

北京航空航天大学学报
Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics
ISSN 1001-5965,CN 11-2625/V

《北京航空航天大学学报》网络首发论文

题目：面向低轨卫星通信的 X/Ku 波段超宽带宽角扫描双极化有源相控阵天线
作者：王洪全，王阳，郭承军，李滚，谢思宇
DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0625
收稿日期：2026-09-10
网络首发日期：2026-11-06
引用格式：王洪全，王阳，郭承军，李滚，谢思宇．面向低轨卫星通信的 X/Ku 波段超宽带宽角扫描双极化有源相控阵天线[J/OL]．北京航空航天大学学报.
https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0625



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

面向低轨卫星通信的 X/Ku 波段超宽带宽角扫描双极化有源相控阵天线

王洪全[1]，王阳[2]，郭承军[3]，李滚[1]，谢思宇[1,✉]，

（1. 电子科技大学 航空航天学院，成都 610095;
2. 成都华兴大地科技有点公司，成都 611731;
3. 电子科技大学 自动化工程学院，成都 610095;)
✉通信作者 谢思宇，E-mail： syxie@uestc.edu.cn

摘要 近年来，低轨卫星通信系统快速发展，对用户终端天线提出了宽频带、高增益、大角度覆盖以及快速波束切换等要求。针对传统卫星通信相控阵天线难以兼顾宽频覆盖和宽角扫描性能的问题，本文提出了一种面向低轨卫星通信终端的 X/Ku 波段超宽带宽角扫描双极化有源相控阵天线。该天线采用紧耦合双极化阵列实现超宽带辐射性能，并结合砖式有源接收架构完成阵列天线、射频接收模块以及波束控制单元的一体化设计。研制的原理样机包含 256 个阵元，采用 PCB 工艺加工，工作频率覆盖 10～18GHz。测试结果表明，该阵列在 10～16GHz 频段实现 ±60°波束扫描，在 10～18GHz 频段实现 ±50°波束扫描，整个工作频带内未出现明显扫描盲区；采用二维泰勒加权后，法向副瓣电平低于−25dB，扫描副瓣电平低于−18dB。实测天线增益噪声温度比（G/T）达到−1.1～3.9dB/K，波束切换时间小于100μs。该天线兼具宽频带、大扫描角、低剖面和易工程实现等特点，可为下一代低轨卫星通信终端提供有效技术方案。

关键词 低轨卫星通信、X 波段、Ku 波段、超宽带、宽角扫描、双极化、有源相控阵天线
中图分类号 TN821+.8；TN927.2 文献标志码 A DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0625

An X/Ku-Band Ultra-Wideband Wide-Angle Scanning Dual-Polarized Active Phased Array for LEO Satellite Communications

WANG Hongquan[1], WANG Yang[2], GUO Chengjun[3], LI Gun[1], XIE Siyu[1]

(1. School of Aeronautics and Astronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610095, China;

2. Chengdu Huaxing Dadi Technology Co., Ltd., Chengdu 611731, China;

3. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610095, China)
✉XIE Siyu,Email: syxie@uestc.edu.cn

Abstract Recent advances in low Earth orbit (LEO) satellite communication systems have imposed increasing demands on terminal antennas, including wide bandwidth, high gain, wide-angle coverage, and rapid beam switching capability. This paper presents an X/Ku-band ultra-wideband wide-angle scanning dual-polarized active phased array receiver for LEO satellite communication terminals.The proposed array employs a tightly coupled dual-polarized antenna configuration to achieve broadband radiation performance and integrates a brick-type active receiving architecture for highly integrated implementation. A prototype consisting of 256 antenna elements is fabricated using multilayer printed circuit board (PCB) technology, covering an operating frequency range from 10 to 18 GHz.Measurement results demonstrate that the proposed array achieves ±60° beam scanning from 10 to 16 GHz and ±50° scanning over the full 10–18 GHz band without significant scan blindness. With two-dimensional Taylor weighting, the measured sidelobe levels are below −25 dB in the broadside direction and below −18 dB during scanning. The measured gain-to-noise-temperature ratio (G/T) ranges from −1.1 to 3.9 dB/K, and the beam switching time is less than 100 μs. The proposed phased array combines ultra-wide bandwidth, wide-

收稿日期：2026-09-10
基金项目：四川省科技计划项目 2025ZNSFSC1511
Foundation item: Sichuan Science and Technology Program 2025ZNSFSC1511
网络首发时间：2026-11-06 16:06:46 网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.2625.v.20261106.1330.002

angle scanning capability, low-profile integration, and engineering feasibility, providing a promising solution for next-generation low-cost LEO satellite communication terminals.

Key words LEO satellite communication, X-band, Ku-band, ultra-wideband, wide-angle scanning, dual polarization, active phased array antenna

随着低轨卫星互联网系统的快速发展，卫星通信凭借低时延、高容量以及全球覆盖等优势，逐渐成为天地一体化通信网络的重要组成部分[1-3]。相比传统高轨卫星，低轨卫星具有轨道高度低、运动速度快以及可见时间窗口短等特点，因此用户终端需要具备快速波束捕获和动态跟踪能力，以保证通信链路的稳定性。同时，面向未来多业务融合需求，卫星通信终端天线还需具备宽频带、高增益、大扫描范围以及低成本、小型化等特点。

传统抛物面天线主要依靠机械转动实现波束指向调整，存在响应速度慢、结构尺寸大以及难以满足高速动态通信场景需求等不足。有源电扫描相控阵天线能够通过电子方式快速改变波束方向，并具有高辐射效率、多波束能力以及易于平台集成等优势，已经成为低轨卫星通信终端的重要技术方案。然而，低轨卫星通信应用对相控阵天线提出了更高要求。一方面，为满足不同通信体制和频谱资源共享需求，终端天线需要覆盖更宽的工作频段；另一方面，由于卫星相对于用户终端高速运动，天线需要在大扫描角范围内保持稳定增益和阻抗匹配性能。因此，如何同时实现超宽带、大角扫描以及低成本工程化设计，是当前卫星通信相控阵天线面临的重要挑战[4]。

