

Y波段基于脊波导多模网络的多波束喇叭天线的研究

赵 芸*, 穆云希

(南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏南京 210044)

摘要: 为了使高频无线通信系统实现高效的信号覆盖与系统容量提升,多波束天线技术发挥着不可替代的作用。然而,现有主流方案存在显著瓶颈:传统巴特勒矩阵在高频下插入损耗大且结构复杂;透镜与反射面天线体积庞大,难以满足紧凑化需求;而传统基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)多模波束形成网络则受限于窄带宽与高介质损耗。针对上述挑战,本文提出一种工作于Y波段(170~260 GHz)的紧凑型宽带多波束喇叭天线,旨在克服现有技术局限,为亚毫米波通信提供一种低损耗、易加工且性能优异的解决方案。本文设计的天线结构主要由脊波导传输线、脊波导多模网络、周期槽移相器及喇叭天线4部分构成。为了突破传统多模波束形成网络带宽窄和旁瓣高的限制,引入单侧脊波导结构改变了波导内部的电磁场分布,电场高度集中于脊缝区域,这在等效电路中相当于增加了并联电容,降低了截止频率,从而显著拓宽了多模波束形成网络的工作频带。同时,采用周期槽移相器作为相位优化的关键组件。移相器加载于与多模波束形成网络输出端口6和7相连的波导中,结构上由多个从波导宽边向外凸出的矩形槽周期性排列组成。基于波导不连续点产生的相位延迟理论,通过调整特定端口的相位延迟,补偿了脊波导多模网络固有的相位偏差,使整体输出相位分布趋于平缓。仿真分析证实,该结构能有效抑制副瓣辐射并增强波束增益。对设计的天线进行制造与测试验证,天线整体采用铝合金材质,并通过高精度计算机数控(Computer Numerical Control, CNC)铣削工艺进行制备。为了减小装配误差,结构采用了H面分裂式加工,并预留适量定位销孔以确保腔体精确对准。测试结果表明,设计的天线在175~225 GHz频率范围内实现了25%的相对阻抗带宽,4个馈电端口的反射系数均低于-10 dB,且端口隔离度良好。在辐射性能方面,测得的4个波束最大覆盖 $\pm 30^\circ$ 的波束扫描范围。在工作频段内,天线实现了最大增益超过15.6 dBi且增益波动小于3 dB的宽带辐射特性,且口径效率保持在48%以上。

关键词: 亚毫米波;Y波段;多波束天线;脊波导多模网络;宽带天线;波导移相器

基金项目: 国家自然科学基金(No.61801230)

中图分类号: TN822

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2026)01-0479-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20250632

Design of a Multi-Beam Horn Antenna Based on a Ridge Waveguide Multi-Mode Network in the Y-Band

ZHAO Yun*, MU Yunxi

(School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

Abstract: To achieve efficient signal coverage and system capacity enhancement in high-frequency wireless communication system, multi-beam antenna technology plays an irreplaceable role. The sub-millimeter wave band has become a key frontier for next-generation communication systems. However, existing mainstream solutions face significant bottlenecks: traditional Butler matrices suffer from high insertion loss and complex structures at high frequencies; lens and reflector antennas are bulky, making it difficult to meet compactness requirements; and traditional substrate integrated waveguide (SIW) multi-mode networks are limited by narrow bandwidths and high dielectric loss. Addressing these challenges, this paper proposes a compact broadband multi-beam horn antenna operating in the Y-band (170~260 GHz), aimed at overcoming existing technical limitations and providing a low-loss, easy-to-fabricate, and high-performance solution for sub-millimeter wave communications. The structure of the designed antenna consists of four parts: ridge-waveguide transmission lines, a ridge-waveguide multi-mode network, periodic slot phase shifters, and a horn antenna. To overcome the limitations of narrow bandwidth and high sidelobes in traditional multi-mode beamforming networks, single-ridged waveguide structure is introduced to alter the internal electromagnetic field distribution. The electric field is highly concentrated in the ridge region,

which acts as an added shunt capacitor in the equivalent circuit. Therefore, the cutoff frequency is lowered, significantly broadening the operating bandwidth of the multi-mode beamforming network. Additionally, periodic slot phase shifters are designed as key optimization components to the phase adjustment of the designed antenna. The phase shifters are loaded into the waveguides connected to the output ports 6 and 7 of the multi-mode network. The shifters consist of periodically arranged rectangular slots protruding outward from the waveguide's broad wall. Based on the theory of phase delay caused by waveguide discontinuities, the inherent phase deviation of the ridge waveguide multi-mode network is compensated, making the overall output phase distribution flatter. Simulation analysis confirms that the designed antenna obtains suppressed sidelobe radiation and enhanced beam gain. The designed antenna is fabricated and measured, the entire antenna is made with aluminum alloy with high-precision computer numerical control (CNC) milling method. To minimize assembly errors, the structure adopts an H-plane split-block design with alignment pin holes reserved to ensure precise cavity alignment. Measurement results show that the antenna achieves a 25% relative impedance bandwidth within the 175~225 GHz range, with reflection coefficients for all four feeding ports below -10 dB and great port isolation. The four synthesized beams cover a maximum scanning range of $\pm 30^\circ$. Within the operating band, the antenna achieves broadband radiation characteristics with a peak gain exceeding 15.6 dBi, a gain fluctuation of less than 3 dB, and an aperture efficiency maintained above 48%.

