

陕西省自然科学奖公示信息

(2025年度)

一、项目基本情况

项目名称	面向演进 MIMO 系统的信道获取技术及其应用
主要完成人	范建存、戈艺萌
主要完成单位	西安交通大学、西安邮电大学

二、提名意见（适用于部门、机构提名）

提 名 者	陕西省教育厅	提名等级	<input type="checkbox"/> 一等奖 <input checked="" type="checkbox"/> 二等奖及以上
-------	--------	------	---

提名意见：

所提名项目“面向演进 MIMO 系统的信道获取技术体系构建与应用”，聚焦虚拟 MIMO、大规模 MIMO、可重构 MIMO 三类核心场景的信道获取难题，以“破解‘精度-效率-开销’矛盾”为核心目标，系统性构建了演进 MIMO 信道获取技术体系，研究成果具备显著的理论创新性与工程应用价值。

从理论创新维度看，项目针对不同 MIMO 形态的架构特性，提出差异化技术方案：在虚拟 MIMO 场景，构建基于调制编码方式（MCS）的有限量化反馈框架，通过指数有效信干噪比映射、算术平均、几何平均、谐波平均四种多均值计算的有效分组级信干噪比（SINR）优化 MCS 选择，结合用户信道质量与活跃度的分级反馈策略，大幅降低反馈开销的同时提升信道适配精度，其中基于谐波平均 SINR 的方案使 LTE 系统下行链路吞吐量接近最优性能；在 FDD 大规模 MIMO 场景，整合压缩感知与深度学习技术，创建“压缩感知+深度学习”融合信道反馈机制，依托离散傅里叶基、随机投影矩阵实现高维信道状态信息（CSI）降维压缩（采样率仅为传统方案的 1/5-1/10），引入 CNN 重构模型与注意力机制，使 128 用户、300km/h 高速移动场景下 CSI 重构精度提升至 95%以上；在可重构 MIMO 场景，创新提出“部分训练-关联预测”信道获取方案，通过深度迁移学习建立信道与波束赋形的模式关联模型，仅训练 10%-20% CSI 即可精准预测未训练信道状态，结合可重构智能表面技术优化相移配置，构建虚拟 LOS 链路，减少多径效应与信号遮挡影响，系统硬件成本降低 40%。

从成果价值与应用验证看，项目核心成果发表 IEEE 系列顶刊论文 35 篇、国际重要会议论文 45 篇，其中多篇入选 ESI 高被引论文。获杨旸、GeoffreyYe Li 等 20 余位 IEEE Fellow、中外院士正面引用评价，形成具有行业影响力的理论体系。同时，项目技术已在中电科 54 所车载基站、中兴通讯无线接入产品等完成集成测试，可直接支撑 5G-Advanced 商用部署、6G 空天地一体化网络及工业物联网发展，在陕西省内带动多家通信企业技术升级，新增产值千万元，为区域下一代无线通信技术自主创新与产业竞争力提升奠定坚实基础。

综上，该项目在演进 MIMO 信道获取技术领域实现关键突破，理论成果丰富、应用前景广阔，符合陕西省自然科学奖评选标准，特此提名。

说明：省科学技术奖一、二等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“仅提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。提名项目正式提交后，提名等级建议本年度不得变更。

三、项目简介

（限 2 页）

演进 MIMO 系统作为突破无线通信容量与效率瓶颈的核心技术，其性能提升高度依赖精准、实时的信道状态信息（CSI）支撑，但虚拟 MIMO、大规模 MIMO、可重构 MIMO 三类技术场景，分别面临与自身架构特性深度绑定的信道获取难题，且“精度-效率-开销”的矛盾贯穿技术落地全过程。项目针对这一行业共性痛点，以“场景适配、技术融合、性能平衡”为核心思路，系统性构建演进 MIMO 信道获取技术体系，填补了不同 MIMO 形态下信道获取技术碎片化、工程化适配性不足的空白，为无线通信系统性能跃升与产业规模化应用提供关键技术支撑。

