



社论:

后 5G 与 6G 天线系统技术演进与创新

段宝岩

西安电子科技大学机电科技研究所, 中国西安市, 710071

E-mail: byduan@xidian.edu.cn

本文编译自 Duan BY, 2020. Evolution and innovation of antenna systems for beyond 5G and 6G. *Front Inform Technol Electron Eng*, 21(1):1-3. <https://doi.org/10.1631/FITEE.2010000>

近年来, 随着第五代 (5G) 无线通信系统发展, 5G 网络建设和终端设备已逐步定型并步入商用阶段。同时, 第六代 (6G) 移动通信系统已成为备受学术界和工业界瞩目的重要领域, 前景广阔。与 5G 相比, 6G 可实现更快的接入速率 (10~100 倍以上)、更低的接入延迟、更广泛深入的通信覆盖以及更优的能量和频谱效率, 使得天线和射频 (RF) 系统的材料、工艺、技术及形式不断演进。现阶段天线和射频系统有如下几个重要发展趋势:

1. 向高频段发展

毫米波在 5G 移动通信系统中不可或缺。作为 6G 潜在发展方向之一, 星联网 (IoS) 为实现全时空覆盖, 需要 Ka 与其它频段的多种天线系统的支撑。近年来, 太赫兹 (THz) 技术愈加引起学术界和工业界的广泛关注, 是国际公认的前沿技术之一。

2. 新材料、超材料应用

新材料和超材料所具有的超然特性, 使天线更趋小型化, 不易受干扰, 性能也更优异, 这是因新材料与超材料突破了传统材料难以逾越的天线理论和工程障碍。

3. 信道特性的演进

拥有新架构或新频带的天线——如三维多输入多输出 (MIMO) 天线阵列和毫米波/THz 天线——将带来新的传波信道特性。为此, 天线设计

者和工程师需研究不同场景与应用中不同传输信道特性天线的性能。

4. 测量技术的变革

在 5G 时代, 传统测量策略与方法、测试指标甚至概念可能不再适用于新的 5G 空口技术 (OTA)。全新的测量方法和测试指标正在迅速定型且有望成为国际标准。因此, 当下全面规划 5G 和 6G 天线测量技术至关重要。

可见, 未来移动通信中的天线系统正面临前所未有的诸多挑战, 天线系统性能的提高无疑将为提升无线通信系统的整体性能插上翅膀。

在此背景下, 中国工程院院刊《信息与电子工程前沿 (英文)》(FITEE) 特组织并刊发了“后 5G 与 6G 天线系统技术演进与创新”专刊。该专刊涵盖天线、无源和有源器件及系统、传播和信道以及材料和算法等方面, 频率涵盖 6 GHz 乃至太赫兹。专刊旨在回顾天线相关技术发展现状, 明确未来发展趋势。经过严格评审, 最终筛选出 13 篇文章, 其中包括 7 篇综述文章、4 篇研究论文以及 2 篇通讯文章。

超材料和超表面因其独有的电磁波调控能力而备受关注。吴瑞元和崔铁军系统总结了传统超材料的基本知识, 回顾了人工表面等离激元等二维平面超材料。文章还介绍了数字编码超材料、可编程超材料和信息超材料等概念, 以及微波超材料的发展前景。

超表面天线的发展为宽带和低剖面天线设计提供了有竞争力的解决方案。陈志宁等阐述了典

型可调控色散的超表面天线工作原理，回顾了这类天线的最新进展。此外，通过探讨超表面天线的功能特性，展示了超表面天线技术在天线创新设计中的广阔应用前景。

作为 5G 技术演进的延续，6G 以其高数据速率、低延迟等特点备受关注。张建华等通过分析几种新兴 6G 技术和应用，阐述了 6G 信道模型的发展趋势，展望了 6G 信道测量和建模的未来发展方向。

MIMO 技术因其独特的优势在当前及未来通信系统中具有重要的理论意义和广阔的应用前景。高隔离度是 5G 终端的一项挑战技术。刘英等分析了 5G 终端解耦方法，展望了 5G 智能手机的发展趋势。

为满足数据传输速率需求，目前已成功研发出适用于大规模 MIMO 发射机的高能效功率放大器 and 线性化技术。陈文华等回顾了用于 sub-6 GHz 和毫米波 5G 大规模 MIMO 系统的高能效集成 Doherty 功率放大器单片微波集成电路和线性化技术，比较了不同半导体工艺和结构，并提出，为适应大规模 MIMO 系统的应用要求，需改进数字预失真技术。

随着毫米波技术的大量应用，宽带电路和系统以其优越的适用性和多功能性而备受关注。余益明和康凯通过介绍 4 款基于变压器的超宽带毫米波低噪声放大器、毫米波三倍频器、毫米波分频器和上变频混频器，从理论分析和实际性能角度回顾了 CMOS 技术的应用。