Ku 波段是当前卫星通信领域应用广泛、技术成熟、场景丰富的核心微波频段，可承载超大容量数据传输，能够满足卫星通信的大带宽业务需求。对 Ku 波段的卫通通信相控阵的研究已有诸多成果。如文献[5]提出了用于卫星通信的 256 单元 Ku 频段圆极化相控阵天线，其中单元采用了具有金属化背腔的金属交叉振子，实现了在 13.1GHz~14.5GHz 频带范围内的±40°的波束扫描。除此之外，针对 Ku 波段应用，文献[6-13]报道了 256 阵元和 1024 阵元卫星通信相控阵接收和发射阵列，通过 PCB 阵列和模块化架构实现了较大的扫描范围和较高的 G/T 指标。然而，此类设计主要针对单一通信频段，工作带宽通常集中于 Ku 波段，难以满足未来多频段兼容需求。为实现宽带宽角扫描性能，紧耦合偶极子阵列利用阵元之间的电磁耦合作用拓展阻抗带宽，并结合宽角阻抗匹配技术改善扫描状态下的阻抗稳定性，成为实现超宽带扫描阵列的重要技术路线[14,15]。然而，宽带阵列技术与高集成度有源接收架构之间仍存在阵列设计、射频互联以及系统集成等方面的挑战。

针对上述问题，本文提出了一种面向低轨卫星通信终端的 X/Ku 波段超宽带宽角扫描双极化有源相控阵接收天线。该天线采用紧耦合双极化阵列实现 10～18GHz 超宽带工作，并结合砖式接收架构完成 256 阵元高集成设计。通过天线阵列、接收模块以及波束控制组件协同设计，实现了宽频覆盖、大角扫描和快速波束切换能力，可同时兼容多类不同功能的业务，具备极强的场景通用性与工程复用性。测试结果表明，该阵列在 10～16GHz 范围内实现±60°扫描，在 10～18GHz 范围内实现±50°扫描，并具有良好的副瓣控制和 G/T 性能。本文所研制的相控阵天线与现有产品相比，具有结构更简单、带宽更宽、支持宽频带工作，为多功能低轨卫星通信终端提供了一种可行技术路径，同时具有成本低、二维可扩展性、极大的提高了批量化生产的能力，为工程应用提供有利条件。

1 相控阵天线系统设计

本文设计的有源相控阵接收天线由天线阵列、接收组件、馈电网络以、波控及电源组件及结构外框等部分组成，共包含 256 个双极化阵元，按照 16×16 矩形阵列排列。每个阵元的两个极化端口分别连接独立射频接收通道，通过数字幅相控制实现二维电子扫描。考虑低轨卫星通信终端对快速波束切换、高可靠性以及低成本制造的需求，本文采用砖式（Brick-type）有源阵列架构。相比瓦片式（Tile-type）结构，砖式架构具有散热能力强、通道隔离度高、维护性好以及工程实现难度低等优势，更适合大规模宽带接收阵列应用。天线阵列采用多层 PCB 工艺加工，并与天线载板一体化集成，具有低剖面、高集成、高可靠性、易加工、低成本的优势。接收组件通过毛纽扣实现与阵列垂直互联，形成高密度射频连接结构，本设计目前为宽带模拟单波束设计，考虑到未来低轨导航等应用需求，可

以采用多子阵的方式实现多波束接收。

由于本文设计对象为接收阵列，整机连续工作功耗小于 60W，因此将电源转换电路和波束控制电路集成于同一波控母板中，以降低系统体积和复杂度。接收组件与波控及电源组件通过低频连接器连接。相控阵各系统在垂直于天线阵面的方向通过连接器依次对插互联并通过螺丝锁紧，其结构如图 1 所示。

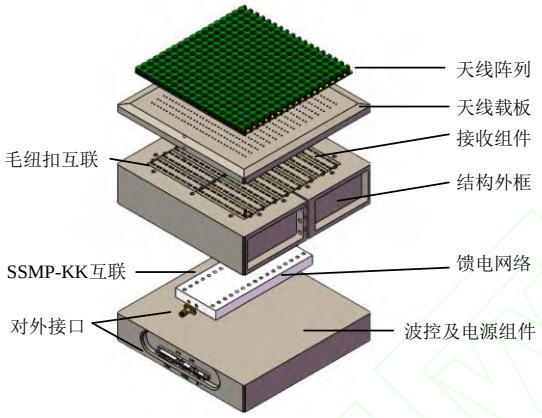


图 1 相控阵天线整机结构爆炸图
Fig.1 Exploded view of phased array antenna structure

图 2 所示为相控阵天线整机原理框图，该相控阵天线的工作原理为：空间电磁波被天线单元的每个极化端口所接收到后，进入接收模块的独立接收通道，经过三级低噪声放大器、移相衰减器以及功合网络，将信号进行一次合成。馈电网络将接收模块送来的信号再次合成后，将全阵合成总信号传输至后端变频模块。外部控制信号可通过波控母板上的 FPGA 控制每个接收通道的幅度和相位，从而控制波束快速相位扫描和低副瓣加权，波束切换时间可小于 100us，电源组件将 28V 的输入电压转化为工作电压，为 FPGA 及接收模块供电。

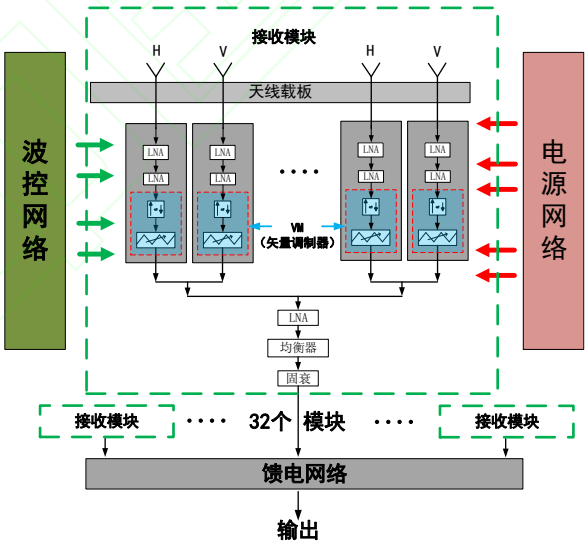


图 2 相控阵天线整机原理框图
Fig.2 Principle block diagram of phased array antenna

2　分系统设计

2.1 天线单元及阵列设计

为实现 10～18GHz 超宽带工作能力以及大角度扫描条件下稳定的阻抗匹配性能，本文采用双极

化紧耦合偶极子阵列作为辐射单元。紧耦合阵列通过调控相邻阵元之间的电磁耦合作用，在宽频范围内实现稳定输入阻抗。其核心思想是在阵列中引入可控容性耦合效应，以补偿低频段阵列结构引入的电感效应，从而拓展阻抗带宽并改善大角度扫描性能[14,15]。

本文天线单元采用双极化结构，介质基板选用介电常数 ε_r=2.2 和 tanδ=0.0009 的低损耗材料。天线 PCB 由 6 层介质层和 12 层金属层组成，通过三次压合工艺加工完成。6 层介质厚度从上到下依次为 1.524mm、0.127mm、1.524mm、0.762mm、0.127mm、0.508mm。

