

2022年度十大天线技术进展



Top Ten Antenna Technology Advances in 2022

张跃平/ZHANG Yueping

(南洋理工大学, 新加坡 639798)

(Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202302013

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20230411.1321.006.html>

网络出版日期: 2023-04-11

收稿日期: 2023-01-16

摘要: “十大天线技术进展”旨在遴选、记录天线领域的年度标志性成果。在广泛征集中国天线产学研界多位专家的意见后, 整理出了2022年度十大天线技术进展, 其中有九大天线技术来自中国。分别介绍了这些天线技术的技术特点和优势。认为在天线开发应用方面, 中国后来居上。指出天线强则国家强, 国家强则天线强。

关键词: 无线输能天线; 大规模多输入多输出天线; 太空卫星阵列天线; 滤波天线; 封装天线

Abstract: The "Top Ten Antenna Technology Advances" aims to select and record annual landmark achievements in the antenna field. After extensively soliciting the opinions of multiple experts from the antenna industry, university, and research community in China, the top ten antenna technology advances in 2022 are selected, including nine antenna technologies from China. The technical characteristics and advantages of these technologies are analyzed separately. It is believed that in terms of antenna development and application, China has come from behind. It is pointed out that if the antenna technology is strong, the country will be strong, and if the country is strong, the antenna technology will be strong.

Keywords: wireless power transmission antenna; massive multi-input multi-output antenna; space satellite array antenna; filter antenna; encapsulated antenna

天线随处可见, 与人们的生活息息相关。它镶嵌在手机内, 提供全新的、高品质用户体验; 它安装在汽车上, 为安全保驾护航。

天线也会架设在丛山峻岭中, 仰望星空, 探索着宇宙的起源。天线更会遨游在太空中, 俯瞰浩瀚的海洋与苍茫大地, 用电波“激励”着你我他。

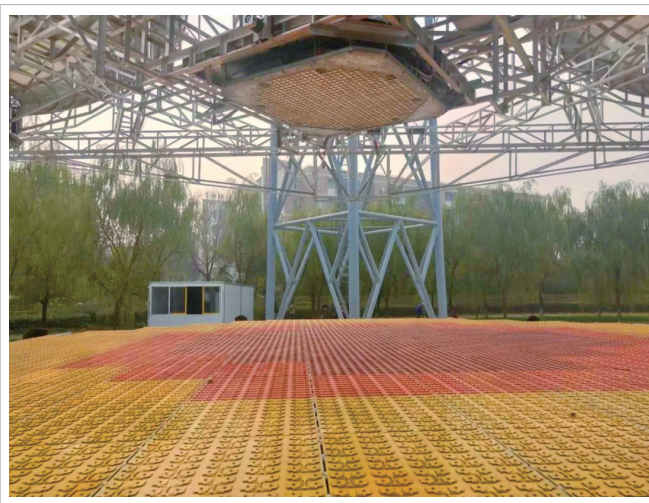
天线的应用层出不穷。新应用、新需求为天线研发者带来新的挑战。每当挑战得到克服, 天线技术就会取得进步。

基于公开发表的信息, 在广泛征集中国天线产学研界多位专家的意见后, 本文整理出2022年度十大天线技术进展, 供大家参考。

1 “逐日工程”微波发射天线、接收与整流天线

由西安电子科技大学段宝岩院士牵头研制的全链路、全系统空间太阳能电站地面验证系统, 于2022年6月15日通过验收, 如图1所示。该验证系统主要包括五大子系统: 欧米伽聚光与光电转换、电力传输与管理、微波发射天线、接收与整流天线、控制与测量。其工作原理是: 首先根据太阳高度角确定聚光镜需要倾斜的角度, 在接收到聚光镜反射的

太阳光后, 位于聚光镜中心的光伏电池阵, 将其转化为直流电能。随后, 通过电源管理模块, 4个聚光系统转换得到的电能汇聚到中间发射天线。经过振荡器和放大器等模块, 电能被进一步转化为微波。微波以无线传输的形式被发射到接收天线。最后, 接收天线将微波整流, 再次转换成直流电, 供给负载。

