

一种滤除电力线噪声的数字滤波器的设计

张秀芳, 徐东明

(西安邮电大学 通信与信息工程学院, 西安 710061)

摘要: 数字滤波是信号处理中滤除噪声干扰的常用方法之一; 针对信号通过电力线信道传输后出现严重失真这一问题, 基于 MATLAB 平台的工具箱函数, 采用窗函数法 (选用哈密窗) 设计出一个 50 阶的数字 FIR 带通滤波器, 借助 MATLAB 仿真对滤波前后的波形作对比和频谱分析, 并通过硬件实现电路测试, 结果表明所设计的 FIR 带通滤波器能够有效地滤除带外信号以及电力线噪声, 还原出 [0.16, 0.24] 频带内的有用信号, 保证了电力线载波通信的可靠进行。

关键词: 数字滤波; 噪声; MATLAB; 窗函数法; 数字 FIR 带通滤波器

Design of Digital Filter for Filtering out Power Line Noise

Zhang Xiufang, Xu Dongming

(School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract: Digital filter technique is one of the methods that commonly used to filter out noise in the signal processing. The signal often appears serious distortion issue after power line channel transmission. For this problem, based on MATLAB toolbox functions, window function method (Hamming window) is adopted to design a 50-order FIR band-pass filter, and compare the waveform before and after filtering, and spectrum analysis. Through the hardware realizing circuit testing, the results illustrate that the designed FIR band-pass filter can effectively filter out out-of-band signals and power line noise, restoring the useful signal, which provides a strong guarantee for reliable power line carrier communication.

Keywords: digital filtering; noise; MATLAB; window function; digital FIR band-pass filter

0 引言

随着数字信息时代的来临, 数字信号处理技术已经被普遍地应用到了很多领域, 其中应用广泛且较为基础的就是数字滤波器, 它的核心任务为从混杂噪声干扰的信号中提取有用信息, 同时抑制其它信号和干扰^[1]。电力线载波通信技术近些年才出现, 但因为它具有巨大的市场潜力和广阔的发展前景, 所以一经出现即被企业和科研机构争相采用。然而, 电力线作为通信传输介质来讲, 有噪声污染大、信号衰减强、电路负载多等诸多有碍信息传输的特性^[2], 这增加了数字滤波器的设计难度。

按照传统步骤设计数字滤波器时, 往往要先进行复杂的公式计算才能求得滤波器系数, 修改参数变量后又需再次计算, 这样不仅求解过程繁琐, 计算量加大, 而且不能随时调整滤波特性, 极大地影响了它的应用, 而利用 MATLAB 能够快捷可靠的完成常用数字滤波器的设计和研究。本文借助窗函数法设计数字滤波器的例子, 充分证实了 MATLAB 平台设计 FIR 带通滤波器的优越性。

1 FIR 滤波器的原理

数字滤波器按其单位冲击响应函数的时域特性分为: 无限

冲击响应 (Infinite Impulse Response, IIR) 滤波器和有限冲击响应 (finite impulse response, FIR) 滤波器。和 IIR 滤波器相比, FIR 采用非递归结构, 能够在有限精度运算范围内确保良好的稳定性; 更重要的是, FIR 滤波器不仅能够符合幅频响应要求, 还能保证严格的线性相位。故而, FIR 滤波器在诸如音频、图像、数据传输等对保真度要求较高的信号处理中备受推崇^[3]。

1.1 FIR 滤波器的基本理论

有限冲击响应滤波器单位冲击响应记作 $h(n)$ ($0 \leq n \leq M-1$), 经过 Z 变换得其系统函数^[4]为:

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

分析 $H(z)$ 展开式及其零极点分布情况可得: $H(z)$ 是稳定的, 又是非递归系统, 没有反馈回路。相应的时域关系表达式为:

$$y(n) = \sum_{m=0}^{n-1} h(m) x(n-m) \quad (2)$$

FIR 滤波器基本结构:

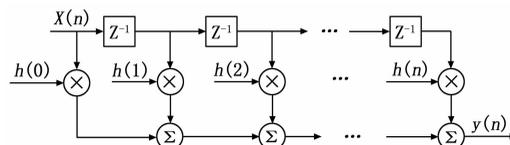


图1 FIR 滤波器基本结构

一个完整的滤波器设计过程包括: 确定指标、模型逼近、仿真分析。目前, 设计 FIR 滤波器的常见方法有窗函数设计

收稿日期: 2015-12-16; 修回日期: 2016-01-15。

基金项目: 陕西省重大科技创新项目(2015ZKC01-02)。

作者简介: 张秀芳(1989-), 女, 河南济源人, 硕士研究生, 主要从事电子与通信工程方向的研究。

徐东明(1963-), 男, 湖北武汉人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事专用集成电路设计方向的研究。

