

国家市场监督管理总局重点实验室（时间频率与重力计量基准）

2024 年度开放课题申报指南

1. 基于 FPGA 和 DDS 的抑制微波泄漏频移的射频源关键技术研究

研究内容：冷原子微波钟是时间-频率计量仪器，其输出精确的频率信号，被广泛用于守时授时、卫星导航、计量体系、高速通信、电力电网等领域。在冷原子微波钟里，高稳定微波频率综合器对冷原子微波钟的频率稳定性和准确度非常重要。为了减小微波泄漏频移，提升钟系统的频率准确度，一般在微波频率综合器中采用基于Mach-Zehnder原理的无相移干涉开关，在原子与微波两次作用之间的原子自由飞行时间内关闭微波，且在微波再次打开时保证相位的连续。尽管基于Mach-Zehnder原理的无相移干涉开关可以将微波泄漏频移降低到小于 $1\text{E}-16$ ，但是该干涉开关系统较为复杂、微波器件较多，较难实现冷原子微波钟的小型化。因此，本项目拟研制基于FPGA和DDS的抑制微波泄漏的射频源，取代传统的基于Mach-Zehnder原理的无相移干涉开关。研究主要包括：1)FPGA电路设计，由FPGA实现频率、相位、幅度可调的基于DDS原理的34 MHz射频输出；2)相位不变性仿真及验证，DDS输出频率在第一次原子与微波作用时为34MHz，在原子与微波两次作用之间的自由飞行时间内切换到偏离中心频率（34MHz）大于10 kHz的频率，在第二次原子与微波作用时再切换回34MHz，在此过程中保证34MHz信号的相位是连续的。所研制的基于FPGA和DDS的抑制微波泄漏频移的射频源，将在小型冷原子微波钟、喷泉钟中进行推广应用。

考核指标：

- 1) 输出频率 $34\text{ MHz}\pm 1\text{ MHz}$ ；
- 2) 频率分辨率优于 $5\text{ }\mu\text{ Hz}$ ；
- 3) 频率切换时间小于 $1\text{ }\mu\text{ s}$ 。

成果形式：

- 1) 验证系统 1 套；
- 2) 研究报告 1 份。

2. 高梳齿间隔、窄脉冲、宽带电光调制光频梳关键技术研究

研究内容：电光调制光频梳在时间频率比对、超稳光生微波、高精度激光测距等领域有着及其重要的应用。现有的电光调制光频梳的光谱宽度受调制器性能及梳齿间隔的共同限制，输出光谱宽度往往小于 5nm。本项目拟研制一种高梳齿间隔、窄脉冲的宽带电光调制光频梳，通过级联高调制深度的电光调制器，结合色散补偿技术和非线性光谱展宽技术，攻克电光调制光频梳的输出光谱带宽受限的难题，实现高梳齿间隔、宽带窄脉冲的电光调制光频梳。主要研究内容包括：1) 高梳齿间隔的电光调制光频梳产生技术研究；2) 脉冲压缩技术研究；3) 非线性相干光谱展宽技术研究。

技术指标：

- 1) 梳齿间隔：10-25 GHz；
- 2) 光谱覆盖范围：1546-1554 nm；
- 3) 输出功率：100 mW。

成果形式：

- 1) 验证系统 1 套；
- 2) 研究报告 1 份。

3. 基于低频地震计的原子重力仪振动补偿算法研究

研究内容：地面振动带来的噪声是原子干涉重力测量中最主要的噪声来源。在通常采用的拉曼光反向反射的几何结构中，上下两束拉曼激光束之间的相位差主要取决于反向反射镜的振动。为了提高测量灵敏度，必须对地面振动噪声进行有效隔离或者补偿。本项目研究基于低频地震计的原子重力仪振动补偿算法，对地震计三个方向输出的速度信号进行滤波处理后直接对重力测量数据进行前馈处理从而提高重力测量的灵敏度，无需设计复杂的隔振系统，可以极大简化原子重力仪系统。主要研究内容包括：1) 原子干涉仪相位与地震计输出的速度信号之间的高保真关联的建立研究。2) 地震计输出信号的调理与相位延迟补偿研究。3) 地震计轴间耦合对补偿效果的影响研究。

技术指标：

- 1) 计算得到的相位与实验测量的原子跃迁概率之间的关联度大于 0.9；
- 2) 补偿后的测量灵敏度优 $30\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

成果形式:

- 1) 验证系统 1 套;
- 2) 研究报告 1 份。

4. 基于绝对重力仪传动系统的数字孪生模型关键技术研究

研究内容: 正确的安装和调试传动系统是激光干涉绝对重力仪实现稳定测量的基础, 高效稳定的传动是绝对重力仪性能提升的核心技术之一。绝对重力仪传动系统包括电机、落体、落体拖车以及钢带。电机的输出变化、钢带等张紧力等因素均会对传动系统的性能产生影响。对于耦合了多因素的传动系统, 通常在实验过程中改变任意影响因素后, 会产生连带的系统状态改变, 使系统状态分析难度增大。本项目提出研制一套基于 Simulink 和 Comsol 一维和三维耦合的绝对重力仪传动系统数字孪生模型, 重点关注电机输出特性以及钢带张紧力的变化对系统传动过程和落体运动产生的影响, 通过实验对模型进行标定, 提升模型准确性, 而后在孪生模型的指导下完善系统的装调工作, 降低系统传动过程导致的落体振动, 提升传动系统的稳定性。本项目中, 拟构建绝对重力仪的传动系统模型, 主要包括内容: 1) 参数化钢带驱动机构设计模型, 2) 传动过程中钢带的振动分析模块, 3) 模型计算精度实验验证。

技术指标:

- 1) 落体运动轨迹模拟精度 $\geq 95\%$;
- 2) 孪生系统指导下系统振动量优化 10%以上;
- 3) 传动模型电机输出模拟精度 $\geq 95\%$ 。

成果形式:

- 1) 验证系统 1 套;
- 2) 研究报告 1 份。