

毫米波宽带波束赋形微带阵列天线设计

倪文俊

中国电子科技集团公司第五十一研究所，上海

收稿日期：2025年11月15日；录用日期：2025年12月17日；发布日期：2025年12月25日

摘要

本文设计了一款毫米波宽带波束赋形微带阵列天线，采用非接触式邻近电磁耦合馈电技术，有效扩展天线阵工作带宽，通过合理设计串联馈电网络，优化单元结构与馈电位置，实现波束赋形所需的激励幅度与相位分布。测试结果表明，本文设计的16单元微带天线阵工作带宽为76 GHz~81 GHz，波束赋形性能良好，副瓣电平优于-18 dB。

关键词

毫米波，宽带，波束赋形，邻近耦合馈电，微带阵列

Design of a Millimeter-Wave Broadband Beamforming Microstrip Array Antenna

Wenjun Ni

51st Research Institute of CETC, Shanghai

Received: November 15, 2025; accepted: December 17, 2025; published: December 25, 2025

Abstract

This paper presents a millimeter-wave broadband beamforming microstrip array antenna. By employing a non-contact proximity-coupled electromagnetic feeding technique, the operating bandwidth of the antenna array is effectively expanded. Through rational design of a series feeding network and optimization of the unit structure and feeding positions, the excitation amplitude and phase distribution required for beamforming are achieved. Test results demonstrate that the designed 16-element microstrip antenna array operates in the frequency band of 76~81 GHz, with excellent beamforming performance and a sidelobe level better than -18 dB.

Keywords**Millimeter-Wave, Broadband, Beamforming, Proximity Coupled Feed, Microstrip Array**

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

毫米波微带天线阵因其体积小、重量轻、低剖面等结构优势，易于与载体表面共形安装，同时具备多极化、多频段等灵活的电气性能。该类型天线适合采用印刷电路技术进行大规模制造，具有成本低、一致性高的特点，并能与有源器件实现高效集成，支持全平面化收发前端模块的开发。因此，毫米波微带天线阵在雷达、通信导航及精确制导等领域已获得广泛应用[1] [2]。

随着印制板工艺水平的持续提升以及新材料、新技术的不断引入，毫米波微带天线应用范围持续扩展。在此背景下，发展高增益、高集成度的微带天线技术具有重要的工程价值[3]-[5]。

毫米波雷达系统对天线宽带性能和波束赋形能力不断提升的要求，微带阵列天线成为毫米波频段的理想选择之一。然而，传统串联馈电阵列虽结构紧凑却常受限于带宽窄的问题，而并联馈电网络又存在结构复杂、损耗较大、不便布阵等挑战[6]。

为解决上述矛盾，本文运用邻近耦合馈电技术，提出一种串联馈电微带阵列天线设计。邻近耦合通过非接触式电磁耦合扩展阻抗匹配带宽，而串联馈电网络则保障了阵列的低损耗与高空间效率。通过理论分析优化单元结构与馈电位置，实现波束赋形所需的激励幅度与相位分布。

天线实测结果与仿真数据吻合良好，验证了天线在毫米波频段的宽带特性与赋形波束性能，表明该设计在满足宽带需求的同时，可实现较好的波束赋形控制。

2. 宽带赋形微带阵列天线设计**2.1. 邻近耦合馈电的基本原理**

邻近耦合馈电(Proximity Coupled Feed)是一种重要的非接触式馈电技术，其基本结构由多层介质板构成：顶层为辐射贴片，中间层为微带馈线，底层为接地板。这种馈电方式通过电磁耦合效应实现能量从馈线到辐射贴片的传输，避免了直接接触带来的带宽限制。与探针馈电和微带线边馈相比，邻近耦合馈电展示了显著的带宽优势，其典型阻抗带宽可达 8%以上，高于传统馈电方式的 2%~5%。图 1 即为本文采用的邻近耦合贴片天线二单元结构图。

