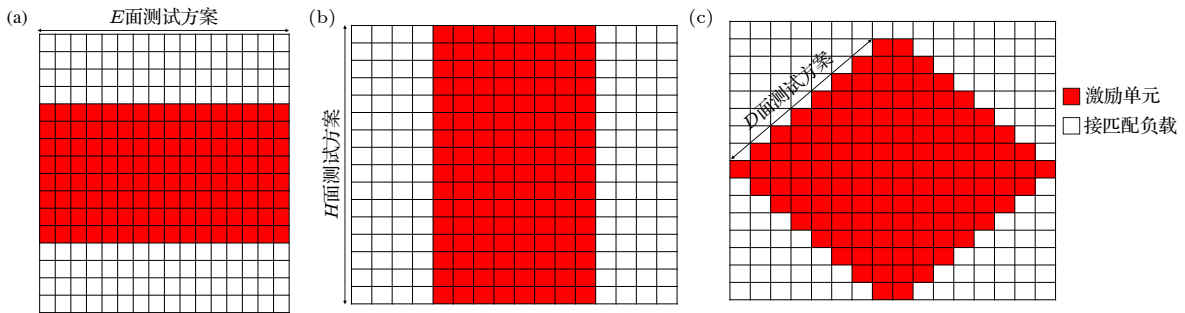


图8 测试方案 (a) E 面; (b) H 面; (c) D 面

Fig. 8. Measurement scheme: (a) E plane; (b) H plane; (c) D plane.

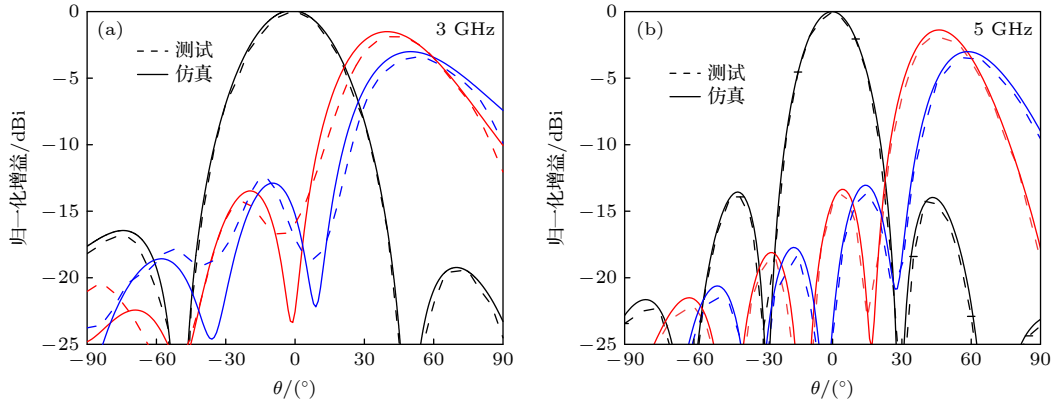


图 9 E 面 0° , 45° , 65° 扫描时的归一化方向图 (a) 3 GHz; (b) 5 GHz

Fig. 9. Normalized radiation patterns at 0° , 45° and 65° scanning in the E plane: (a) 3 GHz; (b) 5 GHz.

