

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205675

冷原子干涉可编程时序控制系统设计与实现*

苏业南^{1,2} 周超¹ 李期学^{1,2} 张旭^{1,2} 章欢开^{1,2} 颜香华³ 朱凌晓^{1,2}

(1. 国防科技大学智能科学学院 长沙 410073; 2. 国防科技大学量子信息学科交叉中心 长沙 410073;

3. 湘中幼儿师范高等专科学校 邵阳 422200)

摘要: 时序控制系统是冷原子干涉实验、重力仪研制及应用测试必不可少的组成部分,负责协调、驱动和控制各子系统的运行,是冷原子干涉控制的中枢单元。针对冷原子干涉过程中高精度调节、多路同步及可灵活调控的时序控制需求,设计实现了一套基于 ARM+FPGA 架构的冷原子干涉可编程时序控制系统,其由时序主控模块和多个从设备模块构成,具有同步触发、模拟调制、射频驱动、信号采集和数据处理等功能。系统测试和冷原子干涉实验结果表明,该系统时序调节精度可达 10 ns,控制精度和多路同步精度均优于 2 ns,符合冷原子干涉时序控制应用需求,成功用于冷原子干涉重力测量。

关键词: 冷原子干涉; 时序控制; 可编程; 重力测量

中图分类号: TN791; TP273 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4045

Design and implementation of programmable timing control system for cold atom interference

Su Yanan^{1,2} Zhou Chao¹ Li Qixue^{1,2} Zhang Xu^{1,2} Zhang Huankai^{1,2} Yan Xianghua³ Zhu Lingxiao^{1,2}

(1. College of Artificial Intelligence, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. Interdisciplinary

Center for Quantum Information, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 3. Xiangzhong Normal

College For Preschool Education, Shaoyang 422000, China)

Abstract: The timing control system is an indispensable part of cold atom interference experiment, gravimeter development and application test. It is responsible for coordinating, driving and controlling the operation of each subsystem, and is the central unit of cold atom interference control. Aiming at the timing control requirements of high-precision regulation, multi-channel synchronization and flexible regulation in the process of cold atom interference, a set of programmable timing control system for cold atom interference is designed and implemented based on ARM+FPGA architecture, which is composed of timing master module and multiple slave device modules, and has the functions of synchronous trigger, analog modulation, RF drive, signal acquisition and data processing. The results of system test and cold atom interference experiment show that the timing adjustment accuracy of the system can reach 10 ns, and the control accuracy and multi-channel synchronization accuracy are better than 2 ns, which meets the application requirements of cold atom interference timing control and is successfully used in cold atom interference gravity measurement.

Keywords: cold atom interference; timing control; programmable; gravity measurement

0 引言

自 1991 年美国斯坦福大学朱棣文教授利用双光子拉曼跃迁实现了冷原子干涉仪以来,冷原子干涉相关研究发展迅速,以原子干涉重力仪为代表,其具有高精度、

高灵敏度优势,在基础物理、资源勘探、地球物理、导航定位等重要领域有着广阔的应用前景^[1-7]。在冷原子干涉实验、重力仪研制及应用测试过程中,冷原子的制备和操纵由多个子系统协同配合,如激光系统、磁场系统^[8-9]等。为确保冷原子干涉正常、有序进行,需要一套时序控制系统按照相应时序约束协调各子系统的运行^[10-12],以高精

收稿日期: 2022-07-10 Received Date: 2022-07-10

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(12004428)、湖南省自然科学基金优秀青年项目(2021JJ20047)资助

度的时序驱动管理控制同步触发、模拟调制、射频驱动、信号采集和数据处理等功能,完成原子干涉流程。

时序控制的任务是使目标系统按既定流程稳定可靠运行,在众多领域应用广泛。在武器装备领域,反辐射导弹的诱骗需要满足诱饵时序^[13];在航空航天领域,火箭的点火发射需要相应时序控制^[14];在核能领域,时序控制系统是托卡马克装置的重要组成部分^[15]。常用的时序控制方案有两种:一种是直接用单片机或计算机作为控制模块,通过监测指令执行周期进行时序管理,硬件相对简单,但其单线程的顺序执行方式使得时序控制精度受限,一般为 ms 量级^[16],且无法同步输出多路控制信号。另一种方案是利用设备板载的 FPGA 对控制信号进行时序约束,其可实现时序的高精度控制及多路同步输出^[17],但其只能控制所属设备,功能有限、灵活性稍差。随着冷原子干涉实验系统的复杂程度增加,需要进行时序控制的设备也随之增加,时序关系愈加复杂,研究人员对控制系统的时序控制精度、功能和灵活性提出了更高的要求。传统时序控制方案及系统难以适应冷原子干涉时序控制需求。

为此,本文面向冷原子干涉时序控制,基于时序控制需求分析,设计并实现了一套可编程时序控制系统,该系统由一个时序主控模块和多个从设备模块组成,可通过软件和硬件的协同编程实现多功能、多路同步触发的时序驱动管理,具有控制精度高、扩展性强、操作灵活等突出优势。实验结果表明,该系统具备 ns 尺度的时序管理精度,可满足冷原子干涉系统的时序控制需求。

