

·技术与方法·

基于 FPGA 超声信号数字动态滤波器的实现

朱利华¹ 武剑辉^{1,2,△} 栾强厚²

(1 电子科技大学生命科学与技术学院 四川 成都 610054; 2 东莞电子科技大学电子信息工程研究院 广东 东莞 523808)

摘要 目的 本文研究了基于现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array,FPGA) 超声成像系统中数字动态滤波器的实现方法和过程。方法 动态滤波器中 FIR 滤波器采用分布式算法(Distributed Arithmetic, DA) 实现结构,并在应用中对 DA 算法进行了改进,包括数据并行处理结构的设计、对查找表(Look Up Table,LUT) 输入字长 N 大小的控制和具有对称系数的 FIR 滤波器的采用。改进后的 DA 实现在 FPGA 资源占用和处理速度之间达到了平衡。同时,结合多级流水线结构,动态滤波器实现了数字超声信号并行处理。结果 采用常值滤波器(远场匹配参数) 进行滤波后,超声回波图像远场分辨率达到了要求,但越靠近近场效果越差。相比之下,本文设计的基于 FPGA 超声信号动态数字滤波器达到了很好的滤波效果,使回声图像近场和远场都有最佳分辨率。结论 利用 FPGA 实现超声系统中动态滤波器是完全可行的,并且有助于提高系统的稳定性和可靠性,并大大减低系统成本。

关键词 超声信号 动态滤波 分布式算法 FIR 滤波器 FPGA

中图分类号 :TN911.72 **文献标识码** B **文章编号** :1673-6273 (2012) 02-344-04

Implementation of Ultrasound Signal Dynamic Digital Filter Based On FPGA

ZHU Li-hua¹, WU Jian-hui^{1,2,△}, LUAN Qiang-hou²

(1 School of life Science and Technology, University of Electronic and Technology of China, Chengdu, 610054, China; 2 Institute of Electronic and Information Engineering in Dongguan, University of Electronic Science and Technology of China, Dongguan, 523808, China)

ABSTRACT Objective: This paper talks about implementation methods and processes of digital dynamic filter based on Field Programmable Gate Array (FPGA) in the ultrasound imaging system. **Methods:** In this paper finite impulse response (FIR) filter using distributed arithmetic (DA) implementation structure and in the application of the DA algorithm we do some improvement including the structure of parallel data processing, controlling the size of the input word length N in the Look-Up Table (LUT) and using the FIR filter with symmetric coefficients. The structure improved can achieves balance between processing speed and occupation in the FPGA resources, at the same time, the FIR filter with pipeline structure can process digital ultrasonic signal in parallel way. **Results:** The resolution of ultrasonic echo image in the Far-field is satisfied using the constant coefficient filter (the parameters of filter in the far-field). However, as closer to the near field, worse the effect of the image is. In contrast, the digital dynamic filter based on FPGA can achieve a good filtering effect, so the images of the ultrasonic echo have the best resolution in the near-filed and the far-field. **Conclusions:** The implementation of digital dynamic filter based on FPGA in the ultrasonic systems is entirely feasible, and it's helpful for improving the system stability and reliability.

Key words: Ultrasonic Signal; Dynamic Filter; Distributed Arithmetic; FIR Filter; FPGA

Chinese Library Classification: TN911.72 **Document code:** B

Article ID: 1673-6273 (2012) 02-344-04

前言

医学超声系统中动态滤波是一个关键环节,这个环节是针对人体组织对不同频率超声能量衰减的不同而提出的。人体软组织对超声衰减与频率大致成线性关系。随着超声频率的升高,组织对超声能量的衰减系数增大。因为超声发射脉冲总会有一定频宽,所接受的回波频率成分构成必然与距离有关。在近场,回波信号频率成分主要集中在频带的高端,随着探测深度的增加,回波频率成分逐渐向频带低端偏移^[1]。

为了使回声图像近场和远场都有最佳分辨率,在近场应选

择体表部分具有良好分辨率的高频分量,而在远场应选择容易到达组织深部的低频分量。动态滤波电路就是用于自动选择回声信号中有诊断价值的频率成分,并滤除近体表以低频为主的强回声和远场以高频为主的干扰的一个频率选择器,从而提高近场的分辨率和远场的信噪比,使回声图像的质量得到改善^[2]。

