

一种L频段低剖面有源相控阵天线设计

陈璐, 王梓涵, 刘海勇, 郭萌, 陈天夫, 段振

西安航天天绘数据技术有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2024年3月21日; 录用日期: 2024年4月21日; 发布日期: 2024年4月30日

摘要

本文提出一种L频段低剖面有源相控阵天线, 天线阵面采用微带缝隙天线和二次圆极化布阵技术, 降低阵面高度, 提高天线轴比性能。天线有源链路采用平面布局和高密度一体化集成技术降低整机高度。天线整机高度 < 43 mm, 比同等性能的砖式相控阵天线高度降低41%, 实现了相控阵天线低成本、低剖面的设计目标。

关键词

L频段有源相控阵, 二次圆极化布阵, 低成本低剖面

Design of an L-Band Low Profile Active Phased Array Antenna

Lu Chen, Zihan Wang, Haiyong Liu, Meng Guo, Tianfu Chen, Zhen Duan

Xi'an Aerospace Remote Sensing Date Technology Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: Mar. 21st, 2024; accepted: Apr. 21st, 2024; published: Apr. 30th, 2024

Abstract

This article presents an L-band low profile active phased array antenna system. The antenna array adopts microstrip slot antenna form and secondary circular polarization array technology to reduce the height of the antenna system and improve the axial ratio (AR) performance. The antenna active links are integrated into one module using the planar layout and high-density integration technology. The maximum height dimension of the antenna system is lower than 43 mm. It reduced the height by 41% compared to brick phased array antennas with equivalent performance and achieved the low cost-low profile design of the antenna system.

Keywords

L-Band Active Phased Array, Secondary Circular Polarization Array, Low Cost-Low Profile



1. 引言

随着卫星通信业务发展, 天线在通信、导航、探测等无线信息传输系统中具有极为重要的价值, 电子设备逐步朝着高密度、小型化的方向发展, 对天线集成度及小型化设计提出了越来越高的要求[1]。相控阵天线和平板或抛物面天线相比, 天线高度较低, 天线波束扫描更加灵活, 波束切换速度快, 可实现同口径多波束扫描功能, 在卫星通信领域的应用日益广泛[2] [3] [4]。相控阵天线通过移相器和衰减器改变不同通道的相位和幅度的原理实现波束扫描赋型功能, 每个天线单元通道都需要对应一路移相衰减及放大滤波通道。由于移相功能、衰减功能、放大功能以及滤波功能都需要不同功能的分立器件实现[5] [6], 因此天线各通道所需分立器件较多, 天线系统整机尺寸较大, 高度较高。为了实现有源相控阵天线系统的小型化低剖面设计, 文献[7] [8] [9]提出了基于多通道波束成形芯片和 PCB 高密度集成技术实现的 Ka 毫米波频段有源相控阵天线, 文献[7]提出的有源天线阵面高度仅 3 mm, 文献[8]设计的 Ka 频段发射天线单 PCB 的厚度仅 1.5 mm, 能有效降低相控阵天线系统整机高度。文献[10] [11] [12]则应用不同工艺, SIP 或 SoC 技术对天线组件部分进行定制化设计, 以提高组件集成度降低整机尺寸。文献[10]提出了一种基于 LTCC 工艺的 X 频段低剖面有源相控阵雷达(AESA), 通过 LTCC 工艺实现 T/R 组件集成化设计, 实现相控阵雷达小型化设计, 组件高度为 20 mm。文献[11]提出了一种采用数模混合收发 SoC 技术实现的 S 频段大功率 T/R 组件设计, 收发变频和数模转换部分的有源链路采用 SoC 技术集成在一个封装芯片当中, 集成后组件高度为 68 mm。文献[12]提出了一种基于 SIP 技术的 L 频段 T/R 组件, 采用 SIP 技术实现组件小型化设计, 组件高度为 22 mm。

