

基于 AD9854 与 STM32 的频率特性测试仪设计

董宝玉 薛严冰 马 驰 盛 虎

(大连交通大学电气信息学院, 辽宁 大连 116028)

摘 要 以 STM32 单片机为任务控制与数据处理核心, 根据零中频正交解调原理, 进行频率特性测试仪的设计制作。采用直接频率合成芯片 AD9854 制作扫频信号源, 产生 I、Q 两路正交信号, 这两路信号分别通过放大器、模拟乘法器及低通滤波器等外围电路, 由 STM32 的片内 ADC 进行信号采集, 经运算获得被测网络的幅频特性与相频特性。该测试仪可以进行点频测量和 1 ~ 50 MHz 的扫频测量, 可以手动预置测频范围和步进频率, 并在 320 × 240 彩色液晶屏上显示幅频特性和相频特性曲线。

关键词 频率特性测试仪 STM32 单片机 零中频正交解调 直接频率合成

中图分类号 TH862 文献标识码 A 文章编号 1000-3932(2014) 06-0655-05

频率特性测试仪是一种测试网络或者电路的频率特性的仪器, 又称扫频仪, 它是现代电子测量领域的一种重要工具, 可以用来测量信号传输网络、信号放大电路及滤波电路等双端口网络的幅频特性与相频特性^[1], 在工程领域有着非常广泛的应用。而在传统的扫频仪设计方法中, 被测网络幅频特性与相频特性的获取, 需要通过不同的电路模块分别进行峰值检测与相位差测量^[2], 导致其系统由多个模块构成, 电路复杂且体积较大。随着现代电子技术的飞速发展, 频率特性测试仪作为一种重要的测量仪器, 其设计理念也在不断地革新, 笔者采用零中频正交解调技术进行频率

特性测试仪的设计, 符合小型化、数字化、低功耗的现代仪表设计发展方向, 本设计中采用直接频率合成(DDS)芯片 AD9854 产生正交扫频信号, 并以低功耗单片机 STM32 作为任务控制与数据处理的核心部件。设计的频率特性测试仪扫频范围为 1 ~ 50 MHz, 幅度测量精度小于 1 dB, 相位测量精度小于 5°, 能够预置测量范围和步进频率值, 并在 320 × 240 彩色液晶屏上显示被测网络的频率特性曲线。

1 总体方案^①

该频率特性测试仪的设计基于零中频正交解调原理, 系统的总体结构如图 1 所示。

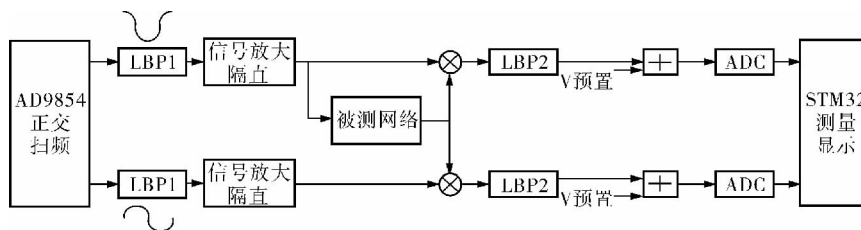


图1 系统总体结构

设计采用 DDS 集成芯片 AD9854 产生正交扫频信号, 该芯片内部整合了两路高速、高性能正交 D/A 转换器, 通过数字化编程即可输出 I、Q 两路合成信号^[3]。将这两路信号分别通过七阶椭圆低通滤波器 LBP1 进行整形, 然后通过放大隔直电路, 获得幅度满足要求的正交信号, 再对被测双端口网络进行基于正交解调原理的扫频测量。

设通过放大隔直电路后, 该正交信号的同相分量 $u_1 = A_1 \cos \omega t$, 正交分量 $u_Q = A_1 \sin \omega t$ 。设被测网络的电压转移函数 $A(\omega) = A_v(\omega) e^{j\varphi(\omega)}$, 那么同相分量 u_1 通过被测网络后获得的稳态响应电压

