本文已被 IEEE天线与无线传播快报 接收发表。此版本为作者稿，尚未经过完整编辑，内容可能会在正式发表前有所变动。引用信息：数字对象标识符 10.1109/LAWP.2025.3539696





# 面向雷达应用的超宽带相控阵边缘截断效应抑制

Chenglong Fan、Shi-Wei Qu（IEEE高级会员）、Shiwen Yang（IEEE会士）和Jun Hu（IEEE高级会员）

摘要—本文提出一种抑制超宽带紧耦合偶极子线阵边缘截断，。显著增加阵列周边未激励单元的数量是抑制ETE的一种



索引词—边缘截断效应、相位优化、相控阵、线阵、阻抗匹配。

## I. 引言

B宽带相控阵天线作为雷达系统的前端，对于提高雷达分辨率、目标分类与识别能力、抗干扰性能及可靠性至关重要 [1], [2], [3]。紧耦合偶极子相控阵（TCDAs）是宽带相控阵天线的代表，凭借其超宽带工作频段、大扫描角和低剖面等优势，在雷达系统中发挥着日益重要的作用。过去十年间，研究人员提出并研究了多种类型的 TCDAs [4-6]。为加快求解速度并节省计算资源，TCDAs 的设计方法主要基于周期环境中的天线单元仿真，这等效于无限阵列。然而，对于有限阵列，边缘单元所处的环境与无限阵列中的阵元环境显著不同，这不可避免地会导致阻抗匹配急剧恶化。当阵列用于发射功率时，边缘单元阻抗匹配恶化会造成大量能量反射，这对馈电收发组件而言是致命的 [7]。因此，亟需找到一种有效方法来抑制超宽带有限尺寸 TCDAs 的边缘截断效应（ETE）。

为抑制TCDAs的ETE，过去数年提出了许多有效方法

本工作得到国家自然科学基金项目（批准号：U20A20165）的资助。
（通讯作者：Shi-Wei Qu）作者来自电子科技大学电气科学与工程学院，成都 611731，中国。（电子邮箱：shiweiqu@uestc.edu.cn）。

本文提出一种抑制有限尺寸紧耦合偶极子线阵（

## II. 阵列设计

### A. 阵列结构

所提出的天线阵列结构如图1所示，由沿y轴排列的16个天线子阵以及两侧的边缘加载结构组成。每个天线子阵 基于[14], 设计，由两个采用等幅同相馈电的天线单元以及两层宽角阻抗匹配层（WAIM）组成。每个天线单元均包含-

© 2025 IEEE。保留所有权利，包括文本与数据挖掘以及人工智能和类似技术训练相关权利。允许个人使用，但重新出版/再分发须经 IEEE 许可。更多信息请参见 https://www.ieee.org/publications/rights/index.html。

本文已被《IEEE天线与无线传播快报》接受发表。此版本为作者稿，尚未经过全面编辑，最终出版前内容可能会有所更改。引用信息：数字对象标识符 10.1109/LAWP.2025.3539696



