

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	无限维压缩感知理论与雷达侦测
主要完成人	杨在，师俊朋，吴训蒙，徐宗本
主要完成单位	西安交通大学，国防科技大学电子对抗学院

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 checked="" type="checkbox"/> 一等奖 <input type="checkbox"/> 二等奖及以上
<p>提名意见：</p> <p>频谱分析是数学与信息科学交叉前沿课题，也是雷达侦测、无线通信等国家重大需求领域的核心基础。针对这些领域当前面临的精度需求高和采样数据少之间的矛盾，项目系统提出了以无限维压缩感知为核心的高维、多通道频谱感知新理论与新方法，主要成果包括三方面：</p> <p>1) 解决了自 1982 年提出的 Carathéodory-Fejér 定理高维形式公开问题，据此发展出了高阶无限维压缩感知的可行算法，被数学与信息领域均评价为“首次”；</p> <p>2) 建立了多通道无限维压缩感知频谱恢复理论与半正定规划算法体系，揭示了利用多通道采样提升频谱分析精度的内在机理，被雷达和通信领域广泛采用；</p> <p>3) 解决了自 1973 年提出的两奇异半正定矩阵 Schur-Hadamard 积的正定性判定公开问题，被写入了本科线性代数教材，并据此建立了雷达信源波达方向估计的性能界理论。</p> <p>项目以解决重要工程领域中的核心问题为导向，通过深刻发掘并潜心解决其中的深层次数学难题，提出了新颖的基础数学理论和可行的工程解决方案，形成了数学与信息科学深度交叉融合的研究范例。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。</p> <p>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。</p>			

三、项目简介



图 1：项目组三方面科学发现

科学发现 1：解决了自 1982 年提出的 Carathéodory-Fejér 定理高维形式公开问题，据此发展出了高阶无限维压缩感知的可行算法和信号域极大似然算法原理。高维频谱分析是捕获无线信道和雷达目标侦测中方向角、俯仰角、多普勒等高维连续参数的算法核心。压缩感知奠基人、美国科学院院士 Emmanuel Candès 于 2014 年开创了无限维压缩感知理论，以解决一维和高维频谱分析中早期压缩感知方法无法处理连续参数的根本局限。然而，由于缺乏 Carathéodory-Fejér 定理高维形式这一核心数学工具，Candès 未能解决高维情况下的计算难题。事实上，Carathéodory-Fejér 定理高维形式被 IEEE 信息论学会 Fellow 委员会主席 Antonia M. Tulino 称为高维频谱分析的“基本问题”，自 1982 年被佐治亚理工教授 James H. McClellan 提出以来一直未解决。通过创新性地引入矩阵秩约束，项目组证明了半正定多层 Toeplitz 矩阵 Carathéodory-Fejér 分解的存在性和唯一性，从而建立了高维 Carathéodory-Fejér 定理，从本质上扩展了 100 多年前的经典理论，并据此提出了高阶无限维压缩感知的可行算法，并开辟了直接求解信号域极大似然问题的结构矩阵优化方法新路径。代表性论文单篇 WoS 核心库他引 157 次。被 Tulino 评价为对 Carathéodory-Fejér 定理高维形式的“首次成功尝试”（first successfully tentative）、“最著名结果”（the best known result），被瑞典隆德大学 Fredrik Andersson 教授称为“首次发现”（first observed），已作为核心方法被 90 篇文献应用于解决雷达侦测、无线通信等工程技术领域中的高维频谱计算问题，形成了以半正定多层 Toeplitz 矩阵优化为核心的高维频谱计算算法设计的新范式。

科学发现 2：建立了多通道无限维压缩感知频谱恢复理论与半正定规划算法体系，揭示了利用多通道采样提升频谱分析精度的内在机理。多通道采样是提升频谱分析精度、突破单通道采样资源限制的有效且常用手段。压缩感知奠基人 Emmanuel Candès 建立的无限维压缩感知变革性理论仅适用于单通道采样，不能有效利用多通道信息。然后，由于各通道信号之间关系的多样性，如何提出多通道无限维压缩感知算法并精确刻画其性能与通道

