

四川师范大学本科毕业设计

基于快速傅里叶的数字示波器研究与设计

学生姓名 杨锦霞

院系名称 计算机科学学院

专业名称 计算机科学与技术

班 级 2014 级 1 班

学 号 2014110144

指导教师 严清

完成时间 2018 年 5 月 10 日

基于快速傅里叶的数字示波器研究与设计

学生：杨锦霞 指导教师：严清

内容摘要：本设计是基于 Cortex-M4 内核的 STM32 的数字示波器，使用主控芯片为 STM32F439，主频 180M，外部扩展的 16MB 的 FLASH。本设计主要由三大部分组成。第一大部分是硬件部分：芯片内有三个内置 ADC 来进行信号采样，主控外接一个 800*480 的 TFTLCD 显示屏来显示待测信号；第二大部分是显示部分：该设计使用了 Seaggar 公司的 eMwin 作为显示输入插件，通过该插件可以实时的显示波形，并且可以通过触摸键盘进行交互操作；第三部分则是数据处理的一些算法：本设计在内 s 部有 $N=512$ 的 FFT 算法、基于线性插值的的时基变换递归算法、递推平均滤波算法等用来处理采样数据。

该设计实现了常规双通道示波器的 XY/YT 显示方式，采样频率达到 3.2MS/s，带宽 300KHz，在不开启 FFT 功能时 FPS 为 0.41，开启时为 0.8 左右，能很好的实时显示出外部的函数发生器输入正弦波、方波、锯齿波、斜波、白噪声等测试信号，并且可以实时显示出 FFT 曲线，可以根据输入信号频率手动调节采样频率，内有统计算法可以实时得到并显示电平信号的平均值、有效值、峰峰值、频率等物理量，值得一提的是，信号频率的计算是基于 FFT 算法得到的，在该设计的带宽内失真率不会超过 2%，误差较小。

关键词：数字示波器 emWin 时基变换 FFT 频率计算

Research and Design of Digital Oscilloscope Based on Fast Fourier Transform

Abstract: This design is based on the Cortex-M4 core STM32 digital oscilloscope, using the main control chip STM32F439, clocked at 180M, externally extended 16MB of FLASH. This design mainly consists of three major parts. The first part is the hardware part: There are three built-in ADCs in the chip to sample the signals. The main control externally connects an 800*480 TFT LCD display to display the signal under test. The second part is the display part: the design uses Seaggar. The company's eMwin as a display input plug-in, through which the waveform can be displayed in real time, and can be interactively operated through the touch keyboard; the third part is a number of data processing algorithms: This design has an internal N=512 FFT algorithm, based on Linear interpolation time-base transform recursive algorithms, recursive average filter algorithms, etc. are used to process the sampled data.

This design realizes the XY\YT display mode of the conventional dual-channel oscilloscope. The sampling frequency reaches 3.2MS/s and the bandwidth is about 300KHz. When the FFT function is not enabled, the FPS is 0.41, and when abled it is about 0.8, which can display well in real time. The function generator inputs test signals such as sine wave, square wave, sawtooth wave, ramp wave, and white noise, and can display the FFT curve in real time. The sampling frequency can be manually adjusted according to the frequency of the input signal, and the statistical algorithm can be obtained and displayed in real time. The average value, effective value, peak-to-peak value, frequency and other physical quantities of the level signal are worth mentioning. The calculation of the signal frequency is based on the FFT algorithm. The distortion rate in the designed bandwidth will not exceed 2%, and the error is small.

Key words: digital oscilloscope A/D conversion FFT emWin

目 录

1	概述.....	1
1.1	研究背景及意义.....	1
1.2	国内现状.....	1
1.3	国外现状.....	2
1.4	本文主要结构.....	2
2	数字示波器的相关技术.....	3
2.1	数字示波器原理与模式.....	3
2.1.1	数字示波器原理.....	3
2.1.2	YT 模式和 XY 模式.....	3
2.2	快速傅里叶变换(FFT).....	4
2.2.1	离散傅里叶变换原理.....	4
2.2.2	快速傅里叶变换的原理.....	6
2.2.3	快速傅里叶变换的应用.....	8
2.3	emWin 图形软件库.....	9
2.3.1	emWin 概述.....	9
2.3.2	emWin 的应用场合.....	9
2.4	三重 ADC 交替模式采集.....	10
2.5	递归线性插值.....	11
3	系统硬件电路设计.....	11
3.1	总体概述.....	11
3.2	ADC 电路设计.....	11
3.3	DMA.....	12
3.4	TFT LCD 屏.....	13
4	系统软件设计.....	13
4.1	数字示波器程序设计与结构.....	13
4.2	ADC 主要实现.....	13
4.2.1	ADC 引脚初始化及配置.....	14
4.3	代码清单.....	14
4.4	TIM-基本定时器.....	15
4.5	FFT.....	16
4.6	emWin 显示界面的设计与实现.....	18
4.6.1	窗口管理器 (WM).....	18
4.6.2	图形小工具 GRAPH.....	19
4.6.3	按键.....	20
4.6.4	FRAMEWIN 框架窗口小工具.....	21
5	系统调试.....	22
5.1	统计值调试.....	22
5.1.1	FREQ.....	22
5.1.2	带宽测试.....	23
6	总结.....	24
7	致谢.....	25
	参考文献.....	26

基于快速傅里叶的数字示波器研究与设计

1 概述

1.1 研究背景及意义

示波器是一种能将肉眼不可见的电信号转换成可见图像的综合型测量仪器，对电压平均值，峰-峰值，最大/小值，时间频率及周期，相位等诸多参数都能连续测量，是电子测量中最重要的一种电子仪器。通过示波器分析这些电信号，科学家，工程师以及教育工作者等等都能清晰的观察到随时间变换的事件，同时示波器在电子产品的设计，制造，维修方面也起着十分关键的作用。

初期的模拟示波器是使用显像管技术，将狭窄并且高速的电子光束，打在涂有荧光物质的屏面上，生成细小的荧光点来显示波形。对于周期性的正弦波或者锯齿波，传统示波器可以比较稳定的显示出它们的波形，但是对于非周期的瞬间信号则不能很好的显示出，尤其是对于一些频率低的小信号，失真率很大不可忽略，且模拟示波器比较笨重不方便携带。

八十年代以来随着集成电路的不断发展与成熟以及数字信号处理的采用，数字示波器应运而生，已经逐渐发展成功能强大的智能测试仪器，能集测量，运算，分析，显示，存储等多功能于一体，泰克（Tektronix）、福禄克（FLUKE）等国际品牌的示波器还可以直接进行 FFT 等变换。由于数字示波器提高前端的 A/D 转换器的性能就能提高带宽，对示波管、扫描电路没有特殊要求，使得数字示波器自上世纪八十年代以来迅速崛起并快速发展，大有全面取代模拟示波器的势头。

示波器生产发展到今天，各种功能齐全，体型各异的示波器层出不穷，应用在人们生活、生产、工作的各个场景。值得一提的是便携式示波器的产生，由于示波器使用的范围越来越广泛，体积小，功能全的便携式示波器在人们的期待中面世了。美国福禄克公司最新的 190 系列 IIScopeMeter®手持示波器将高性能、耐用性和便携性融于一体，具有 60 MHz，100 MHz，200 MHz 和 500 MHz 四种带宽选择。实时采样率高达 5GS/s，分辨率为 200ps，每通道存储器采样深度高达 10,000 个采样点，可实现高精度捕获和显示波形细节，噪声和其他干扰等。要达到国外示波器生产水平，我国自主研发高性能的手持示波器还有很长的路要走。

1.2 国内现状

近两年来我国自主研发的数字示波器得到了长足的发展，从低端入门级的 100MHz~200MHz 带宽产品逐渐进入了中端 500MHz 带宽市场，目前国内已经有厂家生产出了最高带宽达到 1GHz 的产品。但由于国内示波器生产厂家成立时间晚，发展时间短，行业认可度不高。我国自主研发的高性能数字示波器还

比较少,在数字示波器生产领域内处于起步阶段,与国外相比还有较大差距,目前国内测试测量仪器生产厂家主要有 RIGOL 普源、优利德集团有限公司、深圳市鼎阳科技有限公司等。北京普源公司成立于 2000 年,是一家制造生产多种仪器仪表的综合型公司。自成立以来已研发生产了十五个系列数十种产品,2004 年推出国内第一台[采样率](#)达到 1 GSa/s,带宽高达 200 MHz 的数字示波器 DS5000 系列。优利德公司成立于 2005 年,在中国测试仪表市场中拥有超过三份之一的市场占有率,更连续五年位居第一,可以说是中国仪器仪表市场中最具有代表的品牌。同时该公司也向全球多个国家销售产品,已经逐渐发展成为亚洲规模比较大的仪器仪表公司。该公司最新一款的 UTD1082C 手持式数字存储示波表带宽为 80MHz,采样率 500MS/s,储存深度为 7.5 kpts。鼎阳科技是目前国内数字示波器销量领先的示波器制造厂家,从 2005 年以来连续推出了 ADS7000 系列, SDS3000、 SDS2000X、 SDS1000X、 SDS1000X-E 以及手持示波表 SHS1000/800 等多个系列。尤其是高达 1G 带宽的 SDS3000 系列,该系列的产生标志着我们国家示波器研发和制造水平上升到了一个新的高度。由于国内目前对于高性能芯片的研究与设计还处于比较落后的阶段,芯片的制造工艺远远低于国外,国产示波器难以向高精尖产品迈进,采样速率的提高成为急需解决的难题。