目前文献和专利暂未公开适用于 L 频段相控阵天线的通用化多通道相控阵芯片, 现有技术多采用 LTCC 集成工艺结合 SoC、SIP 技术等满足 L 频段有源相控阵天线低剖面设计需求, 但这些技术需要对产品或芯片进行定制化设计, 大规模使用时才能有效降低研制成本。为适应 L 频段有源相控阵天线低成本低剖面的应用需求, 本文提出一种 L 频段低剖面收发共口径有源相控阵天线, 应用平面铺排布局技术和高密度集成一体化技术降低有源相控阵天线高度, 天线整机最大高度不超过 43 mm, 组件高度 30 mm, 比同等性能的砖式相控阵天线高度降低 41%, 实现相控阵天线系统低成本低剖面设计。

2. 相控阵天线设计

2.1. 整机架构

L 频段低剖面有源相控阵天线由 3×3 天线阵列组成, 采用收发共口径设计, 接收天线和发射天线同频分时工作, 波束支持方位 360° , 俯仰 $\pm 30^\circ$ 扫描覆盖。天线整机由天线阵、收发组件、波控单元和功分/合路网络组成, 系统组成框图如图 1 所示。

为了实现天线整机的低剖面设计, 降低天线整机高度, 本文从天线单元形式和系统有源链路设计两方面入手对天线整机高度进行优化: 天线单元设计方面, 相控阵天线单元选用低剖面微带缝隙天线, 采用单馈点实现天线圆极化, 无源天线布阵采用二次圆极化布阵技术, 提高天线辐射轴比特性。天线有源链路设计方面, 设计了一种一体化收发组件, 将 9 路收发组件、波束控制单元和功分/合路网络高密度集成一体化设计, 进一步压缩天线整机高度。天线整机高度小于 43 mm, 外轮廓尺寸不超过 185 mm * 185 mm。

