

基于通孔加载的紧耦合相控阵共模谐振抑制设计

何新月¹ 陈 星^{1*}
HE Xinyue CHEN Xing

摘 要

为实现超宽带相控阵天线抑制带内共模谐振的要求,文章设计了一款超宽带紧耦合偶极子相控阵天线。在紧耦合天线单元设计基础上,利用通孔加载以及类似共面波导结构,将主要频带内的共模谐振移至次要频段,实现超宽带设计,并进行加工和测试。仿真及测试结果表明,该超宽带紧耦合偶极子天线阵尺寸 540 mm×160 mm×27.4 mm,工作频段 1.6~5 GHz 内增益 > 12 dBi, 5~8.4 GHz 内增益 > 20 dBi; 且能够实现方位向 ±45° 扫描。该天线具有超宽带、低剖面、低旁瓣的特点,为超宽带相控阵天线领域提供了一种新颖的天线结构。

关键词

超宽带; 紧耦合偶极子; 共模谐振; 通孔加载; 相控阵

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.01.019

0 引言

紧耦合偶极子天线阵作为一种新兴的超宽带阵列天线技术,其利用了单元之间的互耦效应来拓展带宽。此外,紧耦合阵列单元之间的紧密联系也使得天线的整体尺寸得到减小,在小型化设计上具备天然优势。紧耦合阵列中金属底板带来的周期性短路效应也使得具备低剖面的性能。基于紧耦合技术的阵列天线设计已然成为宽带阵列天线设计中的一种优选方案,具备广阔的应用前景。

传统的紧耦合偶极子阵列天线(tightly coupled dipole array, TCDA)宽带特性往往与其馈电结构息息相关,文献[1-3]提出了一种集成威尔金森功分器和 Marchand 巴伦的 TCDA 阵列,切实减小了馈电端到紧耦合天线端的匹配难度,拓宽了天线带宽;文献[4-5]取消了功分器的使用,再对 Marchand 巴伦的外导体带状线进行穿孔以改变其特性阻抗,并在接地下方继续使用蜿蜒的阻抗渐变线,最终实现了 6.1:1 的阻抗带宽;文献[6]中基于指数型阻抗变换曲线的渐变巴伦,以及文献[7]中 Vivaldi 天线阵中常用的 Knorr 微带线-槽线巴伦,也被用于紧耦合阵列馈电结构设计中;文献[8]提出加载单个开口谐振环的覆盖层形式和文献[9]提出加载周期开口环的金属超表面覆盖层形式,均能将辐射能量上引、引导口径输入阻抗与自由空间波阻抗进行阻抗匹配;同时进行接地短路柱加载,将带内共模谐振向高频推出带外,实现超宽带天线的设计。

本文考虑到工程应用以及加工实现,最初设计的天线单元带内共模谐振受限于天线尺寸,于是对 Marchand 巴伦进

行改进,利用通孔加载以及类似共面波导结构,将主要频带内的共模谐振移至次要频段,实现超宽带 TCDA 单元设计。将单元组阵后,测试结果表明,该超宽带紧耦合偶极子天线阵能够在频段 1.6~8.4 GHz 正常工作,且实现方位向 ±45° 扫描。能应用于无人机超宽带相控阵领域。

1 共模谐振理论

偶极子不平衡的馈电形式会使得馈电结构上的差模电流不平衡,从而在偶极子的一侧产生垂直方向上的共模电流,该共模电流则可以激发一个定向电场,此时产生的谐振即共模谐振。当阵列中相邻单元的两个垂直接地导体之间的距离等于半波长时,均可以产生共模谐振^[10],如图 1 所示。