天线单元采取矩形栅格排布。为满足宽角扫描条件下无栅瓣要求，可由不产生栅瓣的最大阵元间距公式(1)计算得到最大阵元间距。

$$d \le \frac{\lambda_0}{1 \pm \left|\sin \theta_{\max}\right|} \tag{1}$$

其中 λ_0 是波长，θ_{max} 是最大扫描角度。综合阵列增益、加工误差和工程裕量，最终阵元间距设计为 9mm×9mm。

天线单元由宽角介质匹配层、天线辐射层和馈电转接层组成，如图 3 所示。其中天线辐射层的主要物理参数如图 4 所示。位于天线辐射层（L3）的紧耦合偶极子天线的一臂由馈电探针馈电，另一臂通过接地柱接地。馈电探针在馈电转阶层(L11)中被通过具有阻抗匹配功能的带状线转接，同再次通过信号金属柱连接在底面金属圆盘上。金属圆盘周围开有环形槽，用于与毛纽扣互联。为了满足超带宽和宽角扫描特性，本文从以下三个方面对阵元结构进行优化：

1）通过加载阵元间耦合电容结构增强相邻单元之间的容性耦合，改善低频阻抗匹配能力；

2）通过介质层开槽降低等效介电常数，减弱表面波传播，提高阵列带宽；

3）通过加载宽角匹配层改善扫描状态下输入阻抗变化，提高大角度扫描稳定性。

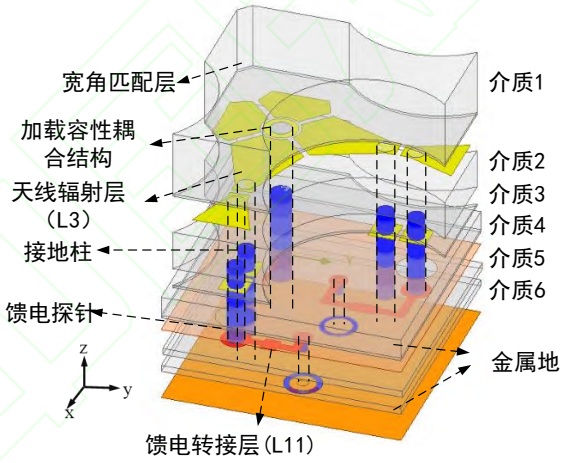


图 3 天线单元爆炸图

Fig.3 Exploded view of antenna element

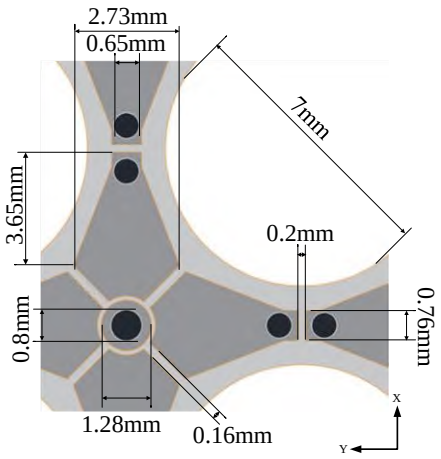


图 4 天线单元俯视图
Fig.4 Top-down view of antenna element

针对 10~18GHz 超宽带的阻抗匹配需求，本文对天线辐射臂轮廓、加载耦合电容结构、馈电转接带状线形状、介质基板厚度等进行了多轮参数仿真优化，获得了良好的匹配。天线单元周期边界仿真模型的无源 S 参数如图 5 所示。天线单元在 10~18GHz 全频段内两个极化端口无源反射系数均优于-10dB。天线 H（水平）和 V（垂直）极化端口隔离度在 10GHz~18GHz 在大部分频点优于 25dB，在接近 18GHz 时略差，约为 20dB。同时本文也仿真了天线单元在方位面和俯仰面波束扫描的时候，两个极化端口有源反射系数的曲线，如图 6 所示。由图中可见，在法向时，两个极化端口的有源反射系数在工作频带内均小于-10dB；当在方位、水平面扫描 ±50 度以内时，两个极化端口的有源反射系数在工作频带内均小于-6dB。

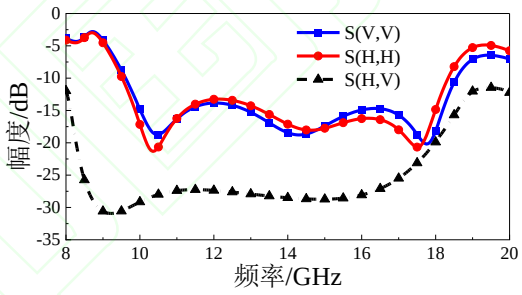


图 5 天线 S 参数仿真结果
Fig.5 Simulated S-parameter results of antenna

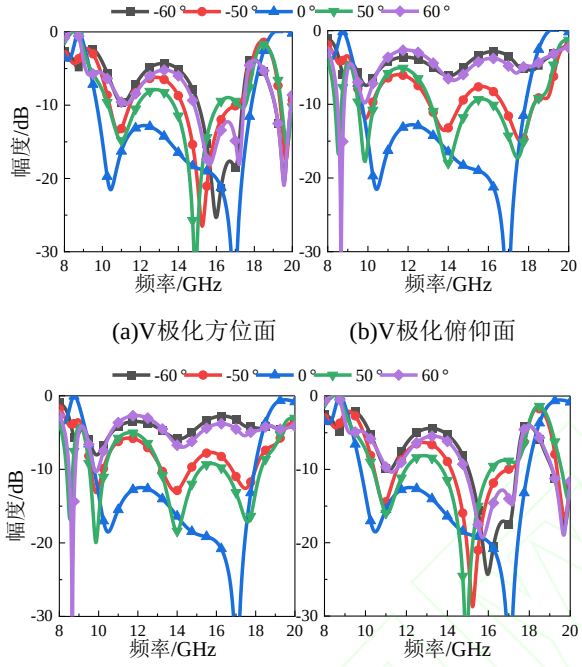


图 6 天线扫描有源反射系数仿真结果
Fig.6 Simulated active reflection coefficients of antenna

为验证阵元辐射性能，分别选取 10GHz、14GHz 和 18GHz 三个典型频点进行了仿真（后文所有出现低/中/高频点的均定义相同），仿真主要关注水平极化和垂直极化单元天线的有源单元方向图，如图 7 所示。结果表明，两个极化方向上的单元具有稳定辐射特性，法向增益分别约为 0.3dBi、3.3dBi 和 4.5dBi（计入馈线损耗）。此外，在低、中频点天线单元的交叉极化电平均大于 30dB；在高频点天线单元的交叉极化电平大于 20dB。

