

三角栅格交错布阵的大通道间距相控阵天线

潘洋一, 黄志成, 廖绍伟

(华南理工大学广东省毫米波与太赫兹重点实验室, 广东 广州 510641)

摘要: 相控阵采用大通道间距能降低成本、提升兼容性, 但会显著限制扫描性能。设计了通道间距为 λ_0 的相控阵天线, 通过在每个通道配置功分器与耦合贴片扩展有源单元方向图的波束宽度, 并借助三角栅格布阵提升扫描能力。对比满阵相控阵天线, 该布阵方法在仅保留满阵 61% 通道数的情况下, 阵因子的扫描能力未受明显影响。仿真结果表明, 所设计的天线口径效率约为 65%, 可实现 E 面与 H 面双向波束扫描, 其中, E 面最大扫描角为 $\pm 51^\circ$, H 面为 $\pm 33^\circ$ 。

关键词: 阵列天线; 三角栅格布阵; 副瓣抑制; 大间距阵列

中图分类号: TN828.4

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2025242

Large phase-shifting channel spacing phased array antenna with triangular grid

PAN Yangyi, HUANG Zhicheng, LIAO Shaowei

Guangdong Provincial Key Laboratory of Millimeter-Wave and Terahertz, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China

Abstract: Phased arrays with large channel spacing could reduce costs and improve compatibility, but they significantly limit scanning performance. A phased array antenna with a channel spacing of λ_0 was designed. The beamwidth of the active element pattern was expanded by configuring a power divider and a coupled patch in each channel, and the scanning capability was improved by using triangular grid array arrangement. Compared with the fully populated phased array antenna, the scanning capability of the array factor was not significantly affected when the array arrangement method retained only 61% of the channel number of the fully populated array. The simulation results show that the aperture efficiency of the designed antenna is about 65%, and bidirectional beam scanning in the E-plane and H-plane can be achieved, where the maximum scanning angle in the E-plane is $\pm 51^\circ$ and that in the H-plane is $\pm 33^\circ$. The design effectively balances the cost, compatibility, and scanning performance of phased arrays, providing a feasible solution for engineering applications requiring large channel spacing.

Keywords: array antenna, triangular grid array arrangement, side-lobe suppression, large-spacing array

0 引言

随着大型二维固态有源相控阵雷达的研制, 移相器和 T/R 组件的成本几乎占据了整个雷达造价的 70%~80%^[1], 因此, 为了降低成本, 在确保天线辐射性能的前提下, 尽量减少阵列通道数目在工

程应用中显得意义重大。对于大型阵列, 增大单元间距, 即形成大间距阵列是减少阵元数目、降低成本的一种有效途径。按常规方法设计的大间距周期性排列的阵列会出现栅瓣。栅瓣会导致信号强度不均匀、角度分辨率下降等问题。

收稿日期: 2025-08-11; 修回日期: 2025-09-17

通信作者: 廖绍伟, liaoshaowei@scut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.62271212)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.62271212)

抑制栅瓣主要通过阵元设计形成平顶的有源方向图以及不均匀阵列的阵因子成形。

文献[2]介绍了一种满阵的圆偏振相控阵天线,它采用了透镜顺序加载的贴片子阵列作为元件,满阵实现了 $\pm 45^\circ$ 的波束扫描。同时,本文还提出了一种稀疏阵列,相比于满阵能够减少边缘 20% 的通道,代价是增益下降约 1 dB,对应口径效率的下降。

虽然满阵相控阵天线的性能表现卓越,但是其成本高昂和难以抑制耦合问题仍难以忽视。为了降低相控阵天线的制造成本,减轻天线的重量,降低馈电网络的设计复杂度,可以通过增加单元间距来减少单元的数量。

微带贴片天线阵列因其具有低剖面、低成本和易共形等特点在现代通信系统和雷达系统中都有广泛的应用,文献[3]设计了一种 7×7 的双模微带贴片天线阵列,阵元间距为 λ_0 ,每个单元支持传输 TM11 模和 TM21 模。

以该种方式构造的单元方向图利用方向图乘积原理在阵因子出现栅瓣的时候进行有效抑制。该相控阵扫描至 20° 时,当阵元只支持 TM11 模进行主模传输时,栅瓣仅比主瓣低 2.5 dB;当阵元只支持 TM11 模和 TM21 模进行双模传输时,栅瓣比主瓣低 30 dB,可见该种方式栅瓣的抑制效果明显。

