



基于 MSP430 的 WDF 设计与实现

 贺卫东¹ 段哲民¹ 南新阳²

(1. 西北工业大学电子信息学院 西安 710072; 2. 中国科学院国家授时中心 西安 710600)

摘要: DTMF 信号被广泛的应用在交互式控制中,如语言菜单、语言邮件、电话银行和 ATM 终端等。对于 DTMF 信号的产生、识别,普通的设计方案一般都采用专用的数字编解码芯片,成本高,体积大。本文论述在 FLASH 型超低功耗 16 位单片机 MSP430 中实现一类 FIR 滤波器 WDF(wave digital filters),借助 WDF 滤波器良好的动态特性,使得 MSP430 的用户可以良好的解决 DTMF 编解码一类的应用问题。

关键词: WDF; MSP430; 数字滤波

中图分类号: TP3

文献标识码: A

WDF for TI's sensor processor MSP430

 He Weidong¹ Duan Zheming¹ Nan Xinyang²

(1. Electronic Information Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072;

2. National Time Service Center, Chinese Academy of Science, Xi'an 710600)

Abstract: The MSP430 is an ultra-low-power 16-bit RISC mixed-signal processor from TI. it can provide the ultimate solution for battery-powered measurement applications. DTMF is widely used in communication, remote-control for its well-done properties, and it is also been used in mutual-control such as tele-bank and ATM terminals these years. In this paper, a FIR filter-WDF(wave digital filters) is implemented, which enable MSP430 users to solve special measurement problems like DTMF problems by means of robust digital filter algorithms.

Keywords: WDF; MSP430; digital filtering

0 引言

IIR 滤波器和 FIR 比起来需要较少的乘法器,故被有的实时系统所采用,但是由于它们的递归特性,特别是在有限长寄存器效应的场合下可能出现稳定性的问题。本

文针对这种情况,提出通过各种方法的优化从而将 FIR 滤波器 WDF 运行在实时单片机系统中。由于 WDF 滤波器的诸多优点,从而较好的解决在实时单片机系统中的稳定滤波问题。

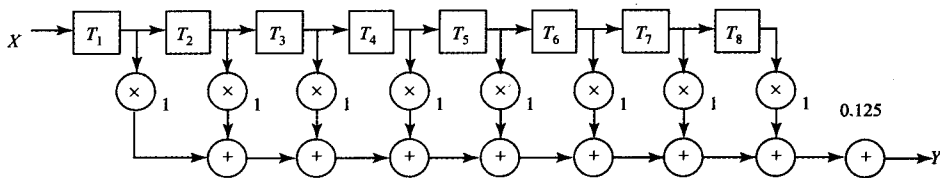


图1 平均滤波的 FIR 滤波器

1 基本原理

如图 1 所示的 7 阶 FIR 滤波器,其 8 个系数都为 1,这个滤波器也可以理解为连续平均的处理过程: $Y=0.125 \times (T_1+T_2+T_3+T_4+T_5+T_6+T_7+T_8)$,这个滤波器的阻带特性很差,然而如果采样频率选择的合适,阻带凹槽出现在噪音频率上,这时这样的滤波器对特定的噪音的过滤

作用将非常明显。所以在实际应用中需要给该滤波器中 8 个乘法器分别赋予不同的系数以使得阻带特性大于 20 dB,当然这些乘法运算将消耗额外的 CPU 的时间。

2 DTMF 信号

DTMF 信号是将拨号盘上的 0 到 9, A 到 D 及 * /E、# /F 共 16 个字符,用音频范围的 8 个频率来表示的一种编码方式。8 个频率分为高频群和低频群 2 组,分别作为列频和行频。每个字符的信号由来自列频和行频的 2 个频率的正弦信号叠加而成。频率组合方式如表 1 所示。

表 1 DTMF 的高频组和低频组

频率/ Hz	1 209	1 335	1 447	1 633
697	1	2	3	A
770	4	5	6	B
852	7	8	9	C
941	*	0	#	D

根据 CCITT 建议,DTMF 信号的技术指标是:传送/接收率为每秒 10 个号码,或每个号码 100 ms。每个号码传送过程中,信号存在时间至少 45 ms,且不多于 55 ms,100 ms 的其余时间是静音。在每个频率点上允许有不超出 $\pm 1.5\%$ 的频率误差。任何超过给定频率 $\pm 3.5\%$ 的信号,均被认为是无效的,拒绝承认接收。另外,在最坏的检测条件下,信噪比不得低于 15 dB。

