

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.04.007

事件时间测量系统及其在绝对重力仪中的应用

钱 锦^{1,2}, 伍 康^{1,2}, 王力军^{1,2}

- (1. 清华大学精密仪器系, 北京 100084;
2. 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要:绝对重力仪通常采用真空腔中自由落体的方法,通过测量激光干涉条纹信号的过零时间来计算绝对重力加速度(g)。针对绝对重力仪的使用,依托电子计数法的基本原理,基于数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)设计实现了事件时间测量系统,精确测量干涉条纹过零时间。首先介绍了事件时间测量的基本原理,然后具体介绍在以 DSP 为核心的硬件上的实现方法。根据理论计算和 MATLAB[®]数值仿真实验,评价系统测时误差以及对重力加速度测值的影响。最后分别通过硬件模拟实验和 FG5X 型高精度绝对重力仪上的对比实验进行验证。实验证明,该系统对重力加速度测量真值影响小于 $1\mu\text{Gal}$ ($1\mu\text{Gal}=1\times 10^{-8}\text{m/s}^2$),标准差影响小于 $5\mu\text{Gal}$ 。该系统体积小、成本低,尤其对于小型化、野外使用的绝对重力仪,完全符合其使用需求。

关键词:数字信号处理器;激光干涉;时间测量;绝对重力仪

中图分类号:TH761.5; TM935.4 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-8110(2017)04-0050-07

Event-time Measurement System and Its Application in Absolute Gravimeters

QIAN Jin^{1,2}, WU Kang^{1,2}, WANG Li-jun^{1,2}

- (1. Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Beijing 100084, China)

Abstract: Laser interference is generally applied in the traditional free-falling absolute gravimeters, and the absolute gravitation acceleration (g) is measured by timing the zero-crossings of the interference fringe signal. An event-time measurement system based on Digital Signal Processor (DSP) is designed and realized for the application in absolute gravimeters. The principle of the event-time measurement is introduced, followed by the hardware implementation method. Time measurement errors and their effect on the gravity measurement are calculated both theoretically and from numerical software simulations with MATLAB[®], and verified by hardware simulated experiments and experiments using an FG5X high-precision absolute gravimeter. The results show that the effect on the true value of gravity acceleration measurement caused by the event-time measurement system is less than $1\mu\text{Gal}$ ($1\mu\text{Gal}=1\times 10^{-8}\text{m/s}^2$), and the effect on the standard deviation is less than $5\mu\text{Gal}$. The system has advantages of compact size, small volume and low cost, and meets the requirements of precision and portability, especially for field ready absolute gravimeters.

Key words: Digital Signal Processor (DSP); Laser interference; Time measurement; Absolute gravimeter

收稿日期:2017-04-29;修订日期:2017-06-07

基金项目:清华大学自主科研计划(20131089245)

作者简介:钱锦(1991-),男,博士生,主要从事绝对重力测量、重力梯度测量方面的研究。E-mail:qianjin_0226@163.com

0 引言

绝对重力仪是用于测量地球表面重力加速度绝对数值的仪器,在精密计量、大地测量、资源勘探、灾害预防等领域都有重要的应用^[1]。经典的绝对重力仪大多采用自由落体的方式精密测量重力加速度。在真空腔中自由释放角锥棱镜,利用激光干涉的方法测量其下落距离,并精密测量记录下落时间,通过拟合一次下落过程中得到的时间-位移数据对,计算出重力加速度的值。因此对落体下落时间的测量是影响重力加速度精密测量的关键因素。

高精度测量时间最基本的方法是电子计数法。为了克服电子计数法的原理误差,在其基础上发展出模拟内插法、抽头延迟线法、差分延迟线法、游标法、时间-幅度转换法等高分辨率的测量方法^[2-7]。相比而言,电子计数法更适用于要求连续测量、实时测量、时间间隔较大、测量精度不太苛刻的场合^[3],可以满足绝对重力仪对落体下落时间测量的需求。

