

1. 一种用于执行剪切波分散超声振动测定的方法,包括:

建立具有单色剪切波分量的剪切波;

从单个跟踪脉冲(404)形成多条平行取向的接收线(411-426),以用于对所述单色剪切波分量(116)进行测量,其中,(i)从在所述单个跟踪脉冲的传输之后接收自靶标位置的回波数据形成所述平行取向的接收线,并且(ii)所述平行取向的接收线包括动态形成的空间平行的接收线;以及

从至少一个其他跟踪脉冲,执行对所述多条平行取向的接收线的所述形成,以便与由所述单个跟踪脉冲形成的所述多条平行取向的接收线中的对应复数条接收线(423-426)重叠以增加测量场深。

2. 根据权利要求1所述的方法,其中,增加所述测量场深必需从平行取向的接收线中的所重叠的复数条接收线中进行组合以建立至少一条重建A线(441-444)。

3. 根据权利要求2所述的方法,其中,所述至少一个其他跟踪脉冲包括不同时间的跟踪脉冲,所述方法还包括从所述至少一个其他跟踪脉冲的所述不同时间的复数个跟踪脉冲(428-430)形成相应的多条通过所述组合建立的重建A线。

4. 根据权利要求1所述的方法,其中,进行测量包括对相应靶标位置处的所述单色剪切波分量进行振幅(132)测量。

5. 一种用于执行剪切波分散超声振动测定的装置,包括:

用于建立具有单色剪切波分量的剪切波的模块;以及

用于从单个跟踪脉冲形成多条平行取向的接收线,以用于对单色剪切波分量进行测量(132)的模块,其中,(i)从在所述单个跟踪脉冲的传输之后接收自靶标位置的回波数据形成所述平行取向的接收线,并且(ii)所述平行取向的接收线包括动态形成的空间平行的接收线,其中,用于形成所述多条平行取向的接收线的所述模块还包括用于针对至少一个其他跟踪脉冲形成所述多条平行取向的接收线,以便与由所述单个跟踪脉冲形成的所述多条平行取向的接收线中的对应复数条接收线(423-426)重叠的模块。

6. 根据权利要求5所述的装置,其中,所述单个跟踪脉冲以及至少一个其他横向偏移的跟踪脉冲被聚焦到共同的深度(504),所述装置还包括:

用于基于来自聚焦到所述共同的深度的相应跟踪脉冲的回波数据重建比所述共同的深度更浅的深度处的传输焦点的模块。

7. 根据权利要求5所述的装置,还包括用于在确定对应相位差时对跟踪脉冲的脉冲发射时间插值以校正采样间波传播(156)的模块。

8. 根据权利要求5所述的装置,其中,所述装置被实施为一个或多个集成电路。

9. 一种用于执行剪切波分散超声振动测定的装置,包括:

用于建立具有单色剪切波分量的剪切波的模块;

用于从单个跟踪脉冲(404)形成多条平行取向的接收线,以用于对所述单色剪切波分量进行测量的模块,其中,(i)从在所述单个跟踪脉冲的传输之后接收自靶标位置的回波数据形成所述平行取向的接收线,并且(ii)所述平行取向的接收线包括动态形成的空间平行的接收线;以及

用于从至少一个其他跟踪脉冲,执行对所述多条平行取向的接收线的所述形成,以便与由所述单个跟踪脉冲形成的所述多条平行取向的接收线中的对应复数条接收线

(423-426) 重叠以增加测量场深的模块。

空间上精细的剪切波分散超声振动测定采样

技术领域

[0001] 本发明针对测量剪切波,更具体地,针对通过剪切波分散超声振动测定(SDUV)来测量剪切波。

背景技术

[0002] 活组织中的机械变化与病理学变化相关。因为在健康组织与病理组织之间,剪切弹性模量(硬度)和粘度可能显著变化。随着过去十年超声弹性成像的发展,很多临床研究已经显示:组织粘弹特性为医师提供了有用的信息以便于更好的癌症诊断和治疗评估。