Keywords: sub-millimeter wave; Y-band; multi-beam antenna; ridged waveguide multi-mode network; broadband antenna; waveguide phase shifter

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.61801230)

0 引言

多波束天线具备多角度信号收发能力,通过增强空间覆盖率及系统容量,有效缓解了频谱资源紧缺问题^[1-2]。近年来,亚毫米波频段凭借丰富的频谱资源及应用潜力备受关注^[3]。作为6G通信的关键频段,它是实现Tbps级传输速率的核心。因此,具备紧凑结构与宽带特性的多波束天线,成为支撑6G海量连接、超低时延及沉浸式体验的理想方案,其战略地位日益凸显^[4-6]。

无源波束形成网络馈电的多波束天线,凭借低功耗与结构简单的优势,展现出良好的工程应用前景。此类天线主要分为电路型、透镜型和反射面型。在电路型网络中,巴特勒矩阵应用最广^[7-8],但其在高频段下的插入损耗较大,且因需集成大量耦合器、移相器及交叉器,导致结构过于复杂。透镜型多波束天线亦是常见方案。文献[9]提出了一种适用于250~290 GHz的均匀介质球形透镜天线,通过圆弧排列的辐射喇叭切换馈电实现多波束。然而,该类天线通常损耗偏大,且较大的物理体积与高精度制造需求限制了其集成化^[10-11]。此外,文献[12]利用三棱镜反射器和迭代衍射分析设计了一个工作于186 GHz的反射面天线,但反射面多波束天线^[13-14]在通过偏移焦平面馈源实现扫描时,易引入相位误差,从而导致副瓣电平显著恶化。

多模波束形成网络是一种基于电路的波束形成网络,相较于传统的无源网络,它不仅具备稳定的波束控制能力,还极大地降低了电路复杂性,并且结构简单,易于实现频段拓展。文献[15]基于多模波束形成网络设计了一种SIW多波束天线,工作频率为27~31 GHz,相对带宽为13.7%。由于多模波束形成

网络结构紧凑,因此辐射效率优于传统的巴特勒矩阵。文献[16]提出了一种非对称多模波束形成网络的SIW多波束天线,其电路尺寸仅为传统巴特勒矩阵的40%,工作频率为31~36 GHz,相对带宽为14.9%。文献[17]针对32.5 GHz频点设计了基于SIW的2×2和4×4多模波束形成网络的对跖费米线性渐变槽多波束天线,增益分别达到12.39 dBi和14.19 dBi。文献[18]通过双模激励的多模波束形成技术实现了双极化SIW多波束天线,工作频率为24~27 GHz,相对带宽为11.3%。然而,传统多模波束形成网络仍存在局限性:一是带宽有限,难以满足宽带应用需求;二是受限于SIW技术的介质损耗问题,不适用于更高频段的工作。这些因素制约了多模网络在高频领域的进一步发展。

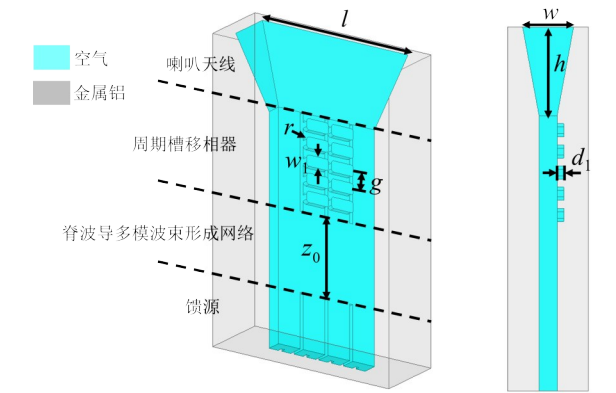
针对上述研究现状,本文提出一种工作于Y波段的全金属脊波导多模网络多波束天线。该天线具有宽频带、结构简单且高度紧凑等优点,波束最大可覆盖60°扇区。利用脊波导多模网络合成4个波束,通过引入脊结构以展宽阻抗带宽,并加载周期槽移相器优化脊波导多模网络输出端口处的相位分布,从而有效抑制波束副瓣。本文详细阐述了脊波导多模网络的设计思路,并完成了天线实物的加工与测试。仿真与实验结果对比验证了方案的可行性,为亚毫米波宽带多波束天线的设计提供了一种紧凑、易实现的解决方案。