目前绝对重力仪中获取落体下落时间的方法有:1)采用商业化的高精度时间间隔测量仪器,例如通用时间间隔计数器 SR620^[6]、事件计时器 A032-ET^[10]等,或专用时间测量芯片 TDC502^[11]等;2)采用高性能的数据采集卡对干涉条纹信号进行采样,结合数字信号处理的方法得到条纹信号的时间信息^[12];3)基于现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)的时间间隔计数^[13]。本文基于数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)设计了一种结构简单、成本低、扩展性强的事件时间测量系统,实现了对绝对重力仪的激光干涉信号过零时间的精密测量。

1 条纹过零时间测量基本原理

经典的绝对重力仪采用激光干涉的方法测量真空中落体自由下落的距离。绝对重力仪中激光干涉光路原理如图1所示^[14]。

激光通过分光镜分成两路,一路经过下落角锥棱镜与参考角锥棱镜的反射,与另一路激光形成干涉,由光电探测器将干涉信号转换成电信号。根据激光干涉测量原理,落体运动位移为激光半波长时,产生一个整周期干涉条纹。条纹信号频率 f 与落体下落速度 v 成正比

$$f = \frac{2}{\lambda} \cdot v \quad (1)$$

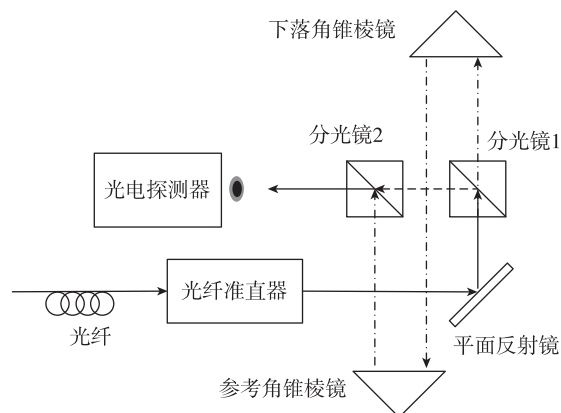


图1 绝对重力仪的激光干涉光路原理

Fig. 1 Optical principle of laser interference in an absolute gravimeter

其中, λ 为激光波长。因此真空中一次自由下落过程得到的激光干涉条纹信号是一组频率随时间线性增大的正弦扫频信号。通过高速过零比较器,将激光干涉得到的正弦扫频信号转换成方波扫频信号作为待测信号,对正弦信号的过零时间的测量即转换成对方波信号跳沿时间的测量。

方波跳沿时间的测量采用电子计数法的基本原理,将待测的方波信号与标准时钟信号进行比对。配置计数器与标准时钟信号锁定,每过1个时钟周期,计数器增计数1。以方波信号的上升沿作为测量的触发事件,触发寄存器记录并存储计数器的当前计数值,记为 n_i (下标 i 表示测量的第 i 个上升沿)。测量基本原理如图2所示。

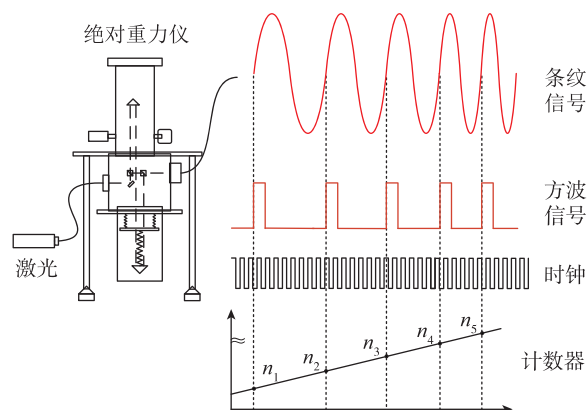


图2 时间测量的基本原理

Fig. 2 Fundamental principle of time measuring

第 i 个上升沿对应落体自由下落时间为

$$T_i = \frac{n_i}{f_c} \quad (2)$$

其中, f_c 是标准时钟信号频率。这段时间内落体的下落距离为

$$S_i = i \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

由得到的时间-位移数据序列 (T_i, S_i) 作二次拟合, 即可算得自由落体加速度的值。

2 系统设计与实现

本设计以 DSP 为核心器件构建激光干涉条纹时间测量系统。系统主要由高速过零比较器、测频单元、计数单元以及时钟、串口数据通信等其他相关模块组成。各单元协同工作框图如图 3 所示。核心处理器选用 TI 公司的 TMS320F28335 芯片。

