**2021年度陕西省科技进步奖提名项目公示**

|  |  |
| --- | --- |
| 项目名称 | 倾斜同步轨道卫星转发式测定轨技术及其应用 |
| 提名者及提名意见 | **提名者：**陕西省科学院**提名意见：**倾斜同步轨道卫星覆盖范围大，可实现区域连续覆盖，广泛应用于导航系统。我国北斗卫星导航系统创新性使用IGSO、GEO、MEO的混合星座。卫星轨道精确测定是其开展导航授时服务的基础。转发式卫星导航试验系统作为北斗系统三大试验任务系统之一，其卫星星座由IGSO、GEO卫星组成。I1-S卫星（倾角为55度的IGSO卫星）作为北斗三号系统首颗试验卫星，转发式测定轨技术作为该卫星主要测定轨手段之一；转发式卫星导航试验系统的IGSO卫星测定轨采用转发式测定轨技术；传统的TWSTFT采用GEO进行，这大大限制了高纬度地区用户使用，采用IGSO卫星进行TWSTFT，可解决这部分用户的迫切需求。中国科学院国家授时中心研制建成了转发式卫星测定轨系统，开展了“倾斜同步轨道卫星转发式测定轨技术及其应用”研究，精密定轨精度优于2米、预报12小时URE精度优于1米，满足了北斗系统、转发式卫星导航试验系统对IGSO精密轨道的需求，本项技术处于国际先进水平；支持了I1-S卫星地面对接测试、在轨测试，运控的测定轨工作，圆满完成工程大总体的任务，在北斗三号工程中发挥了重要作用；提出了基于IGSO卫星的TWSTFT方法，解决了相对运动速度较大而引起的信号传递路径不对称等关键问题，实现了亚纳秒量级的卫星双向时间传递，处于国际领先地位。提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。 |
| 项目简介 | 该项目属于天文地球动力学、时间测量与方法领域。I1-S卫星是北斗三号卫星星座首颗试验卫星，该卫星为倾角为55度的IGSO卫星、承担北斗三号多项关键技术验证任务，同时IGSO卫星也是北斗三号卫星星座的重要组成部分，作为导航卫星的I1-S卫星精确轨道的测定是其开展导航服务的基础。因此北斗办支持建设转发式卫星导航系统I1-S测定轨系统，国家授时中心基于此系统开展了“倾斜同步轨道卫星转发式测定轨技术及其应用”研究，研究成果如下：（1）创新提出倾斜同步轨道卫星转发式测定轨技术、建成具有自主知识产权的、国际先进的倾斜同步轨道卫星转发式测定轨系统。基于高精度卫星双向时间比对技术，自主提出倾斜同步轨道卫星转发式测定轨技术，建成由盱眙、长春、西安、昆明、喀什、三亚6个测轨站组成的转发式卫星测定轨系统，可对转发式GEO卫星、IGSO卫星及北斗GEO卫星3类卫星的轨道进行精确测量与计算，主要功能性能指标包括：单次伪距测量精度优于1厘米;实时测定仪器系统误差，观测系统稳定, 测定轨精度优于2米、预报12小时URE精度优于1米；远距离台站间原子钟的高精度时间同步（亚纳秒级）；可以寄生方式进行卫星定轨观测。（2）开展IGSO卫星测轨方法研究、解决了大多普勒频移情况下测量问题、提升系统测轨精度。针对IGSO卫星相对GEO卫星运动速度的大幅度的增加的特点，对IGSO卫星测轨方法进行了系统研究：天线系统站坐标精确标定研究、天线控制策略研究、系统差标校研究、测距基带多普勒频移研究，并将研究结果应用于I1-S卫星测轨系统的研制中，提升系统测轨精度。（3）利用IGSO卫星的运动特性，提升IGSO卫星定轨标定天线设备时延标定精度。解决了地面设备零值标定和转发器群时延在轨测量等国际难题，用移动站标定方法将测轨设备零值标定到1ns内，用双移动站方法标定双向时间同步的零值，精度达到0.3ns，转发器群时延测量精度优于0.5ns，达到国际先进水平。研究发展了一种新的转发测距系统误差标校方法—“基于北斗IGSO卫星标校GEO卫星转发测距系统误差方法”，明确了北斗IGSO卫星标校GEO卫星转发测距系统误差方法策略及系统误差标校期间有效的转发测轨方案，实现了GEO卫星转发测距系统误差高精度标校，能够为后续相关研究提供理论支撑和试验方案支持。（4）完成IGSO卫星定轨模型精化、定轨算法优化、提升了IGSO卫星定轨精度。