

# 手持宽带数字存储示波器的设计与实现

胡斌强, 苏绍璟, 王跃科

(国防科学技术大学 仪器科学与技术系, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 针对野外作业和生产现场测试需要, 提出了一种手持宽带存储数字示波器的设计与实现方案, 采用可编程宽带信号调理技术实现了 200MHz 的信号模拟通道设计和高速触发模块设计; 采用多通道并列技术实现了 200MSps 的实时采样, 采用基于参量模型的等效采样技术实现了 10GSps 的等效采样; 采用多任务软件技术实现对系统的管理和人机交互。采用可充电的锂电池给系统供电实现了示波器的便携和在无交流电环境下的测试; 测试证明, 该手持宽带存储数字示波器具有良好性能和广阔的应用前景。

**关键词:** 数字存储示波器; 宽带信号调理; 实时采样; 等效采样

## Design and Implementation of a Hand-held Wide Bandwidth Digital Storage Oscilloscope

Hu Binqiang, Su Shaojing, Wang Yueke

(Department of Instrumental Science and Technology, NUDT, Changsha 410073, China)

**Abstract:** An design of wide bandwidth hand-held digital storage oscilloscope is invented to meet the need of the measurement in the field engineering. The programmed wide bandwidth signal conditioning technique is used to realize the 200MHz analog signal channel and the trigger circuit. The interleaving/multiplexing technique is adopted to realize a 200MS/s real-time data acquisition system. The equivalent time sampling method based on parametric model estimation is used to realize 10GSps equivalent time sampling. The multitask system technique is adopted to realize the management of the oscilloscope and the man-machine conversation. The rechargeable lithium battery is used in the oscilloscope to make it more portable, so that the oscilloscope can be used in the fields without alternating current. It was tested that The wide bandwidth hand-held digital storage oscilloscope has good performance and can be used in many fields.

**Key words:** digital storage oscilloscope; wide bandwidth signal conditioning; real-time data acquisition; equivalent time sampling

### 0 引言

随着信息化时代的到来, 各种电子设备的应用日益广泛, 而且各种电子设备越来越复杂。电子设备的研制与维修保障对电子测试设备提出了更高的要求。作为传统通用电子测试设备的示波器也顺应技术发展需求发展迅速。当前, 数字存储示波器 (Digital Storage Oscilloscope) 技术已经成为示波器设计的主流。DSO 的基本思想就是通过先进的数字化测试技术, 高速采样或高精度模数变换, 将信号波形数字化, 然后对数字结果进行存储、处理并显示。DSO 在波形的记录、分析和比较方面, 都比传统的模拟示波器有很大的改进<sup>[1-2]</sup>。

数字存储示波器已经得到了很好的应用和发展, 随着数字化测试技术朝着高速度、高精度、高集成度、低功耗方向的迅速发展。为适应野外作业和生产现场测试需要, 急需研制高性能的手持宽带数字存储示波器<sup>[3]</sup>。作者研制了一种模拟带宽 200 MHz, 实时采样率 200 MSps, 等效采样率 10 GSps 的手持宽带数字存储示波器。手持宽带数字存储示波器的总体结构框架如图 1 所示。手持宽带数字存储示波器主要由数据采集与

处理系统、信号调理模块与触发模块、监控软件系统与人机交互模块、电源模块组成。

### 1 信号调理模块和触发模块设计

#### 1.1 信号调理模块设计

信号调理模块是数字存储示波器的前端信号模拟通道, 主要用来实现对被测模拟信号的衰减、放大和抗混叠滤波, 以保证将被测模拟信号调理到数据采集系统的有效输入范围。要保证信号调理模块在 0 Hz~200 MHz 的整个带宽具有良好的频响特性, 对模拟电路的设计要求很高。我们设计了程控宽带信号调理模块。

程控宽带信号调理模块由高阻输入无源衰减网络、宽带放大/衰减器、抗混叠滤波器组成, 并且在本模块中要插入耦合方式、带宽限制、移位等可实现程控调理电路。程控宽带信号调理模块的原理如图 2 所示。