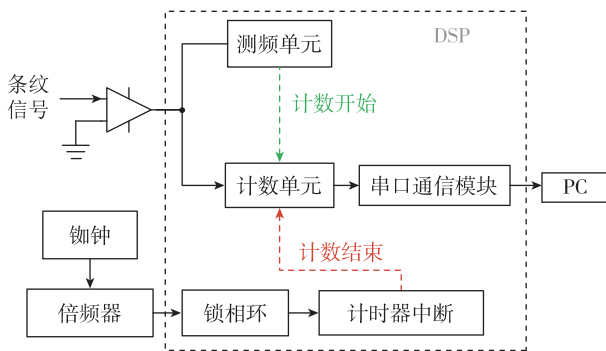


图 3 干涉条纹时间测量系统原理框图

Fig. 3 Principle block diagram of the interference fringe time measurement system

铷原子钟产生时钟信号经倍频器转换, 为 DSP 提供标准的时钟参考源。激光干涉条纹信号经过高速硬件过零比较器, 转换为 TTL 电平的方波信号作为待测信号, 并且可以设定输入捕获信号的预分频, 将分频后的待测方波信号同时输入测频单元和计数单元。

TMS320F28335 芯片中的增强性捕获 (Enhanced Capture, eCAP) 模块用于搭建测频单元和计数单元。按式(1)计算测频单元中的触发频率 f_0 , 作为计数启动条件, 其中, 速度 v 为参与拟合运动段的初始速度。根据设定的下落时间, 设定定时器中断时间 T_s 作为计数结束条件。下落物体从静止开始自由落体, 随着下落速度的增加, 激光干涉条纹信号的频率越来越高。当条纹信号频率达到触发频率 f_0 时, 测频单元产生计数启动信号, 触发计数单元的计数器开始计数, 同时触发定时器中断开始计时, 经过 T_s 时间后, 产生计数结束信号, 终止计数单元计数。这样得到了绝对重力仪一次自

由落体的条纹信号过零时间测量值, 通过串口通信将数据传输至计算机做数据拟合处理。

3 误差分析与精度估计

3.1 实验参数

在做进一步的误差分析和精度估计等理论计算之前, 先对本文采用的实验参数作相关说明。理想的自由落体运动过程激光干涉条纹是一组频率线性增大的正弦扫频信号。设定自由下落加速度 $g_0 = 9.8 \text{ m/s}^2$, 激光波长 $\lambda = 633 \text{ nm}$, 激光干涉信号频率从 $f_0 = 1 \text{ MHz}$ 到 $f_1 = 4.716 \text{ MHz}$ 线性增大。另外, 设定信号预分频数为 50, 这样一次自由下落过程中大约记录 $N = 7000$ 个过零点时间数据。本文选用的 TMS320F28335 芯片主频最高为 150 MHz, 即参考时钟信号频率为 $f_c = 150 \text{ MHz}$ 。

3.2 时间测量误差分析

根据电子计数法的测量原理, 系统测时误差主要来自于量化误差、触发误差和时基误差^[15]。对于本文设计的系统, 测时误差绝大部分来源于量化误差。

量化误差是由于控制计数启动、停止的闸门信号与电子计数器的时钟脉冲不一致造成的, 如图 4 所示。图 4 中, T_c 表示标准时钟信号的周期, T_i 表示第 i 个捕获事件时间的真值。由于计数启动信号、捕获事件与时钟信号的上升沿不一致, 用 t_0 表示计数启动信号与前一个时钟信号上升沿之间的时间间隔, 用 t_i 表示第 i 个捕获事件与其前一个时钟信号上升沿之间的时间间隔。由此易见, 第 i 个捕获事件时间的真值应为

$$T_i = n_i T_c - t_0 + t_i \quad (4)$$

而通过电子计数法得到的时间测量值为

$$T'_i = n_i T_c \quad (5)$$

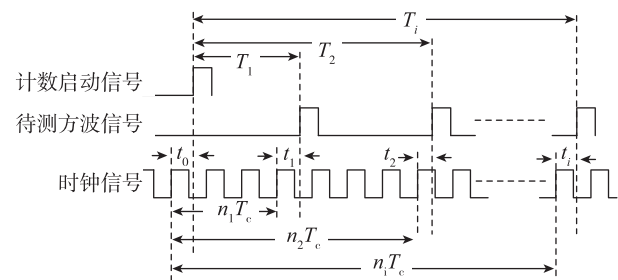


图 4 DSP 时间测量系统的量化误差的示意图
Fig. 4 Schematic of quantization error of the DSP time measurement system

