

基于 FPGA 的编码超声发射系统的设计*

周奇, 王晓春, 计建军, 王延群[△]

(中国医学科学院 生物医学工程研究所, 天津 300192)

摘要:介绍一种以现场可编程门阵列(FPGA)为基础的低电压编码超声发射系统。该系统采用 XC3S400 FPGA 产生编码超声发射所对应的数字编码,该数字编码经过模数转换产生编码发射波形,再将发射波形经过放大后作用于超声换能器,通过回波信号放大电路提取回波信号,对回波信号压缩处理分析结果表明:该编码超声发射系统能满足超声成像指标要求,降低超声单脉冲发射峰值声功率,提高信噪比。

关键词:编码发射;脉冲压缩;信噪比;回波;Golay 码;现场可编程门阵列

中图分类号:R318 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-6278 (2008)04-0243-05

Coded Ultrasound Transmitting System based on Field Programmable Gate Array

ZHOU Qi, WANG Xiaochun, JI Jianjun, WANG Yanqun

(Institute of Biomedical Engineering, Chinese Academy of Medical Sciences, Tianjin 300192, China)

Abstract: To design a low voltage coded ultrasound transmitting system based on field programmable gate array(FPGA). The digital codes corresponding to coded ultrasound transmitting was generated by XC3S400 FPGA. The digital code was transformed coded transmitting wave by analog-to-digital converting. Coded transmitting wave was amplified and then acted on the ultrasound probe. The coded transmitting echo was gotten by an amplifier circuit. As a result of echo's pulse compression, this coded ultrasound transmitting system can fulfill the standard of echo image. The system can reduce peak value power of single pulse sending and increase the signal-to-noise.

Key words: Coded excitation; Pulse compression; Signal-to-noise; Echo; Golay code; Field programmable gate array

1 编码发射技术原理

编码发射技术使用一连串脉冲序列激励宽带换能器,再接收一连串序列的回波,通过脉冲压缩得到分辨率与单脉冲一样的解码脉冲,其原理见图 1^[1]。在峰值声功率相同的条件下,由于编码发射与

单脉冲发射相比提高了发射信号的平均声功率,采用适当的解码方法如匹配滤波,得到的解码脉冲能够提高系统的信噪比,成像质量更高。

由上图可知,编码发射成像系统与传统的单脉冲回波成像系统的不同之处在于:发射电路采用编码发射;同时,为了满足与单脉冲发射一样的分辨率要求,接收电路中需要对回波信号进行脉冲压缩。本研究介绍了一种基于 FPGA 的编码超声发射电路以及回波提取放大电路,发射 Golay 互补序列对,用 matlab 对接收到的回波信号进行压缩分析。

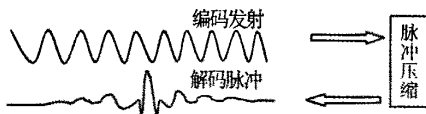


图 1 超声成像中的编码发射原理

Fig 1 Illustration of coded transmitting principle for ultrasound imaging

2 编码脉冲方式

Newhouse1974 年提出了白噪编码的超声成像和

* 基金项目:中央级公益性科研院所业务专项项目(2007);天津支撑计划项目(207CKFSF01400)。

[△]通信作者 Email:wangyanqun-2008@163.com

多普勒测量系统^[2]。在此后的近 30 年里,包括 M 序列、伪随机码、Golay 码、Barker 码和 Chirp 码等各种编码方法被用于编码超声发射的研究^[3]。本设计采用 Golay 互补序列对和 Barker 码作为编码发射码型,来验证电路的合理性。编码发射采用二相码结构,编码发射二相码与发射波形见图 2。

Golay 码是一组二值自相关的互补序列对,Golay 互补序列对定义^[4]:二元互补序列为一对长度相等且由两元素构成的序列,且在任何给定间隔下,一个序列中的相同元素对的个数等于另一个序列中的相异元素对的个数。数学语言描述如下:设

