

一款低剖面超宽带低交叉极化紧耦合阵列

耿 源, 潘 锦, 王凌霄, 刘思豪, 刘颜回, 杨德强*

(电子科技大学电子科学与工程学院, 四川成都 611731)

摘 要: 本文提出了一款低剖面超宽带低交叉极化紧耦合阵列. 传统的紧耦合阵列通常会以牺牲阵列剖面高度的方式来扩展带宽. 为了在不增剖面高度的情况下扩展紧耦合阵列的低频带宽, 在低频引入一种可以等效为磁偶极子的电流环辐射模式. 通过仿真分析可以发现 Double-Y 并非在所有频段都能实现良好的平衡变换, 而非平衡馈电将会导致馈电网络中出现净垂直电流, 通过利用 Double-Y 巴伦在低频为非平衡馈电的特性, 让低频出现的净垂直电流驱动由偶极子、Double-Y 巴伦、短路探针和地板形成的电流环. 而且这种可以等效为磁偶极子电流环, 可以实现有效辐射. 因此, 这一设计改善了阵列的低频带宽, 也相当于降低了阵列剖面. 紧耦合阵列中的传统宽角度阻抗匹配层作用通常相对单一, 一般仅用来改善阵列的阻抗匹配和扫描能力. 然而, 本文提出了一款多功能宽角度阻抗匹配层. 通过将超表面和极化栅格进行融合设计, 宽角度阻抗匹配层不仅保留了原有改善阵列阻抗匹配和扫描能力的功能, 而且可以改善阵列的交叉极化. 最终, 提出的阵列实现了电压驻波比 (Voltage Standing Wave Ratio, VSWR) 小于 3 时 5:1 的带宽 (0.8~4 GHz) 和 E 面 45°/H 面 45° 的扫描. 而且阵列的剖面高度为 0.089 个低频波长, 阵列 E 面 45°/H 面 45° 扫描时交叉极化分别小于 -54 dB 和 -30 dB. 为了验证该设计, 制作了一个 10 × 10 的紧耦合阵列.

关键词: 低剖面; 超宽带; 磁偶极子; 超表面; 低交叉极化; 紧耦合阵列

基金项目: 国家自然科学基金 (No.U2341208)

中图分类号: TN821

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)12-4607-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20251010

A Low-Profile, Ultra-Wideband, Low Cross-Polarization Tightly Coupled Dipole Array

GENG Yuan, PAN Jin, WANG Ling-xiao, LIU Si-hao, LIU Yan-hui, YANG De-qiang*

(School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract: This paper proposes a low-profile, ultra-wideband, low-cross-polarization tightly coupled dipole array. Traditional tightly coupled dipole arrays typically expand bandwidth at the expense of arrays profile height. To extend the low-frequency bandwidth of the tightly coupled dipole array without increasing profile height, a current loop radiation mode equivalent to a magnetic dipole is introduced at low frequencies. Simulation analysis reveals that the Double-Y configuration does not achieve optimal balanced transformation across all frequency bands. Non-balanced feeding introduces net vertical currents within the feed network. By leveraging the Double-Y balun's inherent non-balanced feeding characteristics at low frequencies, the net vertical currents drive a current loop formed by the dipole, Double-Y balun, shorted probe, and ground plane. Moreover, this current loop, equivalent to a magnetic dipole, enables effective radiation. Consequently, this design enhances the array's low-frequency bandwidth while simultaneously reducing the array's profile. Traditional wide-angle impedance matching layers in TCDA serve a relatively singular purpose, typically employed solely to enhance array impedance matching and scanning capability. However, this paper proposes a multifunctional wide-angle impedance matching layer. By integrating a metasurface with a polarization grid, the wide-angle impedance matching layer not only retains its original functions of improving array impedance matching and scanning capability but also enhances the array's cross-polarization performance. Ultimately, the proposed array achieves a 5:1 bandwidth (0.8~4 GHz) with a voltage standing wave ratio (VSWR) < 3, alongside scanning capabilities of 45° in the E-/H-plane. Moreover, with a profile of 0.089 λ_{low} , where λ_{low} is the wavelength at the lowest operating frequency. The array exhibits cross-polarization levels below -54 dB/-30 dB for

E-/H-plane 45° scanning. To validate this design, a 10 × 10 tightly coupled array was fabricated.

Key words: low-profile; ultra-wideband; magnetic dipole; metasurface; low cross-polarization; tightly coupled dipole array

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.U2341208)

1 引言

超宽带相控阵由于能够覆盖多个频段,因此能够将多种功能集成于同一口径面,极大地节省了电子设备的空间占用. 如果为了实现更好的目标设备共形,阵列的剖面也需要进一步降低. 同时,阵列的交叉极化对通信质量和雷达探测性能也有重要影响. 因此,设计一款低剖面、低交叉极化的超宽带相控阵具有重要的应用价值.