1.3 国外现状

目前国外示波器行业主要有美国的泰克、安捷伦、力科,日本的日立、三和等生产制造商,全球示波器市场的绝大部分份额基本为它们的产品。其中,成立于 1947 的美国泰克公司目前有 100 多种示波器,可以满足各种用户不同的使用需求,是示波器行业的领头军,被公认为示波器领域的权威。力科则不同于其他生产多种仪表仪器的制造商,该公司只生产示波器,在高档产品方面能与泰克一较高下。而同样来自美国的安捷伦公司旗下产品众多,涉及面十分广泛,有化学分析、生命科学诊断等多方面的检测仪器,是仪器仪表产品最全的供应商。示波器只是其旗下众多产品中的一类,最近几年来数字存储示波器的发展虽然较前两家慢,但是由于基础雄厚也有陆续推出高端产品。泰克、力科、安捷伦三家公司也被人为全球示波器市场的三大巨头,它们的技术代表了示波器行业的最高水平。

1.4 本文主要结构

本文共分为八个部分:

第一部分是总体概述,这个部分主要论述论文的选题背景及意义、国内外研究近况,以及分析现况,为什么要进行研究。

第二部分是基于 STM32 的数字示波器的关键技术说明,软件系统设计的相关算法。

第三部分是系统硬件电路设计说明,介绍了本设计数字示波器处理器的选用以及相关模块的电路设计。

第四部分是系统软件设计说明,介绍了系统软件设计流程,快速傅里叶变换,emwin,三重 ADC 采样等,构建了整个软件框架。

第五部分是系统调试与使用说明,如带宽的调试,频率的调试等。

第六部分是总结篇，对整个系统进行总结，提出解决办法。
第七部分是致谢篇，感谢对自己给予帮助的人。
第八部分列出了本设计各种有参考价值的文献。

2 数字示波器的相关技术

2.1 数字示波器原理与模式

2.1.1 数字示波器原理

示波器可以基于信号的模拟或数字两种类型分为模拟示波器和数字示波器。如同其他模拟设备和数字设备一样，模拟示波器用于对连续变化的电压进行分析，而数字示波器则适用于表示电压样点的离散的二进制数字。

与模拟示波器不同，数字示波器使用模数转换器（ADC）将要测量的模拟信号转换为数字信号，捕捉波形的一系列采样值并存储采样值，并对样点值进行存储，一直累积到样点数量达到存储限度，描绘出波形并显示到屏幕上。

数字示波器使用串行处理架构。如图 2-1 数字示波器串行处理结构所示，为了满足示波器信号捕获设备（ADC）所需的幅度范围，输入信号必须首先通过垂直放大器进行线性放大或缩小。然后模数转换器(ADC)在离散的时间点对连续的模拟信号进行采样即数字化。采集到的电压样点作为波形点存储于采集存储器中，再经过处理器进行样点处理以增强显示效果。可以看到整个过程中其实波形不是实时的呈现在屏幕上的，而是经过采样存储、处理后才显示出来，因此如果整个采样和转换时间较长，就会产生较大的死区时间，死区时间内的波形就无法观察到了，现如今随着电子技术水平的提高，这种瑕疵已经变得越来越小了。

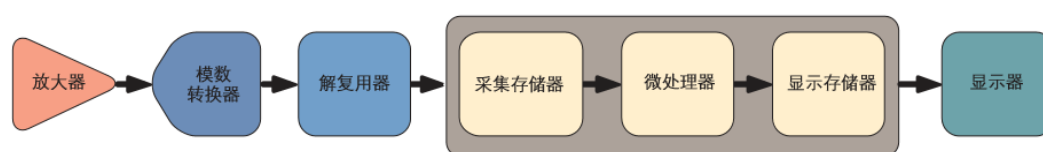


图 2-1 数字示波器串行处理结构

2.1.2 YT 模式和 XY 模式

数字示波器有 YT 时域和 XY 频域两种模式。YT 模式为最为常用的模式，横轴为时间轴，纵轴为频率范围，可观察输入信号的频率随时间的变化。

XY 模式也被称为李萨如图形如下 图 2-3 XY 模式所示，分别在 CH1 和 CH2 输入一个 X、Y 同步信号作为横坐标和纵坐标用于观察李萨如图形。李萨如图是由两个频率成简单整数比的正弦波沿着两个相互垂直的方向振动所合成的规则且稳定的闭合曲线。可用于测量相同频率信号之间的相位差，

如果输入的两信号的频率非线性关系，则得不到稳定的图形。

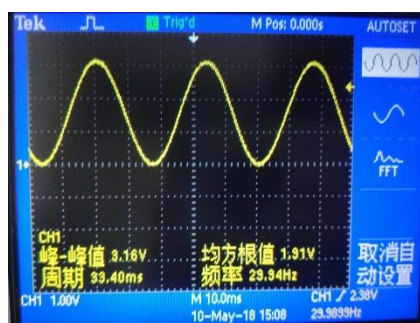


图 2-2 YT 模式

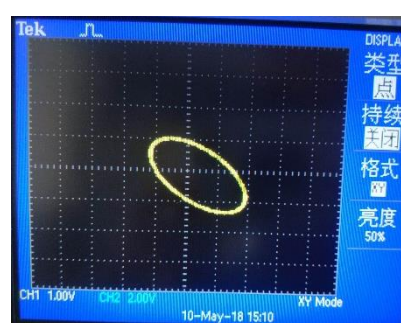


图 2-3 XY 模式

2.2 快速傅里叶变换(FFT)

2.2.1 离散傅里叶变换原理

由于计算机只能处理离散的数值信号，因此离散信号的变换只能使用 DFT。DFT 的作用是将信号从横坐标为时间纵坐标为频率的时域变换到横坐标为频率纵坐标为幅度值得频域图，如下图 2-4 时域到频域的变换在时域的世界，信号的频率会随着时间的变化而变化，这样就很难看出信号的特征。但是从另一个角度频域，信号的频率是永恒静止的，在频域图中可以清楚的观察出信号是由哪些不同频率的正弦分量叠加组成的。

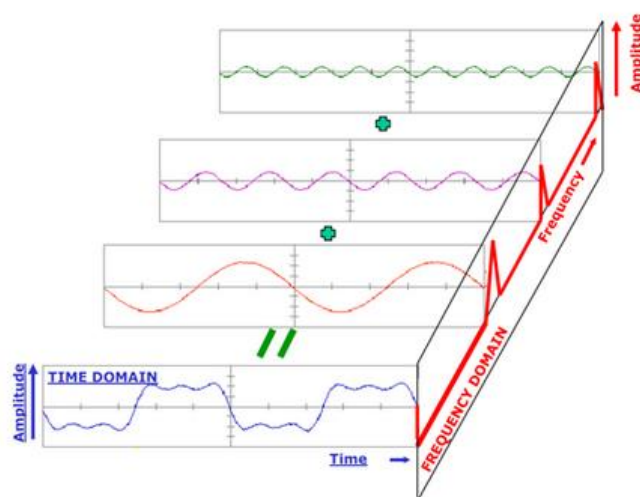


图 2-4 时域到频域的变换

首先 DFT 的公式为

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\left(\frac{2\pi nk}{N}\right)} \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

其中 $W_N^{kn} = e^{-j\left(\frac{2\pi nk}{N}\right)}$ 为旋转因子 (twiddle factor), 其中 n 是原来序列中的点, k

为变换后的点。**错误!未找到引用源。**

编号	特性	公式
1	对称性	$W_N^{k[N-n]} = W_N^{-kn} = (W_N^{kn})^*$
2	周期性	$W_N^{kn} = W_N^{k(n+N)} = W_N^{(k+N)n}$
3	可约性	$W_N^{nk} = W_{mN}^{mnk}, W_N^{nk} = W_{N/m}^{nk/m}$

由于两个复数乘积的模等于它们模的乘积,两个复数乘积的幅角等于它们幅角的和,所以复数的乘、除运算表示模的放大、缩小,幅角表示为逆时针或顺时针旋转,复数 $e^{-j\theta} = 1\angle\theta$ 是一个模等于 1,幅角为 θ 的复数,

$$\text{对于 } \forall F_1 = e^{j\theta_1}$$

$$F = F_1 * e^{j\theta}$$

$$F = e^{(\theta_1 + \theta)j}$$

复数 F 为 F1 逆时针旋转一个角度 θ , F1 的模值与 F 的模值相同保持不变,所以 $W_N^{kn} = e^{-j(\frac{2\pi nk}{N})}$ 称为旋转因子。

旋转因子的作用: 根据欧拉公式 $e^{jx} = \cos x + j\sin x, e^{j\pi/2} = j$, 一个复数乘以 j, 当 $\theta = \pi/2$ 时等于在复平面上将该复数逆时针旋转 $\pi/2$, 当 $\theta = -\pi/2$ 时等于在复平面上将该复数顺时针旋转 $\pi/2$ 。

利用 Matlab 进行离散傅里叶变换仿真, 各参数设置见下表 2- 1 Matlab 参数设置表**错误!未找到引用源。**

表 2- 1 Matlab 参数设置表

编号	变量	注释
1	采样值 (y)	采样点的值, 由纵坐标 Y 表示
2	采样点数 (N)	采集的样点的数量, 采样的数据是一系列离散值
3	频率 (f)	单位时间内完成振动的次数, f= 波的重复次数/N
4	振幅 (A)	表示波的高度也即波的峰值

假设一个的图的波形特征为: 采样点数 $N = 400$, 频率 $f = 20$ 个波, 振幅 $A = 2$, 即 $y = 2 * \sin(2 * \pi * 20 / 400)$, 图 为未经 DFT 变换的时域图, 图 为 DFT 变换后的频域图。可以看到频域图中横坐标值为 20 的地方出现了一个脉冲信号, 由于变换后的图形是对称的所以在频率为 180 的地方同样也有一个脉冲信号。

