

文章编号:1001-9081(2009)12-3221-03

## 基于 DSP 的 FIR 滤波器设计中新型快速算法

杨 诚, 马永杰

(西北师范大学 物理与电子工程学院, 兰州 730070)

(yc007ft@126.com)

**摘 要:**针对 DSP 领域中使用时使用奇数个点的 FIR 冲击响应设计滤波器时,只能使用效率较低的 MAC 指令的问题,提出了一种新的快速算法。通过理论分析推导出奇数个点 FIR 滤波器冲击响应的一种新表达式,根据该表达式设计了基于高效的 FIRS 指令为中心的算法。仿真表明,新算法的计算时间和传统算法相比大幅减少,可灵活地应用于实时性要求较高的高阶 DSP FIR 各种类型滤波器的设计中。

**关键词:**数字信号处理; FIR 滤波器; CCS; 计算时间; 快速算法

**中图分类号:** TN911.72 **文献标志码:** A

## New fast algorithm in DSP FIR filter design

YANG Cheng, MA Yong-jie

(College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou Gansu 730070, China)

**Abstract:** A new fast algorithm was proposed in order to solve the problem that the FIR impulse of odd points can only use inefficient MAC instruction in DSP FIR filter's design. A new expression of FIR filter impulse of odd points was deduced through theoretical analysis and a new fast algorithm based on efficient FIRS instruction was offered in case of this new expression. Comparison with traditional algorithm was implemented through computer simulation, which demonstrates computation time of program can be reduced efficiently by employing this new algorithm which can be flexibly applied in all kinds of high order FIR filter designs in real-time field.

**Key words:** Digital Signal Processing (DSP); FIR filter; CCS; computation time; fast algorithm

### 0 引言

FIR 滤波器设计在数字信号处理领域居于重要的地位<sup>[1]</sup>,在嵌入式设计中使用 DSP 器件实现 FIR 滤波器对于算法的效能提出了较高的要求。基于窗函数的 FIR 滤波器的性能是由所选用的窗函数和滤波器阶数来决定。为获得良好的滤波器性能,增加滤波器的阶数是一个有效的途径,但这会增加运算量,并且会影响到 DSP 的实时性。如何在增加阶数的同时不使运算量过多地增加是一个普遍关注的实际问题。而这一问题在文献[2-3]中并没有给出有效的解决方法,本文算法能够较好地解决这一问题。

对于偶数个点 FIR 冲击响应可以使用以 FIRS 指令为中心的快速算法<sup>[5]</sup>,但无法用来设计高通、带阻滤波器<sup>[1]</sup>;奇数个点的 FIR 冲击响应可以用来设计高通、带阻滤波器,但只能使用效率较低的以 MAC 指令为中心的算法。因为以 FIRS 指令为中心的算法要求使用两个大小一样的缓冲区,而这对于奇数个点情况直接实现起来是困难的。但是,奇数个点的 FIR 冲击响应可以用来描述多种类型的滤波器,应用范围广。针对这一矛盾,经过理论推导,奇数个点的 FIR 冲击响应实际上可以以一种特殊的方式同样使用高效的 FIRS 指令,从而在使用高阶特殊类型的滤波器时大幅减少运算量。

### 1 改进算法的理论分析

在冲击响应为奇数点的情况下,可以推导出 FIR 滤波器冲击响应的一种新的表达式,根据这一表达式仍然可以使用高效的 FIRS 指令。

设 FIR 滤波器的冲击响应  $h(n)$  由  $N$  点构成,且  $N$  为奇数。输入信号  $x(n)$  经滤波器滤波后输出信号  $y(n)$ ,则

$$y(n) = x(n)h(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)x(n-k) =$$
$$\sum_{k=0}^{[(N-1)/2]-1} h(k)x(n-k) +$$
$$h\left(\frac{N-1}{2}\right)x\left(n-\frac{N-1}{2}\right) +$$
$$\sum_{k=[(N-1)/2]+1}^{N-1} h(k)x(n-k)$$