法、频率采样法和切比雪夫最佳逼近法（又称等纹波和最小平方法），它们都是在理想滤波器频率特性的基础上做某种近似^[5]。其中，窗函数法计算简单、物理意义清晰，设计思路比较完善、成熟，因而获得了更多的关注和运用。

1.2 窗函数设计法

窗函数法其主要思想是先选取某一合适的理想频率特性选择滤波器，然后拿一定宽度的窗函数去截断无限长的脉冲响应以获取一个具有线性相位和因果特性的 FIR 滤波器^[6]。因此，选择合适的窗函数和理想滤波器对整个过程至关重要。

窗函数法设计过程^[7-8]：

- 1) 根据滤波指标确定窗函数类型，并估算窗口长度 M 。
- 2) 构建想要逼近的频率响应函数 $H_d(e^{j\omega})$ 。
- 3) 计算 $h_d(n)$ 。上面已给出 $H_d(e^{j\omega})$ ，用傅里叶反变换公式求出 $h_d(n)$ ， $h_d(n)$ 是无限长非因果序列：

$$h_d(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H_d(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega \quad (3)$$

4) 加窗得到结果： $h(n) = h_d(n) \omega(n)$ 。采用有限长窗函数 $\omega(n)$ 去截取无限冲击响应 $h_d(n)$ 的一段记作 $h(n)$ ，用来近似表示 $h_d(n)$ ，这样就使原系统变为物理可实现系统。

1.3 窗函数的选择

工程中常用的 6 种典型窗分别是：矩形窗（Rectangle）、三角窗（Bartlett）、汉宁窗（Hanning）、哈明窗（Hamming）、布莱克曼窗（Blackman）和凯塞窗（Kaiser）。基本参数归纳如表 1 所示。

表 1 6 种典型窗函数的具体参数指标

窗函数类型	旁瓣峰值 α_n/dB	过渡带宽度 Bt		阻带最小衰减 α_s/dB
		近似值	精确值	
矩形窗	-13	$4\pi/N$	$1.8\pi/N$	-21
三角窗	-25	$8\pi/N$	$6.1\pi/N$	-25
汉宁窗	-31	$8\pi/N$	$6.2\pi/N$	-44
哈明窗	-41	$4\pi/N$	$6.6\pi/N$	-53
布莱克曼窗	-57	$12\pi/N$	$11\pi/N$	-74
凯塞窗	-57		$10\pi/N$	-80

实际应用中常通过变换窗函数的类型来达到改善滤波器特性的目地。窗函数的选择原则是^[9]：1) 主瓣宽度要尽量取窄些，以得到较陡的过渡带；2) 相对于主瓣幅度，旁瓣要尽可能取小，这样才能使绝大部分能量聚集于主瓣内，以便于降低波动的幅度和次数，增加通带平稳性和阻带衰减，如此，主瓣也不可以取太窄。通常，窗函数的性能指标不可能同时满足上述的两个条件，所以实际应用中要折中取优：在保证主瓣宽度满足基本需求的同时，放宽对主瓣宽度的要求来尽量减少旁瓣波动。

2 FIR 滤波器的 MATLAB 设计

利用 MATLAB 能够快速可靠地完成常规数字滤波器的设计，且其丰富的资源为建立仿真模型、监控仿真过程、分析仿真结果提供了便利，可更进一步地对比实际需求和滤波性能，更改参数，完成对滤波器的优化^[10-11]。

2.1 MATLAB 设计 FIR 滤波器的流程

通常借助 MATLAB 工具箱函数来完成 FIR 数字滤波器的窗函数法设计，具体流程如图 2 所示。

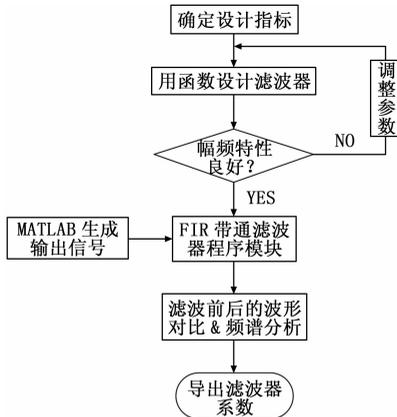


图 2 MATLAB 设计 FIR 滤波器的流程图

2.2 FIR 带通滤波器的设计

现有一个混合了 $f_1 = 50$ Hz、 $f_2 = 115$ Hz 和 $f_3 = 180$ Hz 共 3 种不同频率成分的原信号 y_0 要通过低压电力线信道传输，而且这 3 种成分的采样频率均取值 500 Hz。要求设计一种 50 阶 FIR 带通滤波器，能够保留 $f_1 = 50$ Hz 这个分量，幅度失真小于 1 dB；滤除另外两个分量，衰减不小于 45 dB。

