



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104688273 A

(43) 申请公布日 2015. 06. 10

(21) 申请号 201510114696. 5

(22) 申请日 2015. 03. 16

(71) 申请人 哈尔滨工业大学

地址 150000 黑龙江省哈尔滨市南岗区西大直街 92 号

(72) 发明人 金晶 周之锐 尉明望 鄂尔多斯
沈毅

(74) 专利代理机构 哈尔滨龙科专利代理有限公司 23206

代理人 高媛

(51) Int. Cl.

A61B 8/06(2006. 01)

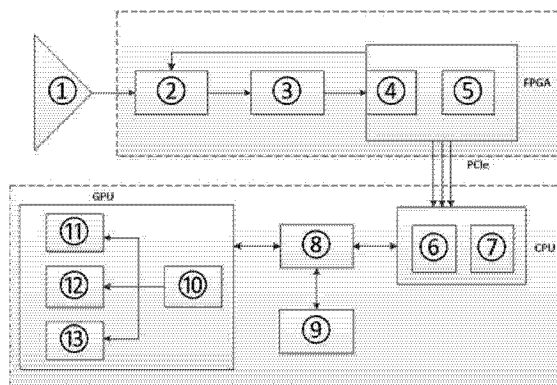
权利要求书2页 说明书4页 附图1页

(54) 发明名称

基于 CPU+GPU 异构架构的超高速超声成像装置及方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于 CPU+GPU 异构架构的超高速超声成像装置及方法, FPGA 控制探头发射多角度的平面波超声信号到待测生物组织上, 并将接收的数据进行模数转换和预放大处理; 经过预处理后的大量数据, 通过高速 PCIe 通道传递到 CPU 中; 在 CPU 中实现对数据的波束合成, 并对人机交互等功能进行实现; GPU 读取 CPU 在内存中的数据, 利用其并行计算能力和可变帧率平面波复合技术将信号进行复合和解调, 实现超高速成像。本发明采用高集成度的发射接收方案和统一的数据采集架构简化前端, 并将波束合成模块移至后端进行, 不仅进一步对前端进行精简, 还充分运用后端处理能力, 充分发挥系统性能。



1. 一种基于 CPU+GPU 异构架构的超高速超声成像装置, 由探头、前端和后端三部分构成, 其特征在于所述前端由 Tx/Rx 模拟接口、A/D 和预放大模块和 FPGA 组成, 后端由 CPU、由 DDR3 和 SSD 组成的存储模块和 GPU 组成, 其中:

(1) 所述 FPGA 的逻辑控制模块控制探头发射多个角度平面波穿透待测生物组织, 产生射频回波信号, 探头切换至接收模式;

(2) 所述 Tx/Rx 模拟接口进行接收, 并通过 A/D 和预放大模块进行预处理之后, 通过 FPGA 的 PCIe 接口模块将数据传递到后端 CPU 中;

(3) 所述 CPU 串行执行前端数据的波束合成, 再通过 DDR3 缓存将处理完的数据传递给 GPU, 并将数据存储进 SSD;

(4) 在 GPU 中实现多个平面波的可变帧率复合以及解调, 并对 Color 模式、B 模式、PW 模式成像进行实现。

2. 根据权利要求 1 所述的基于 CPU+GPU 异构架构的超高速超声成像装置, 其特征在于所述探头是中心频率为 128 阵元的宽带线阵探头。

3. 一种基于 CPU+GPU 异构架构的超高速超声成像方法, 其特征在于所述方法步骤如下:

步骤一: FPGA 控制探头发射多角度的平面波超声信号到待测生物组织上, 并将接收的数据进行模数转换和预放大处理;

步骤二: 经过预处理后的大量数据, 通过高速 PCIe 通道传递到后端 CPU 中;

步骤三: 在 CPU 中实现对数据的波束合成;

步骤四: GPU 读取 CPU 在内存中的数据, 利用其并行计算能力和可变帧率平面波复合技术将信号进行复合和解调, 实现超高速成像, 并实现高帧率、大视域的多模式成像同时运行。