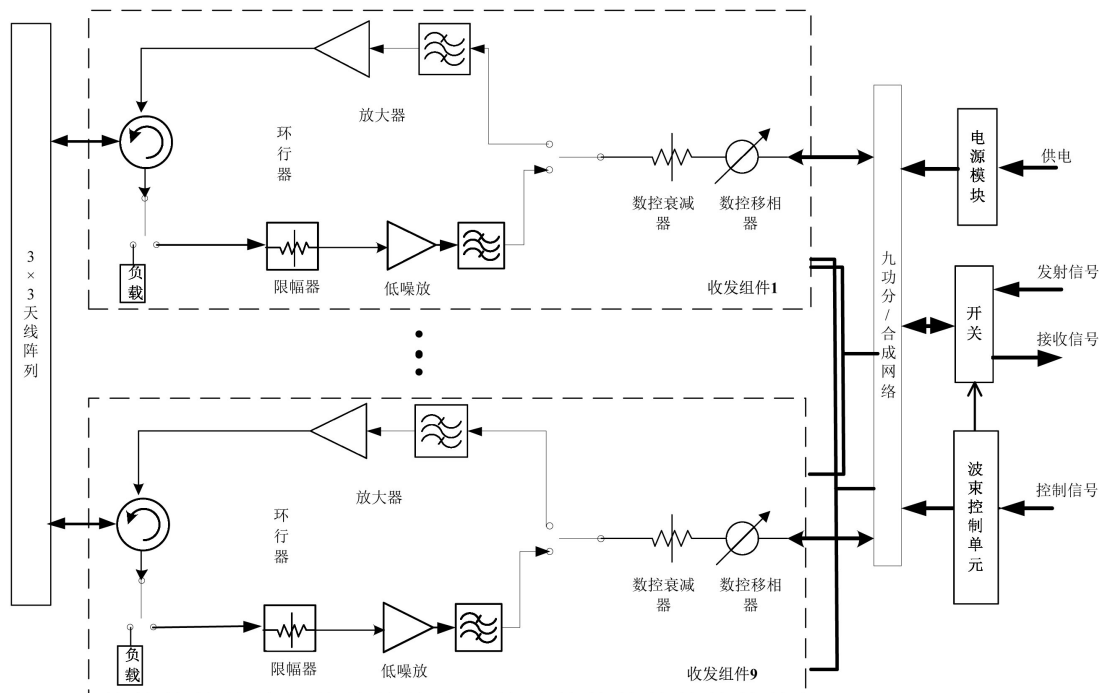


Figure 1. Block diagram of L-band phased active array antenna composition

图 1. L 频段有源相控阵天线组成框图

2.2. 天线阵面设计

L 频段低剖面相控阵天线，工作频段覆盖 1690 MHz~1770 MHz，扫描覆盖俯仰 $\pm 30^\circ$ ，可实现左旋圆极化信号接收和发射功能，针对天线的应用需求实现天线阵面低剖面设计，本文选择了具有良好低剖面特性的微带缝隙天线形式。图 2 为天线单元及天线布阵设计，天线单元采用单馈微带缝隙天线实现天线宽带圆极化性能，天线单元厚度 5 mm。天线阵面由 9 个单元按照 3×3 矩形布阵方式进行排布，为了进一步提高天线辐射轴比指标，拓宽天线轴比带宽，天线阵元采用顺序旋转馈电技术[13] [14]对天线阵面进行二次圆极化布阵设计。

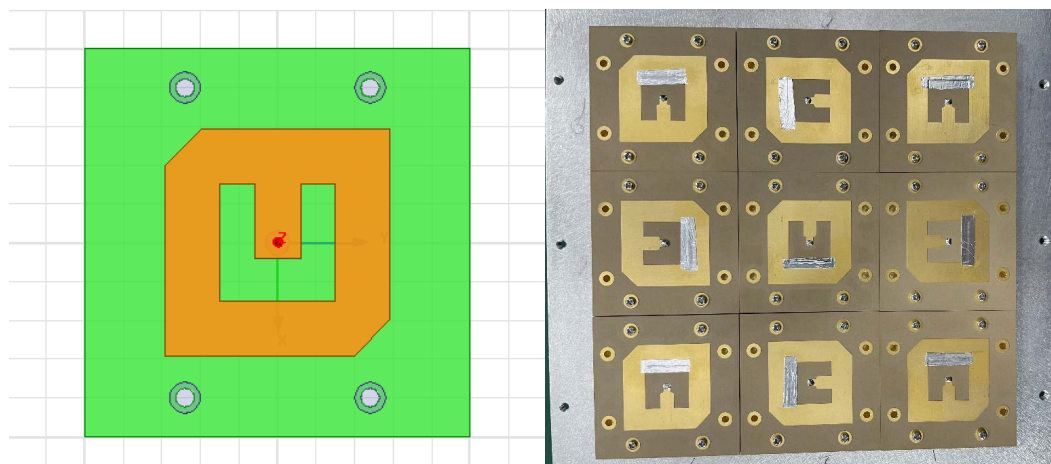


Figure 2. Design of antenna unit and array

图 2. 天线单元及布阵设计

2.3. 一体化收发组件设计

L 频段天线单元尺寸较大, 介质厚度较厚, 不适合和有源链路集成采用多层 PCB 压合的方式进行加工, 组件部分由于缺乏具有通用性的多通道相控阵芯片, 为实现低成本设计采用分立器件实现信号的放大、移相功能。传统的砖式相控阵天线往往采用纵向延伸布局实现天线有源链路的系统集成设计, 如图 3 所示, 收发组件按照一定通道数量设计为独立模块, 和合成网络之间采用线缆或接插件对插的方式进行连接[6]。天线整机高度较高, 安装在阵面内部的收发组件需依靠和周围组件的接触进行散热, 需采用预埋热管的方式提高内部组件的散热效果[9], 散热设计较为复杂, 成本较高。