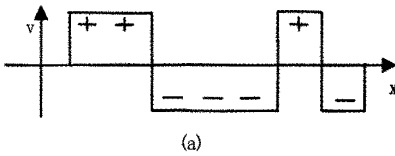


图 2(a) 编码发射二相码
Fig 2 (a) Ambipolar code of coded transmitting

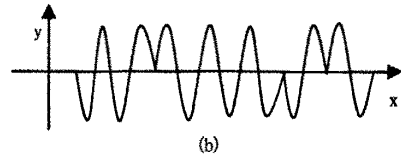


图 2(b) 二相码对应的发射脉冲
Fig 2 (b) Transmitting pulses of ambipolar code

有一对长度相同的有限二相序列 $A = \{a_n\}$, $a_n \in (+1, -1)$, $n \in 0, 1, 2, \dots, N-1$ 和 $B = \{b_n\}$, $b_n \in (+1, -1)$, $n \in 0, 1, 2, \dots, N-1$ 其非周期自相关函数分别为:

$$\chi_A(m, 0) = \sum_{k=0}^{N-1-|m|} a_k a_{k+m} \quad (1)$$

$$\chi_B(m, 0) = \sum_{k=0}^{N-1-|m|} b_k b_{k+m} \quad (2)$$

$$\text{若 } \chi_A(m, 0) + \chi_B(m, 0) = \begin{cases} 2N, & m = 0 \\ 0, & m \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

则称序列 A, B 为互补序列对。图 3 为 Golay 码回波压缩叠加原理示意图^[5]。

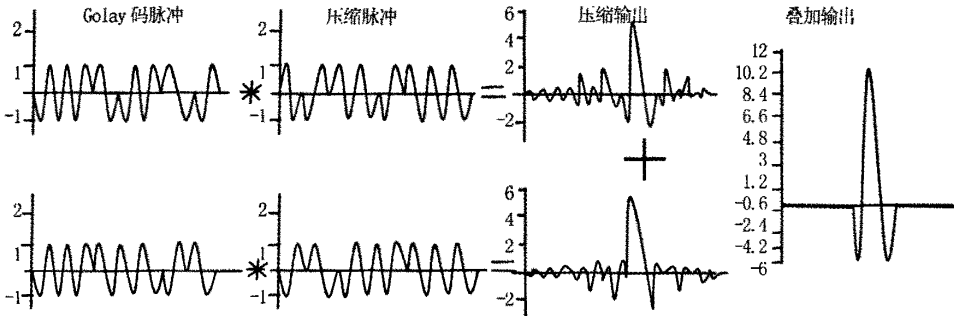


图 3 长度为 8 位的互补 Golay 序列对消除距离旁瓣原理
Fig 3 Principle of side lobe cancellation using pair of Golay complementary sequences of length 8

3 系统设计

3.1 电路设计

近 10 年来,编码发射技术在医学超声成像系统中逐渐得到应用。超声编码发射成像系统结构见图 4^[6]。

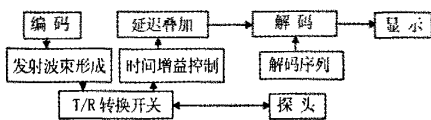


图 4 编码超声发射成像系统结构框图
Fig 4 Ultrasound system block diagram with coded transmitting

根据编码超声发射成像系统的结构,我们提出了一种编码超声发射系统,电路结构见图 5。

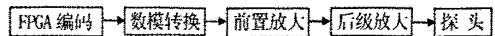


图 5 编码超声发射电路结构简图
Fig 5 Block diagram of the coded ultrasound transmitting circuit

FPGA 产生与需要编码发射对应的 DAC 转换所需要的不同数字编码序列。数模转换和前置放大都是用于波束形成,模数转换把数字编码序列变为模拟编码发射输出,前置放大负责放大数模转换输出的编码发射信号,后级放大用于进一步放大编码发射信号使其能够直接驱动探头。电路中采用的 FPGA 为 Xilinx 公司的 spartan3 系列的 XC3S400^[7],数模转换芯片为 DAC5652,前置放大芯片为 THS4502,后级放大芯片为 THS3091。探头采用中心频率为 10 MHz 的换能器,见图 6。

