

# 基于 FPGA 与 Matlab 的数字正交解调器的设计

周之丽, 孟令军, 王晓丹, 张晓春

(中北大学 电子测试技术国家重点实验室 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

**摘要:** 为有效提取测控系统输入信号的幅度和相位信息, 设计了基于 FPGA 与 Matlab 的信号数字正交解调器; 在 Matlab/Simulink 环境中产生一路调幅信号, 并在此环境下利用 5 个直接 1 型的 4 阶 FIR 滤波器节搭建了 20 阶 FIR 滤波器; 利用 FPGA 查表法实现数控振荡器 (NCO), 并控制 1 路调幅信号与正交的正、余弦信号分别进行数字混频处理; 对经 FPGA 数字混频处理后的两路倍频分量和基频分量信号进行滤波处理, 经处理后的信号在 FPGA 的控制下进行相加处理; 最后在硬件平台上进行了仿真测试实验, 验证了该方案的正确性和可行性。

**关键词:** 现场可编程逻辑门阵列; 矩阵实验室; FIR 滤波器; 数控振荡器; 正交解调

## Design of Digital Quadrature Demodulator Based on FPGA and Matlab

Zhou Zhili, Meng Lingjun, Wang Xiaodan, Zhang Xiaochun

(Ministerial Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, State Key Laboratory For Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** For extracting the amplitude and phase information of the input signal of the control system effectively, this paper designs a signal digital quadrature demodulator based on FPGA and MATLAB. Producing a signal amplitude and using 5 order FIR filters of 4 stairs to build a order FIR filter of 20 stairs in MATLAB/Simulink environment; realizing a Numerical Controlled Oscillator (NCO) basing on a looking up table method of FPGA, and carrying on a digital mixing process between a amplitude modulation signal and the positive/cosine signals in the control of FPGA; filtering the frequency component signal and the fundamental frequency component signal after the process of digital mixing, then getting two output signals, adding the two output signals. Finally the simulation experiment, which verifies the correctness and feasibility of the scheme, is carried out on the hardware platform.

**Keywords:** FPGA; Matlab; FIR filter; numerical controlled oscillator (NCO); quadrature demodulation

### 0 引言

随着数字通信技术的发展, 数字解调技术越来越受到人们的关注。数字解调是将经过频谱搬移后适合在信道中传输的带通信号还原成数字基带信号, 其在数字通信系统中占据着重要的地位, 数字解调器的应用需求也越来越广泛, 对其解调性能的要求也越来越严格。其中数字信号的还原主要通过接收端运用解调器实现, 但是采用传统的数字相干解调方法, 即用同频同相的载波去相干解调, 存在当不满足同频同相条件时, 解调输出会出现严重失真的缺点<sup>[1-2]</sup>。因此, 采用新的解调和滤波方法是关键, 而数字正交解调的出现, 在很大程度上克服了这一缺点。通过利用 FPGA 资源丰富、编程灵活的优点<sup>[3]</sup>, 本文提出了一种基于 FPGA 和 Matlab 的数字正交解调器的设计, 其能够实现数字正交信号的准确还原。通过 Matlab 建立 AM 模型和搭建 FIR 滤波器, 提高了解调器的性能。

### 1 总体方案设计

逻辑控制单元主要完成数字信号正交解调的功能, 采用查表法实现数控振荡器 (NCO), 从而产生正交的正/余弦波信号。通过利用 FPGA 内嵌乘法器实现数字信号的混频, 并借助滤波器 IP 核实现 FIR 低通滤波器, 其内部宏模块实现数学

运算。而输入的调幅信号和 FIR 低通滤波器的设计则是通过 DSP Builder 图形化设计实现的, DSP Builder 依赖于 Matlab/Simulink, 以 Simulink 的 Blockset 出现。在 Simulink 中进行图形化设计和功能验证后, 通过 Signal Compiler 把 Simulink 的设计文件 (. mdl) 转换成相应的 FPGA 设计文件 (. vhd)。其总体方案如图 1 所示, 主要包括输入的调幅信号 (AM) 产生、数控振荡器、正余弦列表、数字混频、FIR 低通滤波器以及加法器等模块。

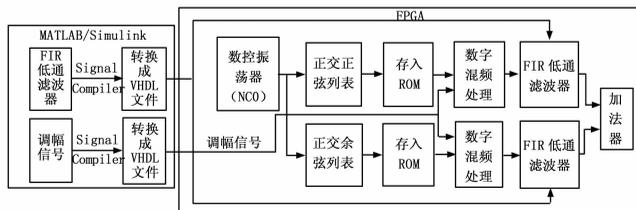


图 1 总体设计方案

### 2 软件设计部分

#### 2.1 MATLAB 软件设计

##### 2.1.1 调幅信号的设计

振幅调制 (AM) 是用调制信号控制载波的振幅, 使之按调制信号的规律变化<sup>[4]</sup>。调幅信号表达式即为:

$$u_{AM} = U_c (1 + m \cos \omega_c t) \cos \omega_c t \quad (1)$$

AM 信号可以用调制信号和载波信号的乘积项来表示, 因此本文设计了以乘法器为核心的频谱线性搬移电路以实现振幅

收稿日期: 2014-08-26; 修回日期: 2014-09-28。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (61004127)。

