

# 基于人工磁导体结构的一维5G毫米波宽角扫描阵列天线

马战刚<sup>①</sup> 张卿<sup>②</sup> 冯思润<sup>①</sup> 赵鲁豫<sup>\*②</sup>

<sup>①</sup>(中国电子科技集团公司第十三研究所 石家庄 050000)

<sup>②</sup>(安徽大学 合肥 230601)

**摘要:** 随着5G毫米波技术的快速发展,对天线的高增益、宽波束覆盖和小尺寸提出了更高要求。该文基于人工磁导体(AMC)结构,设计了一种毫米波频段的具有大角域扫描能力的单极化一维阵列天线。通过利用AMC结构的同相反射特性,天线阵列在提升带宽和增益的同时,实现了显著的宽角扫描能力。天线单元采用单极化设计,通过堆叠式结构优化电流分布,改善了带宽和端口隔离度。阵列以4.6 mm(26 GHz时的0.4波长)间距组阵,加载AMC结构后,阵中天线单元的增益提升至5 dBi,且相邻单元的方形贴片参与辐射,进一步展宽了辐射方向图。仿真结果表明,天线阵列覆盖23.7~28 GHz频段,最大增益达13.8 dBi,在26 GHz时实现了 $\pm 80^\circ$ 的宽角扫描性能。此外,加工测试验证了设计的可行性,实测结果与仿真吻合良好,隔离度优于-15 dB。该文的创新点在于通过AMC结构优化天线单元的辐射特性,结合独特的阵列设计,实现了宽频带、高增益和宽角扫描的平衡,为5G毫米波终端天线的设计提供了新的思路。

**关键词:** 5G毫米波; AMC结构; 宽角扫描; 高增益; 阵列天线

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2026)02-0784-10

DOI: 10.11999/JEIT250719

CSTR: 32379.14.JEIT250719

## 1 引言

随着第5代移动通信系统FR2频段的全球普及,和我国卫星互联网技术的快速成熟,毫米波频段越来越得到人们的关注。然而,毫米波频段由于其高频、短波长的性能,不可避免地存在着较高的路径损耗,导致其覆盖能力有限,尤其在复杂场景中易受障碍物遮蔽影响其性能。因此,具备宽角扫描能力的毫米波天线(阵列)成为当前学术界和产业界关注的热点<sup>[1,2]</sup>。众所周知,天线前端是无线通信系统的核心组件,其性能将会直接影响整机性能。综上所述,在毫米波应用中,天线(阵列)需要满足高增益、宽带宽、双/圆极化以及宽角域覆盖等多重要求,以对抗路径损耗和衰减。

由于毫米波商用频段呈现非连续分布,这增加了其天线系统设计的复杂度,文献[3]提出了一种辐射状三叉形拓扑结构的新型宽带微带天线。该天线在20~28 GHz频带内表现出良好的工作特性,其相对带宽达到32.6%,这一工作频段完全符合5G毫米波通信系统的应用需求。单个天线单元在目标频段内可实现9 dBi的峰值增益,该设计的高增益特性有效补偿了毫米波频段固有的路径损耗问题。研究者采用1×16的一维阵列,对其波束扫描特性进行测试分析。实验数据表明,该阵列的辐射波束在 $\pm 45^\circ$ 范围内具有良好的覆盖能力。

毫米波宽角扫描天线是一种具备大角度波束转向能力的高性能天线,其显著特征在于优异的波束指向性和空间分辨能力。由于其在结构紧凑性和能效方面的突出优势,这种天线方案非常适合部署在空间受限且对功耗敏感的设备中,例如可穿戴智能设备和无人机通信系统,为新一代无线通信应用提供了可靠的技术支撑。文献[4]提出了一种新型的TM<sub>01</sub>模谐振毫米波天线设计方案,主要面向5G移动终端应用场景,通过多层架构设计和真实手机环境测试,证实该天线展现出卓越的宽带性能与广域波束覆盖能力;同时,通过采用馈电端口与接地金属柱的非对称排布方案,有效实现了TM<sub>01</sub>模式激励。测试结果表明,该天线系统在24.25~28 GHz的5G毫米波工作频带内展现出优异的性能,阵列单元间的隔离度在-15 dB以下,阵列在整个频带内均可以实现 $\pm 60^\circ$ 的大角度波束扫描。该天线设计符合当前毫米波终端的发展需求,兼具低剖面特性与多层模块化设计的兼容性。

阵列单元间的强耦合会显著恶化波束扫描性能,因此,采用去耦技术改善扫描性能是宽角扫描设计的重要途径。文献[5]利用接地带状枝节形结构的弱辐射特性,构建能够降低耦合的特殊结构,有效提升了天线阵列的波束扫描性能。实验数据表明,在24.5~29.5 GHz的工作频段内,该设计使阵列单元间隔离度得到大幅度优化,有效降低了互耦干扰对辐射特性的影响。最终,阵列的波束扫描范围扩展至 $\pm 65^\circ$ ,验证了该去耦方案在提升扫描性能方面的有效性。

收稿日期: 2025-07-31; 改回日期: 2025-09-08; 网络出版: 2025-09-23

\*通信作者: 赵鲁豫 lyzhao@ahu.edu.cn

## 2 阵列天线设计

在宽角扫描天线的研究领域，有多种技术手段(如改进辐射结构、优化馈电方式等)通过提升单元方向图的半功率波束宽度(Half Power Beam Width, HPBW)来提升阵列的大角域扫描性能。同时，阵列天线的辐射特性分析还需要考虑阵因子和阵元间的互耦干扰对辐射方向图的影响。基于方向图乘积原理，天线系统的整体辐射性能由单元方向图与阵列因子的乘积共同决定，其中阵元间距的优化设计对波束指向性具有重要调控作用。协同优化单元特性和阵列参数的方法，可以显著提升天线系统的宽角扫描性能。在此基础上，本研究从阵列理论的基本原理出发，深入分析了阵因子和阵中单元方向图的相互作用机制，系统地推导出影响宽角扫描性能的关键参数。