针对虚拟 MIMO 场景中多用户协作导致的 CSI 反馈信道拥堵、有限带宽下信道适配精度不足的双重难题，项目团队提出 LTE 系统 MCS 选择与用户资源优化的研究思路，创新构建基于调制编码方式的有限量化反馈框架。通过引入指数有效信干噪比映射、算术平均、几何平均、谐波平均四种不同均值计算的有效分组级信干噪比，建立多维度 SINR 模型，显著提升 MCS 选择与动态信道的适配精度，其中基于谐波平均的 SINR 优化方案使 LTE 系统下行链路吞吐量接近理论最优；同时设计基于用户信道质量与传输需求的分级反馈策略，让信道条件优、传输需求高的用户反馈详细 CSI，其余用户仅反馈简略信息，反馈开销降低 40% 以上。在此基础上，进一步将用户配对与资源分配环节联合优化，建立涵盖频谱效率、能量效率、用户公平性的统一性能权衡准则，通过数学建模消除频谱效率冗余考量，针对平坦衰落与频率选择性衰落信道分别提出适配方案，使虚拟 MIMO 系统在复杂信道环境下仍能维持良好的资源利用率与用户公平接入率，为多用户协作通信场景实用化提供技术支撑。

针对大规模 MIMO 系统在频分双工制式下，天线数量激增导致的 CSI 反馈数据量暴增、传统压缩感知方案重构精度低与计算复杂度高的难题，项目整合 Z.Qin 团队压缩感知信道表征理论与 P.Liang 等人深度学习重构技术，构建“压缩感知+深度学习”融合型信道反馈机制。先依托压缩感知理论挖掘信道在角度域、延迟域的结构化稀疏特性，通过离散傅里叶基、随机投影矩阵将高维 CSI 映射至低维稀疏域，采样率仅为传统方案的 1/5-1/10，从源头减少反馈数据量；再在基站端引入卷积神经网络（CNN）重构模型与注意力机制，替代传统正交匹配追踪等迭代算法，重构耗时缩短至 1ms 以内，CSI 重构精度提升至 90% 以上，在 128 用户、300km/h 高速移动场景下精度仍达 95%；同时设计场景自适应策略，针对慢衰落场景采用静态稀疏基，快衰落（如高铁）场景采用动态稀疏更新机制，结合“分块压缩+分级反馈”聚焦强信道分量，降低用户端算力负担，成功突破 FDD 大规模 MIMO 系统的反馈瓶颈，使系统频谱效率较传统方案提升 35%。

针对可重构 MIMO 系统因天线参数动态调优导致的瞬时 CSI 获取复杂度高、传统方案反馈开销大、难以支撑高精度波束赋形的问题，项目创新提出“部分训练-关联预测”的信道获取方案。通过深度迁移学习分析信道增益与波束赋形的模式匹配关系，构建模式关联模型，仅对 10%-20% 的 CSI 进行训练估计，即可利用模式间相关性精准预测未训练信道状态，信道获取复杂度降低 60%，反馈开销减少 50% 以上；同时在模型训练中引入无监督训练损失函数，减少对标记数据的依赖。在应用层面，依托精准获取的 CSI，结合智能反射面（RIS）技术，优化 RIS 离散相移配置，突破硬件相位量化误差约束，构建虚拟视距（LOS）链路，在城市复杂环境中减少信号遮挡与多径效应影响，信道传输稳定性提升 40%；且 RIS 无需为每个天线单元配备射频链路，系统硬件成本降低 40%，为可重构 MIMO 在智能交通、工业物联网等场景的应用提供灵活解决方案。

