

2025 年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

一、项目名称

全场景无线通信信道测量与建模理论及应用

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：

通信网络构建前的信道建模与预测直接关乎系统的整体性能与可靠性，是推动空天地海全场景下无线通信技术持续演进的重要基石。项目组从信号传播参数测量与估计、信道建模与验证、基于信道模型的网络跨层设计三个层面开展研究，取得了三个科学理论与发现：提出了复杂散射环境下极弱多径信号检测与估计理论、揭示了无线电波在空天地海典型场景和频段下的传播机理、形成了基于信道模型的通信系统和网络协议评估和优化方法体系。在 IEEE JSAC、TWC、IOTJ、ComMag、JSTSP、TCOM、TVT、TAP、TMTT 等 IEEE 汇刊、中国卓越领军期刊 CJA、旗舰级国际会议 IEEE INFOCOM、ICC 等发表论文 100 余篇，得到 20 余位中外院士和 ACM/IEEE Fellow 的正面评价，5 篇代表性论文中 3 篇入选 ESI 高被引论文，1 篇入选 ESI 热点论文，成果出版全英文学术专著一部。项目成果支撑了华为公司 9 部 5G/6G 无线信道国际标准提案并纳入 2 部 3GPP 国际标准，还应用于中国舰船研究院、中国空间技术研究院、中国电子科技集团以及多家企业的海洋、卫星、无人机、工业厂房等通信系统的信道建模与系统评估和优化。成果获陕西高等学校科学技术一等奖、工业和信息化部国际电信联盟优秀文稿奖、国际会议优秀论文奖等。成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省自然科学奖提名条件。

提名该项目为陕西省自然科学奖 二 等奖。

三、项目简介

信道建模和预测的精准性直接关乎通信系统的整体性能与可靠性，是推动通信技术持续演进的重要基石。随着无线通信技术的迅猛发展和应用，5G/6G 蜂窝网络的信号在密集城区、基站对室内覆盖、工业厂房等环境下存在复杂电磁散射和多径传播，而星地、空地和陆海的超远距离通信导致信号极其微弱，都对无线传播信道的测量和建模提出了挑战。

项目组在国家重点研发计划课题、国家自然科学基金等项目的支持和多家科研院所及企业的合作下，开展无线信道测量与建模研究十余年，取得了三项重要科学理论与发现，并将无线信道模型进行了广泛应用。主要科学发现点为：

1. 复杂散射环境下的极弱多径信号检测与估计理论

深入分析电磁波传播本质和规律，建立了一套针对不同频段（长波、短波、毫米波等）的信道参数体系和测量方案；针对信道测量中密集相干极弱多径、天线与信道响应耦合和多径成份分簇这三个关键问题，提出了基于天线阵列的时-空域联合信号检测与传播参数估计算法、基于反卷积的天线去嵌入方法和基于机器学习的多径参数高维空间聚类算法，解决了复杂散射环境下的极弱多径信号检测与估计的难题，为无线信道测量的发展提供了关键基础理论和技术。

项目组进一步自主研制了“阵列天线+软件无线电+边缘计算”的多维域（空、时、极化域）高精度信道测量系统，包括核心部件“8通道可扩展高速射频信号采集与流盘板卡”和“实时多径参数估计软件”，覆盖 100MHz 到 70GHz 全频段、信号带宽达 200MHz、支持 128 阵子天线阵列、时延分辨率 5ns，空间分辨率小于 1 度，完成从信号采集直到信道参数提取和建模的全流程实时操作。达到国内外先进水平（欧洲信道研究项目 METIS 报告），而且解决了只能数据后处理的弊端，同时体积重量大大减小，满足车载和机载的信道测量需要，为基础研究提供了重要的科学仪器。

2. 全场景多维域信道测量、建模与验证

基于发现点一，项目组开展了空天地海全场景的信道测量与建模，包括：城市宏小区、地铁隧道、楼房建筑、城市车联网等 4G/5G/6G 地面移动通信场景、C919 大飞机总装车间和吉利汽车装配车间等工业场景、高空飞艇和低空无人机空地链路、卫星 X 和 Q/V 波段星地链路，以及极低频陆地到海洋跨介质通信链路等。利用海量实测数据，建立了一系列信道大/小尺度衰落、空/时/极化域传播参数的统计分布和数学模型，揭示了无线信号在典型场景、频段、极化下的传播规律，为我国多项重要的通信系统的设计和性能评估提供了关键依据和仿真参数。