1 基于 FPGA 动态滤波的实现

动态滤波器的设计通常有两类数字滤波器可选用,无限冲激响应(Infinite Impulse Response,IIR) 数字滤波器和有限冲激响应(Finite Impulse Response,FIR) 数字滤波器,这两类滤波器在数字信号处理系统中有着广泛的应用。IIR 滤波器采用递归结构,即带有反馈环路,相位特性不好控制。FIR 滤波器采用非递归结构,具有稳定性好、因果性及线性相位等特点^[2]。超声信号处理及数据传输等领域都要求信道具有线性相位特点,因此

作者简介 朱利华(1985),男,硕士,主要研究方向 医用超声诊断设备中数字信号处理技术

△通讯作者 武剑辉,电话 13412068107,E-mail wjh8866@126.com

(收稿日期 2011-06-02 接受日期 2011-06-27)

本文采用 FIR 滤波器设计动态滤波器。

1.1 基于分布式算法 (Distributed Arithmetic, DA) FIR 滤波器在 FPGA 上的实现结构

分布式算法是一项重要的 FPGA 技术,广泛应用在计算如式 (1) 乘积和中。该算法核心思想是把乘法运算转换成基于 ROM 查找表结构,并且高效的实现多个乘法运算操作,相对于采用乘积和结构设计的 FIR 滤波器来说,在速度和资源占用上具有不可比拟的优势。

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

1.1.1 分布式算法 (Distributed Arithmetic, DA) 原理 这里直接给出有符号变量的 DA 数制。式 (1) 中 $c(n)$ 为已知常数, $x(n)$ 为变量。假设表达式(补码形式)如下:

$$x(n) = -2^B x_B(n) + \sum_{b=0}^{B-1} x_b(n) 2^b \quad (2)$$

其中 x_b 为二进制变量 位宽。把式 (2) 代入 (1) 式可得:

$$y = -2^B c(n)x_B(n) + \sum_{b=0}^{B-1} 2^b \sum_{n=0}^{N-1} c(n)x_b(n) \quad (3)$$

上式 $c(n)x_b(n)$ 的实现方法就是利用一个查找表 (LUT) 实现映射。即设位宽为 N , 则 LUT 接收一个 N 位输入向量 $x_b = [x_b(0), x_b(1), \dots, x_b(N-1)]$, 输出为 $c(n)x_b(n)$ 。各个映射结果都由相应的二次幂加权并累加, 利用移位加法器就能有效地实现累加。在 $(B+1)$ 次查询后完成了有符号 DA 运算。其中符号位运算可采用带加 / 减控制的累加器^[3]。

1.1.2 分布式算法的改进 为了提高速度,可以在基本 DA 结构上增加额外的 LUT、寄存器和加法器。比如,一个 N 阶乘积和运算的基本 DA 结构接收 N 个字中每个字内的一位,而如果每个字每位都得到接收 (如图 1 所示), 那么计算速度则是原来的 $(B+1)$ 倍。这种完全并行的处理结构能够达到最大处理速度,完全满足实时处理的要求。当然,提高速度的代价是增加了 FPGA 资源的消耗^[1]。处理 $(B+1)$ 字长的变量则需要额外增加 B 倍的 LUT、寄存器和加法器,这对于高阶滤波器来说代价是非常昂贵的。

关于如何限制 N 的大小,是下面要讨论的另一个改进。

设滤波器阶数位 LN , 则式 (1) 可改写为:

$$y = \sum_{n=0}^{LN-1} c(n)x(n) \quad (4)$$

进一步可分解为 L 个长度为 N 的内积的和:

$$y = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{n=0}^{N-1} c(Ll+n)x(Ll+n) \quad (5)$$

这样基本 DA 结构 LUT 的 LN 字长降为 N 字长,最后再将 L 个查询结果相加便得到原内积结果 (如图 2)。如果再加上流水线寄存器,这一改进并没有降低速度,但是却可以极大的减少设计规模。

本设计中采用 16 阶 FIR 滤波器,系数字长为 10 bit,因此对每一位来说,16 输入的 LUT 分解为 4 个 4 输入 LUT。因为系数字长为 10 bit,则需 10 组相同的 LUT。

另外,本设计中采用的是具有线性相位的 FIR 滤波器,而线性相位 FIR 滤波器的系数是奇对称 $c(n) = -c(N-1-n)$ 或偶对称

$c(n) = c(N-1-n)$ 的。则式 (1) 可写为:

$$y = \sum_{n=0}^{N-1} c(n)x(n) = \sum_{n=0}^{N/2-1} c(n)[x(n) \pm x(N-1-n)] \quad (6)$$

从上式可以看出,利用线性相位 FIR 滤波器系数固有的对称属性可以减少一半的实现乘法运算所需资源,而实现加法运算所需资源不变^[3]。在 FPGA 中实现乘法运算,尤其是高位宽的乘法运算需要占用大量的资源,而这种简单改进却减少了一半的乘法运算,所以这点改进的性能是非常诱人的。

