

2026 年度拟提名陕西省科技进步奖项目公示内容

一、项目名称

空天通信高效率线性化功率放大器关键技术及规模化应用

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省融办

提名意见：

空天通信是 6G 时代空间信息基础设施建设的关键支撑。功率放大器作为空天通信系统的核心动力装置，始终是射频微波技术领域的战略制高点，更是全球科技竞争的最前沿和主战场。功率放大器的工作频带、输出功率、转换效率、线性度等核心指标相互制约，直接影响着空天通信系统的作用范围、传输质量与服役寿命，相关核心技术长期被欧美国家封锁和垄断，必须自主创新研发。

在国家自然科学基金、国家重点研发计划项目及重大型号工程等支持下，攻克了氮化镓多沟道器件频率提升与高线性度兼容、射频功放工作带宽扩展与效率提升、大带宽多非线性特性交叉作用的稀疏联合失真补偿等瓶颈难题，构建并实现了“材料器件-电路设计-系统架构”协同高效的多频段功率放大器，大幅提升了空天通信系统的传输时效性和用户服务质量，有力支撑了多个国家重大工程的顺利部署和建设。

项目共获授权发明专利 30 项，发表高水平学术论文 46 篇。项目突破了制约空天通信系统性能提升的功率放大器设计与研制难题，开发了多频段、系列化的功放 MMIC 芯片及功率放大器设备，在多个国家重大型号实现了在轨稳定运行，累计创造经济效益达 3.5 亿元。项目显著提升了我国射频功率放大器的技术水平和研制能力，涵盖从设计、研发、生产到制造等环节，加速了射频技术强国的建设进程，彰显了“中国芯”的创新实力与战略价值。

提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。

三、项目简介

空天通信是 6G 时代空间信息基础设施建设的关键支撑。射频功率放大器作为空天通信系统的核心动力装置，始终是射频微波技术领域的战略制高点，更是全球科技竞争的最前沿和主战场。射频功率放大器的工作频带、输出功率、转换效率、线性度及可靠性等核心指标相互制约，直接影响着通信系统的作用范围、传输质量与服役寿命，相关核心技术长期被欧美国家封锁和垄断，必须自主创新研发。项目在国家自然科学基金、国家重点研发计划项目及重大型号工程等支持下，历经十余年集智攻关，攻克了氮化镓多沟道器件频率提升与高线性度兼容、射频功放工作带宽扩展与效率提升、大带宽多非线性特性交叉作用的稀疏联合失真补偿等瓶颈难题，构建并实现了“材料器件-电路设计-系统

架构”协同高效的多频段宽带功率放大器，大幅提升了空天通信系统的传输时效性和用户服务质量，有力支撑了北斗三号、卫星互联网工程等国家重大工程任务的顺利部署和建设。

主要创新成果如下：

1. 攻克了氮化镓基多异质结器件线性度提升难题：揭示了氮化镓沟道载流子的非线性物理特性与功率提升的影响机理，阐明了氮化镓双沟道器件中 Si 掺杂对电流提升与沟道耦合的作用机制，发现了侧壁栅电容对线性度的调控规律，建立了三维栅结构参数与器件阈值电压、跨导高阶导数的对应关系，解决了氮化镓多沟道器件频率提升与高线性度兼容设计难题。围绕 Si 掺杂双沟道外延设计、多异质结三维栅器件结构、低寄生欧姆接触工艺等方面开展一系列线性化提升技术研究。形成了从理论分析、材料器件结构设计到关键工艺突破的高效协同优化设计方法，将器件跨导栅压摆幅从传统 4V 增加至 8V，显著提升了器件的线性度。经与加州大学等国际机构对比，在高效率线性、宽栅压摆幅、线性因子等综合指标处于国际先进水平。为高线性功放电路模块从材料设计与器件结构设计两个维度提供坚实可靠的技术支撑。