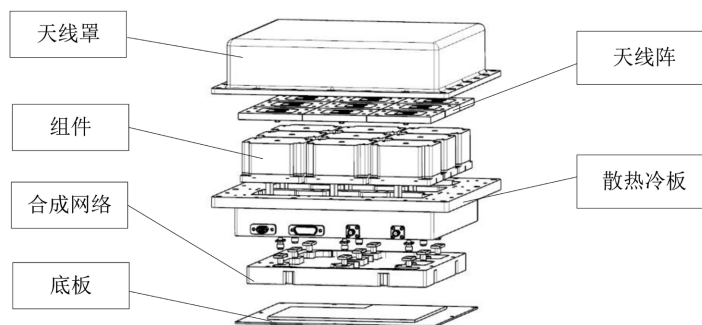


Figure 3. Vertically extended brick type phase array antenna
图 3. 纵向延伸布局的砖式相控阵天线

本文提出的 L 频段低剖面有源相控阵天线, 采用瓦式相控阵架构, 设计了一种低成本小型化高密度集成一体化收发组件, 如图 4 所示, 组件内部集成了 9 路收发移相衰减通道、功分/合成网络和波束控制单元。一体化收发组件采用价格低廉的分立式元器件进行搭建, 采用平面铺排的布局方式和 PCB 高密度集成一体化设计, 降低模块高度。一体化收发组件分为上下两个部分, 上层部分为一个独立 PCB, 集成接收组件、合成网络、波束控制单元, 器件采用平面铺排的方式进行布局设计, 有源链路采用多层 PCB 高密度集成技术实现接收组件电路、功分/合成网络、电源分配网络和波束控制网络的集成化设计; 下层部分为一块独立 PCB 同样采用平面铺排的布局方式实现发射组件功能。下层电路和上层电路采用 SMP 垂直盲插的方式进行连接, 减少模块之间的互联高度, 进一步压缩整机高度。

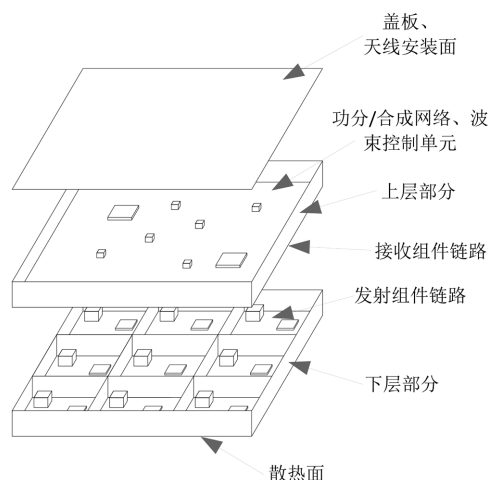


Figure 4. Structure diagram of T/R module
图 4. 收发组件结构示意图

收发组件的主要发热器件为发射组件部分的功率放大器，得益于组件链路的平面铺排设计特点，主要发热器件都可以紧贴收发组件的下表面结构件，利用收发组件的底部结构件进行散热，以提高收发组件的散热效率。只需要采用散热齿 + 风扇的散热方式即可实现相控阵天线的有效散热(图 5)，满足复杂温度环境下天线整机正常工作要求，相比于传统相控阵天线组件预埋热管解决中间组件散热问题的方法，平面铺排的收发组件不存在中间组件的传热效率低的问题，有效提高了整机的散热效率，降低了整机热控设计成本。