1 天线设计

1.1 天线结构

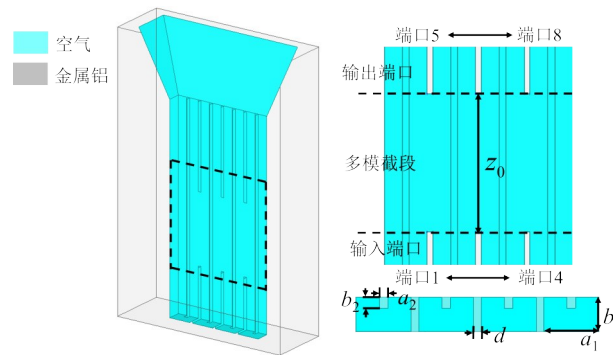
基于脊波导多模网络的多波束喇叭天线结构如图1所示,该天线由喇叭天线、周期槽移相器、脊波导

多模网络和波导馈源 4 部分组成。其中喇叭天线口径长度为 l 、宽度为 w 、高度为 h 。为了抑制副瓣水平,在脊波导多模网络输出端口处加载周期槽移相器。移相器由多个波导宽边向外凸出的间距为 g 的凸槽结构组成,槽深为 d_1 ,横向长度为 a ,纵向长度为 w_1 。为便于数控加工,将所有槽进行倒角处理,倒角半径为 r 。用以合成 4 个不同指向波束的脊波导多模网络,其宽度与 4 个输入和输出波导的整体宽度相匹配,每个波导宽均为 a_1 、高为 b 、多模截段的长度为 z_0 、相邻波导之间的壁厚为 d ,波导脊的宽和高为 a_2 、 b_2 ,脊波导多模网络的高度与 WR5.1 标准波导相同,均为 b 。



(a) 天线正面 3D 图与侧视图

(a) The 3D view and side view of the antenna



(b) 天线背面 3D 图及脊波导多模网络

(b) The bottom view of the antenna and the structure of the ridge-waveguide multi-mode network

($l=5.88$ mm, $w=1.56$ mm, $h=2.7$ mm, $g=0.64$ mm, $w_1=0.4$ mm, $r=0.1$ mm, $d_1=0.2$ mm, $a_1=0.88$ mm, $b=0.648$ mm, $d=0.13$ mm, $z_0=2.84$ mm, $a_2=0.14$ mm, $b_2=0.17$ mm)

图 1 天线结构示意图

Figure 1 The structure of the designed antenna

1.2 脊波导多模网络的分析

脊波导多模网络是在传统多模波束形成网络的基础上进行改进,以匹配喇叭天线的宽带工作特性。

因此,本文从传统多模波束形成网络面临的两个问题入手分析:其一,传统多模波束形成网络带宽较窄导致喇叭天线宽带应用受限;其二,传统多模波束形成网络输出端相位分布导致辐射方向图副瓣电平较高。这两个问题是传统多模波束形成网络亟待解决的问题。矩形波导具有低损耗、易制造和高可靠性等优点,是高频段传输线路与组件的常用结构。本文通过在传统多模波束形成网络引入单侧波导脊,构建了单侧脊波导多模网络。该网络由输入端口、多模截段及输出端口组成。如图 1(b)所示,多模截段负责实现相位变换,其长度 z_0 是决定网络性能的关键参数。由于 z_0 与各模式的截止频率密切相关,波束形成网络的性能对 z_0 的变化具有高度敏感性。文献[13]给出了用来近似确定多模截段初始长度 z_0 的方法,即

$$\beta_n z_0 - b_n = 2m\pi, n = 1, 2, \dots, N, m = 0, 1, \dots, M \quad (1)$$

脊波导多模网络激发了 4 种模式(包括 $TE_{10} \sim TE_{40}$),其中 β_n 和 b_n 分别为不同端口所激励的模式对应的传播常数和特征函数的值。一般来说,此方程没有精确解,但可以用另一种简单方法,通过使端口间的计算不确定性造成的理论误差 ε_n 相差尽可能小,从而确定 z_0 ,即

$$\varepsilon_n = |\beta_n z_0 - b_n - 2m\pi| \quad (2)$$

脊波导中不同模态的截止频率与脊^[19-20]的相对大小有着复杂的关系,使用本征模的数值方法来模拟多模截段中不同模式对应的传播常数,进而获得随着 z_0 变化的误差值^[15]。如图 2 所示, z_0 的最佳取值范围在端口 1~4 的理论误差相差相对最小时的黄色阴影区域(2.7~2.87 mm),相邻端口间的理论误差相差皆小于 0.4。最终经过仿真软件优化后,多模截段的长度 z_0 确定为 2.84 mm。