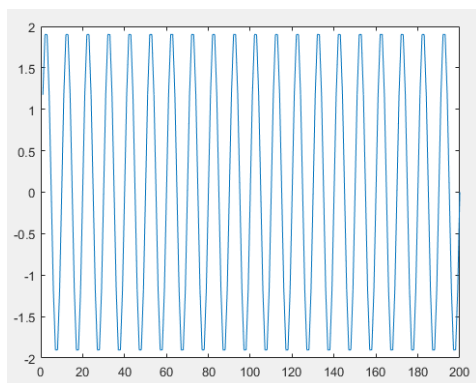


图 2-5 时域

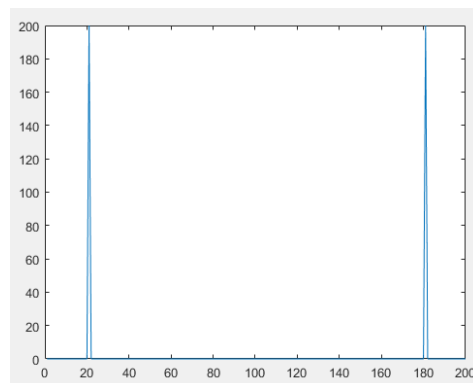


图 2-6 频域

2.2.2 快速傅里叶变换的原理

快速傅里叶变换（FFT）其实质是离散傅里叶变换（DFT），FFT 要求采样点数 N 必须是 2 的整数次方，如果 N 不符合要求可以用 0 补齐或者截断。FFT 在 DFT 的基础上优化了运算简化了在计算机中进行的 DFT 过程。快速傅里叶变换较傅里叶变换在时间复杂度上由 $O(n^2)$ 缩减到 $O(n \log_2 n)$ 。

由公式

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\left(\frac{2\pi nk}{N}\right)} \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

可知，DFT 要进行乘法次数为 N^2 $W_N^{kn} = e^{-j\left(\frac{2\pi nk}{N}\right)}$ ，加法次数为 $N*(N+1)$ （当 $N \gg 1$ 时，近似于 N^2 ），当采样点数 N 很大时，运算量非常大。由于运算量与 N^2 成正比，因此可将 N 点 DFT 分解多个点数较小的 DFT，以减少运算量（ N 越小，计算量越小）。利用旋转因子 $W_N^{kn} = e^{-j\left(\frac{2\pi nk}{N}\right)}$ 共轭复数的对称性、周期性和可约性，将点数 N 的 DFT 分解成两个点数为 $N/2$ 的 DFT，乘法次数变成 $(N/2)^2 + (N/2)^2$ 为原来的一半，继续这样分解下去，由下图 2-7 FFT 与 DFT 所需运算量随计算点数变化的关系曲线图可以看到 FFT 在运算上的优势。

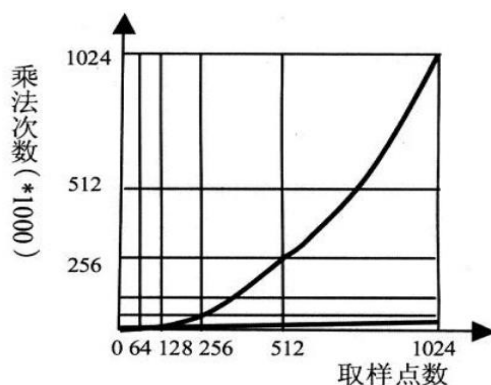


图 2-7 FFT 与 DFT 所需运算量随计算点数变化的关系曲线图

将 $x(n)$ 分为长度均为 $N/2$ 的偶数 $x_1(n)$ 和奇数 $x_2(n)$ 两个序列

$$\begin{aligned}
x(n) &= x_1(n) + x_2(n) \\
X[k] &= DFT[x[n]] = \sum_{\substack{n=0 \\ n \text{ 为偶数}}}^{N-1} x(n)W_N^{nk} + \sum_{\substack{n=0 \\ n \text{ 为奇数}}}^{N-1} x(n)W_N^{nk} \\
&= \sum_{r=0}^{N/2-1} x(2r)W_N^{2rk} + \sum_{r=0}^{N/2-1} x(2r+1)W_N^{(2r+1)k} \\
&= \sum_{r=0}^{N/2-1} x_1(2r)W_N^{2rk} + W_N^k \sum_{r=0}^{N/2-1} x_2(2r)W_N^{2rk} \\
&= \sum_{r=0}^{N/2-1} x_1(r)W_N^{rk} + W_N^k \sum_{r=0}^{N/2-1} x_2(r)W_N^{rk} \\
&= X_1(k) + W_N^k X_2(k)
\end{aligned}$$

其中 $X_1(k)$ 为序列 $x_1(n)$ 采样点为 $N/2$ 的 DFT，和 $X_2(k)$ 为序列 $x_2(n)$ 采样点为 $N/2$ 的 DFT。由于 $X_1(k)$ 和 $X_2(k)$ 的采样点数只有原序列的一半 ($r, k = 0, 1, \dots, n/2-1$)，而 $X(k)$ 的点数为 N ，所以上式仅对一半的点进行了操作，另一半的运算如下

$$\begin{aligned}
x\left(k + \frac{N}{2}\right) &= X_1\left(k + \frac{N}{2}\right) + W_N^{k + \frac{N}{2}} X_2\left(k + \frac{N}{2}\right) \\
&= X_1(k) - W_N^k X_2(k), k = 0, 1, \dots, N/2 - 1
\end{aligned}$$

蝶形运算流程如下图 2-8 图 2-8 蝶形运算所示

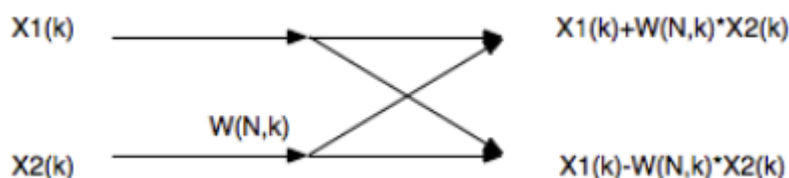


图 2-8 蝶形运算

由此可见，计算出 2 个点数为 $N/2$ 的 DFT，也就是 $X_1[k]$ 和 $X_2[k]$ 利用蝶形运算就可以计算出剩下的全部 $X[k]$ 的值。

下图 2-9 为采用点数 $N=8$ 的 FFT 的第三次蝶形运算分解图

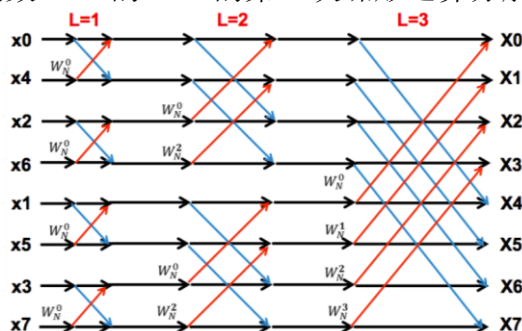


图 2-9 三级蝶形运算

蝶形运算的距离见下

表 2- 2 蝶形运算的距离与级数关系表

级数 L	距离	备注
1	1	
2	2	
3	4	
m	2^{m-1}	

由于 $x(n)$ 被反复的按奇偶分解，所以出入端序列不是有序的，但是仍然有规律可循，输入端的排序正好是二进制的倒序后的排序，如下图 2- 10 倒序

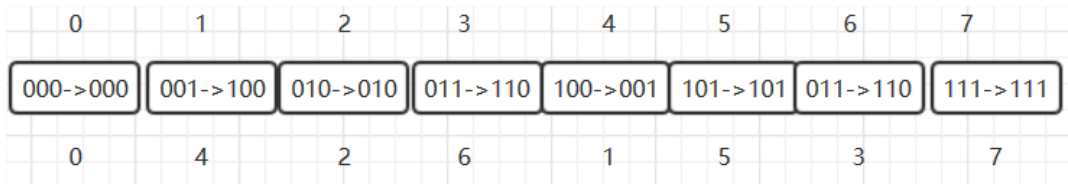


图 2- 10 倒序

2. 2. 3 快速傅里叶变换的应用

1、FFT 在语音信号方面的应用

表 2- 3 FFT 在语音信号方面的应用

编号	应用	举例
1	语音识别	刑侦、门禁系统等
2	声音模拟	候鸟、鱼群的迁徙引导等
3	话音伪装	TOM 猫

对语音信号进行 FFT 变换，将信号的波形图从时域变换到频域，可以更加直观的观察信号的频谱、宽度等信息。图 2- 11 噪声分析为加噪前后语音信号分别在时域和频域的分布，在时域图中几乎观察不到信号有什么变化，而在频域图中可以十分清晰的观察到信号叠加了两个单频域噪声。

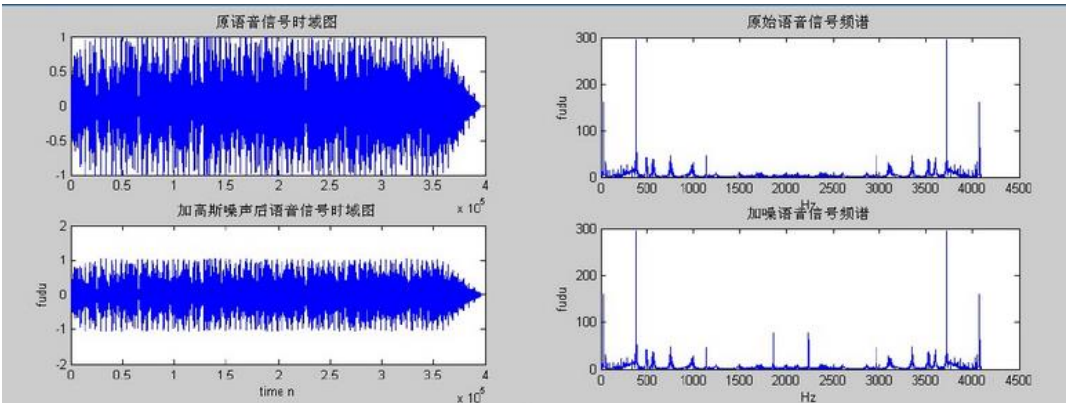


图 2- 11 噪声分析

2、FFT 在图像处理中的应用

表 2- 4 FFT 在图像处理中的应用

编号	应用	注释
1	图像保存	通过 FFT 将图像分解为一组越来越小的正交归一图像，具有很高的压缩比，以更加紧凑的方式存储图像原始数据而不发生任何失真。
2	图像滤波	在进行 FFT 后，若在反变换之间对变换域进行选择，可对图像进行滤波处理。
3	图像复原	对退化，损毁的图像进行处理，使它复原成没有退化的理想图像。如图像上有污点，可以利用信息的相关性，通过傅里叶卷积来达到隐去污点的目的。
4	图像增强	正变换将一幅图像分解为大小、方向和位置都不同的分量，在逆变换之前改变域中某些系数的幅度，有选择的提升感兴趣的分量而忽略不需要的因素。