4. 根据权利要求 3 所述的基于 CPU+GPU 异构架构的超高速超声成像方法, 其特征在于所述探头是中心频率为 128 阵元的宽带线阵探头。

5. 根据权利要求 3 所述的基于 CPU+GPU 异构架构的超高速超声成像方法, 其特征在于所述 FPGA 和 CPU 间的通讯采用基于串行通信系统的 PCIe3.0 总线协议, 采用 128b/130b 的编码方式, 16 条总线的带宽为 15.754GB/s。

6. 根据权利要求 3 所述的基于 CPU+GPU 异构架构的超高速超声成像方法, 其特征在于所述波束合成方法如下:

找到接收阵元 y_i 接收到的射频回波数据中对应延迟时间 $\tau(y_i; x, z, \alpha)$ 的数据, 图像上每个像素点的取得来源于对阵元的数据进行累加, 同时使用变迹函数 $ap(\theta)$ 作为加权系数, θ 表示 (x, z) 到该阵元 y_i 的偏角, 以垂直于探头的方向作为角度零点, 则波束合成累加得到的回波强度为:

$$s(x, z) = \sum_{i=1}^{128} RF(y_i, \tau(y_i; x, z, \alpha)) \cdot ap(\theta_{xzi}) \quad \circ$$

7. 根据权利要求 6 所述的基于 CPU+GPU 异构架构的超高速超声成像方法, 其特征在于所述延迟时间 $\tau(y_i; x, z, \alpha)$ 为:

$$\tau(y_i; x, z, \alpha) = (z \cos \alpha + x \sin \alpha) / c + \sqrt{z^2 + (x - y_i)^2} / c \quad \circ$$

8. 根据权利要求 6 所述的基于 CPU+GPU 异构架构的超高速超声成像方法,其特征在于所述解调步骤如下:

对复合后得到的数据沿深度方向做 Hilbert 解调,线数据为 $r(nT_s)$, T_s 为一条线上相邻两个数据点的时间间隔, n 为线上采样点的索引,则 Hilbert 变换的结果为:

$$r_A(nT_s) = r(nT_s) + j\hat{r}(nT_s) \quad \circ$$

基于 CPU+GPU 异构架构的超高速超声成像装置及方法

技术领域

[0001] 本发明属于超声成像领域,涉及一种在多角度平面波发射的基础上,基于 CPU+GPU 异构架构的超高速超声成像装置及成像方法。

背景技术

[0002] 传统的超声成像系统,不论对于 B 模式,Color 模式或 PW 模式,均采用多阵元发射脉冲波,利用延时控制发射聚焦,接收的回波信号通过波束合成,产生一条扫查线数据;切换不同发射接收通道得到多条回波数据,从而形成图像。这种线线聚焦模式使得传统的超声成像得到一幅图像需要相对长的扫查时间,以整步距扫查为例,利用 128 阵元超声换能器扫查 6 厘米深,形成一帧图像需要 0.01 秒,加大扫查深度,获取时间会更长。因此,在传统超声成像装置下,B 型成像无法捕捉快速运动的脏器信息(如心脏率动过程),Color 成像会受到扫查帧率的限制而缩小观察视域大小,同时重复扫查次数低将导致血流敏感度差,不易发现微小血管血流。PW 模式由于具有不间断扫查特点,无法与 B 或 Color 模式同时工作。

[0003] 区别于传统的线线聚焦模式的超声成像,超高速成像方法采用平面波扫查技术,发射一次平面波可以得到一帧图像数据,获取一幅图像的时间仅依赖于当前的扫查深度,具有高帧数、高质量等特点。以 128 阵元超声换能器扫查 6 厘米深为例,形成一帧图像所需的时间为 0.0078ms,因此从理论上讲,成像帧率为传统超声成像的近千倍;即使考虑应用平面波复合来提高图像的空间分辨率,也可以将成像帧率提高百倍。超高速的扫查方式使得后期成像处理不必区分是何种成像模式,因此前端结构统一,易于小型化。同时,可以提供捕捉快速运动的脏器信息、提供大视域彩色血流以及多模式同时工作的功能。