3 WDF 的可行性

数字滤波器的运算程序常常需要大量的乘法,为了减小溢出和归零的发生,字就必需足够的宽,在这种情况下 DSP 就最合适了。但如果是采用 MSP430,则用 WDF 作为数字滤波器就可以了。WDF 来自模拟 LC 电路和微波滤波器,结果这些模拟滤波器的特性就在数字滤波器上体现出来。

WDF 有对系数的变化很不敏感的特性,这一点对于本课题的应用非常的关键。因为缺少乘法器,所有的乘法都要通过相加和移位来实现,所以缩短和优化系数将可以节约运算时间。而且这一简化肯定不会影响滤波器频率特性和稳定性。由于简化系数的运用,由相乘产生的归零噪音被大大的减少了。

另外,WDF 也表现出良好的动态特性。WDF 就算在输入信号突变的情况下也能保持稳定,所以可以通过中断请求接着继续运行滤波器程序,即 WDF 可以运行在中断模式。如果滤波器的输入过载或有其它的干扰,滤波器的主动特性就使得它自己快速的恢复,这种特性被称为“响应稳定性”,而对传统的 IIR 数字滤波器这个问题还没有被解决^[1]。

4 WDF 的结构

滤波器必须要从输入信号中辨认出特定频率的信号。图 2 的共振型滤波器即是用于这个目的,它由串联共振电路和衰减型适配器^[2]组成。

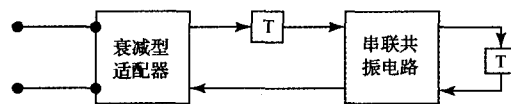


图 2 共振型滤波器的结构

这个滤波器设计的共振频率要恰好等于所要取得的频率。若所需要的频率出现在输入信号中,则它将会被放大,而其它所有频率将被减弱。共振频率信号的放大值和其它所有信号的衰减程度是由参数 K 确定的,其单位为 $-20 \log K(\text{dB})$ 。滤波器的带宽定义在频率衰减为 $-10 \log K(\text{dB})$ 处。如果滤波器的输出幅度超过一个特定的值,则表明输入中存在着需要的频率信号。输入的调节是由衰减型适配器完成的,它和所有的滤波器具有相同的结构,它们有 4 种形式^[2]。因为在 MSP430 的解码算法中没有浮点数运算,滤波器程序仅能达到 16 b 的整数精度,所以选择含有比例因子形式的适配器以增强滤波器的动态特性。

5 关于数字计算

由于缺少硬件乘法器,故运算中存在着大量的移位和相加操作。2 个“重叠数”(即可由 2^n 组合来表示的数)相乘可由重复相加其被乘数的方法实现。如果一个二进制数被向右移动 n 位,结果相当于乘以 2^{-n} 。由于仅介于 2^n 之间的系数是不够精度的,所以二进制数中的每个 1 要进行先移位,后相加的处理。这个可以由下面的例子说明:

$$1 \times 0.46875 = 2^{-2} + 2^{-3} + 2^{-4} + 2^{-5} = 0.46875$$

$$1 \text{ b} \times 0.011110 \text{ b} = 0.01 \text{ b} + 0.001 \text{ b} + 0.0001 \text{ b} + 0.00001 \text{ b} = 0.01111 \text{ b}$$

由于数中包含大量的 0,为增加处理的速度,使用 CSD 码 (canonically signed digit code)。它插入 -1 再通过减法运算来表示二进制的数。上面的计算采用 CSD^[3] 码后的计算如下:

$$1 \times 0.46875 = 2^{-2} - 2^{-5} = 0.46875$$

$$1 \text{ b} \times 0.1000 - 10(\text{CSD}) = 0.01 \text{ b} - 0.00001 \text{ b} = 0.01111 \text{ b}$$

由于采用了 CSD 码,相乘运算被由多个加法简化到一个减法。CSD 码仅当二进制数由多个 1 组成时才能应用。另外,对于乘法的位数问题使用 Horner^[4] 方法以在不扩展位数的情况下保留较高的精确度。

6 八个 WDF 的设计和系数优化

共振型滤波器有以下的参数:(1)抽样频率;(2)滤波共振频率;(3)幅频衰减;(4)带宽。由于 DTMF 信号频率最高是 1 633 Hz,抽样频率取 3 640 Hz 就可以满足采样定理,这一数值刚好等于 MSP430 内 32.768 kHz 的 ACLK 信号的九分之一,所以可以很方便的使用 Timer 产生。虽然

