

宽带宽波束相控阵系统

张铎伦¹, 陈显舟^{2,3}, 杨 旭^{2,3}, 张志亚^{1*}

(1. 西安电子科技大学电子工程学院, 陕西西安 710071; 2. 中国空间技术研究院西安分院, 陕西西安 710100;
3. 空间微波通信全国重点实验室, 陕西西安 710100)

摘要: 具备宽频带与宽角度扫描能力的相控阵系统已成为电子战与宽带通信领域的关键设备。本研究设计并实现了一种宽带宽波束相控阵系统,旨在满足复杂环境下对宽频带波束展宽的设计需求,同时实现系统的小型化和轻量化。该系统采用 6×14 规模的阵列构型,以小型化的对数周期偶极子天线作为基本辐射单元,通过弯折偶极子振子臂延长电流路径,并结合介质基板挖孔技术,有效减小了天线单元的物理尺寸与整机重量,同时配合采用碳纤维地板进一步降低了系统重量。本文的核心创新在于构建了一种能够同时实现宽频带、宽波束的相控阵系统,通过在阵列中集成衰减器、移相器及延迟器,并结合波束赋形算法,在瞬时大带宽条件下实现了稳定的宽波束与精确的宽角度扫描,这一设计同时克服了紧耦合阵列方案中单元间互耦过大对有源驻波的影响,保障了系统在宽频带内的辐射稳定性。多通道T/R组件采用“瓦片式”结构提高了集成度,延迟器用于补偿移相器在不同频率下引入的相位差异,与移相器共同组成宽带波束控制网络,有效避免了传统相控阵在宽带宽角扫描时因移相器频率敏感性而产生的波束空间色散与波形时间色散问题。系统整机测试结果表明,该相控阵系统在0.8~2 GHz全频带内可稳定工作,在每500 MHz瞬时带宽内均可实现俯仰面 $\pm 20^\circ$ 和方位面 $\pm 40^\circ$ 的波束扫描能力,同时方位面波束宽度不小于 10° ,俯仰面波束宽度不小于 20° ,在宽频段内表现出稳定的宽波束性能。整体性能方面,系统在单元输入功率小于10 W的条件下,等效全向辐射功率大于41 dBW,且系统整体重量较传统设计显著降低。仿真与实测结果的一致性验证了设计的有效性,实测中波束指向稳定、副瓣电平可控,证明了该系统在复杂电磁环境下的工程实用性。此外,该系统在宽频带内维持了良好的辐射效率和稳定的增益特性,进一步验证了其在实际应用中的可靠性与适应性。本文研究的宽带宽波束相控阵系统在波束覆盖范围、瞬时带宽内的扫描稳定性与系统轻量化方面均表现出显著优势,为国内宽带阵列工程化应用提供了有效解决方案,且该设计思路有望应用于更高频段的通信与探测系统中。

关键词: 相控阵天线系统;有源;宽带天线;阵列天线;波束赋形;宽波束

基金项目: 国家自然科学基金(No.62271372)

中图分类号: TN82

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2026)02-0673-11

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

DOI: 10.12263/DZXB.20250952

Broadband Wide-Beamwidth Phased Array System

ZHANG Luolun¹, CHEN Xianzhou^{2,3}, YANG Xu^{2,3}, ZHANG Zhiya^{1*}

(1. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an, Shaanxi 710100, China;

3. National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, Xi'an, Shaanxi 710100, China)

Abstract: Phased array systems with wideband and wide-beam scanning capabilities have become critical equipment in the fields of electronic warfare and broadband communication. This study designs and implements a wideband and wide-beam phased array system, aiming to meet the design requirements for wideband beam broadening in complex environments while achieving system miniaturization and lightweight construction. The system adopts a 6×14 array configuration, utilizing miniaturized log-periodic dipole antennas as the basic radiating elements. By bending the dipole arms to extend the current path and combining this with dielectric substrate perforation techniques, the physical dimensions of the antenna elements and the overall system weight are effectively reduced. Additionally, the use of a carbon fiber ground plane further decreases the system weight. The core innovation of this paper lies in constructing a phased array system capable of simultaneously achieving wideband and wide-beam performance. By integrating attenuators, phase shifters, and true time delay lines within the array, combined with beamforming algorithms, stable wide beams and precise wide-angle scanning are achieved under instantaneous wide bandwidth conditions. This design simultaneously overcomes the impact of excessive mutual cou-

pling between elements on active standing wave ratio, which is a challenge in tightly coupled array solutions, thereby ensuring radiation stability across the wide frequency band. The multi-channel T/R modules adopt a “tile-type” structure to enhance integration density. The true time delay lines compensate for phase differences introduced by phase shifters at different frequencies, working together with the phase shifters to form a wideband beam steering network. This effectively avoids the problems of beam squint and signal dispersion that occur in traditional phased arrays during wideband and wide-angle scanning due to the frequency sensitivity of phase shifters. System-level test results demonstrate that the phased array system operates stably across the full 0.8~2 GHz band. Within every 500 MHz instantaneous bandwidth, it achieves beam scanning capabilities of $\pm 20^\circ$ in the elevation plane and $\pm 40^\circ$ in the azimuth plane. Concurrently, the azimuth beamwidth is no less than 10° , and the elevation beamwidth is no less than 20° , exhibiting stable wide-beam performance across the broad frequency range. Regarding radiation performance, with an element input power of less than 10 W, the system’s effective isotropic radiated power exceeds 41 dBW, and the overall system weight is significantly reduced compared to traditional designs. The consistency between simulated and measured results validates the design’s effectiveness. The measured stable beam pointing and controllable sidelobe levels confirm the system’s engineering practicality in complex electromagnetic environments. Furthermore, the system maintains good radiation efficiency and stable gain characteristics across the wide frequency band, further verifying its reliability and adaptability in practical applications. The wideband and wide-beam phased array system developed in this study demonstrates significant advantages in beam coverage range, scanning stability within instantaneous bandwidth, and system lightweighting. It provides an effective solution for the engineering application of wideband arrays domestically, and this design approach holds promise for application in communication and detection systems operating at higher frequency bands.

Keywords: phased array antenna system; active; broadband antenna; array antenna; beamforming; wide beamwidth

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62271372)

0 引言

随着军事尖端技术与科学技术的快速发展,具备卓越扫描能力的宽带阵列系统正日益成为焦点所在,引领着未来防御与探测技术的革新方向^[1-5]。另外,具备宽波束性能的阵列,不仅能够显著提升信号覆盖的广度和均匀性,确保在复杂环境中实现稳定且连续的通信与探测,同时还增强了系统的灵活性和适应性,为动态变化的应用场景提供了高效且可靠的解决方案,为最新的有源相控阵系统给出了更优解^[6-7]。

紧耦合阵列通过在连接偶极子之间引入电容耦合,抵消了地板反射带来的影响,从而拓宽了此类偶极子阵列带宽,这种电容耦合偶极子阵列逐渐发展起来。其后,文献[8]通过增加频率选择表面在6~13.35 GHz的频带内实现E面和H面均大于 60° 的扫描角;而文献[9]通过结合短路柱、电阻贴片等手段实现了10.2:1的带宽内小于3的驻波比,且可以在E面和H面扫描至 $\pm 70^\circ$ 。基于紧耦合阵列技术的发展,催生出多种阵列形式,如用于超宽带低副瓣的反射阵、具备透射功能的传输阵,以及具备动态波束调控能力的相控阵等^[10-12]。常用的宽带阵列 Vivaldi 阵列具备宽带宽、高增益等优势,被应用于各种场景,其设计通常也涉及紧耦合理论。