传统的 Vivaldi 相控阵虽然可以实现超宽带^[1-3],但其剖面较高(约 0.3 低频波长)和 D 面扫描时交叉极化恶化的问题一直没有被同时解决. 近些年,紧耦合相控阵^[4-16]因其能实现比 Vivaldi 阵列更低的剖面受到了很多关注. 然而,改善紧耦合相控阵交叉极化的研究相对较少. 通过借鉴对拓 Vivaldi 天线降低交叉极化的措施,文献[14]提出使用对拓偶极子代替传统紧耦合偶极子阵列(Tightly Coupled Dipole Array, TCDA)中的偶极子,从而改善阵列的交叉极化. 最终,提出的阵列可以在 VSWR < 3.2 时实现 5:1 的阻抗带宽. 阵列 E 面 60°/H 面 45°扫描时交叉极化分别小于 -35 dB 和 -15 dB. 然而采用对拓偶极子在改善交叉极化的同时也限制了其他阵列结构设计,一定程度上影响了阵列的其他性能,例如,其使用了多层介质板导致结构复杂度增加,且剖面高度为 0.102 低频波长.

在已报道的紧耦合阵列中,宽角度匹配层通常仅用来改善阵列的阻抗匹配和扫描能力,赋予宽角度匹配层其他能力的设计研究相对较少. 本文基于超表面和极化栅格,提出一款多功能宽角度匹配层. 提出的多功能宽角度匹配层不仅可以改善阻抗匹配和扫描能力,而且可以降低阵列的交叉极化. 同时,为了改善带宽降低剖面,通过馈电网络、偶极子、短路探针和金属地板,在低频引入了一个电流环模式,有效扩展了低频带宽. 最终,提出的阵列实现了 VSWR 小于 3 时 5:1 的带宽和 E/H 面 45°的扫描,且阵列的剖面高度为 0.089 个低频波长,阵列 E 面 45°/H 面 45°扫描时交叉极化分别小于 -54 dB 和 -30 dB.

2 阵列结构和原理

2.1 阵列单元结构

阵列的单元结构(简称“阵元结构”)如图 1 所示. 超表面和极化栅格被打印在厚度 2 mm、介电常数 2.2 的 F4B 上. 偶极子、Double-Y 巴伦和短路探针被打印在厚

度 0.762 mm、电常数 3.66 的 Rogers 4350 上. 提出阵列单元模型的其他参数已在图 1 中标注.

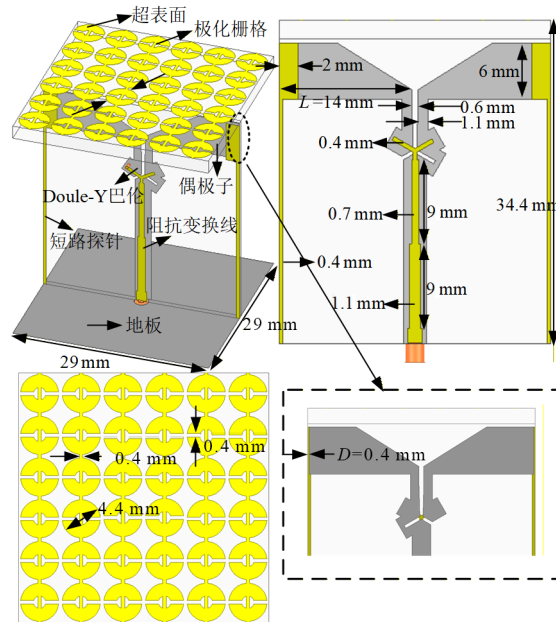


图 1 阵元结构

2.2 电流环模式分析

图 2 为 0.9 GHz 处阵元矢量电流分布,根据镜像原理,地板下方给出了镜像电流. 可以看到阵元左边偶极子、Double-Y 巴伦和短路探针上的电流分布虽然也形成了电流环,但是由于电流存在周期性的反向,所以此电流环不能产生等效于磁偶极子的有效辐射. 然而阵元右边偶极子、Double-Y 巴伦和短路探针上的电流分布并形成了与电流方向一致且完整的电流环,所以能产生等效于磁偶极子的有效辐射^[15].

这种电流环模式的形成与非平衡馈电时馈电网络中的净垂直电流相关. 而净垂直电流的存在将会驱动由偶极子、Double-Y 巴伦、短路探针和地板形成的电流环. 如图 3 所示, Double-Y 巴伦并非在所有频段都能实现良好的平衡变换,在低频 0.9 GHz 时,馈电端口的电流明显非等幅,因此可以说馈电网络在 0.9 GHz 时为非平衡馈电,即存在净垂直电流,也就可以建立起电流环模式.