项目成果发表 IEEE 系列顶刊论文 35 篇、国际重要会议论文 45 篇，其中多篇入选 ESI 高被引论文，获杨旸、GeoffreyYeLi 等 20 余位 IEEE Fellow、中外院士正面评价。研究过程中，团队还针对不同技术场景的工程化落地需求，开发了多套仿真验证平台与原型系统，完成了信道特性模拟、算法性能测试、实际场景适配等多轮验证，确保技术的实用性与稳定性。目前，相关技术已在中电科 54 所车载基站、中兴通讯无线接入产品中完成集成测试，可直接支撑 5G-Advanced 商用部署、6G 空天地一体化网络构建、智能海洋通信等领域发展。在陕西省产业协同方面，项目团队与省内多家通信企业、科研机构建立合作，推动技术成果向本地化产业转化，带动 5 家企业完成技术升级，新增产值超千万元，为陕西省在下一代无线通信技术创新与产业竞争力提升奠定坚实基础，同时培养了一支涵盖通信理论、算法优化、工程验证的复合型研究团队，为行业持续输送专业人才。

四、客观评价

【限 2 页。围绕科学发现点的原创性、公认度和科学价值进行客观、真实、准确评价。填写的评价内容要有客观依据，主要包括国内外同行在重要学术刊物（专著）和重要国际学术会议等公开发表的学术性评价意见，国内外重要科技奖励等，可在附件中提供证明材料。非公开资料（如私人信函等）不能作为评价依据。】

（1）IEEE Fellow，中国香港科技大学（广州）教学副校长杨旻教授正面引用我们的工作，并评价“充分利用 5G 的优势实现压缩感知”。（代表性引文 2）

（2）英国皇家工程院院士，中国工程院外籍院士，IEEE Fellow，IET Fellow，英国肯特大学王江舟教授评价“提出的基于压缩感知的方法可以有效地减少反馈开销”。（代表性引文 2）

（3）IEEE Fellow，AAIA Fellow，IET Fellow，国家杰青，北京交通大学电子信息工程学院院长艾渤教授评价“这项工作使用深度学习很好地实现了原始 CSI 的恢复”。（代表性引文 4）

（4）IEEE Fellow，中国电子学会会士，国家杰青，东南大学副校长金石教授在他的多篇论文中多次正面引用我们的工作，并评价“利用深度学习有效地进行了信道估计”。（代表性引文 4）

（5）IEEE Fellow，IET Fellow，全球高被引科学家，宽带通信国家重点实验前主任，清华大学王昭诚教授认为“在信道估计性能和反馈开销之间达到了很好的平衡”。

（6）IEEE Fellow，IET Fellow 清华大学宋健教授评价“这是一项令人满意的工作”。

（7）欧洲科学院院士、土耳其科学院院士，IEEE Life Fellow，南京邮电大学 Hikmet Sari 特聘教授评价“达到了出色的结果”，并将我们方法作为基准算法进行比较。

（8）英国皇家工程院院士，IEEE Fellow，匈牙利科学院外籍院士，南安普顿大学电子与计算机科学学院电信系主任 Lajos Hanzo 教授评价我们提出的基于压缩感知和深度学习的 CSI 估计“能有效应对时变信道特性带来的信道估计挑战”。

发现点 2 的代表性评价：

（1）IEEE Fellow、帝国理工大学 Geoffrey Ye Li 教授在研究 FDD 大规模 MIMO 反馈技术时，多次引用上述两篇论文，评价“基于压缩感知的稀疏信道表征框架，结合深度学习的智能重构模型，有效解决了大规模 MIMO 反馈开销与精度失衡问题，通过精细的降维与重构设计，提高了信道估计的鲁棒性”。（代表性引文 1）

（2）浙江大学蔡云龙教授在研究 FDD 大规模 MIMO 信道反馈优化时，引用本贡献点相关论文，评价“基于压缩感知挖掘 FDD 大规模 MIMO 信道时延域结构化稀疏特性，结合深度学习的智能重构，有效降低了反馈开销，提升了 CSI 重建精度，为解决大规模天线系统反馈难题提供了创新思路，对 5G 及未来通信系统发展具有重要意义”。（代表性引文 3）

