

基于FPGA的FIR滤波器设计

北方工业大学信息工程学院微电子系 林一超 米国鑫 刘泽华 李鹏程 孙海燕

【摘要】数字信号处理技术广泛应用于各种工程技术领域，而数字滤波器在数字信号处理过程中起到很重要的作用，本文通过对原理和结构的分析，结合了Matlab软件和QuartusII软件介绍了一种线性相位的15阶的FIR数字滤波器的设计方法，并且通过软件的仿真功能，验证了设计的FIR滤波器的可行性以及正确性。

【关键词】FIR滤波器；数字滤波器；Matlab

1. 引言

21世纪是数字信息的时代，数字化、智能化和网络化已经成为了一种趋势，而数字化又是后面两者的基础。实际的生活中能接触到的各种信号，例如最常见的广播信号，通信信号等等的大部分都属于模拟信号，有小部分是数字信号。模拟信号直接处理起来会有困难，所以大部分要用到数字信号处理。而在数字信号处理方法中，数字滤波器属于是数字信号处理的一种常用电子系统。数字滤波器是通过数字运算器件对输入的数字信号进行处理，改变信号频谱，以得到期望的响应特性的离散时间系统。根据数字滤波器的功能特点，可分为低通、高通、带通、带阻和全通类型，根据冲激响应特性的不同，又可分为IIR和FIR数字滤波器，其中FIR滤波器由于其自身的优点，成为信号处理中滤波器的一种最常用电路。

2. FIR滤波器基本原理与结构

FIR滤波器即有限单位冲激响应滤波器，它的系统函数为：

$$H(z) = \sum_{k=0}^N b_k z^{-k} = \sum_{k=0}^N h(k) z^{-k} \quad (1)$$

对应的差分方程为：

$$y(n) = \sum_{k=0}^N b_k x(n-k) = \sum_{k=0}^N h(k) x(n-k) \quad (2)$$

由此可得到直接型结构的FIR滤波器，也称为卷积型结构。其结构如图1所示：

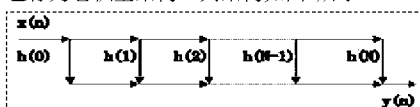


图1 FIR滤波器直接型结构图

当FIR滤波器的单位脉冲响应h(k)满足以下两个条件之一，则为线性相位滤波器。

偶对称：h(k)=h(N-k)；奇对称：h(k)=-h(N-k)；线性相位的FIR数字滤波器，它的系列具有中心对称性，它的对称中心在N/2处。所谓线性相位是指滤波器对不同频率的正弦波所产生的相移和正弦波的频率成直线关系。线性相位FIR数字滤波器的结构如图2所示，利用中心对称性可以减少一半的乘法运算。

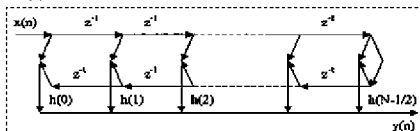


图2 线性相位的FIR滤波器结构

3. FIR滤波器设计方法

FIR滤波器的常用设计方法有窗函数法、频率抽样法；采用窗函数法首先要求出理想

滤波器的单位脉冲响应，即：

$$H(e^{j\omega}) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) e^{-j\omega k} \quad (3)$$

$$h(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H(e^{j\omega}) e^{j\omega k} d\omega \quad (4)$$

FIR数字滤波器的窗函数法设计过程为：把要逼近的理想滤波器的频率响应通过IDTFT(Inverse Discrete Time Fourier Transform)，求得脉冲响应，为无限长序列，需要对他进行截断，直接截断会长生吉布斯现象，利用加窗函数可以避免，以实现一个物理可实现且具有线性相位的FIR数字滤波器的设计目的。最后再通过DTFT(Discrete Time Fourier Transform)得出实际应用的FIR滤波器的频率响应H(e^{j\omega})。

常用的窗函数有：矩形窗函数、三角窗函数、汉宁窗函数、海明窗函数、布拉克曼窗函数和凯塞窗函数等。表1给出了一些窗函数的性能参数。

表1 窗函数指标

窗的类型	旁瓣峰值衰减(dB)	主瓣宽度	最小阻带损耗(dB)	过渡带宽度
矩形	-13	4π/N	21	1.8π/N
三角窗	-25	8π/N	25	6.1π/N
汉宁窗	-31	8π/N	44	6.2π/N
海明窗	-41	8π/N	53	7π/N
布拉克曼窗	-57	12π/N	74	11.4π/N