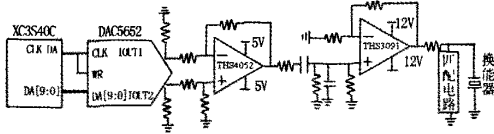


图 6 编码超声发射电路

Fig 6 Transmitting circuit of coded ultrasound

为了提取回波信号,设计了一级回波信号放大电路,电路采用共基-共射放大电路模式,该电路与探头的匹配性好,具有 15dB 的稳定增益等优点,经放大器放大后能够得到清晰的回波信号。

3.2 程序设计

设计中采用可编程逻辑阵列作为超声编码发射

电路的主控器件,其主要功能是产生编码发射所对应的数字编码序列。程序设计是在 Xilinx 公司 FPGA 开发软件 ISE8.1 环境下进行的,整个设计过程包括程序代码编写、调试。设计中采用 FPGA 自带的 IP 核片内 RAM 实现数字编码序列数据的只读存储 ROM,通过改变 ROM 中的数据就能够产生不同的编码发射,程序设计灵活。用 FPGA 的时钟管理单元(DCM)产生数模转换的时钟信号和数据写入信号,信号稳定可靠。程序调试在 Modesim 仿真环境下进行。通过 Modesim 仿真出 FPGA 所输出的数字编码信号是否为预期的数字编码序列,使程序设计更加可控,加快了设计速度。在 ISE 环境下产生的数字编码序列顶层模块见图 7。

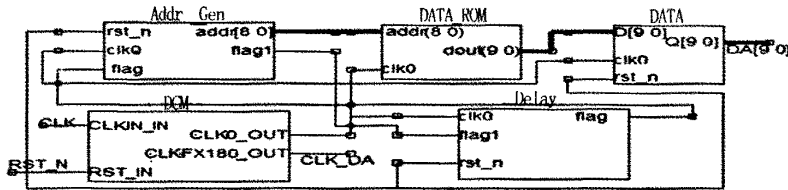


图 7 数字编码序列顶层模块图

Fig 7 The up block diagram of digital coded sequence

4 结果与分析

为了验证电路设计的合理性,我们可以通过发射编码激励,提取回波信号并用相应的压缩方法,从压缩结果观察是否满足超声成像要求以判断电路的合理性。衡量脉冲压缩效果的指标为距离旁瓣水平(RSL),定义为主瓣峰值与旁瓣峰值平均值之比。

$$RSL = 20 \lg \frac{\max(A_{main\ lobe})}{\frac{1}{T} \int A_{side\ lobe}(t) dt} \quad (4)$$

其中, $A_{main\ lobe}$ 是主瓣幅度, $A_{side\ lobe}$ 是旁瓣幅度; T 为所取旁瓣范围,按照超声成像理论要求, RSL 在 -30dB 以下就满足 B 型超声成像要求^[8]。

用该电路发射单个脉冲频率为 10 MHz,长度为 16 位的 Golay 码互补序列对 $A = (-1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, -1, 1, -1, -1)$ 和 $B = (-1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, 1, -1, 1, 1)$,做单面反射实验,采用泰克 TDS5104 示波器,采样频率为 1.25G/s,得到的回波见图 8。在 matlab 环境下采用匹配滤波器对回波信号进行压缩,压缩后的回波信号见图 9。

