

一、项目名称 水下目标回波稀疏分解及高分辨声成像技术

二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省教育厅

提名意见：项目围绕水下目标高分辨声成像在理论与实现方面的一系列难题，以国家自然科学基金项目和国家重大需求为依托，历经十余年的产学研用协同攻关。针对水下复杂环境，采用稀疏信号处理的先进理论研究水下目标回波稀疏分解及高分辨声成像技术。通过联合攻关研究，攻克了一系列核心技术难题，取得重要创新性成果。同时构建了一套水下目标回波稀疏表示及声成像的消声水池实验系统，可实现水声信号产生、探测、采集、存储分析等完整闭环处理。该项研究成果已经推广应用于某“十三五”预研项目“xxxx 声成像技术”，突破了水下移动平台小阵列、实孔径条件下的方位分辨率，并在新型声呐产品、水下声成像设备等领域实际应用，成功解决了水下复杂环境下多目标稀疏表示、高分辨声成像等多项关键技术难题，该项目具有广阔前景和推广价值，对于推动水下装备制造领域技术进步和产业发展有重要意义。

项目内容丰富、理论水平高、创新性强、技术先进，已获得陕西省高校科技成果二等奖 1 项。经专家鉴定，该项目在技术创新性、指标先进程度、难度和复杂程度、成果重现性和成熟程度、成果应用价值与效果以及取得的经济、社会和生态效益等方面均表现出色。

该项目成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科学技术奖提名条件。特提名为陕西省科学技术进步奖二

等奖。

三、项目简介

水下目标高分辨声成像是信号与信息处理、水下目标识别、水声物理等学科的基本问题，也是水声装备发展中迫切需要解决的关键问题，在海洋开发和建设的众多领域有着广泛的应用前景。通过声场获取水下目标图像的方法有多种：波束形成、侧扫声呐、多输入多输出（MIMO）成像以及高分辨子空间声成像。但在实际应用中，这些方法也暴露了内在固有的缺陷和不足，限制了应用。波束形成类方法分辨率受限于瑞利限，在实孔径小阵列条件下分辨率不高，高频密集波束形成虽然提高了分辨率，但由于水介质对高频声波的吸收损失，成像距离很近。高分辨子空间声成像突破了阵列处理的瑞利限，但在相干源、低信噪比、小快拍等条件下，分辨性能严重下降。

该成果依托国家自然科学基金面上项目、国家自然科学基金青年项目等，采用稀疏信号处理的先进理论研究水下目标回波稀疏分解及高分辨声成像技术，提取回波时域、频域、空域多维度信息特征。通过联合攻关研究，攻克了一系列核心技术难题，取得重要创新性成果。构建了一套水下目标回波稀疏表示及声成像的消声水池实验系统，可产生、发射多种类型的水声探测信号波形，并接收、采集、存储水下目标回波数据，开展水下目标回波稀疏分解及高分辨声成像研究。该项研究成果已经推广应用于某“十三五”预研项目“xxx 声成像技术”，突破了水下移动平台小阵列、实孔径条件下的方位分辨率。其主要创新点如下：

(1) 针对水下多亮点目标声成像的方位分辨难题,提出了一种 l_1 范数约束和奇异值分解(l_1 -SVD)稀疏重构的离网格处理方法。采用 l_1 范数稀疏度和阵列信号奇异值分解(SVD)来重构目标方位结构,突破了常规波束形成的方位分辨率,并可分辨相干信号。同时,采用一阶泰勒近似和全变差范数约束无网格处理方法来解决原 l_1 -SVD阵列流型离散化产生的离网格问题,克服了原 l_1 -SVD网格细化法过于依赖于网格初始值导致的算法不稳定问题,提高了方位估计的稳健性和估计精度。

(2) 针对傅氏空时二维谱估计分辨率低以及脉冲体制声呐空时采样数据样本数不足难以估计阵列协方差矩阵的问题,提出了一种移动平台抗混响稀疏重构高分辨角度-多普勒成像方法。在声呐阵列极少样本条件下稀疏重构了回波与混响的角度-多普勒像,并根据移动平台回波与混响的空时分布规律及声呐待检测距离单元位置先验信息稀疏重构空时滤波器来抑制角度-多普勒平面的混响干扰,实现了低速运动声呐在混响背景中对水下多亮点回波的高分辨角度-多普勒成像。同时,方法利用亮点反射波多普勒频率差异提高了方位分辨率。

