

导读:为了应对未来移动通信、新体制雷达、物联网、航空航天信息技术等的飞速发展,作为其中关键技术的射频微波技术,也应从设计理论、仿真方法、工程应用和测试系统等方面不断地取得新进展、新突破、新发明。为了加强国内同行在射频微波领域的学术交流,促进微波技术应用水平的提高,《电子技术应用》杂志2020年第12期和2021年第1期推出“射频与微波”主题专栏,论文内容涵盖毫米波低成本有源相控阵天线、微波近场矢量测量技术、RFID-OTA测试的射频开关箱和无芯片标签设计技术等。本专栏论文都具有鲜明的工程应用背景,接触前沿技术应用,期待与读者互相切磋借鉴,共同提高我国的微波应用水平。本期将刊出上半部分。



特约主编:谢拥军,北京航空航天大学电子信息工程学院教授,博士生导师。主要研究方向为天线与微波技术、计算电磁学及其应用、电磁兼容等。目前主持多项国家纵向和企业横向科研项目。发表学术论文200余篇(其中SCI论文70余篇),主编(或参编)《HFSS原理与工程应用》、《简明微波》等专著8本。

一种低成本 Ka 波段瓦片式有源相控阵天线

刘雪颖

(成都瑞迪威科技有限公司,四川 成都 611731)

摘要:提出了一种低成本、瓦片式 Ka 波段有源相控阵天线。该相控阵天线系统采用三维集成的方式将 CMOS 多功能芯片、GaAs 芯片、天线阵列以及功分网络等集成在一块微波多层板上,极大地降低了整体高度。通过射频垂直互联以及低频插针实现相控阵天线射频部分与变频模块、波控模块和电源模块等部分互联。测试结果表明,在 Ka 频段内,该有源相控阵天线在所有平面内均实现了 $\pm 25^\circ$ 的扫描范围下可获得 7.7%的带宽,且扫描范围内增益变化平稳,变化小于 1 dB,副瓣电平优于 14.5 dB。整个有源相控阵的整体高度小于 52 mm,发射 ERIP 达 66 dBm,接收 G/T 大于 7.55 dB/K,收发切换小于 150 ns。综上,该瓦片式有源相控阵天线具有高集成度、小型化、低成本等特点,有着很高的工程应用价值。

关键词:低成本;瓦片式;有源相控阵天线;Ka 波段;CMOS 多功能芯片

中图分类号:TN82

文献标识码:A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.200493

中文引用格式:刘雪颖.一种低成本 Ka 波段瓦片式有源相控阵天线[J].电子技术应用,2020,46(12):1-4,8.

英文引用格式:Liu Xueying. A low-cost millimeter wave Ka-band active phased array antenna[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(12): 1-4, 8.

A low-cost millimeter wave Ka-band active phased array antenna

Liu Xueying

(RDW Technology Co., Ltd., Chengdu 611731, China)

Abstract: In this paper, a low-cost, tiled millimeter wave active phased array antenna (APAA) is presented. The APAA integrates CMOS multi-function chips, GaAs chips, antenna array and power division network on a microwave multilayer print circuit board by a three-dimensional integration technology, then the height of the APAA has sharply decrease. The RF part of the APAA is interconnected with the frequency conversion module, wave control module and power supply module through the vertical interconnection of radio frequency and low frequency pins. The measured results show that the APPA can achieve 7.7% bandwidth in a scanning range of $\pm 25^\circ$ in all planes in Ka-band, and the gain changes smoothly in the scanning range, less than 1 dB gain variation, and the sidelobe level is better than 14.5 dB. The APPA has low profile of 52 mm, ERIP is larger than 66 dBm, G/T is better than 7.5 dB/K, and the transceiver switch time is less than 150 ns. In summary, this tiled active APAA has characteristics of high integration, miniaturization and low cost, and has high engineering application value.

