

2019 年度高等学校科学研究优秀成果奖（科学技术） 科技进步奖推荐公示材料

项目名称	卫星导航系统星地增强与定位优化关键技术及其应用
推荐单位	湘潭大学
项目简介	<p>本项目围绕卫星导航系统星地增强和定位优化等关键技术开展研究，形成了星地导航增强和北斗定位优化两大具有独到之处的创新性成果，这些成果应用于我国卫星导航系统重大工程建设、北斗 PVT 服务性能评估和产学研合作企业的拳头产品，取得的性能指标达到国际先进水平。主要成果包括 10 项授权发明专利，5 项验收评审意见和 3 项应用证明。下面简要介绍两大主要创新：</p> <p>第一、在国际国内首次提出了一种与美国 WAAS 具有显著不同的星基广域增强原理，通过理论、试验和重大工程建设证明其创新性、科学性和先进性。</p> <p>2007-2012 年 5 年期间，围绕星钟、轨道、电离层和卫星完好性等星基广域增强需要解决的四大关键问题，开展理论研究和试验验证，形成了由一套相对完整的星基增强理论体系，通过试验验证了该原理对 ZFS、GPS 和 BDS 均具有通用性。成果对应《一种基于虚拟基准层的广域差分方法》等 5 项主要授权发明专利，其中星钟和轨道误差相对分离方法、三角分区电离层改正方法和基于互差的卫星完好性监测方法是重要的创新内容。2013-2018 年期间，承担 ZFS 差分增强平台研制和软件开发工作，将理论成果成功应用于 ZFS 建设，建立了由差分站、平台和软件组成的 ZFS 差分增强系统，通过验收，总体技术指标优于预期目标。本创新成果不仅丰富了国际星基增强理论，解决了制约 ZFS 广域高精度定位和广域高精度授时的重大瓶颈问题，而且对促进我国北斗星基广域增强定位、广域高精度授时和三角分区电离层修正具有重要参考价值。</p> <p>第二、在国际国内首次提出了一种互差中值理论，并由此衍生出多种定位优化方法。通过北斗 PVT 服务性能测试评估和产业化应用，取得良好经济效益和社会效益。</p> <p>针对卫星退化、卫星故障、导航信号畸变、卫星注入参数错误等因素严重 PVT 服务性能的关键问题，提出互差中值的内差理论，并形成了一套基于互差中值的反常卫星排查方法，该成果应用于 2012-2018 年期间承担的北斗卫星 PVT 服务性能测试评估工作，为北斗卫星服务性能提升发挥了积极贡献。</p> <p>为了推动北斗产业化应用和提升北斗产品国际竞争力，我们致力于将我国北斗 PVT 服务性能发挥到极致水平的定位优化研究。基于互差中值理论，提出了互差中值加权定位原理，并应用于北斗伪距单点定位，地基网络 RTK 技术和 PPP 等定位的进一步优化，使对应的定位达到国际先进水平：1) 使北斗二号伪距单点定位从 5-10 米提升到 1-3 米；2) 使地基网络 RTK 的实时精密定位精度从几个厘米提升到优于 1 厘米。通过产学研合</p>