2. 提出了宽带高效负载调制功放电路设计方法：阐明了对称 Doherty 功放高效功率范围与射频工作带宽的相互制约机理，构建了负载调制轨迹与合成网络参数之间的函数映射关系，采用分段线性电流变化轨迹求解合成网络参数，形成了完善的高效功率范围拓展理论体系。提出分部调制功放架构，采用“先局部后全局”的负载调制策略，解决了时序类功放主路过饱和难题，实现了射频功放多指标性能的协同提升，为射频微波功放宽带化、高效化及动态化奠定了理论基础。研制了 Ka 频段连续波功放产品（50%相对带宽，功率范围扩展 3dB），应用于北斗三号导航卫星相控阵星间链路，通过相互测距和校时，实现星-星-地联合精密定轨，提高整个系统定位和服务精度，为建设自主可控的全球卫星导航系统提供了重要保障。研制了 K 波段高效率线性功率放大器（40%相对带宽，功率范围扩展 10dB），规模化应用于星网相控阵通信载荷系统，为手机直连服务等应用提供了有力支撑。

3. 构建了三输入联合补偿的稀疏预失真架构：揭示了微波直接变频功率放大器 I/Q 不平衡、本振泄漏和功放非线性失真等相互交叉作用特性，提出基于非线性频率相关交叉项和输入信号幅度的三输入联合补偿模型正交功率放大器架构，通过间接学习结构识别预失真函数，实现多种非线性失真联合补偿。进而，针对低复杂度的数字预失真补偿实现难题，提出了基于鲁棒拟牛顿和压缩感知贪婪算法进行模型冗余项删减，构建稀疏自适应数字预失真模型。在邻信道功率泄露比改善优于 6dB 的同时，系统实现复杂度降低至传统方法 60%以上，为高效功率放大器研制提供了新的解决思路和实现方法。已成功应用于国内首个 W 频段卫星/机载对地 100Gbps 高速传输试验系统，实现了我国空天骨干节点之间信息传输能力的跨越式提升。已推广应用于某低轨大型遥感星座星间链路分系统，实现了高速通信与精密测距，解决了境外高价值遥感影像的高时效

回传难题。

本项目从材料器件、电路设计和系统架构等维度出发，突破了制约空天通信系统性能提升的射频功率放大器设计与研制难题，开发了多频段、系列化的功放 MMIC 芯片及放大器设备，在多个国家重大型号实现了在轨稳定运行。核心成员获 IEEE 国际微波会议功放设计竞赛全球冠军、IEEE 微波理论技术协会奖学金、“中国芯”优秀技术创新产品、多个国际会议最佳学生论文集等荣誉。项目授权国家发明专利 30 项、在业界权威期刊发表高水平学术论文 46 篇。研发的系列功放芯片及模块、高效率放大器等在多个空天通信装备上直接应用，新增产值超 3.5 亿元。得到杨长风与樊邦奎院士的高度认可：项目技术难度极大，突破了国外技术封锁，有完全自主知识产权，整体技术达到国际先进水平，为我国空天通信系统的发展提供了重要技术支撑。

四、客观评价

针对空天通信系统高速率、大容量、低时延传输特性对功率放大器性能指标的严苛要求，项目提出了器件功率与器件线性设计的理论方法，解决了氮化镓多沟道器件频率提升与高线性度兼容设计难题，形成了宽带负载调制功放高效功率范围扩展理论体系，采用三输入稀疏预失真模型方法，攻克了射频功率放大器高效化、线性化、可靠化设计难题，研制了多款射频功率放大器核心芯片、模块及装备产品，涵盖 L 至 W 频段，成功应用于北斗导航卫星、星网卫星等骨干链路，大幅提升了星地、星间数据传输的时效性与可靠性，获得了国内外同行高度评价。

1. 同行专家评价

基于 Doherty 功放，项目组在领域权威期刊 IEEE TCAS I 上发表的论文受到华南理工大学微电子学院院长、IEEE Fellow 薛泉教授团队的正面评价：复数合成方法对于扩展带宽非常有效。

中国科学院-香港科技大学微电子联合实验室主任、中科院拔尖青年科学家、中国电子学会自然科学二等奖及中国仪器仪表学会技术发明二等奖获得者，中国科学院微电子研究所黄森团队于 2022 年发表在 IEEE TED 期刊上的论文对项目提出的氮化镓基高线性器件做出正面评价：AlN/GaN/InGaN 异质结构 HEMT 通过增强动态源极电阻从而提高了 GaN HEMT 的线性度。