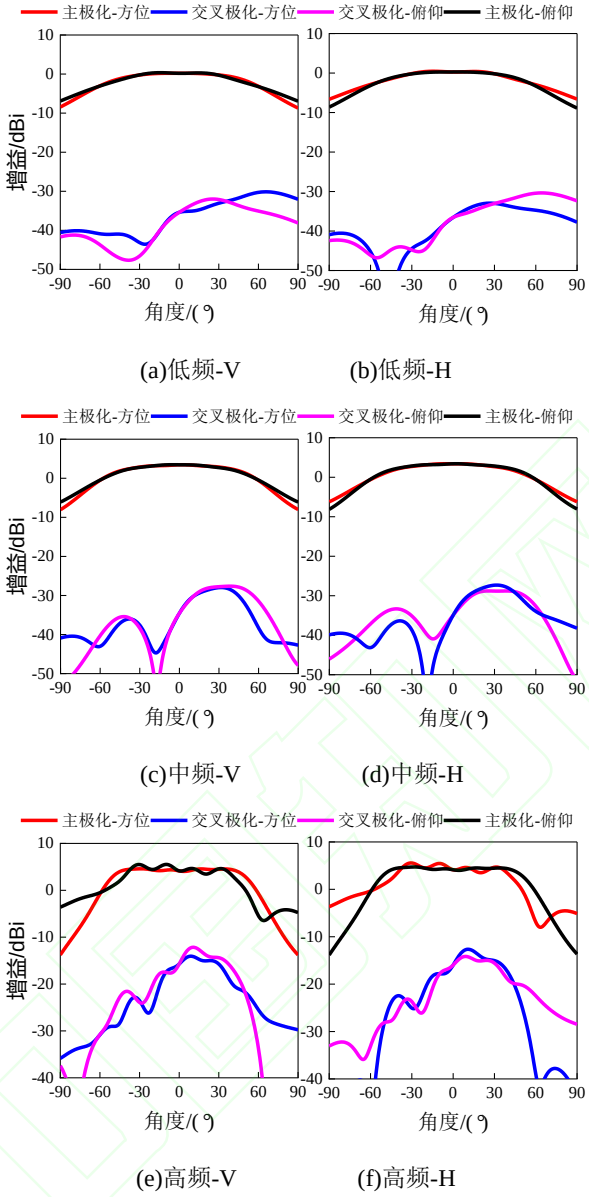


图 7 天线单元方向图仿真结果
Fig.7 Simulation results of element radiation patterns

天线阵列由上述天线单元按照矩形栅格排布而成，阵列规模为 16×16 个单元，阵面尺寸为 144mm×144mm。天线阵面布局如图 8 所示，考虑有限阵列边缘效应对扫描性能的影响，在阵列外围增加一圈寄生单元，以改善边缘阵元所处电磁环境，提高阵列整体阻抗稳定性。天线阵列采用多层复合 PCB 设计，将所有天线单元、馈电结构以及射频转接结构集成于同一印制电路板中。相比传统金属阵列，PCB 工艺具有加工精度高、阵元一致性好、适合批量制造以及成本低等优势，更适用于低轨卫星通信终端的大规模阵列应用。

同时考虑阵列需要兼顾宽带性能、低剖面以及可靠射频互联需求，本文采用多层压合、背钻以及塞孔镀平等工艺完成阵列 PCB 加工。PCB 采用三次压合，首先对馈电转接层一次压合和馈电转接层金属屏蔽柱钻孔；然后将馈电转接层和天线辐射层压合，并完成馈电金属柱的钻孔和金属化工作；最后完成所有叠层的压合工作。此外，整个压合前后还采用背钻工艺去除多余金属化孔，并进行塞孔镀平处理。天线加工完成后的天线阵列通过焊接方式固定于金属载板，并通过毛纽扣连接器实现与后端接收模块的垂直互联。

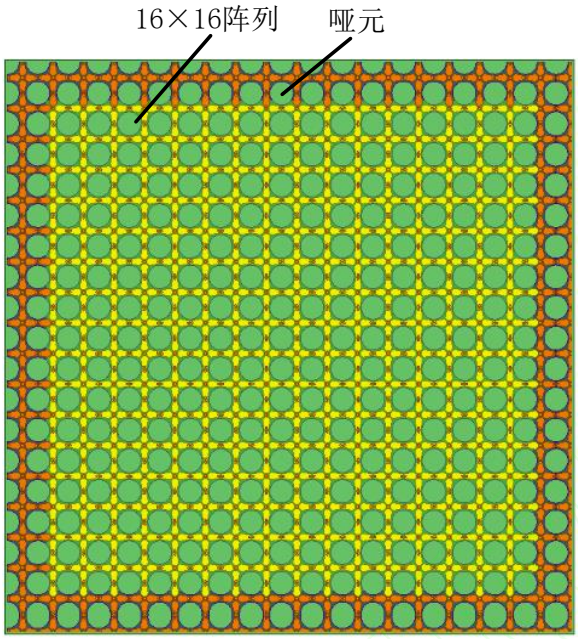


图 8 天线阵列俯视图
Fig.8 Top view of antenna array

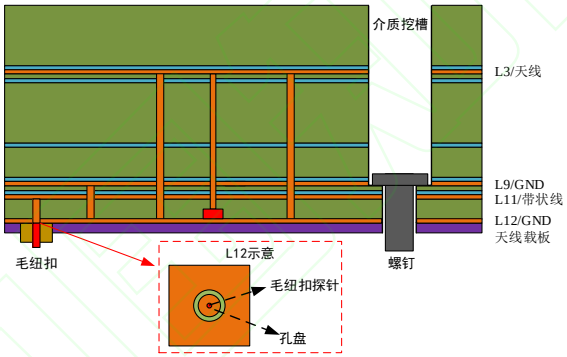


图 9 天线阵列 PCB 叠层示意图
Fig.9 Schematic of antenna array PCB stack-up

由于完整 256 阵元阵列全波仿真计算量较大，为兼顾仿真精度和计算效率，本文建立了 8×8 有限阵列模型，并在阵列外围增加寄生单元，用于分析实际阵列中的单元互耦和边缘效应。图 10 给出了阵列中心单元有源反射系数以及双极化端口隔离度的仿真与测试结果。可以看出，测试结果与仿真结果具有较好一致性，采用 8×8 有限阵对 256 阵元等效仿真，一方面解决仿真资源，另一方面最大限度的保证仿真与实测结果的一致性。在 10～18GHz 整个工作频带内，中心单元有源反射系数均低于-10dB，说明阵列具有良好的宽带阻抗匹配性能。同时，H/V 双极化端口隔离度在大部分频点超过 30dB，最低仍保持在 20dB 以上，满足双极化卫星通信应用需求。

