

doi: 10.7690/bgzdh.2020.12.008

基于 Matlab 的 FIR 数字滤波器设计及在接收机中的应用

陈俊良¹, 康林², 李广伟², 朱润涛³

(1. 驻重庆地区军代局, 重庆 400060; 2. 驻重庆地区军代局驻广元地区军代室, 四川 广元 628017;
3. 四川九州电器集团, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为提高接收机通信质量, 有效滤除干扰, 设计一款有限冲激响应滤波器。采用等波纹法并利用 FDATool 工具设计滤波器, 在某接收机上进行了应用, 验证了设计的正确性。结果表明: 该方法可简化计算量, 实现快速设计滤波器, 提高设计效率。

关键词: 有限冲激响应滤波器; 等波纹; FDATool

中图分类号: TN713 **文献标志码:** A

Design of FIR Digital Filter Based on Matlab and Its Application in Receiver

Chen Junliang¹, Kang Lin², Li Guangwei², Zhu Runtao³

(1. Army Representative Bureau in Chongqing, Chongqing 400060, China;
2. Army Representative Office in Guangyuan, Army Representative Bureau in Chongqing, Guangyuan 628017, China;
3. Sichuan Jiuzhou Electric Group Co., Ltd., Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to improve the communication quality of digital receiver and eliminate interference effectively, a finite impulse response filter is designed. The filter coefficients are calculated by using the equal ripple method and the FDATool tool, the filter coefficients are applied in the digital receiver, and the correctness of the design is verified. The results show that this method can simplify the computation, realize the fast design of filter and improve design efficiency.

Keywords: finite impulse response filter; equal ripple; FDATool

0 引言

数字滤波器是数字信号处理的重要组成部分, 其实质是一种运算过程^[1-2], 是用有限精度算法实现的离散时间系统。它有 2 个作用: 1) 将混合后的信号进行分离; 2) 恢复被损坏的信号。数字信号滤波器具有精度高、可靠性高、可复用以及便于集成等优点。随着可编程逻辑器件的发展, 数字滤波器在语音信号处理、通信信号处理、雷达信号处理、图像信号处理、医学生物信号处理以及其他许多领域得到广泛的应用。

随着硬件电路的发展, 数字滤波器的实现方法有很多, 如何摆脱繁琐的计算步骤、专业的理论知识, 实现高效快捷的设计方法, 显得尤为重要^[3]。Matlab 软件提供了一个可图形化、人机交互的 FDATool 工具箱, 可指导设计人员快捷、高效地完成数字滤波器的设计。FDATool 工具箱优点正是依赖 Matlab 强大的矩阵运算、图形和图像显示能力, 得到了蓬勃的发展。笔者探讨利用 FDATool 工具箱设计等波纹有限冲激响应滤波器, 并在某接收机上进行工程验证。

1 FIR 基础理论

数字滤波器的种类很多, 按实现的网络结构方法或者单位冲击响应分类, 可表示为 2 类数字滤波器: 1) 无限冲激响应滤波器 (infinite impulse response, IIR); 2) 有限冲激响应滤波器 (finite impulse response, FIR)。

笔者重点介绍 FIR 滤波器, 即单位冲激响应有限的滤波器。一个 N 阶 FIR 滤波器的时域运算如下式所示:

$$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{k=0}^N x(k)h(n-k)。 \quad (1)$$

式中, 滤波器的输出 $y[n]$ 为输入序列 $x[n]$ 和单位冲击响应 $h[n]$ 的线性卷积, 完成时域卷积运算, 实现结构为 $N+1$ 个乘法器和 N 个加法器。

FIR 滤波器的系统函数决定了其在频域上的实现结构。其系统函数如下式^[4]:

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)z^{-n}。 \quad (2)$$

从上式的系统函数可以看出: FIR 滤波器只在原点上存在极点, 说明 FIR 系统具有全局稳定性。

收稿日期: 2020-07-22; 修回日期: 2020-08-27

作者简介: 陈俊良(1982—), 男, 四川人, 博士, 工程师, 从事装备管理研究。E-mail: erdongjunlang@163.com。

FIR 滤波器结构可以看成加法器和乘法器的集合，每一个乘法器的乘法系数就是一个 FIR 系数；因此，FIR 滤波器的结构通常被称为“抽头延迟线”结构。

滤波器的线性相位由群时延来度量，如下式：

$$\tau(\omega)=d\phi(\omega)/d\omega。 \quad (3)$$

系统是否为线性相位系统，根据群时延来判定，如群时延是常数，则是；反之，则不是。满足线性相位的滤波器，则滤波器系数也满足对称性或反对称性。

IIR 滤波器在模拟滤波技术上很成熟，可在数字领域^[5]，FIR 滤波具有 IIR 滤波器无法比拟的许多优点：

1) FIR 滤波器是有限长的单位脉冲响应，非递归结构，具有稳定性。IIR 滤波器具有反馈结构，容易出现振荡现象，不是稳定的系统。

2) FIR 滤波器具有严格的线性相位特性，有固定的群延时，IIR 滤波器的相位特性是非线性的。

3) 在 FPGA 设计中，FIR 滤波器可以采用成熟的 IP 核进行设计，IIR 滤波器一般只有手动编写代码实现，工作量大。

4) FIR 滤波器的运算其实质是卷积运算，可以利用快速傅里叶变换快速地实现，而 IIR 无法快速实现。

5) FIR 设计灵活、适应性强，而 IIR 设计比较规格化。

正因为如此，具有线性相位的 FIR 数字滤波器在现代通信、雷达、语音、图形处理等领域得到了快速的发展和广泛的应用。

2 基于 Matlab 的 FIR 数字滤波器设计

Matlab 软件中的 FDATool 工具箱已成为数字信号处理中的设计和分析各项滤波器的专业工具，可以使研究人员方便快捷地设计低通、高通、带通、带阻等经典滤波器。工程技术人员采用此方法，可方便灵活设计所需要的滤波器，提高设计效率，加快项目的开发和调试进度。

FIR 滤波器的设计方法有窗函数法、等波纹法或频率采样法。窗函数法指的是用窗函数乘以理想单位响应得到所需的滤波器单位脉冲响应；频率采样法指的是从频率域出发，使设计的 FIR 滤波器频率特性能够逼近所需滤波器在这些频率点处的值。

笔者采用频率采样设计法中的等波纹(equiripple)线性相位 FIR 设计法设计滤波器^[6]，实现原理是通过 Remez 交换算法与 Chebyshev 近似算

法使加权误差函数最小化，达到通带和阻带的幅度冲击响应传输函数具有等波纹的特点，称为 Parks-McClellan 算法。其中的最小化加权误差函数如下式：

$$\varepsilon(\omega)=W(\omega)[H(\omega)-D(\omega)]。 \quad (4)$$

式中： $W(\omega)$ 为正权重函数； $H(\omega)$ 为滤波器的实际幅度响应； $D(\omega)$ 为理想幅度响应。在通带平坦度 δ_p 和阻带衰减 δ_s 明确的情况下，选择权重函数，使得 $\varepsilon(\omega)$ 峰值绝对值最小。可以选择的权重函数如下：

$$W(\omega)=\begin{cases} 1 & \text{通带} \\ \delta_p / \delta_s & \text{阻带} \end{cases}。 \quad (5)$$

采用等波纹法设计的滤波器具有通带平坦度好、阻带衰减快、旁瓣小等优点，该性能优于采用窗函数设计法的滤波器。

在确定了 FIR 滤波器设计方法后，还需要根据特定的参数来确定滤波器的阶数和系数，根据所需的通带截止频率 ω_p 、阻带截止频率 ω_s 、通带平坦度 δ_p 和阻带衰减 δ_s ，用适当的设计方法，使用 Matlab 中的 FDATool 工具，计算出滤波器的系数。

Matlab 设计的滤波器系数可以封装为 COE 文件，提供给 FPGA 直接调用，可以很方便完成项目的设计、工程的应用，验证滤波器的性能与正确性。

基于 Matlab 设计滤波器步骤如下：

1) 明确滤波器的指标。

针对信号带宽为 8 M，带阻截止频率为 12 M，带外抑制 60 dB，通带平坦度为 1，采样率为 80 M，采用归一化系数，可得到低通滤波设计指标。设计指标有 4 项：通带截止频率 ($\omega_p=0.1$)、阻带截止频率 ($\omega_s=0.15$)、通带平坦度 ($\delta_p=1$ dB)、阻带衰减 ($\delta_s=60$ dB)。