对 A、B 编码发射序列压缩后的波形进行叠加的输出及取其峰值包络图,见图 10。

从叠加后的回波峰值包络值可以看出, Golay 码序列对压缩叠加后的波形其 RSL 值在 -30dB 以下满足超声成像要求。

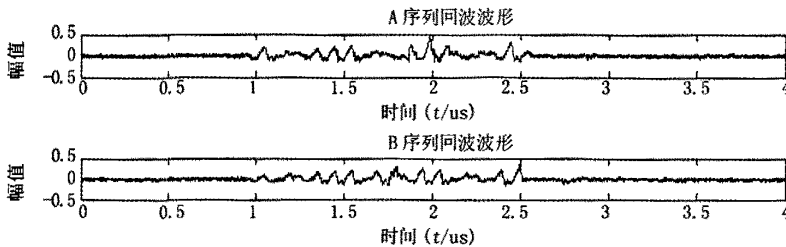


图 8 Golay 码序列对回波信号

Fig 8 Echo signal of Golay code sequence pair

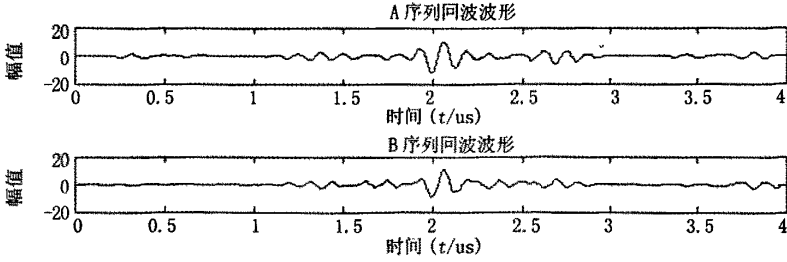


图 9 Golay 码序列对回波压缩后的波形

Fig 9 The compression wave of Golay code sequence pair echo signal

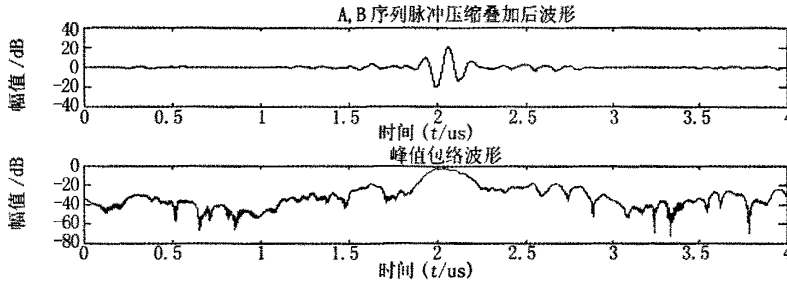


图 10 Golay 码压缩回波叠加后波形

Fig 10 The wave after plusing the compressed echo wave

用该电路发射 16 位长度的 Golay 码互补序列对 $A = (-1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, -1, 1, -1, -1)$ 和 $B = (-1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, -1, 1, -1, 1, 1)$ 做人体眼睛检测实验。脉冲编码发射电压峰值为 24 V, 采用 10 MHz 探头, Golay 码单个脉冲的频率为 10 MHz(周期 100 ns), 即一个脉冲串持续时间为 1.6 us, 回波信号经过增益为 15 dB 的放大电路后, 采用泰克公司的 TDS5104 示波器, 采样频率为 625 M/S。提取眼球底部视网膜的回波信号, 见图 11。在该图中, 根据 $d = 0.5 \times t \times v$, 其中 t 为回波延迟时间(图 11 中约为 32 us), v 为超声波速度($v = 1540$ m/s), 眼球底部距眼表的距离约为 24.6 mm, 由于眼球个体差异的原因, 此数据正是人体眼球底部视网膜的回波信号。将图 11 中 32 ~ 40 us 的图形展开后, 得到眼底视网膜局部的回波及采用匹配滤波器压缩叠加后的波形见图 12。

