

改进窗函数在 FIR 数字滤波器设计中的应用

陈明军, 毛樟梅

(浙江工业大学信息工程学院, 浙江 杭州 310032)

摘要: 电网谐波分析已成为电力系统环境治理的重要课题, 为了提高谐波分析的精度, 对采样得到的信号进行滤波处理是必不可少的环节。窗函数法是 FIR 数字滤波器设计中最简单的方法, 正确地选择窗函数可以提高所设计的数字滤波器的性能。通过对 Gauss 窗函数的改进, 使设计出的低通滤波器具有更好的优越性, 并通过 Matlab 仿真实验验证了该方法的有效性。

关键词: 窗函数; FIR 数字滤波器; 低通滤波器

Application of modified window function in designing FIR digital filter

CHEN Ming-jun, MAO Zhang-mei

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: The analysis of harmonic is an important subject for environment government of power system. It is necessary that the signal of sampling will be processed by the filter, in order to improve the precision of harmonic analysis. Window function is considered to be the simplest method in designing FIR Digital Filter. The performance of FIR digital filter can be improved by choosing the suitable window function. The FIR digital low-pass filter designed in this paper has more advantages in practice, through the improvement of the gauss window function. The simulated results show the effectiveness of the proposed method.

Key words: window function; FIR digital Filter; low-pass filter

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)13-0065-03

0 引言

随着电力电子技术的广泛应用, 电网中有大量的高频噪声信号干扰着电网的正常运行, 谐波对电力系统的污染越来越严重, 检测、分析和抑制谐波已经成电力系统环境治理的重要课题。为了提高谐波的分析精度, 有必要对分析前的信号进行低通滤波处理, 除去噪声和不需要的频率成分的干扰。数字滤波器 DF (Digital Filter)^[1] 在数字信号处理中起着重要的作用, 在信号的过滤、检测与参数的估计等方面, 数字滤波器是使用最为广泛的一种线性系统。由于信号中往往夹杂噪声及无用信号成分, 所以必须将这些干扰成分滤除。滤波是信号处理的基础, 可以对信号进行筛选, 只让特定频段的信号通过。因此, 滤波器的设计问题是数字信号处理中的基本问题。

FIR 滤波器的设计有三种常用的设计方法: 窗函数法、频率抽样法和等纹波逼近法。这些方法各有优缺点, 窗函数法不容易设计预定给出截止频率的滤波器, 不能解决当滤波器的阶次 N 给定时, 怎样设计一个最佳的 FIR 数字滤波器的问题; 频率抽

样法是一种优化设计方法, 但是在进行优化设计时所使用的变量仅限于过渡带上的几个采样值, 滤波器的截止频率不易随意控制, 因而它不是最优设计; 等纹波逼近法具有较好的滤波效果, 但计算量较大, 不易实现。窗函数法是 FIR 数字滤波器设计中最简单的方法, 有很重要的作用, 正确地选择窗函数可以提高所设计的数字滤波器的性能, 或者在满足设计要求的情况下, 减小 FIR 数字滤波器的阶数。本文通过对 Gauss 窗函数的改进使其设计的滤波器具有更好的优越性。

1 数字低通滤波器的窗函数设计原理

基于窗函数的 FIR 数字滤波器的设计方法通常也称之为傅立叶级数法, 是用一定宽度窗函数截取无限脉冲响应序列, 获得有限长的脉冲响应序列, 从而得到 FIR 滤波器^[2]。它是在时域进行的, 由理想滤波器的频率响应 $H_d(e^{j\omega})$ 推导出其单位冲激响应 $h_d(n)$, 再设计一个 FIR 数字滤波器的单位冲激响应 $h(n)$ 去逼近 $h_d(n)$, 表示为:

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

由此得到的离散滤波器的系统传递函数 $H_d(z)$ 为

$$H_d(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h_d(n) z^{-n},$$

该 $h_d(n)$ 为无限长序列, 因此 $H_d(z)$ 是物理不可实现的。

为了使系统变为物理可实现的, 且使实际的 FIR 滤波器频率响应尽可能逼近理想滤波器的频率响应, 采用窗函数将无限脉冲响应 $h_d(n)$ 截取一段 $h(n)$ 来近似表示 $h_d(n)$, 可得:

$$h(n) = h_d(n)w(n),$$

从而有:

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

式中 N 表示窗口长度, 这样

$H(z)$ 就是物理可实现的系统。并且从线性相位 FIR 滤波器的充要条件可知, 为了获得线性相位 FIR 数字滤波器的冲激响应 $h(n)$, 那么序列 $h(n)$ 应有 $\tau = (N-1)/2$ 的延迟。