> 请将此行替换为您的稿件编号（双击此处进行编辑）<

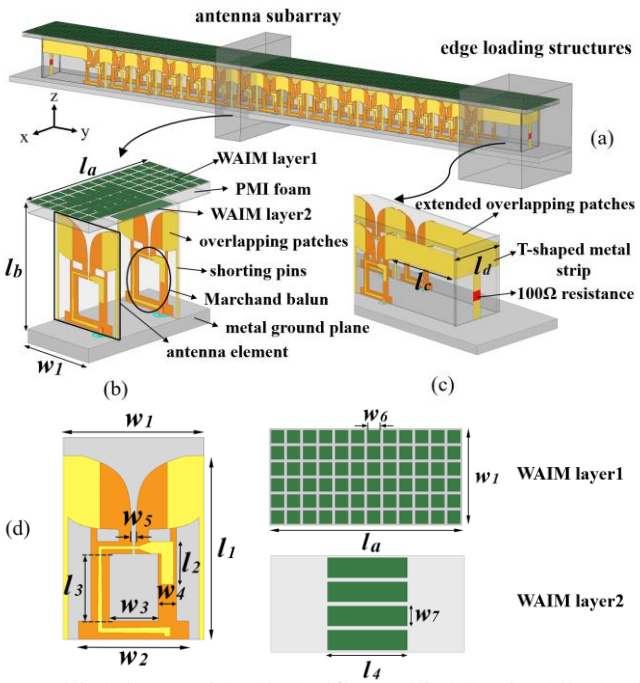



图1. (a) 所提出的2×16 天线阵列的几何结构。(b) 所提出的天线子阵的几何结构。(c) 所提出的边缘加载结构的几何结构。(d) WAMI层、巴伦、偶极子及其相应参数的详细结构。$l_a$=46、$l_b$=36、$l_c$=36、$l_d$=24、$l_1$=30、$l_2$=7、$l_3$=11、$l_4$=19、$w_1$=23、$w_2$=18、$w_3$=8、$w_4$=3、$w_5$=1、$w_6$=2.9、$w_7$=3.5。（单位：mm）

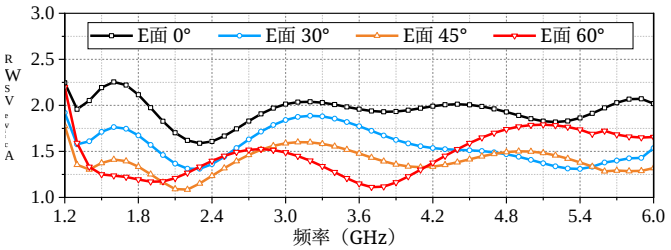



图2. 无限阵列中阵元在E面将主波束分别指向0°、30°、45°和60°时的仿真有源电压驻波比。

从 50 Ω 同轴连接器到槽线的转换，具有一个与槽线连接以进行激励的印刷偶极子、一对容性重叠贴片以及一块金属接地板。巴伦、偶极子和重叠贴片分别设计在一块厚度为0.5 mm的垂直F4BM基板（$\varepsilon_{r1}$= 2.2）

金属接地

充3 mm厚的 04），用

为抑制 ETE，将阵列边缘处的重叠贴片向外延伸 $l_c$=36

金属条，

B. 结果与分析

所提出的天线子阵在一维

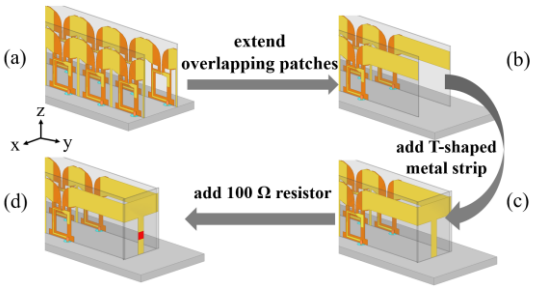
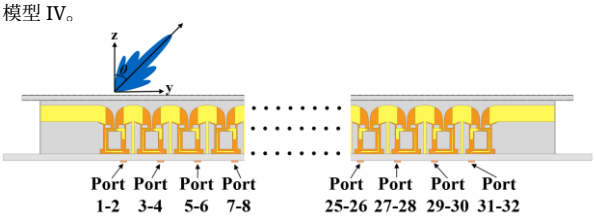



图3. 所提出的边缘加载结构的设计过程。(a) 模型 I。(b) 模型 II。(c) 模型III。(d) 模型 IV。




| Port / Frequency | 1-2 | 3-4 | 5-6 | 7-8 | ..... | 25-26 | 27-28 | 29-30 | 31-32 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.2~2.4 GHz | 1.5*α | 2*α | 3*α | 4*α | ..... | 13*α | 14*α | 15*α | 15.5*α |
| 2.4~4.0 GHz | 2*α | 2*α | 3*α | 4*α | ..... | 13*α | 14*α | 15*α | 16*α |
| 4.0~6.0 GHz | 1*α | 2*α | 3*α | 4*α | ..... | 13*α | 14*α | 15*α | 16*α |