脊波导多模网络的带宽拓展通过在矩形波导宽

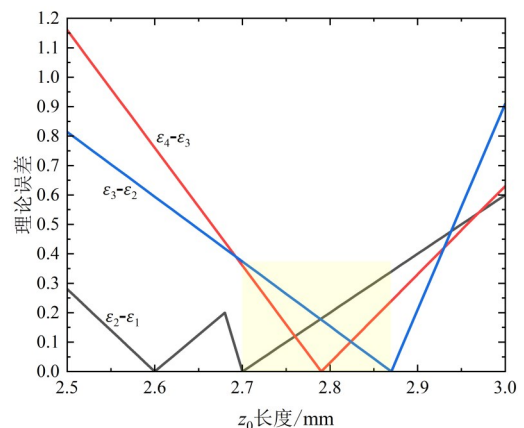


图 2 端口间理论误差差值随多模截段长度的变化

Figure 2 Theoretical error difference between ports varies with the length of the multi-mode section segment

边中心引入内凹脊结构实现。该结构改变了波导内部的电磁场分布:从等效电路角度看,波导脊的引入等效于增加了并联电容。由于电场线高度集中于脊缝区域,类似于平行板电容器极板间距减小的情形,这种等效电容的增加使主模的截止波长增大(即截止频率降低),从而有效拓宽了多模波束形成网络的工作频带。图3为脊的高度与脊波导多模波束形成网络回波损耗的关系,图中只用一条曲线代表端口1和4的回波损耗(端口2和3同理),其中波导脊的高 b_2 对脊波导多模网络的回波损耗有一定影响,当 b_2 为0.17 mm时波束形成网络的 $S_{11}\sim S_{44}$ 在工作频段内普遍低于-10 dB。

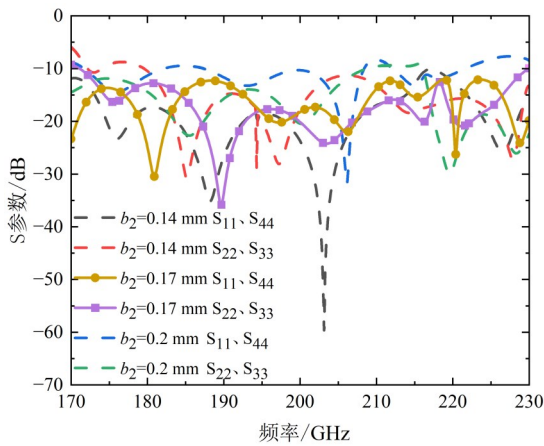


图3 不同脊高 b_2 对应的脊波导多模网络回波损耗对比图

Figure 3 Comparison of S parameters of multi-mode waveguide network with different b_2

1.3 副瓣抑制的分析

尽管脊波导多模网络初始的信号幅值分配较好,但其相位分布仍需进一步优化。由于该网络无法提供喇叭天线所需的平缓相位分布,会导致副瓣电平不理想。为了获得相位变化平缓的相位分布,在与多模网络输出端口6和7相连的波导中加载了周期槽移相器,以实现相应的相位补偿。对于波导移相器,已经有许多关于波导移相器的工作报道,如不等长等高等宽的延迟线波导移相器^[21]、等长等宽等高的间隙波导移相器^[22]和等长等高不等宽波导移相器^[23]、等长不等高不等宽波导移相器^[24]的自补偿波导移相器。本文通过在多模网络输出端加载周期性凸槽来构建移相器。其原理基于波导不连续点产生的相位延迟理论^[23]。如图1(a)所示,这种等长等宽不等高的移相结构是文献[25]中周期槽矩形波导段的一种特殊简化形式,能有效调整端口6与7的输出相位。

以天线工作频率在200 GHz为例,图4展示了周期槽移相器对脊波导多模网络输出端口相位分布的

影响。图中相位数据已进行归一化处理,各曲线的起始相位均设为 0° 。黄色阴影区域表示加载了移相器的输出端口6和7所在位置。

图4下方展示了加载移相器对脊波导多模网络输出端口相位分布的改善效果,若相位分布更平缓,会使得辐射方向图副瓣电平性能优异。从图中可以看出,加载移相器后,端口1馈电时的副瓣电平增大了1.1 dB,增益提升了0.2 dB,端口2馈电时的副瓣电平则增大了3.2 dB,增益提升了0.7 dB。验证了移相器对改善脊波导多模网络输出端口相位分布的影响,从而改善天线的波束辐射性能。其余频点的波束辐射性能也同样得到改善。