2.3 emWin 图形软件库

2.3.1 emWin 概述

emWin(embed win)是由 Segger 公司推出的针对于对嵌入式平台开辟的图形软件库，在设计图形界面时可以直接调用 emWin 提供的函数接口，这样就使得开发嵌入式图形界面应用变得简便而快速。图形软件库就是一些绘制界面的函数，这些函数接口可以供用户直接调用。例如，在没有使用图形软件库时，要控制 LCD 显示一个圆，需要用户自行根据 LCD 驱动编写画圆的函数，而使用图形界面软件库的话，这个画圆函数已经由该软件库提供给用户，用户只需要调用这个函数，设置圆的半径、圆心、等参数的值就可以画出自己想要的圆，而不需要再考虑画圆的算法了。

2.3.2 emWin 的应用场合

emWin 不只是提供了画圆之类的基本绘图函库，它的主要功能见下

表 2- 5 emWin 功能

编号	应用	举例
1	绘制 2D 图形	绘制圆、多边形、弧线、线图、饼形图
2	绘制位图文件	显示 BMP、JPEG、GIF 等格式的图片文件
3	显示文字	支持多种国家的文字，如中文、英文等
4	处理用户输	键盘、鼠标、触摸屏幕的人机交互输

	入	入
5	提供图形控 件	单控件、窗口控件、按键控件、复选 框及框架窗口控件等

emWin 最重要的功能就是提供了多种多样的空间,有了这些控件,就能非常容易地制作出友好的控制界面了。emWin 的这些功能,就是为了解决人机交互应用的设计难题。而它内存的消耗相对来说并不高。据官方统计,它们提供的一个基本例程(移植了 emWin 函数库, 显示“HelloWorld”),消耗 ROM 60KB, RAM 7KB, 这在当前大多数嵌入式平台都是可以接受的。又因为 emWin 可以在多任务系统及裸机(无需硬件)的平台上运行,尤其适合嵌入式繁杂的开发要求,自然使得 emWin 在嵌入式人机交互场合中大放异彩。正是由于它的种种优点,本设计采用 emWin 进行数字示波器的界面设计。

2.4 三重 ADC 交替模式采集

STM32F429IGT6 共有三个 ADC,每个 ADC 提供了 12/10/8/6 位多达四种的精度模式,每个 ADC 有 16 个外部通道可选。ADC 具有独立模式,两重模式和三重模式三种模式,用户的多种 AD 转换要求几乎都能匹配到合适的模式。为了使数字示波器的采样频率尽可能高,本设计采用三重模式。

AD 转换采样过程和转换过程两个过程。在采样阶段对通道数据进行采集,而在转换阶段才将采集到的数据转换为数字量进行输出,这时候转换后的结果不会受到通道数据的变化影响。三重 ADC 采样机制同时采样三个不同通道的数据或者使三个 ADC 交叉采集同一个通道的数据,因此三重模式的转换速度明显高于独立和双重模式。

三重 ADC 交替模式就是三个 ADC 对同一个通道进行交替采集,ADC1 采样完几个时钟周期后在 ADC1 处于转换阶段时,ADC2 开始采样,当 ADC2 采样完几个时钟周期后 ADC1 和 ADC2 处于转换过程中,ADC3 进行采样,如果 ADC3 采样完成并且 ADC1 也已完成转换那么就可以进行下一轮的循环了。这种转换机制,充分利用了转换时间,极大的提高了采样速度,具体转换过程如下图 2-12 三重 ADC 变换机制所示

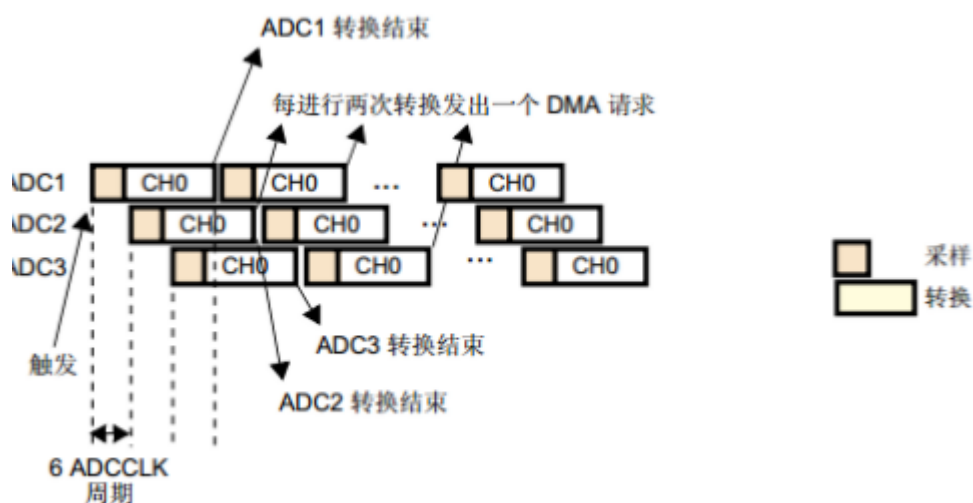


图 2-12 三重 ADC 变换机制

2.5 递归线性插值

线性插值意思是函数只有一次多项式的一种插值方式，这种插值方法在插值节点上的误差为零，与其他插值方式相比的话，比如样条插值，线性插值具有简单易懂、方便快捷等特点，线性插值表达的数学意义为某曲线中利用过 A、B 两点的直线来近似的表示原函数。线性插值作用是可以近似的表达原函数，也可以通过计算获得表中不含有的数值。

已知 (x_0, y_0) 和 (x_1, y_1) ，要求出 $[x_0, x_1]$ 区间 x 的函数值 y ，有如下计算：

$$\begin{aligned}\frac{y - y_0}{x - x_0} &= \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \\ &= \frac{x_1 - x}{x_1 - x_0} y_0 + \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} y_1\end{aligned}$$

在实现数字示波器的时基变换功能时采用了递归线性插值算法来达到时基变大和变小功能。假如采样点数为 N ，要时时基变小波形水平拉伸，截取前一半或者后一半的点然后线性插值，如 $x[1] = (x[0] + x[2])/2$ 。

3 系统硬件电路设计

3.1 总体概述

本设计的数字示波器主要使用的硬件有，STM32f429 开发板，函数发生器（用以产生正弦波），LCD 屏。STM32F429 是 ST（意法半导体）公司生产的，该芯片的内核是最新的 Cortex-M4 系列。STM32 多样化的产品线、极高的性价比、简单上手的库开发方式等特点，使得其迅速在众多 Cortex-M3 MCU 中闪闪发光。基础系列的 F1 可用于控制简单的设备，其内核是 72MHz 主频的 Cortex-M3，性能较高的 F4 系列拥有 180M 高主频的 Cortex-M4 内核。STM32 是微控制器可以外接多种多样的传感器，能控制微型四轴飞行器、智能手环、平衡车、3D 打印机等多种设备，因此 F429 十分适合本次设计的数字示波器的开发。

在本设计中 STM32 的 PC3 引脚与函数发生器的输出端相连，STM32 的地与函数发生器的地相连。

3.2 ADC 电路设计

ADC 模式转换器，联通了模拟系统与数字系统，使用 ADC 就可以从模拟信号得到数字信号。ADC 的输入范围： $V_{REF-} \leq V_{IN} \leq V_{REF+}$ ， V_{REF-} 、 V_{REF+} 、 V_{DDA} 、 V_{SSA} 这四个外部引脚如下图 3-1 ADC 引脚错误!未找到引用源。，接地的是 V_{REF-} 、 V_{SSA} 这两个引脚，接 3.3V 的是 V_{REF+} 、 V_{DDA} 两个引脚，所以 ADC 的输入电压范围为 0-3.3V。如果测量的信号为负电压或者大于 3.3V 的正电压，可以在外部加一个电压的调理电路，拓宽电压范围升高或者降低待测电压以满足 ADC 的测量范围。

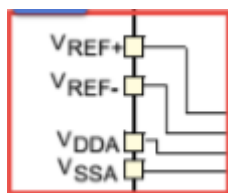


图 3-1 ADC 引脚

ADC 的电路图如下图 3-2 ADC 电路图所示，滑动变阻器调节电阻控制电流的大小，根据待测信号的电压范围调节滑动变阻器以调整 ADC 输入电压的范围。

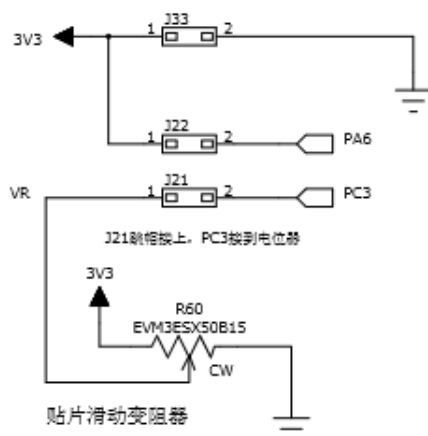


图 3-2 ADC 电路图

3.3 DMA

DMA(Direct Memory Access,直接存储区访问)使数据在外部设备和存储器之间、存储器和存储器之间进行更加高效、快速的传输。之所以称之为高效，是因为 DMA 传输在实现高速数据移动过程无需任何 CPU 操作控制。从硬件层次上来说，DMA 控制器是独立于 Cortex-M4 内核的，有点类似 GPIO、USART 外设，只是 DMA 的功能是可以快速移动内存数据，而不需要请求 CPU 资源。