图4. 所提出的2×16天线阵列的端口编号图和激励相位。

沿 y 轴的周期环境。为了实现

为获得良好的阵列辐射性能，天线子阵在周期条件下经过了精心优化和设计。图 2 展示了计算得到的天线单元有源电压驻波比，结果表明，当有源电压驻波比小于 2.3 时，天线单元的工作频带宽度可达 1。2~6 吉赫兹，且在 E 面扫描角高达±60° 时仍满足这一条件。这表明，若能抑制有限阵列的 ETE，所提出的 TCDLA 便可在超宽带工作频段内实现大角度扫描。

基于上述天线子阵，相应地构建了一个 2×16 阵列。为了考察

采用了边缘加载策略，如图3所示。模型 I: 未进行特殊处理的阵列，作为参考；模型 II: 带有延伸重叠贴片的阵列；模型III: 带有延伸重叠贴片和T形金属条的阵列；模型 IV: 带有延伸重叠贴片、T形金属条和 100 Ω 电阻器的阵列。为便于后续比较，天线

为分析ETE对有源电压驻波比的影响，针对阵列模型

由于ETE在低频段的影响更为显著，为便于比较，仿真结果取自1.2 GHz至3 GHz。显然，模型 I 中位于阵列边缘或靠近阵列边缘的大多数外围单元均表现出较高的有源电压驻波比（大于4），尤其是在工作频段的低频部分（1.2~1.6 GHz）。单元1的有源电压驻波比恶化最为明显，在1.2~4 GHz带宽内基本保持在5以上。因此，有必要采取一些措施来抑制ETE，以改善

© 2025 IEEE。保留所有权利，包括文本与数据挖掘以及训练人工智能和类似技术的相关权利。允许个人使用，但重新出版/再分发须获得IEEE许可。更多信息请参见 https://www.ieee.org/publications/rights/index.html。

本文已被 IEEE天线与无线传播快报 接收发表。此版本为作者稿，尚未经过全面编辑，内容在正式发表前可能会有所变动。引用信息：数字对象标识符 10.1109/LAWP.2025.3539696





