



面向实践教学的模块化幅频特性测试仪的设计与实现

李大宇, 张 宇, 韩永光

(东北大学 计算机科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘要: 电子系统设计是培养电子信息类相关专业学生实践创新能力的重要一环。模块化设计方法将系统电路设计成可拓展的功能电路模块, 设计过程中重视电路设计、程序设计过程, 有利于提高学生的设计能力、培养学生的创新意识, 在学生的实践过程中发挥了重要作用。该设计根据正交乘积法测量幅频特性的原理实现了一套模块化的幅频特性测试系统, 采用 Tiva C LaunchPad 单片机评估板做主控制器, 控制 DDS 芯片 AD9854 产生正交扫频信号, 采用模拟乘法器 AD835 设计正交解调电路, 利用单片机及其片上模数转换器 (ADC) 完成对两路正交信号的采样和数据处理。经实验测试分析, 设计方案可行, 模块化的系统设计适合于应用在实验或课程设计等教学环节。

关键词: AD9854; 幅频特性; 模块化设计; 实践能力培养

中图分类号: TN492

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20190132

Design and Implementation of Modular Amplitude-frequency Characteristic Tester for Practice Teaching

LI Dayu, ZHANG Yu, HAN Yongguang

(School of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Electronic system design is of great importance to cultivate the practical and innovation ability of students majoring in electronic and information engineering. The system circuit is designed as an expandable functional circuit module by modular design method, during which the circuit design and programming design processes are valued. As a result, it contributes to improve students' design ability and innovation cultivation, and plays a critical role in their practice process. According to the principle of measuring amplitude-frequency characteristics by the orthogonal product method, a testing system of modular amplitude-frequency characteristic is designed. The evaluation board of Tiva C LaunchPad is used as the main controller to control the AD9854 chip to produce quadrature frequency sweeping signal, and the analog multiplier AD835 is used to design quadrature demodulation circuit. The two quadrature signals are sampled and processed by micro control unit and the on-chip analog to digital converter (ADC). It is analyzed by the experimental test that the scheme is feasible and the modular system design is appropriately applied to the experiment, course design and other teaching procedures.

Key words: AD9854; amplitude-frequency characteristic; modularization design; training of practical ability

电子系统设计实践是旨在培养学生创新实践能力、加深学生对理论知识理解的一门实践课程。在学生具备一定的电子仪器基本使用能力、简单电路调试能力的基础上, 该课程应侧重培养学生的电子系统调试能力和设计能力^[1-3]。目前电子实践课程普遍基于相对固定的实验平台和试验箱进行一些验证原理的实验。这一类实验项目较为固定, 学生没有参与系统的设计、调试等工作,

对学生真正掌握理论知识、培养学生的实践能力没有明显的帮助。模块化设计就是将系统按照功能分为子电路模块, 各模块的接口采用标准化设计, 同一模块可以在不同的电路设计中使用^[4-5]。学生自主进行各个模块的焊接调试、编程和系统整体的设计和调试。

频谱分析是电子信息类学生的专业基础知识, 贯穿于电子信息工程、通信工程相关专业的课

收稿日期: 2019-04-02; 修回日期: 2020-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(21874016); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N181604008)。

作者简介: 李大宇(1981-), 男, 博士, 讲师, 主要从事仪器电子学方向教学和科研工作。

程体系之中。用于频域测量的电子系统包括频谱仪、扫频仪、调幅通信接收机等,其基本原理和实现方法是电子信息类专业学生所必须掌握的^[6-8]。

幅频特性测量是扫频仪的基本功能。模块化幅频特性测试仪的整个系统包括信号源模块、滤波电路模块、正交解调模块、单片机和显示模块等^[9-12]。学生可以在实践过程中提升系统整体的设计能力、调试能力、编程能力,提升电路模块调试能力,提升团队协作能力。整个系统还涉及模电、数电、高频电子线路、单片机与嵌入式系统、信号与系统和通信原理等课程的理论知识,能够让学生们从理论到实践完整地完一个电子系统的实现。