由图 4 也可以看出,没有短路探针时,此时不能引入可以辐射的电流环模式,所以输入阻抗的实部在 0.9 GHz 基本为 0,且输入阻抗的虚部容抗较大. 而引入短路探针后,此时可以辐射的电流环模式也能被引入,因此输

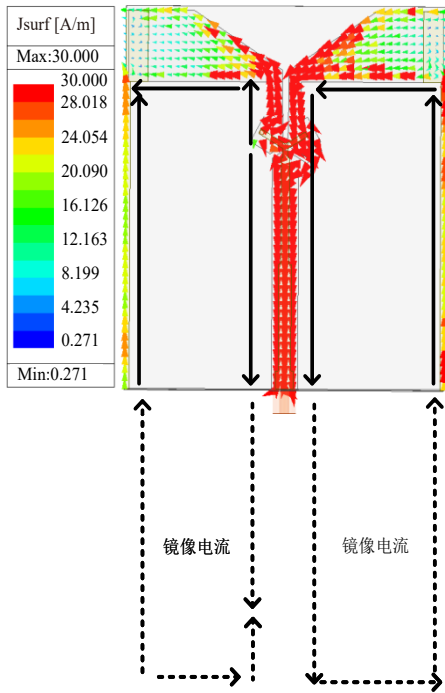


图2 0.9 GHz阵元矢量电流分布

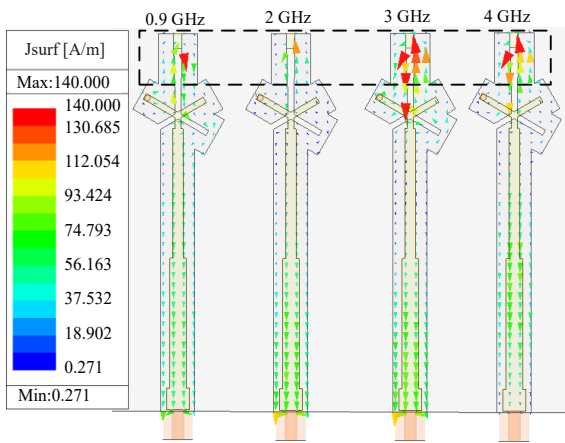


图3 馈电网络在带内各频点矢量电流分布

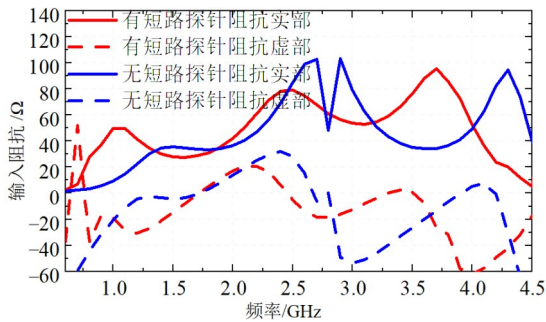


图4 有/无短路探针时的阵元输入阻抗

入阻抗的实部在0.9 GHz增大到30 Ω左右,且输入阻抗的虚部出现了一个谐振点.从图5也可以看出,在引入

短路探针前后,阵元的低频带宽明显被拓展.以有源VSWR小于3为标准,低频截止频率从1.1 GHz拓展到0.8 GHz.高频截止频率虽然略有恶化,但是引入短路探针后的带宽还是大于引入短路探针前,并且引入短路探针还能抑制2.8 GHz附近出现的共模谐振^[9].

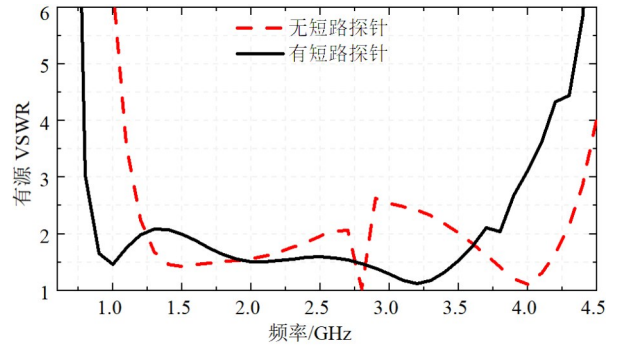


图5 有/无短路探针时的阵元有源VSWR

2.3 超表面宽角度阻抗匹配层分析

宽角度匹配层通常被设计用于改善阵列的宽角扫描能力.如图6所示,模型1为基本单元为分裂环的超表面.将模型1和抑制x轴方向的极化栅格融合,就变成了提出的多功能宽角度阻抗匹配层,即模型2.根据图7的紧耦合阵元经典等效电路模型^[5],阵元的输入阻抗表示为

$$Z_{TCDA} = j\omega L_{dipole} + 1/j\omega C_{coupling} + Z_+ // Z_- \quad (1)$$

$$Z_- = t \frac{Z_0 + jZ_{sup} \tan(2\pi h/\lambda_1)}{Z_{sup} + jZ_0 \tan(2\pi h/\lambda_1)} \quad (2)$$