KHADIKO 等^[4]设计了一种带金属立柱的 1×8 贴片天线线阵,在每个单元的周围插入 8 个金属立柱,相邻单元共用 2 个金属立柱,单元间距为 λ_0 。利用金属柱的漏模特性,可以有效抑制当相控阵天线扫描到低仰角时出现的栅瓣。在 $-25^\circ \sim 25^\circ$ 范围内可以进行有效扫描,扫描到 25° 时,栅瓣比主瓣低约 10 dB。文献[5-7]也使用了类似的方式进行栅瓣抑制,得到了较好的结果。

研究者由介质天线^[8]、波纹喇叭^[9]和八木天线出发设计了一种带有多层金属片引向的阶梯式圆波导平面相控阵,分别进行理论研究和实验分析^[10],阵元间距为 1.14λ 。使用该种口径结构以产生平顶状阵列单元辐射方向图,在水平和垂直方向上都能够进行 $\pm 20^\circ$ 扫描。

球面相控阵天线被设计用于卫星通信系统^[11],通过补偿球面结构上的阵元相位和不同区域的激励来控制波束。球面相控阵的阵元等间距均布在球面上,文献[12]通过优化单元权值以获得特定波束方向上的最大增益,抑制栅瓣,天线工作在 29 GHz,

单元间距为 $0.8\lambda_0$ 。文献[13]将该种方式实现的球面阵列与平面阵列相比较,可以很好地对栅瓣进行抑制。

以往的工作都是基于矩形网络的传统大间距相控阵。虽然上面提到的各种抑制副瓣的方法能改善方向图大栅瓣问题,但是经过精心设计的矩形栅格大间距的相控阵的有效扫描范围大部分仍然局限于 $\pm 20^\circ$ 以内。

本文介绍了一种阵元间距为 λ_0 ,采用三角栅格布阵且通过功分器形成二元子阵作为阵元的相控阵天线,该天线在仅保留满阵 61% 通道数的情况下,E 面的扫描能力最大能够达到 $\pm 51^\circ$ 。扫描到最大角度时,本文设计的天线波束滚降小于 3 dB,副瓣比主瓣低-10 dB。

三角栅格布阵与功分器子阵设计的创新性形式能够带来远超传统矩形网格的大间距相控阵天线的性能,同时大幅减少通道数。

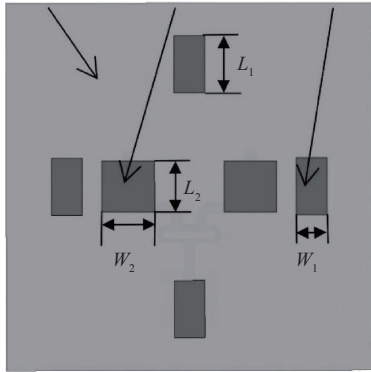
1 阵元设计

本文设计了一个由单个缝隙耦合馈电的贴片天线及功分器组成的单元,所有的电磁模拟和优化程序都由 Ansys HFSS 进行。

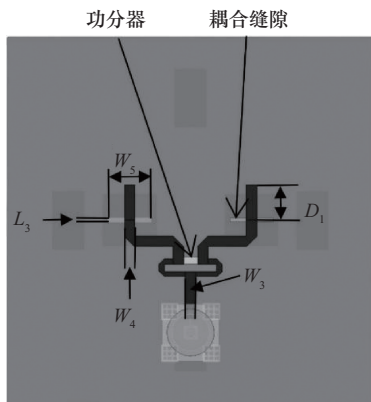
该天线采用缝隙耦合方式进行馈电,并使用两层基板结合在一起以扩展天线的带宽。两层介质基板材料均为 Rogers 4003C ($\epsilon_r=3.55$, $\tan\delta=0.0027$),上层介质基板的厚度为 H_1 ,下层介质基板的厚度为 H_2 ,所有介质基板通过两层总厚度为 H_3 的 Rogers 4450F ($\epsilon_r=3.52$, $\tan\delta=0.004$) 粘合在一起,Rogers 4450F 和 Rogers 4003C 的电磁特性比较接近,可以带来更好的匹配。

双层介质缝隙耦合馈电贴片天线结构和三维图分别如图 1 和图 2 所示,波端口将能量输入下层介质基板底部的线宽为 W_3 的 50Ω 微带线和等幅同相的一分二功分器,功分器通过一段总长度为 5.039 mm 线宽为 W_4 的 70.7Ω 四分之一阻抗变换器实现阻抗匹配。通过下层介质基板顶部的金属地面切割宽度为 W_5 长度为 L_3 的缝隙,将电磁能量与位于上层介质基板顶部的宽度为 W_2 长度为 L_2 的贴片耦合,实现辐射。为了获得更宽的波束宽度和更大的天线孔径,本文的阵元结构中加入了没有能量激励的宽度为 W_1 长度为 L_1 的哑元,用于对波束进行微调。参数设计如表 1 所示。