采用多通道转换的时候，会先将全部完成转换的数据存储在 DR 内，后面时刻另一个通道转换的数据会覆盖掉前面时刻的通道转换的数据，所以当在一个通道完成转换后数据应该立即取走。开启 DMA 模式，ADC 完成后的数据会直接被传输到内存里面，不会产生数据被覆盖的问题。

具体流程图如下图 3-3 三重 ADC 采样流程

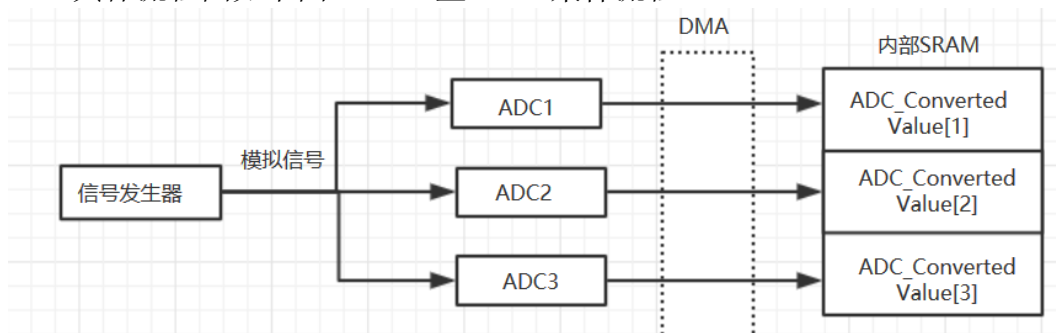


图 3-3 三重 ADC 采样流程

3.4 TFT LCD 屏

液晶显示器，简称 LCD(Liquid Crystal Display)，对比与早期的阴极射线管显示器，LCD 显示器具有低功耗，体积小但信息承载量大的优点，因此成为了现在主流的电子显示设备，如电视，电脑，手机屏幕等各种嵌入式设备的显示器。LCD 液晶接口如下图 3- 4 LCD 液晶接口所示

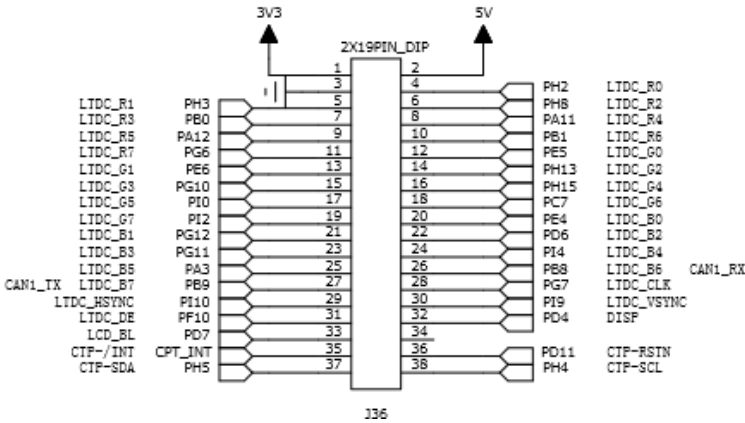


图 3- 4 LCD 液晶接口

4 系统软件设计

4.1 数字示波器程序设计与结构

本设计到这里，示波器硬件平台已经搭建好，现在需要对数字示波器的各种功能的实现进行程序设计。程序的设计是基于 STM32 的，代码的编写包含许多底层驱动的相关配置。主要包括三大部分，第一部分是对硬件进行的操作如 DMA、ADC 驱动等相关参数的配置，第二部分是数据处理相关算法的设计如 ADC 三重交替采样、FFT、滤波、插值等，第三部分是 LCD 屏幕显示代码的编写如按键，波形显示等。接下来一一介绍。

本次设计是在 Keil-MDK5.17 平台上进行代码的编写以及编译调试。

4.2 ADC 主要实现

为了提高采样频率，本设计的示波器同时开启三个 ADC 进行交替采样，在进行 ADC 采集时利用 DMA 传输把 AD 转换的数据转移到内部的自己定义的存储区中，利用 DMA 传输可以达到更高的数据传输速率，并且 DMA 传输不占用 CPU 节省了 CPU 资源。

ADC 的输入电压范围设定为 0~3.3v，如果设置 ADC 为 12 位的话，那么 12 位满量程对应的就是 3.3V，12 位满量程对应的数字值是：2^12。0 对应的就是 0V，4096 对应的是 3.3V。如果转换后的数值为 X，X 对应的模拟电压为 Y，那么会有这么一个等式成立：2^12 / 3.3 = X / Y，=> Y = (3.3 * X) / 2^12。为了

方便处理和绘制图形,将电压范围调整为-5V~5V,计算为 $X = Y * 9.999 / 4096 - 5$ 。

4.2.1 ADC 引脚初始化及配置

具体流程见下表 4- 1 ADC 具体配置：

表 4- 1 ADC 具体配置	
编号	步骤
1	初始化配置 ADC 目标引脚为模拟输入模式
2	使能 ADC1\ADC2\ADC3 及 DMA 时钟
3	开启 DMA 控制将 ADC 通用数据寄存器中的数据转存到指定存储
4	配置 ADC 为三重交替模式，4 分频采样，使用 DMA 模式
5	配置 ADC1\ADC2\ADC3 位 12 位分频率，禁止扫描，连续转换，无外部触发
6	配置 ADC1\ADC2\ADC3 转换通道的顺序及采样时间
7	使能 ADC1 为 DMA 请求，当转换完成后自动进行 DMA 进行数据分析
8	启动 ADC1\ADC2\ADC3 采样

4.3 代码清单

主要配置代码如下

```
78 // -----ADC Init 结构体 参数 初始化-----
79 // ADC 分辨率
80 ADC_InitStructure.ADC_Resolution = ADC_Resolution_12b;
81 // 禁止扫描模式，多通道采集才需要
82 ADC_InitStructure.ADC_ScanConvMode = DISABLE;
83 // 连续转换
84 ADC_InitStructure.ADC_ContinuousConvMode = ENABLE;
85 //禁止外部边沿触发
86 ADC_InitStructure.ADC_ExternalTrigConvEdge = ADC_ExternalTrigConvEdge_None;
87 //使用软件触发，外部触发不用配置，注释掉即可
88 //ADC_InitStructure.ADC_ExternalTrigConv = ADC_ExternalTrigConv_T1_CC1;
89 //数据右对齐
90 ADC_InitStructure.ADC_DataAlign = ADC_DataAlign_Right;
91 //转换通道 1个
92 ADC_InitStructure.ADC_NbrOfConversion = 1;
93 ADC_Init(RHEOSTAT_ADC1, &ADC_InitStructure);
94 // 配置 ADC 通道转换顺序为1，第一个转换，采样时间为3个时钟周期
95 ADC_RegularChannelConfig(RHEOSTAT_ADC1, RHEOSTAT_ADC_CHANNEL, 1, ADC_SampleTime_3Cycles);
96 ADC_Init(RHEOSTAT_ADC2, &ADC_InitStructure);
97 // 配置 ADC 通道转换顺序为1，第一个转换，采样时间为3个时钟周期
98 ADC_RegularChannelConfig(RHEOSTAT_ADC2, RHEOSTAT_ADC_CHANNEL, 1, ADC_SampleTime_3Cycles);
99 ADC_Init(RHEOSTAT_ADC3, &ADC_InitStructure);
100 // 配置 ADC 通道转换顺序为1，第一个转换，采样时间为3个时钟周期
101 ADC_RegularChannelConfig(RHEOSTAT_ADC3, RHEOSTAT_ADC_CHANNEL, 1, ADC_SampleTime_3Cycles);
102 // 使能DMA请求 after last transfer (multi-ADC mode)
103 ADC_MultiModeDMARequestAfterLastTransferCmd(ENABLE);
104 // 使能ADC DMA
105 ADC_DMACmd(RHEOSTAT_ADC1, ENABLE);
106
107 // 使能ADC
108 ADC_Cmd(RHEOSTAT_ADC1, ENABLE);
109 ADC_Cmd(RHEOSTAT_ADC2, ENABLE);
110 ADC_Cmd(RHEOSTAT_ADC3, ENABLE);
111
112 //开始adc转换，软件触发
113 ADC_SoftwareStartConv(RHEOSTAT_ADC1);
114 ADC_SoftwareStartConv(RHEOSTAT_ADC2);
115 ADC_SoftwareStartConv(RHEOSTAT_ADC3);
116 }
```

图 4- 1 ADC 配置代码清单

主要 ADC 采样主要实现代码如下

```

87 void _updateValues(WM_HWIN hGraph, FrameData* framedata, CurveStruct* curveStruct)
88     /* addValue? */
89     int i = 0;
90     /*sampling */
91     if(Model==0){ //随机信号
92         t1=returnMoment();
93         for (i = 0; i < Wsize; i++){
94             curveStruct->data_t[i] = 5 * cos(i / N)*(float)rand()/100 ;
95         }
96         t2=returnMoment();
97     }
98     else if(Model==1){ //低频
99         t1=returnMoment();
100         for (i = 0; i < Wsize; i++) {
101             curveStruct->data_t[i] = ((uint16_t)ADC_ConvertedValue[i%2]*9.999/4096-
102         }
103         t2=returnMoment();
104     }
105     else if(Model==2){ //高频
106         t1=returnMoment();
107         for (i = 0; i < Wsize; i++) {
108             curveStruct->data_t[i] = ((uint16_t)ADC_ConvertedValue[i%2]);
109             Delay_us(delayus);
110         }
111         t2=returnMoment();
112         for(i=0;i<SIZE;i++){
113             curveStruct->data_t[i] =(float) (curveStruct->data_t[i] *9.999/4096-5);
114         }
115         for(i=0;i<8;i++){
116             buf[i]= curveStruct->data_t[i];
117         }
118         for(i=0;i<SIZE;i++){
119             curveStruct->data_t[i]=Filter( curveStruct->data_t[i],buf,8);
120         }
121     }