(3) 针对水下目标回波多个调制分量分辨与分离的问题,设计了一种与回波调制成分相匹配的MicroDopplerlet时频字典,利用水下目标部件微运动差异实现了回波多个调制分量的分离、时频分析以及水下目标的微多普勒特征提取。同时,基于所提出的MicroDopplerlet时频字典,提出了一种稀疏重构微动亮点目标高分辨角度-微多普勒成像方法。该方法根据水下目标亮点的微多普勒效

应差异，从回波中稀疏重构每个亮点的反射波成分，对稀疏重构的单亮点反射波，构造基于 MP 分解的二维子空间处理（MP-MUSIC）方法和时频分布（MP-WVD），分别用来提取水下目标亮点方位角、俯仰角、微多普勒频率信息及时频分布特征，将多亮点参数估计转化为多个单亮点参数估计问题。所提出的方法具有噪声鲁棒性、高分辨性以及亮点数目多于阵元数的欠定问题处理能力。

（4）构建了一套消声水池实验系统，开展了消声水池实验研究。模拟水下目标回波数据，提取了水下目标多亮点角度、角度-多普勒像、微多普勒特征、角度-微多普勒像等时、频、空域多维度信息特征，验证了所提方法的正确性和有效性。

项目研究成果获国家核心知识产权 22 项（发明专利 10 项，软件著作权 12 项），专利转让 4 项；相关的科研论文发表 130 余篇。多名知名专家认为，该成果技术先进，创新性强，总体达到国内领先水平，国际先进水平。研究成果已成功应用于中国船舶重工集团第 760 研究所、福州大禹电子科技有限公司、北京三驰惯性科技股份有限公司、武汉普惠海洋光电技术有限公司、武汉云港科技有限公司等多家企业的产品研发中，新增销售收入 4300 余万元，产出了显著的经济和社会效益。

四、客观评价

（1）项目理论性评价

申报团队关于水下阵列信号目标稀疏表示、稀疏约束求解、稀疏信号高分辨声成像、稀疏重构声目标方位估计等方面技术获得了国内

外同行的充分认可，其中西北工业大学马远良院士认可并特别强调了突破水声成像分辨率的应用前景，并指出稀疏分解是高分辨声成像的重要技术途径之一；中国船舶重工集团公司第 705 研究所樊书宏研究员充分肯定了项目研究使用稀疏信号处理提取时频空域信息方面取得的成果；哈尔滨工程大学乔钢教授指出，应将本项目取得的稀疏信号处理结果推广用于稀疏水声信道估计；西安电子科技大学刘铮教授特别肯定了项目研究取得的消声水池实验结果，消声水池验证的结果是有价值的结果；Alkhowaiter、Kumar 等国外同行对相关研究成果进行了引用。本研究发表相关学术论文 130 余篇，授权国家发明专利 10 项，软件著作权 12 项，相关论文总引用达 400 余次，他引 300 余次。

（2）相关项目验收结论

该项目受国家自然科学基金项目“水下多目标回波稀疏表示及声成像方法研究”资助，国家自然科学基金委员会验收结论为：“该项目在揭示水下多目标回波的稀疏性表征机理、水下多目标稀疏声成像方法方面具有创新性，为解决水下多目标声成像问题提供了有效技术途径”。

该项目受陕西省自然科学基金基础研究计划项目“UUV 水声组网通信与协同探测方法研究”资助，陕西省科学技术厅验收结论为：“该项目完成了水声网络拓扑设计、水声多源信息融合，以及目标协同跟踪理论与方法研究，具有创新性，成果可应用于水下多平台协同探测领域”。

该项目受陕西省自然科学基金基础研究计划项目“蛙人小目标探测的信号处理算法研究”资助，陕西省科学技术厅验收结论为：“该项目提出了水下蛙人声学模型、探测信号相干积累等新理论和方法，在水下小目标主动探测领域具有应用价值”。

该项目受中国船舶重工集团第 705 研究所水下信息与控制重点实验室基础研究基金项目“xxx 探测信息融合及协同 xxx 技术研究”资助，中国船舶重工集团第 705 研究所组织专家验收结论为：“该项目在主被动异类传感器信息融合、信息不连续条件下自适应加权协同 xxx、xxx 任务动态变化条件下协同 xxx 方面取得创新性进展”。