若

$$m = k - \frac{N-1}{2} - 1$$

$$y(n) = \sum_{k=0}^{[(N-1)/2]-1} h(k)x(n-k) +$$
$$h\left(\frac{N-1}{2}\right)x\left(n-\frac{N-1}{2}\right) +$$
$$\sum_{m=0}^{[(N-1)/2]-1} h\left(m+\frac{N-1}{2}+1\right)x\left(n-m-\frac{N-1}{2}-1\right)$$

根据 FIR 滤波器冲击响应的对称性<sup>[4]</sup>:

$$h\left(m+\frac{N-1}{2}+1\right) = h\left(N-1-m-\frac{N-1}{2}-1\right) =$$
$$h\left(\frac{N-1}{2}-m-1\right)$$

$$y(n) = \sum_{k=0}^{[(N-1)/2]-1} h(k)x(n-k) +$$
$$h\left(\frac{N-1}{2}\right)x\left(n-\frac{N-1}{2}\right) +$$

收稿日期:2009-06-02;修回日期:2009-08-10。 基金项目:甘肃省自然科学基金资助项目(096RJZA115)。

作者简介:杨诚(1977-),男,天津人,硕士研究生,主要研究方向:嵌入式技术、音频信号处理; 马永杰(1967-),男,甘肃灵台人,副教授,博士,主要研究方向:智能算法。

$$\begin{aligned}
 & \sum_{m=0}^{[(N-1)/2]-1} h\left(\frac{N-1}{2}-m-1\right)x\left(n-m-\frac{N-1}{2}-1\right) \\
 \text{设 } l &= \frac{N-1}{2}-m-1 \\
 y(n) &= \sum_{k=0}^{[(N-1)/2]-1} h(k)x(n-k) + \\
 & h\left(\frac{N-1}{2}\right)x\left(n-\frac{N-1}{2}\right) + \\
 & \sum_{l=[(N-1)/2]-1}^0 h(l)x(n+l-N+1) \\
 y(n) &= \sum_{k=0}^{[(N-1)/2]-1} h(k)\{x(n-k) + \\
 & x[n-(N-1-k)]\} + \\
 & h\left(\frac{N-1}{2}\right)x\left(n-\frac{N-1}{2}\right)
 \end{aligned}$$

由上面的式子可以看出,输入信号  $x(n)$  与  $N$  为奇数的滤波器冲击响应  $h(n)$  卷积作用的结果可以整理为两项:第一项是输入信号采样点前半序列的样点与后半序列的样点的和,再乘以相对应滤波系数,并对  $[(N-1)/2]-1$  个乘积进行累加的结果;第二项是  $N$  个采样点的中点与相应滤波器系数相乘的积。而第一项完全可以使用文献[5]中的以 FIRS 指令为中心的高效算法。第二项只是一个简单的乘法运算,几乎不会影响算法的效率<sup>[6]</sup>。

## 2 改进算法设计

### 2.1 改进算法的模型结构

根据改进算法滤波公式的结论,要在 DSP 上实现奇数个点 FIR 滤波,算法可使用图 1 模型。该模型由三部分构成:  $X$ 、 $Y$  缓冲区和中值寄存器。对于  $N=17$  的 FIR 冲击响应,  $X$  缓冲区地址由低到高是数据由旧依次变新的顺序,存入 17 个采样点的前一半,且 SYMFIR\_DATX\_P 指针初始指向  $X$  缓冲区的最旧的一个数据;  $Y$  缓冲区地址由低到高是数据由新依次变旧的顺序,存入 17 个采样点的后半一半,且 SYMFIR\_DATY\_P 指针始终指向  $Y$  缓冲区的最旧的一个数据。中值寄存器存放 17 个采样点的中点,且  $X$ 、 $Y$  缓冲区均为循环缓冲区<sup>[5]</sup>。