紧耦合天线在设计时可以实现较宽的工作带宽,但在针对一些波束赋形问题时由于耦合能量的影响,

单元的有源驻波无法保证。相应地,面对此类问题,单元间耦合不高的传统宽带阵列天线,如采用对数周期天线作为基本单元的方案可以作为更好的选择^[13-15]。目前,对数周期天线的小型化主要依赖于延长电流路径的弯折设计或采用高介电常数的介质基板^[16-17]。

在相控阵天线的设计中,通过精细调控衰减器的衰减参数与移相器的相位输出,可实现对波束形状的定制化调整,低副瓣、宽波束等性能均可按此方式实现^[18-19]。除了这种经典的基于移相器/衰减器的模拟调控方案,学界也在积极探索新的波束控制机制。例如,电子科技大学杨仕文教授团队^[20-21]基于时间调制(4-D)阵列,实现了波束的快速捷变与多波束合成。中山大学肖绍球教授团队^[22]则在宽带大角度扫描相控阵、模块化子阵综合^[23]等方面取得了重要进展。此外,东南大学洪伟教授团队^[24]在毫米波硅基相控阵集成技术方面的奠基性工作,也为高频段系统实现提供了关键支撑。然而,值得注意的是,移相器具有显著的频率敏感性,即在不同频率下施加相同相移会导致各异的时延效果,当宽带宽角扫描相控阵天线运行于高瞬时带宽与大扫描角的严苛条件下时,即便依据中心频率实施相位匹配,波束的指向亦会随频率波动而在预定扫描角域内发生偏移,此即波束空间色散现象,对波束指向的精确控制构成挑战。

本文创新性地采用对数周期天线作为宽带宽波束相控阵系统的基本天线单元,通过精巧的振子臂弯折设计,成功实现了天线单元的小型化,同时保持了宽频带特性。进一步地,本文集成了衰减器、移相器及延迟器等先进组件,结合波束赋形算法构建了一个高效的瞬时大带宽波束赋形与宽角扫描机制。加工和测试了该宽带宽波束相控阵系统,最终得到的阵列天线工作于 0.8~2 GHz,每 500 MHz 瞬时带宽内均可保证俯仰面 $\pm 20^\circ$ 和方位面 $\pm 40^\circ$ 的扫描能力,同时俯仰面和方位面的波束宽度分别不小于

20° 和 10° ,等效全向辐射功率(Effective Isotropic Radiated Power, EIRP)在单元输入功率小于 10 W 的情况下大于 41 dBw。

1 宽带宽波束相控阵系统总体设计

该宽带宽波束相控阵系统采用有源发射模式,根据后端信号生成的指向角度指令,完成信号发射及波束扫描。该阵列天线主要包括天线罩、宽带辐射阵面、发射组件、馈电网络、电源及波控单元、结构及热控部分,其原理框图如图 1 所示。

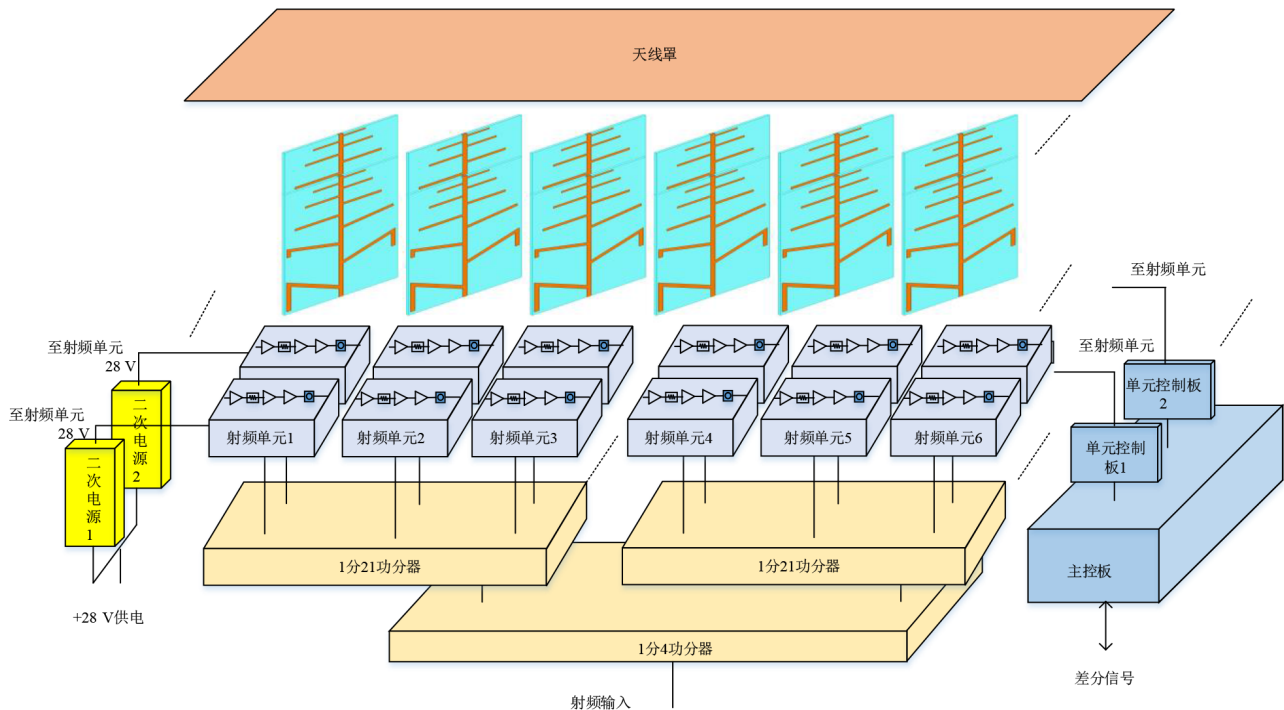


图 1 宽带宽波束相控阵系统组成框图

Figure 1 Block diagram of a wideband, wide-beam phased array system

在信号发射过程中,射频信号先后通过馈电网络中的 1 分 4 和 1 分 21 功分器分配至 84 个发射组件。每个发射组件内,信号首先经过数字衰减器和移相器,控制各单元的幅度和相位。随后,信号经过多级放大器放大后进入各宽带辐射单元,在空间中合成不同指向的波束。波控单元接收后端基带处理单元的指令,调整每个发射组件的幅相控制器。与此同时,电源单元将输入的直流电源转换为各控制电路和射频芯片所需的工作电压。

宽带宽波束相控阵天线阵面内部采用紧凑型快速插拔结构,各功能单元之间通过天线安装架固定及连接,各模块通过定位销与安装架进行精密定位。阵列天线侧面布置对外电气接口,用于电缆连接,同时两侧有风冷的进出口。整机结构爆炸图