Key words: low-cost; tiled; active phased array antenna; Ka-band; CMOS multi-function chips

0 引言

由于相控阵天线具有精度高、扫描速度快、灵活的波束成形能力等优点,近年来在不同系统中已获得广泛研究和应用,如雷达、电子战和卫星通信系统。

按集成方式分类,相控阵天线可以分为横向集成的“瓦片式”结构和纵向集成的“砖块式”结构。相对于传统的砖块式相控阵的重量大、厚度高、尺寸大等特点,新的瓦片式相控阵天线有着重量低、体积小、易于与平台集成共形等特点^[1-2]。但是其设计难度和加工工艺的复杂度也增大了很多。由于瓦片式结构是基于三维微波集成电路的新一代 TR 组件结构,使用多层构架,通过垂直互联技术将射频、控制信号和电源整合连接。因此瓦片式结构已成为当今相控阵天线的发展主流。

另一方面,随着无线通信技术的飞速发展,低频无线频谱资源逐渐趋于枯竭。微波毫米波由于其波长短、带宽宽、干扰小等优点,能提供更高的传输速率,受到广泛的关注^[3]。

综上所述,毫米波相控阵天线已成为当前天线微波领域内的研究热点。民用领域也对毫米波天线的产业化需求非常迫切,但是相控阵天线的成本严重制约着其应用范围^[4]。文献[5]介绍了一种应用于 X 频段的瓦片式 TR 组件,主要采用了倒装芯片、毛纽扣、多层基板实现集成。然而因为毛纽扣的装配要求高,使用比较局限,不利于大面积生产及返修。

本文提出了一种瓦片式、Ka 波段相控阵天线。所提出的相控阵天线采用三维集成的方式将天线单元、TR 组件以及功分网络等集成在一块微波多层板上。高频信号互连使用射频垂直互连实现,低频互连使用低频插针实现。天线、TR 组件和馈电网络之间省去了连接器,既节省了连接器的费用,也释放了空间,易于大规模集成。通过样机测试结果验证了方案的先进性,该相控阵天线具有高集成度、小型化、低成本等优点。

1 片式相控阵天线的架构

相控阵天线主要由辐射天线、TR 组件、馈电网络、电源组件、波控组件、变频组件以及结构件(含连接器、散热装置)等组成,如图 1 所示。其中,TR 组件是相控阵

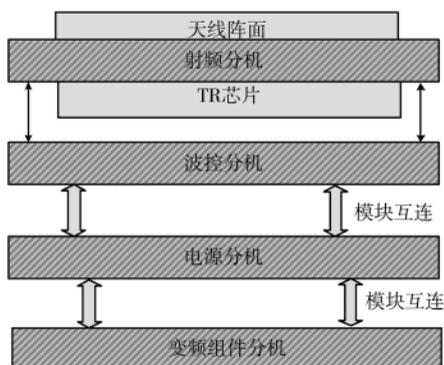


图 1 该相控阵天线前端架构

天线的核心部分,对于一个 320 单元的脉冲体制相控阵天线,TR 组件的成本约占据整个相控阵天线成本的 53%^[6]。另一方面,射频芯片的成本约占相控阵天线中材料成本的 54%^[7]。因此,要设计低成本的相控阵天线,首要的是简化相控阵天线的架构,提高芯片集成度。瓦片式相控阵天线可以大幅度减少 PCB 板材和连接器数量,并能通过大规模微波制造技术和封装工艺使其成本降低,其成本甚至可以做到只有砖式相控阵天线成本的 1/5^[6]。