从等效电路角度分析，邻近耦合馈电单元可以建模为一种串联谐振电路。其中，辐射贴片等效为并联 RLC 谐振电路，邻近耦合缝隙等效为串联电容，而微带馈线则等效为传输线模型。基于传输线理论，终端开路的微带线输入阻抗可表示为：

$$Z_{in}(z) = -jZ_0 \cot(\beta z) \quad (1)$$

式中， Z_0 为微带线特性阻抗， $\beta = 2\pi/\lambda_g$ 为相位常数， λ_g 为介质波长， z 为距开路端的距离。当辐射贴片位于微带线电流波腹点时，对应阻抗极小点，形成串联谐振。此时，天线单元呈现纯阻性，实现最佳阻抗匹配。

邻近耦合馈电的带宽增强机制主要源于：与传统的串馈微带贴片天线单元相比，减小了传输线与辐射单元之间的非线性干扰，可以拓展工作带宽[7]-[11]。

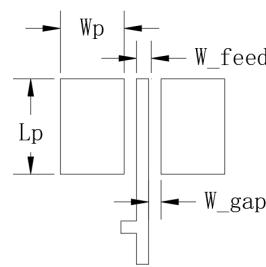


Figure 1. Structure of two-element proximity coupled feed patch antenna
图 1. 邻近耦合贴片天线二单元结构

2.2. 串联馈电的理论基础与阵列分析

串联馈电是一种空间效率高的阵列馈电方式，其基本拓扑结构是辐射单元沿单根微带传输线依次排列，每个单元通过耦合机制从主馈线获取能量。与并联馈电网络相比，串联馈电具有馈线短、损耗小和结构紧凑的优点，特别适合高集成度应用场景。

本文采用的是串联馈电谐振式(驻波)阵列，谐振式阵列中，单元间距为介质波长 λ_g 的整数倍(通常为 λ_g 或 $\lambda_g/2$)，馈线终端开路或短路形成驻波，所有阵元在同相点激励，产生边射方向图。这种阵列的优点是所有单元自然同相，对于串联馈电阵列，阵列因子(Array Factor)是分析其辐射特性的核心工具。对于等间距直线阵，阵列因子可表示为：

$$AF(\theta) = \sum_{n=1}^N I_n e^{j(n-1)kd \cos \theta} \quad (2)$$

其中， I_n 为第 n 个单元的激励幅度， $k = 2\pi/\lambda$ 为波数， d 为单元间距， θ 为偏离阵列法线的角度， N 为单元总数。在串联馈电中， I_n 由每个单元与馈线的耦合强度和贴片宽度共同决定，而相位则取决于单元在馈线上的位置。

2.3. 基于单元位置调控的波束赋形实现

波束赋形(Beamforming)是阵列天线的核心功能之一，指通过控制阵列中各单元的激励幅度和相位，形成特定形状的辐射波束。在串联馈电微带天线阵中，波束赋形主要通过两种机制实现：一是通过耦合强度、调整贴片宽度控制激励幅度；二是通过调整单元位置控制辐射相位。

在串联馈电阵列中，每个单元的激励相位主要由其在馈线上的位置决定。对于谐振式阵列，单元通常放置在驻波波腹点(电流最大点)，确保所有单元同相激励。然而，通过有意偏离这些同相点，可以引入期望的相位差，从而实现波束扫描或波束赋形。根据传输线理论，距离开路端位置 z 处的输入阻抗为 $Z_{in}(z) = -jZ_0 \cot(\beta z)$ ，相应的相位延迟为 $\phi(z) = \beta z$ 。因此，通过控制单元与馈线的耦合位置，可以精确控制其激励相位。

对于需要波束扫描的应用，单元位置调整提供了一种有效的实现途径。假设期望波束指向与阵列法线夹角为 θ_0 ，则相邻单元间需引入的相位差为：

$$\Delta\phi = kd \sin \theta_0 \quad (3)$$

其中 d 为单元间距。在串联馈电网络中，可以通过轻微调整每个单元的位置 z_n 来引入相应的相位偏移。第 n 个单元相对于标准位置的偏移量 Δz_n 与所需相位差的关系为：