数的依赖关系十分困难。为此，项目组提出了联合稀疏原子集合和多通道原子范数概念，基于 Carathéodory-Fejér 定理给出了半正定规划求解算法，并基于向量值三角多项式对偶证书和高维随机分析，揭示了多通道采样提升频谱分析精度的内在机理，构建了多通道无限维压缩感知理论与算法体系。代表性论文单篇 WoS 他引 144 次。所提多通道原子范数方法的定义、算法、理论已被 64 篇论文作为方法基座应用于工程领域，如被 IEEE Fellow、美国科罗拉多矿业学院教授 Michael B. Wakin 在 6 篇论文中多次展示并“解读”（interpret），称多通道原子范数为“核心（core）定义”，明确“提高了性能”、“改进了样本复杂度”。

科学发现 3：解决了自 1973 年提出的两奇异半正定矩阵 Schur-Hadamard 积的正定性判定公开问题，建立了雷达信源波达方向估计的性能界理论。阵列测向或波达方向估计是雷达目标侦测的基础。然而，波达方向估计算法的实用性和可靠性受到实际雷达信源相干性等非理想因素的挑战。此时，由于 Toeplitz 协方差矩阵结构被破坏，原 Carathéodory-Fejér 定理理论基础不再适用。项目组首次发现：方向参数能够被唯一辨识当且仅当两个半正定矩阵的 Schur-Hadamard 积（即逐点乘积）严格正定，其中两矩阵因子均可奇异，从而将原工程问题转化为优美的数学问题。上述数学问题正是 1911 年建立的 Schur 积定理的内容，但该经典理论要求至少一个矩阵因子正定。事实上，两奇异半正定矩阵 Schur-Hadamard 积的正定性判定自 1973 年被加拿大统计学会会士 George P. H. Styan 提出以来，一直是统计学和矩阵论领域的公开问题。为此，项目组创新性地引入了矩阵 Kruskal 秩概念，给出了允许两矩阵因子均奇异且 Schur-Hadamard 积正定的一般性条件，从而回答了上述公开问题，从本质上拓展了 100 多年前的 Schur 积定理，进而提出了全新的相干信源测向参数可辨识条件，为复杂战场环境下雷达目标侦测提供了理论支撑。上述两奇异半正定矩阵 Schur 积定理已被美国数学家 Roger Horn 写入了其最新出版的本科线性代数教材，据此解释了 1973 年 Styan 的举例成立的内在机理。应瑞典科学院院士 Mats Viberg 邀请，项目组撰写了波达方向估计的综述章节，被 Viberg 在信号处理学会 75 周年纪念专刊中推荐为“有关稀疏波达方向估计技术的全面综述”。五篇代表性论文发表于数学与信息科学交叉权威期刊 IEEE Trans. Inf. Theory（1 篇）、IEEE Trans. Signal Process.（3 篇）和 IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.（1 篇），一篇专著章节被编纂收录于信号处理丛书《Academic Press Library in Signal Processing》。六篇代表作 WoS 核心库他引 550 次，其中三篇引用超 100 次，谷歌学术引用共计 931 次（附件-检索证明）。研究成果被美国、英国、加拿大、俄罗斯、瑞典、中国等国院士正面评价，作为核心理论与方法被 100 多篇论文应用于工程技术领域，单位涵盖哥伦比亚大学、卡内基梅隆大学、加州大学洛杉矶分校、法国国家科学研究中心、慕尼黑工业大学、清华大学、香港中文大学等国内外著名高校和科研机构。为华为公司开发的无人驾驶毫米波雷达测向技术成果被评为“优秀”。项目第一完成人受邀在第 25 届欧洲信号处理会议讲授三小时 Tutorial 课程，是该国际顶级会议首位大陆学者担任的 Tutorial 授课人，还担任西交-华为数学技术联合实验室副主任以及信号处理领域旗舰期刊 IEEE Trans. Signal Process. 编委 (Associate Editor)（附件 4），入选了 2019 年基金委“优青”。第四完成人是中国科学院院士，长期坚守在稀疏信息处理研究第一线，提出了著名的压缩感知 $1/2$ 范数正则化理论并成功应用于雷达成像，荣获陈嘉庚信息技术科学奖和华罗庚数学奖。项目成果已获 2024 年陕西高等学校科学技术研究优秀成果特等奖。