3. 基于信道模型的无线通信网络性能评估与跨层设计

基于发现点二的信道特性和模型，项目组开展蜂窝网络和自组织网络的跨层通信系统设计和优化。建立了数据包级无线信道模型，为通信链路的信号处理和网络协议的仿真提供了仿真模型，揭示了无线信道的衰落特性对通信链路性能的影响机理，形成了基于无线信道特性和模型的通信网络跨层设计框架，通过结合信道特性，对通信信号波形体制、信号处理、网络资源分配和协议进行评估和优化，有效提升了网络的吞吐量和可靠性。

上述研究成果在 IEEE JSAC、TWC、IOTJ、ComMag、JSTSP、TCOM、TVT、TAP、TMTT 等 IEEE 汇刊、中国卓越领军期刊 CJA、旗舰级国际会议 IEEE INFOCOM、ICC 以及国际宇航大会 IAC 等发表论文 100 余篇，3 篇入选 ESI 高被引论文，1 篇入选 ESI 热点论文，3 篇获国际会议最佳论文奖，获授权国家发明专利 10 余项。R. S. Thomä、A. Molisch、L. Hanzo、T. Le-Ngoc、T. Rappaport、王承祥、李建东、沈学民等 20 余位中外院士和 ACM/IEEE Fellow 的论文对项目成果进行了引用，所提出的无线信道模型也被美国工程院院士、IEEE Fellow Vincent Poor 编写的 5G 专著、IEEE Fellow Fa-Long Luo 和 Charlie Zhang 教授编写的信号处理专著所引用。成果的室内宽带信道测量和建模、基于信道模型的高

速无线网络优化设计，编写全英文专著《Resource Management for Multimedia Services in High Data-Rate Wireless Networks》，在美国 Springer-Verlag 出版。

科学发现二中的 4G/5G 蜂窝网络城市宏小区场景三维散射信道模型和低空无人机信道模型，被华为公司采用，列入 5 项移动通信国际标准组织 3GPP 提案（3GPPTS RAN R1-131861、R1-133515、R1-134767、R1-135531、R1-1707015）并被纳入 3GPP 36.873 和 36.777 信道模型标准（《应用证明》），为 5G R15 接入网空口标准制定和技术方案评选，特别是为 5G 大规模天线阵列基站（Massive MIMO）的三维波束赋形和链路传输速率的评估，提供了重要依据。

科学发现二中的卫星对地链路信道测量数据和模型，项目组和华为公司共同向国际电信联盟 ITU 提交了 4 项针对 ITU-R P.2108 和 P.619 两部卫星信道国际标准的修正案，纳入主席报告 3K178 和 3K264，并入选工业和信息化部“2022 和 2023 年度国际电信联盟优秀文稿”。该成果是国际上首次实际测量了地形和地物（如秦岭山脉）对低仰角星地链路的杂散损耗，揭示了卫星与地面站建立链接（入站）和断开链接（出站）过程中的信道变化及其对卫星信号捕获的影响。

科学发现一和二构建了我国第一个 Q/V 频段星地信道模型，提供了大气、仰角、经纬度等参数对卫星信号衰落影响规律，助力我国新一代高通量卫星链路的设计优化。利用科学发现一和二，构建了极低频陆海跨介质信号传播模型，阐明了大气、日夜、陆地与海洋环境对极低频信号传播影响的机理，为我国大科学装置极低频探地（WEM）工程的应用提供重要依据。科学发现二和三建立的工业环境下 UHF 和 S 波段信道模型及网络优化方案，使水厂泵房高电磁干扰环境下的无线传感器网络数据传输速率提升 59%，无线网络覆盖率提升 33%，解决了厂房改造和铺设线缆的难题（《应用证明》）。科学发现二和三所建立的无人机空地信道模型和数据链协议优化方案，揭示了无人机飞行高度、姿态、抖动所引起的信道衰落规律，优化了机载天线布局与共形设计，指导了链路预算、收发机功率控制、调制方式以及差错控制协议设计，使宽带数据链传输距离达到 40 公里传输高清视频，支撑了我国第一款“太阳能空中基站无人机”研制，获得了“日内瓦国际发明展”金奖和杰出发明奖、中国国际工业博览会银奖（《应用证明》）。

项目获 2019 年陕西高校科学技术一等奖。

四、客观评价

项目发展了空天地海全场景下无线电波传播信道的测量和建模的技术理论与方法，产生了积极的学术影响，代表性论文 3、4、5 入选 ESI 全球前 1% 高被引论文，代表性论文 3 入选 ESI 全球前 1% 热点论文。项目成果得到了多个国家 20 余位院士和 IEEE Fellow 等国际权威专家的正面引用和评价。