[0003] 剪切波分散超声振动测定(SDUV)是一种基于声辐射力的技术,该技术通过描述剪切波速度分散(即频率)的特征来测量组织剪切弹性和粘度。该技术的应用是无创测量肝硬度以区分肝纤维化和肝硬化的阶段。

[0004] 用于医学成像的超声探查经常使用纵波。在体内组织中,超声以波形式传播。实际上,沿传播路径的所有粒子在适当位置往复振动,并且振动发生在传播方向上。振动产生压缩和稀疏。这些被模拟成正弦曲线的波峰和波谷。能量被传递给靶标,并且通过振荡的粒子移动返回。

[0005] 与之相比,超声剪切波(或横波)特征为垂直于传播方向在适当位置的往复移动。振荡一方面产生波峰,另一方面产生波谷。

[0006] 执行 SDUV 必须发出一系列聚焦的纵波推动脉冲。它们为高强度的窄带宽信号,其以(假定)100Hz 的重复率发射。在这些脉冲中的若干个被发射之后(每个横向一致并且在相同方向),它们建立了从焦点传播出的并且方向与推动脉冲的方向垂直的剪切波。焦深已被选择,使得剪切波行进穿过感兴趣区域(ROI)。

[0007] 向 ROI 发出纵波跟踪脉冲以便在采样点评价剪切波的振幅。该测量被用于估计被采样位置处的剪切波的相位。

[0008] 为了对另一位置采样,另一推动脉冲发往相同的推动焦点,接着向该位置发出跟踪脉冲。需要该第二个循环,因为两点间的相位差被用于确定弹性和粘度。

[0009] 因为推动脉冲的包络是方波,所以存在频率通常为 100Hz 的剪切波和谐波(200Hz、300Hz、400Hz),即分量(或“单色剪切波”)。不同频率处的速度估计被用于推导组织剪切弹性和粘度。

发明内容

[0010] 下文解决了记录的现有技术的不足之处。

[0011] 与使用 SDUV 检测辐射力引导的剪切波相关联的一个主要挑战在于相对低振幅的振动。轴向位移大约 $10\ \mu\text{m}$ 。振动振幅因而易受噪声影响。系统电子噪声和诸如心脏运动或呼吸运动的患者运动将对剪切波位移估计造成显著的噪声。

[0012] 根据本发明的实施例,提出了一种用于执行剪切波分散超声振动测定(SDUV)的方法,包括:建立具有单色剪切波分量的剪切波;从单个跟踪脉冲形成多条平行取向的接收

线,以用于对所述单色剪切波分量进行测量,其中,(i)从在所述单个跟踪脉冲的传输之后接收自靶标位置的回波数据形成所述平行取向的接收线,并且(ii)所述平行取向的接收线包括动态形成的空间平行的接收线;以及从至少一个其他跟踪脉冲,执行对所述多条平行取向的接收线的所述形成,以便与所得到的多条平行取向的接收线中的对应复数条接收线重叠以增加测量场深。

[0013] 此外,快速成像要求检测剪切波。必须记录达到 400Hz 的振动,因为更高频率的剪切波被介质衰减。因此,为了可靠地超过奈奎斯特(Nyquist)阈值,必须在大于 1000Hz 的频率下对每个空间位置进行采样以防止混叠。由于跟踪脉冲重复频率受限于声音在组织中的速度以及 ROI 的深度,因此这限制了使用常规非多线检测序列可以采样的空间位置的数量。

[0014] 如下文提出的,使用多线波束形成器允许对位移场进行更精细的空间采样,和/或在垂向成像平面和横向成像平面两者中的空间采样(当使用与常规 1D 阵列相比的 2D 阵列时)。由于从每个检测脉冲提取出更多信息,因此增加了 SDUV 的弹性测量的鲁棒性。作为增加的优点,流程花费的总时间因此缩短。这从患者的便利性立场来看是有利的,并且有利于减小来自向激励点重复发送推动(push)的热效应的潜在影响。此外,更快节奏的射频(RF)数据采集促进了要求高速度及高空间分辨率的其他剪切波成像/量化技术的应用。