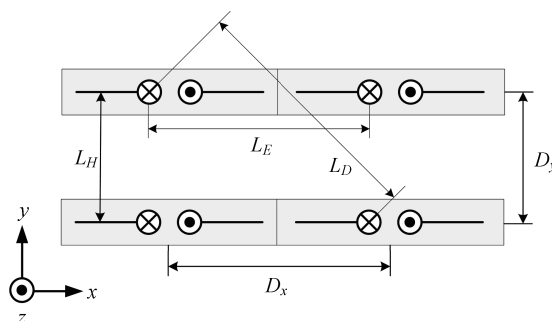


图 1 共模谐振示意图

在 E 面的相邻单元的接地导体距离 $L_E = \lambda/2$ 时,此时激发的共模谐振的频率等于栅瓣频率,一般不存在于工作频段内故不考虑;在 H 面的相邻单元的接地导体 L_H 距离内不存在探针结构,故不会出现共模影响;而在 D 面当相邻单元接地导体距离 $L_D = \lambda/2$ 时将出现谐振影响,此时共模谐振频率为:

1. 四川大学电子信息学院 四川成都 610040

$$f_{cm} \approx \frac{c_0}{2\sqrt{\epsilon_{eff}}L_D} = \frac{c_0}{2\sqrt{\epsilon_{eff}}\sqrt{L_E^2 + L_H^2}} \quad (1)$$

式中： c_0 表示光速； ϵ_{eff} 表示等效介电常数； L_E 、 L_H 和 L_D 分别表示 E 面、 H 面和 D 面的单元间距。

抑制共模谐振的方法大致为三种。一是改变单元尺寸，此时 L_D 极小，则共模谐振不会出现在频带内；二是增加类似探针结构的接地短路柱，缩短共模谐振路径，将其向高频推出带外；三是在辐射结构与巴伦间增加阻性吸收结构。其中前两种方式受限于单元尺寸，最后一种则会影响增益。

2 天线单元及阵列的设计原理

2.1 超宽带紧耦合天线单元设计

本文最初提出的天线模型如图 2 所示，结构从上至下分别是竖直 FSS 层、开口谐振环加载、偶极子辐射臂、矩形耦合片，接地短路柱、Marchand 巴伦及蜿蜒渐变线。

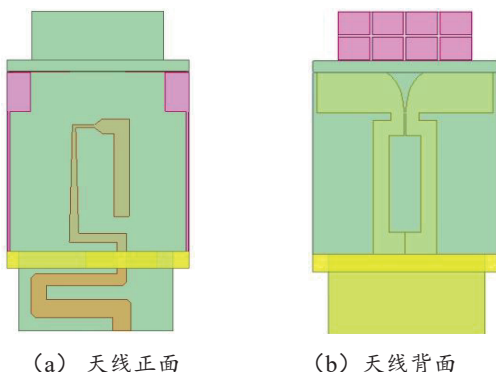


图 2 初始天线单元结构

由于天线阵面口径尺寸需 $< 540 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ ；同时为控制加工成本，天线单元尺寸不能过小；又考虑到后方一分八功分器和波控电路的设计，单元口径尺寸应选择在 $20 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ 较为合适。导致此时天线的有源驻波比仿真结果中，共模谐振出现在 6.7 GHz 左右，且常用的调整接地短路柱，将共模谐振移出带外的解决方式失效。

此时需考虑新的解决带内共模谐振的方式。如图 3 所示。

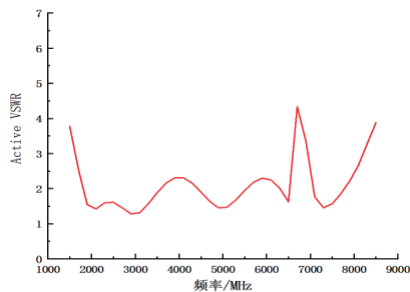
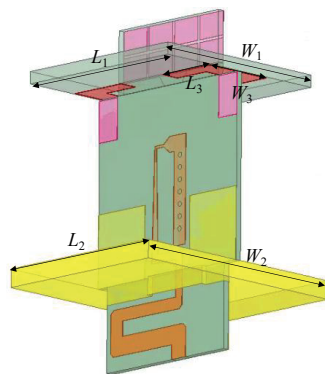