### 2.1 宽角扫描阵列天线影响因素分析

根据阵列天线的基本原理，天线的辐射特性主要由两个关键参数决定：阵列因子和单元方向图。为深入分析这一特性，现考察一个典型的等间距均匀直线阵列模型。如图1所示，该模型采用一维线性排布方式，阵列单元沿Y轴方向均匀分布，其主辐射方向设定为Z轴正向。

$$E = \frac{e^{-jkr}}{r} f_0(\theta, \varphi) U_a(\theta) \quad (1)$$

其中， $f_0(\theta, \varphi)$  描述了阵列单元的方向图特性。对于沿Y轴排列的线性阵列，单元方向图在Y方向上的HPBW是决定波束扫描范围的关键参数。同时，阵因子的特性也对阵列的扫描性能产生重要影响，其远场辐射特性可由式(2)精确描述<sup>[6]</sup>。

$$U_a(\theta) = \sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{jkn d(\sin\theta - \sin\theta_s)} \quad (2)$$

其中， $N$ 表示天线单元数量， $k$ 是波数， $d$ 代表相邻天线单元的距离，而 $\theta_s$ 则定义为阵列的最大辐射方向。经过理论推导，可得到阵列因子的方向性系数 $D_a$ ，其表达式如式(3)所示<sup>[7,8]</sup>

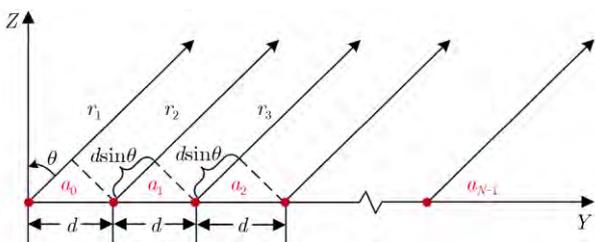


图1 等距离均匀直线阵

$$D_a = \frac{N}{1 + 2 \sum_{n=1}^{N-1} \left(1 - \frac{n}{N}\right) \frac{\sin(nkd) \cos(nkd \sin \theta_s)}{nkd}} \quad (3)$$

针对8单元线性阵列的阵因子仿真分析结果如图2所示，该图对比了不同单元间距 $d$ (以 $0.5 \lambda$ 为基准参考值)与最大扫描角 $\theta_s$ 对阵列因子方向性系数 $D_a$ 的影响。由图2可以分析出，当天线阵列进行大角度扫描时，随着单元间距 $d$ 的逐渐减小，方向性系数 $D_a$ 会逐渐增大。具体而言，在大角度波束扫描情况下，当天线单元间距 $d$ 处于 $0.4\lambda \leq d \leq 0.46\lambda$ 范围时，阵列因子 $D_a$ 达到最大值，表明此时天线阵列可以表现最佳的扫描性能。分析得出，当单元间距过小时(如 $d < 0.4\lambda$ )，并不会进一步优化阵列的大角度扫描性能，反而会因为单元互耦的增强，影响整体天线增益的降低。综合考虑毫米波天线的尺寸约束和辐射性能，本设计最终采用 $d = 0.4\lambda$ 作为单元间距，以兼顾方向性和互耦<sup>[9,10]</sup>。

结合上述对阵列间距影响方向性的仿真分析，阵列间距过小时(如 $d=0.4\lambda$ )，阵列天线系统仍不可避免地会呈现出显著的互耦效应，进而影响阵列的宽角扫描性能。综上所述，毫米波天线的宽角扫描需要重点解决以下3个关键问题：

(1)当阵元间距小( $0.4\lambda \leq d \leq 0.46\lambda$ )时，天线阵列在大角度扫描时虽具有很强的方向性。但如何设计适当的天线形式，以实现小间距组阵与去耦的平衡，仍需深入探索。

(2)采用多种方法(如优化馈电结构、创新天线设计等)来展宽阵中天线单元的辐射方向图。

(3)针对天线单元间距过小的问题，需明确采用何种有效方式消除耦合。

### 2.2 AMC结构分析

人工磁导体(Artificial Magnetic Conductor,

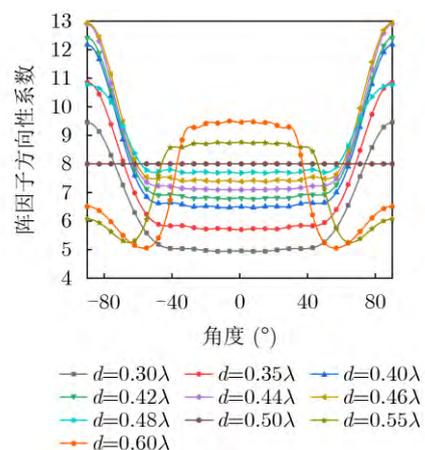


图2 阵因子方向性系数关系图

AMC)结构具有同相反射特性。如图3所示,假定 AMC结构布置于YOZ平面内,电磁波沿着-Z轴方向垂直入射到AMC结构表面。

可以得到AMC的表面阻抗

$$Z_s = \frac{E_Y}{H_X} \tag{4}$$

当电磁场垂直入射到AMC表面时,入射电磁波和反射电磁波会叠加在一起,则可得到式(5)和式(6)叠加场的表达式(i表示入射波,r表示反射波)

$$E(z) = E_i e^{-jkz} + E_r e^{jkz} \tag{5}$$

$$H(z) = H_i e^{-jkz} + H_r e^{jkz} \tag{6}$$

则可得到AMC表面处的阻抗为

$$Z_s = \frac{E(Z=0)}{H(Z=0)} \tag{7}$$

基于电磁场理论中的场量关系,可推导出空间波阻抗 $\eta$ 的表达式,由此可得,入射波与反射波之间的相位差 $\Phi$ (即反射相位)可表示为

$$\Phi = \text{Im} \left\{ \ln \frac{E_r}{E_i} \right\} = \text{Im} \left\{ \ln \frac{Z_s - \eta}{Z_s + \eta} \right\} \tag{8}$$

当表面波阻抗远小于空间波阻抗时( $Z_s \ll \eta$ ),此时的相位差 $\Phi = \pm 180^\circ$ , AMC表面表现出与理想电表面(Perfect Electromagnetic Conductor, PEC)类似的反射特性。如果表面波阻抗远大于空间波阻抗( $Z_s \gg \eta$ ),则相位差 $\Phi$ 趋近于 $0^\circ$ ,此时的AMC就可以看成理想磁导体表面(Perfect Magnetic Conductor, PMC)。当所需要的入射波频率和谐振频率接近时,表面波阻抗会远大于空间波阻抗,AMC就会近似等效成PMC,具有同相反射特性<sup>[11-13]</sup>。