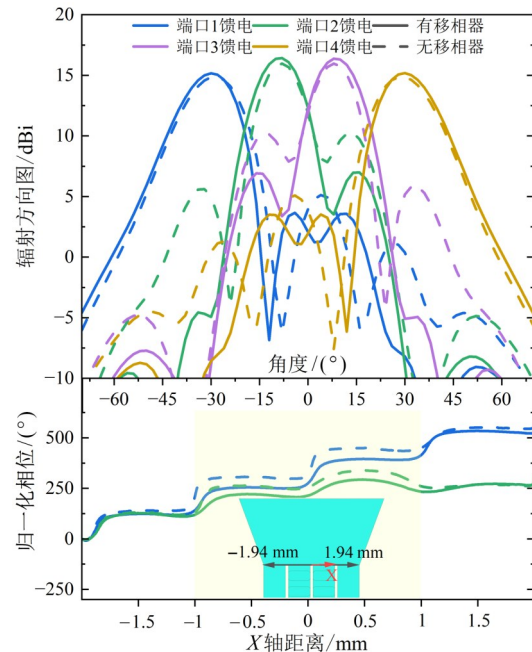
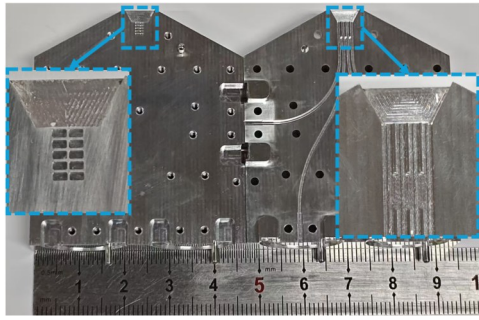


图4 200 GHz处周期槽移相器对脊波导多模网络输出端口相位分布及天线辐射特性的影响仿真分析

Figure 4 Simulation analysis of the phase distribution of the periodic slot phase shifter at output port of the ridge-waveguide multi-mode network at 200 GHz

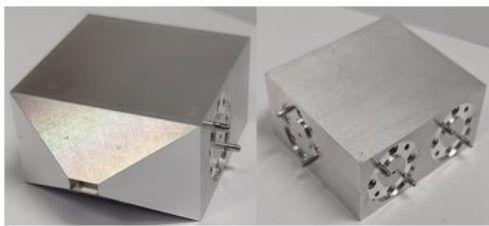
2 测试结果与分析

天线的设计与优化基于商业高频电磁仿真软件HFSS完成,通过仿真对天线的阻抗带宽和辐射性能进行了优化。天线加工实物如图5所示,采用铝合金材质,腔体通过CNC铣削加工而成。为减小装配偏差对天线性能的影响,结构采用了H面分裂式设计,铝块上预留了适量的定位销孔与螺纹孔,以确保最终装配时两个分裂块之间的精确对准与紧固。此外,天线各输入端口均加装了标准UG-387法兰用于测试连接。装配后的天线最终尺寸为 $54.5\text{ mm} \times 47.5\text{ mm} \times 20.648\text{ mm}$ 。该模块集成了UG-387法兰、波导馈线以及WR5.1标准



(a) 天线实物拆分图

(a) The physical disassembly diagram of the fabricated antenna



(b) 天线实物拼装图

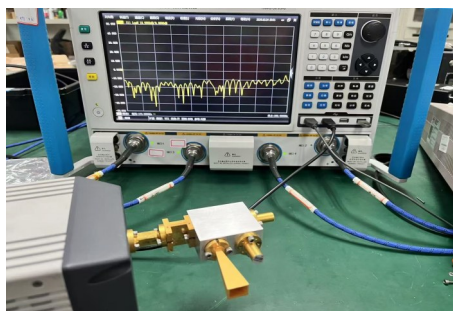
(b) The physical disassembly diagram of the fabricated antenna

图 5 天线实物图

Figure 5 The photo of the fabricated antenna

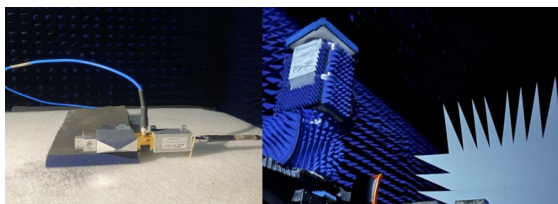
波导之间的过渡结构,4个相邻的馈电端口被分别引出,并利用阶梯结构实现阻抗匹配。

如图 6(a)所示,使用带有频率扩展模块的矢量



(a) S参数测试环境图

(a) The test environment of S parameters



(b) 天线暗室测量环境图

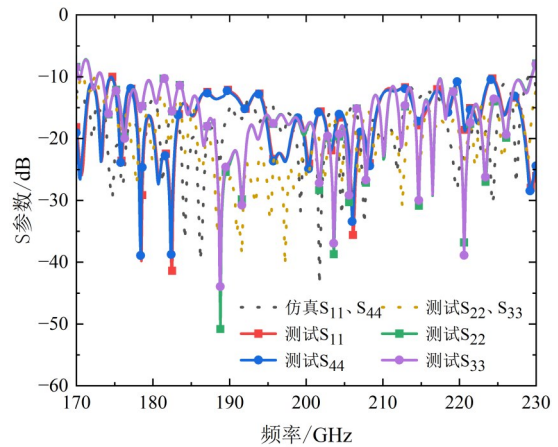
(b) The measurement chamber environment of the designed antenna