1 实验执行方案与措施

1.1 综合性的合作实验为主体

将模块化幅频特性测试仪系统涉及的实践参考资料作综合分析,并参考东北大学实验室条件和培养方案,对该实验课程进行系统规划,以综合性实验代替以往实验室的“插线”实验。通过实验将高频电子线路、模电、数电、微控制器等知识结合起来,考验学生的设计能力、编程能力和动手能力,让学生在合作中了解课堂里学到的知识点的实际意义,提高学生的协作能力。综合性实验的开展,要求学生逐次按照以下步骤去完成。

1) 方案论证

要求学生查阅资料,以组为单位根据系统设计框图开展设计方案论证,完成整个系统的具体实现方案,并明确小组每个人的工作内容。

2) 仿真工作

通过 Multisim、Tina-TI 等软件对设计好的电路进行模拟仿真,根据仿真结果进行调整确定最终电路;用 MATLAB 对系统原理与结果进行仿真。

3) 控制与显示程序的编写

完成对系统控制程序的编写,这一部分考察了学生的单片机编程能力与芯片手册的阅读能力。

4) 电路的焊接与调试

通过电路的安装、调试、数据测量和对实验现象的合理分析,判断设计的性能与效果,进一步提高学生的综合测试与分析能力。

5) 实验报告撰写

根据实验结果,完成实验报告。

1.2 实验实施过程

1) 加强对学生预习成果的要求

加强实验的预习环节,强调学生自主学习、

自主实验。要求学生在正式实验开始之前理解实验的主要原理,明确实验课程中所涉及的知识并提前预习。教师对学生的预习情况进行检查评分。

2) 以小组为单位进行实验

实验要求 3 人一组完成系统设计。在实验正式开始前学生可以自行组队或者上报教师由教师统一安排,确保各队伍中均有同学擅长或者感兴趣单片机编程和硬件系统设计。实验结束后每名同学需要对自己所负责的部分进行总结,并对实验过程中所学到的知识与遇到的困难进行总结。

3) 考核评价方案

学生实践能力的培养包括基本实验技能、分析问题能力以及解决问题能力的培养。因此本课程成绩评定方案采取将平时成绩与验收成绩相结合的方法。平时成绩由预习情况和实验过程环节两部分组成;验收成绩由系统的完成度、系统性能和验收报告两部分成绩组成。通过以上评价措施,希望能够加强学生们对实验课程的准备工作以及使用实验仪器的熟练程度,在实验中培养学生发现问题、解决问题的能力 and 学生的代码编写能力、整体系统的设计能力以及协作能力。

1.3 模块化的硬件系统

采用一个个硬件模块替代以往的接线插线的整块实验板。所谓模块化,也就是将复杂系统细化为一个个基础功能电路并设计成小型 PCB 板,比如运算放大器模块、乘法器模块、滤波器模块等。并且各个子模块都采用具有统一标准的接口实现电源和信号的连通,通过一个个模块组合成复杂的系统。与大型的实验板相比,模块化电路的功能有着基础功能单一的特点。而且各个模块之间用统一的标准化接口,使得模块可以用在不同电路系统中,同时具备了一定的拓展性。这样做的好处就是学生在理解电路原理之后可以根据需要更改参数,易于使用。

使用这些基础功能的电路模块,学生可以灵活方便地构成多种电子系统或其中一部分内容,也可以在实验中比较不同模块、不同芯片之间的性能与作用,易于激发学生的兴趣和自主探求与研究的能力。

2 系统设计

2.1 系统原理

本系统基于乘积法测量频率特性的原理^[13],

设计原理框图如图 1 所示。

首先产生 $U \cos \omega_m t$ 和 $U \sin \omega_m t$ 两路正交信号, 其中 U 为电压幅值。设正交扫频信号源在 ω_m 频率点时产生激励电压 u_i 和两路正交基准电压 u_x 和 u_y 分别为:

$$\begin{cases} u_i = U \cos \omega_m t \\ u_x = U \cos \omega_m t \\ u_y = U \cos \left(\omega_m t + \frac{\pi}{2} \right) \end{cases}$$