作者简介: 周之丽 (1987-), 女, 四川泸州人, 硕士研究生, 主要从事电路与系统方向的研究。

调制电路。本文通过在 MATLAB/Simulink 环境中调用 DSP Builder 库搭建 AM 模块, 构建的调幅信号产生系统级模型如图 2 所示。

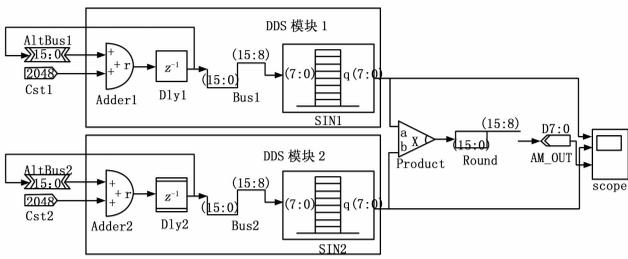


图 2 AM 模型

其中, 搭建的数字频率合成 (DDS) 模块 1 产生载波信号, 其频率受 Cst1 输入端的数据控制; DDS 模块 2 产生调制信号, 调制信号频率受 Cst2 输入端的数据控制。载波信号、调制信号进入乘法器, 取乘法器的输出端高 8 位即为调幅信号 (AM)。本设计中所用的时钟频率是 50 MHz。

载波信号:  $F_{am} = 127 \sin \omega t = 127 \sin(2\pi f_{am} t)$

调制信号:  $F_{dr} = 127 \sin \omega_1 t = 127 \sin(2\pi f_{dr} t)$

载波信号频率:  $f_{am} = 50\ 000\ \text{kHz} / 2^8 \times 2048 \times 1/2^9 = 781.25\ \text{kHz}$

调制信号频率:  $f_{dr} = 50\ 000\ \text{kHz} / 2^8 \times 100 \times 1/2^9 = 38.15\ \text{kHz}$

则 AM 信号表达式为:

$$X(t) = 127^2 \sin(2\pi f_{am} t) \sin(2\pi f_{dr} t).$$

### 2.1.2 FIR 低通滤波器

数字滤波器有两种类型: 有限冲击响应 (FIR) 数字滤波器和无限冲击响应 (IIR) 数字滤波器。对于相同的滤波器设计指标, FIR 数字滤波器具有线性相位, 稳定性好等优点<sup>[5]</sup>。直接 I 型的 FIR 滤波器通过级联得到, 即在滤波器系数可变的情况下, 先设计一个 FIR 滤波器节, 再通过多次调用滤波器节将其级联起来, 从而实现多阶 FIR 滤波器的设计。本文中设计的低通滤波器是 20 阶的, 可以先设计一个直接 I 型的 4 阶 FIR 滤波器节, 再由 5 个 4 阶 FIR 滤波器级联而成。本文以 3 个 4 阶 FIR 滤波器级联为例介绍。

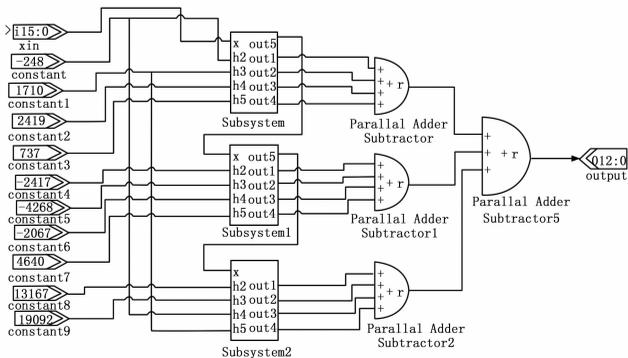


图 3 滤波器节级联图

如图 3 所示是 3 个 4 阶 FIR 滤波器级联的 DSP builder 实现图, 该设计中 “Subsystem”、“Subsystem1”、“Subsystem2” 为 3 个独立的 4 阶 FIR 滤波器, 通过加法器级联后实现高阶 FIR 滤波器。

## 2.2 FPGA 的嵌入式软件设计

FPGA 选用 Altera 公司的 Cyclone II 系列 EP3C16F484C8N 芯片, 该芯片内部有丰富的资源, 包括 504k 的内部 RAM, 56 个 18×18 的可供专用乘法器单元<sup>[6]</sup>, 满足本文的设计要求。本模块实现的功能主要包括数控振荡器、数字混频处理、加法器。