进一步对阵列波束扫描增益进行分析，如图 11 所示。结果表明，在 10～18GHz 整个工作频带内，阵列均能够实现稳定扫描。当扫描角达到±50° 时，阵列增益下降小于 4dB；扫描至±60 度，增益下降小于 6dB；特别在 10GHz~16GHz 频段范围内，天线扫描至±50 度时，增益下降小于 3dB；天线扫描至±60 度时，增益下降小于 4.5dB。上述结果表明，采用紧耦合双极化阵列结合宽角阻抗匹配结构，能够有效提升宽频条件下的大角度扫描能力，为后续有源阵列系统实现提供良好的阵列基础。

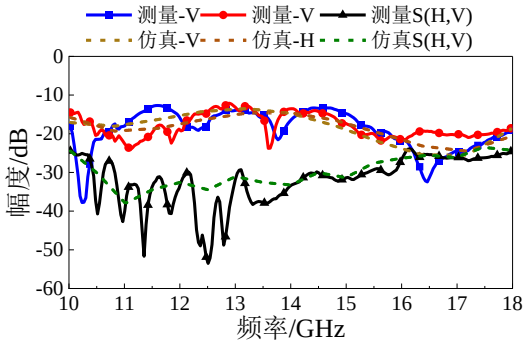
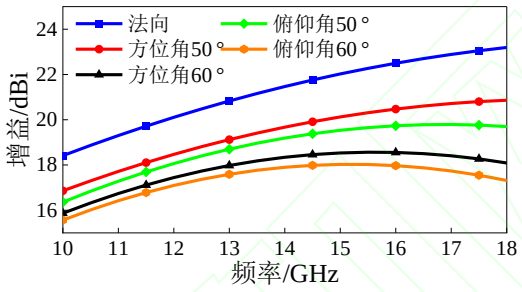
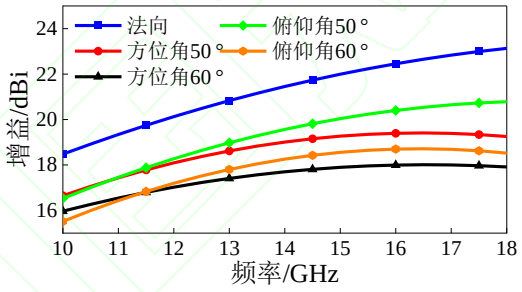


图 10　天线阵列中间单元有源反射系数及隔离度测试结果与仿真结果对比
Fig.10 Comparison between measured and simulated results of active reflection coefficient an isolation for central element of antenna array



(a)V极化阵列



(b)H极化阵列

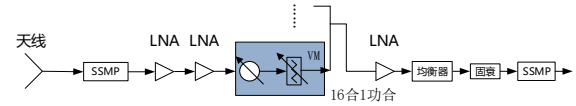
图 11 天线阵列波束扫描增益仿真结果
Fig.11 Simulation results of beam scanning Gain for antenna array

2.2 接收组件设计

接收组件是有源相控阵天线实现高灵敏度接收和快速波束控制的核心部件。针对低轨卫星通信终端对低噪声、高集成度以及快速波束切换的需求，本文采用砖式接收架构设计射频接收模块。每个接收组件包含两个 16 通道接收模块，可对应 16 个双极化天线单元，实现 32 路独立射频通道控制。接收组件通过毛纽扣连接方式与天线阵列垂直互联，在保证高密度集成的同时，提高系统装配可靠性。每个接收通道均具备独立幅相控制能力，可实现 0～15dB、步进 0.5dB 的幅度调节，以及不大于 5°的相位控制精度，从而满足波束扫描和低副瓣加权需求。

接收组件主要由结构腔体、MMIC 芯片、连接器、微带软基片、射频供电板、子板组成。射频供电板为模块供电，子板则接收波控母板指令并为接收模块提供极化选择、移相衰减及其他控制信号。接收组件中所用到的 MMIC 芯片主要包含了 VM（Vector Modulator，矢量调制器）芯片、LNA 芯片、宽带 1 分 2 功分器芯片、均衡器和衰减器。其中，LNA 芯片、均衡器和衰减器是基于砷化镓（GaAs）工艺制造而成。这些 MMIC 芯片和微带软基片通过微组装技术粘接于腔体金属槽内，并通过金丝键合工艺进行连接。

如图 12 所示，空间信号经天线阵元接收后，首先经过两级低噪声放大，提高接收灵敏度；随后进入矢量调制器，实现射频信号幅度和相位的独立控制。相比传统移相器与衰减器组合方案，矢量调制器能够在较小芯片面积内同时实现幅相调节，有利于降低系统复杂度，提高阵列集成度。经过幅相调节后的信号[16-18]，通过宽带 1 分 2 功分芯片构成的 1 分 16 功合网络进行逐级合成，再经过一级低噪声放大、均衡以及功率调整后输出至后端馈电网络。



增益/dB	-0.3	19	19	-13	-3.2	19	-4	-6	-0.3
功率/dBm	-40.3	-21.3	-2.3	-15.3	-18.5	0.5	-3.5	-9.5	-9.8
NF/dB	2.2	1.5	1.5	13	3.2	1.5	4	6	0.3

图 12 接收模块链路原理框图及链路计算
Fig.12 Principle block diagram and link budget calculation of receiving module

为了评估接收链路性能，本文对各级射频器件的增益、噪声系数和输出功率进行了链路预算分析。

计算结果表明，当输入信号功率为-40dBm 时，单通道接收链路输出功率约为-9.8dBm，链路总噪声系数为 1.85dB，可实现 30.2dB 通道增益，同时输入三阶截点满足系统动态范围需求。该接收链路设计保证了阵列在 10～18GHz 宽频范围内具有稳定增益和较低噪声，为实现较高 G/T 指标提供了射频基础。

2.3 馈电网络设计

馈电网络负责将接收组件输出的多路射频信号进一步合成，并传输至后端变频模块。由于本文阵列覆盖 10～18GHz 宽频范围，馈电网络需要同时满足宽带匹配、低插入损耗以及高集成度要求。针对上述需求，本文设计了一种基于宽带功分芯片的 1 分 32 功合网络。该网络由 5 级宽带 1 分 2 功分器级联构成。相比传统基于微带威尔金森功分器的级联结构，采用宽带功分芯片能够有效减小网络尺寸，并降低宽频条件下传输损耗。馈电网络采用与接收模块一致的微组装工艺，将宽带功分芯片和微带软基板集成于金属腔体内部，并通过金丝键合完成射频互联。