本天线设计方案采用方形AMC单元构建阵列天线,其具体结构如图4所示。图5给出了该AMC在Y极化(Y-Pol)条件下的相位反射特性曲线。因为AMC结构的对称性,图中仅给出了Y极化下的结果。 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 为AMC的同相反射区间,此时所设计的AMC结构工作频带覆盖了21~30 GHz范围。

### 2.3 阵列天线的设计

2019年世界无线电通信大会(WRC-19)确定了

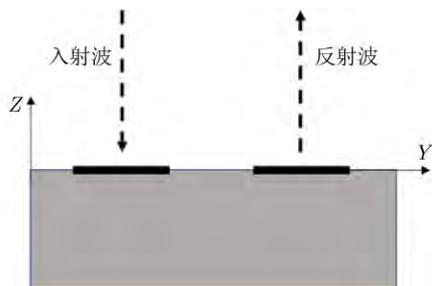
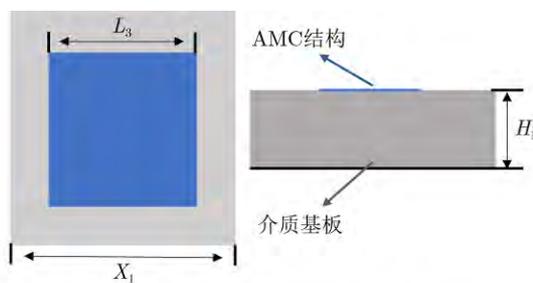


图3 平面波的垂直入射

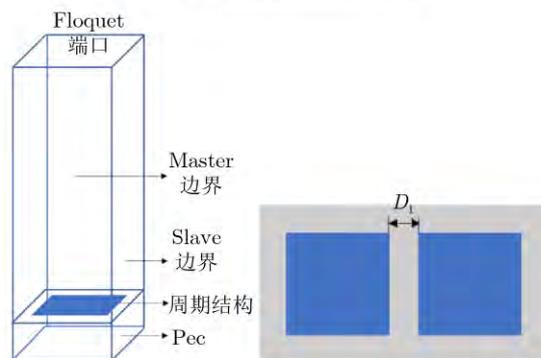
全球统一的5G毫米波频段。5G毫米波频段相较于3G/4G系统采用的sub-3 GHz频段具有明显优势,主要体现在频谱资源方面。毫米波频段不仅提供更充裕的连续频谱,还能有效提升系统的数据传输速率和信道容量。其中24.2~27.5 GHz这一较低频段的 天线设计更符合当前毫米波通信系统的实际应用需求<sup>[14,15]</sup>。基于此,本文设计了一个覆盖23.7~28 GHz频段的5G毫米波天线阵列。

本天线阵列采用3层介质基板堆叠设计,整体设计为单极化工作模式,最顶层为辐射层,集成有4个方形金属贴片作为辐射源,中层设计为十字形金属结构。而低层介质基板上表面加载AMC结构,3层介质基板均采用RO4350材料。

随着5G毫米波技术的快速发展,现代无线通信系统对天线性能提出了更为严格的技术要求。为



(a) AMC结构俯视图和侧视图



(b) AMC周期性结构仿真及排布图

图4 AMC结构

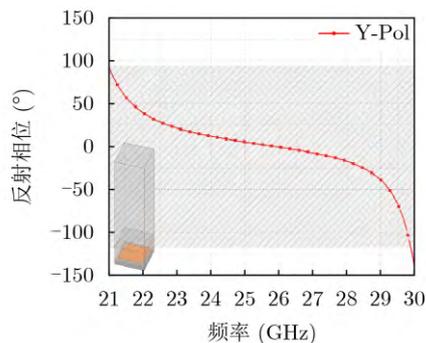


图5 AMC结构的同相反射曲线

满足5G通信系统在毫米波频段对高速率、低时延传输的需求，天线设计需要在宽带特性、辐射增益、波束覆盖范围以及结构尺寸等多个关键性能指标间实现协同优化。在这一技术背景下，本文通过引入人工磁导体结构，为上述技术挑战提供了创新性的解决方案。

AMC结构的引入主要基于其独特的电磁特性，能够有效拓展天线阵列的工作带宽以满足5G毫米波通信的宽频带需求。该结构在不增加天线物理尺寸的情况下显著提升了辐射增益，有效补偿了毫米波频段的路径传输损耗。通过优化AMC结构参数设计，在实现增益提升的同时保持了天线原有的宽波束特性，这一特性对于确保5G系统的广域覆盖能力具有重要价值<sup>[16]</sup>。天线阵列如图6所示，具体的结构参数如表1所示。

图7(b)展示了天线阵列的底层结构设计，采用共面波导接地(Coplanar Waveguide Ground, CPWG)技术实现。为确保上下金属层间实现可靠电气连接，在CPWG结构上设置了256个接地铜柱。为了焊接射频连接器SMPM接头方便，天线阵列底部放置了用于连接SMPM接头的焊盘。该焊盘及与之相连的微带传输线尺寸均是通过仿真精确优化，以最大限度降低测试误差。其中焊盘表面采用裸露铜导体工艺处理。

### 3 阵列天线仿真分析

#### 3.1 阵列天线阵中方向图分析

基于方向图乘积定理，实现宽角度波束扫描的天线阵列，除需严格控制前面分析的天线单元间距外，核心设计约束在于单元天线自身需具备宽波束辐射特性。这意味着单元方向图在低仰角区域内仍需维持有效的增益覆盖<sup>[17]</sup>。

本设计的天线阵列的阵中单元能够实现宽方向图的关键在于顶层4个方形金属贴片。如图6(b)所示，每个单元包含4个方形辐射体贴片，虽然单元的HPBW为92°，但通过阵列组合实现了更宽的辐射特性。

在阵列工作状态下，以中心辐射单元为例，其相邻的单元方形辐射体贴片会产生显著的耦合辐射效应。这种相邻单元间的电磁耦合辐射作用会与中心单元形成协同辐射，从而能够有效展宽阵中天线单元的H面方向图波束宽度。图8(a)详细展示了26 GHz频点下阵中天线单元在的H面辐射方向图特性。为准确评估AMC结构对方向图展宽的实际贡献，实验系统地比较了加载与未加载AMC结构的阵列辐射性能差异。实验数据分析表明，加载AMC结构前后阵列中心单元的方向图在低仰角区域基本保持一致，HPBW均达到180°的宽波束特性。这一结果证实方向图展宽机制主要源于单元的特殊设计，