四、客观评价

科学发现 1 的第三方评价及应用情况：代表作 1、2 合计被引用 **342/168** 次（谷歌学术/WoS 核心库他引）。IEEE 信息论学会 Fellow 委员会主席 Antonia M. Tulino 在[IEEE Trans. Wireless Commun., 2021]中 **46** 次引用**代表作 1**，评价：高维 Carathéodory-Fejér 定理成立与否是高维频谱分析的“**基本问题**”（fundamental question），**代表作 1** “通过引入半正定多层 Toeplitz 矩阵将 Carathéodory-Fejér 定理拓展到了维数大于 1 的情况”，该结果是对上述问题的“**首次成功尝试**”（first successfully tentative）“**最著名结果**”（the best known result），评价半正定规划算法是高维频率恢复“**领先解决方案**”（state-of-the-art solution）（**代表性引文 1**）。瑞典隆德大学 Fredrik Andersson、Marcus Carlsson 教授在[Complex Anal. Operator Theory, 2017]中评价：**代表作 1** 的会议版本“**首次发现**”（first observed）了高维 Carathéodory -Fejér 定理。法国里维埃拉大学研究员 Bernard Mourrain 在[Found. Comput. Math., 2017]中评价：**代表作 1** “将半正定 Toeplitz 矩阵 Vandermonde 分解推广到了半正定多层 Toeplitz 矩阵”（**代表性引文 2**）。IEEE Trans. Signal Process.期刊主编 Zhi Tian 教授评价：**代表作 1** 提出的半正定规划算法是“（二维及以上）高维线谱估计**通用算法**”（general approach for higher (≥ 2) dimensional line spectrum estimation）。

科学发现 1 已被 **90** 篇论文作为**核心算法应用**解决雷达侦测、无线通信、麦克风阵列等工程技术领域中的核心高维频谱计算问题。例如，IEEE Fellow、美国哥伦比亚大学教授 Xiaodong Wang 将该成果在[IEEE JSAC, 2021]等 **6** 篇论文中应用于解决**正交频分复用无源雷达时延-多普勒估计**、**毫米波多输入多输出无线信道估计**、**多用户联合时偏与无线信道估计**、**高移动无线信道估计**等问题，分别指明：“为计算方便，我们将用原子范数的如下等价形式[**代表作 1**]”、“将使用二维原子范数的如下形式[**代表作 1**]等价地推导出(18)的凸形式”、“（省略公式）的原子范数有如下等价形式[**代表作 1**]”、“我们将使用矩阵束法从矩阵（省略公式）中提取（省略公式），具体步骤如下[**代表作 1**]”。此外，被 IEEE Trans. Signal Process.期刊主编 Zhi Tian 教授在 **6** 篇论文中应用于**大规模无线信道估计**、**二维阵列测向**等；被 IEEE Fellow、美国加州大学圣地亚哥分校 Peter Gerstoft 教授在 **2** 篇论文中应用于**大规模信道测量与散射簇识别**；被电子科技大学何子述教授在 **6** 篇论文中应用于**机载雷达空时自适应处理**等。（**附件 1**）

在徐宗本院士带领下，项目组同华为公司创建了**西交-华为数学技术联合实验室**，项目完成人任实验室**副主任**。该科学发现已被应用于无线通信信道估计、无人驾驶毫米波雷达感知等华为公司的核心技术领域，将频分双工无线通信系统信道估计精度提升 20%，将无人驾驶毫米波雷达感知针对车辆、行人的测角精度提升 30%，合作项目获评“优秀”。（**附件-结题证明**）

科学发现 2 的第三方评价及应用情况：代表作 3 被引用 **303/144**（谷歌学术/WoS 他引）。IEEE Fellow、美国卡内基梅隆大学教授 Yuejie Chi 同期提出了多通道原子范数及其半正定规划算法，指明：**代表作 3** 的多通道频谱恢复理论比她们的结果更强。IEEE Fellow、压缩感知领域权威专家 Michael B. Wakin 在[IEEE Trans. Signal Process., 2018]中将**代表作 3** 成果直接应用于**器件结构模态分析**，明确指出：“在这项工作中，我们将解释[**代表作 3**]中的结果如

何能在恢复结构的振型和频率的背景下**解读**（interpret）”、“所有这些表述都基于相同的原子范数**核心定义**（core definition），该定义在[**代表作 3**]中建立并在此重复”、“下面的**定理摘自**[**代表作 3**]中的定理 4”、“[**代表作 3**]中的下述**定理表明**我们可以高概率准确恢复信号并估计频率”（**代表性引文 4**）。Michael B. Wakin 还在两外 5 篇论文中将上述成果应用或推广至未知波形调制雷达超分辨、无线通信自适应干扰消除、多载频信源阵列测向等问题。美国加州大学洛杉矶分校教授 Lieven Vandenbergh 在[SIAM J. Optim., 2017]中评价**代表作 3**“指出了多通道测量的优势”（**代表性引文 5**）。据统计，代表作 3 成果已作为核心理论与方法被 64 篇论文详细展示并应用于工程技术领域。（**附件 2**）