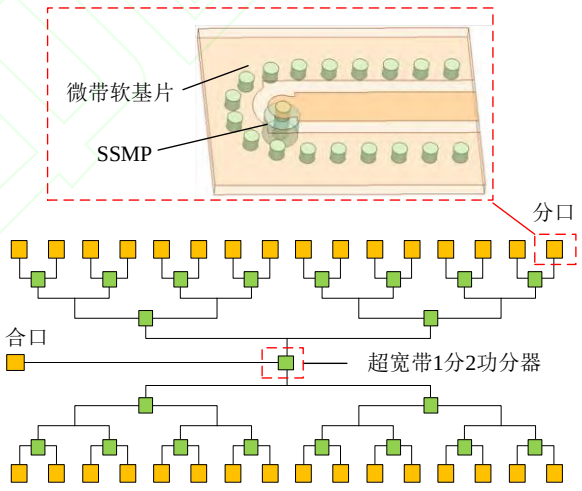


图 13 馈电网络原理框图
Fig.13 Principle block diagram of feeding network

为了降低系统纵向尺寸，馈电网络输入输出接口均采用垂直转接结构，通过 SSMP-KK 连接器与接收组件实现连接。测试结果表明，馈电网络各端口反射系数均低于-10dB，在扣除理想功率分配损耗后，整体插入损耗最高约为 4dB，满足宽带接收阵列信号合成要求。

2.4　波控及电源组件设计

快速波束切换能力是低轨卫星通信终端实现快速捕获和动态跟踪的重要指标。为满足高速运动卫星场景下的实时波束调整需求，本文将电源处理电路和数字波束控制电路集成于同一波控母板，实现系统的小型化和高可靠控制。

如图 14 所示，电源处理模块将外部输入的 28V 电压转换为射频芯片和 FPGA 所需的多路工作电压，包括 5V、1.0V、1.8V 以及 3.3V 等。波束控制模块主要由 FPGA、FLASH 存储器以及接口控制电路组成，用于完成外部控制指令解析、波束数据读取以及射频通道幅相控制。在波束切换过程中，FPGA 根据目标波束方向读取对应幅相控制码，并同步控制 256 个射频通道，实现快速波束重构。由于一次波束切换需要完成 256 次数据读取操作，每次 FLASH 随机读取时间约为 300ns，因此数据读取时间约为 76.8μs。考虑 FPGA 逻辑处理、接口通信以及其他控制开销，系统理论波束切换时间约为 86.8μs。

测试结果表明，该设计满足低于 100μs 快速波束切换要求，可有效支持低轨卫星高速移动条件下的动态波束跟踪。

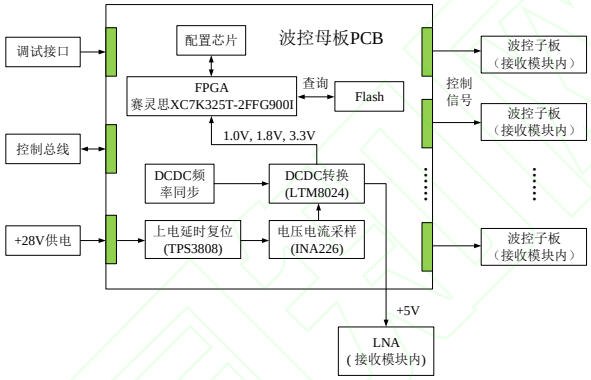


图 14　波控母版原理框图
Fig.14 Principle block diagram of beam control motherboard

3　相控阵天线测试

基于上述设计方案，研制完成了一套 X/Ku 波段双极化有源相控阵接收天线原理样机，其原理样机在微波暗室中的测试照片如图 15 所示。样机尺寸为 190mm×190mm×110mm，质量约 7kg。

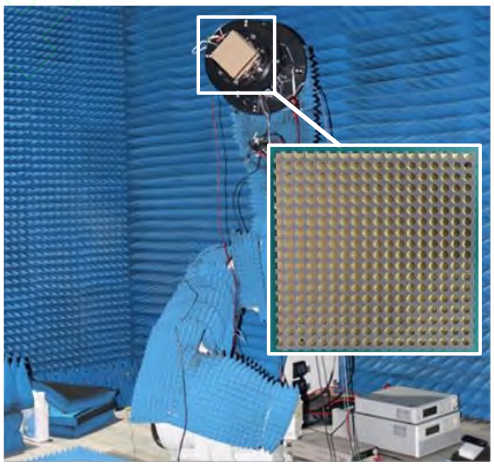


图 15　相控阵天线在微波暗室中的测试照片
Fig.15 Photograph of phased array measured in microwave anechoic chamber

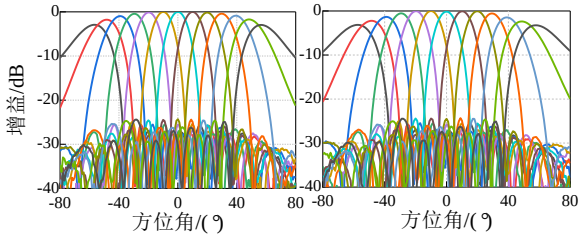
为验证所设计相控阵天线的宽带扫描能力、接收性能以及快速波束切换能力，本文在微波暗室中

开展了阵列通道校准、波束扫描方向图测试以及 G/T 性能测试。

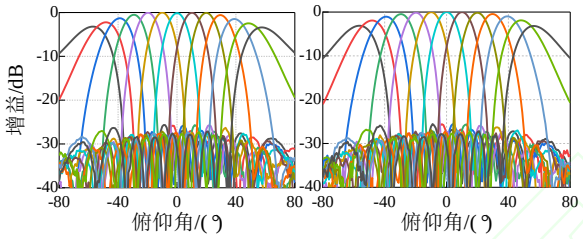
3.1 阵列校准与波束扫描性能测试

对于有源相控阵天线，通道间幅相误差会直接影响波束指向精度、副瓣电平以及阵列增益。因此，在开展阵列方向图测试前，首先采用远场校准方法对全部接收通道进行幅相校准。校准完成后，全阵通道幅度标准差控制在 0.5dB 以内，相位标准差控制在 3°以内，满足波束扫描及低副瓣工作的要求。图 16 给出了不同频率、不同极化状态以及不同扫描平面的实测方向图结果，按照法向增益归一化表示。测试过程中，阵列采用二维-28 dB 泰勒加权，以评估低副瓣工作能力。