故时间测量的量化误差即为

$$\Delta T_i = T'_i - T_i = t_0 - t_i \quad (6)$$

其中, t_0 的值仅由计数启动信号决定, 对于单次下落过程中的每个时间测量值 T'_i 都是一样的, 因此, 在单次下落过程中可以认作系统误差; t_i 的值是由每个捕获事件的上升沿时刻决定的, 其值对不同的 i 是不同的, 并且已知 t_i 是一个服从 $(0, T_c)$ 上均匀分布的随机变量。考虑到测量时间 T'_i 参与后续数据拟合的效果, 系统误差 t_0 可以忽略。这是因为加速度 g 是通过时间-位移数据对 (T'_i, S_i) 的二次拟合取二次项系数得到的, 每个 T'_i 项都含有相同的偏差 t_0 时, 对拟合出的二次项系数并没有影响。也就是说用 (T'_i, S_i) 和 $(T'_i - t_0, S_i)$ 拟合出的加速度应该是一样的。因此, 可以把量化误差(式(9))改写为

$$\Delta T_i = -t_i \quad (7)$$

实验中参考时钟频率为 $f_c = 150\text{MHz}$, 即时钟周期 $T_c = 6.67\text{ns}$ 。因此系统量化误差最大为 6.67ns 。

3.3 干涉条纹过零时间测量误差对重力值拟合的影响

系统测时量化误差量是一个服从均匀分布的随机变量, 区间长度为 6.67ns 。根据均匀分布的随机变量的统计特性, 其标准差是 $\sigma_T = 6.67/\sqrt{12} \approx 1.93\text{ns}$ 。

可以由式(8)计算因过零时间测量不确定度引起的位移测量不确定度^[16]。对于频率为 f 的正弦信号, 位移测量标准差为

$$\sigma_s = \sigma_T \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot f \quad (8)$$

式中, λ 表示干涉仪的激光波长。位移测量标准差与信号频率成正比。实验采用干涉条纹信号的频率是从 1MHz 到约 4.716MHz 线性增大, 相应的位移测量标准差也线性增大, 整个下落过程的位移测量标准差按频率中间值 $\bar{f} = 2.858\text{MHz}$ 估算

$$\sigma_s = \sigma_T \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \bar{f} \approx 1.74\text{nm} \quad (9)$$

拟合重力值的标准差用式(10)估算^[17]

$$\sigma_g \approx \eta \cdot \frac{12\sqrt{5}}{T_s^2} \cdot \frac{\sigma_s}{\sqrt{N}} \approx 4.61\mu\text{Gal} \quad (10)$$

式中, $T_s = 120\text{ms}$ 表示测量时间长度, $N = 7000$ 表示实际拟合的过零点数量。 η 是一个与测量开始时间、下落时间长度及拟合点数有关的系

数。对于本文实验参数, $\eta \approx 1.19$ 。由此推算得本测时系统理论的拟合重力值标准差约为 $4.61\mu\text{Gal}$ ($1\mu\text{Gal} = 1 \times 10^{-8} \text{m/s}^2 \approx 1 \times 10^{-9} g$)。

4 数值仿真

为了实际评估该基于 DSP 的事件时间测量系统的测量精度以及对重力测量的影响, 利用 MATLAB® 软件的 Simulink® 工具对该系统进行仿真。根据测量基本原理和硬件工作流程搭建仿真模型, 模型示意如图 5 所示。