1 冷原子干涉时序控制需求分析

图 1 所示为冷原子干涉重力仪典型时序控制流程,可分为原子冷却、初态制备、原子干涉和末态探测 4 个阶段。在原子冷却阶段,控制系统以一定的时序关系控制磁场和激光,利用塞曼效应和双光子拉曼跃迁实现多普勒冷却、偏振梯度冷却过程,获得冷原子团;在初态制备阶段,通过选态光、吹散光作用,选出冷原子干涉所需的特定态原子;在原子干涉阶段,制备好的冷原子团进行自由落体运动,下落过程中对其作用 $\pi/2 - \pi - \pi/2$ 拉曼脉冲序列,实现原子干涉;在末态探测阶段,打开探测光,对冷原子团进行布居探测,得到跃迁概率。为确保获得准确的测量结果,上述操作的时序控制精度需要控制在 μs 时间尺度内^[18],且要具备多路同步触发的能力。

在冷原子干涉重力仪工作过程中,其冷原子干涉是通过控制许多仪器设备具体实现的,包括电流开关、压控振荡器、声光调制器等,需要多种类型的时序控制信号协

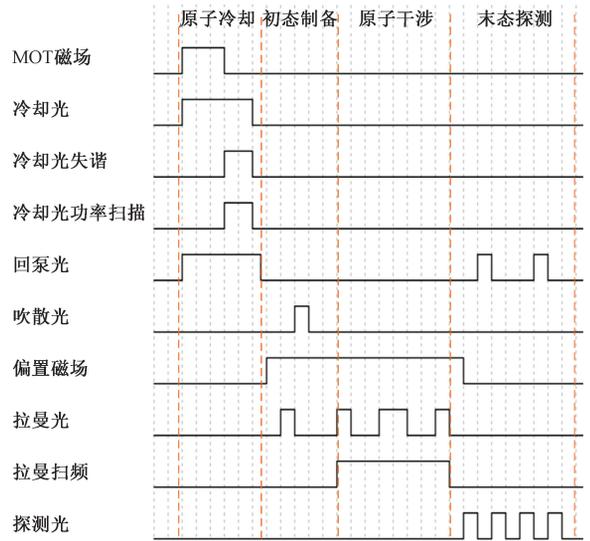


图 1 冷原子干涉时序控制流程

Fig. 1 Timing control flow of cold atom interference

同配合。

图 2 所示为冷原子重力仪时序控制结构框图,冷原子干涉时序控制系统不仅要实现高精度的时序驱动管理,还需具备 TTL 同步触发、模拟调制、射频驱动、通信控制和数据采集等功能,以实现仪器设备控制、系统状态的监测和干涉信号获取。此外,在实际应用中,冷原子干涉的时序控制关系、控制方案不是固化一成不变的,要求时序控制系统具有较强的可扩展性,时序控制方案可在线编程、灵活优化调整。

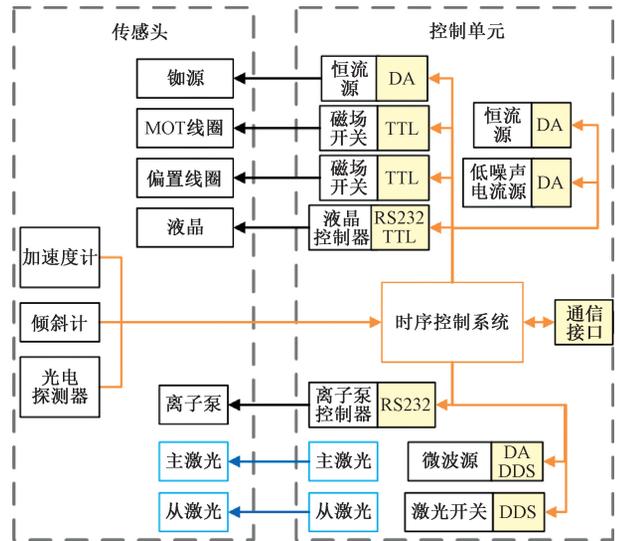


图 2 冷原子干涉重力仪时序控制结构框图

Fig. 2 Timing control structure block diagram of cold atom interference gravimeter

2 方案设计

面向冷原子干涉的功能需求,兼顾后续开发升级,时序控制系统采用模块化设计,系统结构框图如图 3 所示,由 1 个时序主控模块和 4 个从设备模块构成,分别是数字输入输出模块、模拟输出模块、射频驱动模块和数据采集模块。

时序主控模块采用 ARM+FPGA 的设计架构,使系统兼具 ARM 的软件灵活性和 FPGA 的并行硬件特性,可同时进行多路控制信号的高精度时序驱动管理,同时,ARM 和 FPGA 两者都可编程,为系统深度开发使用创造了条件,灵活性更强。与计算机+FPGA 的控制架构相比,ARM+FPGA 架构具有更高的通信带宽,实时性更强。时序主控模块主要负责冷原子干涉时序驱动管理和从模块的驱动控制,同时具备接口管理和数据处理功能,外围设备控制接口负责时序主控模块与外围设备通信协议转换;数字输入输出模块负责控制器件的触发和同步;模拟输出模块负责输出模拟电压信号,对压控器件进行控制;射频驱动模块负责为 AOM、锁相环电路等提供射频信号;数据采集模块负责原子干涉过程中的各种信号采集和监测。时序主控模块和各从设备模块组合使用,不仅满足冷原子干涉实验实际需求,还可随着实验需求的变化进行扩展升级。