[0015] 在本发明的一个版本中,通过从单个跟踪脉冲形成平行取向的接收线以用于对单色剪切波进行测量来执行剪切波分散超声振动测定(SDUV)。

[0016] 作为一方面,从至少一个其他追踪脉冲执行所述形成以便将得到的接收线进行重叠以增加场深。

[0017] 更具体而言,在一些实施例中,该增加必需从重叠的接收线进行组合以建立至少一条重建 A 线(A-line)。

[0018] 相关的其他可能的方面包含从所述至少一个其他追踪脉冲中的不同时间的复数个跟踪脉冲形成相应的多条通过所述组合建立的重建 A 线。

[0019] 作为具体实施例,进行测量包括对单色剪切波进行振幅测量。

[0020] 本文提出可实施的是一种用于执行剪切波分散超声振动测定(SDUV)的装置,该装置被配置为从单个跟踪脉冲形成多条平行取向的接收线,以用于对单色剪切波进行测量。

[0021] 该装置特征可能在于:跟踪脉冲以及至少一个横向偏移的跟踪脉冲被聚焦到共同的深度,该装置被配置为基于从聚焦到该深度的脉冲的回波数据来重建更浅的传输焦点。

[0022] 或者,在可替代的或补充的方面中,该装置被配置为针对至少一个其他跟踪脉冲进行如此形成并且以便重叠接收线,并且该装置还被配置为在确定相位差的时候插入脉冲发射时间以校正采样间波传输。

[0023] 在一个形式中,一种用于执行剪切波分散超声振动测定(SDUV)的计算机软件产品包括收录有计算机程序的计算机可读介质,该计算机程序包括能够由处理器执行以从单个跟踪脉冲形成平行取向的接收线以用于对单色剪切波进行测量的指令。

[0024] 另外,在一些版本中,一种用于执行剪切波分散超声振动测定(SDUV)的装置,包括:用于建立具有单色剪切波分量的剪切波的模块;以及用于从单个跟踪脉冲形成多条平行取向的接收线,以用于对单色剪切波分量进行测量的模块,其中,(i)从在所述单个跟踪脉冲的传输之后接收自靶标位置的回波数据形成所述平行取向的接收线,并且(ii)所述平

行取向的接收线包括动态形成的空间平行的接收线,其中,用于形成所述多条平行取向的接收线的所述模块还包括用于针对至少一个其他跟踪脉冲形成所述多条平行取向的接收线,以便与所得到的多条平行取向的接收线的对应复数条接收线重叠的模块。

[0025] 另外,在一些版本中,一种用于执行剪切波分散超声振动测定(SDUV)的装置,包括:用于建立具有单色剪切波分量的剪切波的模块;用于从单个跟踪脉冲形成多条平行取向的接收线,以用于对所述单色剪切波分量进行测量的模块,其中,(i)从在所述单个跟踪脉冲的传输之后接收自靶标位置的回波数据形成所述平行取向的接收线,并且(ii)所述平行取向的接收线包括动态形成的空间平行的接收线;以及用于从至少一个其他跟踪脉冲,执行对所述多条平行取向的接收线的所述形成,以便与所得到的多条平行取向的接收线中的对应复数条接收线重叠以增加测量场深的模块。

[0026] 另外,在一些版本中,执行剪切波分散超声振动测定(SDUV)包括:在多个位置处通过在该位置处的多个传送(pass),以交错模式进行采样,以用于对单色剪切波进行测量。

[0027] 在这些版本中的具体变型中,在多个传送中的一个中被采样的位置与在所述多个传送中的下一个中被采样的位置交错。

[0028] 作为可能的方面,将在在多个传送中在给定一个位置处采样的结果与参考A线进行比较,以确定单色剪切波在该位置处的位移。

[0029] 同样地,在一些方面,一种用于执行剪切波分散超声振动测定(SDUV)的设备被配置为:在多个位置处通过在该位置处的多个传送(pass),以交错模式进行采样,以用于对单色剪切波进行测量。