图 3 初始天线单元有源驻波比

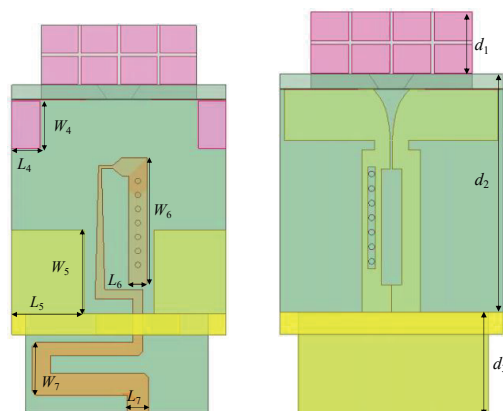
2.2 改进的超宽带紧耦合天线单元设计

本文提出的改进后的天线单元设计结构如图 4 所示。

通过图 4 可以看出，相较于最初版本的天线单元，去掉了常用的接地短路柱，相关参数见表 1。



(a) 改进天线整体视图



(b) 天线正面 (c) 天线背面

图 4 改进天线单元结构

表 1 天线结构相关几何参数值

单位: mm					
参数	数值	参数	数值	参数	数值
L_1	16.0	L_2	16.0	L_3	5.1
L_4	1.8	L_5	4.7	L_6	1.3
L_7	1.5	W_1	16.0	W_2	20.0
W_3	6.4	W_4	3.7	W_5	6.0
W_6	9.0	W_7	3.4	d_1	5.0
d_2	15.4	d_3	7.0		

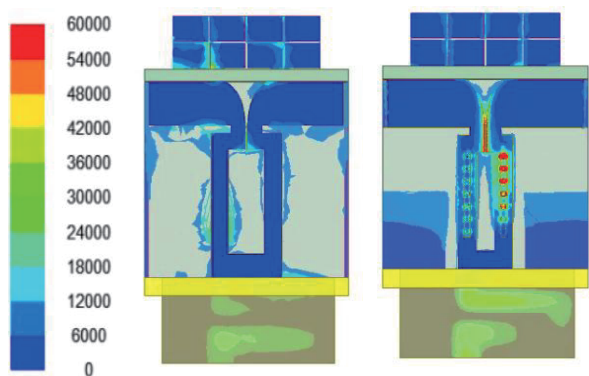
此天线要求主要工作频段 $1.6 \sim 5 \text{ GHz}$ 内增益 $> 12 \text{ dBi}$ ； $5 \sim 8.4 \text{ GHz}$ 内增益 $> 20 \text{ dBi}$ 。

在本天线的设计过程中，采用了 Marchand 巴伦馈电，其面积较大，会在金属底板上感应出电流。感应电流强度较大，所产生的电场会影响邻近单元，造成驻波的恶化。因此，考虑在巴伦处，加载七个金属通孔，限制电流的分布范围，增强电磁波信号在馈电结构上传输时的耦合强度，减小其对邻近单元的影响。

另外在天线一侧增加了类似共面波导结构，相当于金属

带在介质基板上的延伸，延长了电流出现共模谐振的路径，将原本在高频出现的共模谐振，推向低频 4.6 GHz 左右。

从出现谐振的频点 6.7 GHz 处电场分布图可以看出，加载通孔后，其电流被束缚在通孔限制范围内；而类似共面波导结构的加入，显示其上侧有部分电流分布，延长了电流的路径，将谐振向低频移出该频点。如图 5 所示。