■ 科学发现点一的代表性评价（代表性引文 1、2、3）

- (1) 信道研究领域的国际权威学者 IEEE Fellow Theodore S. Rappaport 在顶级期刊《IEEE Journal on Selected Areas on Communications》(IF: 17.2) 论文中，将发现点一基于天线阵列的空时多径信道测量方法与系统，与韩国

Samsung、日本 NTT DOCOMO、纽约大学等国际一流研究机构的系统并列为世界上主要的信道测量系统，并进行参数性能对比。（代表性引文 1）

- (2) 多项国际电信联盟标准起草人、IEEE Fellow K. C. Ho 教授在信号处理领域顶级期刊《**IEEE Transactions on Signal Processing**》（IF: 5.8）论文中引用了发现点一中关于密集多径传播参数估计算法的 2 篇论文，并正面评价：“在非视距（NLOS）或多径环境下获取波达角（AOA）观测值比获取距离测量值更具挑战性，因此需要特别小心。无论如何，已经开发出了一些方法用于多径环境下的 AOA 估计，这些方法通过设计更好的算法来考虑 NLOS/多径特性，或者使用一些特殊信号来辅助估计[40]-[44]。”（代表性引文 2）
- (3) 无线信道测量领域的国际权威、欧洲天线和传播协会（EurAAP）传播学奖获得者、IEEE Fellow Reiner S. Thomä 教授在天线与传播领域顶级期刊《**IEEE Transactions on Antennas and Propagation**》（IF: 5.8）论文中引用了发现点一中关于无线信道多径分簇算法的论文，并肯定了其中的工作：“聚类算法用于将各个多径成份组合成簇。多径的扩散或分散性由一组单独估计的散射中心来表示。如果反射点间隔很近，其参数差异很小，那么对于估计器而言，预先估计单个散射点是一项挑战性的工作。”（代表性引文 3）

■ 科学发现点二的代表性评价（代表性引文 4、5、6）

- (4) 国家杰青、IEEE Fellow 金石教授在顶级期刊《**IEEE Transactions on Communications**》（IF: 8.3）论文中引用了发现点二中关于无人机空地信道模型的 2 篇论文，作为该研究方向的代表性工作，并肯定了其中的研究：“在文献[32]、[33]中，分析了随机摆动下无人机信道的时间自相关函数。研究证明，摆动会引起不期望的时间非平稳性，进而降低信道容量。这些不利影响在 6GHz 以下频段即可观察到，且随着载波频率的增加，影响将更加严重。”（代表性引文 4）
- (5) IEEE Fellow、国家 6G 总体组专家艾渤教授在顶级期刊《**IEEE Transactions on Wireless Communications**》（IF: 10.7）论文中引用了发现点二中关于城市环境中车联网信道模型的 3 篇论文，作为该研究方向的代表性工作，并正面评价：“（文献[21]提出的）非几何随机（NGS）建模方法主要依赖于实际的信道测量数据，并随机生成信道统计信息。总体而言，该方法具有可靠且直观的优点。相比之下，由于 NGS 模型是基于测量结果的分析而构建的，因此它比几何随机（GBS）模型更接近现实。另一方面，NGS 模型的计算复杂度通常为 $O(1)$ [12]，远低于 GBS 模型（例如，文献[22]中的 $O(R+V)^2$ 和文献[6]中的 $O(R+V)$ ）。研究表明，在大规模车联网（V2X）网络仿真中，NGS 模型比 GBS 模型更为有效。”（代表性引文 5）
- (6) 信道研究和无线通信领域的三位 IEEE Fellow: Andreas F. Molisch、Charlie Jianzhong Zhang、R. S. Thomä 在他们的《**IEEE Transactions on Wireless Communications**》（IF: 10.7）论文中引用了发现点二中关于三维空间下俯仰维度信道测量和模型的 4 篇论文，作为该研究方向的代表性工作，并正面评

价：“[30]和[31]分别测量了宏蜂窝和微蜂窝环境中基站(BS)和用户设备(UE)处的俯仰角分布。这些工作在基站处使用了 16 单元双极化均匀平面天线阵列(4x4 矩阵)。为了更好地表征基站和用户设备处的角度分布，还需要进行更多此类测量。”(代表性引文 6)

■ 科学发现点三的代表性评价(代表性引文 7、8)