$$Z_+ = jZ_0 \tan(2\pi H/\lambda_0) \quad (3)$$

$$\lambda_1 = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r} \quad (4)$$

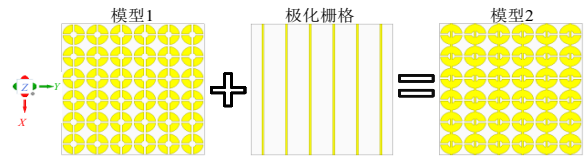


图6 提出的多功能超表面宽角度阻抗匹配层设计过程

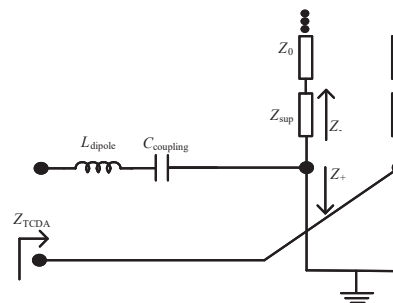


图7 阵元等效电路模型

其中, $Z_{\text{TCD A}}$ 为阵列单元输入阻抗; j 为虚数单位; ω 为角频率; Z_+ 和 Z_- 分别为从偶极子层向地板和自由空间中看去的输入阻抗; Z_{sup} 为宽角度阻抗匹配层的等效特征阻抗; λ_1 和 λ_2 分别为介质和自由空间中的波长; ϵ_r 为相对介电常数; Z_0 代表自由空间中的波阻抗; L_{dipole} 代表偶极子自身等效的电感, 电感的大小与偶极子的长度及形状相关. 如图 8 所示, 增加偶极子的长度, 电感 L_{dipole} 增加, 虽然能略微改善低频带宽, 然而增大电感将导致高频匹配恶化, 从而影响高频带宽, 为了覆盖 L 和 S 波段, 优化后的偶极子长度 L 为 14 mm. C_{coupling} 代表相邻单元间引入的电容, 用于抵消式 (3) 中地板在低频引入的电感. 减小相邻偶极子之间的缝隙 D 将增大 C_{coupling} , 这会让阻抗虚部的零点向低频平移, 从而扩展带宽. 然而, 增大 C_{coupling} 也会影响 1.4 GHz 处的阻抗匹配. 因此, 优化后的相邻偶极子之间的缝隙 D 为 0.4 mm. Z_{sup} 和 ϵ_r 分别代表宽角阻抗匹配层的等效特征阻抗和等效介电常数. h 和 H 分别代表宽角阻抗匹配层的厚度和偶极子距离地板的高度, 宽角阻抗匹配层的特征阻抗与其等效介电常数和等效磁导率有关. 因此, 从式 (1)~式 (4) 可以看出, 优化 h 和宽角阻抗匹配层的等效介电常数和等效磁导率就可以影响阵元的输入阻抗, 从而影响阵列的阻抗匹配. 根据等效媒质理论, 可以将超表面等效成具有特定本构参数的介质^[17]. 那么就可以通过分析超表面宽角阻抗匹配层的等效介电常数和等效磁导率来分析超表面对阻抗匹配的影响.

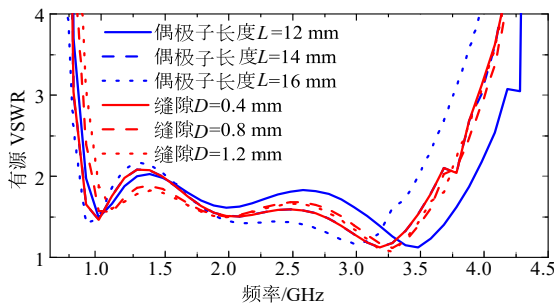
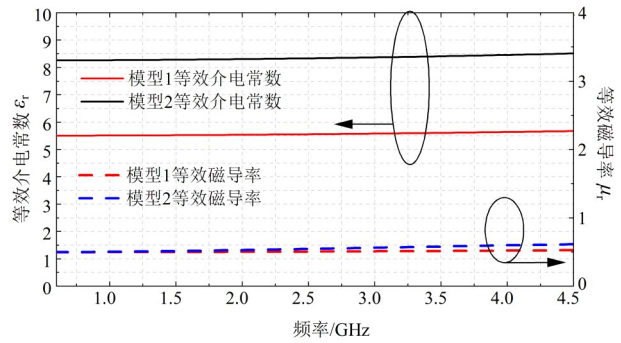