将设计好的调幅信号作为本模块的输入信号, 在 FPGA 中将调幅信号和正交的正/余弦信号分别进行数字混频处理, 将调幅信号分解成了倍频分量信号和基频分量信号。此两路分量信号分别通过 FIR 低通滤波器进行滤波处理, 得到 I、Q 两路正交的基带信号, 最后将两基带信号进行相加处理, 完成正交解调功能。

数控振荡器 (NCO) 用于产生数字可控的正弦波、余弦波, 通常实现方法有实时计算法和查表法, 查表法能有效、简单地实现数控振荡器。数控振荡器在 FPGA 中的实现框图如图 4 所示。

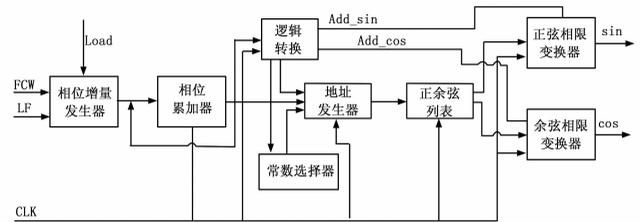


图 4 数控振荡器的 FPGA 实现

在图 4 中, FCW: NCO 的频率控制字; LF: 本振偏移频率, 修正 NCO 的输出频率。相位增量发生器用于计算本振频率和偏移相位增量, 在时钟的推动下相位实现累加, 完成逻辑转换后, 把相位累加器产生的最高两位转换成地址控制信号、象限转换控制信号, 在象限转换器模块实现正交数据的转换功能。

## 3 功能仿真与分析

本设计使用 Quartus II 13.0 进行编译和综合。为了验证本设计的正确性, 采用 SignalTap 逻辑分析仪进行在线逻辑分析, SignalTap II 将测得的信号实时保存于目标器件的 RAM 中, 然后通过器件的 JTAG 端口传送到计算机进行显示。图 5 是调幅信号分别和正、余弦信号混频处理后的仿真波形图。

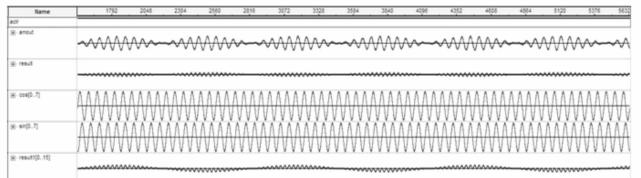


图 5 调幅信号和正余弦信号混频的仿真波形图

在图 5 中, aclr: 清零信号, 低电平清零; sin: 数控振荡器产生的正弦信号; cos: 数控振荡器产生的余弦信号, amount: AM 调幅信号; result1: AM 调幅信号与正弦信号数字混频后的波形; result2: AM 调幅信号与余弦信号数字混频后的波形。由图分析, 实时监测的波形和预测波形是相符合。

在图 6 中, output1: AM 信号与余弦信号数字混频经过滤波的波形; output2: AM 信号与余弦信号数字混频经过滤

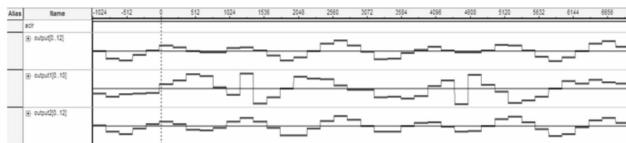


图 6 正交解调器的输出波形图

波后的波形 output2; output; 正交解调的最终波形。正交解调器的波形输出是和正交解调理论输出是一致的。

### 4 结论

本设计实现以 FPGA 为中央控制器, 利用 MATLAB/Simulink 产生 1 路调幅信号以及实现 20 阶 FIR 低通滤波器的设计。本文以高速度高性能的 FPGA 为主 MATLAB/Simulink 为辅的结构简化设计, 缩短数字正交解调器的开发周期。利用 SignalTap 软件对本文设计数字正交解调器进行功能仿真, 其

仿真结果表明本文设计的正交解调器能够有效地提取各测控系统输入信号的幅度和相位信息, 性能稳定, 可靠性高。

### 参考文献:

[1] Langlois J M P, AL-Khalili D. Polyphase Filter Approach for High Performance, FPGA-Based Quadrature Demodulation [Z].

[2] 彭 勇, 陈 菲, 高小明. 基于 FPGA 的数字 B 超检波器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014 (1): 311-313.

[3] 彭柄睿. 基于 FPGA 的数字正交解调与脉冲压缩 [J]. 信息通信, 2014 (1): 54-55.

[4] 孙慧玲, 陈宝锭, 陈华宝, 等. 基于 AD9854 的中频信号正交解调设计 [J]. 赤峰学院学报 (自然科学版). 2014, 30 (3): 68-69.