#### 1.1.1 高阻输入无源衰减网络

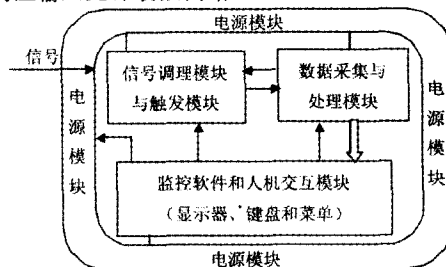


图1 手持宽带数字存储示波器的总体结构框架

收稿日期:2005-12-10; 修回日期:2005-01-09。

基金项目:国防科技大学人才基金资助项目(2006030301)。

作者简介:胡斌强(1978-),男,陕西省宝鸡市人,博士研究生,主要从事数字化测试技术方向的研究。

王跃科(1957-),男,河南灵宝人,工学博士,教授,博士生导师、国务院学位评定委员会专家组成员、仪器仪表学会理事,主要从事数字化测试技术和通信技术的研究。

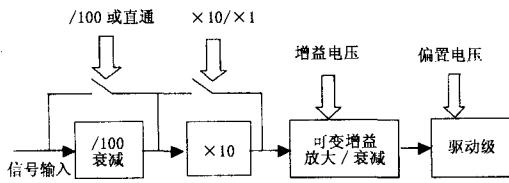


图 2 程控宽带信号调理模块原理图

选择磁保持式继电器开关切换无源衰减器，衰减倍率设置为 1/100。磁保持式继电器开关在吸合时消耗的电流不到普通继电器的一半，很适合在功耗要求高的手持式仪器中使用。

将高阻输入无源衰减网络设计成一级衰减，有利于减小通道输入电容，拟采用单刀结构，用两只继电器设置在网络的两端同步切换，达到提高隔离度的目的。

### 1.1.2 宽带放大/衰减器

为了满足系统对信号调理要求，宽带放大/衰减分为三级，分别是前置放大级、可变增益放大/衰减级和驱动放大级。由前置放大级的放大倍率固定，可变增益放大/衰减级的控制通过串行数模转换器 (Digital-to-Analog Converter, DAC) 由 DSP 控制，输出驱动级加入直流馈入，调整直流偏置电压。

### 1.1.3 抗混叠滤波器

在宽带 DSO 中，为了防止混叠现象的出现，正确地复现波形，通道中需要设置抗混叠滤波器，即滤波器应该具有截止频率特性。我们选用椭圆滤波器完成波形的滤波。

### 1.2 触发模块

“触发”用于提供被测信号的时间测量触发参考点。由“触发信号调节”、“触发比较器”、“触发抑制”和“主触发器”组成。触发系统示意图如图 3 所示。

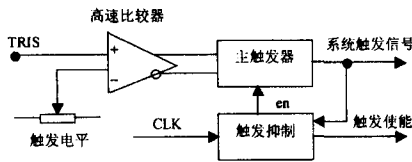


图 3 触发电路示意图

## 2 数据采集与处理系统设计

数据采集与处理模块是手持宽带数字存储示波器的核心模块。数据采集与处理模块要实现采样率 200 MSps，等效采样率 10 GSps 的数据采集。

### 2.1 200 MSps 超高速实时数据采集系统设计

高速模数转换器 (Analog-to-Digital Converter, ADC) 是数据采集的关键电路，它完成模拟信号到数字信号的转换，是一个“桥梁”。它的精度、速度指标决定了仪器的主要指标，因此选择、设计合适的高速 ADC 系统成为仪器设计的中中之重。手持宽带数字存储示波表要求宽带、小体积。便携式仪器由电池供电，要求选用低功耗的器件。而大多数的高速器件都是高耗电的。在众多的 ADC 器件中，低功耗的器件选择的余地相当小，这些必然给器件选型和系统结构设计带来困难。综合考虑 ADC 器件的速度、功耗、体积、成本等因素，选用了 AD9283，采用多通道并列技术实现 200 MSps 的超高速实时采样<sup>[4]</sup>。

AD9283 是一个 8 位的单片集成采样模数转换器，内置低成本、低功耗、易于使用的采样电路。它可以工作在 100 MSps 的转换率，在整个工作范围内都有很好的动态性能。它

的模拟带宽为 475 MHz，功耗为 90 mW，参考源为内部 +1.25 V 基准电压或外接标准源，由 +3.0 V 单电源供电。利用多个 ADC，采用前端并行逐次采样，后端串行多路复用，从而大大提高了整个系统的速度。每个通道采用两片 AD9283 差拍并行采样：两个 ADC 同时工作在 100 MHz，一个在时钟的上升沿采样，采样样本点 1、3、5、7、9、…；另一个在时钟的下降沿采样，即在负时钟的上升沿采样，采样样本点 2、4、6、8、…。样本点 1、2、3、4、5、6、7、8、9、… 构成一个 200MSps 的采样序列。实现了 200MSps 的实时采样率。原理如图 4 所示。两个通道共用 4 个 AD9283，总功耗 360 mW。AD9283 的价格较低，满足了低功耗、低成本的要求。