（3）多家应用单位的认可

申报团队研发的水下阵列信号稀疏表示、高分辨声成像技术、稀疏重构声目标方位估计技术和水下目标回波稀疏表示及声成像的消声水池系统，在新型声呐产品、声成像设备、以及海军某型号装备等研制过程中实际应用，并得到相关应用单位的一致认可。

福州大禹电子科技有限公司将稀疏信号处理高分辨声成像技术成功应用于成像声呐产品中，该技术利用目标信号的空域稀疏性，通过稀疏表示与求解的方法获得目标方位信息，可准确分辨多个相邻目标。该技术原理可解释性强，计算复杂度适当，便于工程实现，可靠性较高，显著提升了水下目标的探测性能，有效解决了产品应用过程中的技术难点问题。使公司的相关产品竞争力增强，创造了良好的经济效益，同时增加 10 人的就业岗位。

北京三驰惯性科技股份有限公司使用阵列信号稀疏表示方法与

目标方位稀疏约束求解技术研发声呐新产品，该技术利用稀疏约束优化求解技术，从阵元域信号中解算出目标信号准确方位，对相邻目标的解算能力要优于传统算法。该技术原理清晰明了，程序计算量适当，方便于嵌入式系统上实现，可靠性有保证，显著提升了水下相邻目标的探测性能，成果实现了产品的实际应用，节约了大量产品研发成本，同时增加 5 人的就业岗位。

武汉普惠海洋光电技术有限公司将稀疏重构声目标方位估计技术用于水下成像声呐产品中，该技术应用于不同扫描距离每次回波的多目标方位估计，可显著减少成像过程中出现的伪目标。该技术原理可解释性强，计算量适度，方便于产品实现，极大降低了公司相关产品研发的经济成本和时间成本，提升了竞争力，同时增加 8 人的就业岗位。

武汉云港科技有限公司将稀疏表示声成像技术用于成像声呐产品中，该技术从水下目标回波的空域稀疏性入手，结合多维度特征提取技术，在传统多波束成像基础上进一步通过稀疏表示及最优化求解获得更优的声成像。该技术显著提升了水下目标声成像的准确性，并有效解决了产品应用过程中的技术实现难题，使公司产品性能提升的同时降低了研发成本，创造了良好的经济效益和社会效益，同时增加 8 人的就业岗位。

武汉祁扬科技有限公司将稀疏重构声目标方位估计技术用于成像声呐产品中，该技术基于水下目标回波在时域、频域、空域的多维稀疏特性，通过构建先进稀疏模型与优化算法，在传统成像方法基础

上实现了更高分辨率的声学成像。该技术原理清晰，计算效率满足工程实时性要求，易于集成到产品系统中，成像结果稳定可靠，同时增加 5 人的就业岗位。

宁波博海深衡科技有限公司将稀疏重构声目标方位估计技术用于成像声呐产品中，该技术能够有效抑制水下环境噪声，对多传感器检测结果进行融合处理，提高系统检测性能。该技术原理可解释性强，计算复杂度适当，方便于工程实现，可靠性较高，同时增加 2 人的就业岗位。

中国船舶重工集团第 760 研究所在研制某项目的水声实验中应用了稀疏高分辨声成像方法和实验系统，取得了预期的实验结果，加快了该研制项目的进度，为我国的装备事业做出了应有的贡献。

五、项目的应用推广及效益情况

(1) 阵列信号目标稀疏表示方法与目标方位稀疏约束求解技术、稀疏信号处理高分辨声成像技术、稀疏重构声目标方位估计技术、稀疏表示声成像技术等应用于主要应用单位的相关声呐、声成像产品中，新增销售收入 4300 余万元。相关技术解算信号准确，计算量适中，提升产品性能的同时降低了企业成本，增强了企业核心竞争力，有力推动了中国高端装备行业的发展。