本文所采用的相控阵架构如图 2 所示。该相控阵采用的器件均为商业化产品。利用单片集成的 4 合 1 的多功能芯片与微带天线一体设计的方式实现瓦片式集成。

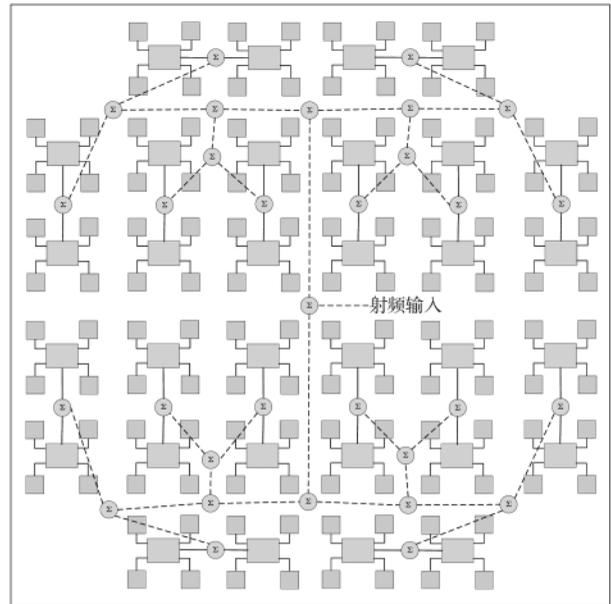


图 2 基于 4 通道 TR 芯片的相控阵天线架构

天线阵面在最外表面,TR 组件、馈电网络、波控网络、电源网络均在多层 PCB 板上。该多层板是基于低成本泰康利 TSM-DS3 材料设计的。整个 PCB 由 16 层金属堆叠,内部具有通孔和盲孔等。天线辐射贴片通过同轴探针馈电。馈电网络采用带状线功分器设计。总共 32 个 CMOS 多功能收发芯片放置在 PCB 的底层,并通过微带传输线连接到天线的馈电点和馈电网络。PCB 器件布局 and 走线采用镜像设计,从馈电(总口)点到每个芯片的电线长度是等长的。利用 SMT(表面贴装技术)将多功能封装芯片焊接在 PCB 上。

2 4 通道 TR+GaAs 的合封芯片

TR 组件的核心部分为芯片,主要为硅基多功能芯片以及 GaAs 收发芯片。采用的多功能芯片为 2×2 的四通道 TR 收发芯片(Tx/Rx),该架构与文献[8]中介绍的内容类似(为简洁起见,未显示)。在硅基多功能芯片以及 GaAs 收发芯片的基础上,使用 Fan_out 的方式进行混合封装,实现硅基芯片与 GaAs 芯片的一体化封装,一颗该封装

芯片可以实现4个通道的收发馈电。该合封芯片的指标如表1所示。每个Ka波段波束形成器包含4个Tx/Rx通道,每个通道包含一个6位移相器、5位可变衰减器、一个PA和LNA。收发芯片每个发射通道具有P1dB输出功率20 dBm,接收通道有24 dB增益。数字控制该芯片通过串行接口(SPI)实现。

表1 2×2 TR+GaAs的合封芯片指标

指标	Tx	Rx
增益/dB	22	24
输出功率/dBm@P1dB/@Psat	20	/
噪声系数/dB	/	6.5
可变增益/位数	0~31 dB/5 bit	
移相器位数	6 bit	

3 单元天线设计

图3为所提出的SIW背腔天线单元的三维(3D)示意图。对于相控阵,天线单元之间的间距非常重要。大间距将导致扫描栅瓣出现;小间距又会引起辐射方向图恶化和天线效率降低,因为小间距时单元天线之间的耦合很强,从而导致输入端口不匹配。为了避免扫描栅瓣,要求单元的间距应满足:

$$d \leq \lambda_0 / (1 + \sin\theta_{\max}) \quad (1)$$

其中, λ_0 是工作频率的自由空间波长, θ_{\max} 是最大扫描角。因此,为保证在扫描方向上不出现栅瓣,根据所提出的相控阵天线的最大扫描角度为 25° ,选取单元间距约为5.5 mm。