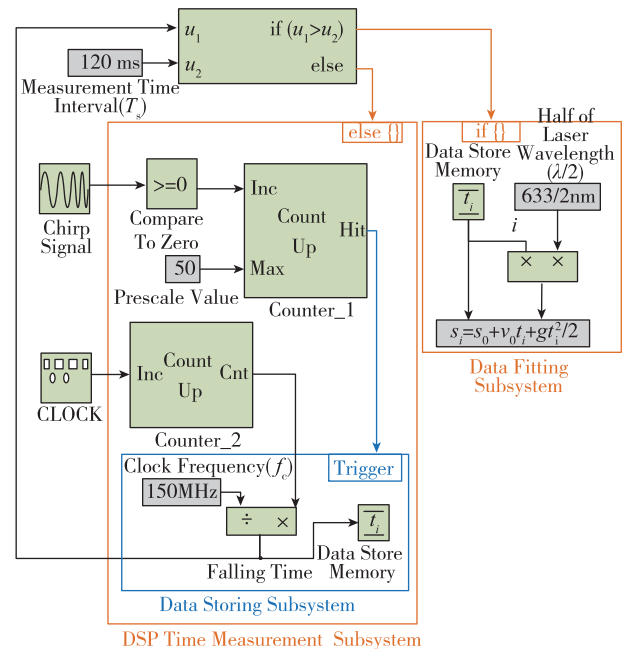


图 5 Simulink® 仿真模型示意图

Fig. 5 Schematic of the simulation model with Simulink®

其中, 在 Chirp Signal 模块中设置理想的正弦扫频信号, 模拟自由下落干涉条纹; Compare To Zero 模块模拟过零比较器; Clock 模块设置为 150MHz ; Counter_1 模块模拟 DSP 中 eCAP 通道的预分频功能; Counter_2 模块模拟 eCAP 通道的 32 位计数器。编写 MATLAB® 程序连续触发 100 组测量, 结果如图 6 所示。

图 6(a) 中, 横坐标 i 表示组数, 纵坐标中 g_i 表示第 i 组自由下落加速度测量值, g_{mean} 表示 100 组自由下落加速度测量值的均值, 故 $g_i - g_{\text{mean}}$ 表示第 i 组自由下落加速度的测量残差, 图形反映了测量值在均值附近的波动情况。图 6(b) 反映了测量残差 $g_i - g_{\text{mean}}$ 的分布情况, 近似服从正态分布规律。

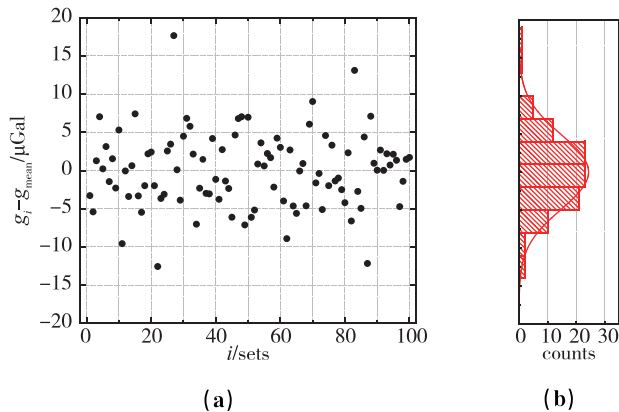


图6 数值仿真实验的典型结果:(a)连续100组自由下落加速度测量值及其(b)分布直方图

Fig. 6 A typical numerical simulation experiment result:

(a) 100 sets in a row of free-falling acceleration measurements and (b) distribution histogram of the measurements

经过统计计算,这100组自由下落加速度测量值的均值 $g_{\text{mean}} = 9.7999999719\text{m/s}^2$,与真值 $g_0 = 9.8\text{m/s}^2$ 偏差为 $-0.281\mu\text{Gal}$;测量残差的标准差为 $4.916\mu\text{Gal}$ 。并且通过多次实验反复验证,测量均值与真值偏差小于 $\pm 1\mu\text{Gal}$,标准差在 $5\mu\text{Gal}$ 以内,实验结果具有可重复性。

5 硬件实验

5.1 硬件模拟理想自由下落实验

如图7所示,配置函数波形发生器(b)(已和DSP锁在同一台铷原子钟(a)上)输出理想的正弦扫频信号,模拟理想的自由下落运动得到的干涉条纹信号。信号经过零比较器(c)后输入DSP测时系统(d)。测量数据传输至计算机(e),并用MATLAB®编写上位机程序,读取数据并拟合重力加速度值。连续触发100组同样的模拟下落实验,结果如图8所示。

