

“引力波探测”重点专项 2022 年度

项目申报指南

(征求意见稿)

“引力波探测”重点专项的总体目标是面向引力波研究发展前沿，围绕引力波探测研究的重大科学问题和瓶颈技术，全面布局阿赫兹到飞赫兹频段、纳赫兹频段和毫赫兹频段等引力波探测研究任务，大力提升我国引力波探测研究的创新能力，培养并形成一支高水平的研究队伍。

2022 年度指南围绕空间引力波探测、原初引力波探测、脉冲星测时阵列引力波探测等 3 个重点任务进行部署，拟支持 14 个项目，同时拟支持 2 个青年科学家项目。

指南方向 1.10 是青年科学家项目，支持青年科研人员承担国家科研任务。青年科学家项目不再下设课题。

1. 空间引力波探测

1.1 星间激光捕获与跟踪技术研究

研究内容：星间激光捕获与跟踪方案设计与仿真，高精度星间光束指向测量、捕获与控制技术，星间激光捕获与跟踪系统样机研制，地面半物理仿真与性能测试等。

考核指标：完成满足空间引力波探测需求的星间激光捕

获与跟踪方案设计，完成星间激光捕获与跟踪系统工程样机研制，通过卫星典型力、卫星振动与热环境模拟试验，星间光束捕获范围不小于 1 mrad，光束指向角度测量噪声不超过 $1 \times 10^{-6} \text{ rad/Hz}^{1/2}$ ，光束跟踪精度不大于 $5 \times 10^{-6} \text{ rad/Hz}^{1/2}$ ，捕获时间不超过 30 分钟，捕获成功率不低于 95%。

1.2 星间激光指向精确测量与控制研究

研究内容：高精度星间光束指向精确测量技术，光束指向精确调节和控制技术，星间激光指向测量与控制系统样机研制，关键技术和系统集成的性能测试与验证。

考核指标：完成星间激光指向测量与控制方案设计，完成星间激光指向精确测量与控制系统工程样机，通过卫星典型力、热环境模拟试验，星间光束指向角调节范围不小于 $1 \times 10^{-5} \text{ rad}$ ，建立接收光功率不大于 0.1 nW 的检测系统，使光束指向角测量噪声小于 $5 \times 10^{-9} \text{ rad/Hz}^{1/2}$ ，星间光束指向控制精度小于 $1 \times 10^{-8} \text{ rad/Hz}^{1/2}$ 。

1.3 弱光相位高精度测量研究

研究内容：超低噪声光电探测技术，低信噪比条件下高精度相位测量技术，采样时钟抖动噪声抑制技术，弱光探测系统集成与性能测试。

考核指标：研制满足空间引力波探测需求的星载四通道相位测量系统工程样机，通过卫星典型力、热环境模拟试验，光电探测噪声小于 $5 \text{ pW/Hz}^{1/2}$ ，对应波长范围为 1060 ~ 1068 nm，

接收光功率不大于 20nW，输入干涉（拍频）信号频率涵盖 5 ~ 25 MHz，在 1 mHz ~ 0.1 Hz 频段范围，相位测量噪声不大于 $5 \times 10^{-6} \text{ rad/Hz}^{1/2}$ 。

1.4 弱光锁相控制系统研究

研究内容：星载弱光探测技术，弱光条件下激光精密锁相技术，弱光锁相控制系统集成与性能测试，星间光束远距离传播弱光锁相控制地面模拟与仿真验证。

考核指标：研制满足空间引力波探测需求的弱光锁相控制系统工程样机，通过卫星典型力、热环境模拟试验，锁相控制系统接收光功率不大于 0.1 nW，对应波长范围为 1060 ~ 1068 nm，外差锁相中心频率不超过 10 ~ 15 MHz，在 1 mHz ~ 0.1 Hz 频段范围，锁相噪声不大于 $5 \times 10^{-5} \text{ rad/Hz}^{1/2}$ 。