联邦科学与工业研究组织（CSIRO）的首席研究科学家、澳大利亚悉尼科技大学全球大数据技术中心移动传感与通信项目 Xiaojing Huang 教授团队于 2025 年发表在 IEEE TWC 期刊上的论文对项目提出的预失真稀疏三输入模型方法做出正面评价：项目所提的数字补偿方法能够改善功率放大器非线性所导致的严重的性能下降。

2. 应用单位评价

北京遥测技术研究所：采用数字辅助结合栅极互易技术，攻克了多路时序负载调制功放中主路无调制、过饱和等难题，实现了多路负载调制功放在带宽扩展、效率提升及可靠性增强等指标的协同提升。

浙江铖昌科技股份有限公司：研制了 Ka 频段连续波功放产品，达到了国际先进水平，成功应用于北斗三号导航卫星 Ka 频段相控阵星间链路，通过相互测距和校时，实现星-星-地联合精密定轨，提高整个系统的定位和服务精度，为我国建设自主可控的全球卫星导航系统提供了有力保障。

五、应用情况

本项目自实施以来，提出了一系列创新型电路架构及设计方法，研制了覆盖 L 至 W 波段的多款宽带氮化镓功放芯片及模块产品，已规模化应用于遥感卫星、导航卫星、空间站、神舟系列载人飞船、无人机数据链等空天通信设备系统。项目成果的成果应用，显著提升了我国在高效率射频功率放大器设计领域的国际竞争力，为国家建设自主可控的射频功率放大器设计、生产、制造产业链奠定了坚实基础。

项目突破了射频功率放大器宽带效率提升、动态范围扩展、工作模式重构等一系列设计研制关键技术，实现了射频功率放大器产品全国产化和自主可控，推动了我国射频电路设计研发能力的跨越式进步，产生了重大的政治、经济、军事和社会效益，具有广阔的应用前景。

主要应用单位情况表

序号	单位名称	应用的技术	应用对象及规模	应用起止时间	单位联系人/电话
1	北京遥测技术研究所	宽带高效率功放设计	某低轨星座	2016 年 7 月至今	李澎 18611150451
2	浙江铖昌科技股份有限公司	整体技术	北斗三号、星网等型号	2017 年 3 月至今	史以群 1536610583
3	银河航天(西安)科技有限公司	整体技术	卫星互联网工程、某大型遥感星座等重大型号	2018 年 1 月至今	杨超越 15389050829
4	陕西航天技术应用研究院有限公司	整体技术	高分七号、碳监测遥感卫星星地数据传输系统；W 频段高速传输试验系统	2019 年 12 月至今	张锐 13991165135

六、主要知识产权和标准规范等目录（限 10 条）

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家 (地区)	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	发明专利权	一种基于 UAVRIS 的安全通信方法及系统	中国	ZL202411925941.6	2025.04.01	7843899	西北工业大学	王大伟, 李佳蔚, 李立, 杨伟超, 闵令通, 靳一, 吕勤毅
2	发明专利权	一种基于氮化镓的宽摆幅双向限幅电路及其制备方法	中国	ZL201810811324.1	2022.02.18	4946902	西安电子科技大学	杨凌;马晓华;芦浩;宓珉翰;侯斌;周小伟;祝杰杰;郝跃
3	发明专利权	一种基于肖特基二极管的毫米波过保护电路及其制备方法	中国	ZL201810811142.4	2020.12.29	4181300	西安电子科技大学	杨凌;马晓华;芦浩;侯斌;宓珉翰;祝杰杰;周小伟;郝跃
4	发明专利权	一种基于迭代学习控制和主曲线分析的数字预失真系统工作方法	中国	ZL202110938078.8	2024.01.26	6647651	重庆大学	李明玉, 赖瑞文, 靳一, 徐常志, 代志江
5	发明专利	一种多带 Doherty 功率放大器	中国	ZL201910799140.2	2023.03.28	5827335	重庆大学	李明玉, 程小兵, 靳一, 代志江, 庞竞舟
6	发明专利	一种基于分段仿射的功率放大器行为建模方法及装置	中国	ZL202011065497.7	2024.01.02	5481210	西安空间无线电技术研究所	靳一, 徐常志, 张建华, 李立,