科学发现 3 的第三方评价及学术影响：Am. Math. Mon.期刊前主编、美国数学家 Roger Horn 与项目完成人合作在[Horn-Yang, Linear Algebra Appl., 2020]中给出了项目组建立的两奇异半正定矩阵 Schur 积定理的更直接证明，将**代表作 4**为唯一文献推荐为“定理 4（即该 Schur 积定理）的更早证明”出处（An earlier proof of Theorem 4 involves Khatri-Rao products; see [17, Section IV]）。Roger Horn 进一步将该成果写入了其 2023 年出版的本科生线性代数教材《Matrix Mathematics: A Second Course in Linear Algebra》，对 1973 年 Styan 的举例给出了明确解释，指出：“矩阵**A**的秩为 2，矩阵**B**每两列线性无关”“这足够保证**A, B**的 Hadamard 积正定”。芬兰国家科学院主席 Heikki Mannila 在[Data Min. Knowl. Disc., 2024]中指出：**代表作 4**引入了平滑协方差矩阵，定义为两个矩阵的 Hadamard 积”（In signal processing, Yang et al. (2019) introduce a smoothed covariance matrix defined as a Hadamard product of two matrices）（**代表性引文 6**）。中国人民解放军陆军工程大学教授许魁在[IEEE Trans. Cognit. Commun. Networking, 2022]中评价：“[代表作 4]提出了一种 Hadamard 积方法来研究基于空间平滑 MUSIC 的波达方向估计对阵列尺寸的要求”（**代表性引文 7**）。IEEE Fellow、香港城市大学 H C So 教授在[IEEE TSP, 2023]中指出：**代表作 5**能够应用于相干和不相干目标共存条件下分置 MIMO 雷达 DOD 和 DOA 估计（the SS approach is applied to joint DOD and DOA estimation for bistatic MIMO radar under the coexistence of coherent and uncorrelated targets）。IEEE Life Fellow、上海交通大学 T K Truong 教授在[IEEE TRS, 2023]中评价：相比于等效孔径的相控阵雷达设计算法，**代表作 5**在分辨率、精度和辨识能力方面具有更强的性能（these algorithms have proved to provide enhanced capabilities in terms of resolution, accuracy, and identifiability, relative to the algorithms designed for their equivalent-aperture phased-array radars）。**代表作 6**被引用 308/162 次（谷歌学术/WoS），作为唯一文献被瑞典科学院院士 Mats Viberg 在信号处理学会 75 周年纪念专刊中推荐为“有关稀疏波达方向估计技术的全面综述”（**代表性引文 8**），所提出的“在网、离网、无网”稀疏方法的命名和分类方式已成为领域标准，被包括以色列科学与人文科学院院士 Yonina Eldar 在内的**国际知名学者跟随采用**。项目完成人受邀以第一授课人身份在第 25 届欧洲信号处理会议就“阵列处理的稀疏估计方法”（Sparse Estimation Methods for Array Processing）讲授三小时 Tutorial 课程，是该国际顶级会议自 2005 年网上有公开资料可查以来**首位大陆学者担任的 Tutorial 授课人**。（**附件 3、4**）

项目成果已获 2024 年陕西高等学校科学技术研究优秀成果特等奖。

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	Vandermonde Decomposition of Multilevel Toeplitz Matrices With Application to Multidimensional Super-Resolution	IEEE Transactions on Information Theory	Zai Yang, Lihua Xie, Petre Stoica	2016 年 62 卷 3685 页-3701 页	2016 年 04 月 12 日	Zai Yang	Zai Yang	杨在	157	Web of Science 核心合集	是
2	Maximum Likelihood Line Spectral Estimation in the Signal Domain: A Rank-Constrained Structured Matrix Recovery Approach	IEEE Transactions on Signal Processing	Xunmeng Wu, Zai Yang, Petre Stoica, Zongben Xu	2022 年 70 卷 4156 页-4169 页	2022 年 08 月 16 日	Zai Yang	Xunmeng Wu	吴训蒙, 杨在, 徐宗本	11	Web of Science 核心合集	是
3	Exact Joint Sparse Frequency Recovery via Optimization Methods	IEEE Transactions on Signal Processing	Zai Yang, Lihua Xie	2016 年 64 卷 5145 页-5157 页	2016 年 06 月 07 日	Zai Yang	Zai Yang	杨在	144	Web of Science 核心合集	是