^① 收稿日期: 2014-03-08(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61201419)

$u = A(\omega) A_1 \cos[\omega t + \varphi(\omega)]$ 。

假设模拟乘法器增益系数为 K , 则经过模拟乘法器后, 同相分量支路的输出为:

$$\begin{aligned} u_I &= KA_1 \cos \omega t \cdot A_v(\omega) A_1 \cos[\omega t + \varphi(\omega)] \\ &= KA_1^2 A_v(\omega) \left\{ \frac{1}{2} \cos \varphi(\omega) + \frac{1}{2} \cos[2\omega t + \varphi(\omega)] \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

正交分量支路的输出为:

$$\begin{aligned} u_Q &= KA_1 \sin \omega t \cdot A_v(\omega) A_1 \cos[\omega t + \varphi(\omega)] \\ &= KA_1^2 A_v(\omega) \left\{ \frac{1}{2} \sin \varphi(\omega) + \frac{1}{2} \sin[2\omega t + \varphi(\omega)] \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

经低通滤波器 LBP2 滤掉各支路信号中的和频分量, 假设低通滤波器的通带内增益为 B , 则滤波后同相分量与正交分量分别为:

$$I = \frac{1}{2} KA_1^2 A_v(\omega) B \cos \varphi(\omega) \quad (3)$$

$$Q = \frac{1}{2} KA_1^2 A_v(\omega) B \sin[-\varphi(\omega)] \quad (4)$$

I、Q 两路信号经 ADC 采样后, 在 STM32 中进行数据处理, 通过计算可得相移与电压增益分别为:

$$\varphi(\omega) = -\arctan\left(\frac{Q}{I}\right) \quad (5)$$

$$A_v(\omega) = \frac{2\sqrt{I^2 + Q^2}}{KA_1^2 B} \quad (6)$$

设计中使乘法器增益系数 K 、正交信号振幅

的平方 A_1^2 与低通滤波 LBP2 通带内增益 B 三者之积为 2, 可以很方便地计算出 A_v 。针对点频输入信号, 利用式(5)、(6)可以获得该频率信号通过被测网络的电压增益和相移, 而针对扫频输入信号, 则可以获得被测网络的幅频特性和相频特性曲线。

图1中加法电路的作用是进行电平调整, 为后续的 ADC 数据采集提供合适的信号电压, 本设计采用 STM32 片内 ADC 进行模/数转换, 其电压测量范围为 0.0 ~ 3.3V。I、Q 两支路信号通过模拟乘法器和低通滤波后, 获得信号电压的范围为 -1.0 ~ +1.0V, 因此需经加法电路抬高其电平, 使其满足采样要求。AD 转换后, 应用 STM32 对数据进行处理, 并通过 LCD 显示幅频和相频特性。

2 硬件电路

2.1 正交扫频信号产生电路

采用数字频率合成芯片 AD9854 产生扫频信号, 该芯片在高稳定度时钟的驱动下, 可产生频率、相位、幅度可编程的正、余弦信号, 其允许输出的信号频率高达 150MHz^[4]。笔者对 AD9854 外围电路的设计如图2所示。AD9854 的参考时钟引脚 69 连接 30MHz 有源晶振, 通过程序设置片内锁相环, 对其进行 10 倍频, 可获得 300MHz 的系统时钟。