作将算法嵌入到几个国内知名的导航企业的定位产品中。为落实“北斗天上好用、地面用好”做出了积极贡献。

主要知识产权证明目录

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	权利人	发明人	是否授权
1	发明专利	一种基于虚拟基准层的广域差分方法	中国	ZL200910022300.9	2011.09.21	中国科学院国家授时中心	蔡成林、李孝辉、吴海涛、张慧君、王玉兰	是
2	发明专利	一种基于广域差分增强的卫星授时方法	中国	ZL200910022301.3	2012.10.24	中国科学院国家授时中心	蔡成林、李孝辉、吴海涛、王文利、常兴旺	是
3	发明专利	一种卫星导航系统中的溯源模型参数产生方法	中国	ZL201510526781.2	2018.01.05	中国科学院国家授时中心	许龙霞、李孝辉、李丹丹、任焯、薛艳荣	是
4	发明专利	一种广域电离层误差改正新方法	中国	ZL201210476764.9	2014.04.09	桂林电子科技大学	蔡成林、席超、李思敏、韦照川、李天松、王利杰、李志斌	是
5	发明专利	定位机械臂上位置点的定位系统及工程机械装备	中国	ZL201210258083.5	2015.06.24	湘潭大学	姚志强、曹璐云、张钰雯、盛梦刚	是
6	发明专利	一种基于测距误差模型修正的无线定位方法	中国	ZL201410362608.9	2017.09.15	湘潭大学	姚志强、谭姣、盛梦刚、简博宇、曹璐云、	是
7	发明专利	一种高精度GNSS伪距单点定位的互差中值加权方法	中国	ZL201410676387.2	2017.12.12	桂林电子科技大学	蔡成林、李春华、徐李冰、王金辉、韦照川、李天松、李刚	是
8	发明专利	一种星钟和星历分离的矢量差分解算方法	中国	ZL200810232620.2	2011.09.21	中国科学院国家授时中心	李孝辉、蔡成林、吴海涛、刘阳、刘娅	是
9	发明专利	泵车间臂架姿态防碰撞检测方法及系统	中国	ZL201410379209.3	2017.01.11	湘潭大学	姚志强、康琴、盛梦刚、张钰雯	是
10	发明专利	一种基于互差的卫星完好性监测方法及系统	中国	ZL201410132939.3	2016.06.01	桂林电子科技大学	蔡成林、邓克群、李思敏、邓仕超、韦照川、李志斌	是
主要完成人情		(格式：姓名、排名、行政职务、技术职务、工作单位、完成单位、对本项目贡献)						

<p>况</p>	<p>蔡成林，排名第一，教授，工作单位：湘潭大学，完成单位：湘潭大学；项目贡献：合作发明专利 6 项，是本项目最核心完成人，是 2 项主要创新的主要贡献者。内容包括：针对 ZFS 广域精准性难题，首次提出与美国 WAAS 具有本质不同的广域差分原理，包括星钟和轨道误差相对分离、电离层三角分区和时频差综合修正等三大创新理论，丰富和发展了星基增强理论体系。针对北斗 PVT 服务性能测试评估中卫星健康字和动态测速的可信判据难题，提出互差中值的内差理论：互差中值的卫星异常排查法、互差中值加权定位原理，为北斗服务性能稳步提升和高可信定位服务提供有力支撑。研制了 ZFS 差分增强子系统：1 个差分数据综合处理平台、6 个固定基准站、3 个移动基准站和 5 个工程化软件，作为 ZFS 重要组成部分，有效支撑了 ZFS 建设，证明其有效性和科学性。</p> <p>吴海涛，排名第二，研究员，工作单位：中国科学院空天信息研究院，完成单位：中国科学院国家授时中心；项目贡献：合作发明专利 1、2、8，是本项目团队的核心组织者之一，对 2 项主要创新均有贡献。内容包括：2007 年-2011 年在中国科学院国家授时中心工作期间，围绕国家重点基础研究计划（973 计划）课题：《CAPS 导航原理研究与方案基础》，深入研究 CAPS 广域增强理论、方法和技术等一系列科学问题。本人作为蔡成林的博士生导师，指导该生开展星基导航增强原理、算法和关键技术研究论证了所提出了差分增强算法的科学性，为 ZFS 系统指标体系提供了重要依据，为 ZFS 工程建设方案提供了重要的技术基础。</p> <p>许龙霞，排名第三，副研究员，工作单位：中国科学院国家授时中心，完成单位：中国科学院国家授时中心；项目贡献：发明专利 3，对 2 项创新做出了重要贡献。内容包括：作为该项目的主要参与者，主要参与完善了广域差分增强技术的体系，攻克广域差分增强工程实现的关键技术，参与开展了广域差分增强技术的试验验证。参与将该技术应用于 ZFS 系统建设，实现了基于广域差分增强技术的 ZFS 差分授时系统建设。提出将广域差分的思想应用于北斗卫星导航系统授时，改善北斗系统的单向授时服务精度，支撑推广北斗系统的广泛应用。</p> <p>李思敏，排名第四，教授，工作单位：广西科技大学，完成单位：桂林电子科技大学；项目贡献：合作发明专利 4、10，是本项目团队的核心组织者之一，对第一个创新点做出贡献。主要包括：与第一完成人合作开展空间电离层广域电离层修正方法，共同提出三角分区的电离层误差修正方法，合作开展卫星完好监测，共同提出基于互差的卫星完好性监测新方法，同时，针对高轨卫星导航信号接收的高灵敏度难题，设计了宽带高增益天线，为 ZFS 基准接收机试验信号接收试验做出了较大的贡献。</p> <p>姚志强，排名第五，教授，工作单位：湘潭大学，完成单位：湘潭大学；项目贡献：3 项发明专利，对第二个创新点做出重要贡献。内容包括：针对如何极限发挥卫星导航系统的定位性能问题，联合国内顶尖级的数学和导航专家，共同探讨和研究北斗定位优化问题，包括伪距单点定位、网络 RTK 和实时 PPP 等，并作为智能导航研究中心副主任，带领团队</p>
----------	--