如图 2 所示。

2 对数周期天线阵面设计

2.1 对数周期天线单元结构设计

为了使设计赋形波束时随所给幅相而变化的有源驻波不恶化太多,天线单元采用了对数周期天线的形式。但由于传统对数周期天线单元需要固定的半低频波长尺寸,未经小型化处理的对数周期天线单元在组阵时相互之间容易发生不必要的耦合,影响有源驻波乃至增益的结果。通过将振子臂末端分成两小段反向弯折,以实现最大程度的小型化,弯折前后振子臂的长度变化如图 3 所示。同时为了保障天线在带内的增益稳定,在 2.5 倍频内设计了 20 对振子。最终设计的单元通过采用铝板折成的 L 型支架进行连

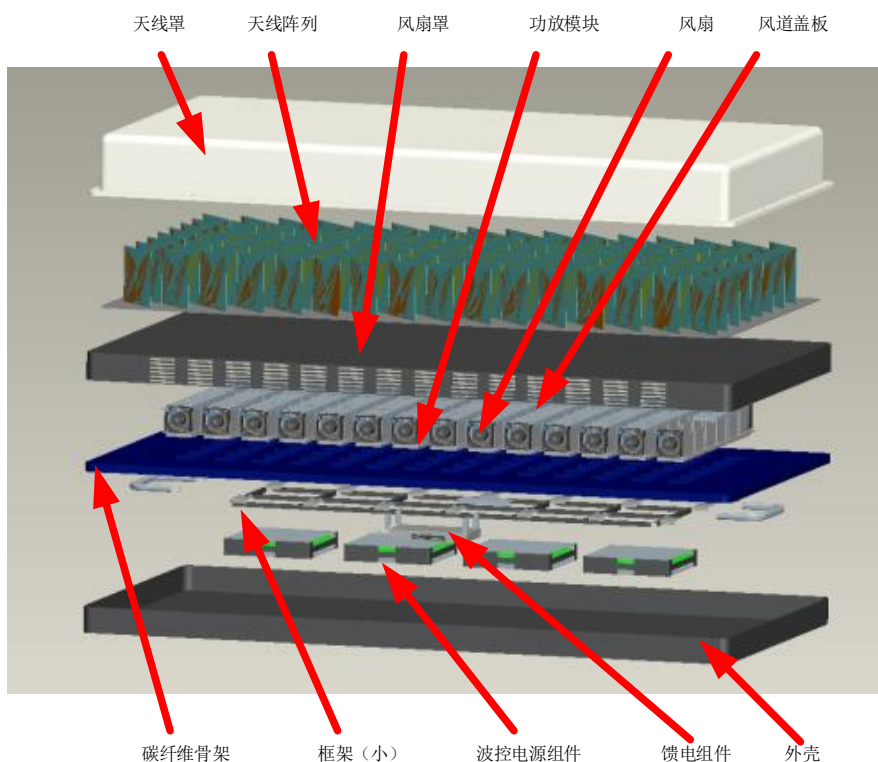


图2 宽带宽波束相控阵天线整机结构爆炸图

Figure 2 Exploded view of the overall structure of the wideband, wide-beam phased array antenna

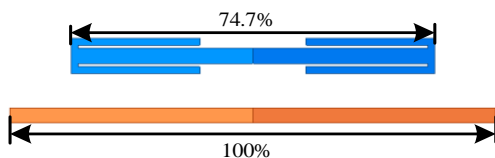


图3 振子臂小型化前后示意图

Figure 3 Schematic of the dipole arms before and after miniaturization

接和固定在地板上,保证结构的稳定性,单元结构如图4(a)所示。此外,天线单元采用挖孔设计,移除了介质板上非必要的结构材料。挖孔部分约占原介质板面积的30%。经核算,此设计使单个天线单元的介质板部分重量减轻约35.8 g。在全系统共84个单元的条件下,仅通过介质板挖孔一项即可为系统整体贡献约3.0 kg的重量缩减。

设计中,金属辐射结构采用厚度 $t=0.036$ mm的铜箔,介质基板采用 $\epsilon_r=2.65$ 、 $h=2$ mm、 $\tan \delta=0.001$ 的微波复合介质。地板位于阵面下方,采用了碳纤维材质以减轻重量。同轴接头穿过地板与天线连接。

针对单元进行仿真,图4(b)为天线单元的仿真驻波比曲线。天线在0.8~2 GHz频段上的驻波在2.5以下,满足系统使用需求。

2.2 阵面设计与宽带赋形实现

为满足需要,天线阵面按俯仰向6个 \times 方位向14个的规模设计,方位向和俯仰向单元间距均为90 mm,且按45°斜极化摆放。阵面尺寸约为550 mm \times 1 270 mm,为

容纳支架及方便安装天线罩,地板适当外扩,结构示意图见图5。

在天线承力骨架及关键结构件的选取中,为满足轻量化设计,采用碳纤维复合材料替代传统铝镁合金材料制备的承载地板。在通过力学测试的前提下,使结构件的重量由原方案的19.6 kg降至11.5 kg,单项减重约8.1 kg,幅度达41%。综合了轻量化地板和天线单元的挖孔减重两项关键设计后,天线系统整体减重约11.1 kg,最终系统整体重量为72.2 kg,与初始设计相比实现了13%的重量优化。

天线阵面等幅同相激励情况下,随着频率升高,阵面的波束宽度逐渐变窄。其结果在表1中给出。

为了在0.8~2 GHz的频带范围内,方位面 $\pm 40^\circ$ 、俯仰面 $\pm 20^\circ$ 的波束扫描范围内,实现任意500 MHz瞬时带宽内的波束宽度满足方位向 $\geq 10^\circ$ 、俯仰向 $\geq 20^\circ$ 的需求,同时维持一定的增益,采用基于迭代傅里叶变换(Iterative Fourier Transform, IFT)算法的阵列波束赋形联合调试法,实现宽带宽波束相控阵天线在宽频段大扫描角度条件下的波束宽度要求。其流程图如图6所示。为满足系统对宽波束的实际要求,本次设计将波束宽度目标设定为方位面 11° 、俯仰面 22° ,副瓣电平约束为-10 dB。在IFT优化过程中,收敛条件设置如下:当连续两次迭代中阵元激励分布不再变化,或迭代次数达到300次上限时停止迭代。

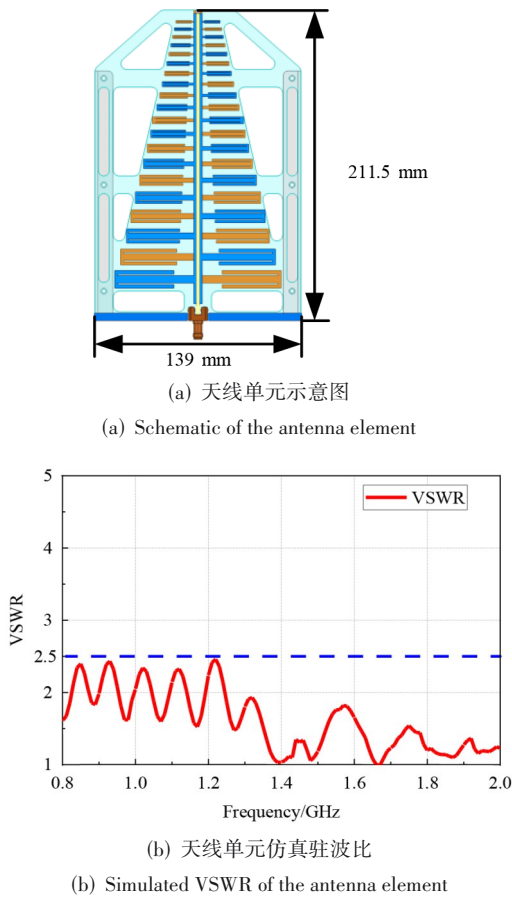


图 4 对数周期天线单元示意图及驻波比
Figure 4 Schematic of the log-periodic antenna element and its VSWR