图8的横、纵坐标意义与图6相同。从图8(b)中可以看出,测量残差 $g_i - g_{\text{mean}}$ 基本符合正态分布规律。统计计算得到这100组自由下落加速度测量值的均值 $g_{\text{mean}} = 9.7999999825\text{m/s}^2$,与真值 $g_0 = 9.8\text{m/s}^2$ 偏差为 $-0.175\mu\text{Gal}$;测量残差的标准差为 $4.377\mu\text{Gal}$ 。

多次实验反复验证,测量均值与真值偏差小于 $\pm 1\mu\text{Gal}$,标准差在 $5\mu\text{Gal}$ 以内。因此,上述结果具有可重复性。与软件仿真结果相比,模拟实验的结果符合得很好。

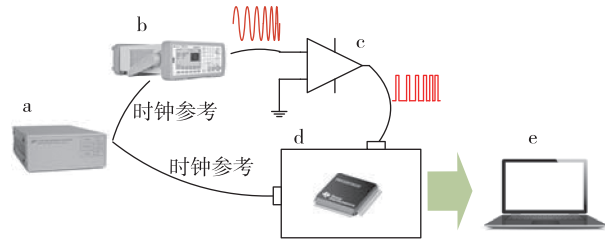


图7 硬件模拟理想自由下落实验装置图:

(a)铷原子钟;(b)函数波形发生器;(c)过零比较器;
(d)DSP事件时间测量系统;(e)计算机

Fig. 7 Set-up drawing of hardware simulated theoretical free-falling experiments: (a) rubidium clock; (b) function waveform generator; (c) zero-crossing comparator; (d) DSP event-time measurement system; (e) computer

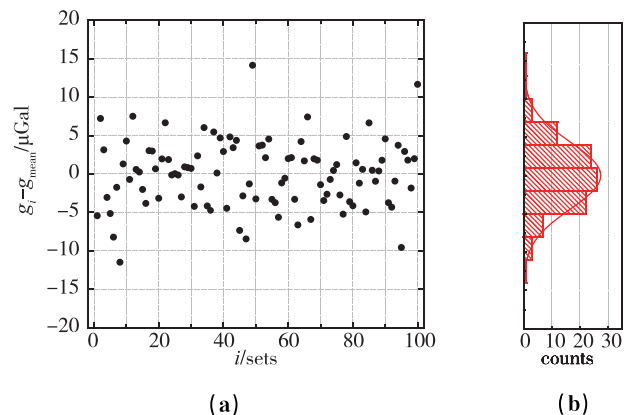


图8 硬件模拟理想自由下落实验的典型结果:

(a)函数波形发生器输出理想的自由下落干涉信号接入DSP测时系统所得连续100组自由下落加速度测量值及其(b)分布直方图

Fig. 8 A typical result of hardware simulated theoretical free-falling experiments: (a) 100 sets in a row of free-falling acceleration measurements and (b) distribution histogram of the measurements as the DSP time measurement system taking theoretical free-falling interference fringe signals generated by a function waveform generator as input

5.2 FG5对比测试实验

美国 Micro-g LaCoste 公司生产的 FG5 型绝对重力仪是目前世界上精度最高的绝对重力仪,厂家设计精度为 $(1\sim 2)\mu\text{Gal}$ 。中国计量科学院引进了 FG5X-249 绝对重力仪,该重力仪是采用 Guide Tech 公司生产的 GT668 型时间测量板卡获取干涉条纹过零时间信息的,时间测量精度达 2ps 。将本文阐述的基于 DSP 的事件时间测量系统应用在 FG5X-249 上进行测试实验,实验装置如图9所示。将 FG5X-249 的激光干涉信号同时输入其自带的时