	<p>完成定位优化的移植，并具体负责定位优化技术的产学研合作，通过与多家企业合作，提升了多家导航企业的北斗产品新性能，降低了企业产品成本，提高了企业的产出效率，和为企业带来了良好的经济效益和社会效益。</p> <p>郭伟，排名第六，副研究员，工作单位：中国科学院国家授时中心，完成单位：中国科学院国家授时中心；项目贡献：作为 ZFS 差分增强系统平台建设的组织者和技术负责人之一，对第一个创新点在 ZFS 中的应用实现做出贡献。内容包括：负责 ZFS 差分增强平台研制的总体规划和设计，负责差分增强系统中各差分基准站的系统建设，负责差分增强算法技术测试和差分效果评估验证工作。</p> <p>杨辉华，排名第七，教授，工作单位：北京邮电大学，完成单位：桂林电子科技大学；项目贡献：作为重要参与人，参与 ZFS 差分增强系统软件总体设计，具体承担 ZFS 差分增强系统的差分综合数据处理软件需求分析、概要设计和详细设计工作，参与差分系统接口内部调试工作，编写差分综合数据软件测试报告和总结报告。</p> <p>武小年，排名第八，副教授，工作单位：桂林电子科技大学，完成单位：桂林电子科技大学；项目贡献：在 ZFS 建设过程中，参与差分增强系统的平台和软件研制工作。主要承担差分系统管理与控制软件、差分效果分析与评估软件的概要设计和详细设计，承担差分数据库的概要设计和详细设计，协助完成软件和数据库的功能测试和性能测试过程中的差错处理，对差分增强算法的工程实施做出了重要贡献。</p> <p>甘才军，排名第九，副教授，工作单位：桂林电子科技大学，完成单位：桂林电子科技大学；项目贡献：在 ZFS 建设过程中，参与差分增强系统的平台和软件研制工作。主要承担差分综合数据处理软件的设计与实现，创造性地解决了差分改正数、星历改正数实时计算、存储与显示，协助完成系统联调阶段的问题的分析与解决，对差分增强算法的工程实施做出了重要贡献。</p> <p>吴海燕，排名第十，研究实习员，工作单位：湘潭大学；完成单位：湘潭大学；项目贡献：从事项目进度管理，项目阶段性报告和项目总结报告的编写。从事差分效果分析与评估试验数据分析，协助编写测试分析软件接口。</p>
<p>主要完成单位及创新推广贡献</p>	<p>主要完成单位 湘潭大学 桂林电子科技大学 中国科学院国家授时中心 广西科技大学</p> <p>创新推广贡献</p> <p>■ 湘潭大学对本项目的主要贡献</p> <p>(1) 承担 ZFS 差分增强算法性能优化研究工作。ZFS 采用 4GE0+1IGSO 星座结构，卫星数量少且轨道相对单一，导致中国区域 GDOP 的 GDOP 为 5-8，为 GPS 或北斗的 3-5 倍，因此实现 ZFS 高精度星基广域增强，必须严格控制伪距噪声等对差分改正数的影响，通过研究抗差卡尔曼滤波算法，并确定了合适的抗差因子。</p> <p>(2) 承担单频电离层修正性能优化研究工作。ZFS 采用单频信号定位体制，电离层误差无</p>

法通过双频内差进行剥离并广域精密建模和修正。围绕这些难题，在经典的半和改正法基础上，提出了多普勒平滑伪距的电离层误差反演方法，为 ZFS 实施电离层精密改正提供了重要技术支持。

(3) 开展北斗载波相位差分应用研究。提出 GNSS 载波相位差分技术与 UWB 智能融合的高可信定位方法，依托载波相位差分技术，使机械臂可以获得实时高精度定位解，智能识别机械臂工作场景中 GNSS 信号的遮挡或部分遮挡，通过 UWB 信标组网系统，自适应克服机械臂 GNSS 信号短时遮挡带来的定位异常问题。