上层介质基板 贴片天线 寄生贴片(哑元)



(a) 俯视图



(b) 仰视图

图1 双层介质缝隙耦合馈电贴片天线结构

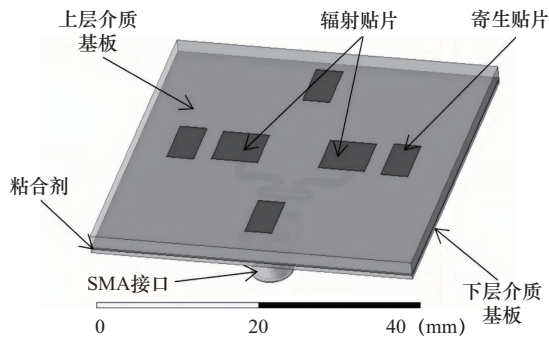


图2 双层介质缝隙耦合馈电贴片天线的三维图

表1 设计参数

参数	数值/mm	参数	数值/mm
W_1	6	L_2	6.1
W_2	6	L_3	0.5
W_3	1.18	H_1	1.524
W_4	0.58	H_2	0.508
W_5	4.9	H_3	0.19
L_1	8	λ_0	27.78

双层介质缝隙耦合馈电贴片天线的回波损耗如图3所示。模拟的贴片阵元在9.8~11.1 GHz范围内的回波损耗较低, 低于-10 dB, 在中心频率10.8 GHz处, 回波损耗为-25.5 dB。

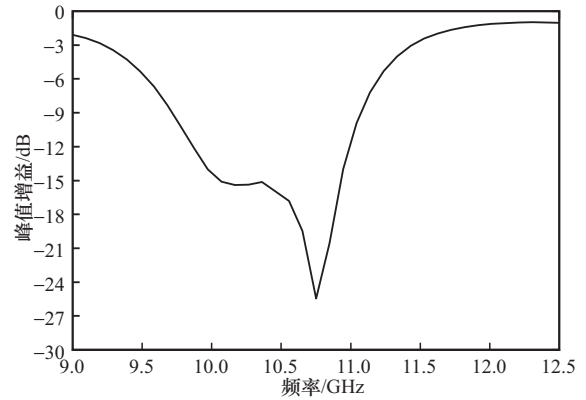


图3 双层介质缝隙耦合馈电贴片天线的回波损耗

位于中心频率10.8 GHz时, 双层介质缝隙耦合馈电贴片天线的有源方向图如图4所示。该天线的3 dB波束宽度E面平均为 $\pm 52^\circ$, H面平均为 $\pm 31^\circ$, 且在 $-25^\circ \sim 25^\circ$ 形成了较平坦的辐射方向图, 这会使天线组阵后进行波束扫描时增益平缓。

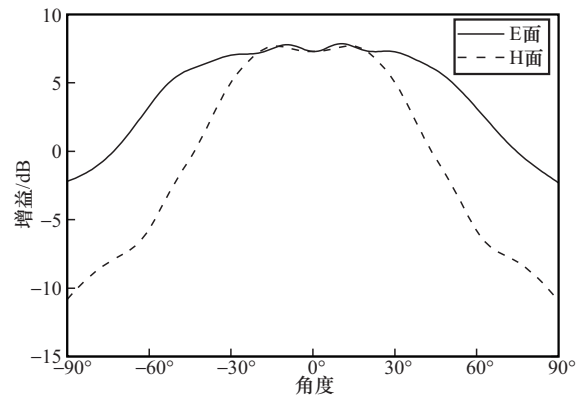


图4 双层介质缝隙耦合馈电贴片天线的有源方向图

2 阵列设计

2.1 三角栅格交错布阵分析

利用前文提出的阵元开发具有阵元间距的相控阵, 以实现高增益。阵元间距表示2个相邻阵元之间的距离, 每个阵元由专用端口提供能量, 也称为通道。均匀的交错三角栅格布阵是一种规则且均匀的阵列排布方式, 其阵元按照三角形的顶点排列, 相邻阵元之间的间距相等, 但在水平方向

上交错分布,形成规则的蜂窝状结构。与传统的矩形或方形满阵相比,这种布阵方式在保持均匀性的同时,引入交错排列的特性,能够显著改善阵列的性能。

本文建立了一个 25 阵元的三角交错阵列。根据方向图乘积原理,先从三角阵的阵因子分析,如图 5(a)所示。图 5 中每一个黑色圆圈代表一个阵元所在的位置,即每一个通道所在的位置。这些阵元规则且均匀地分布在 λ_0 间距的网格中,阵元主要分为 9 行,每一行错开了 $0.5\lambda_0$ 的位置,形成等腰三角形的蜂窝状布阵。每个通道通过一个 SMA 同轴线接口连接至后端电路。