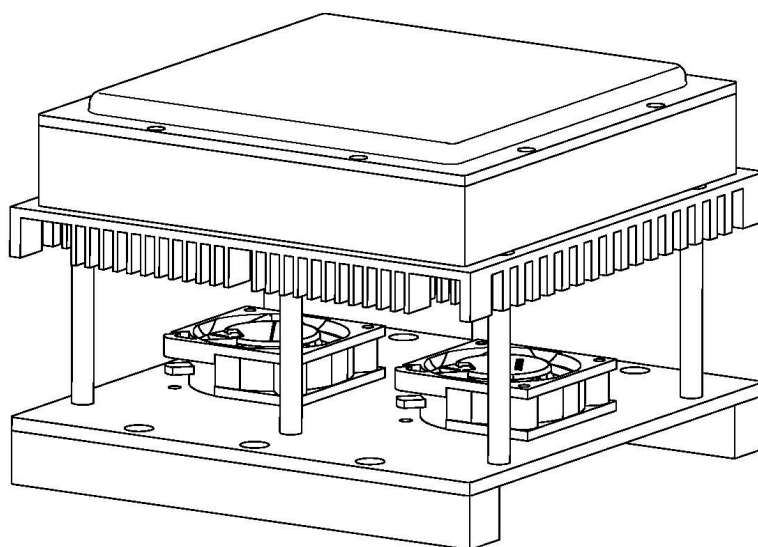


Figure 5. 3D module of heat exchangers

图 5. 散热方式三维模型

2.4. 天线实物及实测性能

图 6 为采用传统纵向布局砖式架构的 L 频段相控阵天线实物图片，整机高度 73 mm，图 7 为 L 频段低剖面有源相控阵天线实物图片，整机高度 < 43 mm，高度相较于同等性能的砖式架构的天线高度降低了 41%。



Figure 6. Photo of the L-Band brick type active phased array antenna with vertical extension

图 6. 纵向布局砖式架构的 L 频段有源相控阵天线实物图片



Figure 7. Photo of the L-Band low profile active phased array antenna
图 7. L 频段低剖面有源相控阵天线实物图

在暗室天线测试系统中对 L 频段低剖面有源相控阵天线方向图和轴比进行了测试。天线波束扫描覆盖 30° 时天线增益下降小于 1.5 dB，全频带扫描 $\pm 30^\circ$ 范围内增益下降小于 2.5 dB，天线增益测试曲线见图 8，详细统计数据见表 1。