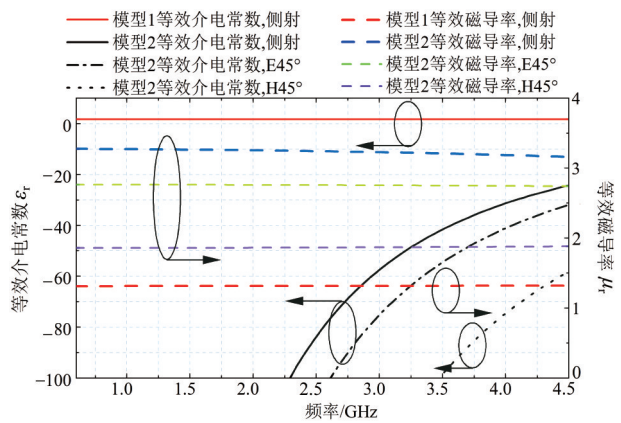
图 8 有源 VSWR 随偶极子长度 L 和相邻偶极子之间缝隙 D 的变化

图 9 给出了模型 1 和模型 2 对不同极化平面波垂直入射时的等效介电常数和等效磁导率. 从图 9(a) 可以看出, y 极化(阵列主极化)平面波入射时, 模型 1 和模型 2 的等效磁导率基本一致. 然而相比模型 1, 模型 2 的等效介电常数增加. 根据式 (2) 和式 (4), $h=2$ mm 时, 等效介电常数增加会导致 Z_{sup} 减小, 从而使天线输入阻抗减小, 更利于阻抗匹配. 从图 9(b) 可以看出, x 极化(阵列交叉极化)无论是侧射还是 E/H45° 入射, 模型 2 在整个工作频带内的等效介电常数一直为负值, 这归功于极化栅格的引入. 从图 10 也可以看出, x 极化平面波不同入射角度下, 整个工作频带内的传输系数始终小于 -15 dB,

这阻止了 x 极化平面波即交叉极化分量的通过, 从而达到了改善交叉极化的目的.



(a) y 极化平面波



(b) x 极化平面波

图 9 模型 1 和 2 对不同极化平面波的等效介电常数和等效磁导率

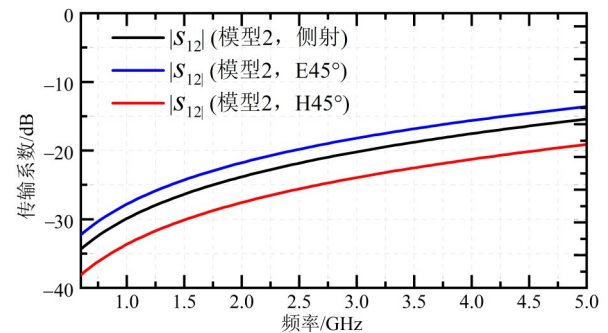


图 10 模型 2 对 x 极化平面波不同入射角度下的传输系数

最终, 引入的多功能宽角度阻抗匹配层不仅改善了阵列的扫描能力, 也改善了阵列的交叉极化. 如图 11 所示, 多功能宽角度阻抗匹配层的引入前后, 阵列侧射时交叉极化改善了 15 dB 以上, E 面 45° 扫描时, 交叉极化甚至实现了约 30 dB 以上的改善. 而 D 面 45° 扫描时, 交叉极化虽然没有在整个频带内实现改善, 但也基本达到了单极化阵列 D 面 45° 扫描的临界值^[14]. 图 12 则表明, 引入的多功能宽角度阻抗匹配层对阵列的阻抗

匹配有明显改善. 尤其是 H45° 扫描, 多功能宽角度阻抗匹配层引入前后, 最大有源 VSWR 从 4.5 降到 3.