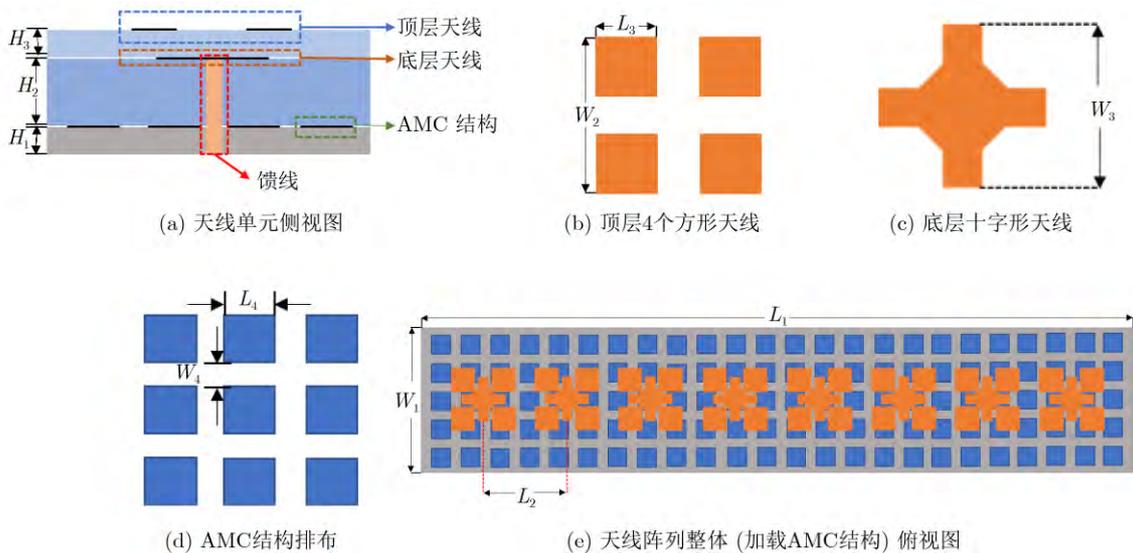


图6 天线阵列结构

表1 AMC结构的阵列天线结构参数(mm)

| $L_1$  | $L_2$  | $L_3$ | $L_4$ | $H_1$ | $H_2$ | $H_3$ |
|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 37.600 | 4.600  | 2.300 | 1.500 | 0.254 | 0.508 | 0.254 |
| $D_1$  | $W_1$  | $W_2$ | $W_3$ | $W_4$ | $X_1$ |       |
| 0.200  | 12.100 | 3.140 | 2.500 | 0.200 | 1.700 |       |

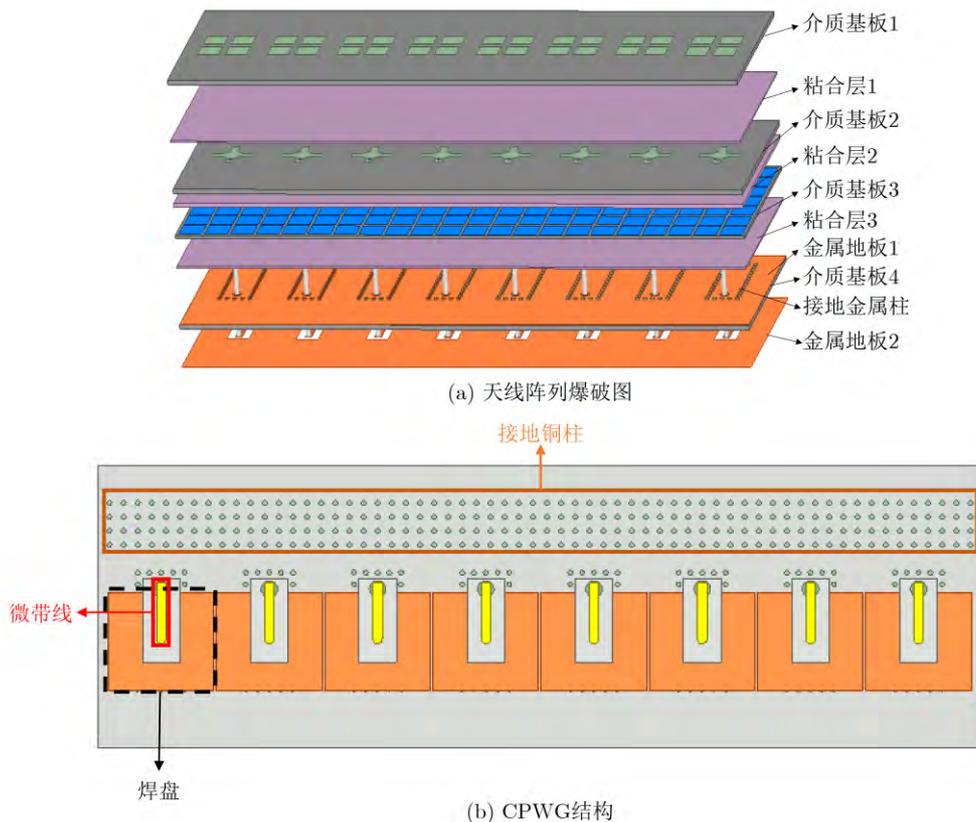


图7 天线阵列效果图

该设计实现了单元间的协同耦合辐射的效应。然而,深入分析发现,AMC结构的引入使中心单元的峰值增益提升了约1 dBi,且这一增益提升并未以牺牲方向图宽度为代价。基于此,图8(b)进一步系统地研究了26 GHz频点下单元间距对辐射特性的影响。研究表明,当单元间距优化为 $0.4\lambda$  (4.6 mm)时,阵列在低仰角区域展现出最优的辐射特性:一方面保持了 $180^\circ$ 的超宽HPBW,另一方面通过合理的间距设计确保了阵因子具有良好的波束指向性。这种双重优势的结合,使得天线阵列在宽角扫描性能上实现了显著提升。

为深入分析方向图展宽机理,图9展示了阵列中心单元(天线4)单独馈电时的截面电场分布。电场分布特征表明,虽然仅对中心单元馈电,但通过电磁耦合辐射作用,相邻单元(天线3和5)也产生了显著的感应辐射。这种单元间的耦合辐射机制是H面方向图展宽的关键因素。值得注意的是,这种耦合辐射效应在展宽方向图的同时,并未影响各单元的阻抗匹配特性。此外,AMC结构的引入进一步优化了阵列性能:一方面扩展了工作带宽,另一方面提升了整体增益约1 dBi。这种设计在保持宽波束特性的同时,实现了性能全面提升。