- (7) 加拿大两院院士、IEEE Fellow Victor C. M. Leung 在通信领域顶级期刊《**IEEE Internet of Things Journal**》(IF: 8.9) 论文中引用了发现点三中关于空基无线网络部署与资源管理优化的论文，作为该研究方向的代表性工作，并肯定该设计方案：“空中层由无人机、飞艇和气球组成，是一个空中移动系统，通过提供宽带无线通信来补充地面网络。与地面网络相比，它具有成本低、灵活性强、部署简便、覆盖范围广等优点，且在区域范围内提供无线接入服务无需基础设施。”(代表性引文 7)
- (8) 通信领域旗舰期刊 IEEE TWC 主编、IEEE Fellow Naofal Al-Dhahir 和 IEEE Fellow 丁志国教授在通信领域顶级期刊《**IEEE Transactions on Communications**》(IF: 8.3) 论文中引用了发现点三中关于大规模物联网用户调度与功率控制的论文，并正面评价：“考虑到每个组包含两个以上用户的情况，文献[21]基于 Lyapunov 优化方法构建并解决了功耗最小化问题。”(代表性引文 8)

■ 国内外学者在学术专著中对本项目成果的引用

- (1) 美国工程院院士、IEEE Fellow H. Vincent Poor 将科学发现二中的城市宏小区三维散射信道模型写入专著《Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond》中。
- (2) IEEE Fellow Fa-Long Luo 和 Charlie Zhang 将科学发现二的室内场景和车联网信道模型写入专著《Signal Processing for 5G: Algorithms and Implementations》中。

■ 获奖

- (1) 陕西高等学校科学技术一等奖：“5G 新频谱无线信道的多维域高精度测量、建模与国际标准推进”，2019.2
- (2) 2022 和 2023 年度国际电信联盟优秀文稿奖：“ITU-P619 中地形和/或地物特性障碍引起的衍射/波导损失”，工业和信息化部，2024.4
- (3) 最佳论文奖：“A 3-D Geometrical-Based Stochastic Model for Satellite-to-Ground MIMO Channels”，第 20 届 IEEE 国际无线通信与移动计算大会(IWCMC'2024)，阿依纳帕，塞浦路斯，2024.5
- (4) 最佳论文奖：“A Distributed Prioritized Multiple Access Scheme for Ad Hoc Networks Using Time-Frequency Hopping Communications”，网络技术与应用国际会议(NaNA)，日本函馆，2016.7
- (5) 最佳论文奖：“Distance Distributions in Finite Ad Hoc Networks: Approaches, Applications, and Directions”，自组织网络国际会议(AdhocNets)，加拿大渥太华，2016.9

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）

（按照表格所示栏目填写支撑本项目重要科学发现的代表性论文专著详细情况，不超过 8 篇，按重要程度排序。所列论文专著应公开发表 2 年以上即 2023 年 8 月 1 日以前公开发表。所列代表作及论文应以省内单位或个人为主要完成单位，署名第一单位（标号为 1 的单位）应为国内单位。

“作者”、“通讯作者（含共同通讯作者）”、“第一作者（含共同第一作者）”和“国内作者”，均应基于论文的全部作者进行填写，不得只填写本项目完成人或少填漏填。

其中，“作者”、“通讯作者（含共同通讯作者）”和“第一作者（含共同第一作者）”的姓名表述应与论文原文的署名保持一致，“国内作者”填写作者的中文姓名。

该表所列论文专著的知识产权归国内所有且无争议，未曾在往年国家科学技术奖励项目、往年省部级（政府）科学技术奖励项目和本年度其他陕西省科学技术奖提名项目中作为支撑材料出现。用于提名陕西省科学技术奖的情况，已征得未列入项目主要完成人和主要完成单位的作者的同意，其中，未列入项目主要完成人的第一作者、通讯作者（含共同第一作者、共同通讯作者）已出具知情同意书面签字意见，与其他作者的有关知情证明材料均存档备查。）

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	Simultaneous Wireless Information and Power Transfer at 5G New Frequencies: Channel Measurement and Network Design	IEEE Journal on Selected Areas on Communications	Daosen Zhai, Ruonan Zhang, Jianbo Du, Zhiguo Ding, F. Richard Yu	2019 年, 37 卷 1 期, 171-186 页	2019 年 1 月 1 日	Ruonan Zhang	Daosen Zhai	翟道森, 张若南, 杜剑波	39	Web of Science	是
2	Pathloss and Airframe Shadowing Loss of Air-to-	IEEE Transactions on	Congle Ge, Daosen Zhai,	2023 年, 72 卷 6	2023 年 1 月 1	Daosen Zhai	Congle Ge	葛聪乐, 翟道	7	Web of Science	是