语音信号也会被带进 ADC 然后被采样,但却不会产生DTMF 信号的识别错误,因为语音信号仅仅是一个DTMF 信号,而双音频是 2 个DTMF 信号同时有效的持续一段时间,但是在DTMF 传输期间其它的所有干扰包括语音信号必须被衰减 23 dB^[5]。

滤波器的共振频率就是各个DTMF 频率,它们应该没

有任何衰减的通过滤波器,其它所有的频率衰减定在-40 dB,相当于衰减 100 倍。如果DTMF 信号附近的信号衰减-20 dB,即 10 倍衰减,由于随后参数优化 10 倍是达不到的,但是剩余的差额水平已足以识别DTMF 了。

在上面的条件下,8 个滤波器的系数计算如表 2 所示^[2]。

表 2 滤波器系数优化

频率 / Hz	697	770	852	941	1 209	1 336	1 477	1633
共振电路种类	B	B	B	C	C	D	D	D
α	0.359 442 0	0.239 315 7	0.099 949 5	0.053 485 1	0.493 508 2	0.329 160 8	0.170 212 4	0.051 645 9
n_2	—	—	—	—	—	1.5146077	2.4736004	5.8005043
适配器 γ_1	0.977 300 7	0.977 417 7	0.975 990 9	0.974 965 4	0.969 632 6	0.970 218 3	0.969 226 5	0.969 404 6
γ_2	-0.974 344 9	-0.974 581 3	-0.971 698 8	-0.969 627	-0.958 835 6	0.960 036 9	-0.958 033 3	-0.958 393 0
n_1	0.025 072 7	0.024 844 7	0.027 621 7	0.029 612 6	0.039 914 0	0.038 772 9	0.040 675 2	0.040 334 0

由于这些数字只能由二进制数表述,故它们的计算需要很多的步骤。因而必须对这些系数进行优化。系数 n_1 和 n_2 只是一种比例因素,可以相对自由的改变。因而它们被修改为以下的较小的值,这样就把它们的计算量简化为较少的移位操作。 α 系数的优化需要更多的工作,因为它影响共振频率。为了能够判断出频率的变化,在优化系数后再次计算其共振频率。表 3 即为成功优化后的 α 的值。

可以看到,虽然在某些情况下数字计算上作了相当程

表 3 成功优化 α 值

频率	697	770	852	941	1 209	1 336	1 477	1 633
α	0.359 375	0.234 375	0.093 75	0.046 875	0.5	0.328 125	0.171 875×2	0.046 875×4
共振频率	697	773	855	937	1 213	1 337	1 475	1 642
频率偏移	0.00	0.39	0.35	-0.43	0.33	0.07	-0.14	0.55
α (CSD)	0.010 111	0.010 000-1	0.000 11	0.000 011	0.1	0.010 101	0.010 11	0.001 1

度的缩短,也节省了大量的计算时间,但频率的偏移却是轻微的。更进一步观察发现衰减适配器的系数都很相似。这是因为它们主要是由-10 dB 参数确定的,而这个参数是对所有的滤波器所规定的标准,即:DTMF 附近的频率应该被抑制-10 dB。

优化后使得 8 个滤波器仅需要一个适配器,这样汇编代码的优化也因一个适配器而简化,程序的纠错变也非常的方便,如果时间允许,可以用一个子函数以节省内存。

7 滤波器的数学仿真与实现

MSP430 的内置 ADC 可以实现模数转换,但是为了检测滤波器的品质需要知道滤波器具体的输出值。由于没有内置的 DAC,所以也无法验证滤波器的幅频特性。为了获得滤波器的性能参数数据,将我们的算法通过 Matlab 仿真从而得到它的幅频特性。Matlab 和 16 位的微控制器的不同,它是以浮点数的精度来运算的。这里我们对 770 Hz 滤波器进行仿真,在仿真中使用简化后的系数。作为对比,没有简化系数的幅频特性也以虚线的形式描出,如图 3 所示。