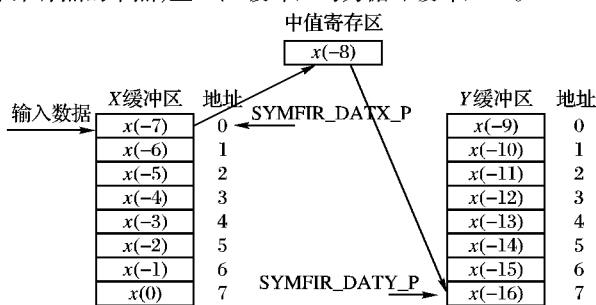


图1 改进算法的模型

依据图1模型的算法流程如图2所示。首先进行程序初始化,建立  $X$ 、 $Y$  循环缓冲区和中值缓冲区。中值缓冲区首先覆盖  $Y$  缓冲区最旧数据,然后用  $X$  缓冲区最旧数据覆盖中值缓冲区,最新的采样点覆盖  $X$  缓冲区最旧数据。计算改进算法滤波公式的第一项,调整指针 SYMFIR\_DATX\_P 使指向  $X$  缓冲区的最新数据,将  $X$  缓冲区的最新数据与  $Y$  缓冲区的最旧数据相加,它们的和与此时相应的滤波系数相乘,并对乘积进行累加,累加次数为  $(N-1)/2$ 。每次累加后,  $X$  缓冲区的数据指向次新数据,  $Y$  缓冲区的数据指向次旧数据,作为下一次计算的数据。由此计算出改进算法滤波公式第一项的结果,中值缓冲区中的数据与相应的滤波系数相乘计算出改进算法滤波公式第二项的结果,将这两部分结果相加得到本次采样点的滤波

结果。取出下一个采样点,依次刷新  $Y$  缓冲区、中值寄存器、 $X$  缓冲区,重复上述步骤完成下一个样点的滤波。

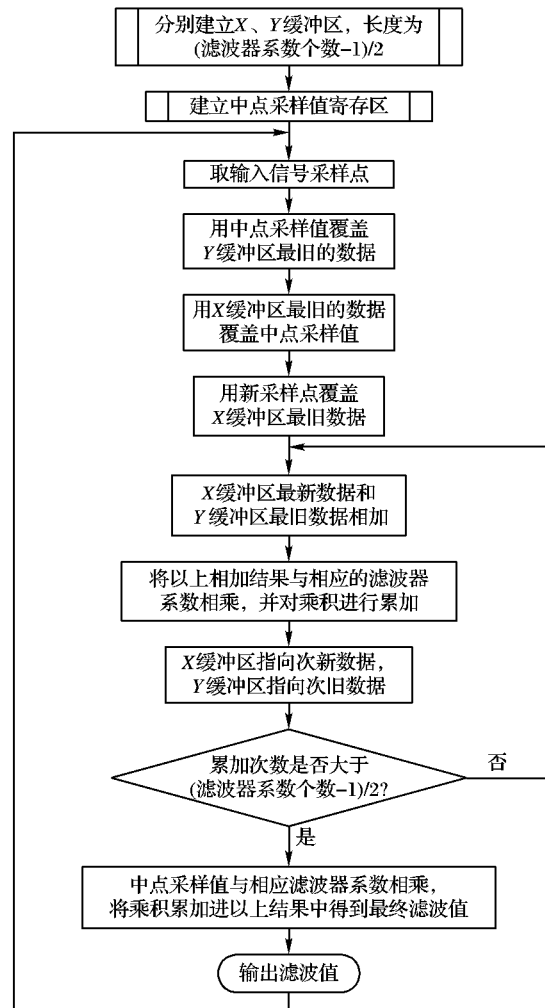


图2 奇数点 FIR 滤波器改进算法的流程

### 2.2 使用改进算法实现的高通滤波器

#### 2.2.1 高通滤波器设计要求

用改进算法在 DSP 上实现一个 FIR 高通滤波器,阻带截止频率 2 kHz,通带起始频率 3 kHz,取样频率 45 kHz,阻带最小衰减 50 dB。根据阻带最小衰减决定使用海明窗,由于该滤波器的过渡带较陡峭,只有增加滤波器的阶数才能满足该要求。经计算,冲击响应的点数  $N$  至少应取 149<sup>[1]</sup>。

