

基于 DDS 技术的航空重力仪电容测微正弦激励源设计^{*1}

李文萍^{1,2)} 柳林涛¹⁾ 吴鹏飞¹⁾

(¹⁾中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量学重点实验室,武汉 430077)
(²⁾中国科学院大学,北京 100049)

摘 要 介绍基于直接数字合成技术(DDS)研制的正弦激励源系统工作原理,运用 matlab-simulink 仿真模块仿真正弦激励源数据,结果表明,幅值稳定性可达到 $10^{-6} \sim 10^{-7}$,频率稳定性达到 10^{-4} ,该系统能解决以往正弦电路中幅值稳定性和高频时频率稳定度差的问题,提高航空重力仪的观测精度。

关键词 航空重力系统;电容测微;直接数字合成;正弦激励源;稳定度

中图分类号:P223⁺.4

文献标识码:A

RESEARCH ON SINUSOIDAL EXCITATION SOURCE OF CAPACITIVE MICROMETER FOR AIRBORNE GRAVITY MEASUREMENT SYSTEM BASED ON DDS TECHNOLOGY

Li Wenping^{1,2)}, Liu Lintao¹⁾ and Wu Pengfei¹⁾

(¹⁾ Key Laboratory of Dynamic Geodesy, Institute of Geodesy and Geophysics, CAS, Wuhan 430077)
(²⁾ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract The principle of sinusoidal excitation source system developed with direct digital synthesis (DDS) technology is systematically introduced and established by using simulation module of matlab-simulink. The simulation results show that amplitude stability and high frequency stability problems of the past sine circuits are basically resolved by improved to $10^{-6} - 10^{-7}$ and 10^{-4} , respectively. Moreover, the precision of gravimeter has been increased.

Key words: airborne gravity measurement system; capacitive micrometer; Direct Digital; Synthesis (DDS); sinusoidal excitation source; stability

1 引言

航空重力仪在资源勘探、军事、大地测量与地球物理等领域有重要应用。其测量原理基于牛顿第二定律,采用一根垂直悬挂的零长弹簧秤,使用高精度电容式微位移传感器来测量重力变化所引起弹簧长度的微小变化,并将位移信号转换成电信号,最终换

算成重力信号。电容测微电路采用运算放大器及二极管构成的模拟电路来产生稳幅振荡激励源,这种方法幅值稳定性不高,频率稳定性也不够,尤其是在高频时,不能满足高精度测量的要求。稳幅振荡器输出的交流信号用于调幅载波,其幅值变动对于仪器来说属于一次误差^[1]。模拟电路的采用限制了稳定性的进一步提高^[2]。直接数字合成(DDS)

* 收稿日期:2013-04-09

基金项目:国家重大科学仪器设备研制专项“海洋/航空重力仪研制”(2011YQ120045)

作者简介:李文萍,女,1984年生,硕士,研究方向为重力仪电容测微系统. E-mail: ping320@126.com

在信号合成领域引入先进的数字处理理论与方法,相对带宽宽、频率分辨率高、输出相位连续、可编程、全数字化、控制灵活方便,在航空重力仪的信号源提供方面具有优势^[3]。

2 电容式微位移传感器

航空重力仪是非助动重力仪,重力变化引起的质量位移很小。航空重力仪采用高度精确、稳定的电容传感器并结合力平衡反馈系统完成此部分功能。其位移分辨力约为 $10^{-4} \mu\text{m}$, 小于 $0.01 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$, 最大线性输出 10 V , 相当于 $10\,000 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$, 可以满足全球测量之用。为了获得高精度, 须使用高分辨率的检测系统来测量长度的微小变化。高精度电容位移传感器具有灵敏度高、精度高、长期稳定性好、性能可靠等优点, 能够精确测量到弹簧因重力变化而引起的长度微小位移, 同时电路系统将位移信号转换成电信号, 经过一系列放大、滤波、检波等处理, 通过外部输出设备, 以模拟或数字的形式显示、记录和处理观测数据(图1)。