### 3.2 AMC结构对天线性能的影响仿真分析

基于商用仿真软件HFSS仿真平台优化设计后,

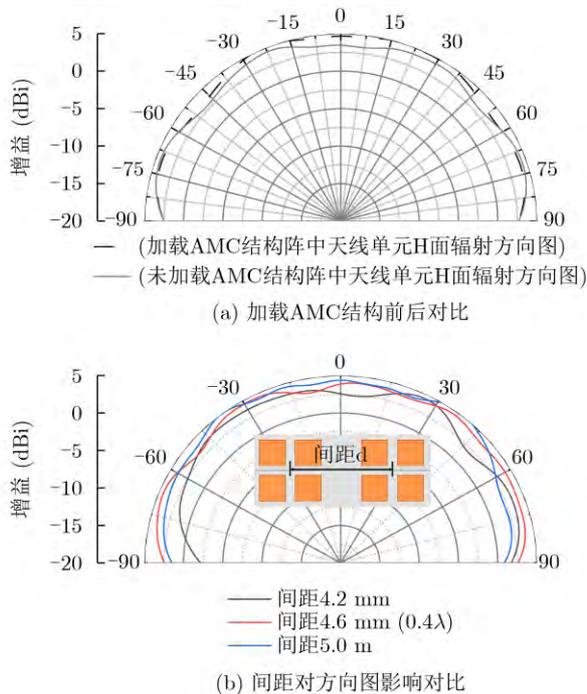


图8 26 GHz阵中单元H面辐射方向图

阵列 $S$ 参数响应如图10所示。加载AMC结构之后,天线在 $|S_{11}| < -10$  dB的条件下的工作带宽显著优于未加载AMC结构的带宽(24.5~27.5 GHz),这种带宽扩展归因于独特的单元耦合机制。当仅激励阵

中单元时，相邻单元表层电流分布与主动激励状态保持同向性，使其同步参与中央单元的阻抗匹配调节与辐射过程。

仿真分析表明，AMC结构的引入显著改善了天线的电流分布特性。在加载AMC结构的情况下，24 GHz和28 GHz频点的表面电流分布与26 GHz中心频点保持高度一致性。

相比之下，未加载AMC结构的天线在这两个频段的电流分布与中心频点存在明显差异。这种电流分布的一致性优化，使得天线在24~28 GHz频

段内获得了更好的阻抗匹配特性，从而有效扩展了阵列的工作带宽。在 $|S_{11}| < -10$  dB的情况下，工作带宽扩展至23.7~28.5 GHz，提升了约50%。如图10(b)所示，AMC结构能够有效调控特性在不同频段的电磁特性，通过稳定多频点的表面电流分布，显著提升了毫米波频段的工作带宽。

为评估阵列的波束扫描性能，实验测试了26 GHz频点下3 dB增益衰减范围内的扫描特性。如图11(a)和图11(b)所示。

由图11的实验数据对比分析，AMC结构的引入使阵列峰值增益显著提升1.3 dBi。在3 dB增益衰减条件下，两种配置均能实现80°的宽角扫描范围，但AMC结构展现出更优异的边缘增益特性，在最大扫描角度处增益额外提高0.6 dBi。综合实验分析表明，AMC结构对天线性能具有双重提升作用：一方面显著提高辐射增益，另一方面有效扩展工作带宽。图12的多角度3D方向图直观展示了阵列优异的波束调控能力。进一步的频带内增益测试(图13)显示，AMC结构使阵列在26 GHz中心频点处的增益提升1.5 dBi，且在24~28 GHz全频段内保持稳定的增益增强效果。具体而言，在24 GHz和