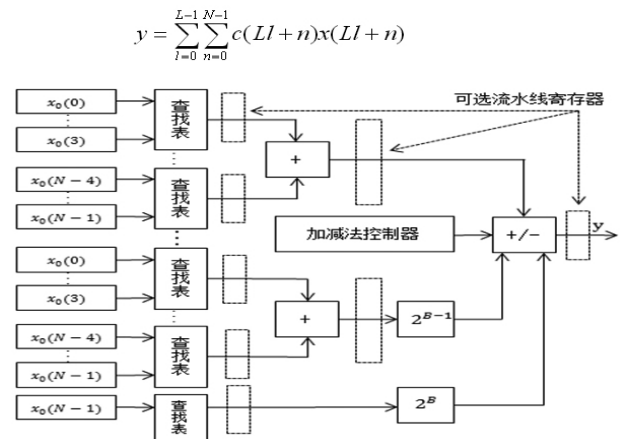


图 1 改进后 DA 结构^[3]

Fig.1 DA structure improved

1.1.3 滤波器单位脉冲响应序列的计算 本设计中动态滤波器是中心频率逐渐下移的一组 (32 个) 带通 FIR 滤波器,系统时钟即采样频率为 20 MHz,探头发射超声波中心频率 3.5 MHz,那么各个滤波器中心频率 ω_0 和带宽 ω_c 可由以下公式计算得出:

$$\omega_0 = \frac{\omega_r(128-n)}{128} \quad (7)$$

$$\omega_c = \frac{\omega_r(128-n)}{384} \quad (8)$$

其中 ω_r 为超声波中心频率和采样频率的商。

有了阶数、中心频率和带宽,各个滤波器系数可由 Matlab 中函数 fir1 计算出。

1.2 基于 DA 的 FIR 滤波器仿真

为了验证滤波器滤波效果,本文利用 Matlab 对设计的滤波器进行仿真。首先利用 fir1 函数求出各个滤波器系数,从而再利用函数 freqz 求出所设计滤波器冲激响应。

下面分别给出了第 1 个和第 30 个 FIR 滤波器冲激响应频谱波形。第一个带通滤波器中心频率为 3.5 MHz,带宽为 1.1667 MHz;第 30 个带通滤波器中心频率为 2.7070 MHz,带宽为 0.9023 MHz。

从图 2、图 3 可以看出滤波器中心频率和带宽基本达到了设计要求。

1.3 动态滤波效果验证

结合实验室研制的数字化超声前端、PCI 采集卡和基于 PC 的超声信号处理和图像显示系统,对动态滤波模块滤波效

果进行了验证。超声回波信号经数字化前端完成波束形成和模/数转换,然后,已数字化的超声回波信号进入本文所设计的数字动态滤波器进行匹配滤波。信号经匹配滤波后已经消除了近体表以低频为主的强回声和远场以高频为主的干扰。为了观察滤波效果,通过 PCI 数据采集卡把信号实时传输到计算机内,并利用基于 PC 的超声信号处理和显示系统完成超声回波的后端处理和显示任务。

在其他条件相同的情况下,本文采用常值滤波器和动态滤波器分别对回波信号进行滤波。常值滤波器采用远场匹配的滤

波参数,中心频率为 2.6856 MHz,带宽为 0.8913 MHz,显示效果如图 4;采用由 32 组不同参数的 FIR 滤波器构建的动态滤波器进行匹配滤波,显示效果如图 5。

通过对比图 4 和图 5 可以看出,采用常值滤波器成像系统分辨率与采用动态滤波器的成像系统分辨率在远场大致相同,但越靠近场,采用常值滤波器的系统图像分辨率越不理想,而采用本文所设计的动态滤波器进行匹配滤波的成像系统无论在近场还是远场,图像分辨率都达到了满意的效果。