								汪滴珠, 璩泽旭
7	发明专利	一种射频功率放大器	中国	ZL201810843910.4	2025.08.19	8168813	苏州能讯高能半导体有限公司	徐长久; 张永胜
8	发明专利权	一种基于弧-弦近似原理的非接触式运动信息解调方法	中国	ZL202111234462.6	2022.08.08	5360388	西北工业大学	吕勤毅; 曹聪琦; 周德云; 冉立新
9	发明专利	一种半导体器件及制备方法	中国	ZL201510363973.6	2019.09.24	3537900	苏州能讯高能半导体有限公司	张乃千、刘费航、金鑫、裴轶、宋晰
10	发明专利	一种数字化预失真线性化器	中国	ZL201710120715.4	2017.3.2	5803325	广州程星通信科技有限公司	贾鹏程

七、主要完成人情况

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
靳一	1	无	研究员	西北工业大学	西北工业大学	负责对项目的整体技术路线规划及应用推广。主要贡献为：提出了宽带 Doherty 功放高效率范围扩展方法，构建了三输入高效率功率放大器线性化模型等，完成了高效率功率放大器系统线性化验证，推动了多项核心技术实现工程化应用。
侯斌	2	无	副教授	西安电子科技大学	西安电子科技大学	负责项目中宽带高效率功放产品研制与应用推广。主要贡献为：研究了宽带功率放大器效率提升技术、多模式功率放大器设计方法、高效率功率放大器线性化技术等，参与研制了多款宽带射频功率放大器、多模式功率放大器等。
史卫民	3	无	副教授	重庆大学	重庆大学	负责项目中宽带高效率功放技术研究。主要贡献为：提出了宽带 Doherty 功率放大器高效率功率范围扩展方法、低复杂线性化等新架构与新理论，完成了多款高效功放的研制。
徐常志	4	无	研究员	西安空间无线电技术研究所	西安空间无线电技术研究所	负责高效率功率放大器线性化技术研究 with 系统架构设计，实现了宽带稀疏

						数字预失真补偿算法的工程化应用。
张乃千	5	无	正高级工程师	苏州能讯高能半导体有限公司	苏州能讯高能半导体有限公司	负责星载 GaN 器件结构创新与宽带线性化技术攻关。主要贡献为：提出自对准空气桥场板创新技术，突破高功率器件效率瓶颈；深耕氮化镓宽带线性化适配技术，满足卫星通信宽频段传输需求；参与完整产业链技术落地与量产体系构建，实现星载 GaN 芯片国产化批量应用，有效降低装备研制成本。
贾鹏程	6	无	教授	广州程星通信科技有限公司	广州程星通信科技有限公司	负责高效率射频功率放大器设计和数字预失真补偿技术研究，实现了高效率线性化功率放大器的实现和验证。
吕勤毅	7	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	负责功率放大器线性化研究与产品应用推广。主要贡献为：研究了宽带多模式功放、高效率功率放大器线性化技术，参与研制了多款高频段、高效率功放，推广了射频功放的应用。
李明玉	8	无	教授	重庆大学	重庆大学	负责项目中高效率功率放大器及其线性化技术与相关成果应用推广。主要贡献为：提出了 Doherty 功率放大器宽带化技术、多模式功率放大器实现方法、低复杂数字预失真技术等，参与了相关成果的推广应用。

张永胜	9	无	工程师	苏州能讯高能半导体有限公司	苏州能讯高能半导体有限公司	负责项目中功率放大器线性化研究与产品应用推广。主要贡献为：研究了宽带多模式功放、高效率功率放大器线性化技术，参与研制了多款高频段、高效率功放，推广了高效率线性功率放大器装备的应用。
冯婷	10	无	讲师	西安电子科技大学	西安电子科技大学	负责项目中高效率功率放大器及其线性化技术研究及产品应用推广。主要贡献为：研究了高效率功率放大器设计、非线性功率放大器线性化技术，推广了项目成果的应用。