(2) 稀疏高分辨声成像方法和实验系统应用于海军某型号产品的研制中，取得了良好的预期试验结果，有力保证军用某型号产品的研制进程，为我国的装备事业做出了杰出贡献。

(3) 在研究成果的攻坚过程中，团队聚焦高端装备与水下军工

技术领域，培育了一批高素质科技人才—其中 5 人已晋升高级职称，8 名博士、20 余名硕士研究生顺利毕业，1 名博士后出站，百余名优秀本科生成长为行业储备力量。这些人才的涌现，为高端装备及军工产业的技术创新注入了核心动能，有力推动了领域内的技术突破与产业升级。同时，研究成果的产业化落地需要大量专业化技术人才支撑，这不仅为相关科研院所、国内龙头企业输送了适配的技术力量，创造了更多精准对口的就业岗位，更通过产学研协同，带动了行业内高校毕业生与技术人员的就业质量提升及研发能力进阶，对推动社会生产力发展、助力产业高质量升级具有深远意义。

六、主要知识产权

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	水下主动探测系统的实时信息处理及数据传输方法	中国	ZL201210199357.8	2014. 07. 16	1444625	西北工业大学	冯西安，张杨梅，张丽丽
2	发明专利	水下运动目标回波模拟方法及收发一体化装置	中国	ZL201710308617.3	2019. 11. 05	3581984	西北工业大学	冯西安，张杨梅，寇思玮，黄辉
3	论文	Robust adaptive beamforming based on interference-plus-noise covariance matrix reconstr	美国	2020, 97: 87-96	2020. 10	Progress In Electromagnetics Research M	西安航空学院	Bi, Yang; Feng, Xi'an; Guo, Tuo

		uction method						
4	论文	Sparse Spatial Spectral Fitting with Nonunifo rm Noise Covarian ce Matrix Estimati on Based on Semidefi nite Optimiza tion	英国	2022,20 22:1648 244	2022.09. 15	Wireless Communic ations & Mobile Computin g	陕西科 技大学	Guo, Tuo; Bi, Yang; Feng, Xi'an; Yan, Luoheng
5	论文	A Source Seeking Method for the Implicit Informat ion Field Based on a Balanced Searchin g Strategy	瑞士	2023,12 (14):30 27	2023.07	Electron ics	西安航 空学院	Liu, Kun; Bi, Yang; Zhang, Qi; Li, Junfang
6	论文	双重优化 的宽带聚 焦波束形 成算法研 究	中国	2017,38 (8):156 3-1571	2017.08. 01	兵工学报	西安航 空学院	毕杨, 王英 民, 王奇
7	论文	水声信号 处理中的 稀疏表示 理论及应 用	中国	2021,49 (9):184 0-1851	2021.09	电子学报	西北工 业大学	冯西安, 寇 思玮, 谭伟 杰, 毕杨
8	论文	Angle-mi cro-Dopp ler	荷兰	2022,18 8:10856 3	2022.01	Applied Acoustic s	西北工 业大学	Kou, Siwei; Feng,

		frequency image of underwater target multi-highlight combining with sparse reconstruction						Xi'an
9	论文	An Improved Kalman Filter Based on Long Short-Memory Recurrent Neural Network for Nonlinear Radar Target Tracking	英国	2022, 2022: 8280-428	2022. 08. 21	Wireless Communications & Mobile Computing	西安航空学院	Song, Fei; Li, Yong; Cheng, Wei; Dong, Limeng; Li, Minqi; Li, Junfang
10	论文	非高斯噪声中水下目标辐射噪声的分布式检测融合方法	中国	2024, 46(11): 3605-3612	2024. 4	系统工程与电子技术	西北工业大学	乔路, 赵金虎, 冯西安

七、主要完成人

排名	姓名	技术职称	行政职务	工作单位	完成单位	对本项目的贡献
1	毕杨	教授	液压技术研究院常务副院长	西安航空学院	西安航空学院	项目负责人，负责项目的总体设计和具体组织实施。揭示水下目标回波的稀疏性表征机理，给出回波数据的一般性稀疏表示方法；提出基