针对IGSO卫星的运动特点，研究了IGSO卫星定轨力学模型精化、定轨算法优化，将其应用于IGSO卫星定轨程序中，实现了I1-S卫星轨道的精密计算。针对IGSO卫星运动范围较GEO卫星大大增加的特点，采用国际GNSS监测评估系统（international GNSS Monitoring and Assessment System，iGMAS）分析中心电离层、对流层精密产品，开展IGSO卫星定轨对流层、电离层精化研究，并将其应用于IGSO卫星定轨程序中，提升了I1-S卫星的定轨精度。I1-S定轨残差15cm，轨道重叠差优于1米。（5）研制的转发式卫星测定轨系统，支持了北斗三号首颗试验卫星I1-S卫星在轨测试，负责I1-S卫星运控的测定轨工作。2015年4月21日北京时间16:00，转发式测轨西安站首次实现与I1-S卫星C波段转发载荷的信号正常贯通。测试结果基本证明：卫星C1转发式器工作正常、EIRP值正常、极化方式正确。（6）利用IGSO卫星实现双向卫星时间频率传递(TWSTFT)，拓展了 TWSTFT应用范围及覆盖区域。针对高纬度地区对基于IGSO卫星的TWSTFT的需求，提出了一种基于IGSO卫星的双向卫星时间频率传递(TWSTFT)方法、分析了卫星运动的双向时间传递影响规律、解决了相对运动速度较大而引起的信号传递路径不对称问题，采用IGSO卫星实现了亚纳秒量级的卫星双向时间传递，拓展了双向卫星时间频率传递(TWSTFT)方法应用范围及覆盖区域。该项目在国际上首次开展了IGSO卫星TWSTFT时间同步的实证性研究工作，紧密围绕北斗三号对I1-S卫星精密轨道需求、高纬度地区对基于IGSO卫星的TWSTFT的需求，开展相关研究。倾斜同步轨道卫星（IGSO）的转发式测定轨技术，有效解决了测轨地面站设备时延差标定问题，并采用I1-S卫星实现了亚纳秒量级的卫星双向时间传递。该项目发表论文9篇，授权发明专利2项，软件著作权7项。该项目成果已应用至中国科学院国家天文台的北斗试验星I1-S卫星测定轨，作为I1-S卫星的地面测定轨系统，长期提供I1-S卫星的高精度轨道数据，有效支撑了导航用户接收机的定位授时试验。该项目已支持亚太通信卫星公司的亚太6C卫星轨道漂移期间的测定轨应用，亚太6C卫星在轨测试期间的测定轨应用；已支持完成中国卫星通信集团有限公司的中星5A卫星漂星共位应用，中星11卫星新建测站系统误差标校；已支持无线电监测中心的无线电保障工作。 |
| 客观评价 | （一）技术比较“倾斜同步轨道卫星转发式测定轨技术”与其它同类技术相比有着明显的优势：1）USB技术测距精度约为3-5米，定轨精度为百米级水平；2）激光测距精度1厘米，但受天气影响，不能全天候和全天时工作；3）L波段伪距和载波相位测量，属于“伪距测量”，对GEO、IGSO卫星测定轨，难以分离轨道和卫星钟差，并且载波相位观测需要处理周跳模糊度问题；4）转发式测距属于“距离测量”，与卫星钟差无关。（二）验收意见；2010年3月26日，对863计划“基于卫星双向时间传递技术的星座自主时间同步与测定轨”的验收意见：该课题组在国际上首次开展了基于IGSO卫星的双向时间同步的实证性研究，具有创新性。（三）评价意见2015年底院135的评价意见：中国科学院研究所“十二五”规划任务书验收结果中关于研究所核心竞争力和国内外地位提及“该所处于国内领跑，国际并行，部分领域国际领跑，在时间基准保持、时间频率传递、卫星测定轨等方面在国内具有显著竞争优势。”（四）应用情况该项目提出了倾斜同步轨道卫星（IGSO）的转发式测定轨技术，并研制了倾斜同步轨道卫星的转发式测定轨系统。有效解决了测轨地面站设备时延差标定问题，并建立了基于IGSO卫星的双向卫星时间频率传递技术。已应用至中国科学院国家天文台的北斗试验星I1-S卫星测定轨，作为I1-S卫星的地面测定轨系统，长期提供I1-S卫星的高精度轨道数据，有效支撑了导航用户接收机的定位授时试验。该项目已支持亚太通信卫星公司的亚太6C卫星轨道漂移期间的测定轨应用，亚太6C卫星在轨测试期间的测定轨应用；已支持完成中国卫星通信集团有限公司的中星5A卫星漂星共位应用，中星11卫星新建测站系统误差标校；已支持无线电监测中心的无线电保障工作。（五）自主知识产权该项目授权发明专利2项，授权软件著作权7项。