八、主要完成单位情况及创新推广贡献

完成单位	排名	对本项目科技创新和应用推广情况的贡献
西北工业大学	1	西北工业大学负责算法仿真、技术开发和成果推广等工作。针对传统 Doherty 功率放大器带宽较窄问题，提出峰值功放非无穷大输出阻抗及复数合成技术，拓展了 Doherty 功率放大器的工作带宽，提升了转换效率；针对高效率功率放大器线性化参数数量繁多问题，提出低复杂度数字预失真技术，实现局部精细非线性建模，显著降低了参数数量。针对星间、星地等应用场景，研制了覆盖 L、C、Ku、Ka 波段的系列产品样机，广泛应用于无线通信系统。
西安电子科技大学	2	西安电子科技大学主要负责器件功率与线性设计理论与方法、氮化镓基高线性器件研制与验证等。阐明了氮化镓双沟道器件中 Si 掺杂对电流提升与沟道耦合的作用机制及侧墙栅对线性度的调控机制，建立了器件功率与器件线性设计的理论方法，攻克了氮化镓多沟道器件频率提升与高线性度兼容设计难题。
重庆大学	3	重庆大学主要负责高效率 Doherty 功放电路设计、低复杂度数字预失真算法实现与验证、功率放大器产品推广等。探究了对称 Doherty 高效功率范围限制机理，构建了负载调制轨迹与合成网络参数之间的函数映射关系，阐明了对称 Doherty 功放高效功率范围与射频工作带宽之间相互制约机理，通过非线性电流变化轨迹求解对称 Doherty 功放合成网络参数，建立高效功率范围拓展方案，形成了完善的宽带 Doherty 功放高效功率范围拓展理论体系。
西安空间无线电技术研究所	4	西安空间无线电技术研究所设计了基于三输入联合补偿模型的数字预失真软件系统，搭建了星地/星间链路地面测试验证与半实物仿真平台；完成了鲁棒准牛顿算法与压缩感知贪婪理论的工程化移植与优化，实现了模型冗余项动态删减，将硬件计算资源开销降低 60%以上；完成了功率放大器样机的环境适应性试验与在轨验证，邻信道功率泄露比改善优于 6dB。
苏州能讯高能半导体有限公司	5	苏州能讯高能半导体有限公司主要负责 GaN 功率器件材料、结构设计、核心工艺、散热管控、线性化技术等方面的工作，主要成效如下：夯实器件可靠性理论与工艺基础，研发高可靠性栅极关键工艺，显著提升芯片本征寿命与环境耐受能力，建立高频大功率 GaN 器件物理模型，为星载功率放大器长周期、

		高可靠服役设计提供核心理论支撑；在此基础上优化材料与器件结构，有效调控温度梯度，攻克卫星密闭狭小空间下高功率芯片散热与热阻管控行业难题，保障星载设备连续稳定工作；同时重点突破氮化镓芯片宽带线性度关键技术，使其适配卫星通信主流工作频段，为星载宽带发射链路及对地高速通信传输提供高性能核心芯片。
广州程星通信科技有限公司	6	广州程星通信科技有限公司主要负责高效率射频功率放大器设计和数字预失真补偿技术的推广和应用，实现了多款功率放大器的在轨稳定运行。

九、完成人合作关系说明

（应以第一完成人角度，介绍项目完成人之间的合作经历或合作关系，不局限于第一完成人与其他完成人的合作，也可以包括其他完成人之间的合作。）

本人负责整个项目的技术路线规划及项目研发管理，是项目的第一完成人。在项目研究过程中本人与第二完成人共同宽带功率放大器效率提升技术、多模式功率放大器设计方法、高效率功率放大器线性化技术等研究；

本人与第三完成人共同完成了多款宽带射频功放电路的设计，共同完成了宽带功放的研制和应用推广；

本人与第四完成人共同完成了宽带数字预失真算法的设计与实现，对宽带稀疏数字预失真的补偿进行了验证；

本人与第五完成人共同完成了星载 GaN 器件结构创新与宽带线性化技术攻关；

本人与第六完成人共同完成了多款射频功率放大器在空天通信系统中的应用研究，完成了射频功放的应用推广；

本人与第七完成人共同完成了宽带射频功率放大器设计方法研究，并完成了其线性化技术研究，共同完成了相关成果的应用推广；

第三完成人与第八完成人共同完成了宽带 Doherty 功率放大器相关理论研究，研制了多款负载调制功放；

第五完成人与第九完成人共同完成了 GaN 功率器件材料、结构设计、核心工艺、散热管控、线性化技术等；

第二完成人与第十完成人共同完成了宽带功率放大器效率提升技术的研究，研制了多款宽带高效率功放。