滤波天线是集滤波和辐射功能于一体的天线。章秀银等介绍了滤波天线的设计方法和 3 款与滤波天线技术密切相关的双频基站天线阵。由于该类天线的滤波结构与辐射器或馈线集成，故无需额外的滤波电路对天线进行滤波。滤波天线固有的滤波性能可降低工作在不同频段天线之间的互耦。实验表明，部分方法已经可应用于工业生产。

面对不同应用场景，姚远等提出了可灵活设计的 60 GHz 毫米波天线阵列。通过改变天线阵的辐射部分，可将天线阵调整为线极化或圆极化。采用低插损的馈电网络和宽带天线单元，可实现高增益、宽带及高效率。结果表明，线极化和圆极化天线阵列均具有良好的辐射性能。

为实现罗特曼透镜的小型化，孙保华等介绍了切比雪夫阻抗变换器、功率分配器和带有功率分配缝隙的截断端口等 3 种技术。研究表明，采用所提出的带功率分配缝隙的截断透镜端口实现罗特曼透镜小型化是一项可靠技术。此外，小型化罗特曼透镜还可用于实现多波束和波束赋形。

焦永昌等设计了大型双极化微带反射阵。通过离散快速傅里叶变换 (DFFT) 与逆 DFFT，建立了孔径分布与远场的一一对应关系。同时，基于迭代投影的交集法可求出各单元在工作频带内某些采样频率下的期望反射相位，进而提出了一种新型求取合适初始解方法，可避免落入不必要的局部极小点。例如，拥有 25 305 个元素的双波段、双谐振微带反射阵列，可覆盖整个中国大陆。仿真结果表明，反射阵列的方向图在两个工作波段均满足对中国大陆的覆盖要求，设计复杂方向图的大型反射阵列的优化方法可靠且高效。

李连鸣等提出了基于封装天线技术的 60 GHz 宽带小型化超表面天线。通过高介电常数玻璃基片实现天线小型化。该设计可通过支持 TM_{10} 模式和反相 TM_{20} 模式来增大天线带宽，进而可有效提高天线性能。

程勇等提出了一种 5G 便携式终端双模 MIMO 天线，通过单极子天线和缝隙天线交错排列方式来提高隔离度。测量与仿真结果吻合良好。提出的天线单元具有宽带和高效率特点，有望成为 5G 无线通信终端天线的候选方案之一。

5G 技术演进推动了天线系统创新。高峰等阐述了通信系统与移动通信系统的未来发展及其对天线系统要求的演变历程，明确了对 5G 天线系统的要求。还提出了大规模 MIMO 天线的加权优化方法，并取得了满意的数值仿真结果。

本期专刊涵盖未来移动通信系统有关天线的多个主题，包括天线、天线阵列、超材料和新材料在天线系统中的应用、无源和有源网络与收发机、电波传播和信道建模以及大规模 MIMO 优化算法，我们期望该专刊对无线通信、天线设计及相关领域的发展有所裨益。

最后，衷心感谢各位作者、审稿人、编辑等为本期专刊出版做出的贡献，感谢中国天线系统产业联盟李永波、何爱芬，感谢刘英、张建华、胡伟东、编辑部，感谢主编潘云鹤院士、卢锡城院士。



段宝岩，中国工程院院士，于1981、1984与1989年获西安电子科技大学工学学士、硕士与博士学位。1991~1994年英国利物浦大学博士后，2000年美国康乃尔大学高访。现为西安电子科技大学教授，全国天线产业联盟主席，中国电子机械工程学会理事长，*Electromech Eng China* 主编，*Chin J Electron Engineering* 学科主编以及其它10多种学术期刊编委。是IET会士、中国电子学会会士。

他长期从事电子机械工程的教学与科研工作，致力于电子装备机电耦合理论、方法与技术研究，开辟了我国电子装备机电耦合研究的新领域。系统地建立了电子装备电

磁场、结构位移场、温度场之间的场耦合理论模型，揭示了机械结构因素对电性能的影响机理，提出了基于场耦合理论模型与影响机理的机电耦合设计理论与方法。上述成果被成功应用于探月、神舟飞船、主力战舰、FAST500m口径球面射电望远镜等国家重大工程中。

发表论文200余篇，国际会议邀请报告10余次，著书6部，授权发明专利40余项。以第一完成人获国家科技进步二等奖3项，入选2009年度科学中国人，获2012年何梁何利科技成果奖，2017年中科院杰出科技成就奖与中国好设计金奖，2018年亚洲结构与多学科优化终身成就奖。

2016年CCTV《大家》栏目播报了专题片“段宝岩：小学科大视野”

(<http://tv.cntv.cn/video/C10309/929b551b153c418a972f69f30d861a2f>, 中)。