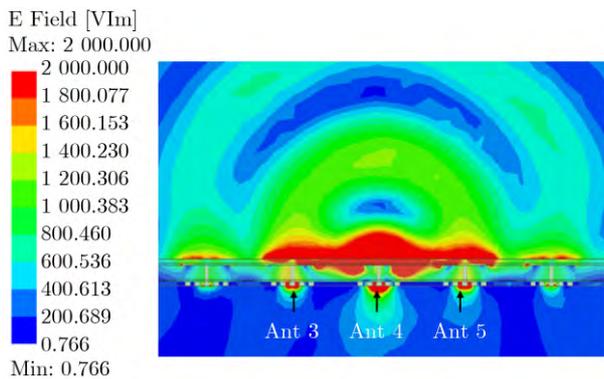


图9 阵中天线单独作用下天线阵列的切面电场

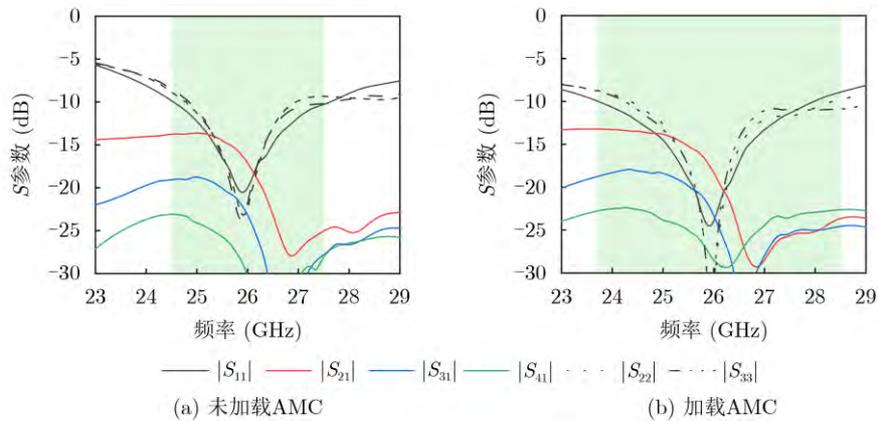


图10 S参数仿真

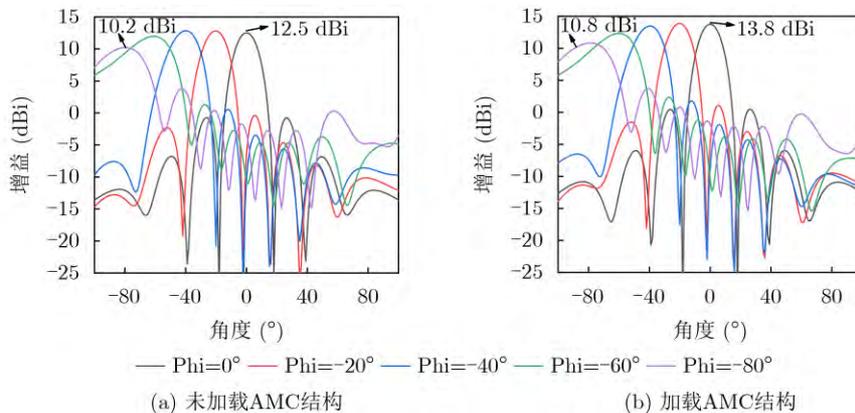


图11 26 GHz天线阵列波束扫描图

28 GHz边缘频点，增益分别提高了2.2 dBi和1.9 dBi，这种宽频带增益提升特性使阵列更适合毫米波通信应用。

### 4 阵列天线测试分析

基于多层PCB工艺加工的天线阵列实物如图14所示，其物理尺寸与仿真模型严格匹配。天线实物焊接了测试所需要的SMPM射频接头。天线阵列的S参数测试采用Keysight N5225A双端口矢量网络分析仪进行，具体测试配置如图15所示。为保证测试的准确性，对于未连接射频线缆的端口，所有空闲端口连接50 Ω负载。实测结果如图16(a)所示，阵列在 $|S_{11}| < -10$  dB的条件下，带宽覆盖23.3~27.7 GHz；隔离度测试下，实测 $|S_{12}|$ 在23.5~25.0 GHz频带内均小于-13 dB，在25~28 GHz的频带内优于-15 dB，与仿真结果基本一致。需指出，测试结果与仿真结果存在略微的误差，出现误差的主要原因源于毫米波段对结构尺寸的极端敏感性。PCB加工工艺限制导致天线贴片、馈电结构与AMC单元的实际尺寸与设计值存在微小偏差，这种偏差在毫

米波段会引发略微的频率偏移。尽管如此，阵列的辐射性能和频带宽度仍完全满足设计指标，验证了方案的工程可行性。而测试曲线中观察到的剧烈波动是因为在使用矢量网络分析仪时，线缆过长，线缆电流回流。

测试天线阵列的波束扫描性能时使用的是TMYTEK®的毫米波相位调制器(Beamforming Box, BBox)，使用其中的8个可独立调节幅度相位的射频端口，将其与阵列的8个端口一一对应连接，进行测试前还需要对8个通道进行逐一的相位校准。进行测试时，通过网线将计算机与BBox连接，通过其自带的软件改变BBox对不同激励端口的相位，控制阵列波束辐射方向，测量其扫描方向图。

SMPM接头到CPWG结构的转换会产生损耗，为最大限度控制该损耗，如图17(b)所示，通过精确仿真优化了CPWG结构设计。仿真结果表明，在阵列工作频段内，该结构的转换损耗可控制在