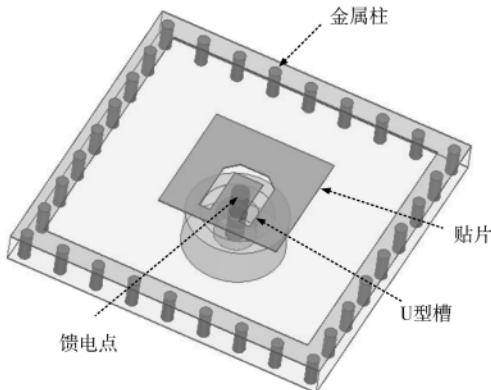


图3 单元天线的3D模型

如图3所示,为降低成本,该贴片天线仅使用单层高频基板实现。该天线由1层贴片和1个SIW腔,以及同轴馈电组成。贴片采用U型槽设计,既可以引入一个谐振点,用来扩展天线带宽;又可以调整馈电位置,使得天线馈电点位于天线单元中心位置。单元天线的四周由金属化过孔作为其侧壁形成的SIW腔。该SIW腔通过周围的金属化通孔来抑制表面波传输,实现宽角扫描特性。此外,也可减少相邻天线单元之间的相互耦合,从而改善天线的辐射性能。

《电子技术应用》2020年第46卷第12期

图4和图5显示了单元天线的端口 $|S_{11}|$ 、法向增益和方向图。图4中显示该天线的阻抗带宽($|S_{11}| < -10$ dB)为7.7%(33.9~36.3 GHz),工作频带内单元天线的增益在6.9 dBi~7.4 dBi之间。图5为单元天线在中心频点35 GHz的2个主剖面的方向图。

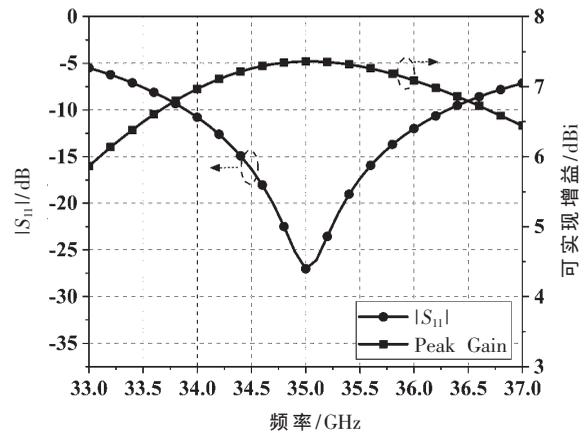
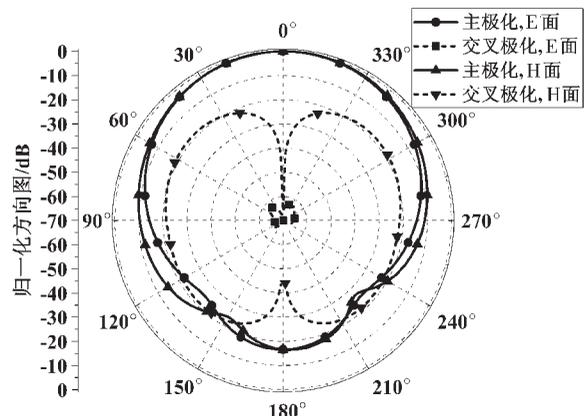
图4 天线的 $|S_{11}|$ 和增益

图5 35 GHz 方向图

4 相控阵天线测试

研制的128单元的瓦片毫米波相控阵天线样机如图6所示,采用三维方式集成了天线阵列、TR通道、馈电网络、电源网络、波控网络和变频组件等,降低了相控阵天线整体厚度,尺寸仅为93 mm×93 mm×52 mm,从而