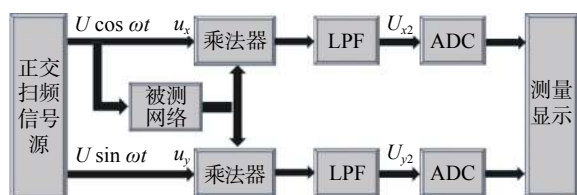


图 1 系统原理框图

被测网络的转移电压比函数为:

$$A(j\omega) = A(\omega)e^{j\theta(\omega)}$$

式中, $A(\omega)$ 为幅度, $\theta(\omega)$ 为相位。则经被测网络的稳态响应电压应为:

$$u_2 = A(\omega_m) U \cos[\omega_m t + \theta(\omega_m)]$$

设乘法器的乘法系数为 K , 低通滤波器的增益为 K' , 其与 U 的乘积为 1, 则滤波后分别得到 $KK'u_{x2}$ 和 $KK'u_{y2}$ 的直流分量为:

$$\begin{cases} U_{x2} = A(\omega_m) U [\cos \theta(\omega_m)] / 2 \\ U_{y2} = A(\omega_m) U [\sin \theta(\omega_m)] / 2 \end{cases}$$

单片机将 U_{x2} 和 U_{y2} 通过模数转换器 (ADC) 采集, 根据二值可计算出待测值为:

$$\begin{cases} A(\omega_m) = \sqrt{U_{x2}^2 + U_{y2}^2} / U \\ \theta(\omega_m) = \arctg(U_{y2} / U_{x2}) \end{cases}$$

2.2 系统框图

系统由主控单片机控制 DDS 芯片产生两路正交扫频信号, 其中一路信号通过待测网络后, 分别与两路基准信号混频, 再经低通滤波得到成分相同的两路正交分量的直流信号, 送到单片机上经过 ADC 采样和数据处理, 计算出相位和幅度, 最后经示波器显示待测网络的幅频特性曲线和相频特性曲线。该系统总体框图如图 2 所示, 可实现最高至 100 MHz 正弦波信号的扫频输出。

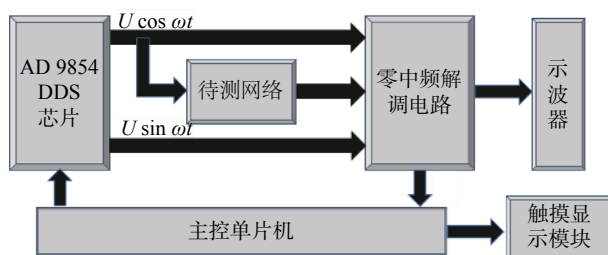


图 2 系统总体框图

3 系统组成

系统的硬件部分主要包括 DDS 模块、信号调理模块和显示模块等。DDS 模块与显示模块部分主要涉及数字电路与微控制器方面的知识, 考查学生阅读手册的能力和单片机代码编写能力; 信号调理模块主要涉及高频电子线路课程中混频这一部分的内容, 考验学生分析问题、解决问题的能力。

3.1 DDS 信号源

本系统正交扫频信号源的两路正交信号是由 DDS 芯片 AD9854 产生的, 该芯片采用先进的 DDS 技术, 内部配有两个高速、高性能的正交 D/A 转换器, 通过数字化编程可以输出 I/Q 两路正交信号, 其 DDS 内核提供 48 位的分辨率 (系统时钟 300 MHz, 分辨率可达 1 μHz), 还集成了两个 14 位的寄存器、两个 12 位数字正交可编程幅度调制器。在高精度、高稳定度的时钟源作用下, AD9854 将产生一组高稳定的频率、相位、幅度可编程的正弦和余弦信号, 作为本振用于通信、雷达等方面。AD9854 允许输出的信号频率可达 150 MHz, 数字调制输出的信号频率可达 100 MHz。通过数字编程可输出两路正交信号 I 和 Q 。