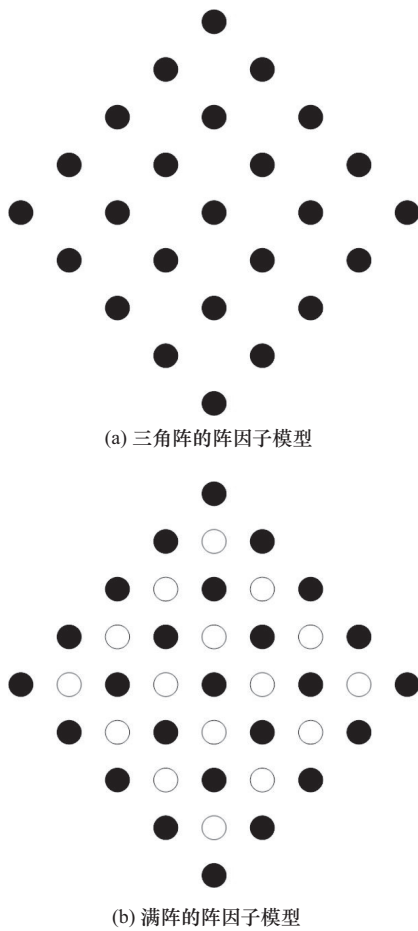


图 5 三角栅格交错布阵的阵列设计

相应地,本文建立了一个满阵的阵因子模型,如图 5(b)所示,每一个圆圈代表一个阵元,即一个通道,其中空心白色圆圈代表比三角阵多出的阵元。每个阵元之间的间距为 $0.5\lambda_0$ 。

将阵元的位置输入 MATLAB,即可得到归一化阵因子图。如图 6 所示,三角阵在未扫描时(扫

描至 0°) 时,阵因子的最大副瓣约为 -24 dB。满阵的最大副瓣略低,约为 -25.8 dB。

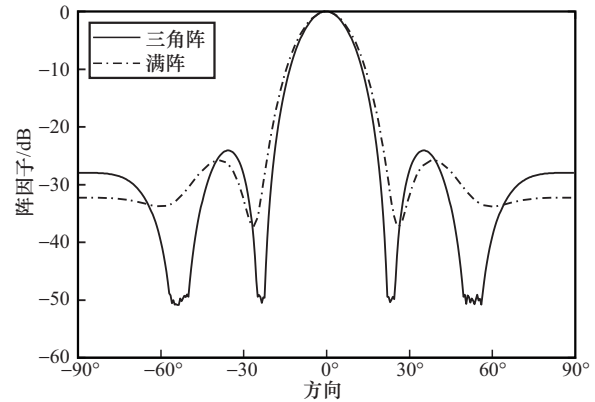


图 6 三角阵与满阵阵因子对比(未扫描)

本文所提出的天线在 E 面和 H 面的扫描能力不相同,因此需要考察阵因子扫描分别扫描至 30° 和 50° 时的情况。如图 7 所示,当扫描至 30° 时,三角阵阵因子的最大副瓣仍为 -24 dB。满阵阵因子的最大副瓣略低于三角阵,为 -25.7 dB。扫描后阵因子的最大副瓣水平与未扫描时几乎一样,三角阵的阵因子的波束宽度相对于满阵阵因子更窄。这也表明了三角交错布阵的优越性,在通道数量减少约 40% 的情况下,最高副瓣仅高 1.7 dB,且能获得更高的峰值口径效率。

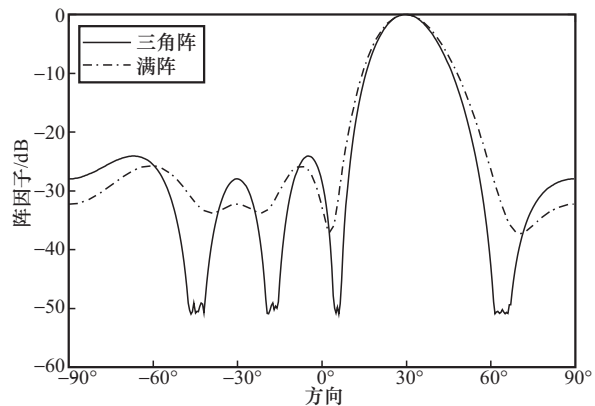


图 7 三角阵与满阵阵因子对比(扫描至 30°)

如图 8 所示,当扫描至 50° 时,无论三角阵还是满阵阵因子带来的最大副瓣均出现在 -90° 方向,且三角阵的最大副瓣为 -10.8 dB,低于满阵的最大副瓣 -8.8 dB。除此之外,三角阵的波束相对于满阵更集中,意味着使用三角阵后增益比满阵高。