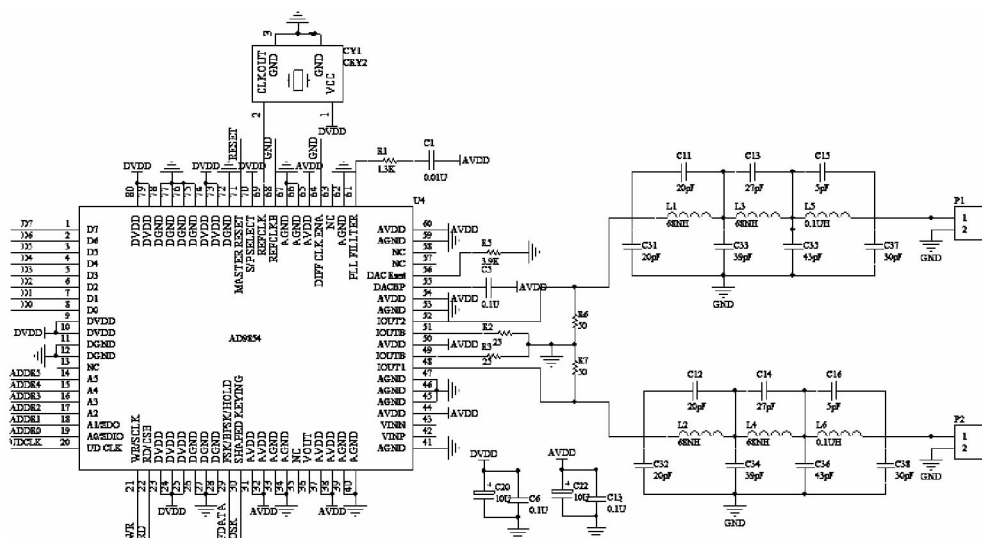


图2 正交扫频信号产生电路

AD9854 芯片内部带有两个高速的正交 DAC, 可同时输出 I、Q 两路正交信号, 两 DAC 输

出通过相位补偿互相影响, 保持 90° 的相位差。AD9854 的 I、Q 两路 DAC 满量程输出电流的幅度

由第 56 引脚连接的电阻 R_{SET} 控制^[5], R_{SET} 的阻值计算公式如下:

$$R_{SET} = 39.3 / I_{OUT} \quad (7)$$

其中 I_{OUT} 为 DAC 满量程输出电流的振幅, 该参数需合理设置, 以使正交 DAC 获得最佳的窄带无杂散动态范围。本设计中 R_{SET} 电阻取 $3.9k\Omega$, 则 I_{OUT} 为 $10mA$ 。图 2 中 I、Q 两路连接输出电阻 $R5$ 、 $R6$ 均为 50Ω , 则 DDS 输出最大电压幅值为 $500mV$ 。

I、Q 两路 DAC 的正交信号输出端 I_{OUT1} 、 I_{OUT2} 需接低通滤波器, 笔者设计了七阶椭圆低通滤波器, 该滤波器过渡带下降迅速, 其截止频率为 $100MHz$, 通带波纹则为 $0.05dB$, 阻带最小衰减为 $50dB$ 。该椭圆滤波器主要用于平滑信号, 同时滤除高频干扰和 DDS 谐波杂散信号。

2.2 STM32 与 AD9854 接口电路

采用低功耗单片机 STM32F103 作为任务控制核心, 其与 AD9854 的接口电路如图 3 所示。STM32F103 是一款基于 ARM CortexTM-M3 内核的 32 位标准 RISC 处理器^[6], 具有 32 位硬件除法器 and 单周期乘法器, 具有强大的数据处理和运算能力, 满足本设计中关于数据处理部分的要求。且其 I/O 端口丰富, 还具有 3 个 12 位的 ADC, 便于数据采集^[7]。同时该芯片采用 $3.3V$ 单电源供电, 可直接对 AD9854 的引脚进行读/写操作, 无需额外的电平转换电路, 简化了硬件设计。

