

2026 年度陕西省技术发明奖公示信息

项目名称			高超声速飞行器干扰信道表征与通信抗扰增强方法						
提名者			陕西省知识产权局						
提名意见									
我单位认真审阅了该项目提名书及附件材料，确认全部材料真实有效，并按照要求对该项目的基本情况进行了公示，公示期间无异议。 该项目系统构建了从介质表征到通信抗扰的理论与技术体系。创新提出了多尺度等离子体介质建模方法，突破了非平稳耦合信道表征难题，发明了时频域协同抗扰与信道软信息编解码协同新体制，显著降低通信门限。成果深化了对黑障机理的科学认知，为工程突破提供了关键支撑。 根据《陕西省科学技术厅关于 2026 年度省科学技术奖提名工作的通知》，参照陕西省技术发明奖评定条件和评定标准，提名该项目参评陕西省科学技术二等奖。									
主要完成人情况									
排名	姓名	技术职称	工作单位				完成单位		
1	石磊	教授	西安电子科技大学				西安电子科技大学		
2	李小平	教授	西安电子科技大学				西安电子科技大学		
3	姚博	副教授	西安电子科技大学				西安电子科技大学		
4	杨敏	教授	西安电子科技大学				西安电子科技大学		
5	刘彦明	教授	西安电子科技大学				西安电子科技大学		
6	白博文	教授	西安电子科技大学				西安电子科技大学		
主要完成单位									
排名	单位名称								
1	西安电子科技大学								
主要知识产权和标准规范等目录									
序号	知识产权（标准）类别	知识产权（标准）具体名称	国家（地区）	授权号（标准编号）	授权（标准发布）日期	证书编号（标准批准发布部门）	权利人（标准起草单位）	发明人（标准起草人）	发明专利（标准）有效状态
1	发明专利	高速飞行器鞘套径向时变电子密度模拟方法	中国	ZL201710527456.7	2021-01-15	4203803	西安电子科技大学	石磊；李小平；刘彦明；姚博；白博文；杨敏	有效

2	发明专利	等离子体鞘套 3D-FDTD 建模中总场散射场平面波源产生方法	中国	ZL201910944401.5	2021-11-16	4792472	西安电子科技大学	石磊；刘彦明；魏海亮；李小平；姚博	有效
3	发明专利	一种临近空间高空平台空间-极化分集 MIMO 信道建模方法	中国	ZL201810226309.0	2021-05-14	4423832	西安电子科技大学	刘彦明；李石琦；磊；李小平；姚博；朱从莹	有效
4	发明专利	一种临近空间动态等离子体鞘套信道建模及模拟的方法	中国	ZL201410583216.5	2017-02-08	2375860	西安电子科技大学	石磊；李小平；刘彦明；周辉；姚博；方水汛	有效
5	发明专利	卡尔曼跟踪环路设计方法、卡尔曼跟踪环路、航天飞行器	中国	ZL202010165702.0	2023-05-12	5963417	西安电子科技大学	石磊；包为民；吕跃广；袁淑容；李小平；刘彦明；姚博；魏海亮	有效
6	发明专利	一种低信噪比环境下基于数据辅助的载波频偏估计方法	中国	ZL202210894046.7	2023-08-01	6193991	西安电子科技大学	石磊；刘彦斐；姚博；李小平；李芳燕	有效

7	发明专利	高超声速飞行器大动态多普勒快速捕获方法及通信系统	中国	ZL201910659204.9	2021-06-25	4506753	西安电子科技大学	石磊；赵蕾；姚博；袁淑容；朱从莹；李小平	有效
8	发明专利	遥测信道非相干大规模SIMO处理方法、系统及应用	中国	ZL202011393240.4	2022-04-08	5057558	西安电子科技大学	石磊；刘彦明；姚博；魏海亮；李小平；袁淑容	有效
9	发明专利	等离子鞘套下原模图比特交织编码调制迭代译码调制系统	中国	ZL202010165716.2	2023-07-04	6114832	西安电子科技大学	石磊；吕跃广；包为民；魏海亮；刘彦明；李小平；姚博；袁淑容	有效
10	发明专利	一种高超声速飞行器遥测SIMO信道下基于功率调制的LDPC-BICM-ID系统	中国	ZL202211304226.1	2025-01-28	7704018	西安电子科技大学	石磊；魏海亮；姚博；刘彦明；李小平；李芳燕	有效

客观评价

该项目成果在高超声速飞行器等离子体鞘套信道建模与干扰抑制通信方法方面取得了核心突破，形成了重要的原始创新。为解决长期困扰高速飞行所面临的“黑障”问题提供了重要理论与技术基础，整体水平跻身国际领先行列。高超声速飞行器信道建模与干扰抑制通信方法，得到了国内外知名机构及众多国内外领域内顶尖团队和学者的学术肯定评价。