（3）IEEE Fellow、清华大学王昭诚教授在宽带通信领域综述中引用本贡献点成果，认为“该工作挖掘 FDD 大规模 MIMO 信道在角度域、延迟域的结构化稀疏特性，通过动态稀疏更新策略，在

信道估计性能和反馈开销之间达到了很好的平衡，是压缩感知在无线通信领域的标杆性应用”。（代表性引文 3）

（4）韩国首尔大学 Jin-Ho Chung 教授在研究大规模 MIMO 实用化技术时，引用本贡献点的轻量化压缩模块设计，评价“这种基于随机投影矩阵的用户端压缩方案，降低了计算复杂度，实现了普通终端实时处理，为大规模 MIMO 技术的工程化落地铺平了道路”。

（5）IEEE Fellow、匈牙利科学院外籍院士 Lajos Hanzo 教授在其著作中引用本贡献点成果，评价“提出的基于压缩感知和深度学习的 CSI 估计方法，能有效应对时变信道特性带来的信道估计挑战，显著提升高速移动场景下的重构精度，对 5G 及未来通信系统发展具有重要意义”。

发现点 3 的代表性评价：

（1）IEEE Fellow，内布拉斯加大学林肯分校计算机与电子工程钱毅教授认为“这项工作对多小区协调调度技术进行了全面总结”。

（2）澳大利亚科学院院士、澳大利亚工程院院士、IEEE Fellow、中国政府友谊奖获得者、悉尼大学教授、悉尼大学电气与信息工程学院物联网与电信中心主任 Branka Vucetic 教授评价“设计的实验方法与技术充分的实现了用户匹配合资源分配”。

（3）IEEE Fellow，密苏里科技大学 Sajal K. Das 教授认为我们的工作“十分具有意义和令人感兴趣”。

（4）IEEE Fellow，美国通信技术实验室智能互联系统部、国家标准与技术研究所 Hamid Gharavi 教授评价“有效的波束形成可以显著提高系统的频谱效率”。（代表性引文 5）

（5）IEEE Fellow、美国艺术与科学院院士、美国德克萨斯州休斯敦大学韩竹教授评价智能反射面离散相移波束赋形方法：“巧妙地结合了智能反射面技术与离散相移技术，实现了波束的精确控制和能量的有效聚焦，为解决无线通信中的信号覆盖问题提供了创新的解决方案。”

（6）IEEE Fellow、美国艺术与科学院院士、新加坡南洋理工大学 Chau Yuen 教授评价基于深度迁移学习的智能反射面波束赋形方法：“该方案利用深度学习模型的泛化能力，实现了从已知场景到未知场景的快速适应，为智能反射面技术在复杂环境中的应用提供了强有力的支持，展现了深度迁移学习在无线通信领域的广阔前景。”（代表性引文 5）

五、代表性论文专著目录
(不超过 8 条, 其中代表性论文不超过 5 篇, 代表性专著不超过 3 部)

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷 页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发 表 时 间	通 讯 作 者	第 一 作 者	国 内 作 者	他 引 总 次 数	检 索 数 据 库	知 识 产 权 是 否 归 国 内 所 有
1	Sparse Representation for Wireless Communications: A Compressive Sensing Approach	IEEE Signal Processing Magazine	Zhijin Qin, Jiansun Fan, Yuanwei Liu, Yue Gao, and Geoffrey Ye Li	2018 年 35 卷 40-58 页	2018.05	Zhi jin Qin	Zhi jin Qin	Zhi jin Qin, Jiansun Fan	187	255	是
2	MCS Selection for Throughput Improvement in Downlink LTE Systems	2011 Proceedings of 20th International Conference on Computer Communications and Networks	Jiansun Fan, Qinye Yin, Geoffrey Ye Li, Bingguang Peng and Xiaolong Zhu	2011 年 1-5 页	2011.08	Jia ncu n Fan	Jia ncu n Fan	Jia ncu n Fan, Qinye Yin, Bingguang Peng and Xiaolong Zhu	126	173	是
3	Deep Learning and	IEEE Transa	Peizhe Liang,	2020 年 69	2020.0	Jia ncu	Pei zhe	Pei zhe	82	102	是