图 4 所示为冷原子干涉时序控制系统的控制逻辑框架。使用时,ARM 通过 I/O 外设控制器加载冷原子干涉时序,根据时序配置生成从设备模块的控制参数,包括所

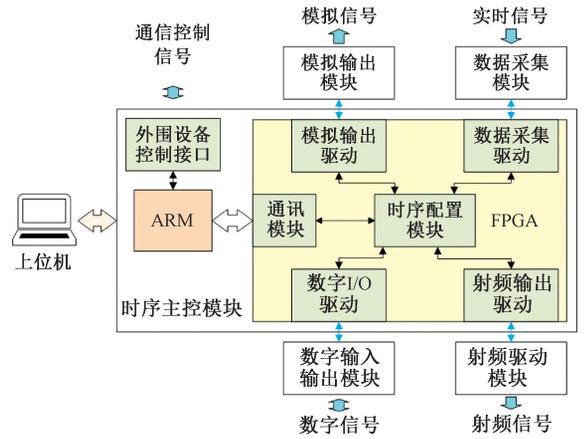


图 3 时序控制系统结构框图

Fig. 3 Structural block diagram of timing control system

控从设备模块设备号、时间参数和信号参数,通过总线将控制参数寄存在到 FPGA 端的控制指令 FIFO 中。当启动 FPGA 上的硬件定时计数器时,控制指令 FIFO 在时间参数设定时刻被读取,根据控制参数上的设备号,信号参数被传递给相应从设备模块驱动,驱动模块执行相应操作。在干涉实验过程中,外界信号的读取采用存储器映射方式和直接存储器访问方式两种方式。存储器映射方式适合小数据量的传输,如数字输入输出模块获取的同步信号;直接存储器访问方式数据传送效率高,不需要 ARM 一直参与,利于数据采集模块的数据搬运。冷原子干涉结束后,ARM 读取 DDR3 中的数据进行条纹拟合等数据处理,可得到测量结果。

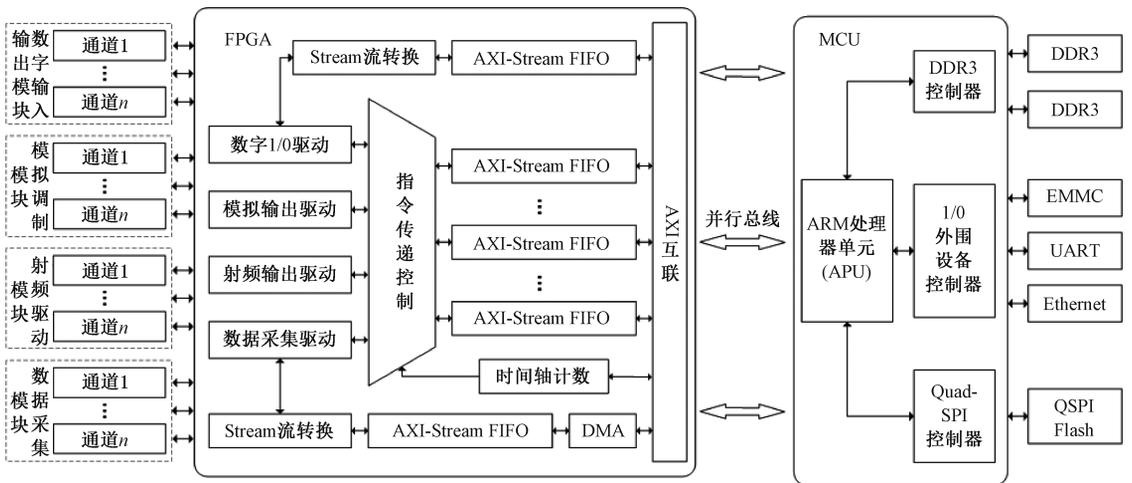


图 4 时序控制逻辑框架

Fig. 4 Timing control logic framework

2.1 时序主控模块设计

根据系统方案设计,需要 ARM 处理器和 FPGA 来搭

建主控模块,选用 ZYNQ-7000^[19-20] 片上系统来实现,其由处理器系统 (processing system, PS) 和可编程逻辑

(programmable logic, PL) 组成, PS 具有两个 ARM 处理器, 主频高达 866 MHz, PL 等价于 Artix-7 系列的 FPGA, 拥有丰富的 I/O 接口。ZYNQ 的 PS+PL 组合与传统上利用两块芯片搭建硬件电路相比, 具有更高的集成度、通信速率, 且配置更加灵活^[21]。ZYNQ 片上系统搭配外部存储器 and 通信芯片, 组成时序主控模块, 如图 5 所示, 可满足从设备模块时序驱动管理、外围设备通信控制和复杂算法处理的应用需求, 是冷原子干涉时序控制的逻辑核心, 具备指令传递、时序控制、设备驱动、数据接收与处理等功能。

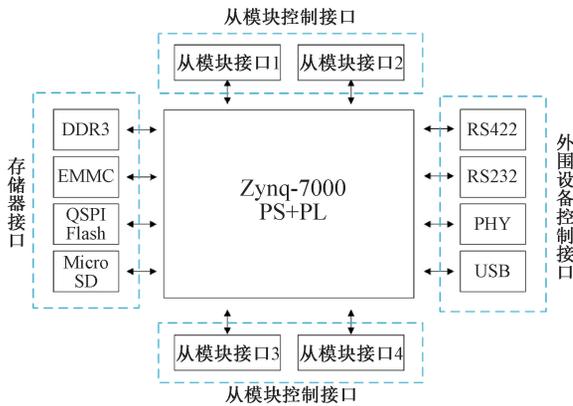


图 5 主控模块组成

Fig. 5 Composition of main control module

2.2 数字输入输出模块设计

在具体的实验过程中, 不同实验设备的同步、触发由 TTL 信号控制, 主控模块 I/O 不支持 TTL 电平标准, 为了满足同步触发应用需求, 设计了数字输入输出模块, 以实现 TTL 电平转换, 其由低压差分信号 (LVDS) 驱动接收电路、电平转换电路和收发控制电路组成, 如图 6 所示。