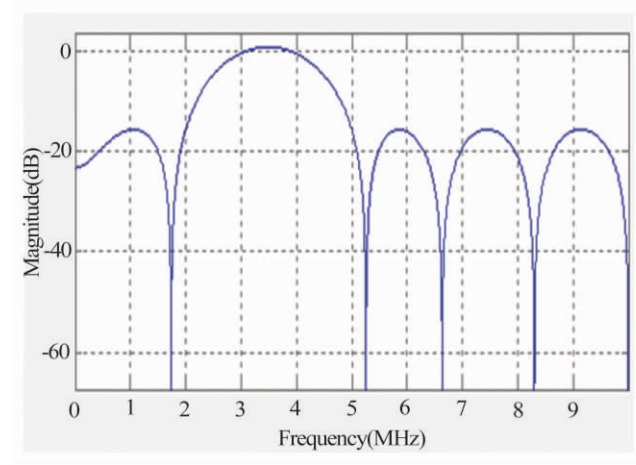


图2 第1个带通滤波器频谱特性
Fig.2 The first one band pass filter spectrum

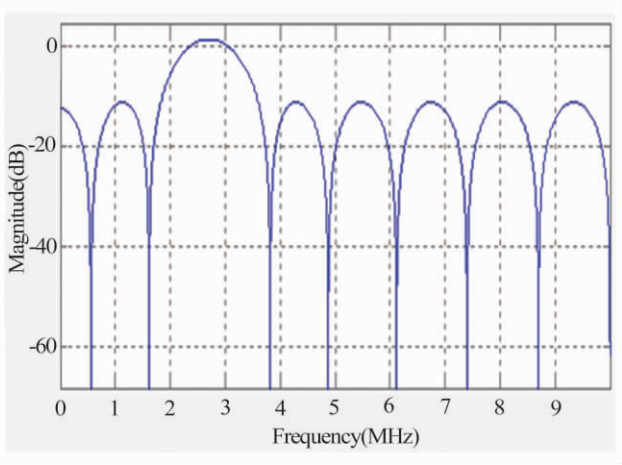


图3 第30个带通滤波器频谱特性
Fig.3 The 30rd band pass filter spectrum

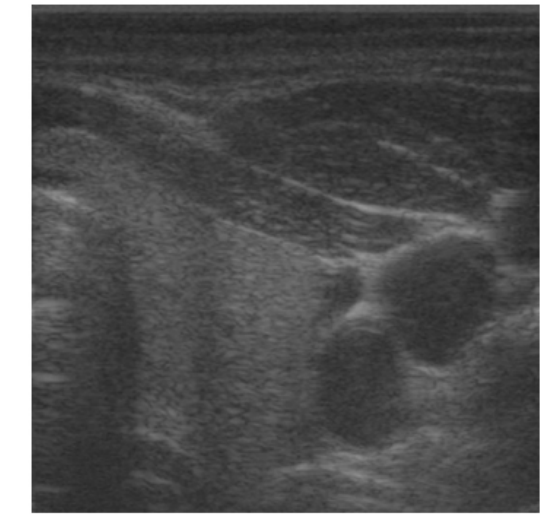


图4 采用常值滤波器
Fig.4 Filter with constant

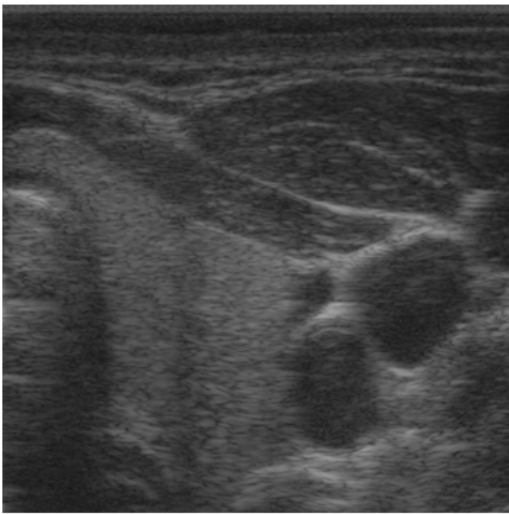


图5 采用动态滤波器
Fig.5 Filter with dynamic filter

2 结语

随着 FPGA 制造工艺的不断发展,FPGA 已经从传统的数字逻辑设计发展到用于进行数字信号处理和嵌入式系统的设计。本文所设计的基于 FPGA 的动态滤波器,因为采用了改进后的 DA 结构,完全可以达到回波信号实时处理,而且通过图 5 和图 6 的对比,超声显示系统的分辨率也达到了满意的效果。

通过本次设计可以看出,我们完全有可能把超声设备中数字信号处理过程,包括前端波束形成,后端的对数压缩、二次采

样以及数字扫描变换器(Digital Scan Converter, DSC),甚至多普勒超声设备中自适应滤波和相关分析等数字信号处理过程完全由 FPGA 实现。这样不仅减小了系统的体积,提高了系统的便携性,也将提高系统的稳定性、可靠性,同时降低了成本,使超声系统变得更有用,更普及,从而给大众带来更好的医疗保健。

参考文献 (References)