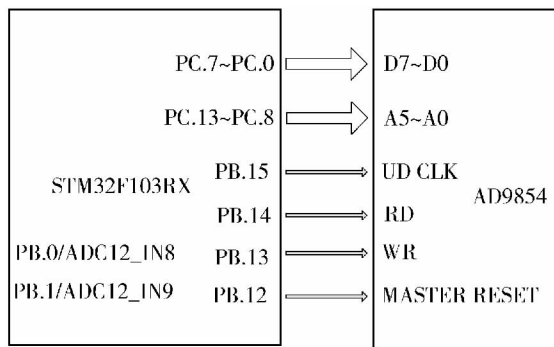


图3 STM32 与 AD9854 的硬件连接

STM32F103 与 AD9854 之间采用并行通信方式, AD9854 的八位双向并行编程数据输入端口 $D[7:0]$ 与 STM32F103 的 PC 口低 8 位相接, AD9854 的六位并行地址总线输入引脚 $A[5:0]$ 与 STM32F103 的 PC $[13:8]$ 相接。AD9854 内部设有 40 个 8 位寄存器, 地址范围为 $00H \sim 27H$, 用

于存储控制字与状态字。通过向这些内部寄存器写入数据, 可以实现对 AD9854 的工作控制, 包括工作模式、输出信号频率、相位及幅度等。AD9854 的控制字可通过 STM32 设定寄存器地址 $A[5:0]$ 和数值 $D[7:0]$, 在 WR 信号的下降沿和上升沿写入。

2.3 模拟乘法器电路

乘法电路设计采用高速模拟乘法器 AD835, 它是一款完备的四象限电压输出模拟乘法器, $3dB$ 带宽达到 $250MHz$, 且乘积噪声低, 其外围电路设计如图 4 所示。AD835 的输入电压范围为 $-1.0 \sim +1.0V$, 具有两个差分输入端, 分别为 $X1$ 、 $X2$ 和 $Y1$ 、 $Y2$, 设计中将差分输入的一端接地, 另一端接乘法信号。该芯片将 X 、 Y 两个输入信号相乘后与 Z 引脚输入电压相加, 再经放大电路, 由 W 引脚输出。为保证 AD835 乘法器的乘性系数 $K=1$, $R1$ 、 $R2$ 的接法如图 4 所示。调整 $R2$, 使 $R1/R2=20$, 此时乘法器的输出 $W=XY+Z$, 将 Z 端接地, 只进行乘法运算, 则最终输出 $W=XY$ 。设计中为了保证输入 AD835 的信号 X 、 Y 满足幅值要求并且不包含直流分量, 在低通滤波器 LBP1 后, 增加一级由超高速运放 AD8009 构成的同相比值放大器, 并采用隔直电容去除信号中的直流分量。

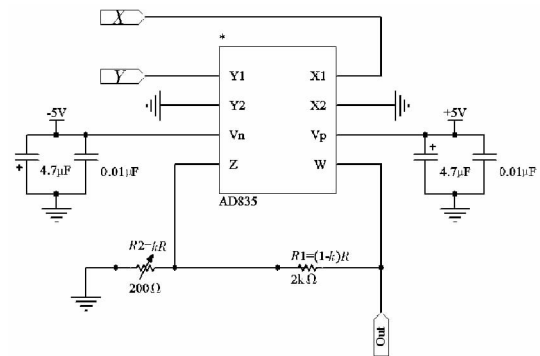


图4 模拟乘法器外围电路

2.4 二阶有源低通滤波器

低通滤波器 LBP2 采用二阶有源低通滤波器, 该滤波器的作用是滤掉正交调制过程中产生的频率为 2ω 的信号分量。设扫频时间为 T_s , 共扫描 N 个频点, 则扫描每个频点的时间为 T_s/N , 选取 4 倍时间常数, 低通滤波器的截止频率 $f_c = 4N/T_s$, 本设计中扫频时间 T_s 取 $2s$, 频点数最大取 500, 计算得 f_c 为 $1kHz$ 。为保证余量, 设计中选

取截止频率 $f_c = 2\text{kHz}$ 。笔者采用精密运算放大器 OP27 设计二阶 Butterworth 低通滤波器,电路的拓扑结构采用 Sallen-Key 结构,且电压增益为 2。