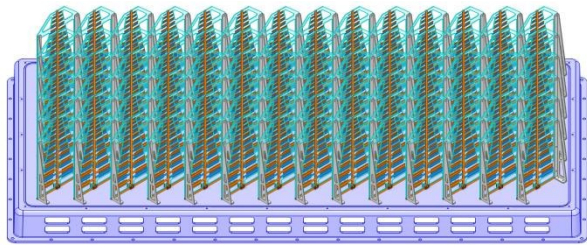


图 5 阵列结构示意图
Figure 5 Schematic of the array structure

表 1 等幅同相情况下各频点正交面波束宽度
Table 1 Beamwidths in the orthogonal planes at different frequencies under uniform amplitude and in-phase excitation

频率/MHz	俯仰面波束宽度/(°)	方位面波束宽度/(°)
800	31.08	14.50
1 300	22.56	9.87
1 650	17.42	7.42
2 000	14.06	6.01

将基于 IFT 算法的阵列波束赋形联合调试法得到的幅相控制值代入到整体阵列中进行全波仿真计

算, 得到的全阵优化后的全波仿真扫描方向图结果如图 7 所示。

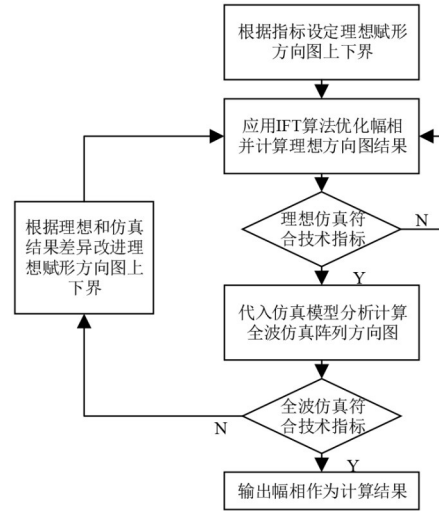


图 6 基于 IFT 算法的阵列波束赋形联合调试法流程图
Figure 6 Flowchart of the IFT-based beamforming joint tuning method

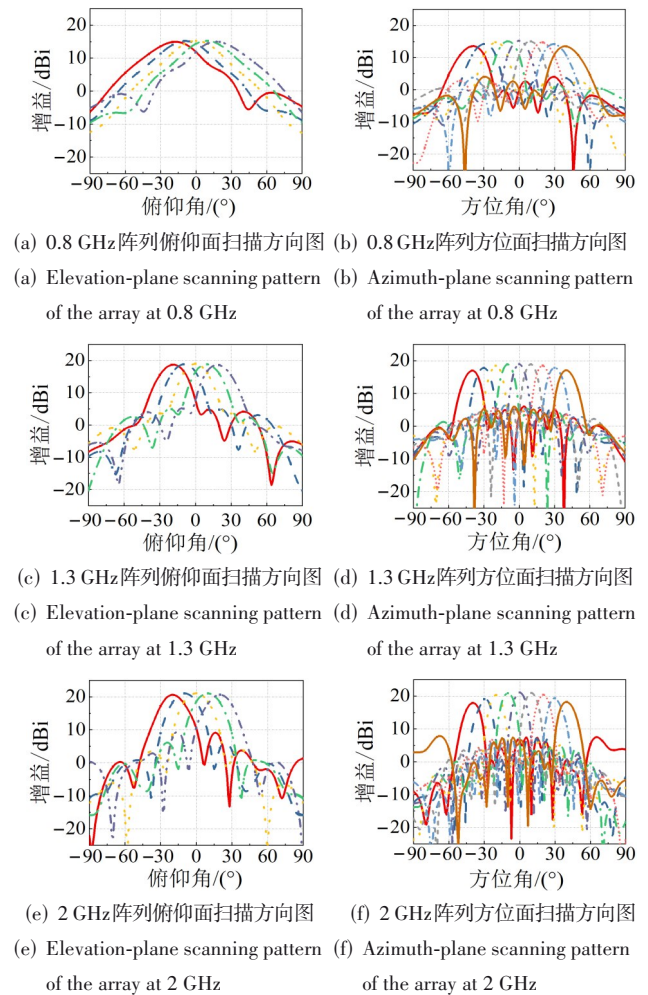


图 7 全波仿真优化后全阵扫描方向图
Figure 7 Scanning patterns of the full array after full-wave optimization

3 宽带 T/R 组件设计

3.1 超宽带发射射频组件原理设计

超宽带发射射频组件由 84 个发射射频单元组成。设计上采用瓦片式构架,发射射频单元由射频芯片、控制芯片、微波多层板、腔体、盖板以及波控子板等部件组成。主要元器件包括 GaAs 单片、GaN 单片等器件,同时集成了数控移相器及均衡电路。如图 8 所示,射频信号由馈电网络输入到发射模块中,通过延时、移相、幅度均衡、衰减、放大后,输出至天线。

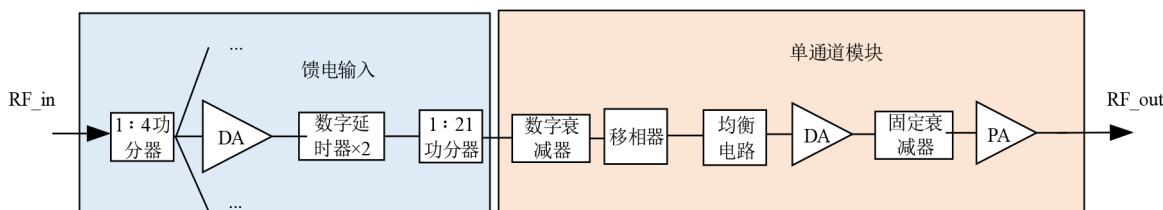


图8 发射射频单元原理框图

Figure 8 Block diagram of the transmit RF unit

在封装工艺方面,组件设计兼顾了气密性可靠性与热管理效能。选用轻质、高热导率的铝合金作为封装外壳材料。针对 GaN 器件的高热流密度特性,在单元腔体外部直接集成散热齿结构,构建了从芯片到盒体底部的低热阻传导路径。

封装时采用激光密封焊接工艺进行盖板封装。相比传统封接方式,激光焊具有热影响区小、焊接精度高的特点,能够有效避免高温对内部精密微波器件的损伤,同时保证组件满足严苛的温冲、热真空及水汽含量指标要求。发射射频单元的设计采用了模块化设计,同时采用了高密度集成及标准化设计,有利于整机快速更换维修。发射射频单元的外形结构如图 9(a)所示,内部布局如图 9(b)所示。