（六）论文评阅意见对成果论文An improved protocol for performing Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer using a satellite in an Inclined Geo-synchronous Orbit的评阅意见如下：In view of several IGSO satellites that could be used for TWSTFT your work is important. The paper proposes a method of including data from inclined geostationary satellites. The proposed method has a systematic offset with respect to the standard method that uses geostationary satellites that are not inclined. This method could be useful if the systematic offset is a constant, so that it could be removed by a calibration process.The material in the paper is worth a publication and the changes are mostly intended to clarify the presentation of the methods and the results.考虑到可以用于TWSTFT的多个IGSO卫星，您的工作非常重要。本文提出了一种使用倾斜地球同步轨道卫星数据的方法，相对于使用不倾斜的地球静止轨道卫星的标准方法，本文所提出的方法具有系统的偏移。如果系统偏移量是一个常数，则此方法会非常有用，因此可以通过校准将系统偏差删除。论文中的内容值得发表，而修改大多旨在澄清方法和结果的表示形式。 |
| 应用情况 | 目前，“倾斜同步轨道卫星转发式测定轨技术”有着非常广泛的应用范围。主要应用单位情况表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 单位名称 | 应用的技术 | 应用对象及规模 | 应用起止时间 | 单位联系人/电话 |
| 1 | 中国科学院国家天文台 | 倾斜同步轨道卫星转发式测定轨技术及其应用 | 导航用户接收机的定位授时试验 | 2015年6月至2020年10月 | 马利华/13691275691 |
| 2 | 亚太通信卫星公司 | 转发式卫星测定轨方法 | 亚太6C卫星轨道漂移期间的测定轨应用 | 2018年5月28日至5月29日 | 亚太通信卫星公司工程技术部 |
| 3 | 亚太通信卫星公司 | 转发式卫星测定轨方法 | 亚太6C卫星在轨测试期间的测定轨应用 | 2018年5月27日 | 亚太通信卫星公司工程技术部 |
| 4 | 中国卫星通信集团有限公司 | 转发式卫星测定轨方法 | 中星5A卫星漂星共位应用 | 2013年10月19日至10月30日 | 中国卫星通信集团有限公司卫星测控中心 |
| 5 | 中国卫星通信集团有限公司 | 转发式卫星测定轨方法 | 中星11卫星新建测站系统误差标校 | 2013年5月20日至6月20日 | 中国卫星通信集团有限公司卫星测控中心 |
| 6 | 国家无线电监测中心 | 校时系统，时钟设备等 | 无线电保障工作 | 2019年10月14日 | 国家无线电监测中心 |