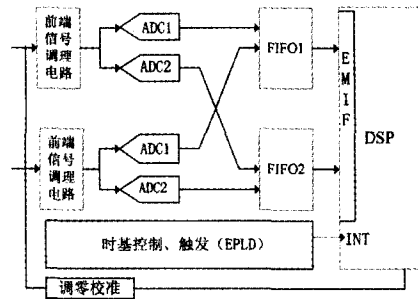


图 4 AD9283 并行实时数据采集设计原理框图

由于采用 200MSps 转换速率的 ADC，采样时钟的相位相对于 DSP 读时钟是不断变化的，所以从 ADC 高速输出的数据需要进行缓存。而 FIFO 可以消除存取频率、相位之间的不匹配因素，保证数据传输的可靠性。鉴于采样速率较高，ADC 的采样数据以并行方式流入 FIFO 入口，而 DSP 通过 EMIF 的并行端口与 FIFO 出口相连，可以消除高速采集时的非同步效应。并且结合 DSP 中 EMIF 口的同步 DMA 功能，FIFO 中的数据以 100MHz 的速率同步流入 DSP 的片内存储器，而无需软件的干预。

### 2.2 0GSps 等效采样的实现

手持宽带存储示波器采用基于参量模型估计的周期信号等效采样方法。对模拟的带限周期信号进行三轮采样获得三组欠采样数据序列，对欠采样数据序列由运行在 DSP 中的基于参量模型的等效采样算法软件进行处理，估计出信号的真实参数，根据信号模型直接重构出信号波形<sup>[5]</sup>。

## 3 监控软件设计

监控软件实现数字存储示波器信号采集参数控制、波形数据采集、波形参数的测量、波形数据的后续处理、显示驱动、数据通信，并为用户提供友好的便于操作的人机交互界面。

监控软件采用多任务实时操作系统技术，很好的解决了任务多和实时控制的矛盾。针对数字存储示波器的功能其任务划分数据流程图如图 5。程序由三个任务组成：按键处理，波形显示，数据采集、处理。

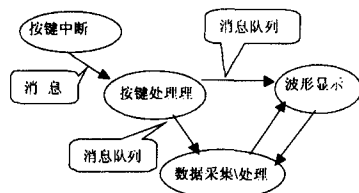


图 5 数字存储示波器监控软件数据流程图

#### 4 具有锂电池充电功能的电源设计

系统的供电电池选用定制的 10A. H 大容量锂电池, 它的输出电压为 3.7 伏, 最大输出电流为 2A。现成的锂电池没有如此大容量的, 我们选用的这款定制电池实际上是多个锂电池内核并联而成的。对锂电池的充电有严格要求, 本项目选用美国美信公司的专用芯片制作充电电路, 同时要求电池供应商在电池模块中内置过充和过放保护电路。在电源电路的设计中, 我们遵从选用体积小、效率高的电源变换芯片这一原则。

#### 5 结论

作者研制的手持宽带数字存储示波器具有体积小、便于

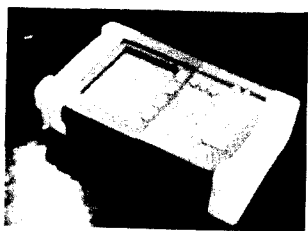


图 6 手持宽带数字存储示波器的外观图

(上接第 1388 页)

其中  $T_s$  为采样周期。在考虑其影响时将其近似为:

$$G_{ZOH}(S) \approx \frac{1}{\left(1 + \frac{T_s}{2}S\right)} \quad (4)$$

由 (4) 式可见, 数字实现时系统实际上不仅在幅频特性上增加了一个转折点, 而且还会引入一个相位滞后:

$$\Delta P_M = \tan^{-1} \frac{\omega T_s}{2} \approx \frac{\omega T_s}{2} \text{ rad} \quad (5)$$

系统设计时选择采样频率为  $T_s = 0.2 \text{ ms}$ , 可见其对系统的影响主要在高频处。当系统剪切频率为 400 Hz 时, 零阶保持器引入的相位滞后为  $\Delta P_M \approx 2.292^\circ$ , 校正网络无须重新设计。