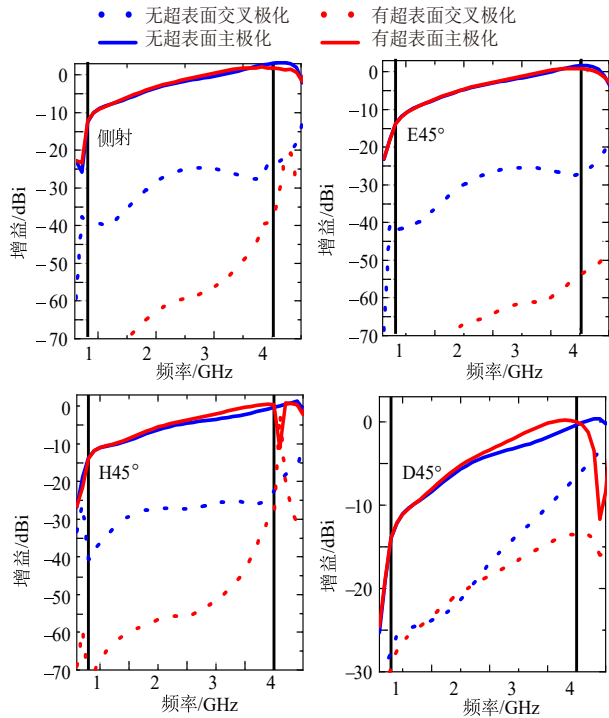


图 11 有/无提出的多功能超表面宽角阻抗匹配层时的主极化和交叉极化增益

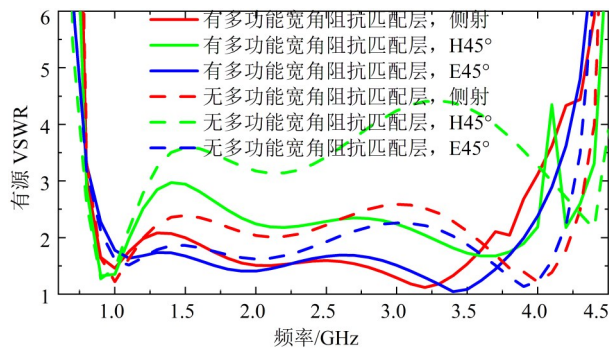


图 12 有/无提出的多功能宽角阻抗匹配层时的有源 VSWR

3 阵列加工和测试

一个 10×10 的阵列被加工出来用于验证本次设计的可行性和性能. 为了有效减少阵列的后向增益, 并且便于将阵列稳固地安装在支架上, 阵列的地板部分被适当延长, 并且在延长的外缘打孔, 以方便固定. 为了确保阵列的稳定性和电性能, 通过在地板上开槽的方式, 将一块打印有偶极子、馈电网络和短路探针的介质板垂直固定于地板表面. 地板下方的电连接部分则通过焊接将馈电网络的地面、短路探针和地板进行电气连接, 从而保证整个系统的电性能稳定. 而打印有超表面和极化栅格的多功能宽角度阻抗匹配层则在其周边

开孔, 然后使用尼龙柱将其支撑固定在地板上.

为了避免有限大阵列的边缘截断效应对阵列性能的影响, 阵列的最外圈被设计为哑元, 即测试时将阵列最外圈接 50Ω 匹配负载. 哑元的引入可以一定程度吸收阵列由无限大变为有限大因截断出现的边缘反射电流, 从而避免边缘反射电流对阵元匹配的影响. 制造完成后的阵列实物模型及相应的有源驻波比和远场方向图测试场景如图 13 所示.

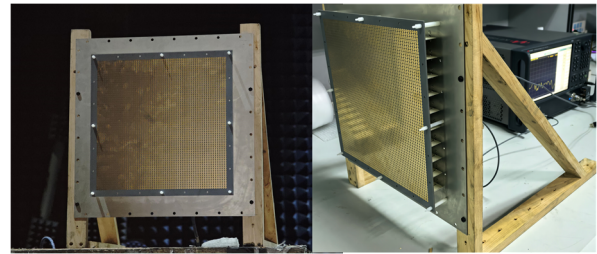


图 13 阵列实物模型和测试场景

采用有源反射系数矢量求和公式即式(5)得到测试有源驻波比. 在测量过程中需要使用矢量网络分析仪进行数据采集. 首先, 测量一个端口的反射系数, 接下来, 继续测量该端口与阵列上其他所有端口之间的传输系数. 在测量反射系数和传输系数时, 除了正在测量传输系数的两个端口外, 其他所有端口需要连接到 50Ω 的匹配负载. 在完成了单个端口的测量后, 重复上述步骤, 逐一测量阵列中每个待测端口的反射系数和传输系数. 每次测量都会记录反射系数和传输系数的数据. 测量完所有待测端口后, 就可以将获取的各项数据代入式(5)和式(6)进行^[18]有源驻波比的计算, 即

$$\Gamma_{pq}(\theta_0, \varphi_0) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N S_{mn,pq} e^{-j[(m-p)d_x u + (n-q)d_y v]} \quad (5)$$

$$\text{Active VSWR} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (6)$$

其中, $M \times N$ 为阵列单元的数量; e 为自然底数; d_x 和 d_y 是阵列沿着 x 轴和 y 轴方向的阵元间距; θ_0 和 φ_0 为阵列的扫描角度; $S_{mn,pq}$ 为阵列单元 mn 与 pq 之间的传输系数. 测量得到的有源驻波比如图 14 所示. 可以看到测试的中心单元有源驻波比结果基本和仿真结果一致.

远场方向图的测量采用单元激励有源方向图法

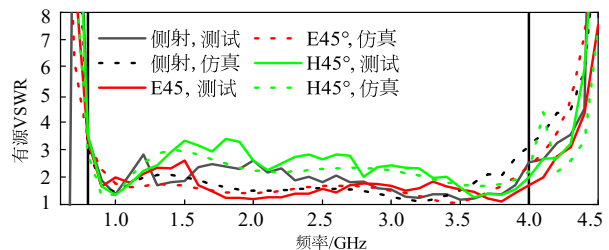


图 14 测试阵列中心单元有源 VSWR

(Unit Excitation Active Element Pattern, UEAP) [19]. 首先,对于阵列中的每个单独单元,依次进行测量.在测量过程中,除了待测的单元外,其他单元需要接入 50 Ω 的匹配负载.重复上述步骤,待测量完成全部端口后,可以按照预定的波束扫描角度对测得的单元方向图进行配相处理,并通过矢量叠加方法将各个单元的方向图合成.通过这一过程,可以准确地得到整个阵列的增益和波束扫描方向图.测得的增益如图 15 所示.从图 15 可以看到,测试增益与仿真增益之间非常一致,表明实际阵列的性能与理论理想口径预测结果相符.此外,在整个工作频带内,测试增益与仿真增益之间的差值始终保持在 1 dB 以内,表明阵列在设计频带内的性能稳定且符合预期. E/H 面 45° 扫描时 1 GHz 和 4 GHz 测试方向图如图 16 所示.从图 16 可以明显看出,实际测量的方向图与仿真方向图非常接近,证明阵列的波束扫描能力正常,并能够在整个频带范围内进行有效的波束扫描.同时,阵列在带内的方向图稳定,没有出现明显的畸变或偏离,进一步证明了阵列的可靠性和工作性能.