						于稀疏分解的高分辨 DOA 估计算法，提高方位分辨率；利用双源、五源及九源相干和非相干信号对稀疏 DOA 高分辨估计方法的正确性进行对比仿真实验，在水池环境中，验证所提出的稀疏 DOA 高分辨估计方法的正确性。
2	冯西安	教授	无	西北工业大学	西北工业大学	负责该项目的总体研究方向和研究方案、各关键技术的研究和实施工作。主要贡献为：提出了 l_1 范数约束和奇异值分解稀疏重构的离网格处理方法；提出移动平台抗混响稀疏重构高分辨角度-多普勒成像方法；设计了与回波调制成分相匹配的 MicroDopplerlet 时频字典；提出了稀疏重构微动亮点目标高分辨角度-微多普勒成像方法。
3	张杨梅	副教授	无	西安航空学院	西安航空学院	项目核心研究骨干成员，参与了项目的全过程研究。提出基于 Hankel 矩阵分解的互素阵列高分辨目标定向、提出阵元失效下基于 Khatri-Rao 积的高分辨测向方法、提出任意复包络信号的匀速运动目标回波脉间补偿及相干积累。
4	乔路	/	无	西北工业大学	西北工业大学	项目核心研究骨干成员。主要贡献为：参与提出了 l_1 范数约束和奇异值分解稀疏重构的离网格处理方法；参与提出了移动平台抗混响稀疏重构高分辨角度-多普勒成像方法；参与提出了稀疏重构微动亮点目标高分辨角度-微多普勒成像方法；提出了非高斯噪声中水下目标辐射噪声检测方法。
5	郭拓	讲师	无	陕西科技大学	陕西科技大学	项目核心研究骨干成员，提出了原子间干扰抑制的正交匹配追踪测向方法、提出一种基于动态字典的稀疏目标方位估计方法、提出了迭代加权原子核范数最小化的无网格目标测向方法。
6	谭伟杰	讲师	无	贵州大学	贵州大学	项目核心研究骨干成员，参与了项目的全过程研究。主要贡献为：提出了原子间干扰抑制的正交匹配追踪测向方法、提出一种基于动态字典的稀疏目标方位估计方法、提出

						了迭代加权原子核范数最小化的无网格目标测向方法。
7	宋飞	副教授	无	西安航空学院	西安航空学院	项目核心研究骨干成员，主要负责贡献为：参与移动平台抗混响稀疏重构高分辨角度-多普勒成像方法的设计和实验验证，参与项目消声水池实验系统的构建和实验方案的设计。
8	刘坤	副教授	无	西安航空学院	西安航空学院	项目核心研究骨干成员，主要负责贡献为：参与了稀疏重构微动亮点目标高分辨角度-微多普勒成像方法的设计和实验验证，参与项目消声水池实验系统的构建和实验方案的设计。
9	张琦	工程师	无	西安航空学院	西安航空学院	项目核心研究骨干成员，主要负责贡献为：参与了稀疏重构微动亮点目标高分辨角度-微多普勒成像方法的实验验证，参与项目消声水池实验系统的构建和调试，并全程参与了实验过程。
10	李军芳	正高级工程师	无	西安航空学院	西安航空学院	项目核心研究骨干成员，主要负责贡献为：参与 l_1 范数约束和奇异值分解稀疏重构的离网格处理方法的设计和实验验证，参与项目消声水池实验系统的构建和实验方案的设计

八、主要完成单位及创新推广贡献

排名	单位名称	主要贡献
1	西安航空学院	本单位对于本项目科技创新和推广应用情况的贡献在于：全力支持配合该项目的顺利实施，在实验室及设备使用方面给予优先权，积极安排实验室人员予以配合相关的实验及测试工作。学校科技部门积极协助项目的申报和实施工作。
2	西北工业大学	本单位对于本项目科技创新和推广应用情况的贡献在于：本项目实施过程中，我校教师积极配合该项目的工作，在设备使用、场地提供、测试分析、研讨指导等方面给予积极的支持与配合。
3	陕西科技大学	本单位对于本项目科技创新和推广应用情况的贡献在于：本项目实施过程中，我校教师积极配合该项目的工作，学校在设备使用、测试分析等方面给予积极的支持与配合。
4	贵州大学	本单位对于本项目科技创新和推广应用情况的贡献在于：本项目实施过程中，我校教师积极配合该项目的工作，学校在设备使用、测试分析等方面给予积极的支持与配合。

九、完成人合作关系说明

项目研究期间（2014 年 1 月-2024 年 11 月），10 位主要完成人以“产学研协同、老中青互补”的合作模式，围绕高端装备与水下军工技术领域的关键问题，形成了紧密且高效的协作体系。