```

图 4-2 ADC 主要实现代码清单

本设计的示波器共有三种模式可选。模式 1 是系统内部产生一个随机信号进行噪声测试以检测示波器的功能，模式 2 为模拟信号采集模式。

4.4 TIM-基本定时器

定时器的基本功能就是设定一定的时间来响应某个事件，比如每隔一段时间采集 AD 数据，每隔 1s 发送 USART 数据等。STM32F429 控制器有 2 个高级控制定时器、10 个通用定时器和两个基本定时器。为了求得精准的采样时间，实现采样频率显示功能，本设计使用了 TIM-基本定时来获取采样前后的时间戳，再两者做差得到采样时间。本设计要求的 TIM 功能比较简单，使用基本定时器就能达到目的，故使用 STM32 的两个基本定时器 TIM6、TIM7。

基本定时器 TIM6 和 TIM7 是 16 位增量定时器。将计数值添加到自动重新加载寄存器（TIMx_ARR）并启用 TIMx 后，当 TIMx_CNT 与 TIMx_ARR 具有相同值的时候将生成事件并清除 TIMx_CNT 寄存器的值为 0，计数器寄存器（TIMx_CNT）将从 0 开始递增进行下一个循环。基本定时器功能流程图如下图 4-3 定时器功能流程

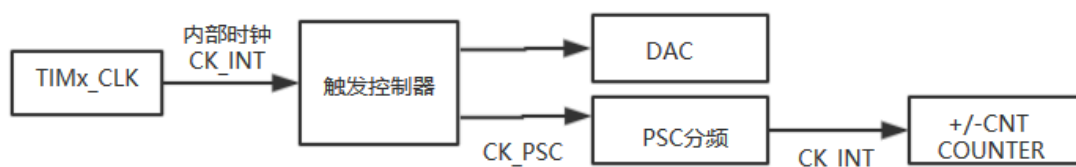


图 4-3 定时器功能流程

TIM6 被设定成一个周期为 10ms 的定时器，没计数一次代表 1us，用以计算采样时间实现显示采样频率这个参数的功能。TIM7 被设定成一个周期为 1s 的定时器，每计数一次代表 100us，用以计算屏幕的刷新时间实现显示屏幕刷新率这个参数的功能。

定时器主要参数配置清单见下

```

6  /*-----us 级-----*/
7  #define BASIC_TIM          TIM6
8  #define BASIC_TIM_CLK      RCC_APB1Periph_TIM6
9  #define BASIC_TIM_IRQn     TIM6_DAC_IRQn
10 #define BASIC_TIM_IRQHandler TIM6_DAC_IRQHandler
11
12 #define BASIC_TIM_Period    (10000-1)//定时器周期1000
13 #define BASIC_TIM_Prescaler 90-1// 预分频器180M/2
14
15 /*-----s级-----*/
16
17 #define SEC_TIM             TIM7
18 #define SEC_TIM_CLK         RCC_APB1Periph_TIM7
19 #define SEC_TIM_IRQn        TIM7_DAC_IRQn
20 #define SEC_TIM_IRQHandler  TIM7_DAC_IRQHandler
21
22 #define SEC_TIM_Period      (10000-1)//10000次/中断 rar
23 #define SEC_TIM_Prescaler   9000-1// 180M/18000 =

```

图 4-4 与定时器相关的主要函数的实现

int BASIC_TIM_getValue()此函数得到 t1 采样开始和 t2 结束两个时间戳

int ms_between(int t1,int t2)

此函数求出了采样周期，单位为 us

int SEC_TIM_getValue()此函数获得整个过程包括采集以及相关处理的开始时间和结束时间。

int SEC_us_between(int s1,int s2) s1 为开始时间,s2 为结束时间，此函数可以得到整个过程的时间，用以计算屏幕刷新率 ScRefTime

4.5 FFT

本设计采用的是按时间抽取的基 2-FFT 算法，算法分为两大部分，第一部分是求旋转因子，复数的加法、减法、乘法，对序列进行重映射（采用递归的方法对 x(n)序列进行不断的奇偶分组直至每组只剩两个点）等，这些都是为 FT 做准备工作，最核心的为第二部分，也就是根据公式进行代码的编写，对数据进行蝶形运算。

重映射流程图见下图 4-5 FFT 重映射

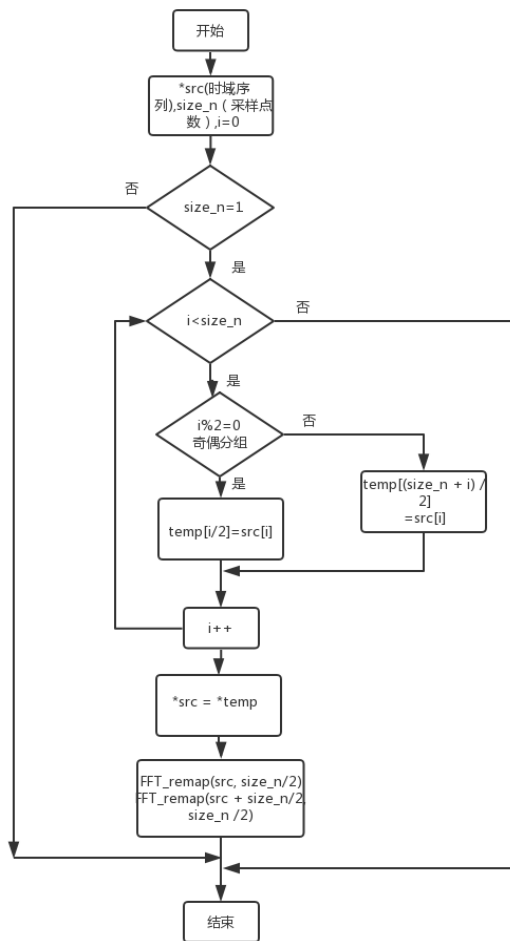


图 4-5 FFT 重映射

下图为重映射的代码片段

```

51 static int FFT_remap(float * src, int size_n) { // 序列重映射
52     if (size_n == 1)
53         return 0;
54     float * temp = (float *) malloc(sizeof(float)*size_n);
55     int i = 0;
56     for (i = 0; i < size_n; i++)
57         if (i % 2 == 0)
58             temp[i / 2] = src[i]; // 偶数
59         else
60             temp[(size_n + i) / 2] = src[i]; // 奇数
61     i = 0;
62     for (i = 0; i < size_n; i++)
63         src[i] = temp[i];
64     free(temp);
65     FFT_remap(src, size_n / 2);
66     FFT_remap(src + size_n / 2, size_n / 2);
67     return 1;
68 }

```

图 4-6 重映射代码片段

FFT 的运算部分分为三层，第一层为蝶形运算级数 L 控制的迭代过程为最外层，第二层是旋转因子的计算（奇数才乘以旋转因子），第三层完成相同的旋转因子的蝶形计算为最里层。

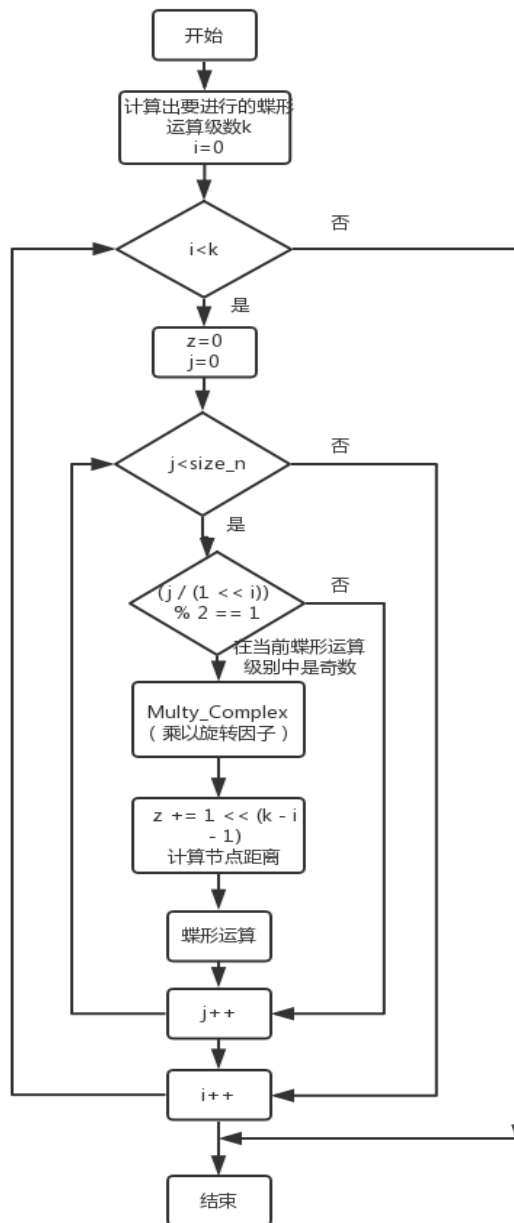


图 4-7 FFT 蝶形运算

4.6 emWin 显示界面的设计与实现

4.6.1 窗口管理器（WM）

emWin 窗口管理器，显示器屏幕上出现的任何控件都包含在窗口中，可以一次在屏幕上开启多个窗口。窗口的大小是通过起点（左上角的 X,Y 坐标）和宽度、高度决定的。建立窗口后，**WM** 会分派一个句柄作为窗口的标识符，该标识符是独一无二的，就像人的身份证一样能表明身份，要对窗口采取任何操作必须先得到窗口的句柄。具体使用如下图 4-8 **emWin** 结构

