

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	面向体域网应用的可穿戴和植入式天线技术研究
主要完成人	闫森 宋新月 张安学 黄斌科
主要完成单位	西安交通大学

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
<p>提名意见：</p> <p>体域网作为新一代信息技术的重要组成部分，在医疗健康监测、智能穿戴和军事通信等关系国计民生与战略安全的领域展现出广阔的应用前景。可穿戴天线作为体域网高效通信的核心组件，决定着系统的稳定性与可靠性，但其性能设计与优化仍面临多重挑战。</p> <p>在此背景下，该项目面向体域网应用的重大需求，在可穿戴与植入式天线领域取得了系统性原创成果，在可穿戴与植入式天线领域取得了系统性原创成果，形成了从理论创新、关键技术突破到实际应用的完整研究体系。项目提出的基于特征模理论的柔性天线分析方法，为高性能体域网天线的设计提供了坚实的理论基础；提出的基于超材料的多功能可穿戴天线与传感器设计，实现了小型化、高性能与多功能融合，展现出广阔应用潜力；提出的应用于胶囊内窥镜的柔性天线设计，有效提升了体内至体外通信的鲁棒性和速率，为医疗植入式设备的发展提供了可靠方案。</p> <p>项目相关成果已发表于本领域国际权威期刊与会议，被来自全球多个国家和地区的学者广泛引用与积极评价，受到包括多位 IEEE Fellow 在内的国际知名专家的高度认可。同时，研究成果已在陕西烽火诺信科技有限公司及陕西天鼎无线技术股份有限公司的多款产品中实现应用，推动了科研成果向产业落地转化。</p> <p>综上，该项目成果不仅在学术上具有突出的原创性和国际影响力，也在产业化与工程应用中展现了显著价值，对推动体域网关键技术和促进军民融合应用具有重要战略意义，特提名此项目参选陕西省自然科学奖二等奖。</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>			

二、提名意见（适用于专家提名）

姓 名			
专家类型	<input type="checkbox"/> 国家最高科学技术奖获得者 <input type="checkbox"/> 中国科学院院士 <input type="checkbox"/> 中国工程院院士 <input type="checkbox"/> 国家科学技术奖获奖项目第一完成人（需注明获奖等次） <input type="checkbox"/> 省最高科学技术奖获奖人（或 xxxx 年省科学技术最高成就奖、xxxx 年基础研究重大贡献奖获奖人） <input type="checkbox"/> Xxxx 年省科学技术奖第一完成人（需注明获奖等次）	提名等级	<input type="checkbox"/> 一等奖 <input type="checkbox"/> 二等奖及以上
责任专家	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否		
提名意见： 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)

体域网是一种能够附着于人体表面或穿戴在人体上的微型通信网络系统，它能实时获取并传输由多种生物传感器所感知到的人体生命特征信息。通过这一过程，体域网为医疗诊断、老年人远程看护、运动健康监测、野外探险救援以及战场医疗保障等一系列军民领域的健康服务提供了高价值的数据支持。这项技术的广阔应用前景不仅引起了学术界和工业界的高度关注，也在我国国民经济建设规划中占据了日益重要的战略地位。作为体域网的关键组成部分，可穿戴天线的性能设计与优化面临着材料、柔性度、环境适应性和电磁特性等多重挑战。如何在实际应用场景中针对不同需求，研发出高效率、高可靠性、可大规模应用推广的可穿戴天线，已经成为业内亟待解决的重要课题。

基于我国在重大经济与社会发展领域的迫切需求，本项目在国家自然科学基金、陕西省科技活动资助项目、深圳市科技计划及华为、烽火等校企合作项目的资助下，针对目前体域网中不同场景下可穿戴及柔性天线设计面临的诸多挑战，开展了系统的研究工作，主要发现点如下：

1) **提出基于特征模式理论的柔性天线分析理论。**通过对人体加载条件下可穿戴辐射体特征模式的分析计算，深刻揭示了人体和辐射结构相互耦合的内在规律，从而可以有效指导可穿戴和植入式天线的设计，得到具有小尺寸、大阻抗带宽和高辐射效率的体域网天线拓扑原型。**被国外知名学者评价为：“有效指导可穿戴天线的设计，实现性能优秀的体域网天线原型。”**