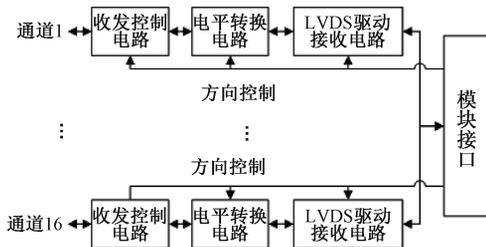


图 6 数字输入输出模块原理框图

Fig. 6 Schematic diagram of digital I/O module

为了实现高带宽、低噪声的数字输入输出, 数字输入输出模块与 ZYNQ 主控采用 LVDS 连接, LVDS 转换器选用 ADI 公司的 ADN4680E 四通道 LVDS 收发器, 高速传输时不仅可以抑制环境噪声, 还可降低信号传输时对环境发出的电磁辐射^[22]; 再经电平转换电路, 利用 ADUM242E0 数字隔离器转成设备所需的 5 V 逻辑电平;

控制器与设备间的接口利用收发器 SN74ABT245 实现数字收发控制, 保证系统上电或复位时的初始状态, 避免初始状态不定造成未知的结果, 消除安全隐患。

2.3 模拟输出模块设计

在冷原子干涉系统中, 存在许多压控器件, 以实现对抗曼激光的控制, 时序控制系统需要提供多路电压信号, 其由模拟输出模块产生。模拟输出模块由数模转换器、基准电压源、电压跟随电路和钳位保护电路组成, 如图 7 所示。

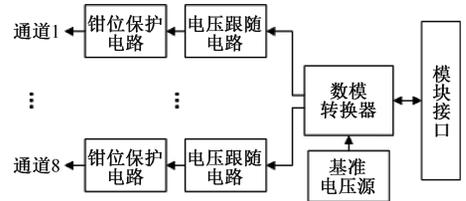


图 7 模拟输出模块原理框图

Fig. 7 Schematic diagram of analog output module

数模转换器选用 AD5362, 额定输出电压范围为 ± 10 V, 覆盖了实验室常用压控器件的输入范围。为了保证输出电压的准确性, 需要给 DAC 提供一个电压基准, 选用设计推荐的低噪声 5 V 基准电压芯片 LTC6655B, 其具有超低噪声、高精度和低温漂移性能。利用精密运算放大器搭建了电压跟随电路, 对信号进行缓冲, 提高负载驱动能力, 减小外设阻抗变化造成的干扰。在输出端, 利用二极管钳位电路将端口电压限制在 ± 12 V 内, 提高系统的安全性。

2.4 射频驱动模块设计

冷原子干涉实验所需的射频驱动信号最初是由信号源产生的, 但信号源作为通用仪器, 体积相对较大, 实际使用过程中控制不便, 不利于系统的集成化。

基于 DDS 芯片设计实验所需的射频驱动模块, 具有体积小、功耗低等优点。其主要由 DDS 芯片、功率调节电路和滤波电路组成, 如图 8 所示。DDS 芯片选用的是 AD9910, 可实现 0~400 MHz 的频率信号输出, 还具备调幅、调相功能。功率调节电路由射频放大器和数字控制衰减器搭建, 可调节信号输出功率以匹配设备输入功率要求。在信号的输出端, 添加截止频率为 400 MHz 的低通滤波器 LFCN-400, 能较好的滤除输出范围外的杂波, 平滑信号。

此外, AD9910 拥有 8 个寄存器, 通过 3 个寄存器引脚选择和串行通信控制, 能实现多个输出频率的快速切换, 在系统时钟为 1 GHz 情况下, 更新延迟小于 100 ns, 与单独使用 SPI 通信设置频率相比, 更新速率极大提高。

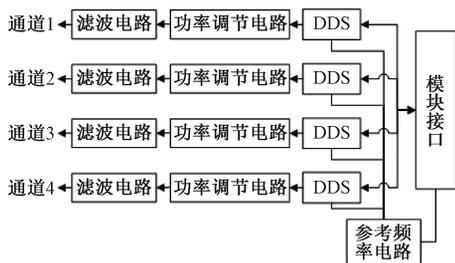


图 8 射频驱动模块原理框图

Fig. 8 Schematic diagram of RF driver module

2.5 数据采集模块设计

数据采集模块不仅采集冷原子干涉荧光信号,还可对系统状态进行实时监测,它由模数转换器、基准电压源、衰减电路和钳位保护电路组成,如图 9 所示。模数转换器选用 ADI 公司生产的 LTC2320,其最大采样率 1.5 MSPS,支持 8 通道 16 位同步差分采集,采样精度高、噪声低。基准电压源选用 4.096 V 电压参考 LTC6655BHMS8,模数转换器输入范围为 ± 4.096 V。为实现 ± 10 V 的测量范围,使用全差分运算放大器设计了衰减电路,以满足信号输入范围要求。在信号输入端,与模拟输出模块相似,利用二极管钳位电路将输入电压限制在 ± 12 V 内,避免输入电压过大造成芯片损坏。