4 波控及供电

波控单元是宽频宽波束相控阵天线重要组成部分,其主要功能为波束扫描控制。波控单元主要包括主控板以及 4 个分配板,组成如图 10 所示。主控板在任务管理器控制下,根据工作频率及所需波束指向,实时计算每个收发通道需要控制的衰减量和移相量,分配板将需要控制的衰减量和移相量分配给发射射频单元,发射射频单元根据本身的控制时序,实现串并转换,完成每路发射通道幅度、相位控制。

主控板主要由 RS422 接口电路、电平转换电路、FPGA 电路、时钟电路、FLASH 电路、配置电路、信号隔离驱动电路组成。主控板接收任务管理器的指令要求,在 FPGA 内部进行指令解算,对发射单元下发波束切换、上电控制等功能指令,同时,把从波控单

3.2 超宽带发射射频组件结构设计

为满足小型化与高功率需求,采用高密度瓦片式集成架构。与传统砖块式架构相比,该设计通过纵向堆叠与三维互连技术,显著提升了空间利用率。组件共集成 84 个发射射频单元,每个单元基于微波多层板工艺,实现了 GaAs 单片、GaN 功率放大器单片及数控移相和均衡电路的异构集成。通过微波多层板内部的高密度垂直互连,有效缩短了射频信号的传输路径,优化了寄生参数,从而在紧凑体积内实现了信号的延时、移相、幅度均衡及功率放大功能。

元上接发射单元及电源数据回传到基带处理板。DC 电源提供波控分机各部分数字逻辑电路供电。主控板组成框图如图 11 所示。

波控单元的供电由二次电源提供,波控单元对二次电源提供的波控电源+5 V 进行降压转换,通过 DC-DC 转换为数字电源 3.3、3.3 和 1.2 V,通过 LDO 转换为数字电源 2.5、1.8 和 1.5 V。

波控单元设计有自检功能,自检时,系统检测信号由各波控专用芯片通过串行通信总线挂在波控处理模块上,波控数据处理模块根据波控自检方式要求进行检测。

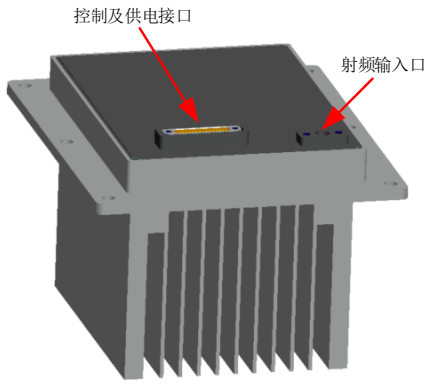
波控单元主控板实物照片如图 12 所示。

5 有源部分散热设计

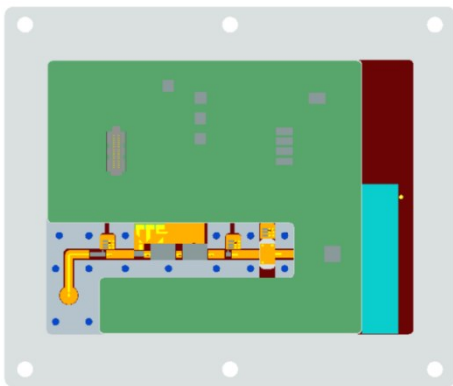
宽频宽波束相控阵系统共包含 84 个发射射频单元,每个发射射频单元内,印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)直接焊接在壳体上,功率放大器通过热沉散热。壳体背面带有一体化散热齿,热量直接可以导到散热齿上,发射射频单元的散热途径如图 13(a)所示。根据宽频宽波束相控阵系统的工作环境,拟采用风冷散热。宽频宽波束相控阵系统每三个发射射频单元组成一个风道,并配备一个风扇,并在风道外端配一个风扇,一端进风,一端抽风,如图 13(b)所示。

热分析时考虑外部风速为 0。该宽频宽波束相控阵天线中器件热源分布如表 2 所示,总热耗 1 098.4 W。

环境温度设置为 55 °C,功放芯片通过 PCB 上的



(a) 射频单元的外形结构
(a) External structure of the RF unit



(b) 射频单元的内部布局
(b) Internal layout of the RF unit

图 9 发射射频单元示意图

Figure 9 Schematic of the transmit RF unit

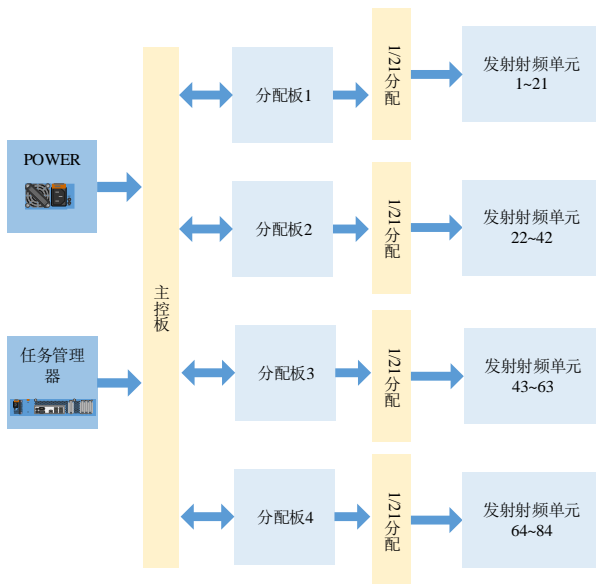


图 10 波控单元组成

Figure 10 Block diagram of the beam control unit

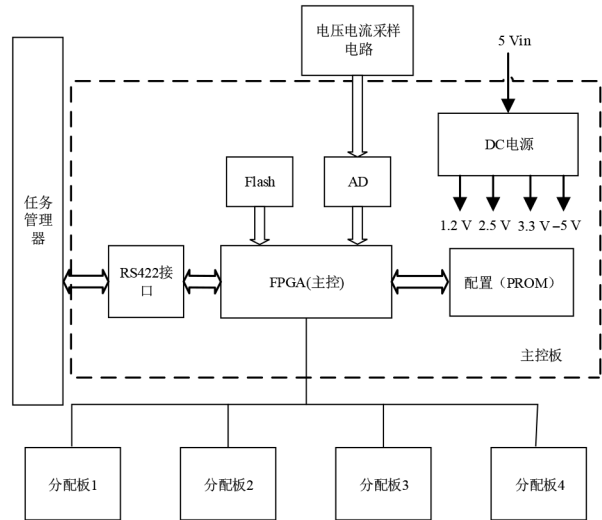
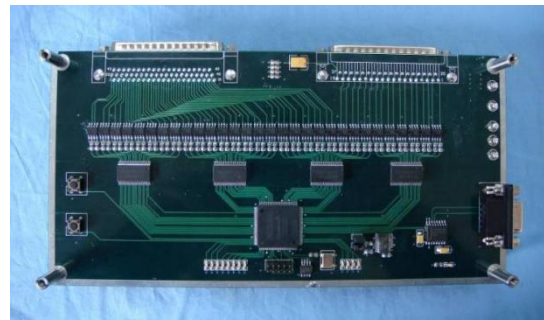