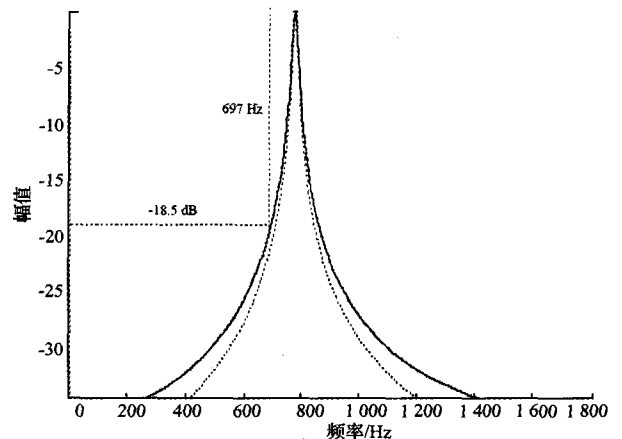


图 3 Matlab 仿真 770 Hz 处幅频特性

(下转第 166 页)

使输出信号的波形更佳。可以相信,随着数字技术的发展,应用速度更快、精度更高、体积更小、更加可靠、操作更灵活的 DSP 微处理芯片将会成为电力电子业的重要趋势。

参 考 文 献

- [1] 李丽欣. 电力系统中的数字移相技术[J]. 德州学院学报, 2005, 21(2): 63-66.
- [2] 余吉强, 傅仲文. TMS320F2812 DSP 在 UPS 不间断电源数字控制中的应用中[J]. 国外电子测量技术, 2006, 26(3): 46-50.
- [3] 王晓明, 王玲. 电动机的 DSP 控制-TI 公司 DSP 应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [4] 苏奎峰, 吕强, 耿庆锋, 等. TMS320F2812 原理与开发

[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

- [5] GUNGOR B, BEKIROGLU E. A PWM technique for DSP controlled ultrasonic motor drive system[J]. Electric Power Components and Systems, 2005 (33): 21-38.

作 者 简 介

裴玖玲, 女, 1980 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子技术。

E-mail: zpzqxy@163.com

屈百达, 男, 教授, 研究生导师, 主要研究方向为现代控制技术与应用, 模式识别和数据处理。

(上接第 161 页)

可以看出临近的 DTMF 频率 (697 Hz) 衰减为 -18.5 dB, 这个差额足够识别出 DTMF 信号。这也证明了 WDF 的系数不敏感性; 虽然系数经过相当程度的优化缩短, 但却没有影响到滤波器的性能。

由于数字滤波器需要大量相乘和相加操作, 故一般是不会用较慢的微控制器来数字滤波的, 但 MSP430 却可以, 因为它的寄存器操作命令在一个时钟周期内就可以完成。Timer 的中断频率为 3 640 Hz, 这等于 ACLK 的九分之一。ADC 可以在中断发生时启动。因为 ACLK 直接从 32.768 kHz 晶振得到, 所以抽样频率是很稳定的。当抽样结束后, 是 8 个数字滤波器的运算及基于其输出的 DTMF 频率的识别, 所以 274.7 μ s 的时间可以用来运行滤波和识别, 这相当于 915 个周期。另外, 为增加计算速度系统时钟频率可由 1 M 提升到 3.3 MHz。

实验结果表明, 虽然 MSP430 内部没有硬件乘法器, 然而 WDF 运行平稳, 对 DTMF 信号的识别可靠。本方案充分发挥了 MSP430 的潜能, 提高了系统的集成度, 适合工程应用。

参 考 文 献

- [1] ULRICH K. RISP: digital processor architecture with reduced instruction set for wave digital filters[J]. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Ruhr-Universität Bochum, 1991.

- [2] KAISER U. Wave digital filters and their significance for customized digital signal processing[J]. Texas Instruments Engineering Journal, 1985, 2(5): 29-44.
- [3] Texas Instruments. MSP430 Family, Software User's Guide[Z]. Texas Instruments, 1996.
- [4] ULRICH S. A ten-channel equalizer for digital audio-applications[J]. IEEE Transactions on Circuit and Systems, 1989, 36(2): 276-280.
- [5] Bundesministerium für Post und Telekommunikation, Draft, Bonn, 1994.
- [6] FETTWEIS, A. Wave digital filters; theory and practice[J]. IEEE Proceedings, 1986, 74(2): 270-327.
- [7] 丁玉美, 高西全. 数字信号处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000: 231-240.
- [8] DIEWALD H. System design and architecture of a mixed signal processor[J]. Euro Technical Conference (ETC), 1993.

作 者 简 介

贺卫东, 男, 1982 年出生, 陕西渭南人, 硕士研究生, 主要研究方向为微电子技术应用。

段哲民, 男, 1953 年出生, 陕西渭南人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电路与系统。

E-mail: cocohero521@yahoo.com.cn