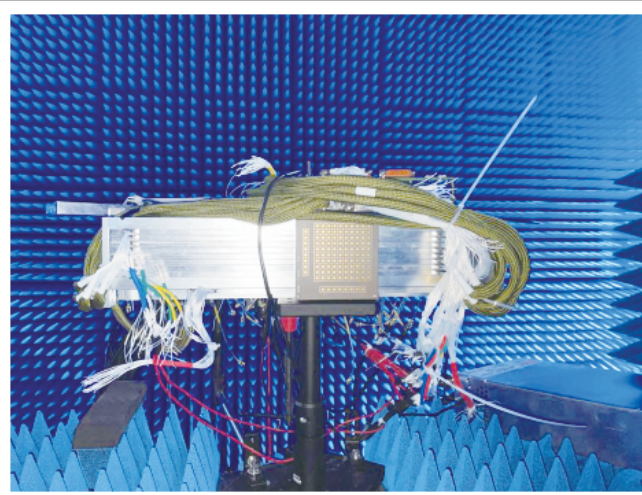


▲图1 “逐日工程”地面验证系统

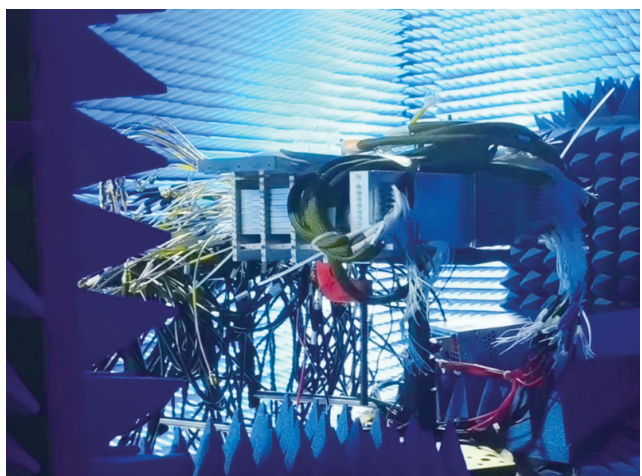
2 非对称全数字大规模MIMO有源阵列天线

众所周知, 1G、2G 移动通信基站采用的是扇形波束单天线技术, 即单输入单输出 (SISO) 架构。3G、4G 开始采用多天线技术, 即多输入多输出 (MIMO) 架构。而 5G 则采用基于混合多波束有源阵列天线的大规模 MIMO 技术, 在频分、时分、码分的基础上继续挖掘空间资源, 以有效提升系统容量。大规模 MIMO 技术的核心是多波束有源阵列天线。大规模全数字多波束阵列天线架构是最佳方案, 但面临系统复杂度、功耗、成本、海量数据实时处理等一系列瓶颈问题。因此, 5G 退而求其次采用了基于相控子阵的混合多波束方案。为了进一步大幅提升系统容量, 同时解决上述瓶颈问题, 面向 6G, 东南大学洪伟教授团队于 2019 年提出了“非对称全数字大规模 MIMO 阵列天线”的概念, 并获得国家重点研发计划项目“非对称毫米波亚毫米波大规模 MIMO 关键技术研究及系统验证”(2020YFB1804900) 的支持, 如图 2 所示。3 年来, 非对称大规模 MIMO 阵列系统架构、天线阵列最佳拓扑结构、非互易信道特性与建模、阵列通道的校准与自校准、通道非线性行为建模与线性化, 以及多通道收发芯片和系统实验验证等均取得重要进展。研究者们研制了国际上首套毫米波非对称 64T16R 全数字大规模 MIMO 阵列原理样机, 如图 3 所示。该样机常被作为对比目标。此外, 研究者们还研制了国际上首套毫米波全数字 64T64R 大规模 MIMO 阵列样机, 如图 4 所示。该样机支持 20 个波束/数据流, 总数据吞吐率达到 50 Gbit/s。图 5 展示了支持全数字多波束阵列的毫米波 4 通道发射/接收芯片。相关研究论文已发表在《IEEE Transactions on Antennas and Propagation》