[0004] 超高速超声的优势明显,但是其快速数据采集导致后端数据处理复杂度高,数据量大。前端的简化对数据传输以及后端处理提出更高要求。是否能有效解决数据传输及后端处理问题,成为超高速超声成像系统能否能够实现的关键。

发明内容

[0005] 本发明针对超高速超声成像装置庞大数据量的吞吐,传统的 PCI 总线协议已经无法满足超高速成像装置数据传输的要求,提出了一种基于 CPU+GPU 异构架构的超高速超声成像装置及方法。本发明通过引入 PCIe 总线来实现高速数据传输,利用 PCIe 总线高带宽的优势,实现不间断采样和传输。同时针对超高速超声庞大的计算量,提出以 CPU+GPU 的异构架构处理器对超高速超声成像方法进行实现。CPU 作为主控芯片,实现对超高速超声成像系统处理流程的调度和任务分配,同时负责基本的 GUI 操作;GPU 作为加速引擎,利用其高效并行计算的特性,对超高速超声成像方法进行实现,缩短空间复合及不同成像的处理时间。

[0006] 本发明针对超高速超声成像的原理,设计了具有平面波发射、多通道并行接收的高集成度前端,对前端数据采集结构进行统一;借助于 PCIe 的高速数据传输,将回波信号进行预处理、波束合成及模式处理转移到后端 CPU 及 GPU 上进行,实现了由硬件到软件的转

化。

[0007] 本发明的目的是通过下述技术方法实现的：

[0008] 一种基于 CPU+GPU 异构架构的超高速超声成像装置，由探头、前端和后端三部分构成，所述前端由 Tx/Rx 模拟接口、A/D 和预放大模块和 FPGA 组成，后端由 CPU、由 DDR3 和 SSD 组成的存储模块和 GPU 组成，其中：

[0009] 1、所述 FPGA 的逻辑控制模块控制探头发射多个角度平面波穿透待测生物组织，产生射频回波信号，探头切换至接收模式；

[0010] 2、所述 Tx/Rx 模拟接口进行接收，并通过 A/D 和预放大模块进行预处理之后，通过 FPGA 的 PCIe 接口模块将数据传递到后端 CPU 中；

[0011] 3、所述 CPU 串行执行前端数据的波束合成，再通过 DDR3 缓存将处理完的数据传递给 GPU，并将数据存储进 SSD；

[0012] 4、在 GPU 中实现多个平面波的可变帧率复合以及解调，并对 Color 模式、B 模式、PW 模式成像进行实现。

[0013] 利用上述装置进行超高速超声成像的方法，包括如下步骤：

[0014] 步骤一：FPGA 控制探头发射多角度的平面波超声信号到待测生物组织上，并将接收的数据进行模数转换和预放大处理；

[0015] 步骤二：经过预处理后的大量数据，通过高速 PCIe 通道传递到后端 CPU 中；

[0016] 步骤三：在 CPU 中实现对数据的波束合成，并对人机交互等功能进行实现。

[0017] 步骤四：GPU 读取 CPU 在内存中的数据，利用其并行计算能力和可变帧率平面波复合技术将信号进行复合和解调，实现超高速成像，并实现高帧率、大视域的多模式成像同时运行。

[0018] 本发明所述步骤一中，所述探头是中心频率为 128 阵元的宽带线阵探头，单次发射一组平面波，发射多组不同角度的平面波，角度依次等间距递增，探头阵列发射与接收模式同一通道。

[0019] 本发明所述步骤二中，FPGA 和 CPU 间的通讯采用最新的基于串行通信系统的 PCIe3.0 总线协议，采用 128b/130b 的编码方式，16 条总线的带宽为 15.754GB/s。以 128 阵元超声换能器发射接收为例，利用 80MHz 采样频率对 128 通道的数据进行采集，极限待传输数据将达到 10GB/s，PCIe3.0 能够满足系统数据传输需求。

[0020] 本发明所述步骤三中，CPU 与 GPU 异构架构进行后端处理，CPU 负责必要的人机交互和波束合成，通过 DDR3 缓存将数据转移至 GPU 中，进行可变帧率空间复合以及多模式成像处理算法。由于 CPU 并不适合进行大计算量工作，因此 CPU 只进行必要的人机交互和波束合成，便将数据转移到 GPU 中进行更复杂的处理，包括可变帧率空间复合以及多模式成像处理算法；波束合成将超声换能器接收的多通道回波数据按照延时进行合成，形成一帧数据的过程，波束合成过程还具有对回波信号强度进行放大、对杂波信号进行抑制、对干扰方向置零等优点。