（1）用于无委干扰源探测项目，对不法干扰源进行了精确定位，保护了国家通信安全；（2）配合卫星公司进行卫星漂移及多星共轨任务；（3）对于高轨卫星精密测定轨有着非常好的优势；（4）对于深空探测飞行器的测定轨具有特殊的应用价值，具有很好的应用前景（5）基于建成的转发式卫星测定轨系统，持续提供转发式IGSO卫星、I1-S试验卫星的高精度轨道数据，圆满完成了I1-S试验卫星在轨测试与在轨试验任务，有效支撑了转发式卫星导航试验系其它分系统的相关试验开展，并应用于转发式卫星导航试验系统的建设和运行。（6）以此为基础，向上级部门提出了北斗卫星导航系统的相关发展建议，获得好评；（7）支撑多家卫星公司的重要任务，确保了卫星安全稳定运行，支撑国家紧急需求，受到各方表扬；（8）完成了国际电信联盟（ITU）了卫星双向时间传递中载频与准确度的相关性研究验证，并向ITU提交了研究报告《The Study of The Relationship Between Rf Carrier Frequency and TWSTFT Accuracy》，支撑ITU相关研究。（9）申请了多项技术专利、软件著作权，发表多篇论文。 |
| 主要知识产权及标准规范 | 1. Wang Wei, Yang Xuhai, Ding Shuo, Li Weichao, Su Hang, Wei Pei, Cao Fen, Chen Liang, Gong Jie, Li Zhigang. An improved protocol for performing Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer using a satellite in an Inclined Geo-synchronous Orbit. IEEE Transactions on UltrasonicsFerroelectics and Frequency Control. 2018,65(8) :1475-1486。(SCI)
2. WeiPei， YangChaozhong, Yang Xuhai, Cao Fen, Hu Zhenyuan, Li Zhigang, Guo Ji, Li Xiaohui, Qin Weijin. Common-View Time Transfer Using Geostationary Satellite. IEEE Transactions on UltrasonicsFerroelectics and Frequency Control. 2020,67(9): 1938-1945。（SCI）
3. 陈琪，雷辉，杨旭海，陈亮，王伟。基于转发式分时观测的IGSO卫星定轨研究。时间频率学报，2017,40（4）：240-250。（CSCD）
4. 杨旭海，丁硕，雷辉，曹芬，李志刚，郭际，李伟超，孙保琪，陈亮，黄承强，成璇，弓剑军，龚婕。转发式测定轨技术及其研究进展。时间频率学报。2016,39（3）：216-224。（CSCD）
5. 黄承强，杨旭海，李伟超，陈亮，曹芬，刘娅。基于移动站的转发式地面站设备时延标校方法。宇航计测技术，2018,38(5):48-53。(CSCD)
6. 黄承强，杨旭海，成璇，李志刚，李伟超，曹芬。转发式测轨系统地面设备时延测量方法。导航定位与授时，2019,06(01):81-86。(期刊论文)
7. 王伟，李伟超，杨旭海，曹芬，陈亮。Modem通道时延对多台站TWSTFT的影响分析。测绘科学，2019,44(08):6-12。(CSCD)
8. Ge Yulong, Yang Xuhai, Qin Weijin, Yang Haiyan, Guang Wei, Zhou Feng, Ouyang Mingjun, Wang Shengli. Mitigation of the multipath effect in BDS-based time transfer using a wave-absorbing shield. Advances in Space Research.
9. Ge Yulong, Dai Peipei, Qin Weijin, Yang Xuhai, Zhou Feng, Wang Shengli, Zhao Xingwang. Performance of Multi-GNSS Precise Point Positioning Time and Frequency Transfer with Clock Modeling.