由于窗函数的选择对结果起着重要的作用, 针对不同的信号和不同的处理目的来确定窗函数的选择才能收到良好的效果。一般情况下, 窗函数选择的原则是:

- 1) 具有较低的旁瓣幅度, 尤其是第一旁瓣的幅度;
- 2) 旁瓣的幅度下降的速率要快, 以利于增加阻带的衰减;
- 3) 主瓣的宽度要窄, 这样可以得到比较窄的过渡带。

2 各类窗函数的比较

常用的窗函数有矩形窗 (Rectangular window)、海明窗 (Hamming window)、布拉克曼窗 (Bartlett window)、高斯窗 (Gauss window)、切比雪夫窗 (Chebyshev window) 等^[2]。

Gauss 函数为: $w(t) = e^{-t^2/2}$, 余弦窗函数^[3] $\cos^a(x)$, a 是一个整数, 常用的窗函数中 $a=2$, 因为随着余弦指数 a 的增大, 旁瓣压低主瓣变宽, 会影响对小信号的检测能力。当 $a=2$ (余弦平方) 时, 即为汉宁窗函数, 还有海明窗、布拉克曼窗等都是其改进的余弦平方函数, 又称为升余弦函数。

引入 mexh 函数^[4], 它为高斯函数的二阶导数: $\psi(t) = (1-t^2)e^{-t^2/2}$ 。结合两者的长处进行改进, 得到一函数为: $w(t) = (1-t^2/10)e^{-t^2/10} \cos(\omega t)$,

其实部是偶对称的, 符合窗函数的要求。

取 $\omega = 1/2, t \in [-3, 3]$, 则令 $T = [\max(t) - \min(t)]/N$, 所以式 $w(t)$ 变换为

$$w(n) = [1 - (nT)^2/10]e^{-(nT)^2/10} \cos(0.5nT),$$

$$n = -N/2, \dots, -1, 0, 1, N/2.$$

各窗函数的频域幅度 (dB) 特性曲线如图 1 所示。

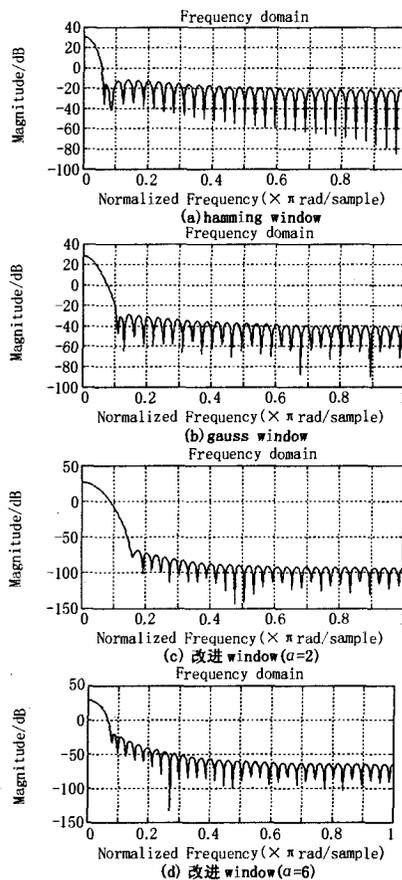


图 1 各类窗函数的频域幅度特性曲线

Fig. 1 Characteristic of window function's amplitude in frequency domain

表 1 各类窗函数的性能比较

Tab.1 Comparison of the performance of window function

窗函数	第一旁瓣相对于主瓣表 减/dB	主瓣宽
Hamming window	-41	$8 \pi/N$
Gauss window	-57.2	$12 \pi/N$
改进 window(a=2)	-95.8	$16 \pi/N$
改进 window(a=6)	-50	$8 \pi/N$

从图 1 和表 1 中可以看出, 改进的窗函数能获得明显较小的第一副瓣电平, 且可随着参数 a 的选择力求使旁瓣的幅度与主瓣的宽度之间达到更好的

匹配, 选到合适的窗函数, 这一特点体现出了该窗函数的优越性。

3 设计实例

3.1 设计一 FIR 低通滤波器

根据下列技术指标设计一 FIR 数字低通滤波器:
 $\omega_p = 0.2\pi$, $\omega_s = 0.4\pi$, $A_p = 0.25$ dB, $A_s = 50$ dB,
 分别采用高斯窗和改进窗函数设计。图 2 为滤波器的幅度响应曲线。