频率抽样法则是从频域出发，把给定的理想频率响应H_d(e^{j\omega})加以等间隔抽样，即：

$$H_d(e^{j\omega})|_{\omega=\frac{2\pi}{N}k} = H_d(k) \text{ 然后以此 } H_d(k) \text{ 作为实际FIR数字滤波器的频率特性的抽样值}$$

H(k)，然后通过公式： $H(z) = \frac{1-z^{-N}}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{H(k)}{1-W_N^k z^{-1}}$ 得到滤波器的系统函数H(z)。

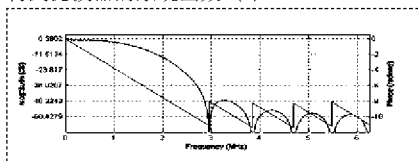


图3 FIR滤波器频率响应

4. 基于FPGA的滤波器设计

论文利用MATLAB的Filter Design & Analysis Tool工具箱中的数字滤波器的设计模块FDAtool，它是Matlab信号处理工具箱专用的滤波器设计分析工具，操作简单方便，可以适用于多种滤波器的设计方法。本文通过Hamming窗设计方法，所设计的滤波器采样频率Fs=12.5MHZ，截止频率fc=1.5MHZ，阶数15阶。

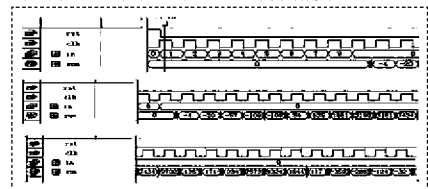
打开MATLAB后在程序栏中直接输入FDAtool回车，则可以打开FDAtool，将要设计的FIR

滤波器的参数输入进去，设计好参数之后点击Design Filter，则可以得到低通幅频响应和相频的分析。

同时得到设计的FIR系数h(n)的值如下：

```
-0.0019955262571678292
-0.0057607620419254397
-0.011345419782172952
-0.0069980556883144519
0.025763551062398023
0.093232446312979181
0.17512557674693699
0.23197818964726655
0.23197818964726655
0.17512557674693699
0.093232446312979181
0.025763551062398023
-0.0069980556883144519
-0.011345419782172952
-0.0057607620419254397
-0.0019955262571678292
```

可以看到有很好的线性相位，因此根据这些系数，采用硬件描述语言对整个系统进行设计，h(n)的系数采用16位二进制数表示，系统的整体仿真结果如图3所示，从仿真结果可以看出，最终得到的数据与利用Matlab卷积得到的数据基本一致，尽管有少许的误差，但是由于计算精度造成。



最后，对整个电子系统利用Quartus II工具，采用芯片型号为EP2K35F484C8的FPGA器件进行综合，使用的逻辑单元599个，占总器件的2%最终达到的时钟频率为77.8MHz。

5. 结论

数字滤波是处理信号信息的一种非常重要的方法，也是最常用的方法。本文通过一个设计实例简单地介绍了一种FIR滤波器的设计方法，通过Matlab对FIR滤波器的具体参数进行计算，通过硬件描述语言对整个系统进行实现，最后通过FPGA综合，得到整体的硬件电路，证明了整个设计的可实现性。

参考文献

- [1]高峰,徐献灵.基于MATLAB的FIR数字滤波器设计[J].广东轻工职业技术学院学报,2013,12(2):14-17.
- [2]叶俊明,余淑华,周光祥.基于MATLAB与FPGA的FIR滤波器设计与仿真[J].电子世界,2013(8):133-135.
- [3]杨为理,应启珩.信号与系统[M].高等教育出版社,2000.
- [4]Verilog HDL硬件描述语言[M].机械工业出版社,2000.
- [5]刘春雅.基于MATLAB与FPGA的FIR滤波器设计与仿真[J].电子设计工程,2012,20(17):119-121.

参考文献

- [1]王薇.王计波.电子技能与工艺[M].北京:国防工业出版社,2009.
- [2]李雅轩.模拟电子技术[M].西安:西安电子科技大学出版社,2000.

社,2000.

- [3]杨志忠.数字电子技术[M].北京:高等教育出版社,2008.

作者简介：吕东南（1969—），男，广东罗定人，罗定市中等职业技术学校中级教师，主要从事电子制作、电子产品维修及电子电工方面的教学。