首先根据设计要求，确定指标。要求保留 $f_1 = 50$ Hz 这个频率成分，所以通带中心频率为 $f_0 = 50$ Hz，按照归一化公式 $\omega = 2f/F_s$ ，计算出归一化频率 $\omega_0 = 0.2$ ；通带边界归一化频率可取 0.16 和 0.24。

确定窗函数类型。根据带通滤波器的指标要求，衰减不小于 45 dB，参照表 1 能够看出，哈明窗、布莱克曼窗和凯塞窗都可提供大于 45 dB 的最小阻带衰减，而哈明窗的旁瓣峰值比其余两个都小，因此优先选取哈明窗。另外，该信号在电力线信道中传输，所以滤波器除了要滤除另外两个频率成分的信号之外，还要滤除电力线信道自身产生的噪声，最大程度地还原出 f_1 分量。

编程时调用 MATLAB 里的工具箱函数 fir1 进行线性相位数字滤波器的标准窗函数法设计和仿真。调用语句“ $b = \text{fir1}(M, Wn, 'ftype', \text{window})$ ”可以得到截止频率为 Wn 的 M 阶 FIR 数字滤波器的系数向量 b ， b 可用数学式子表示为： $B(z) = b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(n+1)z^{-n}$ 。 $0 \leq Wn \leq 1$ ， $Wn = 1$ 对应于采样频率的二分之一。

主要指标参数如下：

$$\omega_1 = 0.16;$$

$$\omega_2 = 0.24;$$

$$Wn = [\omega_1, \omega_2];$$

$$N = 50; \% M = 50 \text{ 的带通滤波器}$$

$$b = \text{fir1}(N, Wn); \% \text{默认使用 Hamming 窗}$$

$$\text{fvtool}(b, 1); \% \text{可视化工具}$$

其中，fvtool 是可视化数字滤波器工具，可以看到滤波器的各种特性曲线， y_1 是包含了电力线信道噪声的信号。图 3 给出了所设计的 50 阶 FIR 带通滤波器的幅频特性和相频特性曲线。分析 (a)、(b) 曲线可知，带通滤波器在要求的频带范围 $[0.16, 0.24]$ 内，不仅满足幅频响应特性的要求，而且有严格的线性相位特性，整体上满足指标要求。

导出 50 阶 FIR 带通滤波器系数 (M 阶有 $M+1$ 个系数)，见表 2。

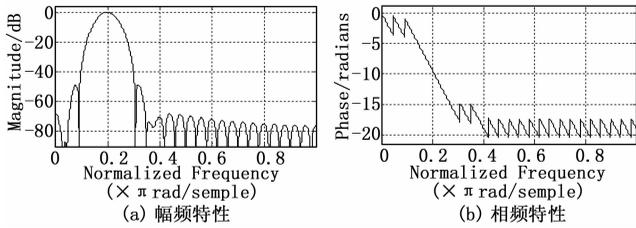


图 3 带通滤波器的特性曲线

表 2 50 阶带通滤波器系数表

系数	数值	系数	数值
$h(1)=h(51)$	0	$h(14)=h(38)$	0.0110
$h(2)=h(50)$	-0.0003	$h(15)=h(37)$	0.0341
$h(3)=h(49)$	-0.0002	$h(16)=h(36)$	0.0489
$h(4)=h(48)$	0.0004	$h(17)=h(34)$	0.0451
$h(5)=h(47)$	0.0019	$h(18)=h(34)$	0.0193
$h(6)=h(46)$	0.0037	$h(19)=h(33)$	-0.0214
$h(7)=h(45)$	0.0045	$h(20)=h(32)$	-0.0609
$h(8)=h(44)$	0.0025	$h(21)=h(31)$	-0.0809
$h(9)=h(43)$	-0.0034	$h(22)=h(30)$	-0.0693
$h(10)=h(42)$	-0.0119	$h(23)=h(29)$	-0.0277
$h(11)=h(41)$	-0.0190	$h(24)=h(28)$	0.0286
$h(12)=h(40)$	-0.0194	$h(25)=h(27)$	0.0762
$h(13)=h(39)$	-0.0091	$h(26)$	0.0948

3 FIR 滤波器的 MATLAB 仿真

3.1 滤波前后的波形比较

y_0 信号在低压电力线传输过程中受到噪声影响变成 y_1 信号, 到达接收端时要先经过滤波处理才能进行其他操作, 这里用 $y_2 = \text{fftfilt}(b, y_1)$ 来完成滤波。