图 6 天线测量环境

Figure 6 The measurement environment of the designed antenna

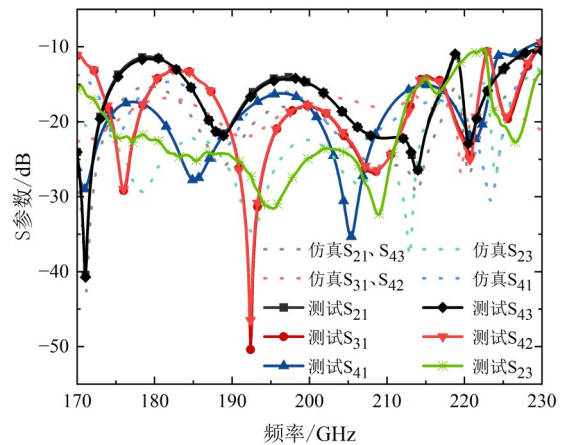
网络分析仪对天线的S参数进行了测量。天线的增益特性及辐射方向图测试在微波暗室的远场测试暗室中完成,具体的测试环境布局如图6(b)所示。图7展示了4个端口的仿真与实测回波损耗及端口隔离度曲线。测试结果表明,在目标带宽内,仿真与测试得到的各端口隔离度均普遍优于-10 dB。在回波损耗方面,仿真结果显示的阻抗带宽为170~230 GHz ($S_{11}\sim S_{44}<-10\text{ dB}$),而实测阻抗带宽为174~227 GHz。实测曲线与仿真结果虽存在细微偏差,但整体变化趋势吻合良好。这些偏差主要归因于天线加工过程中的制造公差、高频段下材料介电参数的实际值与仿真模型间的差异,以及测试电缆、连接器损耗及测试环境非理想性所带来的系统误差。

天线在175 GHz、190 GHz、210 GHz和225 GHz频



(a) $S_{11}\sim S_{44}$ 仿真和测试结果

(a) The simulated and measured results of $S_{11}\sim S_{44}$



(b) 端口隔离度仿真和测试结果

(b) The simulated and measured results of isolation of the ports

图 7 天线S参数仿真和测试结果

Figure 7 The simulated and measured results of S parameters of the designed antenna

点处的方向图如图 8 所示。由图可知,实测方向图与仿真结果基本吻合,但在波束指向角和波束宽度上略有差异。这可能是由于测试过程中发射天线与待测天线的轴线未完全对齐,以及加工精度公差等因素导致的。在 175 GHz 处,端口 1~4 的波束指向分别为 -30° 、 -8.1° 、 8° 及 29.6° ,此时天线的波束覆盖范围为 $\pm 30^\circ$ 。当工作频率为 190 GHz 和 210 GHz 时,端口 1~4 的实测波束指向分别为 $(-29^\circ, -8.3^\circ, 8.1^\circ, 28.8^\circ)$ 与 $(-28.7^\circ, -8.3^\circ, 8.1^\circ, 28.4^\circ)$,对应的波束覆盖范围分别为 $\pm 28.7^\circ$ 和 $\pm 28.4^\circ$ 。由此可见,随着频率升高,多波束天线的覆盖范围逐渐缩小,且副瓣电平有所升高。在 225 GHz 处,天线的波束覆盖范围为 $\pm 28^\circ$,副瓣电平为 11.4 dB。

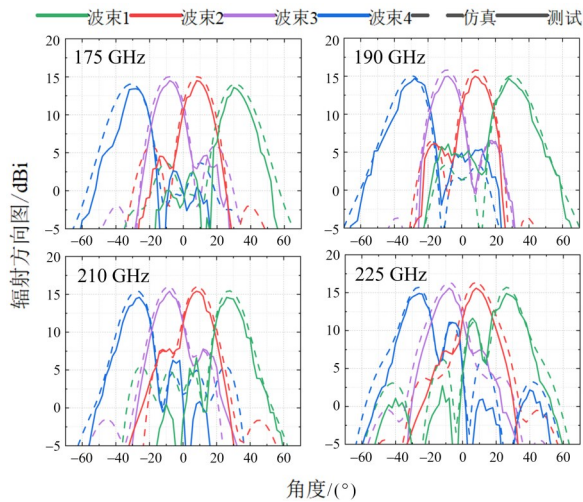


图 8 天线方向图仿真与测试结果

Figure 8 The simulated and measured results of radiation patterns of the designed antenna