3.2 信号调理电路

混频电路设计采用模拟乘法器芯片 AD835, 它是一个四象限的电压输出乘法器, -3 dB 带宽宽达 250 MHz, 且乘积噪声低, 输出电压范围为 -2.5~+2.5 V, 可驱动负载电阻为 25 Ω。其电源电压为 ±5 V, 电流消耗为 25 mA, 工作温度范围为 -40~+85 ℃。

AD835 具有两个差分输入端 X1、X2 和 Y1、Y2 (其中 X1、Y1 为非反相输入端, X2、Y2 为反相输入端)。本设计中将 X2、Y2 接地, 由 X1、Y1 输入的信号 (x_{in} , y_{in}) 相乘再与 Z 端输入的信号 (z_{in}) 相加, 最后由 W 端输出 (w_{out}), 即 $w_{out} = x_{in}y_{in} + z_{in}$ 。本设计中将 Z 端 (求和输入端) 接地, 输出信号 $w_{out} = x_{in}y_{in}$ 。混频电路示意图如图 3 所示。

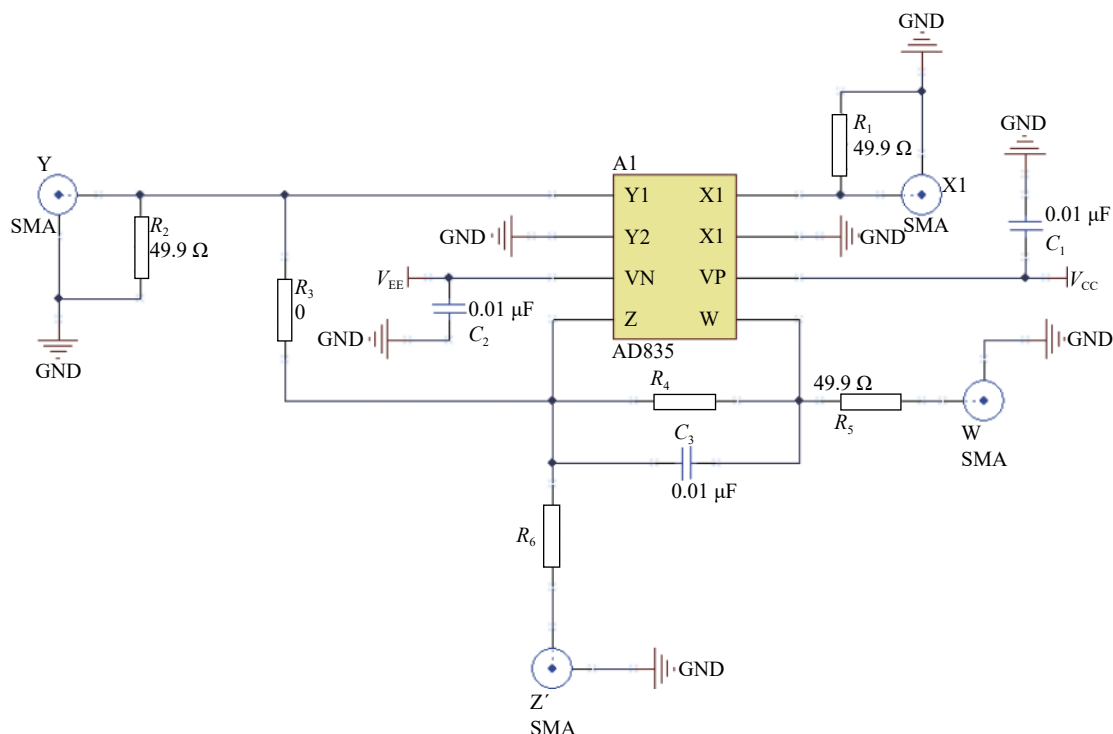


图3 混频电路

OPA227 运算放大器兼具低噪声、宽带宽和高精度等特性, 因此是同时需要交流和精密直流性能应用的理想选择。具有稳定的单位增益并具有高压摆率($2.3 \text{ V}/\mu\text{s}$)、宽带宽(8 MHz)、低输入偏置电流(10 nA (最大值))、低失调电压($75 \mu\text{V}$ (最大值))和低噪声($3 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$)。