	Compressive Sensing-Based CSI Feedback in FDD Massive MIMO Systems	ctions on Vehicular Technology	Jiancun Fan , Wenhan Shen, Zhijin Qin , and Geoffrey Ye Li	卷 9217-9222 页	8	n Fan	Liang	Liang, Jiancun Fan , Wenhan Shen, Zhijin Qin			
4	Joint User Pairing and Resource Allocation for LTE Uplink Transmission	IEEE Transactions on Wireless Communications	Jiancun Fan, Geoffrey Ye Li, Qinye Yin, Bingguang Peng, and Xiaolong Zhu	2012 年 11 卷 2838-2847 页	2012.08	Jiancun Fan	Jiancun Fan	Jiancun Fan , Qinye Yin , Bingguang Peng, and Xiaolong Zhu	35	77	是
5	Beamforming Optimization for Intelligent	IEEE Transactions	Yimeng Ge and Jiancun Fan	2021 年 17 卷	2021.04	Jiancun Fan	Yimeng	Yimeng	39	62	是

	Reflecting Surface Assisted MISO: A Deep Transfer Learning Approach	on Ve hicular Tech nology		253-2 64 页		Fan	Ge	Ge and Jia ncu n Fan			
6											
7											
8											
合 计									469	669	是
补充说明（视情填写）：											

六、主要完成人情况表

姓 名	范建存	排 名	1
行政职务	副院长		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献：			
1、核心理论框架构建与科学问题凝练：			
作为项目学术带头人，主导确立“面向演进 MIMO 系统的信道获取技术”研究方向，精准凝练虚拟 MIMO、大规模 MIMO、可重构 MIMO 三类场景下“精度-效率-开销”失衡的核心科学难题，提出“场景适配、技术融合、性能平衡”的整体研究思路，为项目研究奠定理论基础与技术路线框架。			
2、关键技术创新与理论突破：			
牵头构建三大核心技术体系——针对虚拟 MIMO，借鉴相关文献思路设计基于调制编码方式的有限量化反馈框架，提出基于多均值有效分组级 SINR 的 MCS 优化选择方法及分级反馈策略，解决有限带宽下 CSI 反馈拥堵与适配精度不足问题；针对大规模 MIMO，整合压缩感知与深度学习技术，创建“压缩感知+深度学习”融合信道反馈机制，挖掘信道稀疏特性实现高维 CSI 降维压缩，引入 CNN 重构模型提升基站端 CSI 重构精度与速度；针对可重构 MIMO，提出“部分训练-关联预测”信道获取方案，通过深度迁移学习建立信道与波束赋形的模式关联模型，降低瞬时 CSI 获取复杂度，为三类 MIMO 场景的信道获取难题提供创新性解决方案。			
3、成果整合与学术引领：			
主导项目成果的学术总结与推广，联合发表 IEEE 系列顶刊及国际重要会议论文，形成具有行业影响力的理论与技术成果；指导团队完成技术验证与场景适配，推动相关技术在 5G/6G、工业物联网等领域的应用探索，为项目成果的理论价值与工程意义提升提供关键支撑。			
另外，是代表性论文 2 和 4 的第一作者，代表性论文 3 和 5 的通讯作者，代表性论文 1 的主要合作者。是发现点一和 2 学术思想的提出者，参与了发现点三的计算效率改进工作，完成了三个发现点相关算法研究。			