2) **提出了基于超材料加载的多功能可穿戴天线和传感器设计方法。**利用超材料电磁特性独特可调的特性，调控柔性辐射体的工作模式，获得所需的电流分布和辐射特性。在保持天线小型化、低剖面、佩戴舒适、低比吸收率的同时，实现了双频对称辐射，极化分集，方向图可重构，及准全向辐射的天线及宽频带高灵敏度的传感器原型。**被国外知名学者评价为：“基于超材料理论实现了高性能的可穿戴天线和传感器，应用潜力巨大。”**

3) **提出了应用于胶囊内窥镜的柔性天线设计方法。**通过采用柔性辐射结构与胶囊内窥镜共形设计，得到具有电磁自屏蔽特性的天线结构。通过设计具有辐射准各向同性和方向图分集的的植入式天线，实现了体内至体外信道的链接鲁棒性和数据传输速率的提升。**被国外知名学者评价为：“为胶囊内窥镜影像应用提供了可靠的解决方案。”**

基于以上创新工作，5 篇代表性论文发表于《IEEE Transactions on Biomedical Circuits and systems》、《IEEE Transactions on Antennas and Propagation》等

本领域权威期刊,被来自 40 个主要国家和地区、184 家科研机构的 200 名学者在 59 种国际期刊引用, Google 学术引用 173 次, WOS 核心他引 106 次, SCI 他引 98 次, 受到包括 8 位 IEEE Fellow 在内的国际知名学者的引用和正面评价, 多次受邀作国内外学术会议报告。

基于本项目中针对柔性天线设计提出的研究成果, 面向国家军事领域对天线载体共形安装的迫切需求, 长期与陕西烽火诺信科技有限公司、陕西天鼎无线技术股份有限公司等企业开展校企合作, 依托在陕军工企业实现技术成果转化。研究成果中, 所提出的超短波柔性共形天线已成功应用于陕西烽火诺信科技有限公司的多款产品, **新增销售额 4260 万元, 新增利润 1146 万元**; 所提出的集成式可穿戴天线系统已在陕西天鼎无线技术股份有限公司的多款产品中实现应用, **新增销售额 300 万元, 新增利润 26 万元**; 同时, 相关成果已装备于我军陆航和海航的多型现役装备, 取得了显著的经济效益和社会效益。

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。】

基于以上创新工作，其中 5 篇代表性论文发表于《IEEE Transactions on Biomedical Circuits and systems》、《IEEE Transactions on Antennas and Propagation》等本领域权威期刊。相关成果已被来自全球 40 个主要国家和地区、184 家科研机构的 200 名学者在 59 种国际期刊引用，Google Scholar 引用 173 次，WOS 核心他引 124 次，SCI 他引 98 次。成果多次受到包括 8 位 IEEE Fellow 在内的国际知名学者的正面引用与评价，并多次受邀在国内外重要学术会议上作专题报告。这些事实充分表明该系列研究成果在国际学术界具有较高的影响力和学术价值。

对发现点 1 的评价：有效指导可穿戴天线的设计，实现了性能优秀的体域网天线原型。

■ IEEE Fellow、IET Fellow、格拉斯哥大学教授 Muhammad Imran 评价为：“提出了一种新的宽带按钮天线，在自由空间中表现出优异的性能。”

■ IEEE Fellow、新加坡工程院院士、浙江大学李尔平教授评价为：“为天线设计过程中面临的问题提供了显著的理论依据和解决方案。”

■ IEEE Fellow、享受国务院特殊津贴专家、兰州大学胡斌教授评价为：可穿戴天线为无线体域网的关键通信设备；将馈电电路设计在刚性材料上，以确保电路元件的性能，同时使用柔性基板使天线可穿戴和舒适。

■ IEEE Fellow、澳大利亚阿德莱德大学 Christophe Fumeaux 教授多次引用文章，评价为：“为天线集成概念添加了额外的功能；证明了毛毡适用于可穿戴天线的设计；为柔性天线设计了超宽带的附加特性”等。