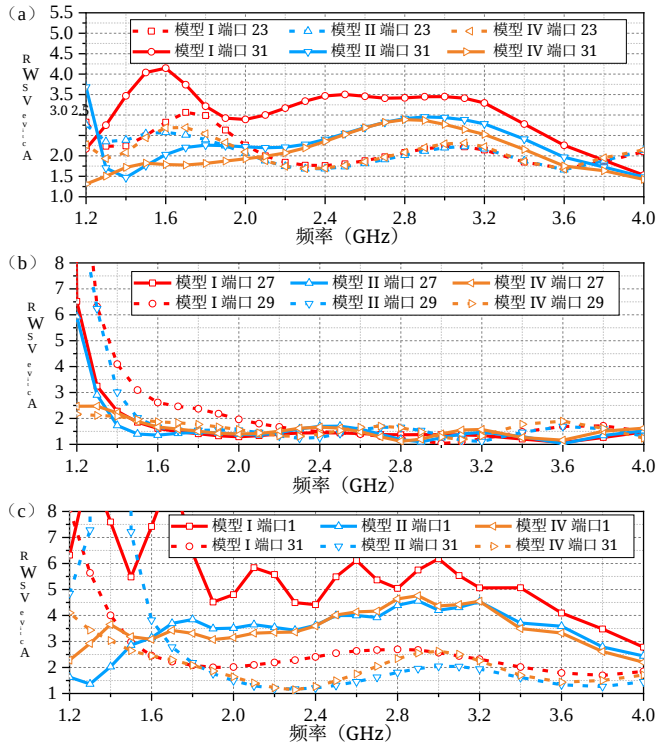



图5. 模型I、II和IV在将主波束指向 E 面内 (a) 0° 和 (b)-(c) 60° 时边缘单元的有源电压驻波比。

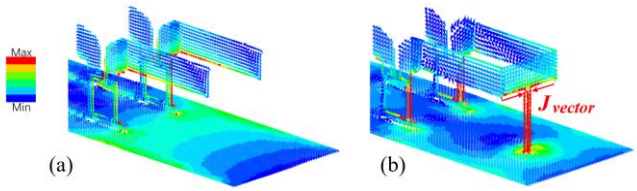



图6. (a) 模型 II 和 (b) 模型III在阵列边缘处的矢量电流分布。

有限阵列的性能。

在本研究中，首先将阵列边缘处的重叠贴片向外延伸，

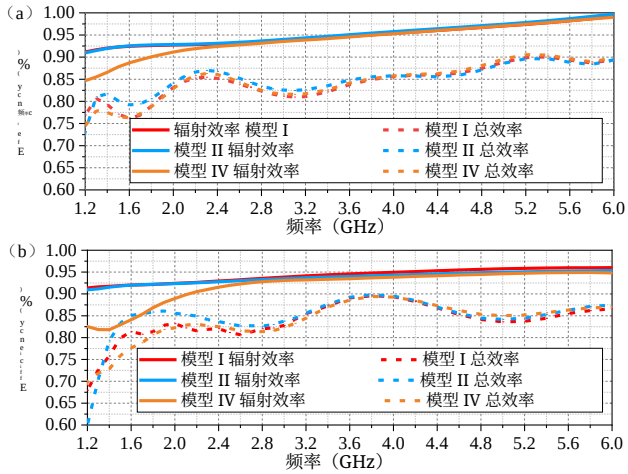



图7. 模型I、II和IV在 E 面将主波束分别指向 (a) 0°和 (b) 60°时的辐射效率和总效率。

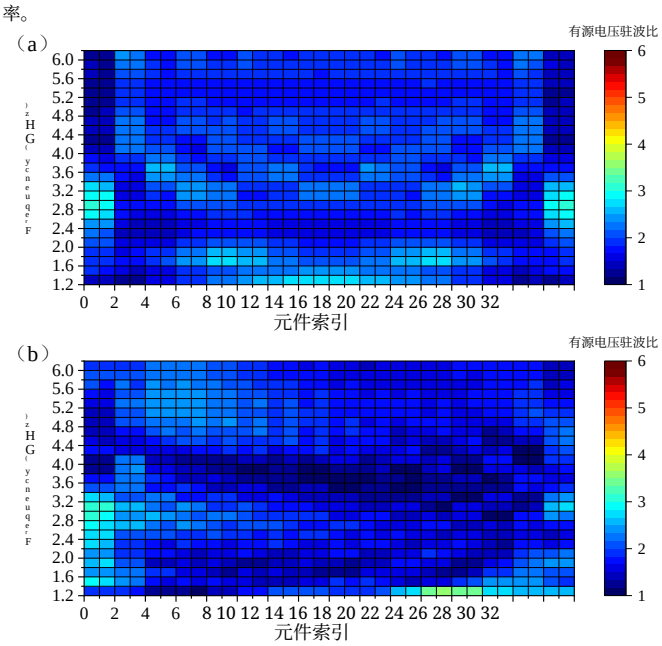



图8. 在 E 面将主波束分别指向 (a) 0°和 (b) 60°时，整个工作频段内各阵元的仿真有源电压驻波比。

边缘单元与其相邻单元之间的激励相位差，是导致扫

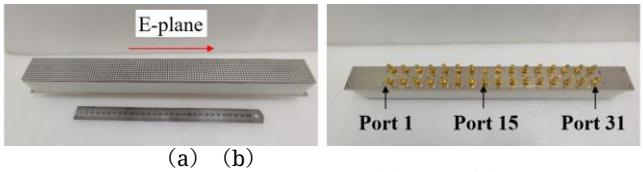
，即，1。2 ~ 2.4 吉赫兹（有源电压驻波比<3.6），2，4 ~ 4.0 吉赫兹（有源电压驻波比>3.6）和4。0 ~ 6.0 吉赫

© 2025 IEEE。保留所有权利，包括文本与数据挖掘以及人工智能和类似技术训练相关的权利。允许个人使用，但重新出版/再分发需获得 IEEE 许可。更多信息请参见 https://www.ieee.org/publications/rights/index.html。