(a) 初始天线 6.7 GHz 电场分布图 (b) 改进天线 6.7 GHz 电场分布图

图 5 改进前后天线单元电场分布图

此时仿真有源驻波比如图 6 所示，可以看到除 4.6 GHz 附近以外，其余频点有源驻波比均 < 2.5 。

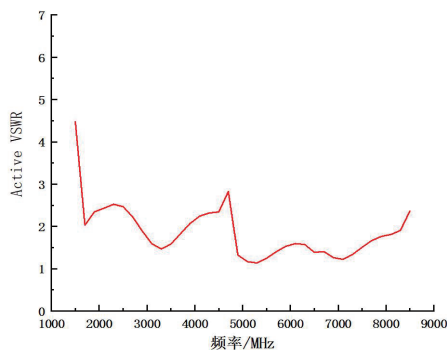


图 6 改进天线单元有源驻波比

考虑到后方波控以及加工实现，10 个天线单元组成一列（包括两个哑元），一列天线后方配有一分八功分器，带功分器及结构的模型如图 7 所示。

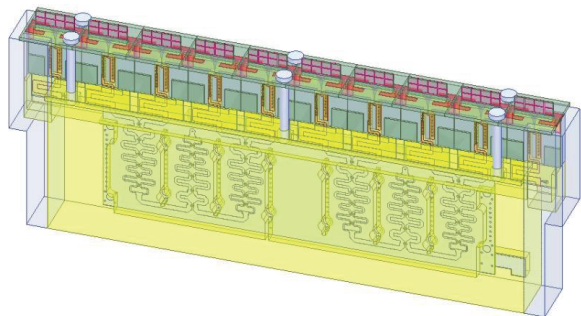


图 7 一列天线模型

3 天线单元及阵列的实测结果

3.1 天线一列实测结果

采用厚度 0.508 mm 的 Rogers RO4003 板材，加工一列天线并进行驻波测试，使用 $50\ \Omega$ 的 smp 接头馈电，可以看出 S11 的仿真与测试结果基本一致。如图 8 所示。

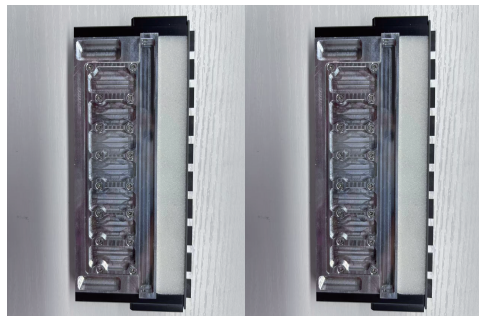


图 8 一列天线加工实物

需要说明的是由于一列天线单元缺乏周围单元提供合适的阻抗匹配环境，因此低频处无源 S11 结果较差，如图 9 所示。

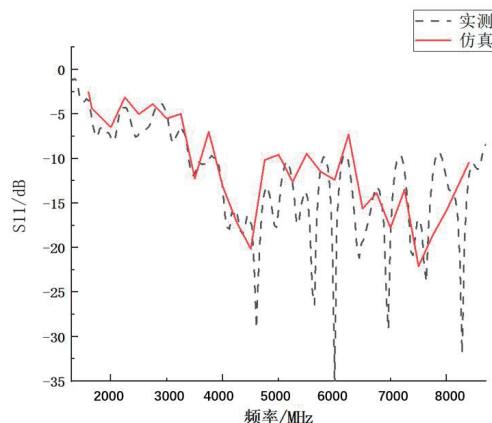


图 9 S11 实测与仿真结果对比

3.2 天线全阵实测结果

阵列测试环境如图 10 所示。

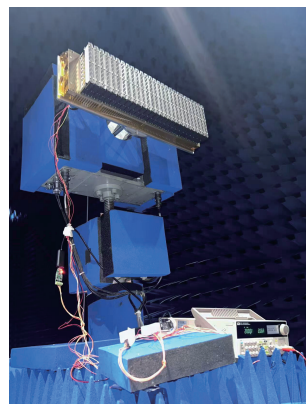
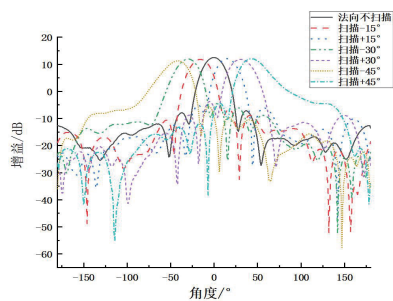
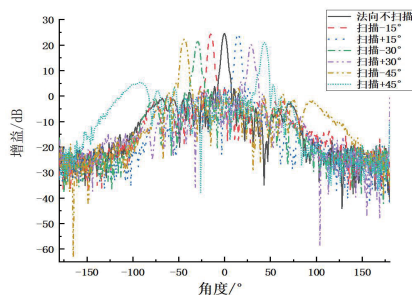