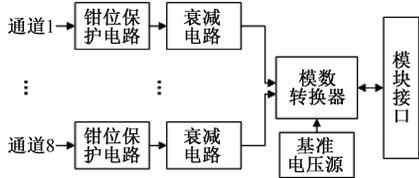


图 9 数据采集模块原理框图

Fig. 9 Schematic diagram of data acquisition module

3 全可编程特性

在使用过程中,时序控制的需求经常随着干涉仪系统方案变化而调整,需要时序控制系统具有较强的灵活性和可扩展性,能够随着冷原子干涉需求的变化对软硬件灵活调整和扩展升级。

3.1 硬件可编程

时序控制系统硬件部分的开发不仅是主控模块和各功能模块的开发,还包括 ZYNQ 片上系统的配置、可编程逻辑设计实现的时序控制链路、模块驱动等。因为系统采用的是 ZYNQ 时序主控模块+从设备模块和存储器映射驱动接口设计,当需要改变模块功能或增添控制端口数量时,只需将相应的模块替换不需要的模块或连接到预留的 ZYNQ 接口,对 PL 端硬件控制逻辑编程,改变或增添相应模块驱动,再将驱动接口与指令传递链路连接,

即可完成硬件部分修改。

此外,在实际的开发过程发现,若实现时序控制各通道、各项操作的完全并行控制,PL 端的资源消耗高,剩余的可编程资源较少,难以对 PL 进行深度开发利用。为此,需要对指令传递链路进行优化,减少可编程逻辑资源的消耗。

各通道、各项操作完全并行控制的控制指令传递方式是一种全通道并行方式,如图 10(a)所示,此方式要求每通道每项操作拥有 1 个控制指令 FIFO,可单独控制从设备模块每个通道的每项操作。然而,在冷原子干涉实际控制过程中,并不需要全通道、全操作的完全并行控制。为了节省 PL 资源,指令传递方式可采用可变通道选择方式,如图 10(b)所示,1 个通道的全部操作指令寄存在 1 个 FIFO 中,可操作通道数即 FIFO 数目由时序控制最大并发数决定,所控设备取决于控制参数上的设备号,这种方式实现了指令传递链路的复用,减少了可编程资源的开销,在本系统中,消耗的 PL 资源约为全通道并行方式的 40%。

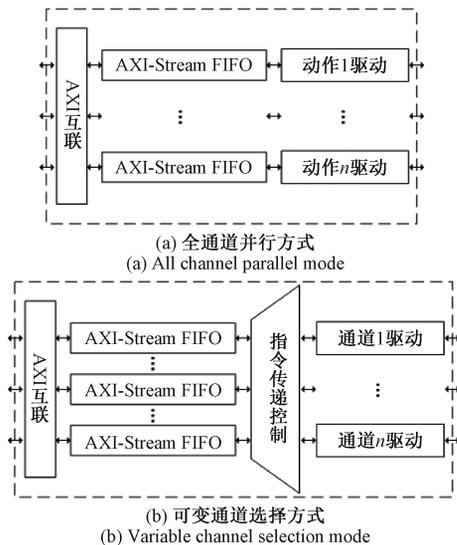


图 10 两种控制指令传递方式

Fig. 10 Two control instruction transmission modes

3.2 软件可编程

时序控制系统硬件部分搭建完毕后,可采用 C 语言等高级语言进行时序控制程序、数据处理程序的开发。对冷原子干涉过程中的时序控制只需调用封装好的从设备模块操作函数库,输入模块的设备号、响应时间、通道号、输出值等信息,即可完成干涉时序的配置。待冷原子干涉结束后,读取内存中的实验数据,进行相应的数据处理,可解析出绝对重力加速度值。对于使用者来说,操作简单,学习成本低,可快速完成时序控制程序开发并投入实验使用。

4 测试与验证

图 11 所示为设计实现的冷原子干涉时序控制系统。本节主要开展时序控制系统的时序管理核心指标测试,并验证其是否满足冷原子干涉时序控制的需求。

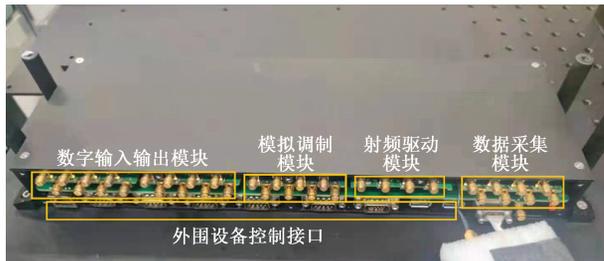


图 11 冷原子干涉时序控制系统

Fig. 11 Timing control system of cold atom interference

时序管理测试可分为最小输出延时测试、信号同步测试、模拟输出及射频输出响应测试和同步采集测试 4 部分。最小输出延时测试可直接反映出系统的时序调节精度;信号同步测试反映了系统并行控制、同步输出的能力;模拟输出及射频输出响应测试主要测试模拟信号、射频信号的输出响应时间;数据采集测试反映数据采集模块获取数据的正确性。待系统测试完毕后,将系统应用于冷原子干涉重力测量实验,进行实验验证。