$$\Delta\phi_n = \beta\Delta z_n = \frac{2\pi}{\lambda_g} \Delta z_n \quad (4)$$

这种方法的显著优点是无需复杂的移相器网络，通过物理布局的优化即可实现波束控制，可以实现复杂的波束赋形，如平顶波束或余割平方波束。

设天线工作频率为 f_0 ，印制板介质厚度为 h ，相对介电常数为 ϵ_r ，则矩形贴片单元的尺寸计算如下：

$$W_p = \frac{c}{2f_0} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + \frac{10h}{w} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{re} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{re} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad (7)$$

$$L_p = \frac{\lambda_e}{2} - 2\Delta L = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{re}}} - 2\Delta L \quad (8)$$

设计中考虑到表面波损耗、覆铜表面粗糙度等因素，选取印制板材料相对介电常数为 3.02，损耗角正切为 0.0013，厚度 $h = 0.127$ mm。根据中心频率 $f_0 = 78.5$ GHz，优化得微带贴片阵元的尺寸为： $W_p = 1.05$ mm， $L_p = 0.68$ mm， $W_{feed} = 0.3$ mm， $W_{gap} = 0.15$ mm。

经软件建模调试，天线单元仿真结果如图 2 所示。

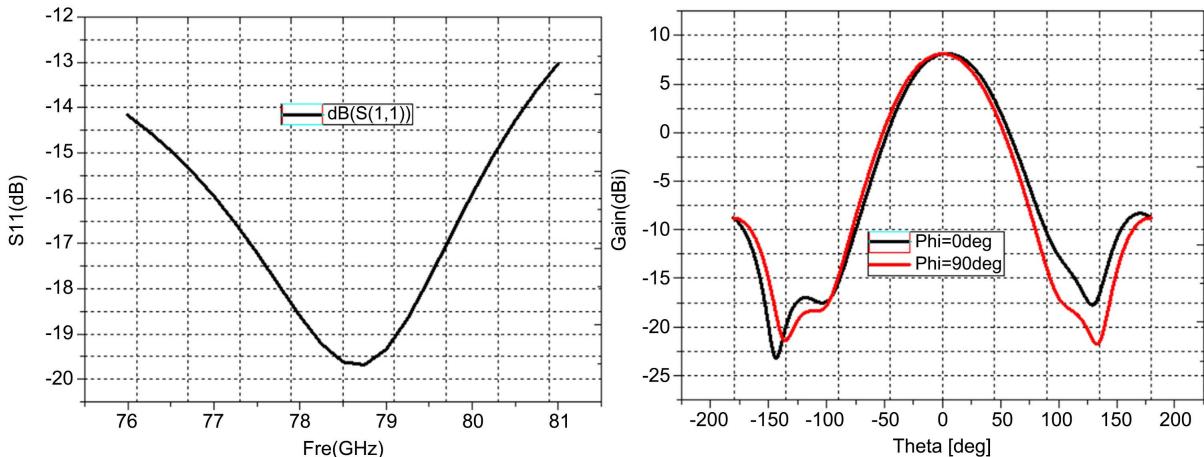


Figure 2. S_{11} & pattern of simulated two-element antenna (78.5 GHz)

图 2. 天线单元 S_{11} 与方向图仿真(78.5 GHz)

3. 天线阵列设计

3.1. 仿真设计

由于本设计为基于 77 GHz 雷达收发前端的微带阵列天线，要求雷达系统具有宽带、波束赋形特性。天线综合的方法很多，其中对离散线阵最常用的是泰勒综合法[12]。

本设计 16 元串馈天线阵列由宽度变化且谐振的天线阵元和高阻抗传输线构成。电磁波的辐射角度看：不同辐射强度的微带单元均工作在谐振状态，通过空间矢量合成，形成了一个加权谐振天线阵列；传输线理论角度看：通过高低传输阻抗变化，构成一个中心频率在 78.5 GHz、带宽为 76 GHz~81 GHz 带

通阻抗变换滤波器，实现波阻抗 377Ω 到发射系统 50Ω 阻抗的匹配。

本设计首先确定最大效率辐射天线单元的尺寸；然后设计可实现的天线因子设计；再利用功率-辐射电阻对应关系进行不同权系数谐振单元尺寸设计；最后天线因子进行组阵仿真优化。