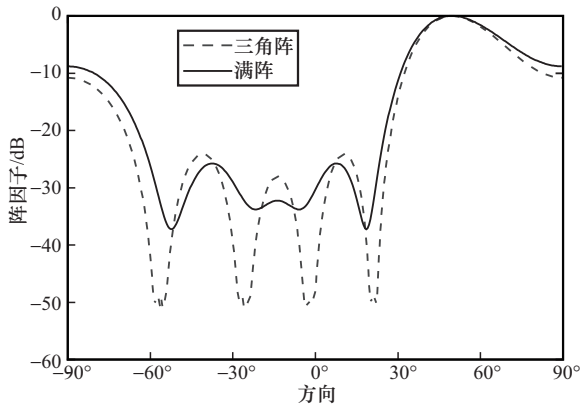


图8 三角阵与满阵阵因子对比(扫描至50°)

由此可见，在阵列布局上，通过本节的阵因子分析，三角阵在通道数仅有61%满阵通道数的情况下，能提供近似的扫描性能以及略高的口径效率。阵因子没有考虑阵元之间的相互耦合，在实际情况中，满阵阵元间距过近，会导致互耦而进一步降低天线的辐射效率，而三角阵的阵元间距较大，互耦现象会得到改善，因此本文选择三角阵的方式来设计相控阵。

2.2 三角交错布阵的相控阵天线设计

基于前文阵元设计和阵列设计，本文设计了有25阵元的三角交错布阵的相控阵天线，实物图如图9所示。每一个阵元由一个带功分器的双层介质缝隙耦合馈电贴片天线以及环绕四周的耦合贴片组成。耦合贴片并没有馈电，而是将贴片天线的能量耦合至耦合贴片上，用以波束成形，实现更宽的相控阵扫描角度。天线使用来自Molex的SMA接口

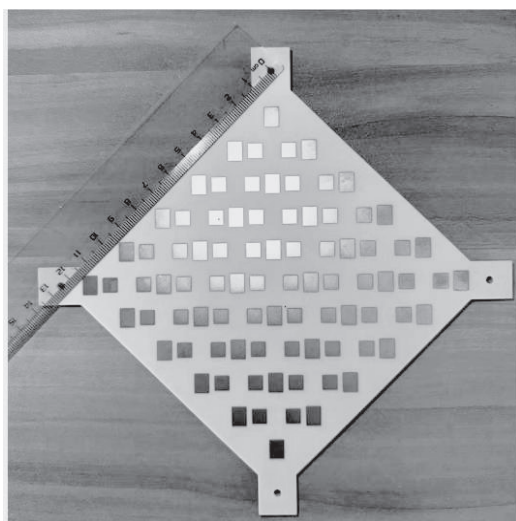
同轴连接器（SMA JACK SMT 50OHM）并接在功分器的微带线的末端。本文提出的相控阵天线总共有五行，每一行的阵元数量分别为1、3、5、3、1。本文提出的三角交错布阵的相控阵天线每个SMA端口供电不加权，为等幅供电。但每行不同的阵元数量会有类似加权供电的效果，有抑制栅瓣的效果。

该三角交错布阵的相控阵天线采用多层介质基板来增加介质板的厚度，本文使用来自Rogers 4003C介质基板，其相对介电常数是3.55。由于Rogers 4003C最厚的介质基板厚度 $H_1=1.524\text{ mm}$ ，厚度仍然不足以形成足够宽的带宽。因此本文设计的贴片天线使用两层厚度分别为 $H_1=1.524\text{ mm}$ 和 $H_2=0.508\text{ mm}$ 的Rogers 4003C介质基板形成宽带腔体，两块介质基板通过4450F粘合剂粘在一起。下层介质基板上表面敷上2oz的铜箔制金属地，并在金属地上开孔将功分器的能量缝隙耦合至贴片天线。此外，每个贴片天线旁的哑元的一部分与相邻的贴片天线是共用的。

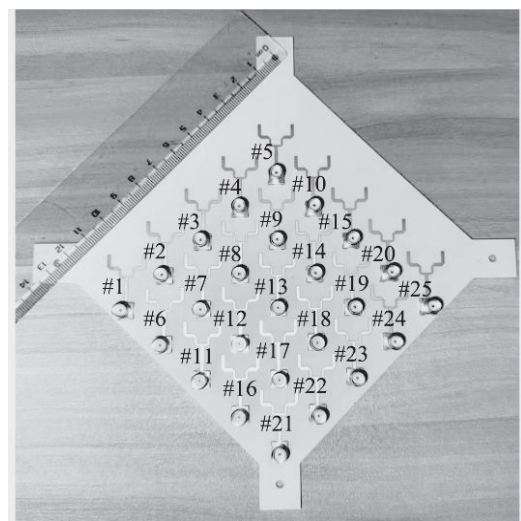
3 测试结果

该25端口相控阵天线的实物已完成加工与测试，其25个端口依次编号为#1~#25。由于该相控阵天线具有轴对称结构，在回波损耗测试中，选取最外侧的#1端口、中心的#13端口及中间区域的#8端口作为代表性测试端口。