图 4 给出了 y_1 信号以及 y_1 经过带通滤波器滤波后的波形对比图。图 (a) 是包含了电力线信道噪声的原信号 y_1 , 其波形有一定的扭曲和变形, 已经无法分辨出有用信号与无用信号; 图 (a) 的 y_1 通过滤波器之后得到图 (b) 中的 y_2 , 与 y_1 曲线相比, 滤波后得到的 y_2 波形清晰, 信号单一稳定。

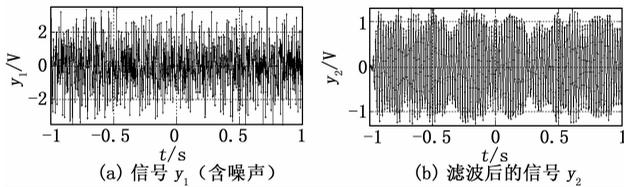


图 4 滤波前后的信号对比

y_2 是用 fftfilt 函数滤波得到的波形, 从 (b) 图可以看出, 在 y_2 的 $[-1, -0.95]$ 区间, 波形出现了严重失真, 这是因为 fftfilt 算法是通过如下差分方程“ $y(n) = b(1) * x(n) + b(2) * x(n-1) + \dots + b(nb+1) * x(n-nb)$ ”进行滤波处理的。这一段失真是一个瞬态过程, 因为输入信号突然从无到有, 这是一个突变, 滤波器使用递推算法将这个突变从瞬态的变化逐步转到稳态, 表现在波形上就是区间 $[-1, -0.95]$ 的过渡稳定期。

综上所述, 设计的 FIR 带通滤波器有效地滤除了其余频率成分的信号和电力线信道的噪声, 还原出 50 Hz 频率成分的

信号, 达到了滤波器设计的预期目标。

3.2 频谱分析

为了更直观地对滤波前后的信号进行对比, 用 FFT (快速傅里叶变换) 算法对信号进行谱分析, 得到信号的频谱如图 5 所示。

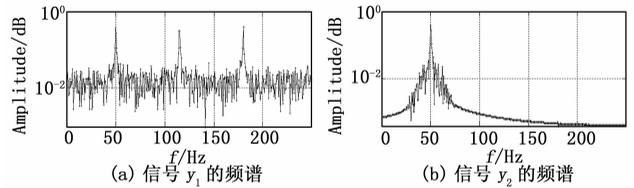


图 5 滤波前后信号的频谱

图 5 (a) 是包含电力线噪声的原信号 y_1 的频谱, 它的有用信号和干扰信号互不重叠, 可以清楚分辨出 3 个不同的频率成分; (b) 是滤波之后的信号 y_2 的频谱, 从本图可以更清楚地看到混合信号中的 115 Hz 与 180 Hz 频率成分基本被有效滤除, 而 50 Hz 频率成分被完整保留的这一结果。

4 结论

本文针对电力线通信过程中信号衰减强、噪声大的缺陷^[12], 借助 MATLAB 工具, 利用窗函数法设计出了一种能有效滤除电力线噪声的 FIR 带通滤波器, 并通过仿真分析滤波前后信号的波形和频谱变化, 结果表明, 该带通滤波器能有效滤除带外信号和电力线信道中的噪声, 完全满足实际需求。另外, 由于 MATLAB 具备强大的接口功能, 前端设计工作完成后, 可以快捷有效地将仿真结果移植到 DSP、CPLD 或 FPGA 等器件中, 为下一步的开发工作做准备。

参考文献:

- [1] 王赞松. FIR 数字滤波器设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [2] 杨 晔. 一种适应中国电网的通信电路 [J]. 电子元器件应用, 2002 (11): 13-16.
- [3] 竺小松, 张 颂. 数字 FIR 滤波器的设计与实现 [J]. 世界电子元器件, 2007 (10): 89-91.
- [4] 潘 登. 基于 DSP 的数据采集及处理系统设计与实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [5] 梁 辰. 基于 MATLAB 的 FIR 数字滤波器的设计 [J]. 机械设计与制造, 2010, 12: 87-89.
- [6] 飞思科技产品研发中心. MATLAB7 辅助信号处理技术与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [7] 杨大柱. MATLAB 环境下 FIR 滤波器的设计与仿真 [J]. 电子技术应用, 2006, (9): 101-103.
- [8] 高西全, 丁玉美. 数字信号处理 (第三版) [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
- [9] 张德丰. 详解 MATLAB 数字信号处理 (MATLAB 仿真与应用系列) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [10] 刘 波. MATLAB 信号处理 (MATLAB 使用指南系列) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [11] 张绍宸, 常宇辉, 白凤山. 基于 FDATool 的数字滤波器设计与分析 [J]. 农机使用与维修, 2013, 07: 98-99.
- [12] 李 伟, 江 楠. OFDM 技术在电力线通信中的应用 [J]. 电子测试, 2013, 09: 10-11.