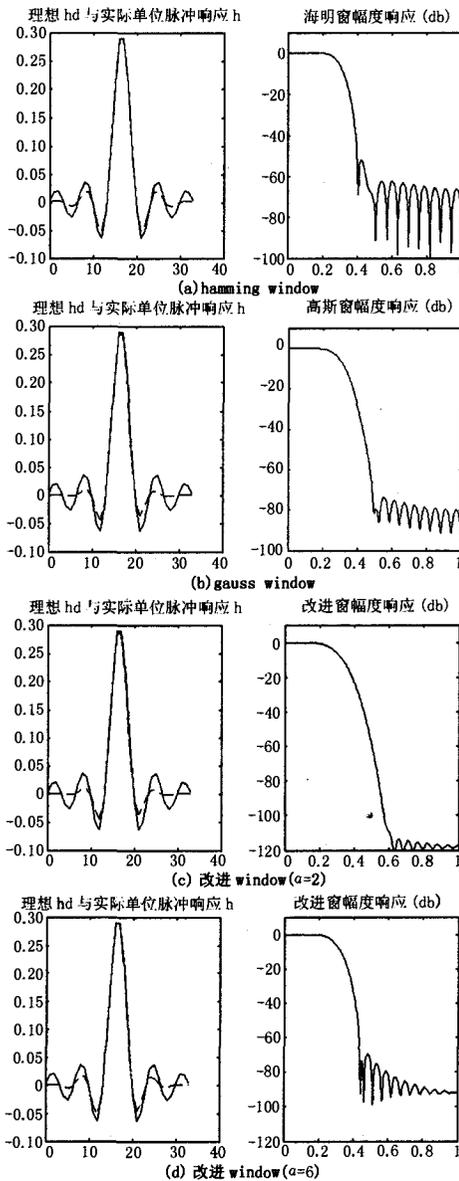


图 2 滤波器的幅度响应(实线: 理想单位脉冲响应; 虚线: 实际脉冲响应)

Fig.2 Amplitude response of filter(real line: ideal pulse response; broken line: actual pulse response)

从图 2 的理想单位脉冲响应与实际单位脉冲响

应对比曲线中, 可见改进窗函数可使脉冲响应的起始端更快的趋于 0。在窗函数幅度响应中 hamming 窗、gauss 窗和改进窗的第一副瓣电平分别为 -52 dB、-80 dB、-114 dB ($\alpha=2$)、-74 dB ($\alpha=6$), 改进窗的第一副瓣电平明显较小; 其由 -3 dB 到 -50 dB 的过渡带宽分别为 0.124π 、 0.186π 、 0.117π ($\alpha=2$)、 0.15π ($\alpha=6$), 可见在过渡带宽相同的条件下, 利用改进窗函数设计的 FIR 低通滤波器可达到较低的第一副瓣电平, 且通过参数 α 的调整可使窗函数在阻带衰减和过渡带间做最佳选择, 逼近理想滤波器。

3.2 信号处理—低通滤波

—含噪声的谐波信号

$$i(t) = 20\sin(100\pi t) + 4\sin(300\pi t) + 3\sin(500\pi t) + \sin(700\pi t) + 0.8\sin(1100\pi t) + \text{randn}(1, \text{length}(t)),$$

采用由上述窗函数设计的低通滤波器进行低通滤波, 结果如图 3 所示。

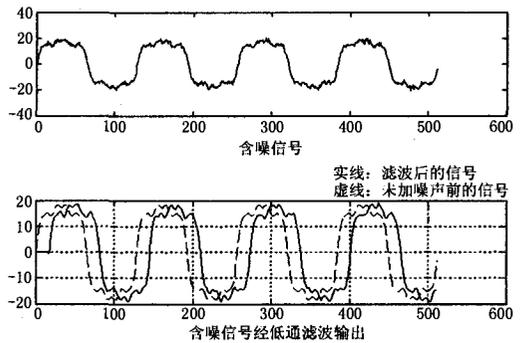


图 3 信号处理结果

Fig.3 Result of signal process

从图 3 中可以看出, 滤波后输出的信号相对输入信号有 $\alpha=10$ 的延时, 保留了低频成分, 去掉了噪声部分, 滤波后的信号 (实线显示) 逼近原不含噪声的谐波信号 (虚线显示), 达到了数字滤波的目的。

4 结论

本文提出的窗函数是在高斯窗和余弦窗函数的基础上改进的, 在 FIR 滤波器的设计中选取该函数作为窗函数。通过 Matlab 仿真实验, 结果表明改进窗函数不仅具有一般窗函数设计简单、易于实现的优点, 而且还可通过参数 α 的选择, 在阻带衰减和过渡带间做最佳选择, 使旁瓣幅度与主瓣的宽度之间达到更好的匹配, 能实现较好的滤波效果, 达到数字滤波的目的。上述这些充分体现了该函数的优越性, 具有实用性。