天线远场测试环境如图10所示。为保障测试稳定性，本文为该天线设计了3D打印树脂支架，



(a) 俯视图



(b) 仰视图

图9 三角交错布阵的相控阵天线实物照片

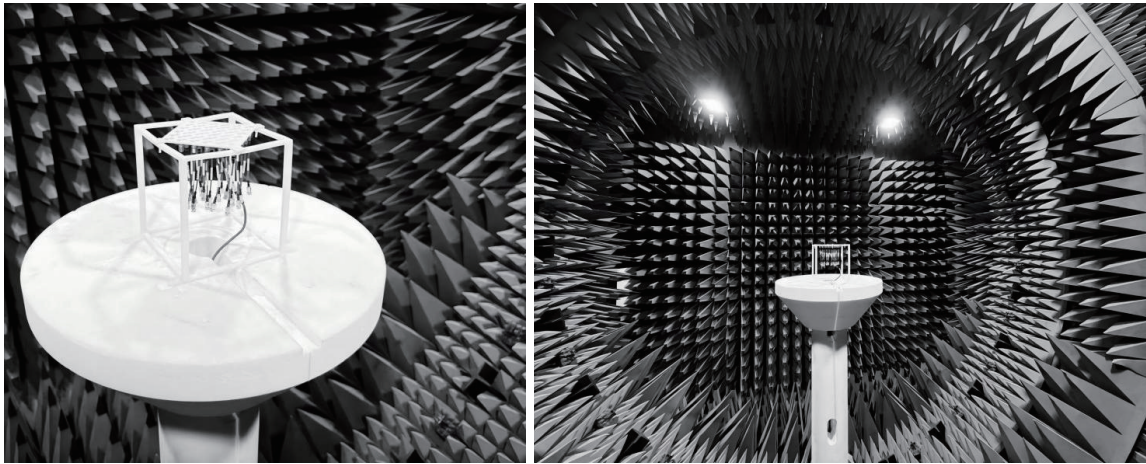


图10 三角交错布阵的相控阵天线的远场测试环境

采用 PTFE (聚四氟乙烯) 螺丝将天线固定于支架上, 可有效避免天线在暗室旋转采样过程中产生位移; 同时, 支架高度参数经过优化设计, 确保相控阵天线的相位中心与暗室几何中心完全重合, 从测试装置层面最大限度地降低位置偏差对结果的影响。

远场辐射特性测试采用天线远场测试 (AEP) 方法, 针对天线的 25 个端口开展独立测试。每个端口重复测试 3 次以减少随机误差, 并结合三重多采样技术进一步提升数据可靠性; 测试过程中, 除当前被测端口外, 其余端口均接匹配负载, 避免非被测端口信号干扰, 旨在获取稳定性最优的有源阵元方向图。后续通过 MATLAB 软件对各端口的测试数据进行后处理, 最终合成相控阵的扫描远场数据, 为后续方向图分析提供基础。本文中的增益单位为 dBi, 简称为 dB。

本文采用 Ansys HFSS 软件对该天线设计进行仿真分析, 并将仿真结果与实测结果展开对比。结果显示, 该基于缝隙耦合馈电的三角栅格布阵相控阵天线, 其 -10 dB 阻抗带宽为 9.8~11.1 GHz (相对工作带宽约为 12%), 且回波损耗最低值均集中在中心频率 10.8 GHz 附近; 实测结果与仿真结果吻合度较高。本节将 #1、#8、#13 端口对应的 $S_{(1,1)}$ 、 $S_{(8,8)}$ 、 $S_{(13,13)}$ 参数的 HFSS 仿真结果与实测结果进行叠加, 如图 11 所示。

由图 11 可见, 各端口 S 参数的仿真结果一致性极佳, 且与阵元设计分析中单一阵元的回波损耗特性几乎一致。实测过程中, 天线支架、SMA 接口转接结构等实物装配因素会对天线 S 参数产生影响, 导致实测 S 参数随端口位置呈现一定差

异; 但各端口对应的天线工作频段仍大体一致, 且回波损耗最低值仍集中在 10.8 GHz 频段附近。上述结果表明, 该相控阵天线可在通频带 (9.8~11.1 GHz) 内稳定工作。仿真及测试结果如图 12 和图 13 所示。