图 11 波控单元主控板组成框图

Figure 11 Block diagram of the beam control unit main control board



(a) 正面
(a) Front view



(b) 反面
(b) Rear view

图 12 波控单元主控板实物照片

Figure 12 Photograph of the main control board of the beam control unit

热沉散热, 驱动芯片用金锡焊接于 PCB 板上, PCB 板用铅锡焊接于模块腔体上。经过仿真计算, 芯片仿真温度与芯片内热阻引起的温升相加得到最终仿真温度如表 3 所示。由仿真可知, 功放芯片仿真壳温为 79.13 °C, 计算功放芯片的结温为 169.88 °C, 满足结温要求。

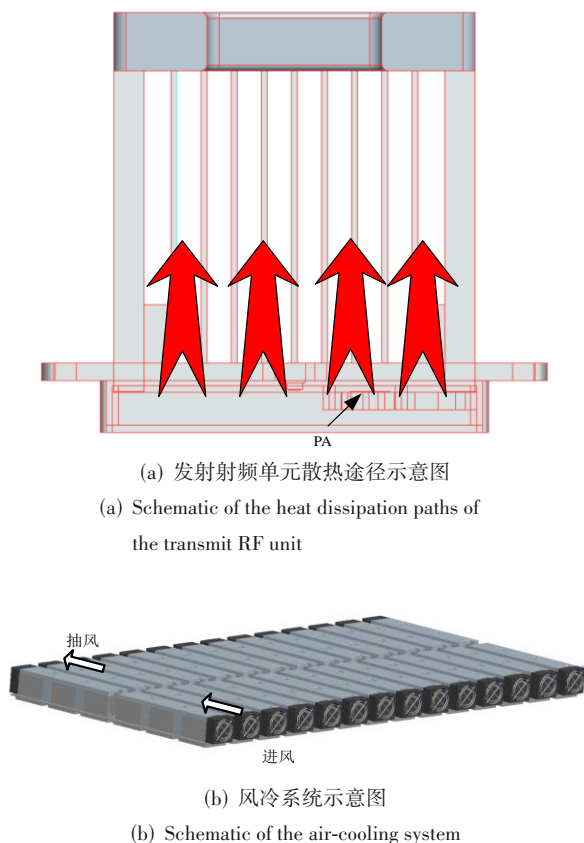


图13 射频单元及系统散热途径

Figure 13 Heat dissipation paths of the RF unit and the overall system

表2 元器件热耗

Table 2 Power dissipation of the components

器件名称	单个热耗/W	数量	总热耗/W
功放芯片	7.5	84	630
驱动芯片1	2	84	168
驱动芯片2	0.3	84	25.5
现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array,FPGA)	5	1	5
电源模块	无	无	269.9

6 宽带波束功率可重构系统测试

为了验证波束综合效果及扫描性能,加工了天线阵面并结合波控单元,在微波暗室对天线的方向图和法向波束情况下的有源电压驻波比进行了测试,宽带波束相控阵天线测试场景如图14所示。

有源电压驻波比结果由于仿真条件限制,对比了 3×3 阵列中边缘单元和中心单元的仿真结果与整阵边缘(位于俯仰向第1行-方位向第1列)及中心(位于俯仰向第3行-方位向第7列)单元的测试结果,如图15所示。

方向图测试过程中,该宽带波束相控阵天线被

表3 元器件仿真结温

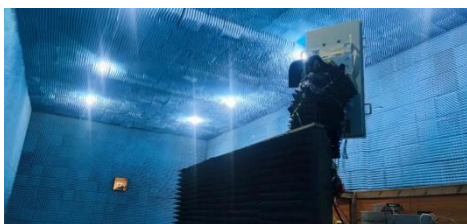
Table 3 Simulated junction temperatures of the components

元器件	片内热阻 $R_{jc}/(^{\circ}\text{C}/\text{W})$	热阻温 升/ $^{\circ}\text{C}$	仿真壳 温/ $^{\circ}\text{C}$	额定壳 温/ $^{\circ}\text{C}$	仿真结 温/ $^{\circ}\text{C}$	额定结 温/ $^{\circ}\text{C}$
功放 芯片	12.1	90.75	79.13	85	169.88	225
驱动 芯片1	11	22	74.37	85	96.37	175
驱动 芯片2	30.4	9.12	75.06	85	84.18	175
FPGA	1.3	5.2	70.94	85	76.14	125
电源 模块1	无	无	80.35	100	无	无
电源 模块2	无	无	72.99	100	无	无
电源 模块3	无	无	71.01	100	无	无
电源 模块4	无	无	68.94	100	无	无



(a) 方位面测试

(a) Azimuth-plane measurement



(b) 俯仰面测试

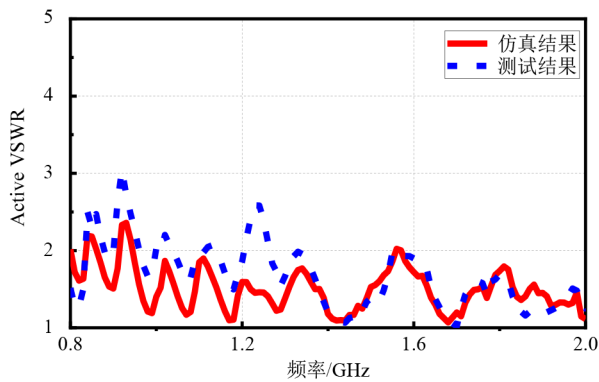
(b) Elevation-plane measurement

图14 宽带波束相控阵天线测试场景图

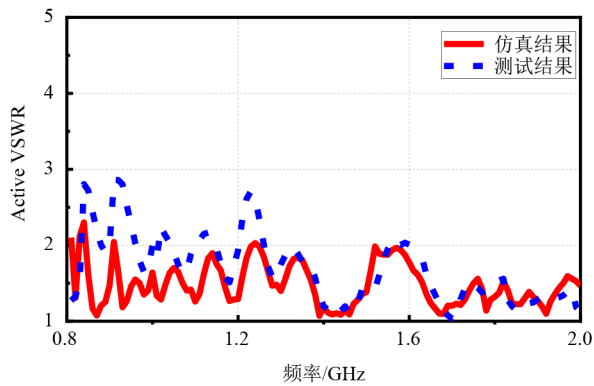
Figure 14 Measurement setup of the wideband, wide-beam phased array antenna

稳固地安装于高精度旋转平台上,以确保在测试两个主要平面时,能够沿预设轴线进行精确的圆周旋转,从而全面覆盖所需测试区域。测试接收端选用了双脊喇叭天线,其架设采用与待测天线保持一致的架设高度,并确保二者之间的间距满足远场测试条件。

宽带波束相控阵天线工作于0.8~2 GHz,其实测0.8、1.3及2 GHz频点下俯仰面和方位面的扫描方



(a) 边缘单元有源电压驻波比结果对比
(a) Comparison of active VSWR for the edge element



(b) 中心单元有源电压驻波比结果对比
(b) Comparison of active VSWR for the center element

图 15 3×3 阵列仿真与整阵测试有源电压驻波比对比
Figure 15 Comparison of simulated and measured active VSWR of the 3×3 array and the full array