[5] 凌生强, 廖柏林, 徐澧明, 等. 基于 MATLAB 与 CCS 的 FIR 滤波器的 C 语言实现 [J]. 信息技术期刊, 2012 (6): 27-29.

[6] Altera-Cyclon III Decie-Handbook [DB/OL]. http://www.altera.com.cn/litera-ture/hb/cyc3/cyclone3\_handbook.pdf, 2012.

(上接第 293 页)

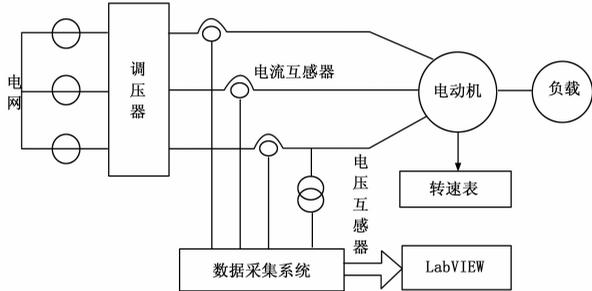


图 5 异步电机监测系统

### 参考文献:

[1] Rabiner L R, Schafer R W, Rader C M. The Chirp Z-Transform Algorithm [J]. IEEE Transaction on Audio and Electroacoustics, 1969, 17 (2): 86-92.

[2] Sheng X L, Wan S T, Tian F Q. Gear fault diagnosis of wind turbine generator system based on lifting wavelet-zooming envelope analysis [A]. Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2011 Second International Conference on [C]. 15-17, 2011: 1332-1335.

[3] 胡广书. 数字信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

[4] Hoyer E, Stork R, The zoom FFT using complex modulation [A]. Proc. ICASSP [C]. 1977, 2: 78-81.

[5] 焦新涛, 丁 康. 加窗频谱分析的恢复系数及其求法 [J]. 汕头大学学报 (自然科学版), 2003, 18 (3): 26-30.

[6] 谢 明, 丁 康. 频谱校正时谱线干涉的影响及判定方法 [J]. 振动工程学报, 1998, 11 (1): 52-57.

[7] 丁 康, 谢 明, 张彼德, 等. 基于复解析带通滤波器的复调制细化谱分析原理和方法 [J]. 振动工程学报, 2001, 14 (1): 29-35.

[8] Pei D, Yang S, Yang H W, et al. High efficient and real-time realization of Zoom FFT based on FPGA [A]. Computer Application and System Modeling (ICASSM) International Conference [C]. 2010, 2: 669-673.

[9] 丁 康, 张晓飞. 频谱校正理论的发展 [J]. 振动工程学报, 2000, 13 (1): 14-32.

[10] 许伯强, 孙丽玲, 李和明. 基于高频率分辨率谱估计技术与优化算法的异步电动机转子故障检测新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (3): 140-147.

[11] 尉 宇, 王 涛, 刘振兴, 等. 基于 CZT 变换分段频谱细化的鼠笼式异步电动机转子故障诊断 [J]. 武汉科技大学学报 (自然科学版), 2008, 31 (6): 643-647.

[12] 郑玉芳, 马松龄. 基于电流分析法的电动机故障诊断虚拟仪器系统的研制 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (3): 512-514.

[13] 赵宏强. 频谱细化算法分析 [J]. 四川兵工学报, 2013, 34 (5): 105-109.

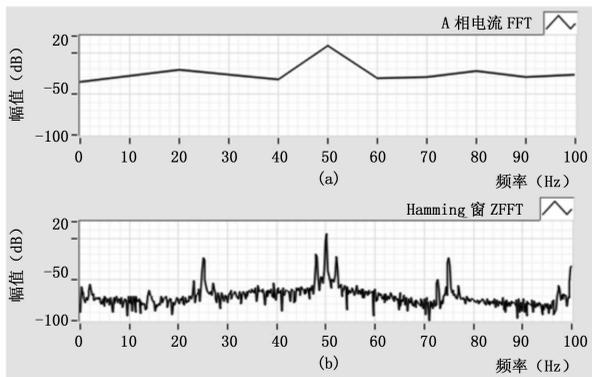


图 6 A 相电流 FFT 和 Hamming 窗 ZFFT

上的实现与仿真说明该方法可以灵活的选择细化频带, 有效的提高频域分辨率, 并在很大程度上减少了传统 FFT 方法的计算量。此外, 增大细化倍数并合理的选择窗函数能够有效减少谱线干涉和泄露的影响。但是, 复调制 ZFFT 方法需要 DN 点数据, 与 CZT 和 FFT-FS 一样都不是提高“物理分辨率”, 可作为 DN 点 FFT 的一种快速算法。针对较难识别的异步电机转子断条故障, 通过搭建监测平台实现对断条故障分量的检测, 说明 ZFFT 适用于异步电机及其他设备的在线故障诊断中。