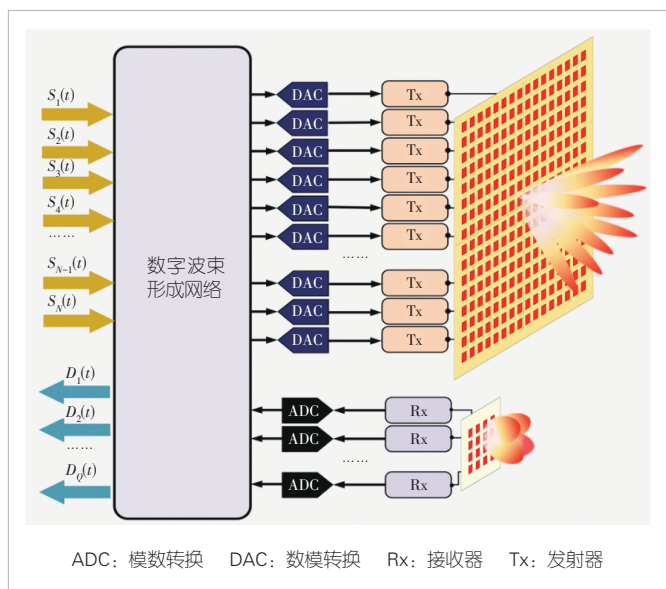
《IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques》《IEEE Journal of Solid-State Circuits》《中国科学: 信息科学》等权威期刊上, 其中有 2 篇入选 ESI 高被引论文, 1 篇获 IEEE MTT-S 微波奖。



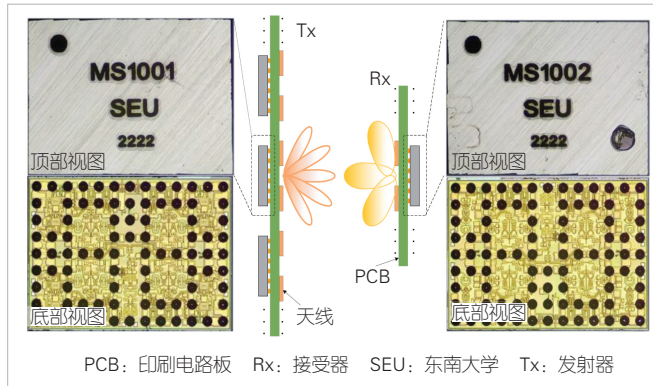
▲图3 64T16R非对称全数字大规模多输入多输出阵列天线



▲图4 64T16R非对称全数字多波束阵列天线原理样机与动态性能测试



▲图2 非对称全数字大规模多输入多输出阵列天线架构



▲图5 支持全数字多波束阵列的毫米波4通道发射/接收芯片

3 蓝色行者 3 商用移动通信阵列

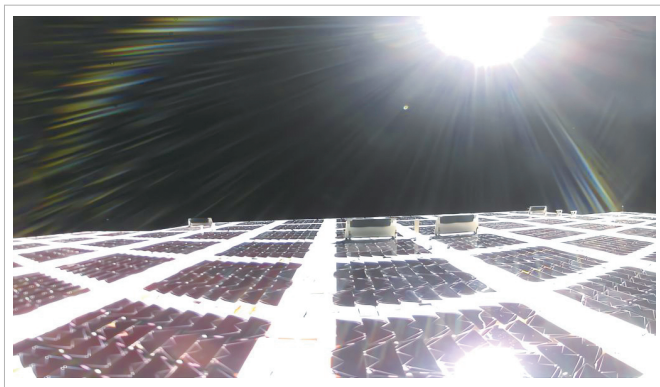
美国 AST 太空蓝色行者 3 是部署在近地轨道上的最大商业通信阵列，旨在通过第 3 代合作伙伴计划（3GPP）标准频率以 5G 速度直接与蜂窝设备通信。卫星阵列天线已经于 2022 年 11 月 14 日在太空展开（如图 6 所示），面积为 64 m^2 。这一设计对于支持天基蜂窝宽带网络至关重要。该卫星预计在地球表面拥有超过 $776\,996 \text{ km}^2$ 的视野。