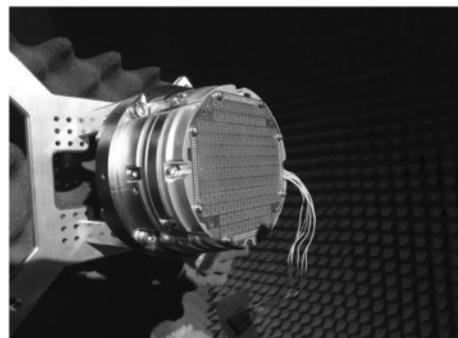
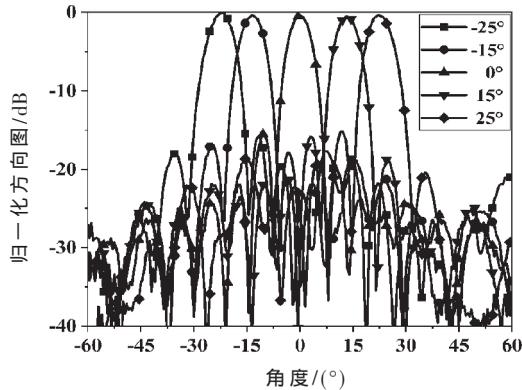
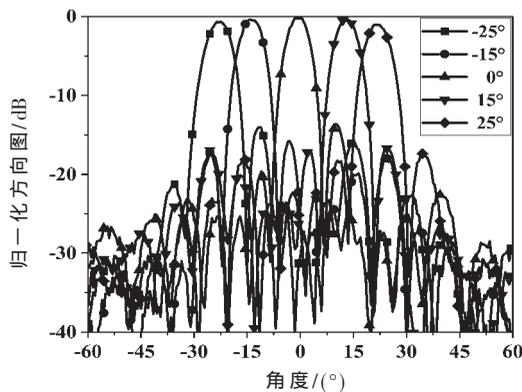


图6 128单元瓦片式毫米波相控阵天线样机

能够满足低成本、轻薄和模块化的要求。该相控阵天线经过平面近场测试系统(由RDW Technology Co., Ltd.制造)进行诊断和校准。远场暗室测试结果如图7~9所示,通过远场测试系统(满足 $2D^2/\lambda$ 的远场条件)对相控阵天线的一些关键指标进行测试。该相控阵天线发射和接收状态下,在35 GHz下的E面和H面的实测主极化扫描方向图如图7和图8所示。图7显示了扫描范围内,增益下降小于1 dB,其副瓣电平优于14.5 dB,在俯仰向(E面)和方位向(H面)的法向波束宽度均为 6.5° 。图9显示了