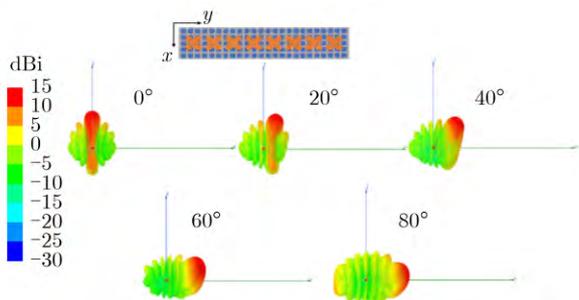


图 12 天线阵列的三维扫描

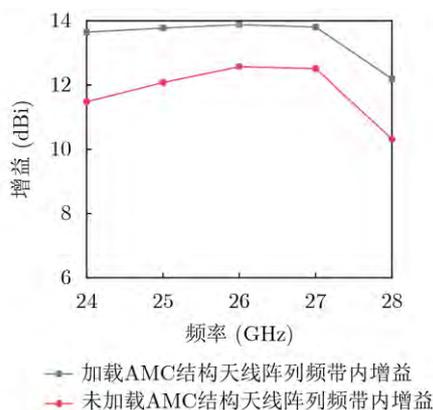


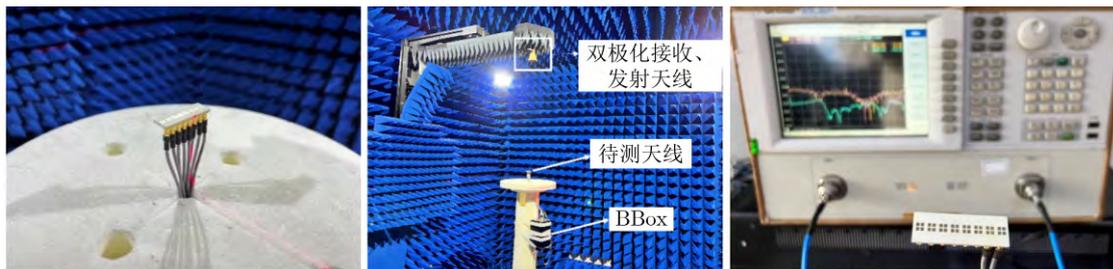
图 13 加载AMC结构前后阵列增益对比



(a) 天线实物图

(b) 天线实际尺寸

图 14 天线实物和测试环境



(a) 辐射方向图测试暗室

(b) S参数测试环境

图 15 天线测试环境

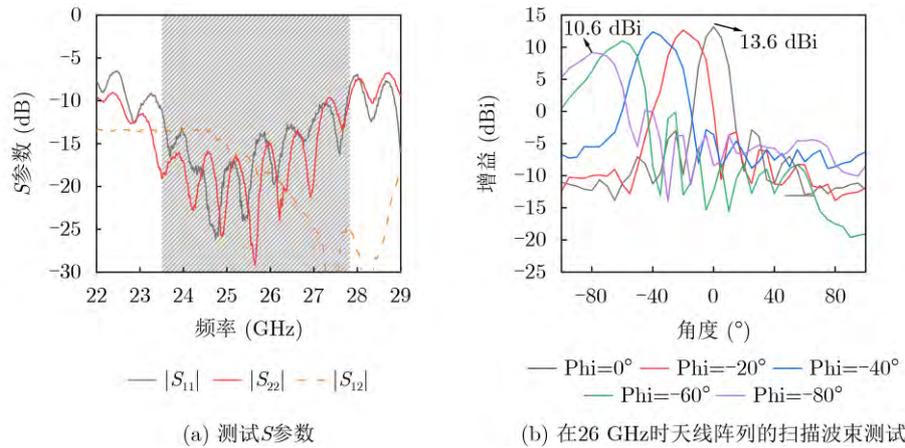


图 16 天线阵列的测试结果

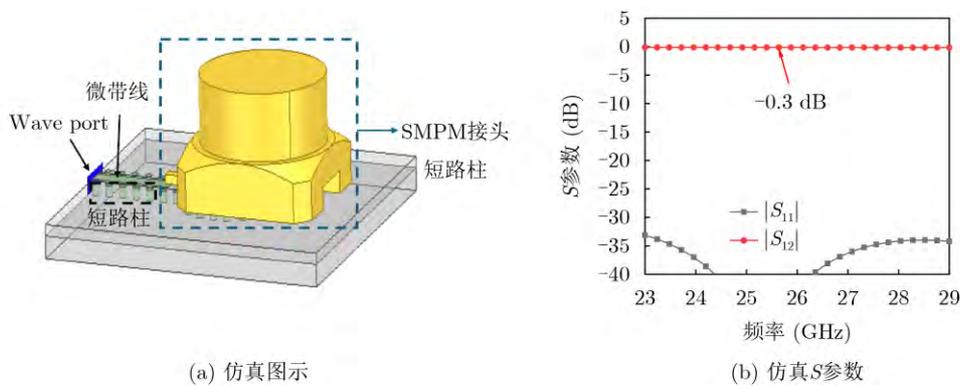


图 17 SMPM接头到CPWG的损耗

0.3 dB左右。测试结果表明，本研究的AMC结构毫米波阵列天线在26 GHz中心频点处，实测扫描方向图的增益特性较仿真结果整体降低约0.2 dBi。如图16(b)所示，这一增益差异主要来源于CPWG传输结构的固有损耗，这与前文分析的0.3 dB接口损耗结果相符。阵列实测扫描性能与设计预期高度一致，最大扫描角度达 $\pm 80^\circ$ ，且在大角度扫描情况下仍维持低副瓣辐射特性。

## 5 结论

本文设计了一种毫米波频段的具有大角域扫描能力的单极化一维阵列天线。本设计利用AMC的同相反射特性，优化了带宽、增益和扫描性能。采用单极化堆叠单元和 $0.4\lambda$ 间距组阵，实现了23.7~28 GHz工作带宽和13.8 dBi最大增益，在26 GHz频点达到 $\pm 80^\circ$ 扫描范围。实测结果验证了设计的可行性，隔离度优于-15 dB。本设计的核心突破在于，通过AMC调控辐射场与阵列耦合机制的协同作用，在宽频带、高增益和宽角扫描3者间实现性能平衡，为毫米波终端天线设计开辟了新路径。

## 参考文献

- [1] LI Yujian and LUK K M. A multibeam end-fire magnetolectric dipole antenna array for millimeter-wave applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(7): 2894–2904. doi: 10.1109/TAP.2016.2554601.
- [2] DENG Changjiang, LIU Di, YEKTAKHAH B, et al. Series-fed beam-steerable millimeter-wave antenna design with wide spatial coverage for 5G mobile terminals[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(5): 3366–3376. doi: 10.1109/TAP.2019.2963583.
- [3] OZPINAR H, AKSIMSEK S, and TOKAN N T. A novel compact, broadband, high gain millimeter-wave antenna for 5G beam steering applications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(3): 2389–2397. doi: 10.1109/TVT.2020.2966009.
- [4] LUO Yong, XU Jiayou, CHEN Yuanqing, et al. A zero-mode induced mmWave patch antenna with low-profile, wide-bandwidth and large-angle scanning for 5G mobile terminals[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 177607–177615. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2958120.
- [5] GU Lizheng, YANG Wanchen, LIAO Shaowei, et al. Novel coupling cancellation method by loading planar path for wideband high-isolation wide-scanning millimeter-wave phased array[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(11): 10520–10530. doi: 10.1109/TAP.

- 2022.3195456.
- [6] 何宇奇. 5G毫米波高性能天线阵列[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2022. doi: 10.27389/d.cnki.gxadu.2022.001839.
- HE Yuqi. 5G millimeter wave high-performance antenna array[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2022. doi: 10.27389/d.cnki.gxadu.2022.001839.
- [7] 魏文元, 宫德明, 陈必森. 天线原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 64–78.
- WEI Wenyuan, GONG Deming, and CHEN Bisen. Antenna Principle[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1985: 64–78.
- [8] 翟孟云. 阵列天线理论导引[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980: 175–236.
- ZHAI Mengyun. Array Antenna Theory Guidance[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1980: 175–236.
- [9] NI Shucheng, LI Xiangqiang, QIAO Xiaobin, *et al.* A compact dual-wideband magnetoelectric dipole antenna for 5G millimeter-wave applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(10): 9112–9119. doi: 10.1109/TAP.2022.3184550.
- [10] LIU Chunmei, XIAO Shaoqiu, and ZHANG Xiaolin. A compact, low-profile wire antenna applied to wide-angle scanning phased array[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(3): 389–392. doi: 10.1109/LAWP.2018.2791286.
- [11] 张璇. 人工磁导体结构在天线设计及RCS缩减中的应用研究[D]. [硕士学位论文], 长安大学, 2023. doi: 10.26976/d.cnki.gchau.2023.000314.
- ZHANG Xuan. Research on the application of artificial magnetic conductor structure in antenna design and RCS reduction[D]. [Master dissertation], Chang'an University, 2023. doi: 10.26976/d.cnki.gchau.2023.000314.
- [12] 苏小珂. 基于人工磁导体的阵列天线低散射技术研究[D]. [硕士学位论文], 电子科技大学, 2024. doi: 10.27005/d.cnki.gdzku.2024.003635.
- SU Xiaoke. Research on low scattering technology of array antenna based on artificial magnetic conductor[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2024. doi: 10.27005/d.cnki.gdzku.2024.003635.
- [13] 王新庄. 加载人工磁导体的WLAN圆极化天线研究[D]. [硕士学位论文], 西安理工大学, 2024. doi: 10.27398/d.cnki.gxalu.2024.000368.
- WANG Xinzhuang. Research on WLAN circular polarized antennas loaded with artificial magnetic conductors[D]. [Master dissertation], Xi'an University of Technology, 2024. doi: 10.27398/d.cnki.gxalu.2024.000368.
- [14] HONG Wei, JIANG Zhihao, YU Chao, *et al.* Multibeam antenna technologies for 5G wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(12): 6231–6249. doi: 10.1109/TAP.2017.2712819.
- [15] MA Wenyu, CAO Wenquan, HONG Rentang, *et al.* Planar broadband higher-order mode millimeter-wave microstrip patch antenna array with low sidelobe level[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(12): 2225–2229. doi: 10.1109/LAWP.2021.3103532.
- [16] 周路捷. 基于人工磁导体结构的LTCC毫米波阵列天线[D]. [硕士学位论文], 电子科技大学, 2023. doi: 10.27005/d.cnki.gdzku.2023.003105.
- ZHOU Lujie. Millimeter wave antenna array using artificial magnetic conductor structures Based on LTCC technology[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2023. doi: 10.27005/d.cnki.gdzku.2023.003105.
- [17] SHEN Xiumei, LIU Yujia, ZHAO Luyu, *et al.* A miniaturized microstrip antenna array at 5G millimeter-wave band[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(8): 1671–1675. doi: 10.1109/LAWP.2019.2927460.
- 马战刚: 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为射频电路设计。  
张 卿: 男, 硕士生, 主要研究方向为毫米波相控阵、相控阵的宽角扫描。  
冯思润: 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为射频电路设计。  
赵鲁豫: 男, 博士, 教授, 主要研究方向为多天线系统、天线阵列、天线测量。