为了突出提出的紧耦合阵列的优势,表 1 列出了已报道的紧耦合阵列.从表 1 可以看到,已发表阵列 E 面扫描时的交叉极化水平最好的仅有 -35 dB,然而本设计 E 面扫描时的交叉极化水平达到了 -54 dB.文献[16]通过采用镜像馈电技术, E/H 面 45° 扫描时的交叉极化水平均小于 -28 dB.然而镜像馈电也导致扫描时阻抗剧烈波动,导致其最大有源驻波比达到 6 以上,宽带也限

表 1 提出的阵列和已发表紧耦合阵列的对比

| 阵列 | 带宽 | 扫描表现 | 单元尺寸 | 整体剖面 | 交叉极化水平 | 降低交叉极化水平技术 |
|--------|-----------------|-------------|--|-----------------------------|--------------------------------|-------------|
| 文献[6] | 3:1(VSWR<2.8) | E-45°/H-45° | $0.46\lambda_{\text{high}} \times 0.46\lambda_{\text{high}}$ | $0.19\lambda_{\text{low}}$ | <-15 dB 在 E/H 面 | 平面模块化阵列 |
| 文献[7] | 5.1:1(VSWR<3) | E-70°/H-60° | $0.37\lambda_{\text{high}} \times 0.37\lambda_{\text{high}}$ | $0.12\lambda_{\text{low}}$ | <-15 dB 在 E/H 面 | 对称偶极子 |
| 文献[8] | 5:1(VSWR<3) | E-60°/H-60° | $0.47\lambda_{\text{high}} \times 0.47\lambda_{\text{high}}$ | $0.22\lambda_{\text{low}}$ | <-15 dB 侧射 | 对称偶极子 |
| 文献[10] | 5.5:1(VSWR<3.2) | E-60°/H-55° | $0.35\lambda_{\text{high}} \times 0.35\lambda_{\text{high}}$ | $0.113\lambda_{\text{low}}$ | <-20 dB 在 E/H 面 | 对称偶极子 |
| 文献[14] | 5:1(VSWR<3.2) | E-60°/H-45° | $0.45\lambda_{\text{high}} \times 0.45\lambda_{\text{high}}$ | $0.102\lambda_{\text{low}}$ | <-35 dB 在 E 面 <-15 dB 在 H 面 | 平衡对拓偶极子 |
| 文献[16] | 1.6:1(VSWR<6.2) | E-70°/H-50° | $0.42\lambda_{\text{high}} \times 0.42\lambda_{\text{high}}$ | $0.165\lambda_{\text{low}}$ | <-28 dB 在 E 面 <-28 dB 在 H 面 | 镜像馈电 |
| 本文 | 5:1(VSWR<3) | E-45°/H-45° | $0.39\lambda_{\text{high}} \times 0.39\lambda_{\text{high}}$ | $0.089\lambda_{\text{low}}$ | <-54 dB 在 E 面 <-30 dB 在 H 面 | 多功能宽角度阻抗匹配层 |

4 结论

本文通过赋予紧耦合阵列传统宽角度阻抗匹配层新功能,在不增加阵列结构复杂度的同时,实现了扫描能力和交叉极化水平的同时改善.而且,为了进一步降低剖面改善带宽,通过偶极子、容性探针和馈电网络在低频引入了电流环辐射模式,这扩展了低频带宽.最终,一款低剖面超宽带低交叉极化紧耦合阵列被提出.

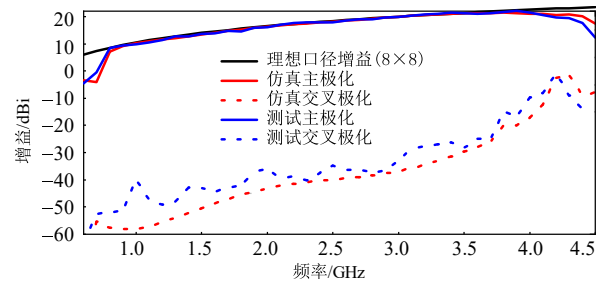


图 15 阵列测试主极化和交叉极化增益

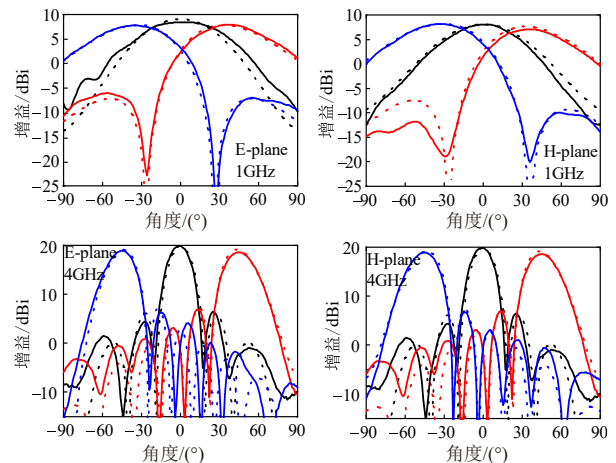


图 16 阵列测试和仿真方向图(实线为测试结果虚线为仿真结果)