	Ground UAV Channel in the Airport Area at UHF- and L-Band	Vehicular Technology	Yi Jiang, Ruonan Zhang, Xiaobo Yang, Bin Li, Xiao Tang	期, 8094-8098 页	日			森, 蒋毅, 张若南, 杨晓波, 李彬, 唐晓			
3	Delay Sensitive Secure NOMA Transmission for Hierarchical HAP-LAP Medical-care IoT Networks	IEEE Transactions on Industrial Informatics	Dawei Wang, Yixin He, Keping Yu, Gautam Srivastava, Laisen Nie, Ruonan Zhang	2022 年, 18 卷 8 期, 5561-5572 页	2022 年 8 月 1 日	Keping Yu	Dawei Wang	王大伟, 何亦昕, 聂来森, 张若南	36	Web of Science	是
4	Joint Position Optimization, User Association, and Resource Allocation for Load Balancing in UAV-Assisted Wireless Networks	Digital Communications and Networks	Daosen Zhai, Huan Li, Xiao Tang, Ruonan Zhang, Haotong Cao	2024 年, 10 卷 1 期, 25-37 页	2022 年 2 月 1 日 (在线发表)	Haotong Cao	Daosen Zhai	翟道森, 李欢, 唐晓, 张若南, 曹浩彤	17	Web of Science	是
5	A V2I and V2V Collaboration Framework to Support Emergency Communications in ABS-Aided Internet of Vehicles	IEEE Transactions on Green Communications and Networking	Yixin He, Dawei Wang, Fanghui Huang, Ruonan Zhang, Xin Gu, Jianping Pan	2023 年, 7 卷 4 期, 2038-2051 页	2023 年 2 月 1 日	Dawei Wang	Yixin He	何亦昕, 王大伟, 黄方慧, 张若南, 顾欣	29	Web of Science	是
6	Resource Management for Multimedia Services in High	Springer-Verlag (斯普林格出版	Ruonan Zhang, Lin Cai	ISBN 978-1-4939-	2017 年 1 月 1	Lin Cai	Ruonan Zhang	张若南	/	/	是

	Data-Rate Wireless Networks	社, 美国纽约)		6717-9	日						
合 计									128		

六、主要完成人情况（不超过 6 人）

（所列完成人应为在陕个人，或与在陕个人合作的我国其他地域的个人（**第一完成人必须为全职在陕的个人**），且是“代表性论文专著”主要学术思想的提出者，并在“代表性论文专著”中有署名。应按表格要求逐项填写。附件所列验收、鉴定的专家组成员不能作为完成人。同一人同一年度只能作为一个提名项目的完成人参加陕西省科技奖的评审。附件所列验收、鉴定的专家组成员不能作为完成人。

工作单位：根据人事关系填写完成人现工作的单位，已退休的填写退休前的工作单位。

完成单位：填写完成人参与本项目主要研究工作时所在单位，应为国内法人单位。如涉及多个单位，应根据贡献大小填写一个单位。完成单位与奖励证书关联，请根据实际情况审慎填写。

对本项目贡献：不超过 300 字。应具体写明完成人对本项目做出的实质性贡献，并注明代表性论文专著编号。

填报时括号部分内容删除。）

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
张若南	1	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	对科学发现一、二、三均做出了创造性贡献：构建了时空多径传播参数测量与估计、全场景信道建模与验证的理论体系，提出了复杂散射环境下的极弱多径信号检测与估计算法，发现了多种移动通信场景下电波传播的规律和机理，建立了一系列多维域无线信道模型，并与科研院所和科技企业开展信道模型的应用。代表性论著 1、6 的第一作者，代表性论著 2、3、4、5 的共同作者。
李彬	2	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	对科学发现一、二、三均做出了创造性贡献：搭建了基于天线阵列的高精度多波段空时信道测量系统，自主研发了核心部件“8 通道可扩展高速射频信号采集与流盘板卡”和“实时多径参数估计软件”，完成了多种场景下的无线信道测量和建模，构建了信道传播参数测量数据库，揭示了无线电波在不同场景下的传播规律和机理。代表性论著 2 的