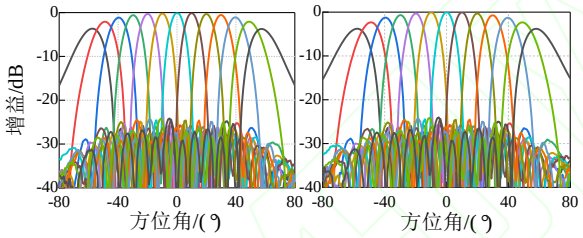
测试结果表明，该阵列在 10～18GHz 整个工作频带内均能够实现稳定波束扫描。其中：1）在 10～16GHz 频段，方位面和俯仰面扫描范围均达到±60°；2）在 10～18GHz 全频段，扫描范围均达到±50°。当扫描角达到±50°时，阵列增益下降小于 4dB；在 10～16GHz 频段扫描至±60°时，增益下降仍小于 4.5dB。同时，测试过程中未观察到明显扫描盲区，验证了紧耦合阵列和宽角匹配结构对于提升宽频大角扫描性能的有效性。此外，通过天线波束扫描方向图的测试结果统计结果，天线波束指向精度在法向小于±0.05°，在扫到最大角度满足指向精度小于±0.03°。



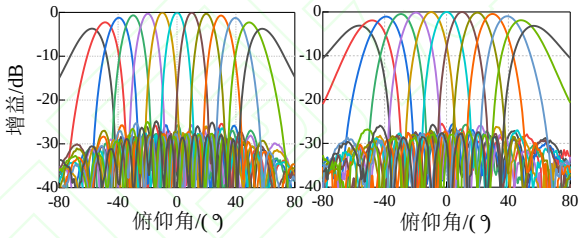
(a)V极化低频方位面　(b)H极化低频方位面



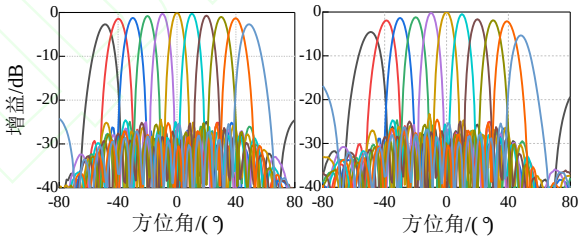
(c)V极化低频俯仰面　(d)H极化低频俯仰面



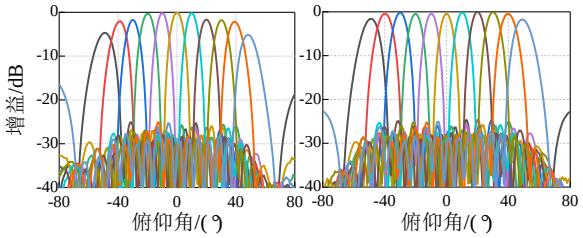
(e)V极化中频方位面　(f)H极化中频方位面



(g)V极化中频俯仰面　(h)H极化中频俯仰面



(i)V极化高频方位面　(j)H极化高频方位面



(k)V极化高频俯仰面　(l)H极化高频俯仰面

图 16 天线阵列波束扫描测试结果

Fig.16 Measured results of beam scanning for antenna array

3.2 G/T 性能测试

对于卫星通信接收阵列，天线增益噪声温度比（G/T）是衡量系统接收能力的重要指标。天线的设计 G/T 值由公式(2)计算所得：

$$G/T = G_{ant} - 10\log_{10}\left(T_{ant} + (F-1)T_0\right) \tag{2}$$

其中 G_{ant} 为天线阵列增益，T_{ant} 为天线阵面噪声温度，F 为接收链路噪声系数，T_0 为环境温度，取值 290K。G_{ant} 为天线阵面加二维-28dB 泰勒加权时的法向增益，根据设计结果，在 10GHz、14GHz 和 18GHz 三个典型频点，天线阵列增益分别为 23.3dB、26.4dBi 和 28.0dBi，通过 2.2 节的计算，系统噪声系数为 1.85dB。T_{ant} 通过计算约为 90K。对应理论 G/T 值分别为-1.1dB/K、2.0dB/K、3.6dB/K。

在微波暗室中，进行 G/T 值测试时，将频谱仪接在待测接收天线出口；将标准增益喇叭置于待测天线的远场区域并对准，并连接到信号源。测试 G/T 值采用的计算公式为：

$$G/T = P_{ont} - \left(P_{in} - L_{line} + G_{horn} - L_{air}\right) - N - 10\log_{10}(k) \tag{3}$$

其中 P_{out} 为信号源、接收天线均开电时频谱仪读数，L_{line} 为信号源到标准喇叭天线的线损，G_{horn} 为标准喇叭天线增益，L_{air} 为产品到标准喇叭口面之间的空间损耗，N 为接收天线开电、信号源不开电状态下的底噪；k 为玻尔兹曼常数。

经过暗室测试，阵列实测 G/T 结果分别达到低频-1.1dB/K、中频 2.2dB/K 和高频 3.9dB/K，测试结果与理论计算基本一致，验证了阵列天线设计、射频接收链路以及系统集成方案的有效性。

3.3 与已有卫星通信相控阵对比

由于 G/T 值主要由天线单元增益、馈线损耗、接收链路的噪声系数和阵元规模决定，天线单元与接收链路设计完成后，可以按照公式（4）来推算改变阵列规模 m_1 后相比原始阵列规模 m_0 的 G/T 值：

$$(G/T)_1 = (G/T)_0 + 10\log_{10}(m_1/m_0) \tag{4}$$

其中$(G/T)_0$为原始阵列规模的 G/T 值，$(G/T)_1$为改变阵列规模后的 G/T 值，为本文的阵列未来具有规模可扩展性。因此，可以通过公式(4)将其他阵列的 G/T 值归一化到相同阵列规模进行对比。

本文所设计相控阵天线与已有文献中的接收天线性能对比如表 1 所示，由此可见在波束扫描范围、G/T 值（已经通过公式 4 换算到本阵列规模）、副瓣电平等方面，与本文设计的接收相控阵天线指标接近。而本文所设计相控阵天线兼备超宽带的优势，具有更优的工程化应用条件。

表 1 本天线与相关文献天线的性能对比

Table 1 Performance Comparison Between the Proposed Antenna and Antennas Reported in References