图 10 阵列测试环境

实测结果表明该相控阵天线可在方位向进行 $\pm 45^\circ$ 扫描。全阵扫描至 $\pm 45^\circ$ 时的实测方向如图 11 所示。

(a) 1 600 MHz 时扫描至 $\pm 45^\circ$ 增益(b) 8 400 MHz 时扫描至 $\pm 45^\circ$ 增益图 11 全阵扫描至 $\pm 45^\circ$ 时的实测方向图

由图 12 可以看出工作频段 1.6~4 GHz 内增益 > 12 dBi, 5~8.4 GHz 内增益 > 20 dBi。

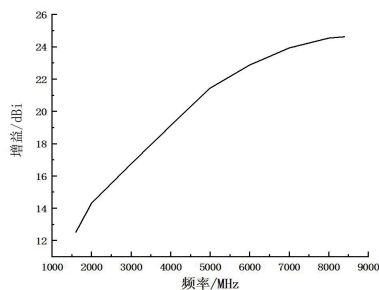


图 12 全阵 1.6~8.4 GHz 实测增益值

4 结论

本文利用通孔加载以及类似共面波导结构,将主要频带内的共模谐振移至次要频段,实现紧耦合超宽带天线设计。加工制作了天线全阵并完成了测试。仿真及测试结果表明,该超宽带紧耦合偶极子天线阵工作频段 1.6~5 GHz 内增益 > 12 dBi, 5~8.4 GHz 内增益 > 20 dBi; 且实现方位向 $\pm 45^\circ$ 扫描。能应用于大部分超宽带相控阵领域。

参考文献:

- [1]DOANE J P, SERTEL K, VOLAKIS J L. A 6.3:1 bandwidth scanning tightly coupled dipole array with co-proposed compact balun[C//Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. Piscataway:IEEE,2012[2025-12-31].<https://ieeexplore.ieee.org/>

document/6348918.DOI: 10.1109/APS.2012.6348918.

- [2]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.
- [3]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.
- [4]YETISIR E, GHALICHECHIAN N, VOLAKIS J L. Wideband & wide angle scanning array with parasitic superstrate[C//2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, Piscataway:IEEE,2015: 2521-2522.
- [5]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.
- [6]CHEN Y K, YANG S W, NIE Z. A novel wideband antenna array with tightly coupled octagonal ring elements[J]. Progress in electromagnetics research, 2012, 124: 55-70.
- [7]HOLTER H, CHIO T H, SCHAUBERT D H. Experimental results of 144-element dual-polarized endfire tapered-slot phased arrays[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2000, 48(11): 1707-1718.
- [8]ZHANG H Y, YANG S W, XIAO S W, et al. Low-profile, lightweight, Ultra-wideband tightly coupled dipole arrays loaded with split rings[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2019, 67(6): 4257-4262.
- [9]SUN J X, CHENG Y J, FAN Y. Planar Ultra-wideband and wide-scanning dual-polarized phased array with integrated coupled-marchand balun for high polarization isolation and low cross-polarization[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2021, 69(11): 7134-7144.
- [10]CHEN Z, HU W, WANG X B, et al. Ultra-wideband high-efficiency dual-polarized conformal phase array for wireless power transfer[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2024, 23(11): 3787- 3791.

【作者简介】

何新月 (1998—), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 研究方向: 超宽带紧耦合相控阵天线。

陈 星 (1970—), 通信作者 (email: chenxing@scu.edu.cn), 男, 四川巴中人, 博士, 教授、博士生导师, 研究方向: 电磁场理论与微波工程。

(收稿日期: 2025-11-18 修回日期: 2026-01-08)