加入零阶保持器前、后校正网络的 Bode 图如图 4 所示:

对上述设计的校正网络进行离散化处理, 考虑到离散系统的稳定性以及算法的简单性, 采用双线性变换。离散化得:

$$G(z) = \frac{5.336z^4 - 20.49z^3 + 29.5z^2 - 18.86z + 4.52}{z^4 - 3.708z^3 + 5.204z^2 - 3.278z + 0.7824}$$

由图 5 可以看出其幅频特性与原校正网络拟合很好。

对于  $G(z)$  形式的四阶算法, 其实现类似于普通的 IIR

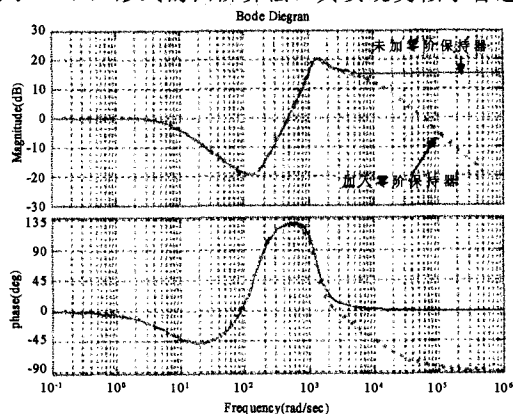


图 4 校正网络 Bode 图

携带、电池供电, 使它能在没有交流电源的现场完成时域多参量测量。手持宽带数字存储示波器的外观如图 5 所示。经测试, 手持宽带数字存储示波器垂直分辨率 8 bits, 带宽 200 MHz, 垂直灵敏度范围 5 mV/div~50 V/div, 最大输入电压 400 Vpp, 幅度线性误差小于 5%; 通道隔离度优于 40:1。最大实时采样速率 200 MSps, 最高水平分辨率 4 ns; 最大等效采样速率 10 GSps, 最高水平分辨率 0.1 ns。存储深度可达到每通道 32 Kb。重量只有约 2 Kg, 实现了便携的目的。该手持宽带数字存储示波器于国内领先水平。

#### 参考文献:

- [1] 张乃国. 新型电子示波器 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1990.
- [2] 马杨云, 牟方锐, 王章瑞. 100MHz 虚拟示波器数据采集卡的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2003, 11 (12): 983-985.
- [3] 陈光禹. 现代电子测试技术—信息装备的质量卫士 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [4] 沈兰荪. 高速数据采集系统的原理与应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1995.
- [5] Hu Binqiang. A New Method to Realize 5GS/s Equivalent Time Sampling [C]. Proc. of 5th International Symposium on Test and Measurement, Shenzhen: ISTM. 2003, 603-606.

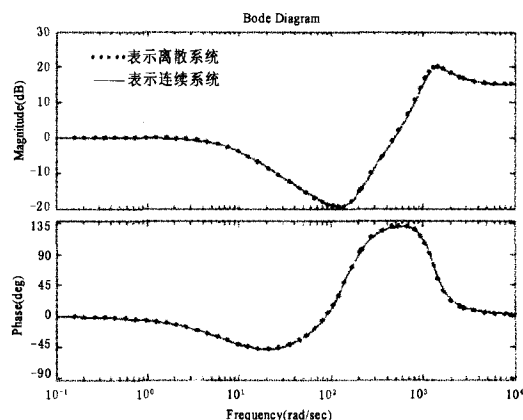


图 5 离散系统拟合曲线

滤波器, 调用 IIR 滤波器程序即可。完成上述算法所需时间为 11  $\mu\text{s}$ , 确保了系统的实时性。此外, 可以应用自适应控制、最优控制等现代控制理论对系统进行复杂的动态补偿。

#### 4 结论

本文主要就陀螺加速度计伺服回路设计提供一种新思路, 具体研究了系统数控校正网络的设计。对于陀螺加速度计这种高精度仪器来说, 系统设计时还有诸多因素需要考虑, 这将在后续研究中逐步予以解决。

#### 参考文献:

- [1] 陆元九, 等. 惯性器件 (下) [M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [2] 严小军, 等. 基于 DSP 的陀螺加速度计数字伺服回路研究 [J]. 导弹与航天运载技术, 2002, (4): 44-49.
- [3] TMS320LF/LC240xA DSP Controllers Reference Guide [Z]. Texas Instrument, 2001.
- [4] 韩安太, 等. DSP 控制器原理及其在运动控制系统中的应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.