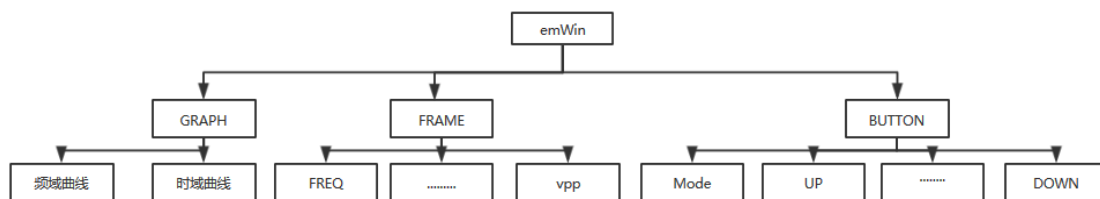


图 4- 8 emWin 结构

整体界面由三部分组成，FRAME 小工具,GRAPH 小工具,BUTTON 控件。FRAME 为整个界面的容器,装载 GRAPH,BUTTON。实物图见下图 4- 9 界面设计效果图

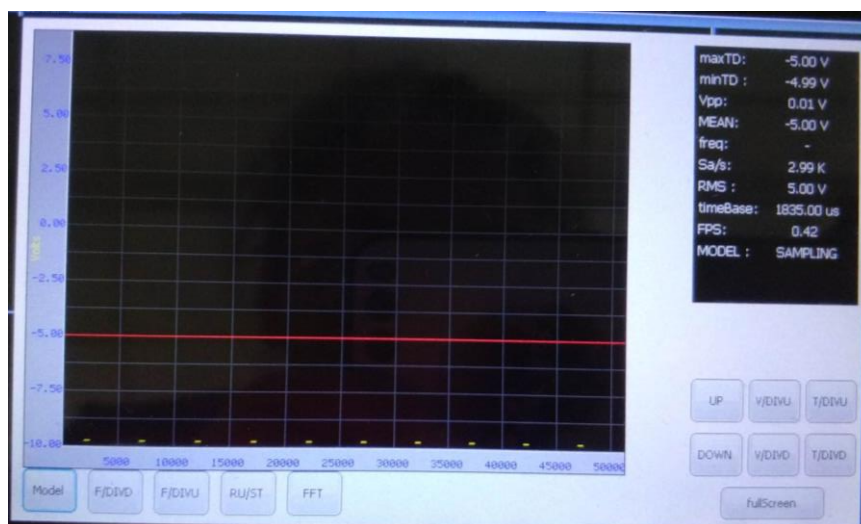


图 4- 9 界面设计效果图

4. 6. 2 图形小工具 GRAPH

图形工具 GRAPH 主要用于显示波形。该图形小工具最经典的用法就是显示测量曲线和功能图，并且可以同时显示多条曲线。水平和垂直刻度可用于测量曲线。还可以使画布显示不同水平和垂直间距的网格。即使图形显示区域无法容纳所有数据阵列，小工具也可以自动显示滚动条并滚动屏幕以显示大型数据阵列。

GRAPH 的详细结构如下

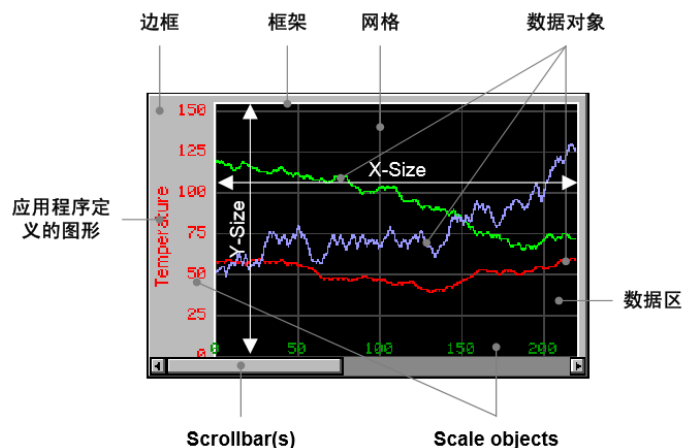


图 4- 10 GRAPH 详细结构

创建 GRAPH 小工具的相关步骤见下表 4- 2 GRAPH 创建相关步骤错误!未找到引用源。:

表 4- 2 GRAPH 创建相关步骤

编号	步骤
1	设置所需属性，如 color 背景颜色，X-Size 数据区的 X 尺寸等。
2	创建数据对象
3	将数据对象添加到图像小工具
4	创建可选的刻度对象
5	将刻度对象添加到图形小工具

GRAPH 小工具支持两种数据模式，GRAPH_DATA_YT 数据对象用于显示由点阵列组成的曲线对应于示波器的 YI 模式；GRAPH_DATA_XY 用于显示每一个位的 X 都对应一个 Y 值的曲线对应于示波器的 XY 模式。

GRAPH_DATA_YT 数据对象相关函数见下：

表 4- 3GRAPH_DATA_YT 数据对象相关函数

函数名称	用途
GRAPH_DATA_YT_AddValue()	向 GRAPH_DATA_YT 对象添加数据项
GRAPH_DATA_YT_Clear()	清除 GRAPH_DATA_YT 对象的所有数据项
GRAPH_DATA_YT_Create()	创建 GRAPH_DATA_YT 对象
GRAPH_DATA_YT_Delete()	删除 GRAPH_DATA_YT 对象
GRAPH_DATA_YT_SetAlign()	设置给定的 GRAPH_DATA_YT 对象对齐方式
GRAPH_DATA_YT_SetoffY()	设置用于绘制数据的垂直偏移

4. 6. 3 按键

屏幕按键清单见下表 4- 4 屏幕按键清单：

表 4- 4 屏幕按键清单

编号	按键名称	功能
1	F/DIVU	正弦波频率减小
2	F/DIVD	正弦波频率增加
3	Mode	模式选择
4	stop	停止 FFT 变换
5	FFT	快速傅里叶变换
6	Prt Sc	截屏
7	UP	信号波形垂直上移
8	DOWN	信号波形垂直下移
9	V//DIVU	波形垂直缩短
10	V/DIVD	信号垂直拉伸

11	T/DIVU	时基变大
12	T/DIVD	时基变小

其中 F/DIVU、F/DIVD 两个按键的作用是模式 1 中噪声测试随机信号叠加的正弦波的频率增大和缩小，用于 FFT 测试使用并无其他意义。

4.6.4 FRAMEWIN 框架窗口小工具

框架窗口提供一个 PC 应用程序的窗口外观，在本设计中用以装载 GRAPH 小工具，Button 等。参数显示清单见下：

表 4-5 统计值显示清单

编号	参数名称	意义
1	maxTD	最大值
2	minTD	最小值
3	VPP	峰峰值
4	mean	平均值
5	Freq	频率
6	Sa/S	采样频率
7	Volts/div	垂直分辨率
8	timebase	时基
9	ScRefTime	帧率
10	Rms	有效值

```

10
11 typedef struct { //帧图片数据
12     /*TD */
13     float maxTD;//最大值
14     float minTD;//最小值
15     float Vpp;//峰峰值
16     float mean;//平均值
17     float sumTD;
18     float rms;
19     int sampT;//采样时间us
20     /*FD */
21     float freq;
22     float FPP[10];//频率功率分布
23     float sumFD;
24     /*SIS*/
25     float timeBase;//时基大小
26     float Sas;//采样频率
27     float vDiv;//垂直分辨率
28     float ScreenRefTime;//屏幕刷新速率
29 }FrameData;
30
31

```

图 4-11 参数初始化代码片段

其中，maxTD 和 minTD 为显示波形中的最大幅值和最小幅值，VPP 峰峰值为最大最小值之差，Freq 为显示频率分量中的最高值，Volts/div 垂直分辨率为垂直方向上信号被切分成多少段。timeBase 时基为波形显现时间的基本单位就是每

格代表几个 us、ns 的单位时间，改变时基也即改变每格所代表的时间。ScRefTime 为屏幕的刷新速度，RMS 为有效值。运算公式如下：

在连续的时间 t1-t2 有

$$\int_{t1}^{t2} \frac{v^2(t)}{R} dt = \frac{V_{RMS}^2}{R} (t2 - t1)$$

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{R}{(t2 - t1)} \int_{t1}^{t2} \frac{v^2(t)}{R} dt}$$

对于离散的时间点有（n1,n2 为离散的时间点）

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n2 - n1} \sum_{i=1}^{n2} v^2(i)}$$

RMS 实现代码如下，其中 data 为电压值。

```
62 float RMS(float* data) {
63     int i = 0;
64     float rms, sqsum;
65     for(i=0; i<SIZE; i++) {
66         sqsum+=data[i]*data[i];
67     }
68     rms=pow((sqsum/SIZE), 0.5);
69     return rms;
70 }
```

图 4- 12 RMS 实现代码片段

5 系统调试

5.1 统计值调试

5.1.1 FREQ

外接函数发生器的产生一个正弦信号，从 10KHz 开始每次增加 20KHz，测量其频率，分析误差。实测频率见下表 5- 1 频率测试值：

表 5- 1 频率测试值

编号	示波器	函数发生器	误差率
1	11.7KHz	10. 0KHz	17. 0%
2	29.2KHz	30. 0 KHz	2.6%
3	50.7KHz	50. 0KHz	1.4%
4	70.3KHz	70. 0KHz	4.2%

5	89.7KHz	90. 0KHz	0,3%
6	110.5KHz	110. 0KHz	0.45%
7	128.7KHz	130. 0KHz	1%
8	152.0KHz	150. 0KHz	1.3%
9	169.6KHz	170. 0KHz	0.23%
10	187.1KHz	190. 0KHz	1.5%
11	198.8KHz	200. 0KHz	0.6%