[1] 冯若. 超声手册 [M]. 南京: 南京大学出版社, 1999
Feng Ruo. Ultrasound Guide [M]. Nanjing: Nanjing University Press,

1999

- [2] 周盛,杨军.全数字 B 超信号处理 [J].国际生物医学杂志,2007, 30 (6):356-360
Zhou Sheng, Yang Jun. Digital signal processing of B-mode ultrasound system.International Journal of Biomedical Engineering,2007, 30(6):356-360
- [3] Meyer-Baese U. Digital signal processing with field programmable gate arrays [M]. Third Edition. Berlin: Springer, 2007
- [4] 何宾. FPGA 数字信号处理实现原理及方法 [M].北京:清华大学出版社,2010
He Bing. FPGA digital signal processing theory and methods [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010
- [5] Erhan Özalevli,Walter Huang,Paul E,et al. A reconfigurable mixed-signal VLSI implementation of Distributed Arithmetic used for finite-impulse response filtering [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems,2008,55(2):510-521
- [6] Pramod Kumar Meher.New approach to Look-UP-Table design and memory-based realization of FIR digital filter [J].IEEE Transactions on Circuits and Systems,2010,57(3):592-603
- [7] Nelson R. Optimizing resolution and sampling rate [J]. Test Measurement World, 2006, 26, 26(2):23-26
- [8] Von Bernus L, Bulavinov A, Dalichow M, et al. Sampling phased array-a new technique for signal processing and ultrasonic imaging [J]. Insight, 2006, 48(9):545-549
- [9] 黄英.全数字 B 超回波信号处理方法研究 [D].南京:东南大学,2010.
Huang Ying. Digital B-Mode ultrasound echo signal processing research [D]. Nanjing: Southeast University, 2010
- [10] 周盛,李仙琴,王晓春,等.全数字 B 超动态滤波器的设计与实现 [J].中国生物医学工程学报,2010,29(3):418-421
Zhou Sheng, Li Xian-qin, Wang Xiao-chun, et al. Design and realization of a dynamic filter in digital B Mode ultrasonography [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2010, 29(3):418-421
- [11] Stewart B, Crockett L. The Xilinx DSP Primer [M]. University of Strathclyde Press, Scotland, 2008
- [12] 王冠,黄熙,王鹰.Verilog HDL 与数字电路设计 [M].北京:机械工业出版社,2006
Wang Guan,Huang Xi,Wang Ying.Digital circuit design with Verilog HDL [M]. Beijing:China Machine Press,2006
- [13] 王雷,沈毅,王小涛.B 超动态滤波器的设计与实现 [J].中国医疗器械杂志,2006,30(5):372-374
Wang Lei,Shen Yi,Wang Xiao-tao.Designing and realization of the dynamic filter in B mode ultrasonic scanning [J].Chinese Journal of Medical Instrumentation,2006,30(5):372-374
- [14] 徐远泽,戴立新,高晓蓉,等.FIR 滤波器的 FPGA 实现方法 [J].现代电子技术,2010(22):64-70
Xu Yuan-ze,Dai Li-xin,Gao Xiao-rong,et al.Realization methods of FIR filter based on FPGA [J].Modern Electronics Technique,2010 (22):64-70
- [15] 邵朝,阴亚芳,卢光跃.数字信号处理 [M].北京:北京邮电大学出版社,2004
Shao Zhao,Yin Ya-fang,Lu Guang-yue.Digital signal processing [M], Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2004
- [16] Sangyun,Gunhee,Sungho,et al.A low-power implementation scheme of interpolation FIR filters using distributed arithmetic [J].IEICE TRANS.Electron,2003,86(11):2346-2350

(上接第 311 页)

- [9] Yashiro M,Kamata T,Segawa H , et al. Comparisons of Cystatin C with Creatinine for evaluation of renal function in Chronic Kidney disease[J]. Clin Exp Nephrol,2009,13(6):498-604
- [10] Sato H,kuroda T,Tanabe N, et al. Cystatin C is a sensitive marker for detecting a reduced glomerular filtration rate when assessing Chronic Kidney disease in patient with rheumatoid and secondary amyloidosis [J]. Scand J Rheumatol,2001,39(1):33-37
- [11] Waties KB, Talkington DE. Mycoplasma pneumoniae and its role as a human pathogen [J]. Clin Microbiol Rev, 2004 17(4):696-728
- [12] Stelmach I,Podsiadlowicz-Borzeka M, Grzelewski T, et al. Humoral and cellular immunity in children with Mycoplasma pneumoniae infection ,a-year prospective study [J]. Clin Diagn Lab Immunol, 2005,12(10):1246-1250