在图 12 中, 由于视网膜及其软组织反射, 所以能够连续提取多个编码回波序列串, 但由于回波信号只经过 15 dB 的放大, 因此只能看到视网膜回波和一层软组织反射的回波信号, 即编码序列回波持续时间为 3.2 us, 压缩叠加后得到类似于 10 MHz 单脉冲发射得到的两个眼底回波信号, 即与 10 MHz 单脉冲发射有相同的分辨率, 在图 12 回波压缩叠加后波形中, 前一个为视网膜回波信号, 由于视网膜反射强, 因此压缩后幅值较大, 后一个为视网膜软组织层面反射后的回波压缩后的信号, 幅值较小。

采用传统眼科 A 超单脉冲发射方法做人眼检测实验, 发射脉冲电压为 100 V, 眼底视网膜回波经 30 dB 增益后, 用泰克 TDS5104 示波器提取回波信号, 采样率为 625 M/s, 见图 13。

将图 13 中 32 ~ 40 us 的图形展开后, 得到单脉冲发射视网膜局部的回波, 见图 14。

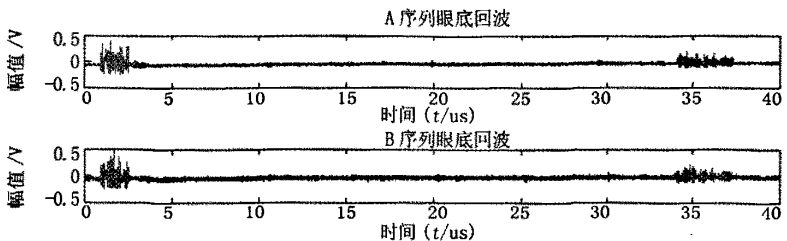


图 11 编码发射检测眼底视网膜回波信号

Fig 11 Retina echo signal of coded excitation

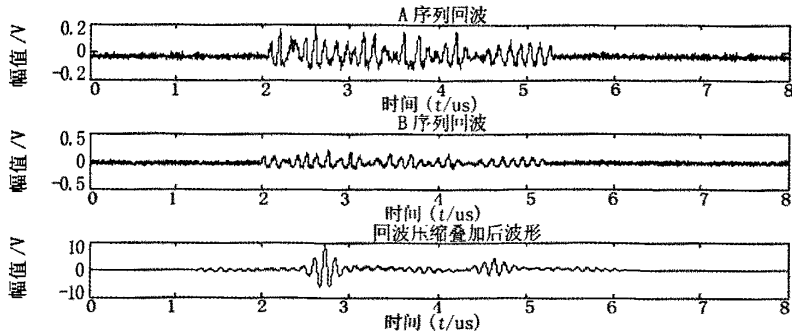


图12 16位Golay码局部眼底视网膜回波及压缩波形

Fig 12 The segment retina echo signal and compressed wave using 16 bits Golay code

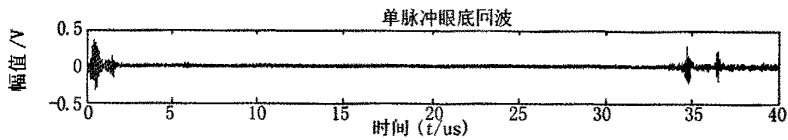


图13 单脉冲发射时眼底视网膜回波

Fig 13 The retina echo of single pulse transmitting

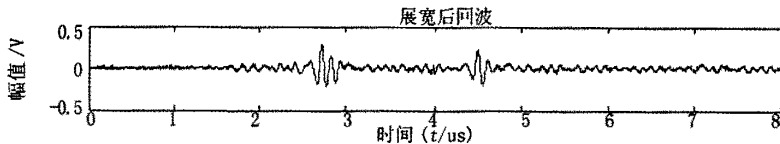


图14 单脉冲发射时局部眼底视网膜回波

Fig 14 The segment retina echo of single pulse transmitting

在图14中,由于眼底视网膜和软组织的反射,同样存在两个回波信号,从图中可以看出,经过30 dB增益后,视网膜和软组织回波信号峰峰值大约分别为0.6 V和0.4 V。再结合图12可以看出:采用编码超声发射电路检测人体眼睛,发射单个脉冲频率为10 MHz的编码序列,用24 V的发射电压得到的回波,经15 dB放大后进行脉冲压缩叠加得到的视网膜信号波形和10 MHz、100 V单脉冲发射得到的视网膜波形相似,即具有相似的分辨率和信噪比。即在相同信噪比条件下,该编码激励发射电路能够降低超声波发射电路电压峰峰值。即如果在相同发射电压的条件下,该编码超声发射电路较单脉冲发射而言提高了图像信噪比。