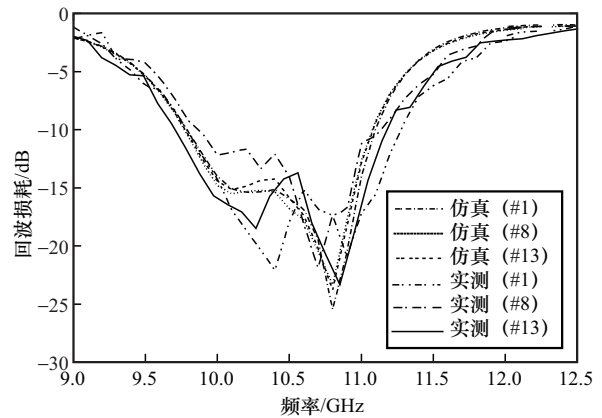


图11 双层介质缝隙耦合馈电贴片相控阵天线的回波损耗

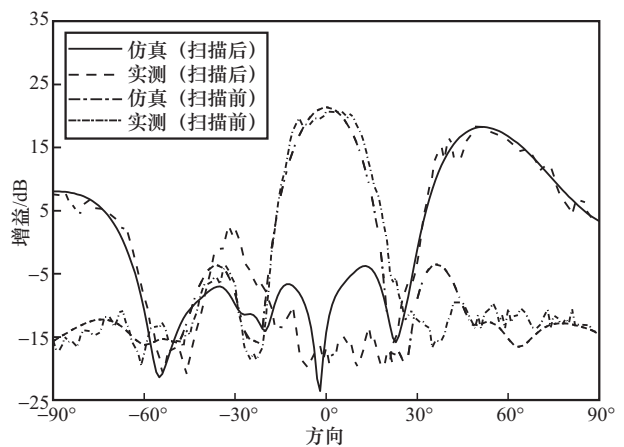


图12 双层介质缝隙耦合馈电贴片相控阵天线的增益(E面)

本设计的核心需求为：大扫描角、宽频带及大通道间距。且本设计满足更严格的辐射指标：副瓣电平小于 -10 dB，波束滚降小于 3 dB。基于上述要求，本文对所设计阵列天线的扫描能力进行了仿真与实测对比分析。天线测试采用 T3 多采样方式，该方式易引入较多尖刺噪声，图 13 中呈现的为原始测试结果，未对数据进行平滑处理，真实反映了测试过程中的信号特征。

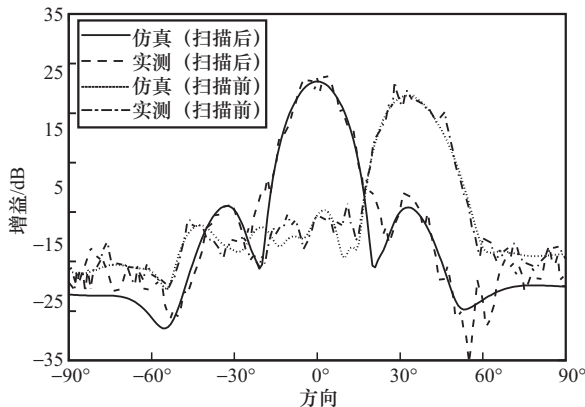


图 13 双层介质缝隙耦合馈电贴片相控阵天线的增益(H面)

本设计扫描到 0° 时，仿真增益为 21.35 dB，实测增益为 20.7 dB，峰值口径效率约为 65% 。SMA 端口引入的额外损耗会直接影响实测效率，因此本设计口径效率的理论值应高于 65% 这一实测值。

此外，该天线 E 面与 H 面的扫描性能存在差异。当 E 面最大扫描至 51° 时，实测增益为 18.3 dB，相对于 0° 扫描状态的增益滚降 3 dB，且主瓣与最高副瓣的差值（即副瓣抑制比）大于 10 dB，满足设计对副瓣抑制的要求。仿真结果与实测结果吻合度较高，进一步验证了设计的可靠性，表明该相控阵天线在 E 面可稳定实现 50° 的正常扫描。当 H 面最大扫描至 33° 时，增益为 18.3 dB，增益滚降 3 dB。主瓣和最高的副瓣相差大于 23 dB。

图 14 中呈现了天线峰值增益随频率变化的实测与仿真曲线。在天线工作频率区间内，实测与仿真曲线整体变化趋势一致，在近中心频率 10.8 GHz 附近达到峰值。在中心频率处天线实测最大增益为 20.7 dB；且在整个通频带内，各频率点的增益与中心频率 10.8 GHz 时的增益差值不超过 2 dB，仿真曲线与实测曲线吻合度较高，也验证了天线设计模型的准确性。