为了减小串馈阵列天线副瓣电平，必须通过对天线阵元进行加权。本设计考虑主瓣展宽和副瓣抑制和实际的可实现性，贴片宽度 W_p 应大于馈线宽度的 2 倍，取最小天线宽 $W_{feed} = 0.19 \text{ mm}$ 。8 组单元可实现的副瓣电平 $SLL = -20 \text{ dB}$ ，具体分布如图 3 所示。

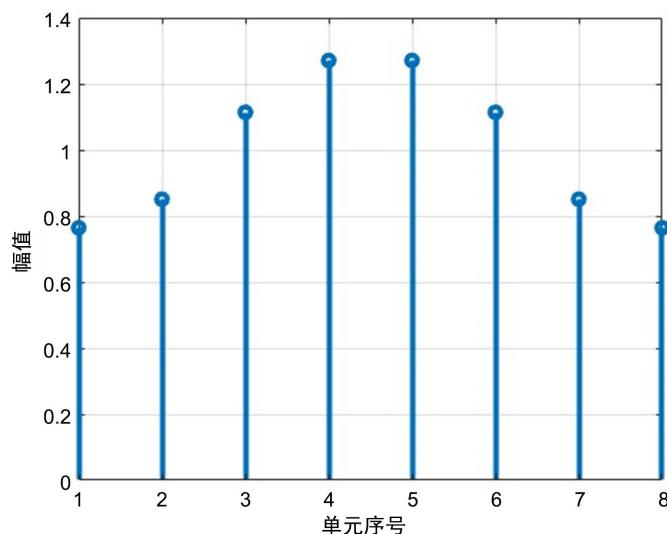


Figure 3. Weighting coefficient of $SLL = -20 \text{ dB}$
图 3. $SLL = -20 \text{ dB}$ 天线阵加权系数

在天线阵设计中，每个阵元的实际激励幅度主要由两个几何参数共同决定：辐射贴片宽度(W_p)：增加贴片宽度会增强其辐射能力，对应更大的激励幅度。邻近耦合距离(W_{gap} ，指馈线与贴片的间隙)：减小耦合距离可以增强能量耦合，从而提高激励幅度。最终，每个阵元的激励幅度是其自身宽度和与馈线耦合程度共同作用的结果，阵元激励相位与位置偏移量 Δz_n 直接相关，这为实现精确的幅相控制提供了灵活性。

基于全波仿真软件 HFSS，16 元(8 组)串馈天线阵仿真建模如图 4 所示。设置近场线观测阵元幅相特性，辐射贴片宽度(W_p)、邻近耦合距离 W_{gap} 、位置偏移量 Δz_n 对阵元幅相特性量化影响如图 5 所示。