图 9 给出了天线的峰值增益及口径效率随频率变化的曲线。由图可知,在 175~225 GHz 频段内,天线的峰值增益均大于 14 dBi。在整个工作频段内,喇

叭天线的口径效率均超过 48%。效率损失可能归因于副瓣辐射以及表面制造公差所引起的额外相位误差。

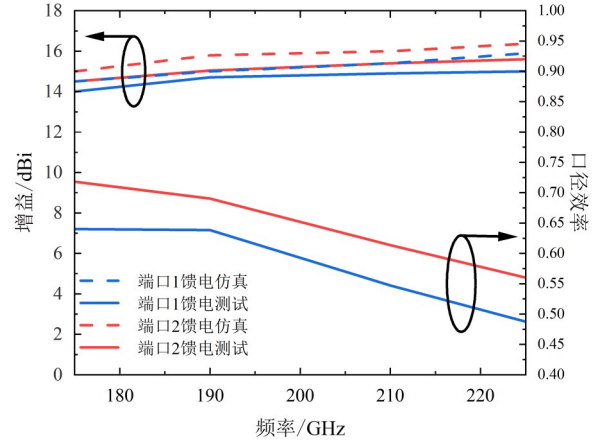


图 9 天线增益和口径效率仿真与测试结果

Figure 9 The simulated and measured results of gain and aperture efficiency of the designed antenna

将本文所提出的天线与部分已发表的多波束天线进行性能比较,结果展示如表 1 所示。文献[9]和文献[8]中设计的天线具有高的增益和较宽的波束扫描角度,但天线带宽较窄。文献[12]和文献[14]中讨论的天线具有较高的增益,但是波束扫描角度有限并且带宽较窄,尤其文献[12]中的天线只工作在单频点。这 4 篇文献中天线的波束形成网络基于透镜结构或者基于反射器结构,对天线的集成化带来了极大的难度。本文提出的基于脊波导多模网络的多波束喇叭天线相较于文献[18]使用的传统多模波束形成网络的多波束天线,保证波束扫描角度的同时大幅拓宽了天线的带宽,并且维持较为良好的增益水平。总体而言,本文提出的天线能实现更宽的带宽和更高的集成度,同时还能保持优异的辐射性能,适用于亚毫米波通信。

表 1 本文设计的天线与参考文献中多波束天线的性能对比

Table 1 The comparison of the designed antenna with the reported antennas with multi beams

参考文献	波束形成网络种类	工作频率/相对带宽	波束扫描角度	增益	集成度
文献[8]	巴特勒矩阵	99~101 GHz/0.02%	$\pm 26^\circ$	14.5 dBi	中等
文献[9]	球面介质透镜	210~230 GHz /9.1%	$\pm 45^\circ$	47.64 dBi	低
文献[10]	龙勃透镜	320~390 GHz /19.7%	$\pm 60^\circ$	20.8 dBi	低
文献[12]	三棱镜反射器	186 GHz / —	13.5°	35 dBi	低
文献[14]	多反射面结构	76~86 GHz /12.3%	$\pm 13^\circ$	25.7 dBi	低
文献[18]	多模波束形成网络	24~27 GHz /11.3%	$\pm 30^\circ$	9 dBi	高
本文	脊波导多模网络	175~225 GHz /25%	$\pm 28^\circ$	15.6 dBi	高

3 结论

本文提出了一种基于脊波导多模网络的Y波段多波束喇叭天线。相比传统结构,脊波导多模网络能有效拓宽阻抗带宽,同时通过引入周期槽移相器优化输出端口相位分布,显著降低了天线辐射方向图的副瓣电平。实测结果表明,在175~225 GHz频段内,天线反射系数低于-10 dB,阻抗匹配良好。波束扫描范围最大覆盖 $\pm 30^\circ$,最大增益达15.6 dBi。该天线结构紧凑、加工简便,具有拓展至太赫兹频段的潜力。此外,该天线既可独立使用,也可作为子阵列,配合相关协议与算法,能够有效满足高频多通道通信的应用需求。