对发现点 2 的评价：基于超材料理论实现了高性能的可穿戴天线和传感器，应用潜力巨大。

■ IEEE Fellow、英国利物浦大学黄漪教授引用文章并肯定了成果对全纺织反射超表面在天线贴身应用中的探索。

■ 国家杰青、国家优青 南京理工大学丁大志教授引用文章作为超材料天线在可穿戴及领域的代表性成果，体现了超材料可穿戴天线的应用价值。

■ IEEE Fellow、中国电子学会会士金荣洪教授引用文章并评价：“证明了 SSPPs 天线的灵活可用性”

■ 佛罗里达国际大学变换天线中心主任、IEEE TAP、IEEE OJAP 副主编 Stavros V. Georgakopoulos 教授引用文章并评价：“实现了单极子天线的小型化”，对成果在利用超材料实现可穿戴天线尺寸减小方面的贡献进行认可。

■ IEEE Fellow 冰岛雷克雅未克大学 Slawomir Koziel 教授引用文章并评价：“利用超材

料谐振器在宽频段实现了传感器的高灵敏度”。

对发现点 3 的评价： 为胶囊内窥镜影像应用提供了可靠的解决方案。

■ IEEE Fellow、蒙特利尔国家科学研究所 Tayeb A. Denidni 教授多次引用文章，并评价：“无线胶囊内窥镜检查的医学植入式设备在诊断和治疗体内存在的感染和疾病方面发挥着重要作用。”

■ IEEE Life Fellow、亚利桑那大学 Richard W. Ziolkowski 教授引用文章，认证了所设计的胶囊内窥镜在移动无线场景下的应用。

■ 国家杰青、国家优青、重庆大学唐明春教授多次引用文章，并肯定了所设计的准各向同性天线在胶囊内窥镜应用场景下实现了有效解决方案。

综上所述，本项目成果所提出的三点原创性发现均得到了国际同行，特别是多位 IEEE Fellow 等权威专家的积极引用与高度评价，充分体现了研究工作的原创性、公认度和科学价值。在可穿戴与植入式天线领域形成了系统性创新，不仅在理论上丰富了体域网中可穿戴天线的研究体系，也在实践中推动了体域网的应用发展，为医疗诊断、远程健康监测、运动康复及战场救援等提供了重要支撑，展现出广阔的应用前景与战略意义。

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	Design of Wideband Button Antenna Based on Characteristic Mode Theory	IEEE Transactions on Biomedical Circuits and	Yan Sen; Vandenberg Guy A. E.	2018 年 12 卷 1383 页	2018 年 12 月 01 日	Yan Sen	Yan Sen	闫森	33	SCI	是
2	Design of a Compact Dual-Band Textile Antenna Based on Metasurface	IEEE Transactions on Biomedical Circuits and	Zhang Kai; Soh Ping Jack; Yan, Sen	2022 年 16 卷 211 页	2022 年 02 月 14 日	Yan Sen	Yan Sen	张凯 闫森	34	SCI	是
3	Miniaturization of Monopole Antenna Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons	IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters	Qu Bingyue; Yan Sen; Zhang Anxue; Pang	2021 年 20 卷 1562 页	2021 年 06 月 22 日	Yan Sen	Qu Bingyue	屈冰玥 闫森 张安学 庞永强 徐卓	11	SCI	是
4	A Design of Metamaterial Inspired Resonator for Multifrequency Fluidic Sensors	IEEE Microwave and Wireless Technology Letters	Song Xinyue; Yan Sen; Chen Juan	2023 年 33 卷 94 页	2022 年 09 月 19 日	Yan Sen	Song Xinyue	宋新月 闫森	9	SCI	是
5	Conformal Folded Inverted-F Antenna With Quasi-Isotropic Radiation Pattern For Robust Communication In Capsule Endoscopy Applications	IEEE Transactions on Antennas and Propagation	Wang Yanyang; Yan Sen; Huang Binke	2022 年 70 卷 6537 页	2022 年 03 月 28 日	Yan Sen	Wang Yanyang	王艳洋 闫森 黄斌科	19	SCI	是
合 计									106	SCI	是
补充说明 (视情填写):											

六、主要完成人情况表

姓 名	闫森	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： 作为第一完成人，围绕面向体域网应用的可穿戴与植入式天线技术，提出并完成了三项具有原创性的主要发现，并发表代表性论文 1-5。（1）建立了基于特征模理论的柔性天线分析方法，为可穿戴天线的设计与优化提供了理论支撑；（2）提出了基于超材料加载的多功能可穿戴天线与传感器设计方案，显著提升了体域网可穿戴器件的性能与应用拓展性；（3）实现了应用于胶囊内窥镜的柔性天线设计，为医疗植入式设备提供了可靠的通信解决方案。			