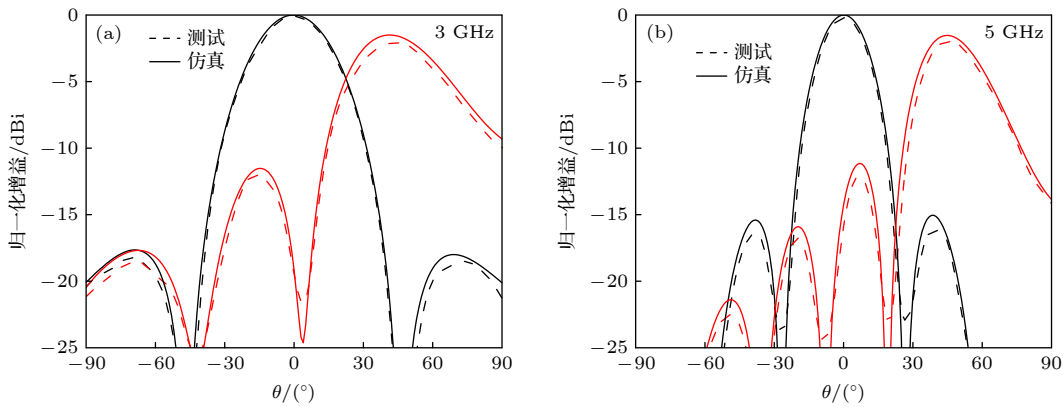


图 10 H 面 0° , 45° 扫描时的归一化方向图 (a) 3 GHz; (b) 5 GHz

Fig. 10. Normalized radiation patterns at 0° and 45° scanning in the H plane: (a) 3 GHz; (b) 5 GHz.

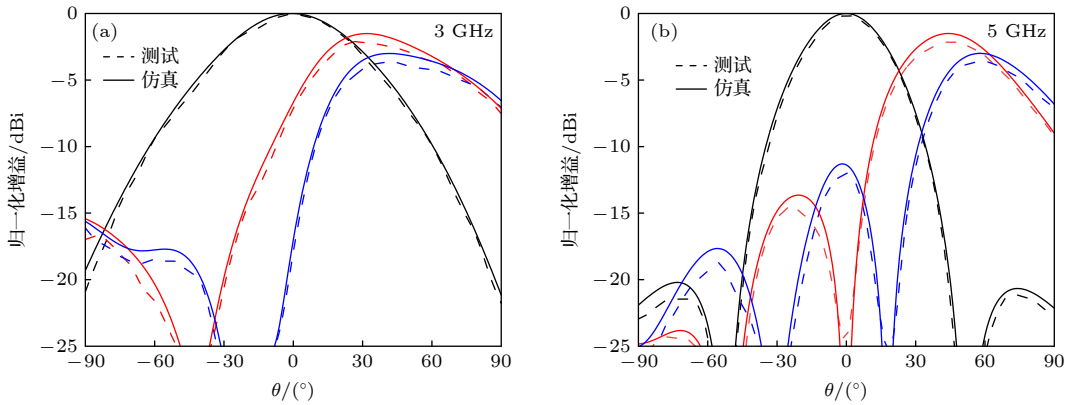


图 11 D 面 0° , 45° , 60° 扫描时的归一化方向图 (a) 3 GHz; (b) 5 GHz

Fig. 11. Normalized radiation patterns at 0° , 45° and 60° scanning in the D plane: (a) 3 GHz; (b) 5 GHz.

的方向图有一定的不对称,这主要是由于馈电结构的不对称所致.在高频大角度扫描时,测试增益和仿真增益相比有一定下降,这主要是由接头、测试线缆的损耗所致.

天线阵边射时,测试和仿真的同极化增益以及理想口径增益对比如图 12 所示.可以看出,低频

时,测试和仿真的同极化增益和理想口径增益比较符合;高频时,测试和仿真的同极化增益和理想口径增益差异增大,这是由于在高频时交叉极化变差,线缆和接头的损耗也变大,导致同极化增益减小.在 5.4 GHz 时,测试的同极化增益比理想口径增益小 2.3 dB.

表 1 按相同辐射口径换算, 不同文献中天线阵的辐射功率对比

Table 1. Comparisons of radiated power of antenna arrays in literatures on the same conversion size radiation aperture.

参考文献	工作频率/GHz	单元周期/ $\lambda_{\text{high}} \times \lambda_{\text{high}}$	扫描角度	有源驻波比	单元个数	辐射效率	辐射功率/W
[16]	0.75—3.85 GHz (5.1:1)	0.36×0.36	E-70° H-60°	<3	771	95%	732
[17]	0.68—5.00 GHz (7.35:1)	0.45×0.45	E-45° H-45°	<3	493	70%	345
[18]	0.80—4.38 GHz (5.5:1)	0.35×0.35	E-70° H-55°	<3	816	87%	710
[19]	3.13—11.63 GHz (3.7:1)	0.36×0.36	E-75° H-60°	<3	771	84%	647
[20]	6.5—14.5 GHz (2.23:1)	0.45×0.45	E-50° H-50°	<2	493	95%	468
[21]	7.8—13.5 GHz (1.7:1)	0.45×0.39	E-70° H-70°	<2	569	90%	512
本文设计	1.7—5.4 GHz (3.2:1)	0.144×0.144	E-65° H-45°	<2	4822	84%	4050