参考文献

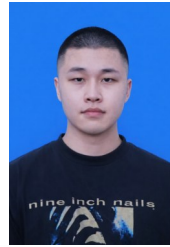
- [1] Hong Wei, Jiang Zhihao, Yu Chao, et al. Multibeam antenna technologies for 5G wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(12): 6231-6249.
- [2] 张思雅, 柴蓉, 梁承超, 等. 基于成本函数优化的多波束卫星通信系统波束调度及资源分配算法[J]. *电子学报*, 2025, 53(4): 1232-1240.
Zhang Siya, Chai Rong, Liang Chengchao, et al. Cost function optimization-based beam scheduling and resource allocation algorithm for multibeam satellite communication systems[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2025, 53(4): 1232-1240. (in Chinese)
- [3] Song H J, Nagatsuma T. Present and future of terahertz communications[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, 1(1): 256-263.
- [4] Guo Y J, Ansari M, Ziolkowski R W, et al. Quasi-optical multi-beam antenna technologies for B5G and 6G mmWave and THz networks: A review[J]. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2021, 2: 807-830.
- [5] Rappaport T S, Xing Yunchou, Kanhere O, et al. Wireless communications and applications above 100 GHz: Opportunities and challenges for 6G and beyond[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 78729-78757.
- [6] 王俊, 王承祥, 冯瑞, 等. 6G太赫兹信道测量与建模: 进展与挑战[J]. *电子学报*, 2025, 53(6): 2118-2130.
Wang Jun, Wang Chengxiang, Feng Rui, et al. 6G terahertz channel measurements and modeling: Recent developments and future challenges[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2025, 53(6): 2118-2130. (in Chinese)
- [7] Han Kangkang, Wei Gao, Lei Siyuan, et al. Design of broadband 9×9 butler matrix and its extension for multi-beam application[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2023, 70(8): 2874-2878.
- [8] Wang Dongxu, Xu Kaida, Cao Yuanxi, et al. A butler matrix-based multibeam W-band slot antenna array fabricated by metal additive manufacturing technology[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(6): 5349-5354.
- [9] Sugimoto Y, Tsuchida T, Takada S, et al. Homogeneous dielectric multibeam spherical lens antenna with high crossover gain for wide-angle coverage in the 270 GHz band[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2025, 73(9): 6289-6299.
- [10] Headland D, Withayachumnankul W, Yamada R, et al. Terahertz multi-beam antenna using photonic crystal waveguide and Luneburg lens[J]. *APL Photonics*, 2018, 3(12): 126105.
- [11] Jain R, Hillger P, Ashna E, et al. A 64-pixel 0.42-THz source SoC with spatial modulation diversity for computational imaging[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2020, 55(12): 3281-3293.
- [12] Hay S G, Smith S L, Timms G P, et al. Three-shaped-reflector beam-scanning pillbox antenna suitable for mm wavelengths[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59(7): 2495-2501.
- [13] Ettorre M, Sauleau R, Le Coq L. Multi-beam multi-layer leaky-wave SIW pillbox antenna for millimeter-wave applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59(4): 1093-1100.
- [14] Potelon T, Ettorre M, Bateman T, et al. Broadband passive two-feed-per-beam pillbox architecture for high beam crossover level[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(1): 575-580.
- [15] Cheng Yujian, Hong Wei, Wu Ke. Design of a multimode beamforming network based on the scattering matrix analysis[J]. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2009, 52(7): 1258-1265.
- [16] Cheng Yujian, Fan Yong. Millimeter-wave miniaturized substrate integrated multibeam antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59(12): 4840-4844.
- [17] Gupta S, Akbari M, Sebak A. SIW beamforming of 2×2 and 4×4 AFLTSA arrays for MMW applications[C]// 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE, 2016: 807-808.
- [18] Wu Qi, Hirokawa J, Yin Jiexi, et al. Millimeter-wave multibeam endfire dual-circularly polarized antenna array for 5G wireless applications[J]. *IEEE Transactions on Anten-*

- nas and Propagation, 2018, 66(9): 4930-4935.
- [19] Cohn S B. Properties of ridge wave guide[J]. Proceedings of the IRE, 1947, 35(8): 783-788.
- [20] Hopfer S. The design of ridged waveguides[J]. IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1955, 3(5): 20-29.
- [21] Sakr A A, Dyab W M, Wu Ke. A dually polarized six-port junction based on polarization-selective coupling for polarization-inclusive remote sensing[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(8): 3817-3827.
- [22] Shi Yongrong, Feng Wenjie, Qian Zhiyu, et al. Gap waveguide technology: An overview of millimeter-wave circuits based on gap waveguide technology using different fabrication technologies[J]. IEEE Microwave Magazine, 2023, 24(1): 62-73.
- [23] Cheng Yujian, Hong Wei, Wu Ke. Broadband self-compensating phase shifter combining delay line and equal-length unequal-width phaser[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(1): 203-210.
- [24] Deng Jie, Burasa P, Wu Ke. Compact 140–220 GHz E/H waveguide phase shifter and its application to terahertz multiport circuits[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2023, 13(5): 511-525.
- [25] Liu Zongqing, Liu Jiashan, Lu Hongda, et al. Terahertz broadband self-compensating waveguide phase shifter[C]// 2019 International Symposium on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE, 2019: 1-3.

作者简介



赵 芸 女, 1987年9月出生于江苏省扬州市。现为南京信息工程大学副教授、硕士生导师。主要研究方向为毫米波太赫兹天线理论与设计。
E-mail: zhyun_922@163.com



穆云希 男, 2001年1月出生于辽宁省辽阳市。现为南京信息工程大学硕士研究生。主要研究方向为天线理论与设计。
E-mail: muyunyi17@outlook.com