向图如图 16 所示。

EIRP 是描述系统在特定方向上有效辐射能力的参数, 定义为在给定方向上, 发射天线相对于各向同性辐射天线的相对天线增益乘以天线从连接的发射机接收的净功率, 其公式可以表示为

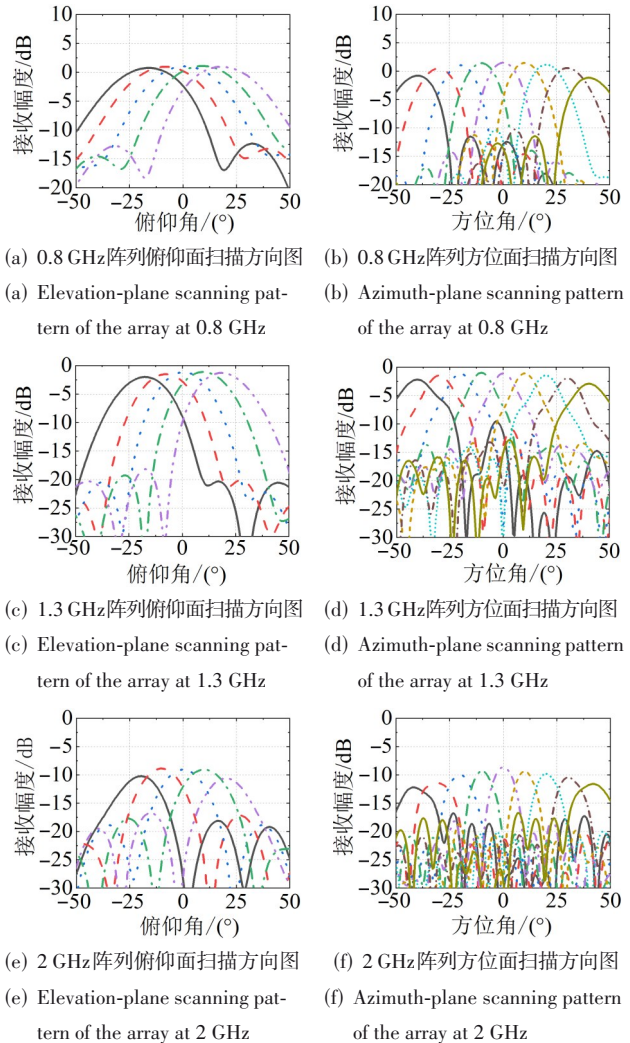
$$EIRP = P_{in} \cdot G \quad (1)$$

其中: P_{in} 为馈入的总功率; G 为该方向的天线增益。通常用分贝值计算时也可表示为

$$EIRP(\text{dBW}) = P_{in}(\text{dBW}) + G(\text{dBi}) \quad (2)$$

阵面若干频点的增益、满足 EIRP 要求时单通道最大功率的最小值, 以及此时的通道总功率及对应 EIRP 结果见表 4。

测试结果表明, 在 0.8~2 GHz 频段范围内, 方位角 $-40^\circ \sim +40^\circ$, 俯仰角 $-20^\circ \sim +20^\circ$ 扫描覆盖范围内, 方位角波束宽度最小值为 10° , 俯仰角波束宽度最小值为 20° 。阵面在实现波束展宽的同时, 在宽频带上维持了相对稳定的 EIRP。



(a) 0.8 GHz 阵列俯仰面扫描方向图
(a) Elevation-plane scanning pattern of the array at 0.8 GHz
(b) 0.8 GHz 阵列方位面扫描方向图
(b) Azimuth-plane scanning pattern of the array at 0.8 GHz
(c) 1.3 GHz 阵列俯仰面扫描方向图
(c) Elevation-plane scanning pattern of the array at 1.3 GHz
(d) 1.3 GHz 阵列方位面扫描方向图
(d) Azimuth-plane scanning pattern of the array at 1.3 GHz
(e) 2 GHz 阵列俯仰面扫描方向图
(e) Elevation-plane scanning pattern of the array at 2 GHz
(f) 2 GHz 阵列方位面扫描方向图
(f) Azimuth-plane scanning pattern of the array at 2 GHz

图 16 宽带波束相控阵天线测试结果

Figure 16 Measured results of the wideband, wide-beam phased array antenna

表 4 阵面 EIRP 及功耗测试结果

Table 4 Measured EIRP and power consumption of the array aperture

频率/GHz	增益/dBi	满足 EIRP 要求时单通道最大功率的最小值/W	通道总功率/W	EIRP/dBW
0.8	15.2	4.97	417.8	41.4
1.0	16.2	3.84	322.8	41.3
1.2	17.4	3.05	255.8	41.5
1.4	18.2	2.53	212.3	41.5
1.6	18.9	2.04	171.7	41.3
1.8	20.3	1.41	118.8	41.1
2.0	21.1	1.28	107.8	41.4

相比本文方法, 目前已有工作的两类主要研究方向: 一是宽带扫描阵列, 侧重于实现宽角扫描

而非固定波束赋形；二是静态宽波束天线/阵列，通常不具备电扫描或宽带特性。为更清晰地定位

本工作的贡献，表 5 归纳了与本研究目标相近的典型设计及其性能。

表 5 本文设计与其他文献的对比

Table 5 Comparison of the proposed design with other reported works

文献	核心目标	带宽	波束宽度	扫描范围	阵列类型/技术
文献[9]	宽带宽角扫描	164%	窄波束	$\pm 70^\circ$	紧耦合偶极子、多谐振抑制
文献[23]	宽角扫描/双 CP	40%	窄波束	$\pm 70^\circ$	紧耦合密布阵
文献[7]	宽波束切换/扫描	窄带	宽波束	有限范围	微带导航天线阵
本文	宽带宽波束扫描	85%	方位 $\geq 10^\circ$, 俯仰 $\geq 20^\circ$	方位 $\pm 40^\circ$, 俯仰 $\pm 20^\circ$	LPDA 密布相控阵

相比之下,本研究首次提出并完整实现了一种面向“宽带宽波束”应用的相控阵系统,其创新体现在以下两个方面:实现了从宽带小型化天线单元到完整相控阵系统的端到端设计;在较宽的频带内同时实现了宽波束(方位 $\geq 10^\circ$ /俯仰 $\geq 20^\circ$)、电扫描(方位 $\pm 40^\circ$ /俯仰 $\pm 20^\circ$)和稳定辐射特性。

7 结论

本文设计和构建了 6×14 规模的宽带宽波束相控阵天线系统样机。宽带宽波束阵面天线单元以弯折实现小型化的对数周期天线作为基本单元,避免了采用紧耦合天线阵面时单元间互耦过大对有源驻波的影响。同时天线单元做挖孔进行减重,配合采用碳纤维的地板大幅降低系统重量。多通道 T/R 组件采用“瓦片式”结构,在射频链路采用了移相器加频率不敏感的延时器,实现了瞬时大带宽大角度扫描,不产生波束空间色散及波形时间色散。微波暗室远场实测结果表明,该阵列在 0.8~2 GHz 的宽频带内可以正常工作,实现任意瞬时带宽 500 MHz 内满足宽波束需求的同时具有在俯仰面 $\pm 20^\circ$ 和方位面 $\pm 40^\circ$ 的扫描能力,并维持了足够的辐射性能,具备优良的信号覆盖和控制能力,为动态变化的应用场景提供了高效且可靠的解决方案。