10. 王伟.观测数据质量分析软件，中国，软件登记号：2017SR422384。2017-08-03。
11. 王伟.地面测轨站天线方位俯仰角计算软件，中国，软件登记号：2017SR422386。2017-08-03。
12. 韦沛, 马浪明, 武美芳. SATRE MODEM 控制软件，中国，软件登记号：2015SR164116. 2015-8-24.。
13. 韦沛. 双向比对原始数据质量监测软件，中国, 软件登记号：2018SR634560. 2018-8-9。
14. 韦沛. 双向比对原始数据绘图软件，中国,软件登记号：2018SR634618. 2018-8-9。
15. 韦沛. 双向比对原始数据缺失查询软件，中国, 软件登记号：2018SR634233 . 2018-8-9。
16. 王伟，GEO天线观测IGSO卫星的观测大纲自动生成软件。中国，软件登记号：2019SR0736794。2019-07-17。
17. 陈亮，杨旭海，李志刚，雷辉，孙保琪，李伟超，孙乐，马浪明，胡珍源。利用转发测距值和伪距值确定GEO导航卫星钟差的方法。专利号:ZL201110072879.7。
18. 丁硕，王源昕，王霄，韦沛，苏行，杨旭海，孙保琪，秋宏兴，李志刚。基于高轨通信卫星的低轨卫星全弧段测定轨方法。专利号：ZL201911251410.2。
 |
| 主要完成人情况 | 杨旭海（1/9），中国科学院国家授时中心，高精度时间传递与精密测定轨研究室主任，研究员，完成单位中国科学院国家授时中心。主要贡献：1）负责研制了倾斜同步轨道卫星的转发式测定轨系统，并成功开展了北斗试验星I1-S卫星在轨测试；2）提出了基于IGSO卫星的双向卫星时间频率传递方法；3）IGSO卫星测定轨系统总体设计。李伟超（2/9），中国科学院国家授时中心，高精度时间传递与精密测定轨研究室副主任，研究员，完成单位中国科学院国家授时中心。主要贡献：　1）IGSO卫星测定轨系统总体设计、研制；2）测轨系统系统差标校；3）开展北斗试验星I1-S卫星在轨测试、运控的测定轨工作。王伟（3/9），中国科学院国家授时中心，助理研究员，完成单位中国科学院国家授时中心。主要贡献：1）支持了I1-S卫星地面对接测试、在轨测试，负责I1-S卫星运控的测定轨工作，圆满完成工程大总体的任务，在北斗三号工程中发挥了重要作用；2）针对高纬度地区对基于IGSO卫星的TWSTFT的需求，提出了基于IGSO卫星的双向卫星时间频率传递方法，解决了相对运动速度较大而引起的信号传递路径不对称等关键问题，并采用I1-S卫星实现了亚纳秒量级的卫星双向时间传递，处于国际领先地位。曹芬（4/9），中国科学院国家授时中心，副研究员，完成单位中国科学院国家授时中心。主要贡献：　1） IGSO卫星定轨力学模型精化、定轨算法设计优化、定轨程序实现；2）I1-S卫星在轨测试、运控测定轨工作；3）系统误差标校。韦沛（5/9），中国科学院国家授时中心，助理研究员，完成单位中国科学院国家授时中心。主要贡献：　1）提出了基于预报轨道的多普勒频移修正方法，开发了SATRE MODEM控制软件,通过修正信号发射频率，使I1-S卫星的观测可以正常开展；2）开发了双向比对原始数据质量监测软件、双向比对原始数据绘图软件、双向比对原始数据缺失查询软件，通过自动化软件简化运维流程，保障数据质量的有效性，支持了相关试验研究的开展；3）参与了I1-S卫星测轨站研制、在轨测试、测距基带多普勒频移研究、IGSO卫星双向时间频率传递研究等多项工作。陈亮（6/9），中国科学院国家授时中心，高级工程师，完成单位中国科学院国家授时中心。主要贡献：　I1-S卫星过赤道保护功能实现，I1-S卫星运控测定轨。雷辉（7/9），中国科学院国家授时中心，研究员，完成单位中国科学院国家授时中心。主要贡献：　1）IGSO卫星定轨力学模型精化、定轨算法设计优化、定轨程序实现；2）I1-S卫星在轨测试、运控测定轨工作。孙保琪（8/9），中国科学院国家授时中心，研究员，完成单位中国科学院国家授时中心。主要贡献：采用iGMAS分析中心电离层、对流层精密产品，开展IGSO卫星定轨对流层、电离层精化研究。成璇（9/9），中国科学院国家授时中心，副研究员，完成单位中国科学院国家授时中心。主要贡献：1） IGSO卫星定轨力学模型精化、定轨算法设计优化、定轨程序实现；2）I1-S卫星在轨测试、运控测定轨工作。 |