(4) 载波相位差分技术成果应用于多家导航企业，为企业产品定位性能提升提供了重要的技术基础，产品提高了市场竞争力，为企业创造了较大的经济效益，对我国北斗高精度应用推广具有重要贡献。

■ 桂林电子科技大学对本项目的主要贡献

(1) 承担 ZFS 差分增强算法设计和算法的前期论证工作。差分增强算法是 ZFS 差分增强系统工程建设的核心内容，通过近一年时间，完成算法的撰写和论证工作，为差分增强实施方案设计奠定了技术基础。

(2) 承担 ZFS 差分增强系统算法、平台和软件研制工作。承担了差分增强算法、差分站数据采集与传输软件、差分系统管理与控制平台及软件、差分数据综合处理平台及软件和差分效果分析与评估软件等，为本项目顺利完成和取得良好效果提供了技术保障和技术支撑。

(3) 提出三角分区电离层改正新方法。中国区域呈雄鸡状的不规则结构，不利于建立格网电离层监测站，针对这一问题，提出三角分区的电离层广域改正法，为 ZFS 取得高精度的广域差分定位精度和授时精度提供了重要的技术支持。

(4) 提出了互差中值理论。该理论直接应用于北斗 PVT 服务性能测试评估，为系统的问题排查提供了可信依据。

■ 中国科学院国家授时中心对本项目的贡献

(1) 承担了 ZFS 差分增强的理论基础研究。提出星钟和轨道误差修改方法，该方法是本项目的核心内容之一，该项研究工作是本项目第一完成人在中国科学院国家授时中心攻读博士期间在导师及其项目组成员的指导下共同完成的；

(2) 制定了 ZFS 差分增强系统实施方案。中国科学院国家授时中心作为 ZFS 差分增强系统建设的总体单位，负责总体工程建设，负责外场差分基准站建设、运行和维护工作，负责差分基准接收机和差分用户接收机的研制工作，为差分增强算法实施提供必要的硬件平台；

(3) 承担 ZFS 差分授时的工程建设。一种广域差分增强的卫星授时方法由本项目第一完成人提出，由中国科学院国家授时中心时频测量与控制团队联合桂林电子科技大学建立 ZFS 授时时间溯源模型参数，为 ZFS 高精度广域差分授时发挥了主体贡献；

(4) 负责组织差分增强各阶段的研制进度安排和控制，负责项目合同每个阶段的评审工

	<p>作。负责提出项目的技术指标要求和测试大纲，为各阶段工作按时完成提供了重要保障。</p> <p>■ 广西科技大学对本项目的贡献</p> <p>(1) 协助 ZFS 差分效果评估和分析软件设计、并协助相应问题排查；</p> <p>(2) 协助论证了 ZFS 高增益接收天线设计方案，并参与 ZFS 差分接收机高增益接收天线研制，为后续差分基准站接收机研制发挥积极作用。</p>
<p>推广应用情况</p>	<p>■ 成都国星通信有限公司</p> <p>将北斗伪距单点定位优化技术应用于成都国星通信有限公司所研制的北斗二号精稳工程手持验证终端和北斗二号车载一体用户，这些装置应用于自主导航定位和车载定位，取得了良好的经济效益和社会效益。</p> <p>■ 北斗国科（北京）科技有限公司</p> <p>将北斗定位优化技术应用于北斗国科（北京）科技有限公司所研制的 RN168 导航芯片、G380 导航板卡和 GK-N101 高精度定位接收机，这些装置应用于交通、物流、物联网以及北斗高精度等行业应用领域，为我司的项目运营作出了重要贡献，取得了良好的经济效益。</p> <p>■ 北京天斗科技有限公司</p> <p>将卫星导航系统差分增强与定位优化技术应用于北京天斗科技有限公司研制的授时守时装置、时间统一系统和卫星导航装置等北斗/GPS 系列产品，缩短了产品的开发周期，减轻了设计者的劳动强度，提高了设计效率，降低了设计成本，增强了产品的稳定性和可靠性，使该公司的生产能力得到了大幅度提高，进一步开拓了市场，这些设备应用于导航产品检测和测试、智能电网、车辆导航、智慧物流、物联网、高精度测绘等行业应用领域，取得了显著的经济和社会效益。</p>
<p>曾获科技奖励情况</p>	<p>本项目的关键技术点：北斗二号服务性能测试评估理论和方法研究获得 2014 年中国卫星导航定位协会卫星导航定位科技进步三等奖。</p>