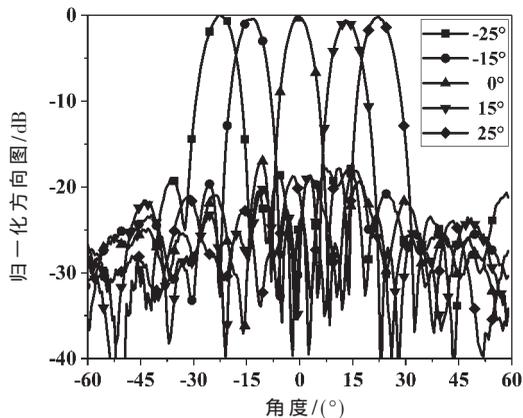


(a) E面主极化方向图

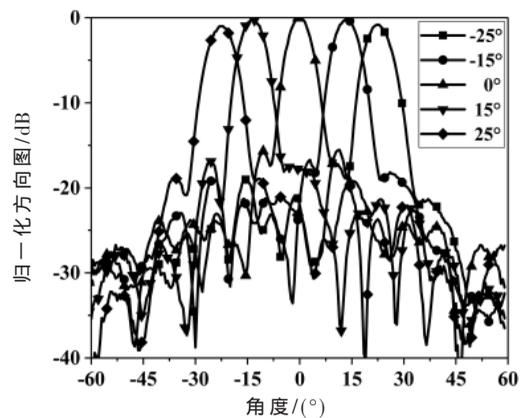


(b) H面主极化方向图

图7 发射状态下阵列天线在35 GHz的E面和H面扫描方向图

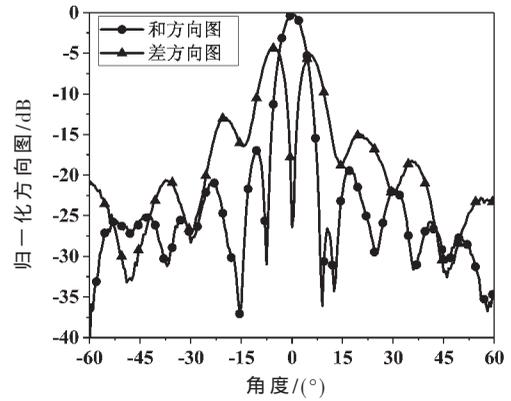


(a) E面主极化方向图

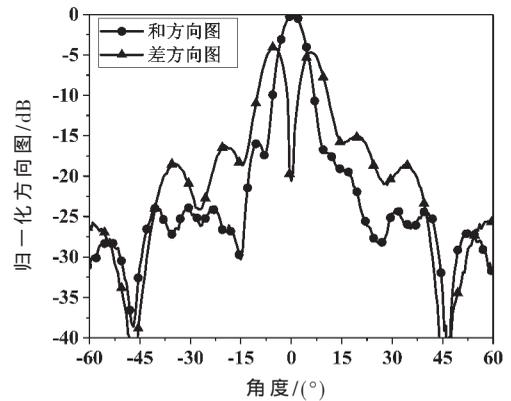


(b) H面主极化方向图

图8 接收状态下阵列天线在35 GHz的E面和H面扫描方向图



(a) E面和、差方向图



(b) H面和、差方向图

图9 接收状态下阵列天线在35 GHz的E面和H面法向和、差方向图

在接收状态下,35 GHz的和、差方向图测试结果,曲线显示零深均大于20 dB。

整机等效各向同性辐射功率 EIRP 由式(2)给出:

$$\begin{aligned} \text{EIRP}_{-1\text{dB}} &= 20\log N + G_{\text{ant}} + P_{\text{single}} \\ &= 42.14 + 4 + 20 = 66.14 \text{ dBm} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, N 为单元个数, G_{ant} 为单元天线的增益, P_{single} 为单通道输出功率。

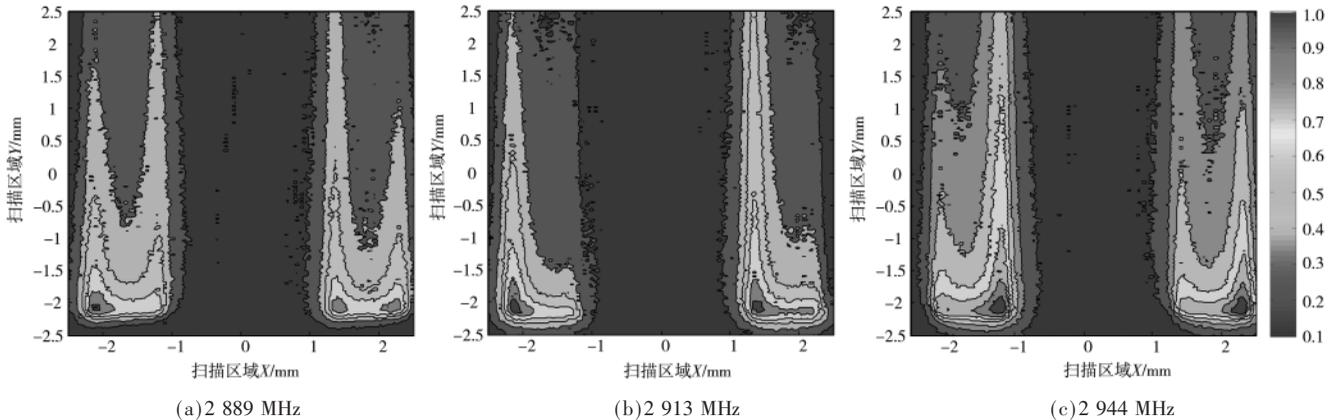


图4 不同共振频率下微带天线部分近场微波磁场分布结果

金刚石中各 NV 轴向敏感的微波频率。在 ODMR 谱峰所对应的微波频率下进行拉比振荡过程,以及器件的矢量场扫描成像。文中通过微带天线扫描成像验证了该技术的理论基础和可行性。综上所述,该方法拥有分辨率高、干扰小、完全的磁场敏感、工作频率宽的优点,可广泛用于天线的表征、芯片的电磁兼容测试、数字电路信号完整性分析等。