4	Source Resolvability of Spatial-Smoothing-Based Subspace Methods: A Hadamard Product Perspective	IEEE Transactions on Signal Processing	Zai Yang, Petre Stoica, Jinhui Tang	2019年67卷2543页-2553页	2019年03月28日	Zai Yang	Zai Yang	杨在, 唐金辉	25	Web of Science 核心合集	是
5	On Parameter Identifiability of Diversity-Smoothing-Based MIMO Radar	IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems	Junpeng Shi, Zai Yang, Yongxiang Liu	2022年58卷1660页-1675页	2021年11月09日	Zai Yang	Junpeng Shi	师俊朋, 杨在, 刘永祥	51	Web of Science 核心合集	是
6	Sparse Methods for Direction-of-Arrival Estimation	Academic Press Library in Signal Processing	Zai Yang, Jian Li, Petre Stoica, Lihua Xie	2018年7卷509页-581页	2018年01月01日	Zai Yang	Zai Yang	杨在	162	Web of Science 核心合集	是
合 计									550		
补充说明（视情填写）：											

六、主要完成人情况表

姓 名	杨在	排 名	1
行政职务	无		
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： 三方面科学发现的主要贡献人，代表作 1、3、4、6 的第一作者，所有代表作的通讯作者，是这些研究工作的思路提出、方法实现、论文写作的主要完成人或核心指导人。			

姓 名	师俊朋	排 名	2
行政职务	无		
技术职称	教授		
工作单位	国防科技大学电子对抗学院		
完成单位	国防科技大学电子对抗学院		
对本项目主要学术贡献： 代表作 5 的第一作者，是科学发现 3 的主要贡献人。与第一完成人合作，完成了代表作 5 的方法实现与论文写作。			

姓 名	吴训蒙	排 名	3
行政职务	无		
技术职称	助理教授		
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： 代表作 2 的第一作者，是科学发现 1 的主要贡献人。在第一完成人、第四完成人的指导下，完成了高维频谱分析信号域极大似然的方法实现和论文写作。			

姓 名	徐宗本	排 名	4
行政职务	无		
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： 代表作 2 的主要作者，是科学发现 1 的核心指导人和项目整体路线的主要规划人。长期从事稀疏信息处理的基础理论与方法研究，贡献了高维频谱分析信号域极大似然算法设计的基本思想，指导了方法实现与论文写作。			

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>西安交通大学为本成果的取得提供了政策、团队资源、办公场地、后勤服务等软硬件条件。该成果主要在西安交通大学“大数据算法与分析技术国家工程实验室”、“国家天元数学西北中心”、“陕西国家应用数学中心”、“西交-华为数学技术联合实验室”等科研平台的支持下完成。西安交通大学的科研管理、财务等部门为本成果相关项目的日常管理和成果申报提供了重要帮助。</p>	

单位名称	国防科技大学电子对抗学院
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>国防科技大学电子对抗学院为本成果的取得提供了政策、团队资源、办公场地等软硬件条件。该成果主要在国防科技大学电子对抗信息处理军队重点实验室、电子制约技术安徽省重点实验室等科研平台的支持下完成。国防科技大学电子对抗学院的科研管理、财务等部门为本成果相关项目的日常管理和成果申报提供了重要帮助。</p>	

完成人合作关系说明

本项目四位主要完成人（杨在、师俊朋、吴训蒙、徐宗本）之间具有长期且稳定的科研合作关系。自 2019 年到 2024 年，杨在与徐宗本教授联合指导博士生吴训蒙，共同提出了高维频谱分析信号域极大似然原理与算法，合作发表了包括代表作 1 在内的多篇论文，获得了 2024 年陕西高等学校科学技术研究优秀成果特等奖。此外，杨在与师俊朋教授合作在代表作 5 中阐明了混合信源下稀疏阵 MIMO 雷达的参数辨识机理。

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	论文合著	杨在、吴训蒙、徐宗本	2019年至今	Maximum Likelihood Line Spectral Estimation in the Signal Domain: A Rank-Constrained Structured Matrix Recovery Approach	代表作 2
2	共同获奖	杨在、吴训蒙、徐宗本	2019年至今	2024 年陕西高等学校科学技术研究优秀成果特等奖	获奖证书
3	论文合著	杨在、师俊朋	2021年至今	On Parameter Identifiability of Diversity-Smoothing-Based MIMO Radar	代表作 5