4.1 时序管理测试

数字输入输出模块拥有 120 MHz 带宽,高于时序主控模块接口输出信号带宽,其最小输出延时可说明本系统的时序调节精度。在时序控制程序上间隔最小时间单元(10 ns)改变 TTL 输出状态,输出一个正脉冲,同时为了方便信号同步测试,设置 2 路 TTL 信号同步输出,如图 12 所示,测得 TTL 脉冲最小输出延时 PW 为 11.30 ns,与理论值 10 ns 差 1.30 ns,不同通道的信号同步误差 Δt 为 1.6 ns。改变延时时间,对延时脉冲宽度进行多次测试,结果如表 1 所示,延时偏差随时间累积,且随着延时脉宽增加而减少。经分析,延时偏差产生原因是信号翻转速率差异和反射所致,同步误差是硬件差异所致。通过最小输出延时测试和信号同步测试,可得系统时序调节精度为 10 ns,控制精度和同步精度在 2 ns 以内,满足冷原子干涉所需。

表 1 不同延时时间延时偏差

Table 1 Delay deviation of different delay time

延时脉宽/ns	测量平均值/ns	脉宽标准差/ns
10	11.30	0.026 1
100	100.96	0.056 6
1 000	1 000.6	0.357 8

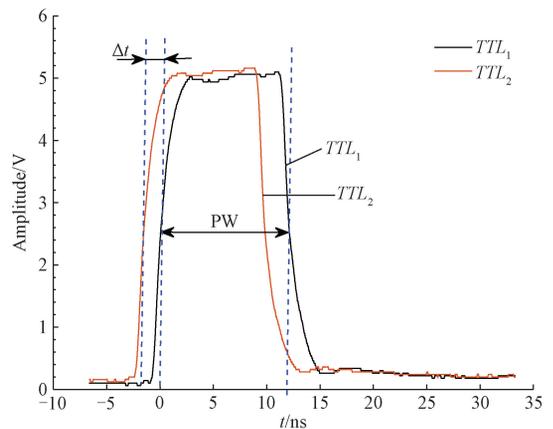


图 12 TTL 最小输出延时和信号同步测试

Fig. 12 TTL Minimum output delay and signal synchronization tests

设置 TTL 信号、模拟信号、射频信号在同一时刻输出,模拟输出电压为 5 V,射频频率为 100 MHz,以 TTL 信号作为起始信号进行信号响应测试。测试结果如图 13 所示,模拟信号输出响应时间 Δt_1 为 $(10.22 \pm 0.03) \mu\text{s}$,射频信号响应时间 Δt_2 为 $(1.55 \pm 0.01) \mu\text{s}$,均满足冷原子干涉模拟信号、射频信号输出刷新速率要求。经分析,两者响应时间可分为两部分:SPI 延迟时间与建立时间,其中 SPI 延迟时间为设备驱动对硬件进行 SPI 通信控制所消耗的时间,建立时间为芯片更新输出时间。SPI 延迟时间由 PL 实现的硬件驱动电路决定的,是一个固定值,可通过对时间参数的偏移消除,实现信号的快速响应,但无法提高信号刷新速率。

对于射频信号,通过预加载参数和改变 3 个寄存器选择引脚可进行快速响应更新,如图 14 所示,射频驱动模块依次输出 20、0、40、0、80、0、160 MHz 信号,射频输出响应时间小于 100 ns,与单独使用 SPI 通信控制相比,可短时间内极大提高射频信号刷新率,实现射频信号的快速响应,在冷原子干涉偏振梯度冷却控制过程中,效果更佳

对于数据采集模块,需在特定时段使能采集,避免数据量过大和方便数据处理。数据采集模块输入一路频率为 20 kHz 的正弦信号,同步触发信号源输出和数据采集,同步关闭,利用傅里叶变换对采集的数据进行频谱分析,结果如图 15 所示,频谱信息与预设信号频率一致,表明采集模块功能正常。

4.2 冷原子干涉实验验证

时序控制系统测试完毕后,将系统应用于冷原子干涉重力测量实验,冷原子干涉重力测量系统结构框图如图 16 所示,其可分为传感头和控制机柜两大部分。传感头主要包括隔振平台、真空腔、磁场线圈和磁屏蔽罩,位