陆建华院士团队、加州大学洛杉矶分校 Seth Putterman 教授（斯隆研究奖获得者）、美国空军学院 Randall Musselman 教授（Tau Beta Pi 荣誉学会的成员，美国空军学院杰出科学家，美国空军空战司令部下属的国家能力战术开发 TENCAP 办公室顾问）、哈尔滨工业大学李立毅（杰青）团队鄂鹏（国家级青年人才）、南京航空航天大学贾德院士团队朱秋明教授(IEEE Senior Member)、美国空军研究实验室 Ngwe Thawdar（IEEE 国际通信会议奖获得者）、南昌大学袁凯教授（国家高层次人才特殊计划青年拔尖人才）、天津大学光电信息技术教育部重点实验室姚建铨院士团队、李艳华（前北京遥测技术研究所所长、航天长征火箭技术有限公司总经理）总师和美国桑迪亚国家实验

室在高超声速飞行器通信信道特性研究方面都引用了完成人的相关研究成果，给予了高度认可。

2022 年 12 月，美国智库 BluePath Labs 研究报告《An Exploratory Analysis of the Chinese Hypersonics Research Landscape》（中国高超音速飞行技术研究现状探析）中，将完成人及高超声速飞行器信道建模方向作为国际前沿方向进行了全面的总结和评书，完成人被称中国高超领域 8 位顶尖学者之一。

本成果相关理论和技术通过教育部成果鉴定，鉴定意见指出“提出了动态等离子体鞘套信道建模理论方法。揭示了时变等离子体中信号畸变的物理机理，发现了等离子体介质特性引起的通信信号幅相寄生调制现象，提出了等离子体鞘套信道建模方法，形成了等离子体鞘套非平稳、高动态、多尺度信道模型。发明了一种等离子体鞘套物理感知和信息处理的协同通信方法。大幅提升了传输信号适应等离子体鞘套动态变化的能力。该项目研究难度很大、创新性强，拥有自主知识产权，核心技术完全自主可控，总体技术水平达到国内领先、国际先进。项目成果已在相关国家重大科技专项得到成功应用，军事、社会效益显著，应用前景广阔。”

项目简介

高超声速飞行器的测控通信技术属于航天电子技术领域。高超声速飞行器在军事与民用领域展现出的广阔应用前景使其成为当前世界主要国家高科技竞争的焦点。然而，在高速飞行过程中，飞行器面临着复杂的电磁干扰信道环境，主要体现为以下两类挑战：一是由包裹飞行器表面的等离子体鞘套引起的信道环境干扰，导致信号质量严重劣化乃至通信中断，即“黑障”难题；二是高速飞行引发的剧烈多普勒频移，对实时测控构成了严峻挑战，即快速捕获与跟踪难题。具体而言，高超声速飞行器全航程的可靠测控通信，一直是制约其技术发展的核心瓶颈，也是世界航天领域尚未完全攻克的前沿科学难题。

项目团队系统开展了高超声速飞行器等离子体鞘套物理介质表征与建模、信道非平稳表征与模拟、通信抗扰增强方法和抗扰增强通信体制的体系化研究，形成了“高超声速飞行器干扰信道表征与通信抗扰增强方法”研究成果。该成果深化了对黑障形成机理与信道演化规律的认识，为黑障问题的实质性缓解提供了理论与技术支撑。主要发明点如下：

（1）发明了等离子体鞘套时变介质多尺度精细表征与高效电磁计算方法。

面向等离子体鞘套等效介质参数多因素影响变化规律复杂，难以准确描述难题，提出了多时间尺度差异化建模表征描述方法，将等离子体鞘套等效介质建模为随飞行姿态、攻角缓慢变化的大、中尺度半确定性介质模型，以及快速随机时变的小尺度统计介质模型，实现了时空多维度全面且精确地捕捉等离子体鞘套介质在不同空间位置的多时间尺度复杂变化特性，有效避免了因介质模型误差所导致的电磁计算误差，彻底解决了长期以来缺乏适用模型的技术难题。

（2）发明了等离子体鞘套-多径非平稳耦合干扰信道建模与统计表征方法

针对高超声速飞行器信道状态非平稳多变，难以全局描述难题。建立了基于马尔可夫随机过程的非平稳信道建模架构，实现对高超声速飞行器非平稳信道的统一框架表征，揭示了等离子体鞘套-空间多径非对称耦合机理，提出了基于介质变化规律映射的耦合信道准确高效模拟方法，实现对具有非平稳、快时变、强相关、非对称特性的高超飞行器信道的全面表征和高效模拟，属于国内外开创性研究，为适应性通信方法研究提供信道输入理论基础。