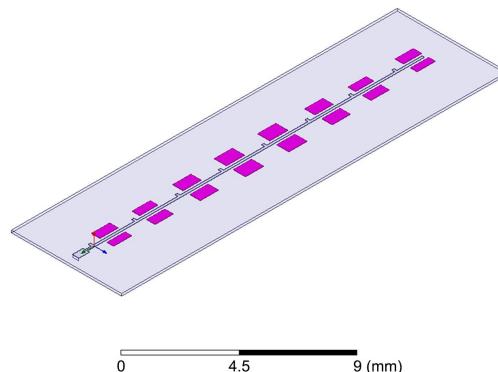


Figure 4. Simulation model of series-fed array antenna
图 4. 串馈阵列组阵仿真模型

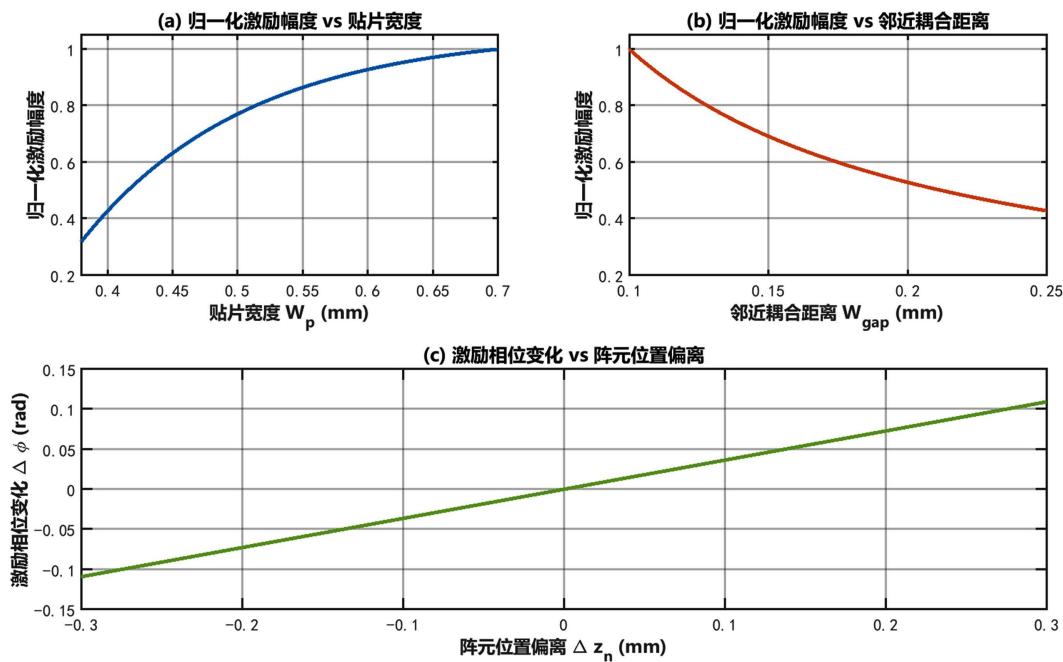


Figure 5. Relationships between element excitation amplitude-phase characteristics and key parameters
图 5. 阵元激励幅相特性与关键参数量化关系

幅度和相位的调整并非独立进行，而是在仿真软件中通过参数化分析进行协同优化，天线阵仿真流程如图 6。基于泰勒分布设计的 16 元微带天线阵仿真结果如图 7 所示，其主副瓣电平差达到-18 dB。