制在 2 倍频以内.相比以往文献,本文提出的阵列不仅具备相当良好的交叉极化,在剖面高度也具备一定的优势,而且带宽也达到了 5 倍频.

对所设计的天线阵列进行了加工与测试,测试结果与仿真结果高度一致,证实了此设计.因此,所提阵列具备优良的性能表现,有望被应用到新型多功能电子系统中.

参考文献

- [1] LOGAN J T, KINDT R W, VOUVAKIS M N. Low cross-polarization Vivaldi arrays[J]. IEEE Transactions on An-

- tennas and Propagation, 2018, 66(4): 1827-1837.
- [2] LOGAN J T, KINDT R W, VOUVAKIS M N. A 1.2-12 GHz sliced Notch antenna array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(4): 1818-1826.
- [3] ELMANSOURI M A, FRIEDRICHS G R, BOSKOVIC L B, et al. An X-band through Ka-band thinned all-metal Vivaldi phased array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(11): 7613-7623.
- [4] NOVAK M H, VOLAKIS J L. Ultrawideband antennas for multiband satellite communications at UHF-Ku frequencies[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(4): 1334-1341.
- [5] DOANE J P, SERTEL K, VOLAKIS J L. A wideband, wide scanning tightly coupled dipole array with integrated balun (TCDA-IB)[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(9): 4538-4548.
- [6] HOLLAND S S, SCHAUBERT D H, VOUVAKIS M N. A 7-21 GHz dual-polarized planar ultrawideband modular antenna (PUMA) array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(10): 4589-4600.
- [7] HU C H, WANG B Z, WANG R, et al. Ultrawideband, wide-angle scanning array with compact, single-layer feeding network[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(4): 2788-2796.
- [8] ZHANG H Y, YANG S W, CHEN Y K, et al. Wideband dual-polarized linear array of tightly coupled elements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(1): 476-480.
- [9] ZHONG J N, JOHNSON A, ALWAN E A, et al. Dual-linear polarized phased array with 9:1 bandwidth and 60° scanning off broadside[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(3): 1996-2001.
- [10] BAH A O, QIN P Y, ZIOLKOWSKI R W, et al. A wide-band low-profile tightly coupled antenna array with a very high figure of merit[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(4): 2332-2343.
- [11] YETISIR E, GHALICHECHIAN N, VOLAKIS J L. Ultrawideband array with 70° scanning using FSS superstrate[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(10): 4256-4265.
- [12] XIAO S W, YANG S W, ZHANG H Y, et al. A low-profile wideband tightly coupled dipole array with reduced scattering using polarization conversion metamaterial[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(8): 5353-5361.
- [13] GENG Y, PAN J, LIU S H, et al. A compact fed tightly coupled dipole array of high performance without wide-angle impedance matching layers[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2025, 24(4): 813-817.
- [14] WANG B J, YANG S W, CHEN Y K, et al. Low cross-polarization ultrawideband tightly coupled balanced antipodal dipole array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(6): 4479-4488.
- [15] SUN J X, CHEN M Z, CHENG Y J. Single-PCB fabricated, ultrawideband, and wide-scanning phased array antenna with vertically integrated resistive frequency-selective surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024, 72(3): 2411-2422.
- [16] LIU W Y, HAO Z C, SUN D M, et al. A low cross-polarization and wide scanning-range dual-polarized planar phased array using mirrored pair feeding technique[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(6): 1749-1753.
- [17] SZABÓ Z, PARK G H, HEDGE R, et al. A unique extraction of metamaterial parameters based on Kramers-Kronig relationship[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(10): 2646-2653.
- [18] GROSS F B. *Frontiers in Antennas: Next Generation Design & Engineering*[M]. New York: McGraw Hill, 2011: 127-166.
- [19] POZAR D M. The active element pattern[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42(8): 1176-1178.

作者简介



耿源男, 1997年9月出生于安徽省亳州市。现为电子科技大学电子科学与工程学院博士研究生。主要研究方向为相控阵天线和滤波天线设计。

E-mail: YuanG6793@163.com



杨德强男, 1971年4月出生于四川省成都市。现为电子科技大学电子科学与工程学院正高级待遇的高级实验师。主要研究方向为天线技术, 包括移动终端天线、时域天线、阵列天线、天线测量等。

E-mail: dqyang@uestc.edu.cn