#### 2.2.2 Matlab 辅助设计

用 Matlab 2008b 与 TI 公司的 CCS3.3 联合调试验证改进算法的有效性<sup>[7-8]</sup>。利用 Matlab 的运算能力可以方便地设计滤波器并生成相应的系数,产生输入信号并对输入输出信号进行分析。输入信号为 1 kHz、2 kHz、3 kHz 随机相位正弦混频信号(输入信号具有随机性可以更好地验证算法的有效性)。为适于 DSP CCS 汇编编程环境数据格式的需要,编写 Matlab 程序将输出数据格式转换成 Q15 所需格式<sup>[3]</sup>。Matlab 生成的输入信号通过 Matlab 自带的“Embedded IDE Link CC”<sup>[9]</sup>与 CCS 通信并将数据直接写入 DSP 的数据存储器中,经 DSP 处理过的输出信号通过 CCS 返回 Matlab 中分析。这种方法可以提高 DSP 算法设计的灵活性和效率。使用 Matlab 的 FDA TOOL 依据第 2.2.1 节提出的设计要求设计 148 阶 FIR 高通滤波器,设计输出的幅频特性和相频特性如图 3 所示。

#### 2.2.3 CCS 软件仿真

在 TI 公司的 DSP 开发环境 CCS 下,使用 TMS320C5402 模拟器对算法进行软件仿真。Matlab 输入随机相位 1 kHz、

2 kHz、3 kHz 混频信号经过 CCS 仿真出的截止频率 2.5 kHz、148 阶 FIR 高通滤波器后,在 Matlab 中对输入输出信号进行分析,分析仿真结果如图 4。

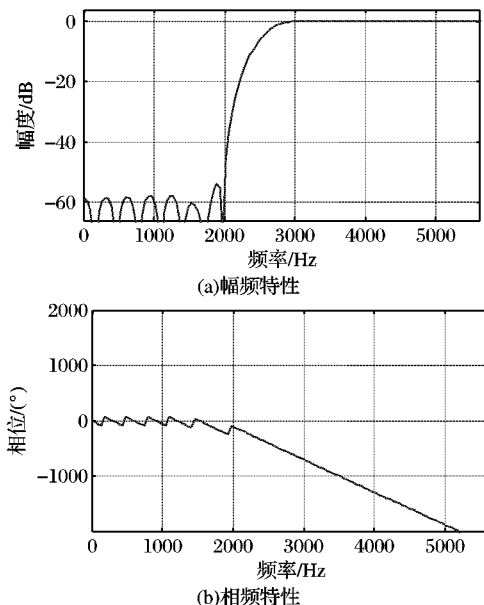


图 3 148 阶高通滤波器频谱特性

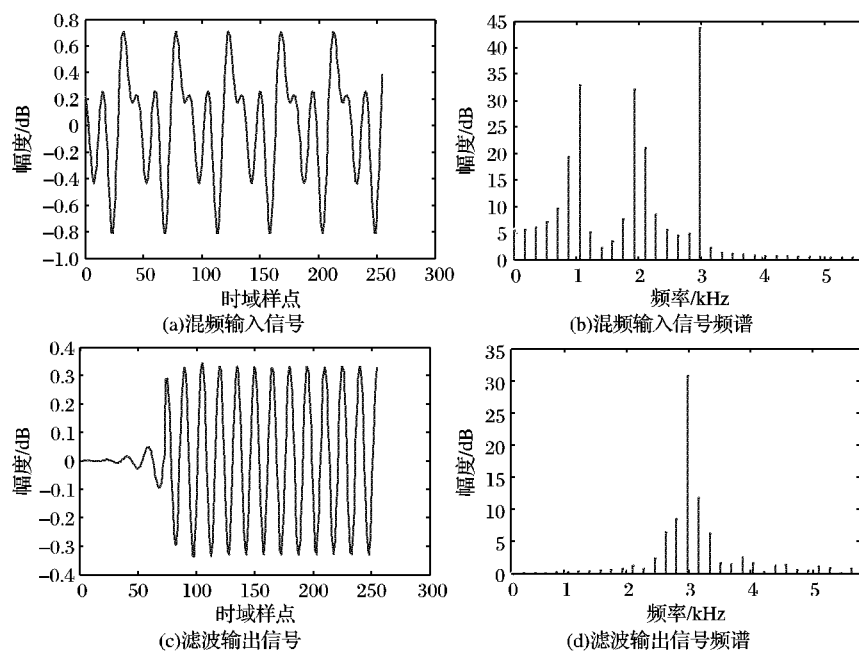


图 4 148 阶高通滤波器输入输出信号分析

由图 4(c)可以看出,在 149 点以前由于 DSP 缓冲区尚未全部被输入信号采样点填充,因此滤波值有偏差。在 149 点以后输出正常的滤波信号。上述仿真试验验证了算法的可行性。