在电容测微传感器中, 采用三片式差动位移传感器, 它由三块金属板组成, 中间为活动板, 两边为固定板(图2)。

金属板之间的电位差与其间距成正比:

$$C_1 = C_0 \frac{1}{1 - \Delta d/d_0} \tag{1}$$

$$C_2 = C_0 \frac{1}{1 + \Delta d/d_0} \tag{2}$$

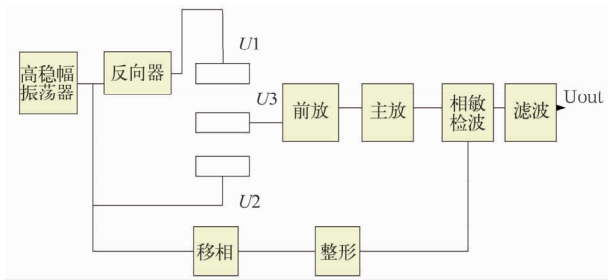


图1 电容测微系统框图

Fig.1 Sketch of capacitive micrometer system

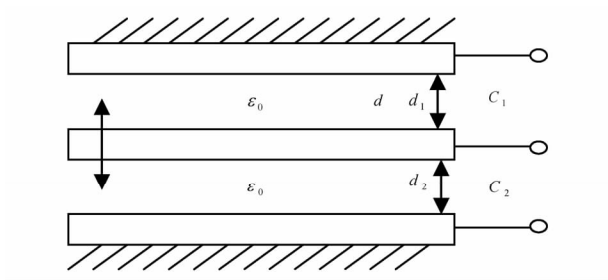


图2 差动平板电容传感器结构图

Fig.2 Structure chart of differential capacitive plate capacitive sensor

在 $\Delta d/d_0 \ll 1$ 时, 按泰勒级数展开得

$$C_1 = C_0 \left[1 + \frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + \dots \right] \tag{3}$$

$$C_2 = C_0 \left[1 + \frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 - \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + \dots \right] \tag{4}$$

电容值总变化量为

$$\Delta C = C_1 - C_2 = 2C_0 \left[\frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^5 + \dots \right] \tag{5}$$

其中 Δd 为活动板偏离零位的距离, d_0 为间距 d_1 和 d_2 的平均值 $d_0 = (d_1 + d_2)/2$ 。可以看出: 偏离零位的距离 Δd 与传感器输出电压成正比, 故由传感器输出电压可以求出动板与零位的距离。要求给差动电容位移传感器施加一对幅值和频率相等、相位相反的正弦波信号 U_1 和 U_2 。为了保证电容测微器的测量精度, U_1 和 U_2 的幅值须严格相等且稳定。振荡器幅值的变化以及 U_1 和 U_2 之间幅值的相对变化都会对测量精度产生影响。

$$U_3 = \frac{\Delta d}{d}, U_2 = \frac{\Delta U}{2} \left(1 + \frac{\Delta d}{d} \right) \tag{6}$$

U_3 为活动板受固定板电场感应所产生的电位。可见, 当 U_1 和 U_2 之间存在幅值差值 ΔU 时, 活动板在零位时输出电压为 $\Delta U/2$ 。活动板上测量误差 E_3 为

$$E_3 = \frac{\Delta U}{2} \left(1 + \frac{\Delta d}{d} \right) \tag{7}$$

量程-精度比是电容测微传感器的重要指标之一。若要求差动电容位移传感器在测量范围内测量精度达到 0.1% , 则 U_1 和 U_2 的幅值稳定性须高于 0.1% 。因此, $\Delta U/U_2$ 应比 $\Delta d_{\text{MAX}}/d$ 小 $2 \sim 3$ 个数量级, 为 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 。可见, 差动电容位移传感器要求有高质量的激励信号。振荡器的幅度变化、放大器的增益变化对测量精度产生影响, 从而对振荡器的幅度稳定度、放大器的增益稳定性以及反相器的性能指标提出要求。

若要求电容测微器精度为 $0.001 \mu\text{m}$, 量程为 $1 \mu\text{m}$, 则量程-精度比为 $100:1$, 故振荡器的幅度稳定性和放大器的增益稳定性须优于 $1/100$ 。另外, 由于要求电容测微器精度为 $0.001 \mu\text{m}$, 电容板之间的间距为 0.25 mm , 则要求反相器输入输出电压之间比值的变化小于 3×10^{-6} 。

3 直接数字频率合成技术(DDS)

传统的模拟电路产生的载波信号幅值和频率稳定性低。为了获取高精度的海洋航空重力仪电容测微系统, 需采用更高稳定度的激励源。实验证明,

DDS 方法可以克服载波信号幅值和频率稳定性低及谐波失真大、系统线性差等不足,提高调幅式电容传感器精密测量系统的精度。基于直接数字频率合成技术(DDS)的正弦波发生器与传统振荡电路相比最大优点是:能有效地抑制幅值振荡、影响最严重的二次、三次等谐波的干扰,更高次的谐波幅值较小,可以通过滤波器基本滤除。采用 DDS 原理生成幅值、频率稳定性高的载波信号,其基本原理如图 3 所示。