本系统中, 低通滤波器的作用是滤除掉正交解调过程中产生的频率为 2ω 的频率分量, 因此所设计的低通滤波器的截止频率越低越好。由于基本没有低频噪声, 本设计选用 OPA227 设计截止频率为 1 Hz 的一阶低通滤波器即可满足要求。

4 系统测试

4.1 测试仪器

数字万用表(FLUKE-15B)、示波器(Tektronix DPO 4104B-L)、信号发生器(RIGOL DG4202)、频谱分析仪(RIGOL DSA815)。

4.2 测试结果

系统设计完成后, 进行实物测试。DDS 能产生的 $0 \sim 100 \text{ MHz}$ 的扫频信号。示波器测得扫频信号输出波形如图 4 所示。

DDS 是通过改变频率控制来改变相位累加器的相位累加速度, 因此其输出信号必定含有大量的杂散谱线。在整个 DDS 的实现过程中, 低通滤波器除了滤除上述的高频信号以外还有去除杂散的作用。

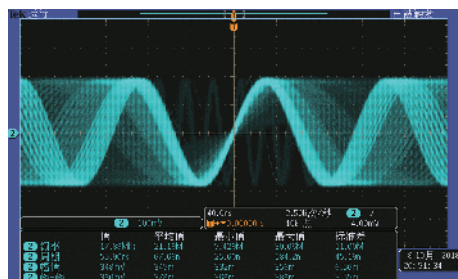


图4 扫频信号

因此, 低通滤波器的滤波特性的好坏直接影响整个 DDS 的技术指标。椭圆低通滤波器是一种零、极点型滤波器, 它在有限频率范围内存在传输零点和极点。它的通带和阻带都具有等波纹特性, 因此通带、阻带逼近特性良好, 且它所需用的阶数较低, 过渡带比较窄。DDS 经过椭圆滤波器输出的两路正交 I 、 Q 信号及其相位关系如图 5 所示。

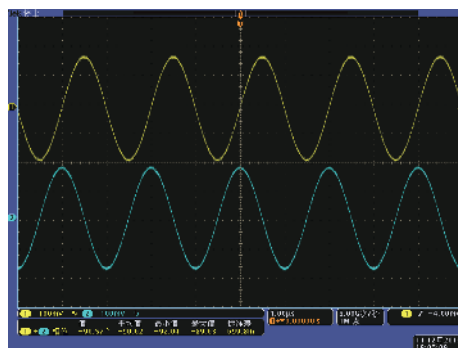


图5 两路正交信号相位关系

分别用所设计的系统和频谱分析仪测量待测网络的幅频特性曲线,将系统测得的幅频特性曲线与频谱分析仪测得的幅频特性曲线进行比对。如图 6 和图 7 所示分别为待测网络——RLC 滤波器的测试结果,滤波器的中心频率为 15 MHz,扫频范围为 1~40 MHz。