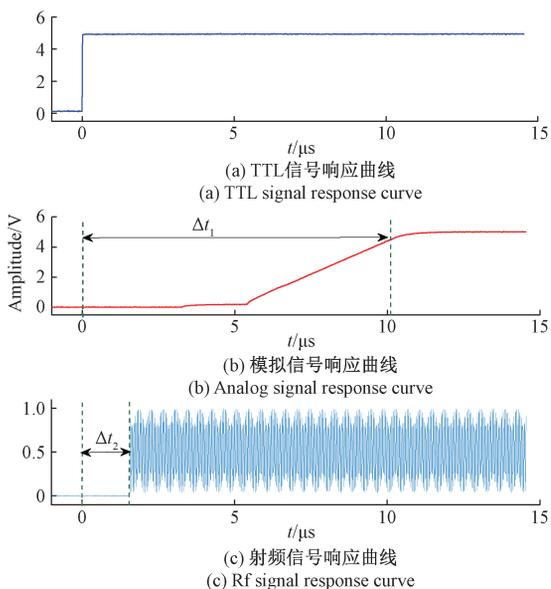


图 13 模拟输出、射频输出响应测试

Fig. 13 Analog output, Rf output response test

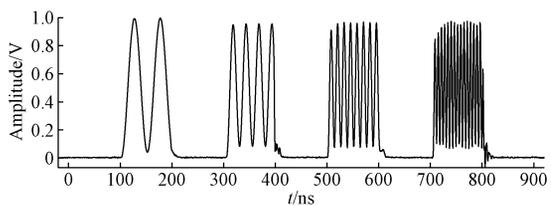


图 14 射频驱动模块快速响应测试

Fig. 14 Quick response test of RF driver module

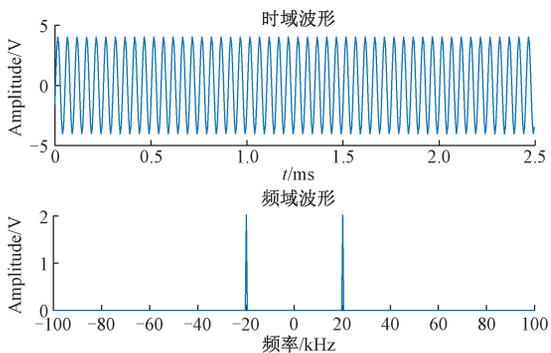


图 15 数据采集测试

Fig. 15 Data acquisition test

于真空腔内的原子在磁场、激光的作用下完成冷却、干涉和探测过程,隔振平台和磁屏蔽罩可减少外界环境的影响。控制机柜主要包括控制计算机、离子泵、时序控制系统、激光系统、电流源等,为传感头运行工作提供超高真空、激光、磁场线圈驱动电流等条件。

按照原子冷却、初态制备、原子干涉和末态探测流程

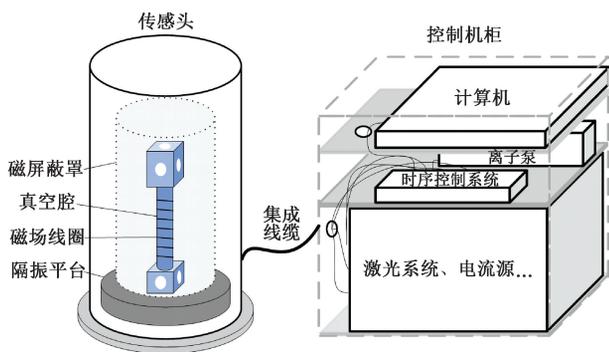


图 16 冷原子干涉重力测量系统结构框图

Fig. 16 Block diagram of cold atom interferometric gravimetry system

和本系统实际工作时序安排,利用时序控制系统对内部子系统、设备进行操作控制,使冷原子干涉重力测量系统正常工作,设置拉曼脉冲间隔 T 为 31 ms,对拉曼光频率啁啾率进行扫描,可得到原子处在 $F=2$ 能级处的布居概率曲线,即冷原子干涉重力测量条纹,如图 17 所示。扫描不同 T 下的干涉条纹,可进一步得到拉曼光共振啁啾率,解算出绝对重力值。实验证明,时序控制系统能够实现冷原子干涉控制,满足冷原子干涉重力测量实验所需。

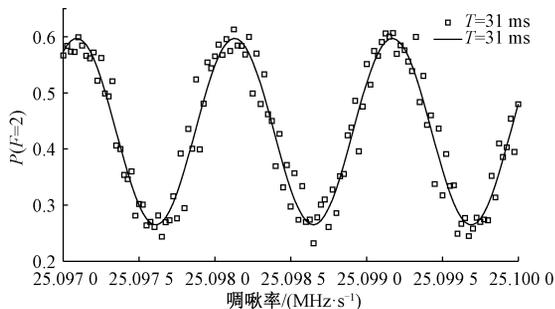


图 17 冷原子干涉条纹

Fig. 17 Cold atom interference fringes

5 结 论

本文面向冷原子干涉时序控制的应用需求,基于 ARM+FPGA 架构设计实现了一套冷原子干涉时序控制系统,由 1 个时序主控模块和 4 个从设备模块构成(数字输入输出模块、模拟输出模块、射频驱动模块和数据采集模块,可根据需求进行扩展)。实验测试结果表明,设计实现的时序控制系统各模块工作正常,时序调节精度可达 10 ns,控制精度和多路同步精度均优于 2 ns,满足应用需求,可直接用于冷原子干涉重力测量。系统具备全可编程特性,灵活性高、扩展性强,可适应各类应用场景,具有较高的实用价值。