						共同作者。
翟道森	3	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	对科学发现二、三均做出了创造性贡献：构建了基于信道模型的 4G/5G/6G 蜂窝网络跨层设计框架，提出了一系列网络资源管理、多址接入的优化方案，揭示了无线信道衰落和干扰对蜂窝网络性能的影响机理和规律。代表性论证 1、3 的第一作者，代表性论文 2 的通讯作者。
王大伟	4	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	对科学发现二、三均做出了创造性贡献：构建了基于信道模型的蜂窝网络和无人机通信的跨层设计框架，提出了一系列面向网络信息安全传输的资源管理、协议体制的优化方案，揭示了无线信道衰落和干扰对网络安全信息传输性能的影响机理和规律。代表性论著 3 的第一作者，代表性论著 5 的通讯作者。
蒋毅	5	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	对科学发现一、二、三均做出了创造性贡献：搭建了基于无人机和卫星地面站的空地/星地信道测量系统，完成了大量空地链路和星地链路的信道测量和建模，建立了一系列信道模型，揭示了航空航天场景下的无线电波的传播规律和机理，提出了基于信道特性的无线自组网协议跨层设计方案。代表性论著 2 的共同作者。
何亦昕	6	无	助理教授	嘉兴大学	西北工业大学	对科学发现二、三均做出了创造性贡献：构建了基于信道模型的车联网通信和无人机通信的跨层设计框架，提出了一系列车联网资源管理、协议体制的跨层设计方案和算法，揭示了无线信道衰落和干扰对车联网性能的影响机理和规律。代表性论著 5 的第一作者，代表性论著 3 的共同作者。

七、主要完成单位情况（不超过 3 个）

完成单位	排名	对本项目主要贡献（限 600 字）
西北工业大学	1	<p>投入 500 多万元纵向和横向科研课题经费，搭建了基于天线阵列的高精度多波段空时信道测量系统，自主研发了核心部件“8 通道可扩展高速射频信号采集与流盘板卡”和“实时多径参数估计软件”，并组织科研团队开展理论研究和关键技术攻关，形成了国内一流的无线信道传播实验、测量与理论研究能力。以学校平台为依托，支持项目团队与华为技术有限公司、中国舰船研究院、中国空间技术研究院、中国电子科技集团以及多家企业单位开展校企联合科研攻关，将无线信道研究成果应用于 4G/5G/6G 蜂窝移动通信系统以及我国多项航空、航天和海洋通信系统的性能评估和设计优化。同时，项目团队依托学校参与 3GPP 和 ITU 国际标准的制定，提交了多份无线信道领域的国际标准提案。</p> <p>产学研用多环节科研政策助力项目团队潜心研究，攻坚克难，取得重要创新成果，包括：（1）构建了时空多径传播参数测量与估计、全场景信道建模与验证的理论体系，自主研发了国内领先的基于天线阵列的高精度多波段空时信道测量系统，为无线信道研究提供了重要的理论基础和科学仪器；（2）提出了复杂散射环境下的极弱多径信号检测与估计算法，解决了信道测量与精确建模的难题；（3）建立了空天地海多种场景的无线信道模型，助力移动通信国际标准的制定和提升我国企业的话语权，此外解决了我国多项重要军民通信网络设计评估中缺乏信道模型的难题；（4）提出了一系列基于信道模型的无线通信网络性能评估与跨层设计方案与算法，显著提升了蜂窝网络、无人机通信网络和卫星通信的传输速率和可靠性。</p>

八、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。）

项目的第一至第五完成人均一直在西北工业大学电子信息学院工作，第六完成人自 2012 年至 2023 年在西北工业大学电子信息学院完成本科、硕士和博士阶段的学习，所有完成人同属于电子信息学院同一个团队，具有长期稳定的合作关系，共同承担科研项目，合作发表论文和申请专利，构成本项目列表中的研究成

果，具体情况如下：

1. 各完成人在项目执行过程中，共同发表了项目中列出的代表性论文和其他论文，并先后承担共同了项目列举的国家级和省部级科研项目。

2. 第一、二、五完成人是陕西高等学校科学技术奖一等奖“5G 新频谱无线信道的多维域高精度测量、建模与国际标准推进”的前三位完成人。

3. 在本项目执行过程中，第一完成人是国家重点研发计划课题、国家自然科学基金面上项目、教育部“新世纪优秀人才支持计划”、陕西省重点研发计划的负责人，第二、三、四、五、六完成人均是所列科研项目的骨干人员，同时也是代表性论著的主要完成人。项目第一完成人和第五完成人分别是项目第六完成人的博士和硕士生导师。

第一完成人签名：