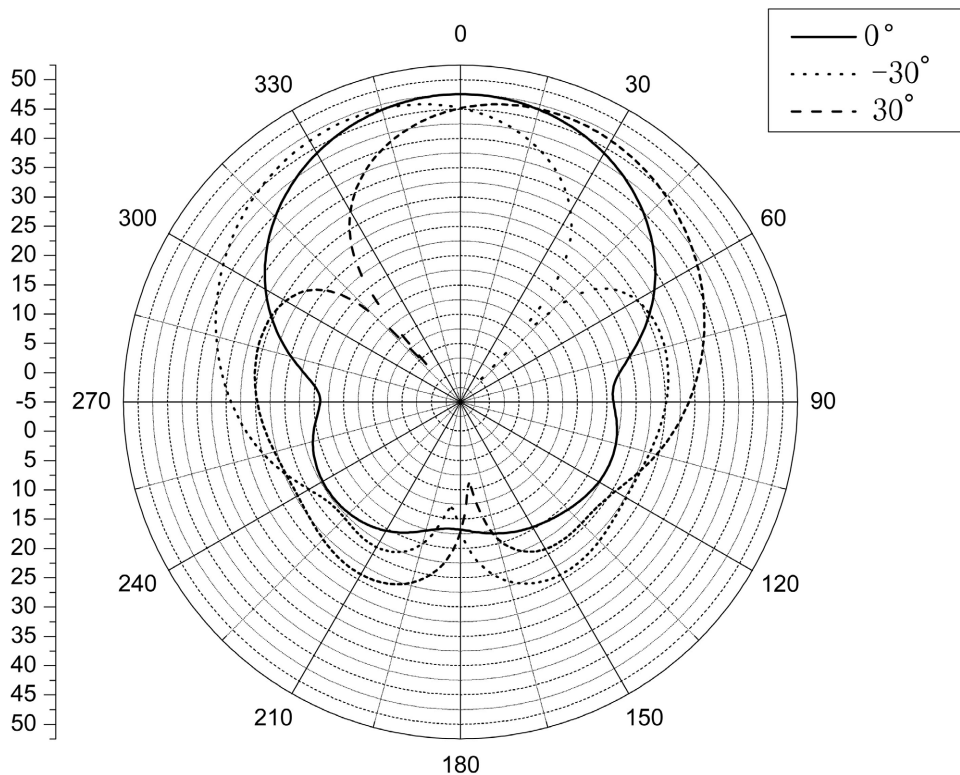
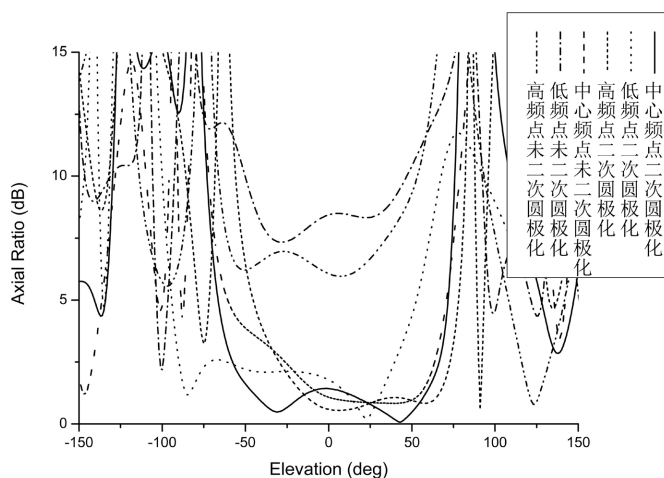
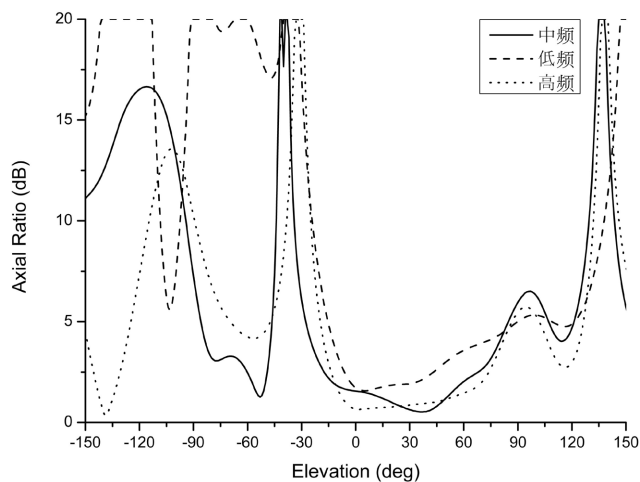


Figure 8. Test radiation patterns of the L-Band low profile active phased array antenna at different scanning angles (center frequency)
图 8. L 频段低剖面有源相控阵天线扫描方向图测试曲线(中心频点)

Table 1. Receiving active gain data of the antenna at different scanning angels**表 1.** 不同扫描角度的天线接收有源增益统计表

频率	扫描角度				
	0°	-15°	-30°	+15°	+30°
高	46.6	46.4	46	46.2	45.7
中	47.7	47.2	46.3	47	46.8
低	45.8	45.8	45.3	46.1	45.2

图 9 对比了波束指向为法向时，阵面二次圆极化布阵设计和未进行二次圆极化布阵设计的轴比测试指标，可以看出，阵面未进行二次圆极化布阵设计时，中心频点处的轴比指标较好优于 3.0 dB，但高低两个边频的轴比均较差高于 5.0 dB；阵面二次圆极化布阵设计后，三频轴比均优于 3.0 dB。图 10 为阵面二次圆极化布阵设计后，波束指向俯仰 30°方位 0°时的轴比测试曲线，高中低三频的轴比均小于 3.0 dB。可见二次圆极化布阵设计有效拓宽了天线的轴比带宽，提高了天线圆极化性能。L 频段低剖面有源相控阵天线扫描覆盖范围内全频段轴比性能优于 3 dB。