参考文献

- [1] 何川. 原子干涉仪高精度检验等效原理[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
HE CH. High-precision equivalence principle test using atom interferometer [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [2] ASENBAUM P, OVERSTREET C, KIM M, et al. Atom-interferometric test of the equivalence principle at the 10-12 level [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(19): 191101.
- [3] 杨建岭. 重力勘查在铁矿勘探中的应用分析[J]. *中国金属通报*, 2021(10): 90-91.
YANG J L. Application analysis of gravity exploration in iron ore exploration [J]. *China Metal Bulletin*, 2021(10): 90-91.
- [4] 祝意青, 张勇, 杨雄, 等. 时变重力在地震研究方面的进展与展望[J]. *地球与行星物理论评*, 2022, 53(3): 278-291.
ZHU Y Q, ZHANG Y, YANG X, et al. Progress of time-varying gravity in seismic research [J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2022, 53(3): 278-291.
- [5] 张旭, 颜树华, 朱凌晨, 等. 冷原子干涉型量子传感器在导航应用中的研究现状[C]. 第十届中国卫星导航年会, 2019: 105-109.
ZHANG X, YAN SH H, ZHU L X, et al. Research status of cold atom interference quantum sensor in applications of navigation [C]. *The 10th China Satellite Navigation Annual Conference*, 2019, 105-109.
- [6] 孙枫, 曹通. 基于重力信息的惯性系相对准精度分析[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(11): 2409-2415.
SUN F, CAO T. Accuracy analysis of coarse alignment based on gravity in inertial frame [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(11): 2409-2415.
- [7] 李嘉华, 姜伯楠. 原子干涉重力测量技术研究进展及发展趋势[J]. *导航与控制*, 2019, 18(3): 1-6, 81.
LI J H, JIANG B N. Research progress and development trend of atomic interference gravimetry technology [J]. *Navigation and Control*, 2019, 18(3): 1-6, 81.
- [8] 吕梦洁, 王光明, 颜树华, 等. 原子干涉重力仪集成光源系统综述[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(7): 1-10.
LYU M J, WANG G M, YAN SH H, et al. Review of compact laser systems for atomic interference gravimeter [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(7): 1-10.
- [9] 张淋, 高伟, 李倩. 冷原子干涉陀螺仪实现及其性能分析[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(7): 11-18.
ZHANG L, GAO W, LI Q. Realization and performance analysis of gyroscope based on cold atom interferencer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(7): 11-18.
- [10] 李一民. 冷原子干涉仪实验程序控制系统研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
LI Y M. Investigation of experimental control system for cold atom interferometers [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [11] 罗东云, 程冰, 吴彬, 等. 用于冷原子干涉仪激光时序控制的 DDS 跳频系统设计与实现[J]. *计算机测量与控制*, 2017, 25(9): 83-86.
LUO D Y, CHENG B, WU B, et al. Design and implementation of DDS frequency hopping system for cold atomic interferometer laser timing control [J]. *Computer Measurement and Control*, 2017, 25(9): 83-86.
- [12] BOLA S M, ZACHARY P, WU X J, et al. Embedded control system for mobile atom interferometers [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(7): 073103.
- [13] 李秀金, 马彦恒, 刘静, 等. 雷达诱饵抗 ARM 技术研究[J]. *计算机测量与控制*, 2012, 20(1): 129-131.
LI X J, MA Y H, LIU J, et al. Study of technology of radar decoy in antagonizing ARM [J]. *Computer Measurement and Control*, 2012, 20(1): 129-131.
- [14] 梁嘉琪, 邝强, 王稀宾, 等. 一种低成本无控火箭点火时序控制器设计[J]. *计算机测量与控制*, 2021, 29(2): 98-102.
LIANG J Q, MANG Q, WANG X B, et al. A design of low-cost uncontrolled rocket ignition timing controller [J]. *Computer Measurement and Control*, 2021, 29(2): 98-102.
- [15] 任磊磊, 罗萃文, 刘攀乐, 等. HL-2M 装置时序控制与数据采集系统设计[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2021, 41(S2): 553-558.
REN L L, LUO C W, LIU P L, et al. Design of HL-2M timing control and data acquisition system [J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2021, 41(S02): 553-558.
- [16] 王番. 高精度的时序控制系统设计与实现[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2014.
WANG F. Design and implementation of high precision sequential control system [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2014.
- [17] 厉泽环, 颜树华, 贾爱爱, 等. 基于虚拟仪器的冷原子干涉时序控制系统[J]. *中国科技论文*, 2016, 11(8): 886-890.
LI Z H, YAN SH H, JIA AI AI, et al. Sequential control

system for cold atom interferometer based on virtual instrument[J]. China Science Paper, 2016, 11(8): 886-890.

- [18] 胡青青. 冷原子干涉重力仪测量性能评估与提升方法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2017.
HU Q Q. Performance evaluation and improvement of the cold atom interferometry gravimeter [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
- [19] SANTARINI M. Zynq-7000 EPP sets stage for new era of innovations[J]. Xcell Journal, 2011, (75):8-13.
- [20] RAJAGOPALAN V, BOPPANA V, DUTTA S, et al. Xilinx Zynq-7000 EPP: An extensible processing platform family[A]. 2011 IEEE Hot Chips 23 Symposium (HCS), 2011:1-24.
- [21] JOAO S, VALERY S, IOULHA S. Comparison of on-chip communications in Zynq-7000 all programmable systems-on-chip[J]. IEEE Embedded Systems Letters, 2015, 7(1):31-34.
- [22] 胡胜. LVDS 技术的应用与研究[C]. 《IT 时代周刊》论文专版(第 315 期), 2015:261-263.
HU SH. Application and research of LVDS Technology[C]. 《IT Time Weekly》Special Edition of Thesis (Issue 315), 2015:261-263.

作者简介



苏业南, 2020 年于国防科技大学获得学士学位, 现为国防科技大学硕士研究生, 主要研究方向为空间仪器工程。

E-mail: suyenan@foxmail.com

Su Yenan received his B. Sc. degree from National University of Defense Technology in 2020. Now he is a M. Sc. candidate at National University of Defense Technology. His main research interest includes space instrument engineering.



周超(通信作者), 2010 年于武汉大学获得学士学位, 2012 年、2017 年于国防科技大学获得硕士、博士学位。现为国防科技大学讲师, 主要研究方向为精密测量理论与技术、空间仪器工程及时空信息安全。

E-mail: zhouchaowhu@126.com

Zhou Chao received his B. Sc. degree from Wuhan University in 2010, M. Sc. degree and Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2012 and 2017, respectively. Now he is a lecturer at National University of Defense Technology. His main research interests include precision measurement theory and technology, space instrument engineering, time and space security.