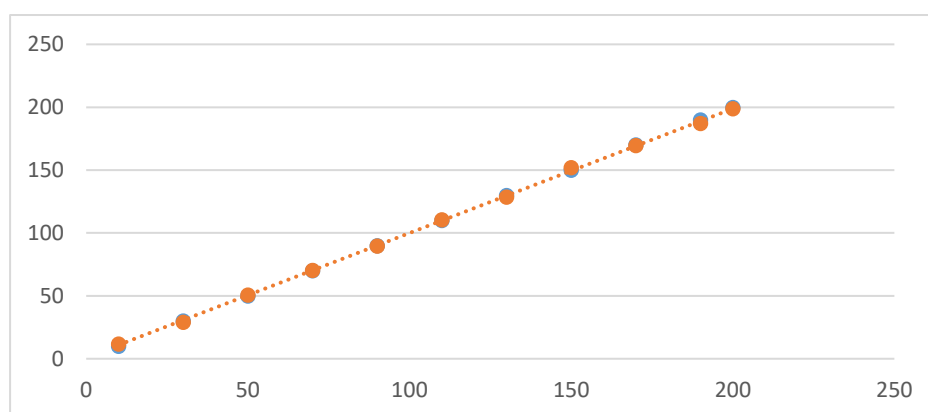


图 5- 1 频率误差分析图

由图可见，频率误差很小。

5. 1. 2 带宽测试

逐渐升高输入信号的频率，下图分别为 210KH 和 300KHz 的情况。可以看到 300Khz 时域失真已经较为严重见下

图 5- 3 300KHz 波形图，但是频率测量误差较小。故该示波器带宽约为 200KHz~300KHz。

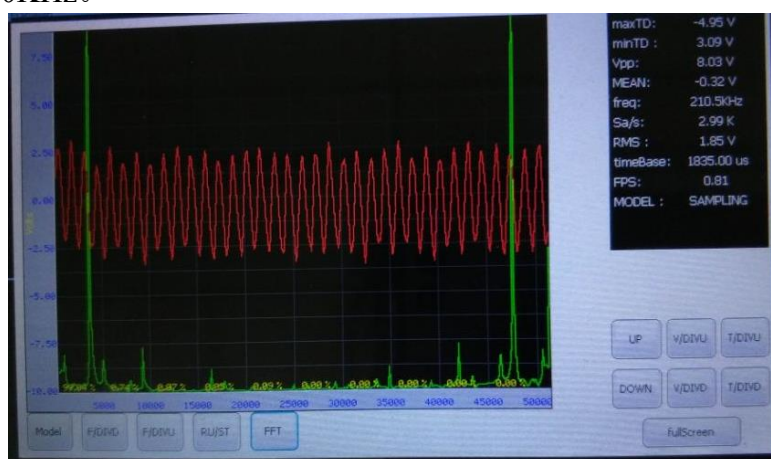


图 5- 2 210KHz 波形图

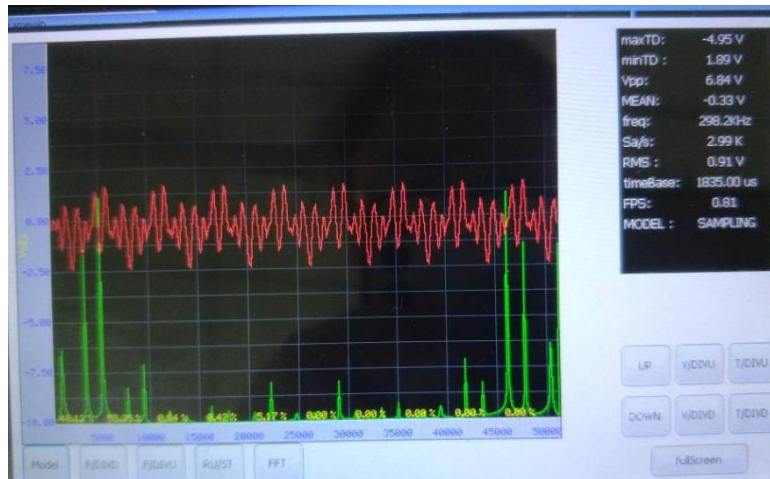


图 5- 3 300KHz 波形图

6 总结

在本次毕业设计的数字示波器是集数据采集，A/D 转换，数据处理，emWin 图形绘制等一系列技术制作的。由于本示波器是基于 STM32 微处理器设计的，ADC 模块是 STM32F429 开发板内部集成的其精度只有 12 位，即使采用三个 ADC 进行交替采集机制，采样频率也只有 3.2MHz。根据奈奎斯特采样定理要保证采样频率为信号最高频率的 2.56~4 倍，在实际工业应用中，采样频率一般为信号最高频率的 10 倍[13]。因此带宽为 200KHz~300KHz。本设计数字示波器可以把待测信号波形稳定的显示出来，即绘制出时域图，并且能对信号做 FFT 变换，计算出待测信号的频率，且误差在可以允许的范围内，能对波形做一些简单的变换，如时基变换，垂直变换等等，是一个功能完整、界面友好、操作简单的数字示波器。

当然，本设计也存在很多不足的地方，最遗憾的是，没有设计调理电路，由于 STM32 内置 ADC 的参考电压范围为 0~3.3V，不可更改，超出 3.3V 的信号仍为 3.3V，低于 0V 的为 0V，导致相关参数的计算没有真实性。

在本次设计当中最大的收获就是从无到有。让我学习到了很多以前很少接触到的知识，如 FFT，emWin 等等。程序设计从一个模块的一个模块的配置，调试，计算参数。特别是第一次实现波形的显示内心是十分激动的。真是学习到了很多，熟练的掌握了 STM32 相关模块的配置技巧，学会了怎么用 emWin 设计界面。

随着示波器在各行各业越来越广泛的使用，和示波器相关性能的不断完善，示波器在整个测试行业的地位日益突出。为了便于测试工作的开展，更高性能，更小体积的数字示波表应运而生，其外观，大小跟万用表差不多，可以在现场进行手持检测。可见数字示波器还有很大的提升空间。

7 致谢

完成本次设计，非常感激我的老师严清，谢谢他对我学习指导，给予我的帮助。有不懂的都能向他提问，尽力的帮我解决。在软件设计和硬件设计方面尤其给了我很大的帮助，对于硬件的调试和程序的调试，教我经验方法，灵活运用，学到了很多。

要感谢的就是帮助我的同学，网友提供学习资料给我，让我少走弯路。

最后感谢我的父母一直督促我论文要认真完成，感谢它们的支持。

参考文献

- [1] 于寅虎.国产示波器发展现状及对策分析[J].电子产品世界,2014,21(05):10-11.
- [2] 郭宏博.脑电图信号识别技术在智能假肢领域中的应用研究[D].东北大学,2012.
- [3] 孙彦明.手持式示波器的改进设计[D].电子科技大学,2006.
- [4] 1GSPS 数字存储示波器数字系统硬件设计
- [5] 金映. 1GSPS 数字存储示波器数字系统硬件设计[D].电子科技大学,2006.
- [6] 周晋. 实现 DSO 数字荧光的通用显示系统设计[D].南京航空航天大学,2007.
- [7] 毕博. 隔离四通道数字存储示波器的设计与研究[D].山东科技大学,2010.
- [8] 飞机航电综合显控计算机视频显示技术的研究与实现.
- [9] 徐桂英.怎样理解棣模佛公式[J].内蒙古师范大学学报(教育科学版),2001(04):33-35.
- [10] 袁晓波. 六通道 16 位 PXI 采集模块硬件设计[D].电子科技大学,2014.
- [11] 张胜宗. BDS/GPS 精密单点定位的处理技术研究[D].哈尔滨工程大学,2016.
- [12] 高俊虎. AC/DC 电力变换装置控制设计与实现[D].哈尔滨工程大学,2012.
- [13] 李磊. 基于网络化虚拟仪器的车辆零部件检测系统的研发[D].武汉理工大学,2011.
- [14] 张伟.数字信号处理对电子测量与仪器的影响研究[J].电子制作,2018(Z2):28-29.
- [15] 朱江淼,王世镖,缪京元,赵琳潇,张月倩.宽带取样示波器时基漂移的不确定度研究[J].电子测量与仪器学报,2018,32(03):184-188.
- [16] 朱江淼,王世镖,缪京元,赵琳潇,张月倩.宽带取样示波器时基漂移的不确定度研究[J].电子测量与仪器学报,2018,32(03):184-188.
- [17] 王克柔,洪志良.一款 12 位 5 kS/s 逐次逼近型模数转换器的设计[J].固体电子学研究与进展,2018,38(01):75-79.
- [18] 张琳. 低功耗高精度逐次逼近型模数转换器设计[D].河北科技大学,2018.
- [19] 王克柔,洪志良.一款 12 位 5 kS/s 逐次逼近型模数转换器的设计[J].固体电子学研究与进展,2018,38(01):75-79.
- [20] 张琳. 低功耗高精度逐次逼近型模数转换器设计[D].河北科技大学,2018.
- [21] 张华忠.基于 STM32 的便携式数字示波器设计与实现[J].现代计算机(专业版),2017(19):45-47.
- [22] 马永杰,田福泽,马善林.基于 STM32 的数字示波器系统设计[J].仪表技术与传感器,2016(04):22-24+35.
- [23] 蔡志威. 基于 STM32F4 的数字存储示波器的设计[D].东华理工大学,2014.
- [24] 王金玉. 基于嵌入式系统的数字示波器设计[D].吉林大学,2016.
- [25] 涂兰敬. 信号分析与处理技术的新突破[N]. 中国计算机报,2015-01-26(005).
- [26] 詹圣益.嵌入式系统中数字滤波器的分析和设计[J].微型电脑应用,2012,28(08):38-40.
- [27] 曹龙,刘炜,曾力.基于单片机的数字示波器设计与仿真[J].信息通信,2015(11):66-67.
- [28] 高伟霞,章毛连,张永锋.基于 AVR 单片机的便携式数字示波器设计[J].蚌埠学院学报,2014,3(01):6-8.