### 3 改进算法计算时间评估

在 DSP 设计中,传统奇数个点 FIR 滤波器设计核心指令为 MAC,依据式(1)用 CCS 的“profile”功能模块,对传统算法和改进算法的计算时间进行比较,在不同阶数不同类型的滤波器中,同样处理 256 个采样数据进行计算时间比较,如表 1 所示。

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

每种算法在同一种类型同一阶数的滤波器中,使用两种不同的输入信号(随机产生)测试,分别编号为 1 和 2。每次

测试中 DSP 算法程序整体循环运行(每个循环处理 256 个采样点)均在 200 次以上,得到它的平均耗时。

由表 1,在 50 阶低通滤波器测试中传统算法是改进算法计算时间的 1.49 倍,100 阶带通滤波器测试中传统算法是改进算法计算时间的 1.68 倍,而 148 阶高通滤波器测试中传统算法是改进算法计算时间的 1.76 倍。改进算法的计算时间明显优于传统算法,并且滤波器阶数越高这种优势越明显。改进算法不仅可以应用于各种滤波器的设计,而且在阶数较高时可以节约将近一半的时间。按 CPU 时钟 100 MHz 来计算,改进算法在 TMS320C5402 上处理 256 点采样信号通过 148 阶高通滤波器需要约 1.8 ms,即处理一个采样点需约 7.2  $\mu$ s。这就是说,输入信号通过该滤波器后的延迟仅约为 7.2  $\mu$ s,提高了信号处理的实时性。

表 1 改进算法与传统算法计算时间比较(CPU 周期)

算法	测试 编号	低通滤波器 (50 阶)	带通滤波器 (100 阶)	高通滤波器 (148 阶)
传统算法	1	122 972	224 776	322 779
	2	122 865	225 544	322 499
改进算法	1	82 548	133 529	183 261
	2	82 660	134 077	182 845

### 4 结语

改进算法成功地解决了奇数个点的 FIR 滤波器冲击响应无法使用以 FIRS 指令为中心的算法的问题。由于以 FIRS 指令为中心的改进算法比以 MAC 指令为中心的传统算法节省将近一半的运算量,并且奇数个点的 FIR 滤波器冲击响应又可广泛应用于各种类型滤波器的设计,因此算法效率高、适应范围宽。算法的高效也使得设计能够进行实时数据处理、性能较好的更高阶的 FIR 滤波器成为可能。

#### 参考文献:

- [1] 程佩青. 数字信号处理教程[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2004: 344-388.
- [2] 刘利群, 韩震宇, 李绍卓. FIR 滤波器的设计及 DSP 实现[J]. 现代电子技术, 2007(22): 38-40.
- [3] 伍小芹, 王萍, 易家傅. 基于 DSP-TMS320C5402 的 FIR 数字滤波器设计及实现[J]. 海南大学学报: 自然科学版, 2007, 25(4): 361-365.
- [4] 袁菁, 高勇. FIR 滤波器的高速实现[J]. 数据采集与处理, 2006, 21(1): 118-122.
- [5] Texas Instruments Corporate. TMS320C54x DSP reference set volume 4: Applications guide [M/OL]. [2009-04-10]. <http://focus.ti.com/dsp/docs/dspsupporttechdocs>.
- [6] Texas Instruments Corporate. TMS320C54x DSP reference set volume 2: Mnemonic instruction set [M/OL]. [2009-04-10]. <http://focus.ti.com/dsp/docs/dspsupporttechdocs>.
- [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] 张猛. 基于 Matlab 的 FIR 数字滤波器设计[J]. 长春大学学报, 2009, 19(1): 47-49.
- [9] The MathWorks, Inc. Embedded IDE link CC user's guide [S/OL]. [2009-04-10]. <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/ccslink>.