(下转第 84 页 continued on page 84)

4 建议和结束语

对比修改硬件电路和修改保护程序, 修改程序容易的多, 因此建议把保护软件升级。

①把目前正在使用的定制版 RCS-9612A II_02206 版本号: 3.09 升级为 RCS-9612A II_02206 版本号: 3.3.31 版。彻底消除了纽扣电池失效对重合闸软压板的影响, 利于电网的安全运行。

②通过与厂家核实, 我们城郊供电分局目前使用的所有 RCS-9612A 标准版均可升级为定制版: RCS-9612A II_02206 版本号: 3.3.31 版。升级后, 使其增加了远方投退重合闸软压板的功能, 减小了运行人员工作量, 提高了工作效率。

③在对使用 RCS-9612A II 型保护的间隔进行保护检验或保护装置电源断电时间较长时, 必须测

量主 CPU 板中的纽扣电池电压 (不必拔掉插板, 可直接测量; 标准电压 3.6V, 低于 2.6V 为不合格)。若发生电池失效, 软件升级后的保护装置仅会使“报文”清除, 而不影响设备的正常运行, 更换电池后可正常工作。

同时建议厂家在今后的保护装置中, 对硬件电路进行改进。

收稿日期: 2006-09-28

作者简介:

徐伟 (1978-), 男, 大专, 助工, 从事变电运行工作; E-mail: Xuwei02@jxep.com.cn

李自刚 (1979-), 男, 本科, 助工, 从事变电检修工作。

(上接第 67 页 continued from page 67)

参考文献

- [1] 王济, 胡晓. Matlab 在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 知识产权出版社, 2006.
WANG ji, HU Xiao. Matlab Application in Vibratory Signal Processing[M]. Beijing: China Water Power Press, China Intellectual Property Press, 2006.
- [2] 飞思科技产品研发中心. MATLAB 7 辅助信号处理技术与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
Feisi R&D Center. MATLAB7 Assistant Signal Processing Technology and Application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [3] 陈华丽. 配电网谐波测量(硕士学位论文)[D]. 武汉: 武汉大学硕士论文, 2003.
CHEN Hua-li. Measure of Power Network Harmonic, Thesis[D]. Wuhan: Wuhan University, 2003.
- [4] 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与 MATLAB 7

实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

Feisi R&D Center. Wavelet Analysis Based on MATLAB[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.

- [5] 赵红怡, 张常年. 数字信号处理及其 Matlab 实现[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
ZHAO Hong-yi, ZHANG Chang-nian. Digital Signal Processing Based on Matlab[M]. Beijing: Publishing House of Chemical Industry, 2002.

收稿日期: 2006-12-20; 修回日期: 2007-02-09

作者简介:

陈明军 (1962-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电能质量分析, 电力系统继电保护和控制;

毛樟梅 (1979-), 女, 硕士研究生, 研究方向为小波理论在电力系统谐波分析中的应用. E-mail: cross_m@163.com

(上接第 76 页 continued from page 76)

5 结语

随着我国电力事业的飞速发展, 今后电源建设特别是容量 600 MW 及以上大型火电机组的建设必将得到发展, ABB 公司的 Symphony 分散控制系统西柏坡电厂 ECS 系统的成熟应用, 可以为今后建设机组起到借鉴作用。

参考文献

- [1] 高伟. 计算机控制系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
GAO Wei. Computer Control System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [2] 陈良根, 张进, 田兰. ECS 在巴蜀江油电厂的应用[J]. 四川电力, 2003.

CHEN Liang-gen. Computer Control System's Application in Jinagyou Power Plant[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2003.

- [3] 杨彦, 陈勤昌. 125 MW 机组改造中 DCS 的 ECS 应用[J]. 华东电力, 2002.
YANG Yan, CHEN Qin-chang. Problems of Application of ECS in DCS for 125 MW Unit Retrofit and Its Countermeasure[J]. East China Electric Power, 2002.

收稿日期: 2006-12-19 修回日期: 2007-03-07

作者简介:

刘力军 (1968-) 女, 硕士, 讲师, 研究方向为电子技术应用; E-mail: llj1995@163.com

魏颀颀 (1975-) 女, 硕士, 工程师, 研究方向为自动控制;

高菁 (1981-) 女, 本科, 助理工程师, 研究方向为自动控制。