**Figure 9.** The testing Axis Ratio of different array arrangement (pointing normal direction)**图 9.** 不同布阵方式下的轴比测试曲线(波束指向法向)**Figure 10.** The testing Axis Ratio of the Secondary circular polarization antenna array (pointing El = 30°, AZ = 0°)**图 10.** 二次圆极化布阵设计后的轴比测试曲线(波束指向为俯仰 30°，方位 0°)

3. 小结

为适应电子设备高密度、小型化的发展需求,从相控阵天线低成本低剖面设计角度出发,本文提出一种 L 频段低剖面收发共口径有源相控阵天线,工作频段覆盖 1690 MHz~1770 MHz,全频带扫描增益平坦度优于 2.5 dB,轴比小于 3 dB,可实现天线接收 G/T (天线接收增益与系统噪声温度的比值) -17 dB/K,发射 EIRP (等效全向辐射功率) 26 dBW 的性能指标。天线整机最大轮廓不超过 185 mm * 185 mm * 43 mm,对 L 频段有源相控阵天线的应用发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 王萌. 基片集成波导宽带低剖面相控阵天线设计[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [2] 张光义. 共形相控阵天线的应用与关键技术[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5(4): 331-336.
- [3] 赵晖, 刘才瑞, 薛晟, 梁显锋. L 频段星载相控阵天线设计与实现[J]. 微波学报, 2022, 38(6): 10-18.
- [4] 郭超, 赵春柳, 鄢泽洪, 等. 一种 S 频段卫星通信相控阵天线设计[J]. 西安电子科技大学学报, 2018, 45(3): 175-180.
- [5] 万梦军. S 频段相控阵天线的研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 南京邮电大学, 2023.
- [6] Bentini, A., Attura, L., Visciglia, P., et al. (2017) A C-Ku Band, 8 Channel T/R Module for EW Systems. 2017 *IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems (COMCAS)*, Tel-Aviv, 13-15 November 2017, 1-4. <https://doi.org/10.1109/COMCAS.2017.8244719>
- [7] 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.
- [8] Low, K.K.W., Zahir, S., Kanar, T. and Rebeiz, G.M. (2022) A 27-31 GHz 1024-Element Ka-Band SATCOM Phased-Array Transmitter with 49.5-dBW Peak EIRP, 1-dB AR, and $\pm 70^\circ$ Beam Scanning. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **70**, 1757-1768. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2021.3139911>
- [9] 张伟伟, 蔡文炳, 梁亚娟, 等. 一种小型化有源相控阵天线设计与测试[J]. 数字通信世界, 2023(2): 80-83.
- [10] Ko, E., Znazi, N. and Altunta, F. (2022) High-Performance Miniaturized Quad T/R Module for X-band Low-Profile AESA. 2022 *19th European Radar Conference (EuRAD)*, Milan, 28-30 September 2022, 309-312.
- [11] 崔敏, 雷国忠, 王洁, 等. 一种 S 波段大功率 4×4 瓦片式数字 T/R 组件设计[J]. 微波学报, 2021, 37(5): 58-62.
- [12] 徐海飞, 蒋福生, 杨阳, 等. 一种基于 SIP 技术的多通道 L 波段 T/R 组件设计[J]. 电视技术, 2022, 46(1): 26-31.
- [13] 罗斯琪, 胡俊, 江婷, 李黄炎, 吴文. 采用顺序旋转技术的紧凑型异构 OAM 阵列天线[C]//中国电子学会. 2023 年全国天线年会论文集(中). 2023: 179-181.
- [14] Xu, J., Luk, K.-M. and Hong, W. (2023) Low-Profile Wideband Circularly Polarized Complementary Antenna and Arrays for Millimeter-Wave Communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **71**, 2052-2063. <https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3233647>