4 大规模分布孔径深空探测天线

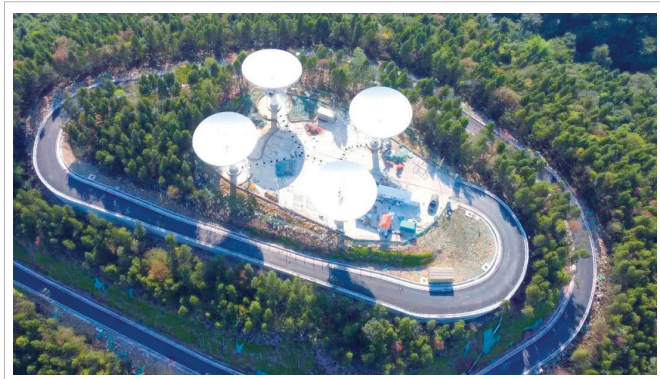
近日，由北京理工大学牵头建设的“中国复眼”成功开机观测。与世界著名的“中国天眼”不同，它的大天线由很多小天线合成，就像昆虫的眼睛一样，因此得名“中国复眼”，意为“中国复兴之眼”。整个系统的建设包括 3 个阶段，其中，第 1 阶段工程建设已完成（如图 7 所示），第 2 阶段工程建设已经启动。建成后“中国复眼”可实现超远程探测，探测距离可达 1.5 亿千米。

5 跨频段共口径大规模天线

华南理工大学章秀银教授课题组对跨频段共口径大规模天线阵列关键技术进行了研究与验证，如图 8 所示。在异频



▲图 6 太空蓝色行者 64 m^2 阵列天线



▲图 7 大规模分布孔径深空探测雷达一期工程天线



▲图 8 跨频段共口径大规模天线阵列

共口径天线阵列中，不同频段阵子密集分布导致互耦严重、端口隔离差。此外，处在上方的低频天线单元会遮挡下方的高频天线单元，导致高频辐射方向图产生畸变。针对该问题，课题组提出了基于集成滤波天线的隔离度提升技术，利用集成滤波天线的带外抑制特性来降低不同频段的互耦，提高隔离度。此外，课题组还提出了基于空间滤波天线的方向图畸变改善技术，设计了具有空间滤波特性的低频天线，使其下方的高频天线辐射的电磁波可以透过低频天线，从而改善高频天线的辐射方向图。基于滤波天线技术设计系列多频共口径基站阵列天线，实现了 3 GHz/4 GHz/5 GHz 不同频段天线的一体化集成。

6 毫米波片上天线测量系统

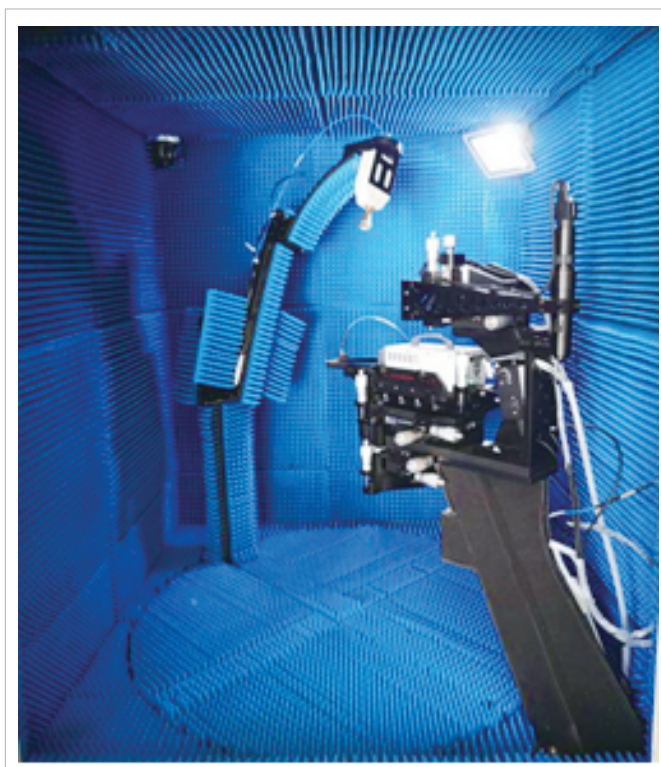
电科思仪毫米波片上天线测量系统的频率覆盖范围为 8 ~ 110 GHz（可扩展至 500 GHz）。该系统具有频率覆盖范围宽、动态范围大、馈电形式灵活、结构紧凑、测试参数全面等优点。系统采用通用化、模块化设计思想，以电科思仪高性能矢量网络分析仪为核心，由频率扩展模块、高精度转台、片上天线馈电平台、微波暗箱等单元组成，如图 9 所示。该系统具有方向图、副瓣电平、增益、轴比、驻波等多种参数测量功能，可用于片上天线、集成天线、封装天线等非常规馈电形式的微型天线电性能参数测试分析。