参考文献

- [1] 杨易陆, 夏飞扬, 徐进. 多功能射频综合一体化技术研究及展望[J]. 空间电子技术, 2023, 20(4): 27-32.
Yang Yilu, Xia Feiyang, Xu Jin. Research and prospect of multifunctional RF integrated technology[J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(4): 27-32. (in Chinese)
- [2] 张雪莲. 多功能综合射频技术发展研究[J]. 现代雷达, 2020, 42(7): 78-81.
Zhang Xuelian. A study on integrated multifunction RF technology trends[J]. Modern Radar, 2020, 42(7): 78-81. (in Chinese)
- [3] 冯颖, 李岩, 吴春邦, 等. 超宽带相控阵天线的发展现状及星载应用展望[J]. 空间电子技术, 2023, 20(4): 9-19.

Feng Ying, Li Yan, Wu Chunbang, et al. Potential application and development trend of ultra-wideband phased array antenna for satellite payloads community[J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(4): 9-19. (in Chinese)

- [4] 周志鹏, 孙红兵, 施鹤年. 宽带有源天线阵列设计[J]. 微波学报, 2017, 33(1): 1-4.
Zhou Zhipeng, Sun Hongbing, Shi Henian. Design of broadband active antenna array[J]. Journal of Microwaves, 2017, 33(1): 1-4. (in Chinese)
- [5] 蒋俊毅, 王梓丞, 施刚, 等. 三维高集成度超宽带 LTCC 功率分器[J]. 电子学报, 2025, 53(6): 1917-1922.
Jiang Junyi, Wang Zicheng, Shi Gang, et al. Highly integrated three-dimensional structure ultra-wideband LTCC power divider[J]. Acta Electronica Sinica, 2025, 53(6): 1917-1922. (in Chinese)
- [6] Talisa S H, O'Haver K W, Comberiate T M, et al. Benefits of digital phased array radars[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(3): 530-543.
- [7] 周凯翔, 袁健锋, 袁雪林. 一种波束赋形可调的导航天线设计[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(9): 099002.
Zhou Kaixiang, Yuan Jianfeng, Yuan Xuelin. Design of navigation antenna with adjustable beam forming[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(9): 099002. (in Chinese)
- [8] Liu Mubin, Liu Ying, Jia Yongtao. Low profile tightly coupled dipole array with 60° scanning off broadside[C]//2021 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Piscataway: IEEE, 2021: 9618496.
- [9] Zhao Liangliang, Zhu Hailiang, Ding Can, et al. An ultra-wideband dual-polarized tightly coupled dipole array (TCDA) with wide scanning range[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(7): 1961-1965.
- [10] Li Wenting, Tu Hancheng, He Yejun, et al. A novel wide-band tightly coupled dual-polarized reflectarray antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(6): 5422-5427.
- [11] Zhang Zhechen, Wang Bingjun, Yang Feng, et al. Conical conformal tightly coupled dipole arrays co-designed

- with low-scattering characteristics[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(12): 12352-12357.
- [12] Sun Jianxu, Chen Mingzhe, Cheng Yujian. Single-PCB fabricated, ultrawideband, and wide-scanning phased array antenna with vertically integrated resistive frequency-selective surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024, 72(3): 2411-2422.
- [13] Qi Huanhuan. Elimination of anomalous resonances in coaxial-fed LPDA and its array with integrated Φ -shaped balun[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(11): 9000-9005.
- [14] Jiang Zhaoneng, Wang Zhixin, Nie Liying, et al. Ultra-wideband wide-angle scanning sparse array antenna based on LPDA[C]//2021 13th Global Symposium on Millimeter-Waves & Terahertz. Piscataway: IEEE, 2021: 9511949.
- [15] Imran Wan Mohd Zamri W M, Karmakar N C. 4 by 4 ultra-wideband millimeter-wave printed log-periodic dipole array antenna[C]//2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. Piscataway: IEEE, 2015: 2427-2428.
- [16] Huang Daosheng, Xu Guanghui, Ding Dawei, et al. Wide-band integrated log-periodic antenna array for 5G Q-band applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(7): 1428-1432.
- [17] Shin G, Kong M, Lee S H, et al. Gain characteristic maintained, miniaturized LPDA antenna using partially applied folded planar helix dipoles[J]. IEEE Access, 2018, 6: 25874-25880.
- [18] 张祺. 宽带相控阵延时补偿系统设计方法[J]. 电子信息对抗技术, 2024, 39(1): 52-55.
- Zhang Qi. A design method of time-delay compensation system in wide-band phased array[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2024, 39(1): 52-55. (in Chinese)
- [19] 梁志伟, 林幼权, 孙红兵, 等. 大型宽带相控阵天线子阵级延时器误差分析及补偿[J]. 微波学报, 2023, 39(3): 30-36.
- Liang Zhiwei, Lin Youquan, Sun Hongbing, et al. Analysis and compensation method of real-time delayers for multi-layered subarray application in wideband large phased array[J]. Journal of Microwaves, 2023, 39(3): 30-36. (in Chinese)
- [20] Chen Kejin, Gong Xiaodong, Yang Feng, et al. Joint beamforming and waveform optimization in 4-D antenna arrays for integrated sensing and communication systems[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2025, 73(10): 7787-7799.
- [21] Chen Kejin, Yang Feng, Chen Yikai, et al. Hybrid digital and analog modulation for multibeam systems based on 4-D antenna arrays[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2025, 73(10): 8161-8174.
- [22] Li Yan, Xiao Shaoqiu. Wideband wide-angle scanning phased array based on miniaturized metasurface antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(2): 1107-1119.
- [23] Li Yan, Xie Shengxu, Xiao Shaoqiu. A modular wide-band dual CP tightly coupled phased array antenna with 70° scanning[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2025, 73(11): 8958-8971.
- [24] 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.

作者简介



张铧伦 男, 1996年11月出生于浙江省温州市。西安电子科技大学电磁场与微波技术博士研究生。主要研究方向为相控阵天线设计、宽带阵列、阵列综合。

E-mail: zhangluolunypk@163.com



陈显舟 男, 1985年3月出生于陕西省咸阳市。高级工程师, 任职于中国空间技术研究院西安分院, 西安交通大学专业学位研究生企业导师。主要研究方向为超宽带多功能相控阵、多功能可重构综合射频技术等。中国电子学会会员编号: E190067384S。

E-mail: xianzhouchen@126.com



张志亚 男, 1985年1月出生于江苏省盐城市。现任西安电子科技大学教授、博士生导师, 华山学者特聘教授。主要研究方向为相控阵系统、宽频带天线阵、低轨卫通相控阵、天线测量系统、新型天线及超材料技术等。中国电子学会会员编号: E190197768M。

E-mail: zy Zhang@xidian.edu.cn