间测量通道和 DSP 事件时间测量系统,连续触发 100 组自由下落实验,结果如图 10 所示。

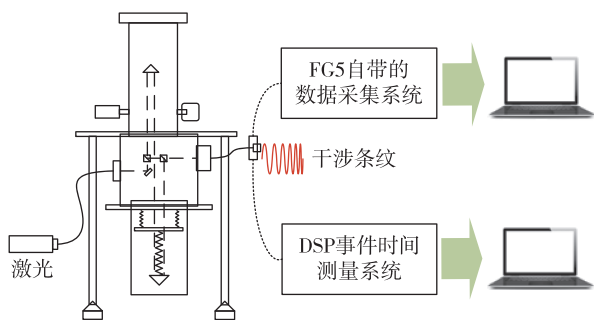


图 9 FG5 测试实验装置示意图
Fig. 9 Set-up drawing of experiments on FG5

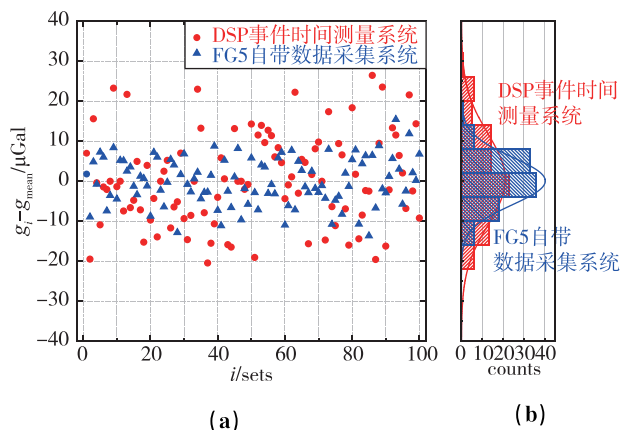


图 10 FG5 对比测试实验的典型结果:(a)FG5X-249 自带的数据采集系统(蓝)与 DSP 时间测量系统(红)同时连续测量 100 组自由下落加速度测量值及其(b)分布直方图

Fig. 10 A typical result of comparative experiments on FG5: (a) 100 sets in a row of free-falling acceleration measurements and (b) distribution histogram of the measurements with the built-in data acquisition system of FG5X-249 absolute gravimeter (blue) and the DSP time measurement system (red)

图 10 的横、纵坐标意义与图 6 相同。测量残差 $g_i - g_{mean}$ 基本符合正态分布规律。通过 FG5X-249 自带数据采集系统得到的重力测值残差标准差为 $\sigma_1 = 5.944\mu\text{Gal}$;而通过 DSP 时间测量系统得到的重力测值残差标准差为 $\sigma_2 = 11.371\mu\text{Gal}$,比前者增大了约 $5.4\mu\text{Gal}$ 。

假设 FG5X-249 除去干涉条纹过零时间测量环节以外的部分(包括但不限于下落腔、干涉仪、激光器、隔振等子系统)引入的测量标准差为 σ_0 ,并假设这个误差与条纹过零时间测量系统的误差互不相关,那

么根据相互独立的随机误差合成原理,FG5 自带的数据采集系统引入的测量标准差为 $\sigma_F = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_0^2}$,DSP 时间测量系统引入的测量标准差为 $\sigma_{\text{DSP}} = \sqrt{\sigma_2^2 - \sigma_0^2}$ 。以 FG5 自带的数据采集系统得到的重力测量结果为标准,认为 FG5 自带的数据采集系统引入的误差是很小的, $\sigma_F \approx 0$,那么 σ_0 与 σ_1 近似相等,从而 $\sigma_{\text{DSP}} \approx \sqrt{\sigma_2^2 - \sigma_1^2} = 9.694\mu\text{Gal}$ 。

根据前文所述,硬件模拟理想自由下落实验(图 8)、数值仿真(图 6)的结果与理论计算(式(14))符合得很好,因而可以确定对于理想条纹信号,该 DSP 事件时间测量系统对重力加速度测值的标准差影响在 $5\mu\text{Gal}$ 以下。这与 FG5 对比测试实验得到的 $9.694\mu\text{Gal}$ 有一定的偏差。这个偏差可能来源于实际自由下落产生的干涉条纹信号并非理想的扫频信号。FG5 采用 GT668 型时间测量板卡测量干涉条纹过零时间,测时精度可达 2ps,而 DSP 方案的测时精度为 6.8ns,相对较低,可能会因为条纹信号不理想引入相对较大的测量不确定度。