[0021] 本发明所述步骤四中，CPU+GPU 的异构架构可共用内存区域，GPU 能够高效读取 CPU 在内存区域中的数据。可变帧率空间复合将不同平面波偏转扫描获得的多角度平面波数据通过加权融合成一帧图像数据，同时根据后端的 GPU 硬件处理能力选择适当的复合帧偏移量，使其自适应调整成像帧率，有效隔离数据采集与处理过程。空间复合技术可以提升

超声图像的空间分辨率,弥补非聚焦平面波发射下图像质量低的缺点。超高速超声成像系统的最大优势在于不改变前端扫查的基础上,可以在空间复合后,运用不同的成像方法,实现多种成像模式同时运行,即可以同时显示 B 模式、Color 模式、PW 模式等。

[0022] 本发明与现有技术相比,具有如下优点:

[0023] (1) 区别于传统超声所采用的前端方案,本发明采用高集成度的发射接收方案和统一的数据采集架构简化前端,并将波束合成模块移至后端进行,不仅进一步对前端进行精简,还充分运用后端处理能力,充分发挥系统性能。

[0024] (2) 本发明针对 PCI 总线无法满足超高速成像带宽需求的问题,引入最新的 PCIe3.0 总线规范,使装置能够满足超高速成像的高数据速率图像的采集传输需求,使得采样传输连续,不丢失数据,提高成像质量和帧率。

[0025] (3) 本发明针对超高速超声大量数据处理,区别于传统超声所采用的串行处理架构,采用 CPU+GPU 的异构处理结构,充分发挥 CPU 串行处理和 GPU 并行处理特点,并且 CPU 和 GPU 共享同一个内存空间,优化了两者之间的数据传输过程,提高数据传输效率,充分发挥 GPU 计算能力。

附图说明

[0026] 图 1 为基于 CPU+GPU 异构架构的超声超高速成像装置的结构图,图中:1- 探头,2-Tx/Rx 模拟接口,3-A/D 和预放大模块,4- 逻辑控制模块,5-PCIe 接口模块,6- 波束合成模块,7- 预处理模块,8-DDR3,9-SSD,10- 可变帧率复合及解调模块,11-B 模式成像,12-Color 模式成像,13-PW 模式成像。

具体实施方式

[0027] 下面结合附图对本发明的技术方案作进一步的说明,但并不局限如此,凡是对本发明技术方案进行修改或者等同替换,而不脱离本发明技术方案的精神和范围,均应涵盖在本发明的保护范围内。

[0028] 如图 1 所示,本发明提供的基于 CPU+GPU 异构架构的装置主要由探头 1、前端和后端组成,前端主要由 Tx/Rx 模拟接口 2、A/D 和预放大模块 3 和 FPGA 组成,后端主要由 CPU、由 DDR38 和 SSD9 组成的存储模块和 GPU 组成,其中:

[0029] 1、通过 FPGA 的逻辑控制模块 4 来控制探头 1 发射多个角度平面波穿透待测生物组织,产生射频回波信号,探头切换至接收模式。

[0030] 2、由 Tx/Rx 模拟接口 2 进行接收,并通过 A/D 和预放大模块 3 进行预处理之后,通过 FPGA 的 PCIe 接口模块 5 将数据传递到后端 CPU 中。

[0031] 3、后端的 CPU 中串行执行前端数据的波束合成 6 以及预处理 7,再通过 DDR38 缓存将处理完的数据传递给 GPU,还可将数据存储进 SSD 9。

[0032] 4、在 GPU 的可变帧率复合及解调模块 10 中实现多个平面波的可变帧率复合,并对 Color 模式成像 11、B 模式成像 12、PW 模式成像 13 进行实现。