我们以FPGA为基础,设计了一种结构简单的低电压编码超声发射电路,通过单面反射实验和活体人眼检测实验,该电路产生的编码超声发射回波压缩后能够满足超声成像指标。该电路具有降低超声波发射电压的作用,在便携式超声设备中会有广

泛的应用。

参考文献:

- [1] Donnell M O', Wang Y. Coded excitation methods in biomedical ultrasound[J]. IEEE, 2004, 37-40.
- [2] Newhouse VL, Bendick PJ. An ultrasonic random signal flow measurement system[J]. Jour Acoust Soc of America, 1974, 56: 860-870.
- [3] 彭旗宇, 高上凯. 医用超声成像中的编码激励技术及其应用[J]. 生物医学工程学杂志, 2005, 22: 175-180.
- [4] GOLAY MJ. Complementary series IRE trans inform theory[J]. 1961, IT-7: 82-87.
- [5] Nowicki A, Secomski W, Litniewski J, et al. On the application of signal compression using golay's codes sequences In ultrasound diagnostic[J]. Archives of Acoustics, 2003, 28: 313-324.
- [6] Chiao R Y, Hao XH. Coded excitation for diagnostic ultrasound: a system developer's perspective[J]. IEEE Ultrasonics Symposium, 2003, 437-448.
- [7] Xilinx Corporation. Spartan-3 FPGA Family: Complete Data Sheet[R]. 2005.
- [8] 刘凯, 高上凯. 高频超声成像中的编码激励研究[J]. 北京生物医学工程, 2007, 26: 31-35. (收稿日期: 2008-09-03)

基于FPGA的编码超声发射系统的设计

作者: [周奇](#), [王晓春](#), [计建军](#), [王延群](#), [ZHOU Qi](#), [WANG Xiaochun](#), [JI Jianjun](#), [WANG Yanqun](#)

作者单位: [中国医学科学院生物医学工程研究所, 天津, 300192](#)

刊名: [生物医学工程研究](#) **ISTIC**

英文刊名: [JOURNAL OF BIOMEDICAL ENGINEERING RESEARCH](#)

年, 卷(期): 2008, 27(4)

引用次数: 0次

参考文献(8条)

1. [Donnell M O', Wang Y Coded excitation methods in biomedical ultrasound](#) 2004
2. [Newhouse VL, Bendick PJ An ultrasonic random signal flow measurement system](#) 1974
3. [彭旗宇, 高上凯 医用超声成像中的编码激励技术及其应用\[期刊论文\]-生物医学工程杂志](#) 2005
4. [GOLAY MJ Complementary series IRE trans inform theory](#) 1961
5. [Nowicki A, Secomski W, Litniewski J On the application of signal compression using golay's codes sequences In ultrasound diagnostic](#) 2003
6. [Chiao R Y, Hao XH Coded excitation for diagnostic ultrasound:a system developer's perspective](#) 2003
7. [Xilinx Corporation Spartan-3 FPGA Family:Complete Data Sheet](#) 2005
8. [刘凯, 高上凯 高频超声成像中的编码激励研究\[期刊论文\]-北京生物医学工程](#) 2007

相似文献(2条)