（3）发明了恶劣耦合干扰信道时频域协同抗扰增强方法

针对高超声速飞行器恶劣信道环境下接收信号质量畸变和退化难题。从等离子体鞘套随机时变干扰、高速移动引起的频域干扰两个角度设计干扰抑制方法。针对鞘套随机时变干扰，提出了同时跟踪接收信幅度衰减和相位的新型卡尔曼滤波方法，有效抑制了时域乘性噪声强度；针对高速移动频域干扰提出了基于数据辅助的载波频偏估计与补偿方法，在低信噪比环境下实现了频域干扰的对消，有效提高接收信号质量。所提方法优于传统 MMSE 类算法 2-3dB。

（4）发明了信道软信息调制编解码协同的通信抗扰增强方法

针对单一途径和传统体制难以对抗等离子体鞘套信道，通信质量难以显著改善难题，设计了联合调制编解码和信道对消多维度协同优化策略，提出了一种信道软信息与编解码协同的通信新体

制，新体制在原模图比特交织编码调制迭代译码（BICM-ID）框架下融合了非相干频率调制（NC-FSK）和信道软信息的优势，规避了等离子体鞘套的相位干扰、显著削弱了信道幅相寄生调制和深衰落的影响，大幅度提升了通信黑障产生的门限。相较于传统方法，该方法可靠通信信噪比门限降低了约 15dB。

相关成果申请国家发明专利 20 余项。发表 IEEE 汇刊等国内外重要 SCI 期刊论文 40 余篇，出版 2 部“国家高超声速出版工程”专著《高速飞行器等离子体鞘套电波传播与通信技术》和《临近空间飞行器高超声速飞行器信道特性分析与建模》，是国际上系统论述高超声速飞行器信道理论和通信方法的首批专著。成果鉴定会专家一致认为：“总体技术达到了国内领先，国际先进，项目成果已在相关国家重大科技专项得到成功应用”。

应用情况和效益

项目成果系统开展了等离子体鞘套信道建模方法研究，提出了高超声速飞行器适应性通信方法。成果应用于中国航天科技集团有限公司第五研究院西安分院微波遥感与空间安全技术研究所某预研课题中，支撑了等离子体鞘套微波散射特性研究，为关键技术攻关提供了技术支撑。成果应用于陕西航天应用技术研究型号研制中，支撑了某控制系统的信道化信号处理。成果应用于空间智能控制技术国家重点实验室某项目中，支撑了控制分系统总体方案论证，有力地保障了的国家重要任务和项目的顺利推进。

项目成果应用于北京遥测技术研究所某专项工程关键技术攻关中的系统论证、设计阶段，有力地保障了研究项目的顺利推进。成果在北京临近空间飞行器系统工程研究所某飞行器专项工程中的测控系统论证、设计、测试等多阶段得到应用，有力保障了专项工程任务顺利完成。成果应用于北京凌空天行科技有限责任公司商业临近空间高速试验飞行平台的研制和发射，拓展了临近空间高速试验飞行平台的通信方式。

项目研究成果应用于北京遥测技术研究所北京遥测技术研究所为某飞行器研制的测控通信系统设计过程中，等离子体通信适应性技术与全链路仿真计算结果。为相关遥测设备提供了设计参考指标。为高速目标等离子体理论研究提供了有效的理论模拟环境和工程支撑平台。

完成人合作关系说明

李小平对本项目发明点 3 和 4 做出创造性贡献。对发明点 3：发明了高超声速飞行器新型卡尔曼跟踪环路，实现时域寄生调制乘性干扰的高效抑制（专利 5）。对发明点 4：发明了基于等离子体鞘套信道软信息的 LDPC-BICM-ID 系统，其复杂度低，可显著提高等离子体信道下通信的误码率性能，改善通信质量、缓解通信黑障（专利 10）。

姚博对本成果发明点 1 和 3 做出了创造性贡献。对发明点 1：发明了高速飞行器等离子体鞘套径向时变电子密度模拟方法（专利 1）。对发明点 3：发明了高超声速飞行器多普勒速率盲匹配及谱峰搜索范围修正的多普勒频偏和多普勒变化率联合捕获方法，实现了大动态多普勒干扰高效抑制（专利 7）。

杨敏对本项目发明点 1 做出了创造性贡献。建立了快速随机时变的小尺度统计介质模型（专利 1）。

刘彦明对本项目发明点 2 和 4 做出了创造性贡献。对发明点 2：发明了临近空间高空平台空间-极化分集 MIMO 信道建模方法，准确描述了高空平台环境下大尺度和小尺度衰落特性及子信道之间的相关性（专利 3）。对发明点 4：发明了针对高超声速飞行器下行 SIMO 遥测信道的自适应功率调制及非相干检测方法，有效避开了相位（寄生）调制，使得调制方法免受高超声速飞行器下行信道相位扰动的影响（专利 8）。

白博文对本项目发明点 1 做出了创造性贡献。建立了随飞行姿态、攻角缓慢变化的大、中尺度半确定性介质模型（专利 1）。