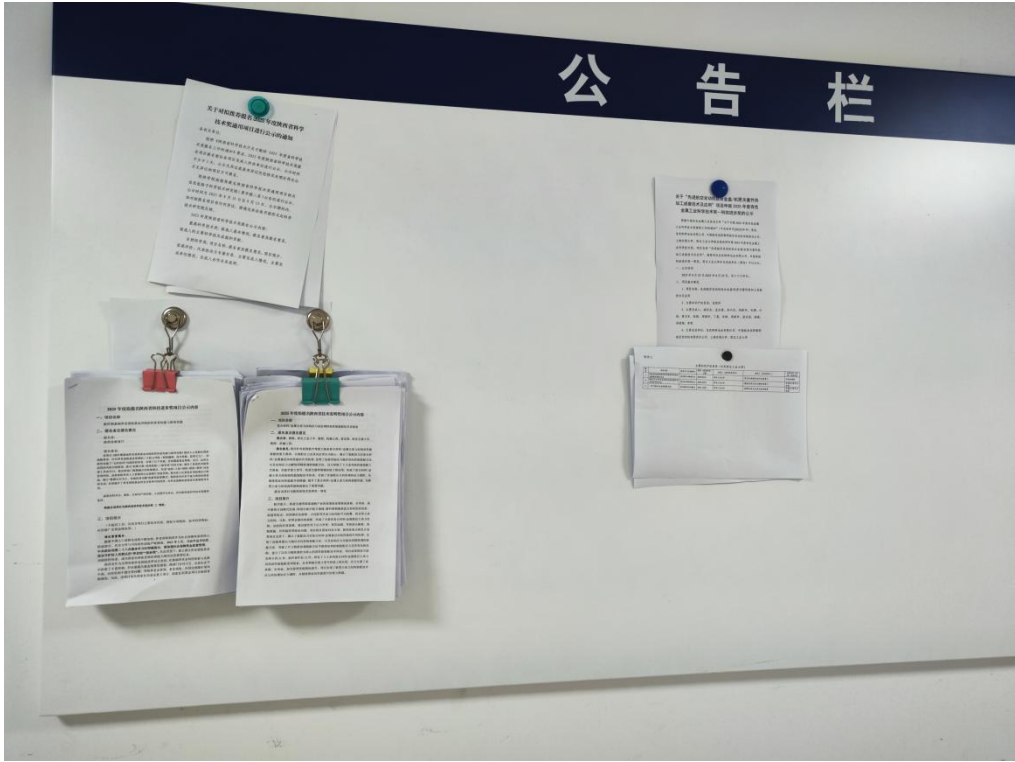
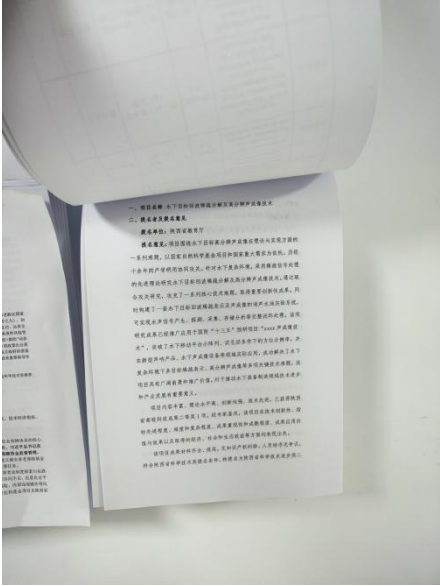
毕杨、张杨梅、郭拓、谭伟杰、宋飞、刘坤均毕业于西北工业大学，张琦毕业于西安石油大学，李军芳毕业于西安电子科技大学。其中，毕杨、张杨梅、宋飞、刘坤、张琦、李军芳共同任职于西安航空学院，均为多模态异构信息的智能感知处理创新团队核心成员，项目第 1 完成人毕杨为团队带头人，郭拓任职于陕西科技大学，谭伟杰任职于贵州大学。项目第 2 完成人冯西安教授的工作单位为西北工业大学，是毕杨、张杨梅、乔路、谭伟杰的导师。10 位完成人以西安航空学院、西北工业大学航海学院相关实验室为核心协作阵地，通过定期研讨会、实验数据共享平台，实现了研究进度的同步推进与问题的高效解决，形成了涵盖研究报告、核心论文、发明专利等在内的多元成果体系。