[0033] 本发明装置构件选型如下:多元阵列超声探头选用 128 阵元的宽带线性探头,探头中心频率为 4.5MHz,带宽为 60%。FPGA 选择的是带有 IP 硬核的 Altera 公司的 Cyclone IV Gx 系列,可以很好的支持 PCIe 总线。

[0034] 利用上述装置实现本发明方法的实现步骤是：

[0035] 本发明采用平面波投射法产生超高速超声成像，平面波通过超声换能器延迟发射，一次穿透整个成像区域，以牺牲成像质量为代价，可以在一次发射之后就计算出完整的超声图像。由于移除发射聚焦步骤，导致图像对比度和分辨率的下降。在实现中，使用多角度平面波进行补偿，利用多个倾斜的平面波相干叠加计算出高分辨率图像，对聚焦过程进行弥补，提高成像质量。

[0036] 本发明对射频回波信号进行波束合成以及之后用到解调方法具体解释如下：

[0037] 阵元 y_i 发射偏角为 α 的超声波到二维扫查平面一点 (x, z) ，并且回到该阵元的延迟时间为：

$$[0038] \quad \tau(y_i; x, z, \alpha) = (z \cos \alpha + x \sin \alpha) / c + \sqrt{z^2 + (x - y_i)^2} / c \quad (1)。$$

[0039] 找到接收阵元 y_i 接收到的射频回波数据中对应延迟时间的数据，图像上每个像素点的取得来源于对 128 个阵元的数据进行累加，同时使用变迹函数 $ap(\theta)$ 作为加权系数， θ 表示 (x, z) 到该阵元 y_i 的偏角，以垂直于探头的方向作为角度零点，则波束合成累加得到的回波强度为：

$$[0040] \quad s(x, z) = \sum_{i=1}^{128} RF(y_i, \tau(y_i; x, z, \alpha)) \cdot ap(\theta_{xzi}) \quad (2)。$$

[0041] 本发明的可变帧率平面波复合是通过前端偏转扫查得到的多帧数据，分别对单帧数据进行逆向偏转变换，估计出正向扫查时的数据形式，分别存储到相应的数据缓冲区中，而后将不同帧数据中相应采样点的值进行加权求平均，得到复合后采样点的数值，完成一次复合。可变帧率机制是通过获取系统的硬件信息估计系统的计算能力，从而设置复合的帧偏移量 (Frame Offset) $Noffset$ 使得后端从前端获取 $Noffset$ 帧数据才会生成一帧复合数据，从而将前端的数据采集和后端处理有效隔离。

[0042] 对复合后得到的数据沿深度方向做 Hilbert 解调，线数据为 $r(nT_s)$ ，这里 T_s 为一条线上相邻两个数据点的时间间隔， n 为线上采样点的索引，则 Hilbert 变换的结果为：

$$[0043] \quad r_A(nT_s) = r(nT_s) + j\hat{r}(nT_s) \quad (3)。$$

[0044] 本发明中 B 模式成像、Color 模式成像以及 PW 模式成像方法介绍如下：

[0045] B 模式超声成像在解调后，只需要对数据进行包络提取，便可以得到组织反射回波的强弱，从而反应到图像亮度上；

[0046] 将实部和虚部平方求和后求平方根，得包络信号：

$$[0047] \quad E(nT_s) = \sqrt{r^2(nT_s) + \hat{r}^2(nT_s)} = g(nT_s) \quad (4)。$$

[0048] Color 模式需要利用多个重复采样的扫描点估计其频谱偏移，从而估计血流运动速度。与传统的自相关方法不同的是，在超高速超声成像系统中，由于数据采集具有超高帧率，因此其重复聚集扫查的个数较多，可以使用更精确的 FFT 频谱估计方法。

[0049] PW 模式在超高速超声成像下，可以选择更多的采样点数（通常 128 个点）来估计频谱偏移，从而估计血流速度。与传统的 PW 模式不同，由于统一的前端数据采集结构，因此二维截面中的任意一点均可以进行 PW 估计，同时还可以结合 B、Color 进行多模式成像同时工作，这也是超高速超声的优势所在。