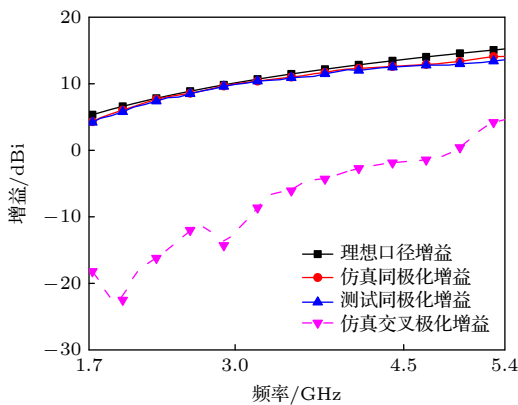


图 12 天线阵边射时, 测试结果和仿真结果对比

Fig. 12. Comparisons between measured and simulated results at broadside radiation.

3.2 与文献中其他设计的性能对比

假设每个天线单元输入功率为 1 W, 工作在边射最高频率, 按相同辐射口径 ($10\lambda_{\text{high}} \times 10\lambda_{\text{high}}$) 换算, 文献 [16–21] 以及本文设计的天线阵辐射功率对比如表 1 所列. 可以看出, 由于本文提出的天线单元具有最小的电尺寸, 因此, 在 $10\lambda_{\text{high}} \times 10\lambda_{\text{high}}$ 的口径下可以布置多达 4822 个天线单元; 同时, 本文设计的天线阵具有较高的辐射效率, 最终天线阵辐射功率为 4050 W, 是文献中其他阵列辐射功率的 5.5 倍以上.

需要指出的是, 文献 [16–19] 中天线阵的带宽和扫描角度是在天线单元有源驻波比 < 3 的标准下给出的, 而本文的带宽和扫描角度是在天线单元有源驻波比小于 2 的更优标准下给出的.

4 结 论

本文设计了一个用于有限口径辐射功率提升的紧耦合相控阵天线. 在有限口径下布置更多单元

和提高天线阵辐射效率均有助于提升有限口径的辐射功率, 因而采用高介电常数的介质基板和紧凑型巴伦使天线阵小型化; 同时, 改善天线阵和自由空间的阻抗匹配、巴伦和天线的阻抗匹配以及采用低损耗的介质基板提高天线阵的辐射效率, 最终天线单元周期仅为 $0.144\lambda_{\text{high}} \times 0.144\lambda_{\text{high}}$. 天线阵的工作频段为 1.7—5.4 GHz, 在有源单元驻波比小于 2 的标准下, 能够实现 E 面 65°、H 面 45° 和 D 面 60° 的扫描性能. 实际加工了一个 16×16 天线阵, 仿真和测试结果具有良好的一致性. 和文献中的其他阵列对比, 按相同辐射口径面积换算时, 本文设计的阵列具有更高的辐射功率, 验证了通过减小单元尺寸、同时提高天线阵辐射效率, 能够提升有限口径的辐射功率.

参考文献

- [1] Gold S H, Nusinovich G S 1997 *Rev. Sci. Instrum.* **68** 3945
- [2] Chen Y, Zhang Y P 2005 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **53** 3089
- [3] Choe H, Lim S 2014 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 5497
- [4] Li J F, Chu Q X, Huang T W 2012 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **60** 482
- [5] Chen Z F, Huang H, Chang A B, Xu Z, He H, Lei L R, Hu J J, Yuan H, Liu Z B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 238402 (in Chinese) [陈昭福, 黄华, 常安碧, 许州, 何晓, 雷禄容, 胡进光, 袁欢, 刘振帮 2014 *物理学报* **63** 238402]
- [6] Munk B A 2003 *Finite Antenna Arrays and FSS* (USA: Wiley-IEEE Press) pp181–213
- [7] Yetisir E, Ghalichechian N, Volakis J L 2016 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **64** 4256
- [8] Hu C H, Wang B Z, Gao G F, Wang R, Xiao S Q, Ding X 2020 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **20** 63
- [9] Zhang Y H, Yang S W, Xiao S W, Chen Y K, Qu S W, Hu J 2019 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **18** 378
- [10] Lim T B, Zhu L 2008 *Proceedings of the IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Art Miniaturizing RF Microwave and Passive Components* Chengdu, China, December 14–15, 2008 p153
- [11] Zhu L, Bu H, Wu K 2000 *IEEE MTT-S International*