7 自动化微型相控阵天线测试系统

成都天锐星通科技有限公司自动化微型相控阵天线测试系统，频率覆盖范围为 10 ~ 110 GHz，占地面积不足 5 m^2 ，如图 10 所示。系统采用多功能实时控制模块、同步信号调理模块和宽带双极化馈源，实现了 0.5 m 口径相控阵天线的全指标一键高效测量。结合大数据分析技术，该系统可快速实现产品的基本性能分析以及一致性和相关性分析。同时产品配备了自动装卸和进出料模块，自动化程度高，易于产线部署，可用于相控阵天线的大规模生产。

8 大规模阵列的封装天线技术

未来移动通信将通过极致连接为人类社会提供全无线、

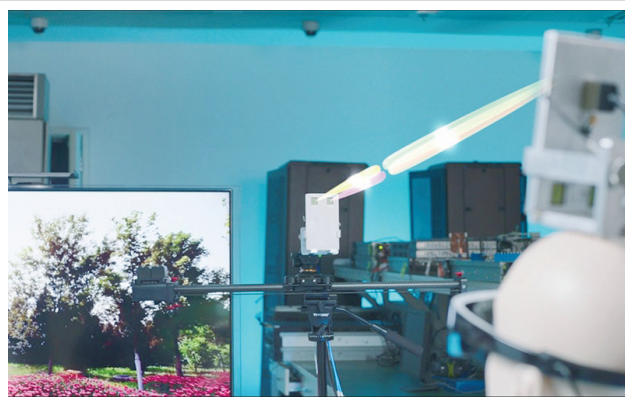


▲图9 毫米波片上天线测量系统



▲图10 自动化微型相控阵天线测试系统

以人为中心的沉浸式体验，真正开启智能时代。华为研究团队在毫米波 70 GHz 频段，成功研制了超低功耗、超高吞吐、超低时延的短距通信原型样机，实现了超过 10 Gbit/s 的吞吐率和亚毫秒级的时延，并实时演示了 4K 虚拟现实（VR）业务，如图 11 所示。此样机具有突出的短距传输性能。传输

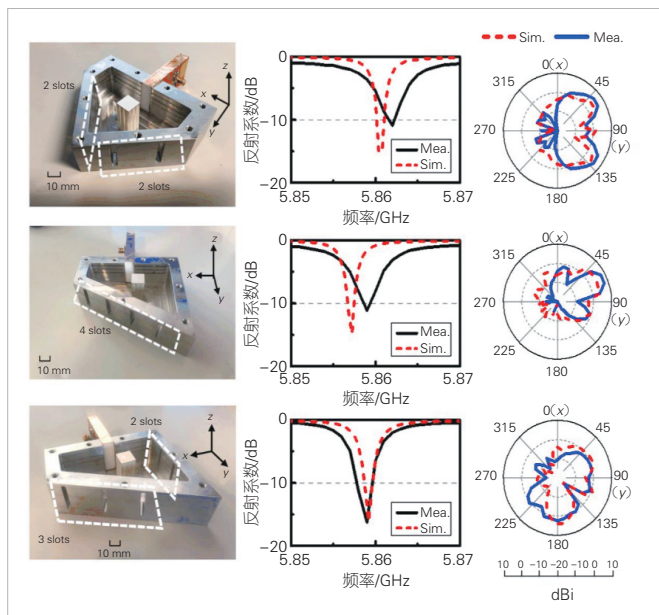


▲图11 华为 70 GHz 频段短距通信原型样机与封装天线

速率是通用串行总线（USB）等有线通信方式的数倍，且整机功耗低于 560 mW。该原型样机采用了高效锗硅大规模阵列。不规则阵列天线可封装在手机规格的低温共烧陶瓷模块中，使微型的封装天线也可以应用在可穿戴设备中。