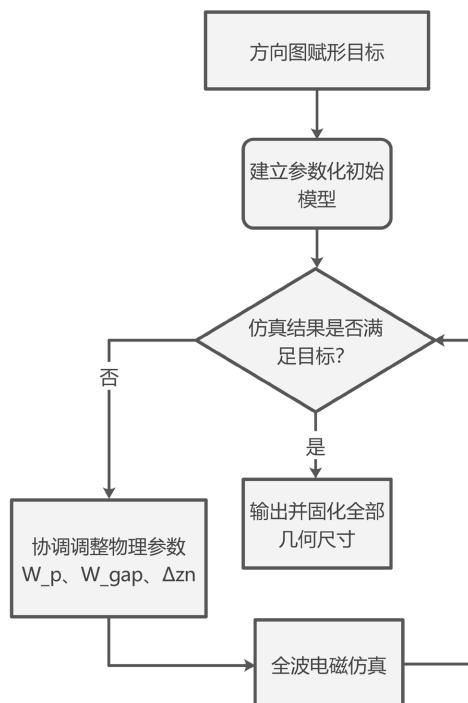


Figure 6. Antenna array simulation process
图 6. 天线阵仿真流程

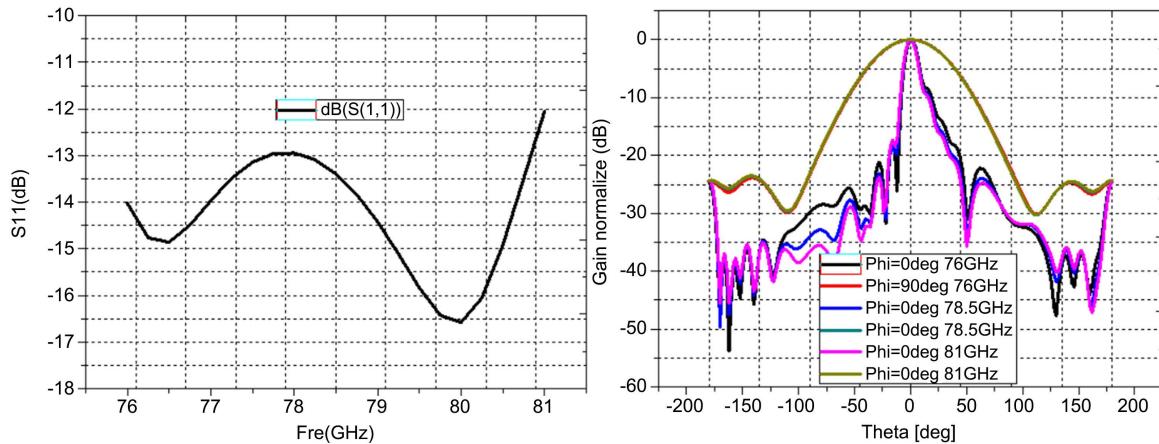


Figure 7. S_{11} & pattern of simulated Taylor linear array
图 7. 泰勒线性阵列 S_{11} 与方向图仿真

3.2. 实物制作与测试

本文设计的 16 元天线阵加工实物如图 8 所示，天线阵布置于毫米波雷达板上。天线阵在微波暗室中测试如图 9 所示。天线阵俯仰面波束赋形方向图、水平方向图测试结果与仿真结果对比如图 10、图 11 所示。

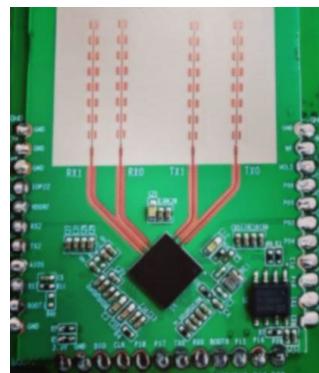


Figure 8. Manufactured antenna array
图 8. 天线阵实物



Figure 9. Antenna array under testing
图 9. 天线阵方向图测试

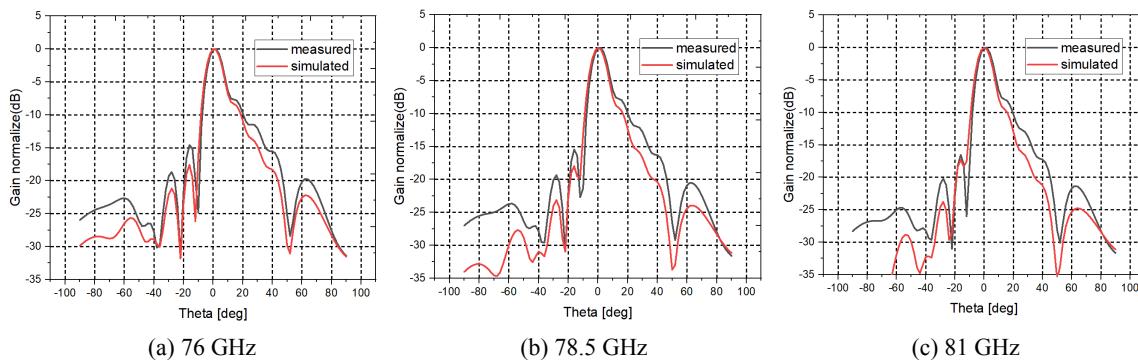


Figure 10. Comparison of measured & simulated results of antenna array elevation pattern