3 软件部分

系统的软件部分主要包括系统主程序、键盘扫描子程序、AD9854 控制子程序、模/数转换子程序及液晶显示子程序等。主程序首先进行系统初始化,配置 STM32 的 GPIO 端口,初始化 LCD、AD9854 和片内 ADC,然后等待按键输入,进行测量模式选择。模/数转换子程序对片内 ADC 进行配置,并实现点频、扫频测量数据采集存储和多次采样确认。液晶显示子程序完成幅频、相频特性的显示、清屏及字符显示等功能。AD9854 控制子程序完成 DDS 芯片工作模式选择、正交扫频信号频率设置及扫频信号振幅设置等功能。软件主程序流程如图 5 所示。

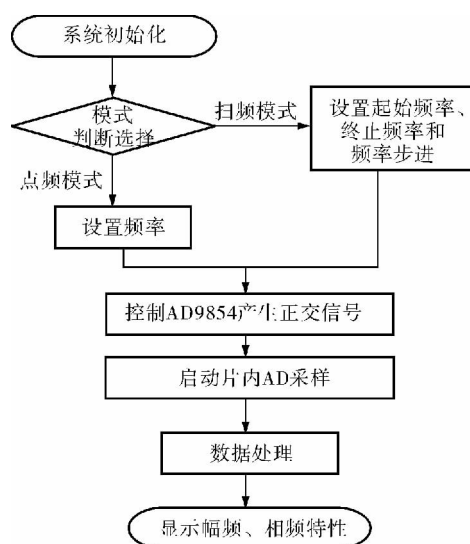


图5 主程序流程

限于篇幅,只列出关于 AD9854 工作模式设置和正交信号幅度、频率设置的部分程序代码:

//设置 AD9854 工作模式选择为 single-tone,对参考时钟进行 10 倍频,由 PIN20 引脚外部刷新频率

```
unsigned char mode1[4] = {0x00, 0x4A, 0x00, 0x60};
```

//默认初始频率 1MHz,频率字 FW 根据公式 $f_{OUT} = (f_{SYCLK} \times FW) / 2^N$ 计算得出

```
unsigned char freq[6] = {0x00, 0xDA, 0x74, 0x0D, 0xA7, 0x41}; //信号频率控制字
```

```
unsigned char signalAM1[2] = {0xFF, 0xFF}; //信号幅度控制字
```

```
unsigned char signalAM2[2] = {0xFF, 0xFF}; //信号幅
```

度控制字

```
AD9854_Reset();
```

AD9854_SetSpecialWord(mode1); //设置 AD9854 的工作模式

AD9854_SetOutkeyI(signalAM1); //设置 I 支路信号振幅

AD9854_SetOutkeyQ(signalAM2); //设置 Q 支路信号振幅

```
AD9854_SetFreq1( freq); //设置正交信号频率
```

```
AD9854_IOUpdate(); //频率刷新
```

其中调用的部分子程序如下:

```
void AD9854_SetSpecialWord( unsigned char * SWord) //向地址寄存器 0x1D ~ 0x20 写入控制字,设置 AD9854 的工作模式
```

```
{ unsigned char i;
  unsigned char Special_addr = 0x1D;
  for( i = 0; i < 4; i++)
  { WriteByte( Special_addr + i, SWord[i]);
    delay_us( 200); } }
```

```
void AD9854_SetFreq1( unsigned char* freq) //向地址寄存器 0x04 ~ 0x09 写入频率控制字 1
```

```
{ unsigned char i;
  unsigned char freq_addr = 0x04;
  for( i = 0; i < 6; i++)
  { WriteByte( freq_addr + i, freq[i]);
    delay_us( 200); } }
```

4 结束语

笔者设计的频率特性测试仪,可对双端口网络进行点频测量和 1 ~ 50MHz 的扫频测量,扫频模式可手动预置测频范围和步进频率值。其输出结果可通过液晶显示,系统界面友好,工作稳定。本设计基本实现了数字化,并满足低功耗的要求。