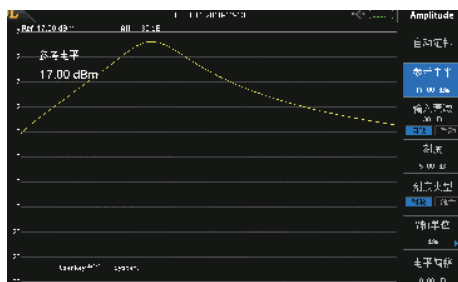


图 6 频谱分析仪测得幅频特性曲线

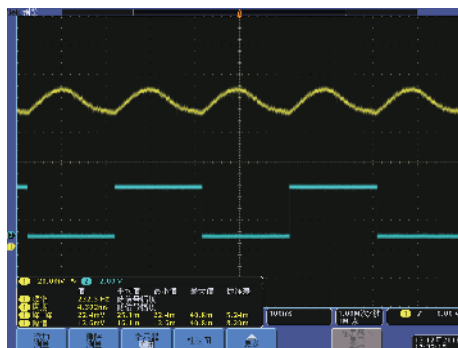


图 7 系统测得幅频特性曲线

由于本系统的信号频率较高,各模块采用 SMA 输入输出接口,模块之间的互联使用同轴线或直接用双通。各模块实物如图 8 所示。

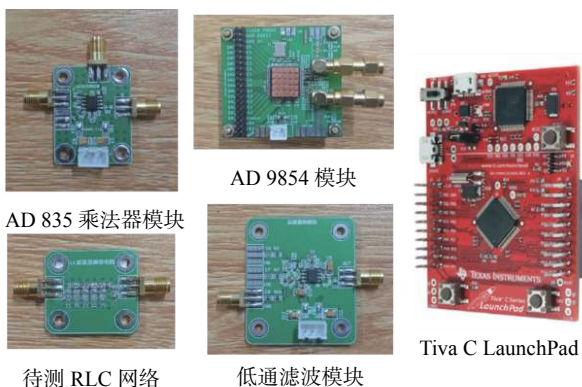


图 8 各子模块实物

5 结束语

本文采用 DDS 芯片 AD9854 作为正交扫频信号源,最终可以实现对待测网络进行点频以及 1~80 MHz 频率范围内扫频等测量。被测网络的幅频

特性曲线可以清晰地显示在示波器上,幅频和相频特性曲线通过单片机的采集与处理显示在液晶屏上。

系统采用模块化的思想,大大地缩小了整体体积和重量,降低了系统成本,适用于在实验室以小组为单位开展。此外,系统提供了大量外围接口,方便进行功能拓展,有利于学生发挥主动性,大胆探索,实现更多功能。该设计将系统按照功能划分为几个模块,涉及电子系统整体的设计和调试、单片机程序编程等工作,能够提升学生的实践能力和创新能力,适用于实验教学或课程设计等教学环节。

参考文献

- [1] 王越,韩力,沈伯弘,等.大学生电子设计竞赛的开展与学生创新能力的培养[J].中国大学教学,2005(10):4-6.
- [2] 杨弈,徐鹏,彭小峰.电子设计竞赛与实践教学改革[J].实验室研究与探索,2013,32(4):172-175.
- [3] 姚有峰,赵江东,汪明珠.从电子设计竞赛谈电子类实践教学改革[J].实验技术与管理,2009,26(7):131-132.
- [4] 林华杰,包涛,都兴强.ZHT-03基于“高频电子积木”的实验教学模式改革[J].实验室科学,2017,20(4):110-113.
- [5] 徐雪慧,王川.电子积木式射频识别技术实验系统开发及其在教学中的应用[J].工业和信息化教育,2015(2):62-65.
- [6] 李小亮,宋伟中,王照平,等.基于正交调制的频率特性测量系统改进设计[J].实验技术与管理,2017(5):109-114.
- [7] 戴明,朱慧萍,陈思平,等.基于线性扫频激励的磁声电导率检测系统研究[J].生物医学工程研究,2018(3):243-247.
- [8] 徐伟,韩笑,施元,等.远程幅频特性测试仪的设计[J].仪表技术与传感器,2018(6):19-23.
- [9] 董宝玉,薛严冰,马驰,等.基于AD9854与STM32的频率特性测试仪设计[J].化工自动化及仪表,2014(6):655-659.
- [10] 王敏.基于AD9854的简易频率特性测试仪[J].数字技术与应用,2013(9):69-70.
- [11] 梁志勋,闭吕庆.高精度简易频率特性测试系统设计[J].现代计算机,2018(10):73-76.
- [12] 张学斌,钱莹晶,张仁民,等.基于数字零中频解调技术的便携式宽频扫频仪研制[J].电子器件,2017,40(1):71-76.
- [13] 阙继泰.用正交乘法测量频率特性[J].北京理工大学学报,1992(3):86-90.

编辑 何雨莲