姓 名	戈艺萌	排 名	2
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	西安邮电大学		
完成单位	西安邮电大学		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>1、子课题技术研发与算法优化：</p> <p>深度参与虚拟 MIMO 有限反馈框架的技术落地，负责基于谐波平均 SINR 的 MCS 选择算法仿真验证，优化用户分级反馈策略的参数配置，提升方案在复杂信道环境下的吞吐量与资源利用率；牵头大规模 MIMO 场景下“场景自适应反馈策略”研发，针对快慢衰落信道设计静态/动态稀疏更新机制，解决传统方案在复杂场景下性能波动问题；主导可重构 MIMO“部分训练-关联预测”方案的工程化适配，优化模型训练流程，减少对标注数据的依赖，提升方案的场景适应性。</p> <p>2、应用验证与成果转化：</p> <p>负责项目技术的实验验证与应用落地，搭建 RIS 辅助可重构 MIMO 算法框架，完成虚拟 LOS 链路构建、多径效应抑制等关键技术的实验验证，为技术实用性提供数据支撑；参与核心论文撰写与专利申报，推动研究成果向学术成果与知识产权转化，同时协助第一完成人指导研究生，参与形成稳定的研究团队，为项目持续推进提供重要执行支撑。</p> <p>另外，是代表性论文 5 的第一作者。是发现点三学术思想的提出者，并完成了发现点三中基于深度迁移学习相关算法研究，提高了 RIS 波束赋形的效率和适应性。</p>			

七、主要完成单位情况表

单位名称	西安交通大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>在软硬件设施方面，西安交通大学拥有通信与信息系统实验室、无线通信信号处理实验室等专业科研平台。实验室配备了先进的信道测量设备，能够精确测量不同环境下的信道参数，为演进 MIMO 系统信道特性研究提供了可靠的数据来源；高性能计算集群拥有数千个计算核心，可支撑大规模 MIMO 场景下海量数据的仿真运算，例如在验证“压缩感知+深度学习”融合信道反馈机制时，能够快速完成高维 CSI 降维压缩及重构算法的模拟测试，大大缩短研究周期。此外，学校还搭建了基于德州仪器 TMS320C6416 DSP 的 MIMO 信道硬件仿真器，能真实模拟 3GPP LTE、IEEE802.11n 等多种无线系统中的 MIMO 信道，用于空-时信号处理算法评估及系统开发，为项目技术方案的硬件实现与优化提供了实践平台。</p> <p>在平台建设上，学校基于已有的 LTE-A 系统级仿真平台，通过天线规模扩展及 3D MIMO 信道模型集成，开发出适用于大规模 MIMO 的系统级仿真平台。该平台实现了支持大规模 MIMO 场景的多用户调度及预编码模块，并设计了开放接口，方便研究人员根据项目需求灵活调整参数、接入新算法。例如在虚拟 MIMO 场景研究中，利用此平台对基于 MCS 的有限量化反馈框架进行仿真，验证了不同均值计算的有效分组级 SINR 对 MCS 选择的影响，为提升信道适配精度提供了有力的数据支撑。同时，学校构建的信息与通信工程学科实验教学平台，为项目培养了大量具备扎实理论基础与实践能力的研究生，保障了研究工作的持续推进。</p> <p>知识产权方面支持论文的发表，同时为专利的申请提供专业指导。</p>	

单位名称	西安邮电大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>西安邮电大学通信与信息工程学院配备毫米波信道测量仪及 MIMO 信号发生器，搭建复杂信道模拟平台，支撑可重构 MIMO “部分训练-关联预测”方案实测，验证 RIS 虚拟 LOS 链路对多径效应的抑制效果；部署 MATLAB / Simulink MIMO 仿真工具包，集成 3GPP 信道模型，高效完成大规模 MIMO 反馈精度、频谱效率等指标仿真，为算法优化提供数据支撑；搭建工业物联网测试床，模拟多用户干扰场景，验证虚拟 MIMO 分级反馈策略的资源分配适配性。</p> <p>依托“陕西省信息通信网络及安全重点实验室”省级重点实验室，开发 MIMO 技术模块化测试子系统，完成 LTE 上行虚拟 MIMO 用户配对方案吞吐量测试；联合企业共建工业互联网实验室，搭建场景验证平台，将大规模 MIMO 反馈技术应用于工业监控，降低传输时延 30%；依托省级研究院组织产学研研讨，推动成果纳入企业技术规划，加速转化。</p> <p>综上，硬件方面同样为项目的开展提供了测试环境和仿真软件、完成了程序的编制、算例验证和算法性能分析工作。</p>	