- Microwave Symposium Digest* Boston, USA, June 11–16, 2000 p315
- [12] Magill E G, Wheeler H A 1966 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **14** 49
- [13] Smith D R, Schultz S 2002 *Phys. Rev. B* **65** 195104
- [14] Hood A Z, Karacolak T, Topsakal E 2008 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **7** 656
- [15] Cavallo D, Syed W H, Neto A 2017 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65** 1788
- [16] Hu C H, Wang B Z, Wang R, Xiao S Q, Ding X 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **68** 2788
- [17] Moulder W F, Sertel K, Volakis J L 2013 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **61** 5802
- [18] Bah A O, Qin P Y, Ziolkowski RW, Guo Y J, Bird T S 2019 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **67** 2332
- [19] Jiang Z G, Xiao S Q, Yao Z X, Wang B Z 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **68** 7348
- [20] Syed W H, Cavallo D, Shivamurthy H T, Neto A 2015 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **64** 543
- [21] Xia R L, Qu S W, Yang S W, Chen Y K 2018 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **66** 1767

A tightly coupled dipole array used for radiation power improvement on finite radiation aperture*

Tong San-Qiang Wang Bing-Zhong[†] Wang Ren

(*Institute of Applied Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China*)

(Received 9 February 2021; revised manuscript received 21 April 2021)

Abstract

Radiation power of an electromagnetic wave plays a decisive role in its transmission distance. Traditionally, the radiation power can be improved by expanding the radiation aperture size of the antenna array or increasing input power of the unit cell. However, the radiation aperture size is always restricted by assembly space. The input power improvement of the unit cell is always limited by the signal source. It is difficult to improve radiation power on a finite radiation aperture. However, the radiation power on a finite radiation aperture is related closely to the number of antenna elements and the radiation efficiency of the antenna array. It is useful to arrange more elements and improve radiation efficiency of the antenna array to improve the radiation power on a finite radiation aperture. Wideband wide-angle scanning phased array is able to make full use of a finite radiation aperture. The wide-angle scanning properties make it possible for the radiated power to cover a wide area. In this paper, a compact wideband wide-angle scanning tightly coupled dipole array (TCDA) is proposed. A high permittivity substrate and compact wideband balun are used for miniaturizing the antenna array. The period of the unit cell is only $0.144\lambda_{\text{high}} \times 0.144\lambda_{\text{high}}$ (λ_{high} is the wavelength at the highest operation frequency in free space). Parameters of the balun are optimized to improve impedance matching between the balun and the antenna array. Two bilateral frequency selective surfaces (FSSs) are used to replace traditional dielectric superstrate to improve the impedance matching between the antenna array and free space. A low-loss dielectric substrate is used to reduce dielectric loss of the antenna array. In these ways, the radiation efficiency is greatly improved. The simulation results show that the proposed antenna array operates at 1.7–5.4 GHz (3.2:1) while scanning up to 65° in the E plane, 45° in the H plane and 60° in the D plane with following a rigorous impedance matching criterion (active VSWR < 2). A 16×16 prototype array is fabricated and measured. Good agreement is achieved between the simulation results and the measurement results. Compared with the designs in the literature, the proposed antenna array has an excellent performance in radiation power on a finite radiation aperture.

Keywords: radiated power, radiation aperture, phased array antennas, wideband wide-angle scanning

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 42.60.Da

DOI: 10.7498/aps.70.20210309

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61731005, 61901086), the Postdoctoral Innovation Talents Support Program, China (Grant No. BX20180057), the Applied Foundational Research Project of Sichuan Province, China (Grant No. 2021YJ0100), and the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant No. ZYGX2019J101).

[†] Corresponding author. E-mail: bwang@uestc.edu.cn