天线	阵列规模	工作频带 (GHz)	极化	扫描范围	副瓣电平	法向GT (dB/K)	功耗/W	尺寸/mm×mm
[6]	256	10.7~12.7	双线极化	±70°	-18	5	27.2	197×222
[8]	1024	10.7~12.7	双线极化	±60°	-17	4	142	338×390
[9]	256	17.7~20.2	单圆极化	±70°	-12	-1	\	\
[10]	1024	17.7~20.2	双线极化	±70°	-11	2.1	122.9	224×252
[12] [13]	6144	/	单圆极化	±60°	-11	-1.47	\	448×448
本文	256	10~18	双线极化	±60°	-18	-1.1~3.9	60	190×190

4 结论

本文针对低轨卫星通信终端对宽频带、大角度覆盖以及快速波束切换的需求，提出了一种 X/Ku 波段超宽带宽角扫描双极化有源相控阵接收天线。该天线采用紧耦合双极化阵列实现 10～18GHz 超宽带工作，并结合砖式有源接收架构完成 256 阵元高集成设计。通过阵列结构、射频接收链路以及波

束控制系统协同优化，实现了宽频覆盖、大角扫描和快速波束切换能力。

测试结果表明，该阵列在 10～18GHz 范围内实现±50°稳定扫描，在 10～16GHz 范围内实现±60°扫描；扫描至±50°时增益下降小于 4dB，未出现明显扫描盲区。采用二维泰勒加权后，阵列法向副瓣电平低于-25dB，扫描副瓣电平低于-18dB。实测 G/T 值达到-1.1～3.9dB/K，波束切换时间小于 100μs。相比已有针对单一频段设计的卫星通信相控阵，本文方案通过超宽带紧耦合阵列与高集成有源接收架构结合，在有限阵元规模下实现了 X/Ku 跨频段覆盖和宽角扫描能力，为低成本、多功能低轨卫星通信终端提供了一种可行技术路径。

参考文献（References）

[1] AL-SAEDI H,ABDEL-WAHAB W M,RAEIS-ZADEH S M,et al. An integrated circularly polarized transmitter active phased-array antenna for emerging Ka-band satellite mobile terminals [J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2019,67(8):5344-5352.

[2] 梁晓莉，陈建光，姚源，等．国外低轨卫星互联网发展现状分析[C]//第十五届卫星通信学术年会论文集．北京，2019：19-22.
LIANG X L,CHEN J G,YAO Y,et al. Analysis of developments of foreign LEO satellite internet[C]//Proceedings of the 15th Annual Conference of Satellite Communications,Beijing,2019:19-22.(in Chinese).

[3] 钟顺林，谢瑞宏，樊星，等．Ka 频段商业卫星通信相控阵天线的研究[C] //2021 年全国天线年会论文集．宁波， 2021： 599-601.
ZHONG S L,XIE R H,FAN X,et al.Research Ka-band commercial satellite communications phased array antenna[C]//2019 National Conference on Antenna,Ningbo,2021:599-601.(in Chinese).

[4] 孙磊．低轨星地移动通信中的相控阵技术[J]．现代雷达，2023，45（9）：1-8.
SUN L.Phased array technology in the LEO satellite mobile communications[J].Modern Radar,2023,45(9):1-8.(in Chinese).

[5] ZHANG L K,WANG Y X,LI J Y,et al. Cavity-backed circularly polarized cross-dipole phased arrays[J].IEEE Transaction on Antennas and Propagation,2021,20(9):1656-1660.

[6] ALJUHANI A H,KANAR T,ZIHIR S,et al.A 256-Element Ku-band Polarization agile SATCOM receive phased array with wide-angle scanning and high polarization purity[J].IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2021,69(5):2609-2628.

[7] GULTEPE G,KANAR T,ZIHIR S,et al.A 1024-element Ku-band SATCOM phased-array transmitter with 45-dBW single-polarization EIRP[J].IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2021,69(9),4157-4168.

[8] GULTEPE G,KANAR T,ZIHIR S,et al.A 1024-element Ku-band SATCOM dual-polarized receiver with >10-dB/K G/T and embedded transmit rejection filter[J].IEEE Transactions on Microwave Theory and Theory and Techniques,2021,69(7), 3484-3495.

[9] ABDEL-WAHAB W M,AL-SAEDI H, HAJ MIRZA ALIAN E,et al.A modular architecture for wide scan angle phased array antenna for K/Ka mobile SATCOM[C]//2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium(IMS),2019,1076-1079.

[10] LOW K K W,KANAR T,ZIHIR S,et al.A 17.7-20.2-GHz 1024-element K-band SATCOM phased-array receiver with 8.1-dB/K G/T,±70° beam scanning and high transmit isolation[J].IEEE Transactions on Microwave Theory and Theory and Techniques,2022,70(3):1769-1778.

[11] 刘敦歌，金世超，崔喆，等．Ka 频段双极化低剖面卫通相控阵天线[J]．空间电子技术，2022，19（6）：42-47.
LIU D G,JIN S C,CUI Z,et al.Ka-band dual-polarization low profile phased array antenna for satellite communication[J].Space Electronic Technology,2022,19(6):42-47.(in Chinese).

[12] 何小峰，王永胜，朱贵德，等．Ka 频段双波束平板卫通相控阵天线设计[J]．电讯技术，2025，65（10）：1703-1709.
HE X F,WANG Y S,ZHU G D,et al. Design a Ka-band dual beam flat-panel phased array for satellite communication[J].Telecommunication Engineering,2025,65(10):1703-1709.(in Chinese).

[13] 何小峰．一种 K 频段双波束接收卫通相控阵天线[J]．电波科学学报，2024，39（6）：1160-1167.
HE X F.A K-band dual beam receiving phased array on satellite communication[J].Chines journal of radio science,2024,39(6):1160-1167.(in Chinese).

[14] JIANG Z G, XIAO S Q,YAO Z X.A planar ultrawide band wide-angle scanning tightly coupled array loaded with polarization-sensitive frequency-selective surface structure[J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019,68(11):7348-7357.

[15] ZHANG S H,CHEN Y K.An extremely wideband tightly coupled dipole array with shared-aperture configuration[J].IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2023,22(6),1366-1370.

[16] 黎剑．矢量调制器测试数据的分析及提数方法设计[J]．电子科学技术，2014，01（1）：109-112.
LI J.The measure and application of the vector modulator[J]. Electronic Science and Technology,2014,01(1):109-112.(in Chinese).

[17] 蒋东．一种高精度数控矢量调制器的设计[J]．压电与声光，2017，39（4）：535-538+543.
JIANG D. Design of high-precision digital-control vector modulator[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2017,39(4):535-538+543. (in Chinese).

[18] ZHANG D,ZHANG B,YU H, et al. A 45-75 GHz vector modulator MMIC with built-in voltage converter[J].IEEE Microwave and Wireless Components Letters,2017,27(5):515-517.