本文已被 IEEE天线与无线传播快报 接受发表。此版本为作者稿，尚未经过全面编辑，最终发表前内容可能会有所变动。引用信息：数字对象标识符 10.1109/LAWP.2025.3539696








（a）（b）

图9. 制作完成的2 × 16 阵列原型照片。（a）正面（b）背面。

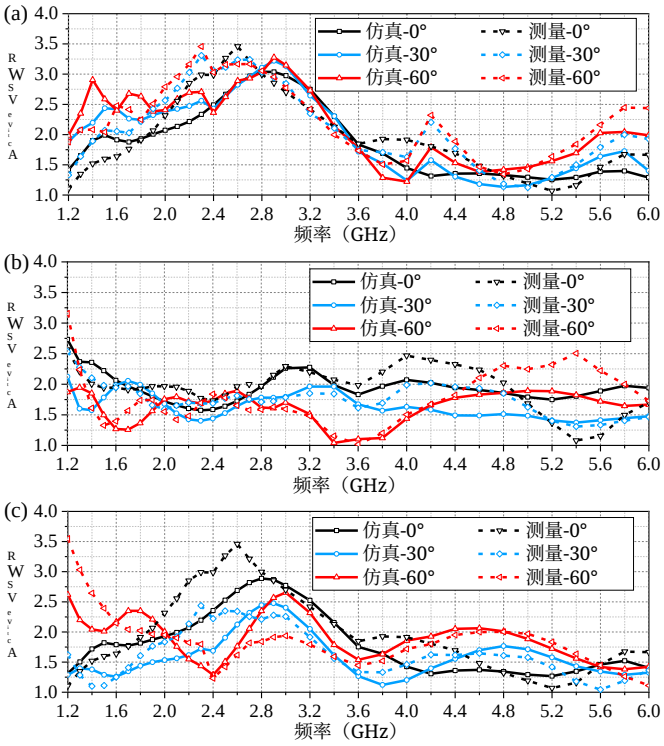



图10. 将E面主波束分别指向0°、30°和60°时，2 × 16 阵列原型边缘阵元和中心阵元的仿真与实测有源电压驻波比。 a）端口1。（b）端口15。（c）端口3

当主波束在E面分别扫描至0°和60°时，结果如图8所示。[illegible]看出，所有阵列单元的有源电压驻波比均成功降至3.5以下。 阵列的工作频带宽度已达到周期条件下天线单元的工作频带宽度。

参考阵列与本设计的主要性能特性如表I所示。尽管所提设计的带宽小于[11]，，但无需降低阵列的最大功率容量和口径效率，即可实现更大的扫描角。此外，与[10] 和[illegible]计具有更大的工作带宽和扫描角范围。

## III. 阵列原型测量

已制造并测量了一个2×16 原型，如图9所示。图10展示了正侧向和扫描条件下中心阵元及边缘单元的实测有源电压驻波比；结果表明，在E面扫描条件下，中心阵元及边缘单元的实测有源电压驻波比均小于3.5。图11展示了

表I 所提出的天线与其他工作的比较

| Ref. | 方法 | 阵列 type | 阻抗 带宽 （吉赫兹） | Scan 范围 （电场/磁场） | VSWR peak |
|---|---|---|---|---|---|
| [10] | 加载短路 阵元 | 平面 | 0.2-0.6 (100%) | N.A./ ±30° | 3 |
| [11] | 幅度-相位 优化 | 平面 | 0.2-2 (164%) | ±45°/ ±45° | 3 |
| [16] | 延伸偶极子 arm | 线性型 | 2.2-6.0 （86.4%） | ±45°/ N.A. | 3 |
| This work | T形带材 负载电阻 | 线性型 | 1.2-6 （133%） | ±60°/ N.A. | 3.5 |