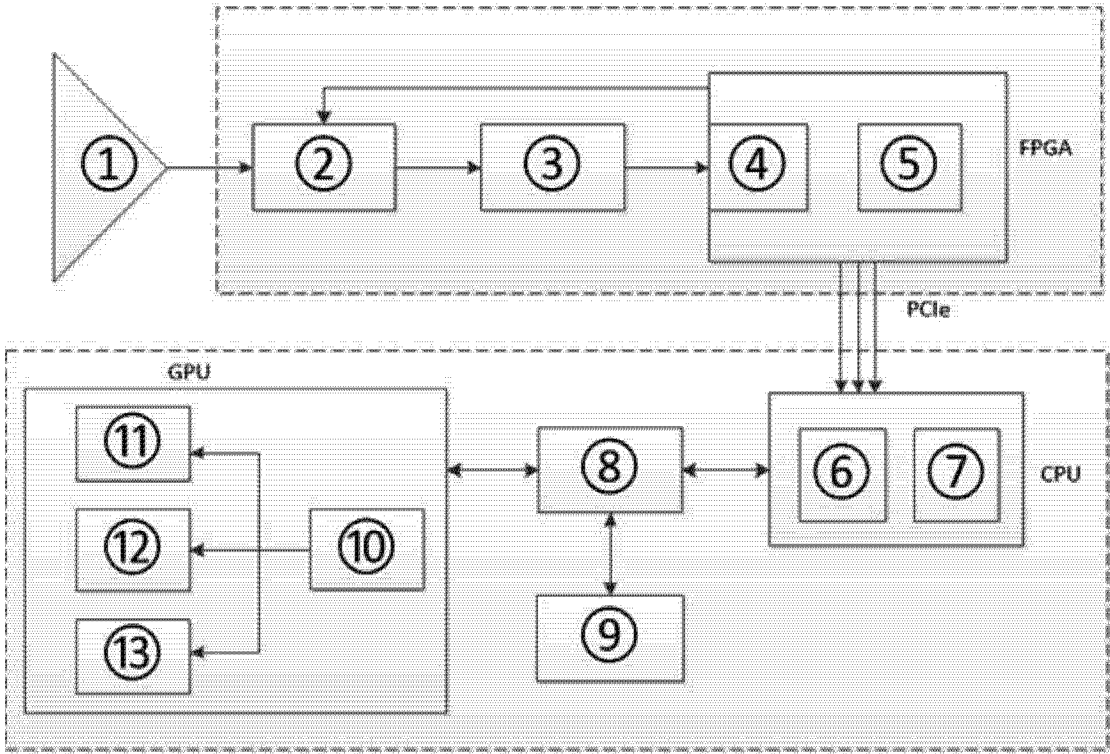


图 1

专利名称(译)	基于CPU+GPU异构架构的超高速超声成像装置及方法		
公开(公告)号	CN104688273A	公开(公告)日	2015-06-10
申请号	CN201510114696.5	申请日	2015-03-16
[标]申请(专利权)人(译)	哈尔滨工业大学		
申请(专利权)人(译)	哈尔滨工业大学		
当前申请(专利权)人(译)	哈尔滨工业大学		
[标]发明人	金晶 周之锐 尉明望 鄂尔多斯 沈毅		
发明人	金晶 周之锐 尉明望 鄂尔多斯 沈毅		
IPC分类号	A61B8/06		
CPC分类号	A61B8/06 A61B8/4444 A61B8/48 A61B8/52 A61B8/56		
代理人(译)	高媛		
外部链接	Espacenet SIPO		

摘要(译)

本发明公开了一种基于CPU+GPU异构架构的超高速超声成像装置及方法，FPGA控制探头发射多角度的平面波超声信号到待测生物组织上，并将接收的数据进行模数转换和预放大处理；经过预处理后的大量数据，通过高速PCIe通道传递到CPU中；在CPU中实现对数据的波束合成，并对人机交互等功能进行实现；GPU读取CPU在内存中的数据，利用其并行计算能力和可变帧率平面波复合技术将信号进行复合和解调，实现超高速成像。本发明采用高集成度的发射接收方案和统一的数据采集架构简化前端，并将波束合成模块移至后端进行，不仅进一步对前端进行精简，还充分运用后端处理能力，充分发挥系统性能。