责任编辑: 廖海贝

## A one-dimensional 5G millimeter-wave wide-angle Scanning Array Antenna Using AMC Structure

MA Zhangang<sup>①</sup> ZHANG Qing<sup>②</sup> FENG Sirun<sup>①</sup> ZHAO Luyu<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(The Thirteenth Research of China Electronics Technology Corporation, Shijiazhuang 050000, China)

<sup>②</sup>(Anhui University, Hefei 230601, China)

### Abstract:

**Objective** With the rapid advancement of 5G millimeter-wave technology, antennas are required to achieve

high gain, wide beam coverage, and compact size, particularly in environments characterized by strong propagation loss and blockage. Conventional millimeter-wave arrays often face difficulties in reconciling wide-angle scanning with high gain and broadband operation due to element coupling and narrow beamwidths. To overcome these challenges, this study proposes a one-dimensional linear array antenna incorporating an Artificial Magnetic Conductor (AMC) structure. The AMC's in-phase reflection is exploited to improve bandwidth and gain while enabling wide-angle scanning of  $\pm 80^\circ$  at 26 GHz. By adopting a 0.4-wavelength element spacing and stacked topology, the design provides an effective solution for 5G millimeter-wave terminals where spatial constraints and performance trade-offs are critical. The findings highlight the potential of AMC-based arrays to advance antenna technology for future high-speed, low-latency 5G applications by combining broadband operation, high directivity, and broad coverage within compact form factors.

**Methods** This study develops a high-performance single-polarized one-dimensional linear millimeter-wave array antenna through a multi-layered structural design integrated with AMC technology. The design process begins with theoretical analysis of the pattern multiplication principle and array factor characteristics, which identify 0.4-wavelength element spacing as an optimal balance between wide-angle scanning and directivity. A stacked three-layer antenna unit is then constructed, consisting of square patch radiators on the top layer, a cross-shaped coupling feed structure in the middle layer, and an AMC-loaded substrate at the bottom. The AMC provides in-phase reflection in the 21~30 GHz band, enhancing bandwidth and suppressing surface wave coupling. Full-wave simulations (HFSS) are performed to optimize AMC dimensions, feed networks, and array layout, confirming bandwidth of 23.7~28 GHz, peak gain of 13.9 dBi, and scanning capability of  $\pm 80^\circ$ . A prototype is fabricated using printed circuit board technology and evaluated with a vector network analyzer and anechoic chamber measurements. Experimental results agree closely with simulations, demonstrating an operational bandwidth of 23.3~27.7 GHz, isolation better than -15 dB, and scanning coverage up to  $\pm 80^\circ$ . These results indicate that the synergistic interaction between AMC-modulated radiation fields and the array coupling mechanism enables a favorable balance among wide bandwidth, high gain, and wide-angle scanning.

**Results and Discussions** The influence of array factor on directional performance is analyzed, and the maximum array factor is observed when the element spacing is between  $0.4\lambda$  and  $0.46\lambda$  (Fig. 2). The in-phase reflection of the AMC structure in the 21~30 GHz range significantly enhances antenna characteristics, broadening the bandwidth by 50% compared with designs without AMC and increasing the gain at 26 GHz by 1.5 dBi (Fig. 10, Fig. 13). The operational bandwidth of 23.3~27.7 GHz is confirmed by measurements (Fig. 16a). When the element spacing is optimized to 4.6 mm ( $0.4\lambda$ ) and the coupling radiation mechanisms are adjusted, the H-plane half-power beamwidth (HPBW) of the array elements is extended to  $180^\circ$  (Fig. 8, Fig. 9), with a further gain improvement of 0.6 dBi at the scanning edges (Fig. 11b). The three-layer stacked structure—comprising the radiation, isolation, and AMC layers—achieves isolation better than -15 dB (Fig. 16a). Experimental validation demonstrates wide-angle scanning capability up to  $\pm 80^\circ$ , showing close agreement between simulated and measured results (Fig. 11, Fig. 16b). The proposed antenna is therefore established as a compact, high-performance solution for 5G millimeter-wave terminals, offering wide bandwidth, high gain, and broad scanning coverage.

**Conclusions** A one-dimensional linear wide-angle scanning array antenna based on an AMC structure is presented for 5G millimeter-wave applications. Through theoretical analysis, simulation optimization, and experimental validation, balanced improvement in broadband operation, high gain, and wide-angle scanning is achieved. Pattern multiplication theory and array factor analysis are applied to determine 0.4-wavelength element spacing as the optimal compromise between scanning angle and directivity. A stacked three-layer configuration is adopted, and the AMC's in-phase reflection extends the bandwidth to 23.7~28.5 GHz, representing a 50% increase. Simulation and measurement confirm  $\pm 80^\circ$  scanning at 26 GHz with a peak gain of 13.8 dBi, which is 1.3 dBi higher than that of non-AMC designs. The close consistency between experimental and simulated results verifies the feasibility of the design, providing a compact and high-performance solution for millimeter-wave antennas in mobile communication and vehicular systems. Future research is expected to explore dual-polarization integration and adaptation to complex environments.

**Key words:** 5G millimeter-wave; AMC structure; Wide-angle scanning; High gain; Array antenna