2) 设计滤波器。

在 FDATool 工具滤波器设计界面相应条目中选择或者输入滤波器指标，即可完成滤波器设计。

图 1 为使用 FDATool 工具所得到设计的滤波器幅频响应与相位频率响应结果截图。

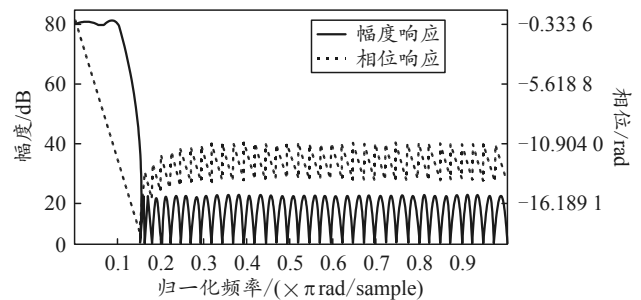


图 1 滤波器幅度及相位响应

3) Matlab 仿真测试。

数字 FIR 滤波器的带宽确定了后端数字信号的处理带宽，针对 Matlab 设计的滤波器，可以对输入信号频谱和经过滤波后的信号频谱展开测试验证。

输入一个频点为 1、10 MHz 的混合信号，其频谱如图 2 所示。

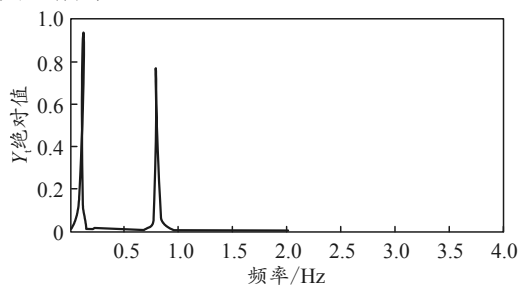


图 2 信号频谱

通过滤波器后，其频谱如图 3 所示。

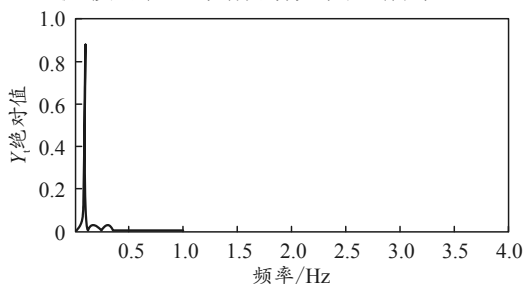


图 3 滤波后频谱

通过 Matlab 仿真，验证了滤波器设计的正确性，可进一步处理加载入 FPGA 信号处理板，在工程中实现应用验证。

3 工程应用

通过 Fdatool 计算所得到的滤波器系数是一个双精度的浮点数集。FPGA IP 核的 COE 文件采用定点数运算，在有效使用滤波器系数之前，必须先对系数进行量化处理^[7-8]。

量化就是用最接近的量化系数代替原来的双精度系数，使系数满足 FPGA 资源占用有限位的 RAM。通过量化将系数以最小变化程度达到 FPGA 可以接受的定点系数范围内。量化的二进制值，由字长和系数的最大变化范围来决定，因而比特数为有限位宽时会导致误差存在。根据概率理论可知，位宽为 N 比特，总共的数值有 2^N 个可能的值。而比特数目如果越多，量化系数与原生成系数就越接近，但量化处理的时间也就越长。量化步长是指相邻量化单位值的间距 $A=R/2^N$ ，其中 R 为滤波系数的最大变化范围， N 为二进制系数的字长， A 也称为量化器的分辨率。

采用 16 bit 量化，量化后的幅度、相位响应与原始的幅度、相位响应比较如图 4 所示。

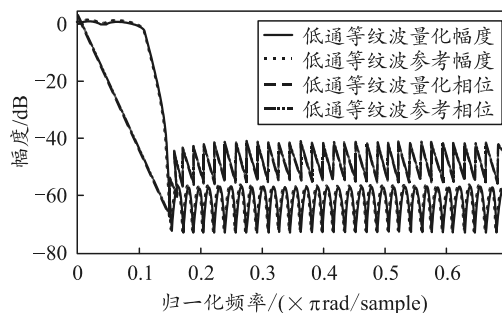


图 4 量化前后滤波器幅相对应比

从图中比较可知：选用 16 bit 量化，两者滤波器能很好地拟合。如图 5 所示，FPGA 可以调用量化的 COE 系数，调用成功后，可以查看 FPGA 生成的幅频相应。

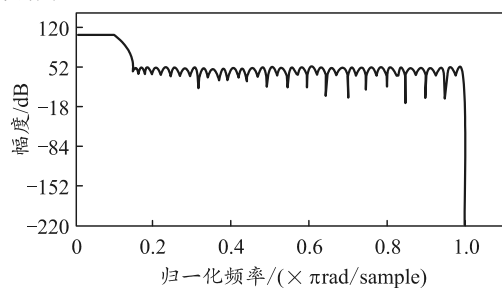


图 5 FPGA 幅频响应

将设计的 FIR 数字滤波器在某接收机上进行工程应用验证。采用中频数字接收的实现方式，射频信号通过天线接收，输入 RF 模块；然后由 RF 模块处理输出为中频信号，最后中频信号经过中频信号处理模块进行数字化处理。

中频信号处理模块为核心处理模块，由 A/D 转换芯片、FPGA 芯片和 DSP 芯片等主要器件构成。其实现原理：1) A/D 转换，模拟中频 (IF) 信号变为数字中频信号，采用奈奎斯特带通采样定理；2) 数字下变频，采用 IQ 正交数字混频，数字滤波，得到 IQ 零中频基带信号；3) 基带数字信号处理，完成信号的解调与识别。

该工程应用验证对不同的射频 (RF) 信号统一变频到相同的中频 (IF) 信号。设计的 FIR 低通数字滤波器具有通用性，能够适配不同射频信号的零中频信号。图 6、图 7 分别为中频处理板通过 ChipScope Pro Analyzer 采集的中频信号，零中频滤波后的信号。通过图 6、图 7 可以看出：该滤波器可以很好地完成基带信号的提取，并且经过测试，60 dB 动态范围也符合设计要求。