目前为止,该技术主要用于近场磁场的表征,对于以电场为主的芯片部位仍无法分析。未来研究工作的主要方向是研制具有近场电场探测能力的金刚石 NV 色心集成探针,用于充分表征芯片表面的电流和电荷分

布,了解芯片不同部位的电场耦合情况。与此同时,结合 FPGA 等技术实现整个测试系统的小型化,进一步提高该技术的实用性。

参考文献

- [1] APPEL P, GANZHORN M, NEU E, et al. Nanoscale microwave imaging with a single electron spin in diamond[J]. *New Journal of Physics*, 2015, 17(11): 112001–112006.
- [2] HORSLEY A, APPEL P, WOLTERS J, et al. Microwave device characterization using a widefield diamond microscope[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(4): 4039–4048.

(下转第 13 页)

(上接第 4 页)

系统品质因数 G/T 由式(3)给出:

$$G/T = 10 \log N + G_{\text{ant}} + 10 \log \frac{1}{290 \times 10^{NF/10}} \\ = 21.07 + 4 - 32.6 = -7.55 \text{ dB/K} \quad (3)$$

其中, N 为单元个数, G_{ant} 为单元天线的增益(含芯片输出端到天线输入端的损耗), NF 为单通道噪声系数。

此外波束切换执行时间仅为 150 ns。

5 结论

本文介绍了一种工作在 Ka 频段的低成本瓦片式相控阵天线。该天线实现 128 单元的辐射通道集成,体积仅为 93 mm×93 mm×52 mm,重量仅为 0.8 kg。该系统的 ERIP 优于 66 dBm, G/T 优于 -7.55 dB/K,收发切换时间小于 150 ns。实测结果表明,该相控阵天线前端系统适用于微波、毫米波频段,相比传统的相控阵天线,具有更低的剖面 and 成本,具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 彭祥龙. 相控阵天线集成技术[J]. *微波学报*, 2010, 26(1): 725–728.
- [2] 赵怡, 桂进乐, 李骥, 等. 一种瓦片式 T/R 组件的研制[C]. 2019 年全国微波毫米波会议, 2019: 750–752.
- [3] 李吉浩, 李益兵, 陈志新, 等. 毫米波通信 64 单元瓦片相

控阵天线研究[J]. *微波学报*, 2018, 34(1): 99–102.

- [4] 周志鹏. 毫米波有源相控阵天线技术[J]. *微波学报*, 2018, 34(1): 1–5.
- [5] HA J H, MOON J Y, LEE K W, et al. A Design of X-band tile type active transmit/receive module[J]. *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, 2010, 21(12): 1467–1474.
- [6] 何庆强. 低成本有源相控阵天线研究[J]. *微波学报*, 2019, 35(1): 44–48.
- [7] HAUHE M S, WOOLDRIDGE J J. High density packaging of X-band active array modules[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part B*, 1997, 20(3): 279–291.
- [8] KIBAROGLU K, SAYGINER M, REBEIZ G M. A low-cost scalable 32-element 28-GHz phased array transceiver for 5G communication links based on a 2×2 beamformer flip-chip unit cell[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2018, 53(5): 1260–1274.

(收稿日期: 2020-06-12)

作者简介:

刘雪颖(1976-),女,硕士,工程师,主要研究方向:卫星通信及相控阵天线阵面集成技术。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所