| 主要完成单位及创新推广贡献 | 主要完成单位：中国科学院国家授时中心创新推广贡献：国家授时中心是我国唯一、专门、全面从事时间频率科学研究的机构。承担着我国标准时间的产生、保持和发播任务，是国家不可缺少的基础性工程和社会公益设施，是国际原子时合作重要参加单位，研究领域完整覆盖“频率-守时-授时-用时”学科链，处于国际先进水平。其前身是陕西天文台，始建于1966年，总部位于陕西临潼，授时台位于蒲城县。2001年更名为中国科学院国家授时中心。五十多年来，为我国国民经济建设、国防安全和社会发展做出了不可替代的重要贡献，共获省部级以上重大科技成果奖百余项。该项目是科技部863项目等课题的成果，国家授时中心在项目的立项、技术力量、研究经费、基础设施的建设等方面给予了大力支持。 |
| 完成人合作关系说明 | 1. 陈亮，杨旭海、雷辉、孙保琪、李伟超以共同知识产权的合作方式合作完成“利用转发测距值和伪距值确定GEO导航卫星钟差的方法”。
2. 韦沛，杨旭海，孙保琪等以共同知识产权的合作方式合作完成“基于高轨通信卫星的低轨卫星全弧段测定轨方法”。
3. 王伟，杨旭海，李伟超，韦沛，曹芬，陈亮以论文合著的合作方式合作完成“An improved protocol for performing Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer using a satellite in an Inclined Geo-synchronous Orbit”。
4. 韦沛，杨旭海，曹芬等论文合著的合作方式合作完成“Common-View Time Transfer Using Geostationary Satellite”。
5. 雷辉，杨旭海，陈亮，王伟以论文合著的合作方式合作完成了“基于转发式分时观测的IGSO卫星定轨研究”。
6. 杨旭海，雷辉，曹芬，李伟超，孙保琪，陈亮，成璇以论文合著的合作方式合作完成了“转发式测定轨技术及其研究进展”。
7. 杨旭海，李伟超，陈亮，曹芬以论文合著的合作方式合作完成了“基于移动站的转发式地面站设备时延标校方法”。
8. 王伟，杨旭海，李伟超，曹芬，陈亮以论文合著的合作方式合作完成了“Modem通道时延对多台站TWSTFT的影响分析”。
9. 杨旭海，成璇，李伟超，曹芬以论文合著的合作方式合作完成了“转发式测轨系统地面设备时延测量方法”。
10. 杨旭海以论文合著的合作方式合作完成了“Mitigation of the multipath effect in BDS-based time transfer using a wave-absorbing shield”。
11. 杨旭海以论文合著的合作方式合作完成了“Performance of Multi-GNSS Precise Point Positioning Time and Frequency Transfer with Clock Modeling”。
12. 杨旭海，李伟超，孙保琪，雷辉，陈亮以共同立项的合作方式合作完成了“基于卫星双向时间传递技术的星座自主时间同步与测定轨”。
13. 杨旭海，李伟超，王伟，曹芬，韦沛，陈亮，雷辉，孙保琪，成璇等以共同立项的合作方式合作完成了“转发式测定轨试验”。
14. 杨旭海，李伟超，王伟，曹芬，韦沛，陈亮，雷辉，孙保琪，成璇等以共同立项的合作方式合作完成了“基于北斗IGSO卫星标校GEO卫星转发测距系统误差方法研究”。
 |