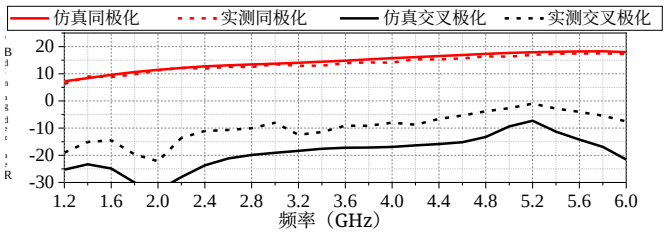



图11。共 极化增益和交叉极化增益随频率的变化（在宽 d侧。

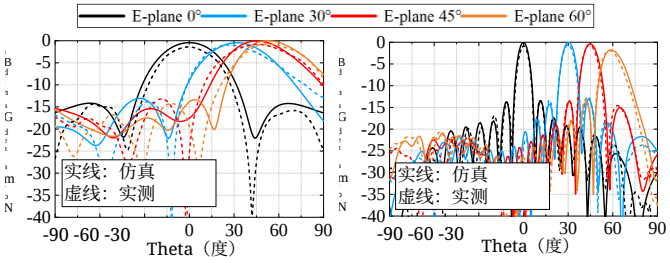



图12. 将E面主波束分别指向0°、30°、45°和60°时，2 × 16 阵列原型在（a）1.2 GHz和（b）6 GHz下的仿真和实测同极化归一化增益方向图

正侧向的实测同极化（co-pol）和交叉极化（cr-pol）增益。整个工作带宽内，实测同极化增益与仿真值的平均差异小于1分贝。尽管实测交叉极化增益有所恶化，但整个工作带宽内的实测交叉极化比低于-15分贝。图12展示了在1.2 GHz和6 GHz下E面扫描时的归一化增益方向图。可以看出，实测增益方向图与仿真结果吻合良好。测量结果与仿真结果之间存在一些小差异，主要是由装配误差造成的。

## IV. 结论

本文提出了一种抑制有限尺寸TCDLA的ETE的新方法。[illegible]在阵列边缘增加了带有100 Ω 电阻器的T形金属条[illegible]。仿真和测量结果有效地证明了所提方案在抑制TCDLA超宽带ETE方面的有效性。

© 2025 IEEE。保留所有权利，包括文本与数据挖掘、人工智能及类似技术训练方面的权利。允许个人使用，但重新出版/再分发须获得 IEEE 许可。更多信息请参见 https://www.ieee.org/publications/rights/index.html。

本文已被 IEEE天线与无线传播快报 接收发表。此版本为作者稿，尚未经过完整编辑，最终发表前内容可能会有所变更。引用信息：数字对象标识符 10.1109/LAWP.2025.3539696





## 参考文献

[1] D. Lee、G. Shaker和W. Melek，“一种用于超宽带脉冲雷达应用的宽
7803
W. H
IEEE
[3] L
散射
第6期
Ding
超宽
473-
共享
第22
W. K
带模
692-701页，2018年2月。[7] H.-C. Mao、S.-W. Qu和S. Yang，“相控腔背式堆叠贴片阵列的边缘截断效应抑制”，IEEE天线与无线传播快报，第22卷，第12期，第3192-3196页，2023年12月。[8] H. Holter和H. Steyskal，“有限相控阵模型的尺寸要求”，IEEE天线与传播汇刊，第50卷，第6期，第836-840页，2002年6月。[9] H. Holter，“采用BOR阵元的双极化宽带阵列天线：机械设计与测量”，IEEE天线与传播汇刊，第55卷，第2期，第305-312页，2007年2月。[10] I. Tzanidis、K. Sertel和J. L. Vola
IEEE
[11] F. Yang
紧耦
70卷
W. H
宽扫
2018
化敏
汇刊
S. Ya
IEEE天线与传播汇刊，第66卷，第1期，第476–480页，2018年1月。[15] S. S. Holl
播汇
Wan
向下
播快

© 2025 IEEE。保留所有权利，包括文本与数据挖掘以及人工智能和类似技术训练方面的权利。允许个人使用，但重新出版/再分发须获得 IEEE 许可。更多信息请参阅 https://www.ieee.org/publications/rights/index.html。