图 10. 天线阵俯仰面方向图测试结果与仿真结果对比

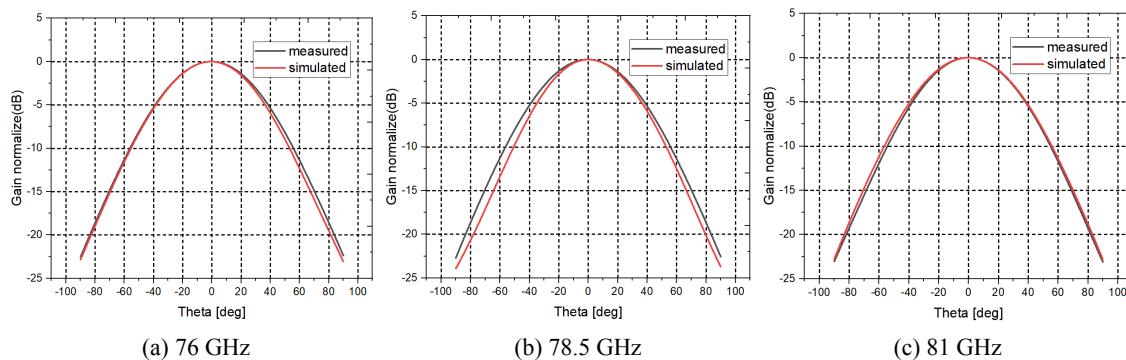


Figure 11. Comparison of measured & simulated results of antenna array azimuth pattern

图 11. 天线阵水平面方向图测试结果与仿真结果对比

由测试结果可知，本文设计的 16 元赋形微带阵列天线在 76 GHz~81 GHz 频段内，带内增益大于 15 dB，口径效率约为 72%，俯仰面、水平面方向图实测值与仿真值吻合良好，赋形设计达到预期效果。天线阵具有低副瓣特性，满足设计要求。

4. 结论

本文依据研制要求,设计的工作于毫米波频段的宽带赋形微带阵列天线,各项指标测试结果与仿真结果吻合良好。表明天线阵中串联馈电网络不仅可实现天线阵元激励幅度分布,还可有效实现天线阵波束赋形。该微带天线阵列的宽频带、波束赋形、低副瓣特性,能有效提高毫米波探测的距离分辨与抗干扰能力,具有较大的工程应用价值,可在汽车雷达、防撞雷达等领域广泛应用。

参考文献

- [1] 张钧, 刘克诚. 微带天线理论与工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
 - [2] Schoenlinner, B. and Rebeiz, G.M. (2002) Compact Multibeam Imaging Antenna for Automotive Radars. 2002 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Seattle, 2-7 June 2002, 1373-1376.
<https://doi.org/10.1109/mwsym.2002.1011925>
 - [3] David, M.P. and Daniel, H.S. (1995) Microstrip Antenna: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays. IEEE Press, 57-68.
 - [4] Humphrey, D., Richard, L. and Cojocaru, V. (2009) Planar Antenna Design for Long Range Radar Applications. 2009 IEEE 10th Annual Wireless and Microwave Technology Conference, Clearwater, 20-21 April 2009, 5-18.
<https://doi.org/10.1109/wamicon.2009.5207291>

-
- [5] Zhang, X.Y., Duan, W. and Pan, Y. (2017) Corrections to “High-Gain Filtering Patch Antenna without Extra Circuit”. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **65**, 6196-6196. <https://doi.org/10.1109/tap.2017.2755441>
 - [6] 陈绍军. 垂直极化串馈微带天线阵研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2023.
 - [7] 师曼. 宽带毫米波车载雷达天线阵列研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2020.
 - [8] Zhang, Y., Zhang, X.Y. and Pan, Y. (2017) Compact Single- and Dual-Band Filtering Patch Antenna Arrays Using Novel Feeding Scheme. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **65**, 4057-4066. <https://doi.org/10.1109/tap.2017.2717046>
 - [9] Ishfaq, M.K., Rahman, T.A., Yamada, Y. and Sakakibara, K. (2017) 8 × 8 Phased Series Fed Patch Antenna Array at 28 GHZ for 5G Mobile Base Station Antennas. 2017 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), Verona, 11-15 September 2017, 160-162. <https://doi.org/10.1109/apwc.2017.8062268>
 - [10] 冯丁舜. 一种小型化毫米波收/发天线阵设计与仿真[J]. 舰船电子对抗, 2020, 43(2): 95-97.
 - [11] 刘佳仔. 中远程一体化车载雷达天线阵列设计[J]. 压电与声光, 2024, 46(3): 399-403.
 - [12] 钟顺时. 微带天线理论与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1991.