其他完成单位公示：“水下目标回波稀疏分解及高分辨声成像技术”，
其他完成单位公示信息：

1、西北工业大学。

公示方式：线下公示。

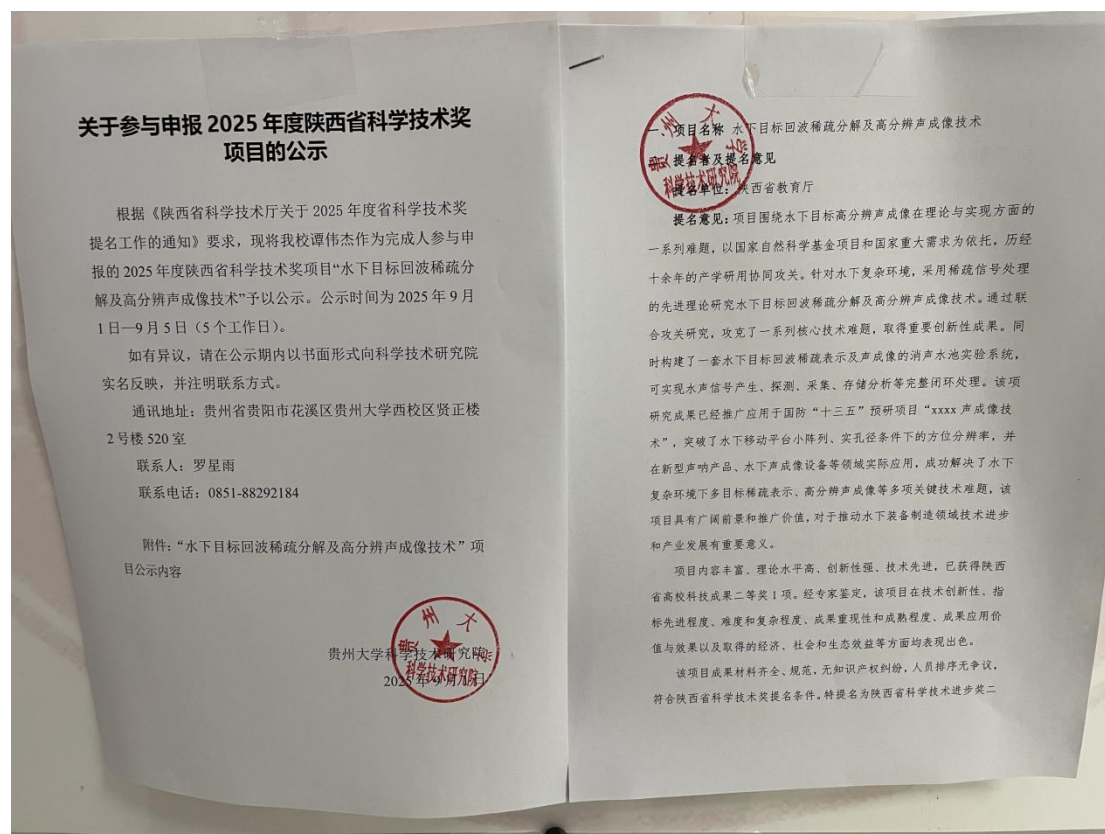
公示地点：西北工业大学科学技术研究院（勇字楼二层）公告栏



2、贵州大学

公示方式：线下公示。

公示地点：贵州大学贤正楼五楼



3、陕西科技大学。

公示方式：线下公示。

公示地点：陕西科技大学西安校区逸夫楼 603 办公室外墙

关于对 2025 年度陕西省科学技术奖拟提名项目的公示

根据陕西省科学技术厅“关于 2025 年度省科学技术奖提名工作的通知”的要求，提名陕西省科学技术奖的项目应在完成单位、项目所有主要完成人所在工作单位、完成单位范围内进行公示。

现将陕西科技大学拟提名、参与提名的 2025 年度陕西省科学技术奖励项目信息予以线下公示，征询异议。自公布之日起五日内，任何单位或者个人对公布项目持有异议，或认为有文字错漏需要更正的，可以向校科技处提出，我们将按照有关规定进行处理。提出异议的单位或个人应当提交书面异议材料和必要的证明，并在书面材料上加盖单位公章或个人署名，提供联系方式；以匿名方式提出的异议一般不予受理。

公示地点：逸夫楼 603 办公室

公示日期：2025 年 8 月 30 日至 9 月 3 日

联系电话：86168071 联系人：李老师