1.5 检验质量的电荷与表面电势测量研究

研究内容：空间引力波探测中检验质量的残余电荷和表面电势的影响分析，检验质量的电荷测量在轨方案研究，检验质量的电荷与表面电势测量技术，检验质量的电荷与表面电势分布的物理机理研究，检验质量电荷管理系统评估技术。

考核指标：给出检验质量的电荷测量与评估的在轨方案，建立检验质量的残余电荷和表面电势测量装置，在 1 mHz ~ 0.1 Hz 频段内检验质量的电荷测量精度小于 $1 \times 10^{-13} \text{ C}$ ，表面电势时变测量分辨率小于 $5 \times 10^{-5} \text{ V/Hz}^{1/2}$ ，在空间分辨率不大于 0.1 mm 条件下表面电势分布测量精度不大于 0.1 mV。

1.6 检验质量锁紧与释放技术研究

研究内容：航天器发射和入轨后检验质量的锁紧与释放方法和仿真研究，检验质量锁紧与释放技术，检验质量锁紧与释放系统装置研制和性能测试技术。

考核指标：研制满足空间引力波探测应用需求的锁紧与释放系统装置，具备尺寸紧凑、满足惯性传感器探头安装集成需求，兼容高真空（不大于 10^{-5} Pa），通过卫星典型力、热环境模拟试验，锁紧对象的质量不小于 2.5 kg，锁紧力不小于 2500 N，释放对检验质量的冲量不超过 1×10^{-5} kg m/s。

1.7 高精度星载温度测量与控制研究

研究内容：高精度星载温度测量传感技术，超低热导率隔热材料设计与研制技术，高精度温度系统设计与控制技术，温度控制模拟系统研制与性能验证。

考核指标：温度测量分辨率小于 5×10^{-6} K/Hz^{1/2}；隔热材料热导率不小于 0.05 W/(m·K)；研制出满足空间引力波探测需求的高精度温度控制系统，尺寸不大于 0.5 m × 0.5 m × 0.4 m，功耗不大于 30 W，质量不大于 20 kg，通过卫星典型力、热环境模拟试验；模拟控温对象尺寸不小于 0.4 m × 0.4 m × 0.3 m，功耗不小于 20 W，功耗波动不小于 0.2W，接口平台温度范围不超过 19.5 ~ 20.5 °C 条件下，实现控温精度不超过 1×10^{-5} K/Hz^{1/2}，频率范围 1 mHz ~ 0.1 Hz。

1.8 零膨胀新型材料与超稳结构研究

研究内容：超低热膨胀系数和高导热率的新型材料制备

与成型技术，航天器高刚度、轻量化和超稳定结构优化设计与研制技术，航天器超稳结构样件研制，航天器结构高精度形变测量与评估。

考核指标：针对空间引力波探测需求，实现高稳定零膨胀新型材料制备与结构成型，完成航天器超稳结构设计方案，研制超稳结构样件尺寸不小于 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 3\text{ cm}$ ，密度不超过 2.3 g/cm^3 ，支撑负载质量不小于 350 kg ，结构基频不小于 40 Hz ，通过卫星典型力、热环境模拟试验，热膨胀系数小于 $1 \times 10^{-7}/\text{K}$ （两个方向），热导率大于 $30\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，形变检测线位移精度不超过 $10\text{ nm}/\text{Hz}^{1/2}$ ，角度精度不超过 $2 \times 10^{-7}\text{ rad}$ ，结构形变不超过 $100\text{ nm}/\text{Hz}^{1/2}$ ，工作温度范围涵盖 $19.5 \sim 20.5\text{ }^\circ\text{C}$ ，频率范围 $1\text{ mHz} \sim 0.1\text{ Hz}$ 。

1.9 空间引力波探测数据仿真与预处理研究

研究内容：空间引力波探测数据预处理整体方案与指标需求分析，原始测量数据的模拟生成与预处理方法，基于时间延迟干涉抑制激光频率噪声与时钟噪声的数据处理方法，环境干扰效应与噪声的数据预处理方法等。