1. 学位论文 [鲍静 医学超声成像系统的编码激励技术研究](#) 2007

医学超声成像是现代医学影像技术研究的最重要领域之一。近年来, 工程技术的迅猛发展带动了医学超声成像技术的发展和普及, 超声诊断在现代医学中的地位也越来越高。改善医学超声系统的成像质量、增强系统功能、提高系统可靠性和灵活性、降低系统成本, 已成为医学超声成像方法研究中的重点依据。编码激励技术在医学超声成像系统中的应用对提高成像质量、增加探测深度、提高系统对微弱信号的灵敏度等方面有显著效果。本论文从理论上分析了编码激励技术在医学超声成像系统中的应用, 设计了二相编码发射电路和相应的脉冲压缩模块, 通过在本课题组项目“数字医学超声内窥成像系统”中的应用, 展示了编码激励技术的优越性能和广阔的应用前景。

论文主要完成了以下工作:

1. 针对编码激励技术对医学超声成像系统性能的改善进行了分析研究, 介绍了编码激励以及脉冲压缩的原理, 并给出了编码激励系统的评价指标。
2. 分别介绍并比较了编码序列(包括Chirp和伪Chirp信号、Barker码、Golay互补序列、M序列等)在编码激励系统中的应用以及数字脉冲压缩的应用(包括时域法和频域法)。
3. 针对相位编码信号和时域脉压方法设计了主要由Supertex公司生产的芯片MD1211和TC6320构成的二相编码发射电路和利用Altera公司FPGA实现的脉冲压缩功能。
4. 在课题组“数字医学超声内窥成像系统”的应用背景下, 完成了对电路的调试和程序的修改, 实验结果和仿真结论与理论分析基本一致, 体现了编码激励技术在数字医学超声内窥成像系统中的优势。

2. 学位论文 [彭旗宇 数字化医学超声成像方法的研究](#) 2003

利用数字化技术改善医学超声成像系统图像质量、增强系统功能、提高系统的可靠性和灵活性、降低系统的成本, 一直是医学超声成像方法研究中的热点。

该文按照从发射到成像的顺序, 对超声成像中编码发射激励、数字波束合成、数字解调和对数压缩、数字扫描变换四部分分别进行了深入研究。

该文在第一部分中的主要成果是:

- (1) 提出了一种脉冲激励和元素为0、1的Golay互补序列对编码激励相结合的成像方法, 可应用于眼球的超声成像中, 实现玻璃体图像增强。
- (2) 针对Chirp信号编码激励时脉冲压缩效果不佳的缺点, 提出了一种基于加权最小二乘法的脉冲压缩方法, 通过使泄漏的能量更均匀分布在主瓣周围, 取得了较好的脉冲压缩效果。

该文在第二部分研究中的主要成果是:

- (1) 提出了一种新的频域波束合成方法。该方法通过FFTPruning算法减少波束合成时的计算量; 通过在波束合成的同时进行回波解调, 省去了后继解调环节。
- (2) 提出了一种基于 Δ - Σ 变换的超声动态接收变速方法, 能够在降低线路的复杂性和后继数字信号处理计算量的大小的同时, 抑制阵列孔径引起的衍射瓣, 改善超声图像质量。
- (3) 提出了一种基于 Δ - Σ 变换的波束合成中, 抽取和解调合并处理的方法。该方法 Δ - Σ 量化正交解调时的正弦和余弦信号, 并使抽取和解调合并处理, 能够在保证成像质量的同时, 进一步简化系统结构。

该文在第三部分中的主要成果是:

- (1) 提出一种基于二叉树比较的平方根和对数压缩方法, 以较少的硬件开销, 实现精确的平方根和对数运算。
- (2) 对一种便携式机械扇扫的超声成像系统成功地进行了全数字化改造, 进一步降低了系统硬件成本、减小了系统尺寸和重量、提高了图像质量。

该文在第四部分中的主要成果是:

- (1) 提出了一种通过四次查表实现的基于软件的双线性插值的高速算法。该方法能够以较高的速度实现数字扫描变换, 并取得较好的图像质量。
- (2) 提出了一种基于PCI总线的数据传输方法。
- (3) 设计实现了一种基于PC的医学超声成像系统。

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdsyxgc200804004.aspx

下载时间: 2010年5月27日