由于扫频测量法是一种稳态测量方法,它需要等到被测网络输出达到稳态后才能测量。因此本设计中并没有设置太快的扫频测量速度,并且在 STM32 发送频率控制字与获取 ADC 采样转换值之间进行了适当的延时。否则如果被测网络响应建立时间长,而扫频测量速度太快,会形成建立误差,使测得的特性曲线畸变失真。

参考文献

- [1] 谢敏,刘艺,徐闯,等.基于 AD9851 及 FPGA 的网络频率特性测试仪[J].化工自动化及仪表,2011,38(7):834~836.
- [2] 伍玉,夏新凡.频率特性测试仪的设计[J].电子设

- 计工程 2009 ,17(2) : 30 ~ 32.
- [3] 袁辉,李延香. 基于 AD9854 的雷达信号源设计与实现[J]. 现代电子技术 2011 ,34(21) : 23 ~ 27.
- [4] 王成华,叶佳. 基于 AD9854 的多功能信号源设计[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版) ,2006 ,7(2) : 126 ~ 129.
- [5] 马陆,乔卫民,范进,等. 基于 AD9854 的高精度高频信号发生器[J]. 微计算机信息 2007 ,23(3) : 186 ~ 187.
- [6] 张旭,元学广,李世光,等. 基于 STM32 电力数据采集系统的设计[J]. 电子测量技术 2010 ,33(11) : 90 ~ 93.
- [7] 孙启富,孙运强,姚爱琴. 基于 STM32 的通用智能仪表设计与应用[J]. 仪表技术与传感器 2010 ,4(10) : 34 ~ 36.

Design of Frequency Characteristics Tester Based on AD9854 and STM32

DONG Bao-yu , XUE Yan-bing , MA Chi , SHENG Hu

(College of Electrical and Information Engineering , Dalian Jiaotong University , Dalian 116028 , China)

Abstract Taking STM32 MCU as the task control and data processing center and basing on the zero-IF quadrature demodulation theory , a frequency characteristics tester was designed , in which , the AD9854 direct frequency synthesizer chip generates the sweep frequency signal source and the two orthogonal sine waves (I and Q) which passing through the amplifier , analog multiplier and the low pass filter till to be collected by ADC in STM32; and through computation , the testing network's amplitude-frequency and phase-frequency characteristics can be obtained. The frequency characteristic tester can implement point frequency measurement and 1MHz to 50MHz sweep measurement , and its frequency measurement range and stepping frequency can be manually set , as well as the frequency characteristics curves can be displayed on a 320x240 LCD screen.

Key words frequency characteristic tester , STM32 MCU , zero-IF quadrature demodulation , direct frequency synthesizer

(上接第 654 页)

- [9] 王洪刚,韩文秀. 基于 MATLAB 小波工具箱的开发与应用[J]. 微型机与应用 2002 ,5(2) : 52 ~ 54.
- [10] 孙涛,刘晶璟,孔凡,等. 小波变换和希尔伯特 - 黄变换在时频分析中的应用[J]. 中国水运 2006 ,11(4) : 111 ~ 113.
- [11] 高云超. 希尔伯特-黄变换方法的仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学 2005.

Leakage Detection and Location of Pipelines in Heat Supply Network Based on EMD and Wavelet Transform

LI Hong , SHEN Rui-qi

(School of Electrical Engineering and Information , Northeast Petroleum University , Daqing 163318 , China)

Abstract The acoustic detection-based method for pipeline leakage detection and location in heat supply network was studied , and the acoustic wave method-based experimental design scheme and location principle were presented; making use of MATLAB-based wavelet function and the EMD decomposition , separating original data frequency step by step was kept till singular point information can be extracted to denoise and determine the pipeline leakage. Comparing two methods can get the optimal solution.

Key words leakage detection , wavelet transform , empirical mode decomposition , intrinsic mode function