考核指标：研发出空间引力波探测的数据预处理的软件系统，实现包括空间引力波探测模拟数据生成、时间延迟干涉等环节在内的端对端处理过程，实现对主要噪声类型的有效抑制，具备高实时性，完成引力波探测数据仿真与数据预处理验证。

1.10 无拖曳航天器编队精确控制研究（青年科学家项目）

研究内容：无拖曳航天器编队精确控制理论与方法，多自由度编队系统任务规划与高精度协调控制技术，无拖曳航天器编队全流程数值仿真与验证。

考核指标：提出空间引力波探测航天器编队自主协调控制方法，提出引力波探测编队任务规划与协调控制策略，建立编队精确控制全流程数值仿真平台，要求航天器编队臂长范围 10~300 万公里，航天器编队臂长变化范围不超过 1%，航天器姿态控制指向测量精度小于 $1 \times 10^{-7} \text{ rad/Hz}^{1/2}$ ，编队姿态控制精度不超过 $1 \times 10^{-5} \text{ rad}$ ，频率范围 1 mHz ~ 0.1 Hz。

2. 原初引力波探测

2.1 原初引力波望远镜接收机研发

研究内容：开展多频段原初引力波望远镜低频接收机的研究，包括光学系统、天线、焦平面探测器以及接收机系统的集成。

考核指标：完成 40GHz 原初引力波望远镜接收机研究，相对带宽不低于 20%，中心频率(40GHz)角分辨率小于 1.75° ，F 参数不超过 1.6，视场大于 10° ，探测器总数不低于 150。

2.2 原初引力波望远镜焦平面探测器模块研发

研究内容：开展多频段原初引力波望远镜高频接收机焦平面探测器模块的研究，包括天线阵列、焦平面探测器阵列的研制以及天线与探测器阵列的集成。

考核指标：完成 95 GHz / 150 GHz 原初引力波望远镜的接收机探测器模块核心技术和系统集成，天线阵列单个天线的交叉极化达到 -20 dB，焦平面探测器阵列单个探测器本征噪声达到 $5 \times 10^{-17} \text{ W/Hz}^{1/2}$ ，焦平面探测器单模块集成度不低于 200，探测器总数达到万量级。

2.3 原初引力波望远镜低温读出系统核心技术研究

研究内容：适用于原初引力波望远镜大规模超导转变边缘探测器 (TES) 焦平面探测器低温端复用读出方法与技术，多通道探测器集成技术等。

考核指标：研制满足高灵敏度原初引力波望远镜所需的低温读出系统原理样机，单个低温读出芯片复用比不小于 32:1，单个通道噪声小于 $5 \times 10^{-18} \text{ W/Hz}^{1/2}$ ，通道间串扰小于 1%。

3. 脉冲星测时阵列引力波探测

3.1 脉冲星测时阵列纳赫兹引力波探测研究

研究内容：基于我国 500 米口径射电望远镜 (FAST) 等装置，开展我国自主的脉冲星测时阵列数据处理方法与技术、脉冲星测时噪声抑制方法与技术、新一代全带宽射电望远镜技术和组阵技术、更高带宽脉冲星测时数据接收技术、纳赫兹引力波信号探测方法与技术等研究。

考核指标：完成中国射电望远镜装置观测数据的联合分析研究，实现不少于 40 颗毫秒脉冲星的长期测时观测数据精度小于 200 ns，其中不少于 20 颗脉冲星精度小于 100 ns，

纳赫兹频段引力波探测的灵敏度不大于 2×10^{-15} 。

3.2 高灵敏度超宽带接收机和宽带相控阵接收机关键技术研究

研究内容：基于大口径射电望远镜超宽带馈源和接收机低噪声设计技术，基于单片微波集成电路（MMIC）技术差分低噪声放大器芯片设计，大规模相控阵馈源阵列实现方案、波束合成以及相控阵接收机设计等技术。

考核指标：超宽带馈源照射角大于 148 度，工作带宽 0.7 ~ 4 GHz，接收机噪声温度小于 16 K，相控阵接收机噪声温度小于 20 K，工作带宽为 0.7 ~ 1.8 GHz，阵元数量不少于 96 个。