6 总结

本文针对绝对重力测量的应用,依托电子计数器原理设计实现了一种基于 DSP 的事件时间测量系统,精确测量落体自由下落产生的激光干涉条纹信号的过零时间。根据理论计算、数值仿真以及硬件模拟实验,表明系统测时误差小于 6.8ns;对于理想的干涉条纹信号,系统对重力加速度测量真值的影响小于 $1\mu\text{Gal}$,标准差影响小于 $5\mu\text{Gal}$ 。系统也在 FG5 型高精度绝对重力仪上实现了应用,对重力加速度测量的标准差影响小于 $10\mu\text{Gal}$ 。利用该测时系统测量一次自由落体运动的过程,从落体开始下落到计算出重力加速度值,耗时不超过 1.3s。可见针对快速小型化绝对重力仪的应用,系统已经完全满足测量精度和速度的指标要求。并且测时功能都在一片 DSP 芯片上完成,相较于现有的绝对重力仪的时间测量技术,结构简单,功耗低,适应性强,极大缩小仪器体积,显著降低实现成本。

基于本文设计实现的时间测量系统,结合 DSP 强大的数字运算能力,未来还可以将绝对重力仪的更多功能移植到 DSP 上实现,例如对时间-位移数据的拟合计算、真空自由落体装置中电机的运动控制等。再加上相应的显示部件,就能够脱离 PC 完成绝对重力测量,进一步缩小体积、降低成本。另外,从误差分析可见系统测时误差主要来源于量化

误差,因此可以使用性能更加优越、主频更高的 DSP 芯片,通过提高时钟频率的方法来提高时间测量的精度,从而满足更高精度的重力测量的要求。

致谢 对中国计量科学院吴书清副研究员、冯金扬助理研究员在 FG5 对比测试实验中提供的支持与帮助表示由衷的感谢!

参考文献

- [1] 王谦身. 重力学[M]. 北京:地震出版社, 2003.
- [2] 张延, 黄佩诚. 高精度时间间隔测量技术与方法[J]. 天文学进展, 2006, 24(1): 1-15.
- [3] 孙杰, 潘继飞. 高精度时间间隔测量方法综述[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(2): 145-148.
- [4] 李孝辉, 杨旭海, 刘娅, 等. 时间频率信号的精密测量[M]. 北京:科学出版社, 2010.
- [5] 施智勇, 潘晓声, 张谦. 利用延时法进行高精度脉冲激光测距[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 252-258.
- [6] 宋建辉, 袁峰, 丁振良. 脉冲激光测距中高精度时间间隔的测量[J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 1046-1050.
- [7] 冯志辉, 刘恩海. 用于激光测距的高精度时间数字转换电路[J]. 光学精密工程, 2010, 18(12): 2665-2671.
- [8] 陈骥, 赵晓明, 曹久大, 等. 高速运动测量机的研制与试验[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 928-934.
- [9] Niebauer T M, Sasagawa G S, Faller J E, et al. A new generation of absolute gravimeters [J]. Metrologia, 1995, 32(3): 159-180.
- [10] 张为民, 王晓兵, 叶文蔚, 等. 事件计时器在小型快速绝对重力仪中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(1): 149-151.
- [11] 王荣, 郭唐永, 邹彤, 等. TDC502 时间测量在绝对重力仪中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(S2): 74-77.
- [12] Svitlov S, MasLyk P, Rothleitner C, et al. Comparison of three digital fringe signal processing methods in a ballistic free-fall absolute gravimeter [J]. Metrologia, 2010, 47(6): 677-689.
- [13] 吴书清, 葛春雨, 刘达伦, 等. 基于 FPGA 的重力仪干涉条纹和时间间隔计数[J]. 计量学报, 2010, 31(6): 530-532.
- [14] 胡华, 伍康, 申磊, 等. 新型高精度绝对重力仪[J]. 物理学报, 2012, 61(9): 542-549.
- [15] 吴守贤, 漆贯荣, 边玉敬. 时间测量[M]. 北京:科学出版社, 1983.
- [16] Svitlov S, Rothleitner C, Wang L J. Accuracy assessment of the two-sample zero-crossing detection in a sinusoidal signal [J]. Metrologia, 2012, 40(4): 413-424.
- [17] Svetlov S M. An absolute gravimeter and vibration disturbances: A frequency responses method [M]. Gravity, Geoid and Marine Geodesy. Springer Berlin Heidelberg, 1997: 47-54.