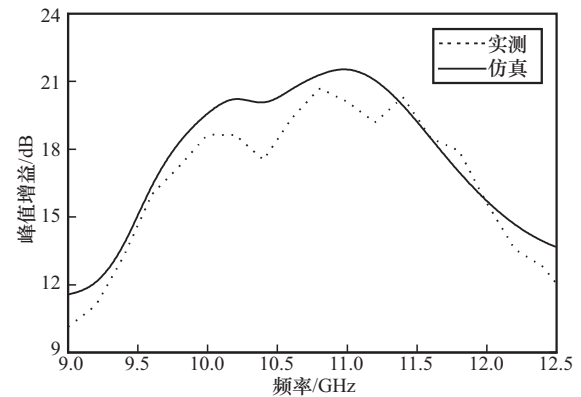


图 14 双层介质缝隙耦合馈电贴片相控阵天线的增益(H面)随频率的变化

4 结束语

本文基于对三角栅格交错布阵阵因子的研究，设计了通道间距为 λ 并采用三角栅格布阵的相控阵天线，以减少通道数进而降低成本。通过功分器和寄生贴片设计的二元子阵来降低通道间距。相对于满阵的相控阵天线，本文介绍的布阵方法在仅保留满阵 61% 通道数的同时，阵因子的扫描能力几乎没有受到影响。实测结果表明，所设计的天线相对带宽为 12% ，通频带内 S 参数和增益稳定，峰值口径效率约为 65% 。最终实现了 E 面的最大扫描角为 $\pm 51^\circ$ ，H 面的最大扫描角为 $\pm 33^\circ$ 。

参考文献:

- [1] 罗天光. 大间距相控阵天线栅瓣抑制方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
LUO T G. Research on grating lobe suppression methods of large spacing phased array antenna[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [2] BALANIS C A. Antenna theory: analysis and design. 4th ed[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.
- [3] ALSHRAFI W, HEBERLING D. Grating lobe mitigation in linear phased array antennas using leaky-mode of bed of nails[C]//Proceedings of the 2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 281-283.
- [4] KHADIKO N, ALSHRAFI W, CHALERMWISUTKUL S, et al. Comparison of grating lobe suppression using high impedance structure: EBG and BON in phased array antenna[C]//Proceedings of the 2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [5] ALSHRAFI W, BERTUCH T, HEBERLING D. Grating lobe reduction of phased array antennas using bed of nails structure[C]//Proceedings of the Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC 2018). London: IET, 2019: 1-4.
- [6] CRÉPIN T, MARTEL C, GABARD B, et al. Blind spot mitigation in phased array antenna using metamaterials[C]//Proceedings of the 2014

- International Radar Conference. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-4.
- [7] TOLKACHEV A A, DENISENKO V V, SHISHLOV A V, et al. High gain antenna systems for millimeter wave radars with combined electrical and mechanical beam steering[C]//Proceedings of International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Piscataway: IEEE Press, 2002: 266-271.
- [8] SKOBELEV S P. Optimized phased array antenna element based on multidisk slowing structure for limited-field-of-view applications[C]//Proceedings of the International Conference on Antenna Theory and Techniques. Piscataway: IEEE Press, 1998: 266-269.
- [9] SKOBELEV S P, SHISHLOV A V. On the use of Yagi-Uda elements in array antennas for limited scan applications[C]//Proceedings of the Proceedings 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology. Piscataway: IEEE Press, 2002: 299-302.
- [10] EOM S Y, PARK H K, JEON S I, et al. Shaping of flat-topped element patterns in a planar array of circular waveguides using a multilayered disk structure [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 51(5): 1040-1053.
- [11] SENGUPTA D, SMITH T, LARSON R. Radiation characteristics of a spherical array of circularly polarized elements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1968, 16(1): 2-7.
- [12] AMITAY N, GALINDO V, WU C P. Theory and analysis of phased array antennas[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 1972.
- [13] HIZAL A. Wide angle scanning conformal phased array on a spherical surface[C]//Proceedings of the 2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Piscataway: IEEE Press, 2014: 259-266.

[作者简介]



潘洋一 (2001-), 男, 重庆人, 华南理工大学硕士生, 主要研究方向为相控阵天线、透镜天线。



黄志成 (1998-), 男, 云南曲靖人, 华南理工大学博士生, 主要研究方向为相控阵天线、透镜天线。



廖绍伟 (1981-), 男, 四川成都人, 博士, 华南理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为微波毫米波器件与天线设计、电磁建模与测试研究、5G/6G通信中的射频技术、毫米波/太赫兹相控阵天线和系统。