完成人合作关系说明

本项目完成人范建存（第一完成人，西安交通大学）与戈艺萌（第二完成人，西安邮电大学）为长期稳定的学术合作团队，合作基础清晰、分工明确、成果关联紧密，具体合作关系如下：

一、合作基础与渊源

范建存教授作为西安交通大学博士生导师，于 2019 年招收戈艺萌为其指导的博士研究生，双方以“演进 MIMO 系统信道获取技术”为核心研究方向建立学术合作。博士培养期间，范建存教授指导戈艺萌完成核心理论推导、实验方案设计及论文撰写；戈艺萌毕业后入职西安邮电大学，双方延续研究合作，共同推进技术成果深化与验证，形成“师生传承-协同攻坚”的稳定合作模式。

二、项目研究中的具体分工与协作

第一完成人范建存：负责项目整体研究框架设计、核心科学问题凝练及技术路线规划，主导虚拟 MIMO 有限反馈框架构建与大规模 MIMO 融合反馈机制理论创新，指导关键实验验证与成果总结，是项目学术思想与技术体系的主要提出者。

第二完成人戈艺萌：在范建存教授指导下，负责可重构 MIMO“部分训练-关联预测”技术的具体算法实现、RIS 辅助波束赋形实验仿真，参与 FDD 大规模 MIMO 信道稀疏特性分析，协助完成学术论文撰写与技术成果验证，是核心技术方案的重要执行者。

双方通过定期学术研讨、实验数据共享、联合撰写成果等方式，实现理论研究与工程验证的深度协同。

三、合作成果的关联性

本项目核心成果（虚拟 MIMO 有限反馈、大规模 MIMO 融合反馈、可重构 MIMO 信道预测）均为“演进 MIMO 信道获取技术体系”的有机组成部分，范建存与戈艺萌合作完成的 6 篇代表性论文（含 IEEE Wireless Communications 1 篇、IEEE Transactions on Information Forensics and Security 1 篇、IEEE Internet of Things Journal 1 篇、IEEE Transactions on Vehicular Technology 2 篇）及 5 项关键技术突破，均围绕同一研究目标展开，成果间存在明确的理论延续性与技术互补性，共同支撑了项目整体科学价值的实现。

综上，两位完成人合作关系真实稳定，分工清晰且成果关联紧密，符合陕西省自然科学奖完成人合作关系的的要求。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作时间	合作成果	证明材料
1	专著合著	范建存（1）	2012 年 3 月 1 日 -2023 年 12 月 31 日	Sparse Representation for Wireless Communications: A Compressive Sensing Approach	代表性论文 1
2	专著合著	范建存（1）	2012 年 3 月 1 日 -2023 年 12 月 31 日	MCS Selection for Throughput Improvement in Downlink LTE Systems	代表性论文 2
3	专著合著	范建存（1）	2012 年 3 月 1 日 -2023 年 12 月 31 日	Deep Learning and Compressive Sensing-Based CSI Feedback in FDD Massive MIMO Systems	代表性论文 3
4	专著合著	范建存（1）	2012 年 3 月 1 日 -2023 年 12 月 31 日	Joint User Pairing and Resource Allocation for LTE Uplink Transmission	代表性论文 4
5	专著合著	戈艺萌（1）、范建存（2）	2019 年 9 月 1 日 -2023 年 12 月 31 日	Beamforming Optimization for Intelligent Reflecting Surface Assisted MISO: A Deep Transfer Learning Approach	代表性论文 5
.....					
（不限 条目）					