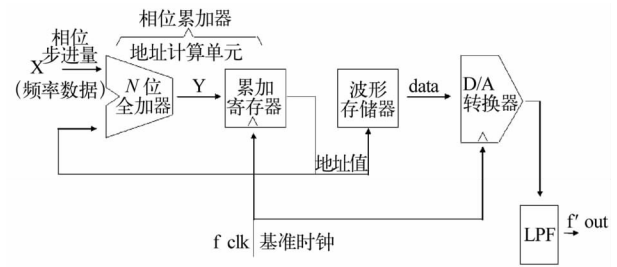


图 3 直接数字合成技术的基本原理框图
Fig. 3 Basic principle of DDS technology

DDS 以数控振荡器的方式产生频率、相位可控的正弦波。电路包括基准时钟、频率累加器、相位累加器、幅度/相位转换电路、D/A 转换器和低通滤波器(LPF)。频率累加器对输入信号进行累加运算,产生频率控制数据 K (frequency data 或相位步进量)。相位累加器由 N 位全加器和 N 位累加寄存器级联而成,对代表频率的 2 进制码进行累加运算,产生累加结果 Y 。幅度/相位转换电路实质是一个波形寄存器,供查表使用。读出的数据送入 D/A 转换器和低通滤波器^[4]。

DDS 输出信号频率 F_{out} 与时钟脉冲频率 F_{clk} 、累加器位数 N 以及频率控制字 K 的关系如下:

$$F_{out} = KF_{clk}/2^N \tag{8}$$

可见,通过设定相位累加器位数、频率控制字 X 和基准时钟的值,可产生任意频率的输出。

DDS 的频率分辨率为: $\Delta f = F_{clk}/2^N$ 。

由于基准时钟一般是固定的,因此,相位累加器的位数决定频率分辨率。本次仿真实验中,相位累加器为 16 位,分辨率可认为是 16 位。位数越多,分辨率越高。

4 仿真条件和仿真

在 simulink 的 DDS 系统模型(图 4)中,用 sources 模块中的 plus generator 来产生时钟频率输入 fclk,时钟信号的频率、幅度均可调。频率控制字 K 采用 constant 模块。信号显示使用 sinks 的 scope 模块。相位累加器模块由 triggered subsystem, sum, math function, unit delay 模块组成。其工作机理为每遇到一个时钟上升沿,触发器 trigger 向加法器

sum 中输入一个频率控制字 K , sum 将其与累加器的输出求和。mod 模块用来设置加法器位数,使其完成 N 位相加后高位溢出,同时加法器输出由 unit delay 返回输入端,实现累加功能^[5]。

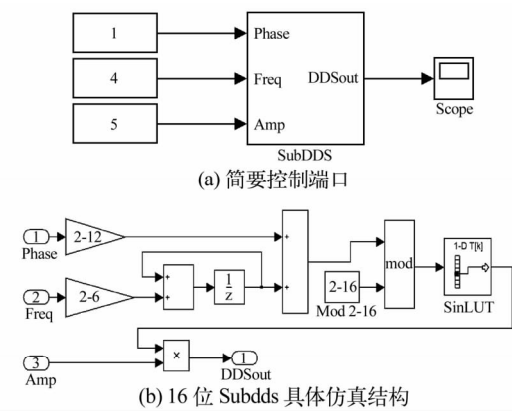


图 4 直接数字仿真模型
Fig. 4 Simulink model of DDS

5 Simulink 仿真实验与结果分析

为验证 DDS 方法设计的正弦激励源是否满足航空重力仪电容测微系统的要求,仿真时取参数如下:输入频率 $f_{clk} = 10 \text{ MHz}$, 频率控制字 $K = 4$, 存储器位数 N 为 16 位。

如图 5 所示,实线为 U_1 ,虚线为其反相输入 U_2 。由数据分析得到,经 DDS 模型的 Simulink 仿真出的正弦信号,其幅值稳定性达到 $10^{-6} \sim 10^{-7}$, 频率稳定性为 0.000 1 Hz,能够满足航空重力仪中的电容测微系统精度要求。实验结果也证实了这一点,所得图形及数据与仿真结果十分符合(图 6)。