9 近零介电常数媒质构造几何无关天线

清华大学电子工程系李越副教授课题组使用近零介电常数（ENZ）媒质构造几何无关的新型天线，使天线的工作频率不再与天线的几何形状有关，实现了天线空间辐射特性和工作频率的独立设计，如图 12 所示。该课题组于 2022 年 6 月 22 日将相关成果发表在《Nature Communications》上^[1]。该成果为天线设计提供了全新的灵活性，在柔性电子、智能感知与无线通信等领域具有潜在应用价值。

▲图12 几何无关天线^[1]

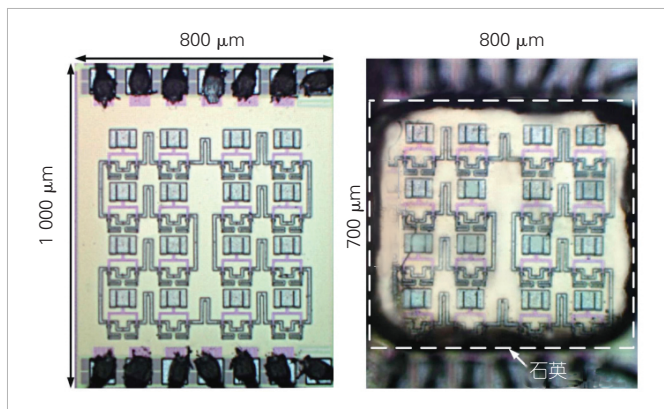
10 太赫兹 16 元环形耦合振荡器-辐射器阵列

香港城市大学太赫兹及毫米波国家重点实验室陈志豪教授团队使用 65 nm 的互补金属氧化物半导体 (CMOS) 在 0.8 mm^2 的总面积上实现了 16 元环形耦合振荡器-辐射器阵列, 如图 13 所示。最大辐射功率 -2.8 dBm 是在 472 GHz 的条件下测得的。这种设计实现了目前最高的直流太赫兹转换效率和频率调谐范围分别为 0.12% 和 4.2%。

11 结束语

天线作为“器”的发明与发展, 先后经历了创世纪阶段、大跃进阶段、添新丁阶段。然而, 中国在这些阶段基本上是缺席者。

在天线作为“术”与“用”的发展中, 中国后来居上。



▲图 13 太赫兹片上天线阵列^[2]

这可以从中国天线产业居世界首位、学界发表论文全球第一得到佐证。

2022 年度十大天线技术进展中, 有九大天线技术是由中国天线科技工作者完成的。我们不难看出这样的结论: 天线强则国家强, 国家强则天线强!

参考文献

- [1] LI H, ZHOU Z H, HE Y J, et al. Geometry-independent antenna based on Epsilon-near-zero medium [J]. Nature communications, 2022, 13(1): 1-8. DOI: 10.1038/s41467-022-31013-z
- [2] GAO L, CHAN C H. A 0.47 THz ring scalable coupled oscillator - radiator array with miniature patch antennas [J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2022, 70(8): 3964-3974. DOI: 10.1109/TMTT.2022.3186329

作者简介



张跃平, 无线电电子学家、新加坡南洋理工大学教授、2010 级 IEEE Fellow、2012 年度 IEEE 天线与传播学会谢昆诺夫论文奖获得者、2020 年度克劳斯天线奖获得者、2022 年度 IEEE 电子封装学会杰出技术成就奖获得者, 曾任香港大学客座教授、太原理工大学教授、IEEE 天线与传播学会杰出讲师、IEEE 天线与传播汇刊副编辑; 曾多次在 IEEE (美国)、CIE (中国)、IET (英国)、EurAAP (欧洲)、IEICE (日本)、KIEES (韩国) 组织的旗舰会议上发表演讲; 2020 年获欧洲天线与传播学会大会组委会赠送的、为纪念奥斯特发现电磁现象的牌匾, 2021 年获香港中文大学电子工程系建系 50 周年杰出校友奖, 曾多次获国际学术会议最佳论文奖; 发表论文 300 余篇, 拥有 7 项美国发明专利。