姓 名	宋新月	排 名	2
行政职务	无		
技术职称	讲师		
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： 与第一完成人合作，基于超材料理论提出了多功能传感器设计方法，为可穿戴与植入式天线在体域网及相关应用中的性能提升与功能拓展提供了技术途径，进一步完善了体域网电磁器件布局，为其实用化和规模化应用奠定了基础，发表代表性论文 4。			

姓 名	张安学	排 名	3
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
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>与第一完成人合作，提出了基于表面等离子激元超材料的天线小型化方法，有效突破了传统天线在超短波频段尺寸约束下的性能瓶颈，为可穿戴与植入式天线的集成化和实用化提供了新的技术途径，发表代表性论文 3。</p>	

姓 名	黄斌科	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： 与第一完成人合作，提出了应用于胶囊内窥镜的柔性天线设计方法。通过采用柔性辐射结构与胶囊内窥镜的共形集成，实现了具有电磁自屏蔽特性的天线结构，有效提升了体内至体外信道的链接鲁棒性和数据传输速率，为无线胶囊内窥镜的可靠通信提供了关键技术支撑，发表代表性论文 5。			

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>西安交通大学作为第一且单独完成单位，系统性地提出并验证了面向体域网应用可穿戴与植入式天线的多项关键技术创新，形成了此领域的原创性成果。主要包括：建立了基于特征模理论的柔性天线分析方法，揭示了人体与辐射结构耦合机理并指导了高性能体域网天线的设计；提出了基于超材料加载的多功能可穿戴天线与传感器设计方法，实现了小型化、低比吸收率与多功能融合；提出了应用于胶囊内窥镜的柔性天线设计方法，显著提升了体内至体外信道的链接鲁棒性和传输性能。</p>	

完成人合作关系说明

本项目由第一完成人牵头组织实施，负责总体研究方向的确立、研究方法的提出与创新、研究框架的设计与统筹，主导完成了面向体域网应用的基于特征模的天线设计理论、基于超材料的可穿戴、植入式天线与传感器设计方法的提出与验证，系统推进了项目的整体创新与成果凝练，发表代表性论文 1, 2, 3, 4, 5。

第二完成人主要承担交叉学科研究相关工作，重点负责可穿戴天线在柔性条件下的实验验证，并参与基于超材料的多功能传感器设计，确保研究成果在理论与实验之间的有效衔接，推动了跨领域方法在本项目中的应用，与第一完成人合作发表代表性论文 4。

第三完成人负责基于超材料的小型化可穿戴天线研究，重点突破了传统天线在尺寸受限条件下性能难以兼顾的瓶颈问题，提出了小型化与高性能兼顾的解决方案，为体域网应用中天线的集成化与实用化提供了技术支撑，与第一完成人合作发表代表性论文 3。

第四完成人专注于植入式天线的研究，重点完成了应用于胶囊内窥镜的柔性天线设计，提出了具有电磁自屏蔽特性和辐射准各向同性的新型结构，有效提升了体内至体外信道的链接鲁棒性与数据传输速率，为医学植入式设备的可靠通信提供了关键支撑，与第一完成人合作发表代表性论文 5。

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	论文合作	宋新月(1), 闫森(2)	2018 至今	合作发表代表性论文	Song X, Yan S, Chen J. A design of metamaterial inspired resonator for multifrequency fluidic sensors[J]. IEEE Microwave and Wireless Technology Letters, 2022, 33(1): 94-97. (排名 1)
2	论文合作	张安学(3), 闫森(2)	2019 至 2023	合作发表代表性论文	Qu B, Yan S, Zhang A, et al. Miniaturization of monopole antenna based on spoof surface plasmon polaritons[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(8): 1562-1566. (排名 3)
3	论文合作	黄斌科(3), 闫森(2)	2019 至 2023	合作发表代表性论文	Wang Y, Yan S, Huang B. Conformal folded inverted-F antenna with quasi-isotropic radiation pattern for robust communication in capsule endoscopy applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(8): 6537-6550. (排名 3)