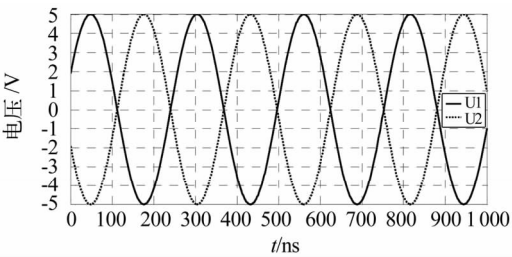


图 5 仿真结果
Fig. 5 Simulation results of simulink

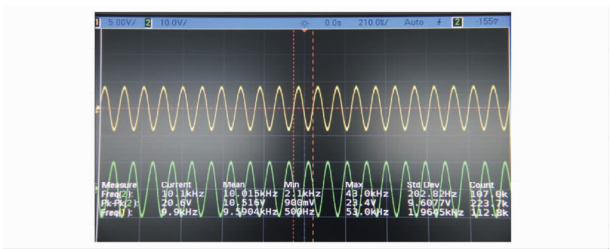


图 6 实际电路中示波器显示结果
Fig. 6 Results of real circuit showed by oscilloscope

6 结语

基于 DDS 技术设计的正弦激励源,其信号具有较高的频率稳定性和幅值稳定性。输出频率范围为 30 ~ 100 MHz,频率稳定度优于 10^{-4} ,幅度范围为 50 mV ~ 12 V,输出正弦波幅值稳定性达到 10^{-6} ~ 10^{-7} 。同时电路能实现精准移相,避免模拟移相电路带来的误差。滤波器和增益控制可用数字方法实现,使系统误差降到最低。该正弦激励源波形平滑稳定,能满足电容测微系统的精度需求,改善系统性能指标,实现系统的有效开发。

(上接第 79 页)

向,刀片位于焦点之前时,刀片从左向右移动时,亮斑从右往左逐渐消失;当刀片位于焦点之前时,亮斑从左往右逐渐消失;当刀口恰位于焦点处时,亮斑会立刻消失。利用逐次逼近不断调整刀片和光阑所在的导轨的位置,即可沿光轴方向将光阑位置调整好。

3.2 垂直光轴方向的安装

光阑垂直方向的安装,采用边观测卫星边调整的方法。首先将光阑开到最大,边移动边缩小光阑,并观察观测界面,使从卫星返回的激光脉冲一直能通过光阑,进入 C-SPAD。一旦信号消失,通过移动光阑,使信号重新被接收。逐步缩小,最终光阑开到最小时,仍旧有有效的光信号返回,则光阑中心与系统焦点完全重合。

4 试验结果

采用 0.5 mm 直径的视场光阑实现空间滤波,1.5 埃带宽的窄带滤光片实现频率滤波,距离门(基于 FPGA 技术,分辨力达到 2 ns)实现时间滤波,以及完善系统的跟踪指向能力,流动 SLR 系统 TROS1000 实现了晨昏、正午时段,对高、中、低轨道高度各类卫星的白天测距。图 3 给出 2012 年 12 月 6 日对 LAGEOS 卫星的白天观测数据,观测时长 22 分钟,经内符合的有效观测点数为 1 876 个。

参 考 文 献

- 1 胡国庆,蔡亚先. 一种高精度电容测微器[J]. 大地测量与地球动力学,1986,(3):255 - 260.
- 2 赵树忠,郑义忠. 改进电容测微仪稳定性的技术措施[J]. 中国测试技术,2003,(5):7 - 9.
- 3 师树恒,王斌,朱健强. 高精度电容式位移传感器关键技术的研究[J]. 仪表技术与传感器,2007,(7):1 - 3.
- 4 贾晓斌,刘四新,贾海亮. 基于 DDS 的椭圆函数低通滤波器设计[J]. 电子工程设计,2010,18(9):171 - 173.
- 5 王锦,柳林涛. 基于 matlab-simulink 的航空重力仪陀螺稳定平台仿真[J]. 大地测量与地球动力学,2011,(3):145 - 149.

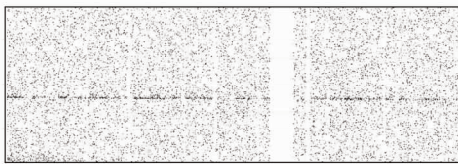


图 3 LAGEOS 卫星白天观测数据

Fig. 3 Daytime observations of LAGEOS satellite

5 结论

通过分析白天天空背景噪声对观测成功率的影响,给出应用于卫星激光测距的空间滤波安装和调试过程。利用“刀口阴影法”可以快速有效的完成空间滤波光阑的安装,观测表明,其可将 TROS1000 的激光接收角从 80 角秒减小为 15 角秒,大大抑制了天空背景噪声的影响。

参 考 文 献

- 1 杨福民,等. 白天卫星激光测距系统的设计和实测结果[J]. 中国科学,1998,28(11):1 048 - 1 056.
- 2 郭唐永,等. 高重复频率卫星激光测距的实测结果[J]. 大地测量与地球动力学,2008,(6):137 - 138.
- 3 苏大图. 光学测试技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2001.