[0030] 与本文提出类似的可以采用以下形式:一种用于执行剪切波分散超声振动测定(SDUV)的方法,所述方法包括对单色剪切波进行测量,并且对该测量应用一组(bank)滤波器,该滤波器被调谐到所述波的相应候选速度,不需要确定波在不同空间位置处的相位差。

[0031] 在其他方面,针对该测量可以使用低通滤波器,以来减小所述应用的制备噪声。

[0032] 在再另一方面,在该组(bank)中的滤波器是二维的,一维是空间位置,并且另一维是时间。

[0033] 在附加的方面,一种用于执行剪切波分散超声振动测定(SDUV)的设备被配置为对单色剪切波进行测量,并且对该测量应用一组滤波器,该滤波器被调谐到所述波的相应候选速度,所有这些不需要确定波在不同空间位置处的相位差。

[0034] 作为进一步附加的方面,上述装置和设备可以被实施为一个或多个集成电路。

[0035] 下文参考附图给出了用于SDUV的新颖的精细空间采样方法的细节。

附图说明

[0036] 图1为例示出两个连续SDUV采样的示意图;

[0037] 图2为表示SDUV顺序跟踪的范例的时间线;

[0038] 图3为对应于图2的时间线的流程图;

[0039] 图4为示意性的传输-接收图,其通过举例图示出如在16x多线波束形成器中实施的使用回顾性动态传输(RDT)的SDUV采样采集;

[0040] 图5为展示出RDT背景下检测波束传输焦点的可能放置的示意图;

[0041] 图6为示例性交错采样方案的图形再现;以及

[0042] 图 7 为表示作为如何确定组织剪切弹性和粘度的范例的具体实施例的流程图。

具体实施方式

[0043] 首先大致讨论具有更快采样的 SDUV 的一个版本。在这一背景下,下文从图 4 开始是与更精细空间采样有关的进一步示例性发展。

[0044] 图 1 以说明性而非限制性范例的方式描绘了在两个连续 SDUV 采样之间的关系。示出了超声推动探头 104,以及通过超声跟踪探头(未示出)分别在采样时间 t_1 、 t_2 发出的第一跟踪脉冲 108 和第二跟踪脉冲 112。推动探头 104 发送一系列聚焦的推动脉冲(或“推动”) 114 以建立剪切波 115,该剪切波 115 (或“单色剪切波”)的频率分量被表示为第一轨迹 116。组织沿着 y 方向振动,并且剪切波 115 沿着 x 方向传播。

[0045] 可以分别将两个分离的探头用于推动和跟踪。然而这一类型的大体积配置对于临床应用是不实用的。

[0046] 此外,在分离的单元(single-element)换能器的情况下,要求重复发射推动脉冲以便测量在不同横向位置处的剪切波相位延迟,从而导致重复的组织加热。

[0047] 在另一方面,如果利用阵列换能器实施跟踪,则根据本文的提议缓和了对重复推动的需要。

[0048] 此外,一个单阵列换能器能够同时实现推动和跟踪的功能。两用的单阵列换能器将使系统更加紧凑并且更容易控制。然而,该配置需要更多的硬件支持和软件支持,以便保证能够通过单个换能器产生声辐射力并且对得到的剪切波 115 进行成像。单个换能器可以为允许横向和垂向(elevation)推动和 / 或跟踪脉冲位置的单排阵列(1D 换能器)或多排阵列(1.75 或 2D 换能器)。

[0049] 改进的 2D 阵列技术将允许以 3D 维度发送跟踪脉冲;然而,下文的讨论涉及跟踪轴向 - 横向平面上的组织运动。在不失普遍性的情况下,相同的处置应用于轴向 - 垂向平面。

[0050] 跟踪脉冲 108、112 被靶向到空间上分隔位置间距离 128 、 Δr 的相应位置 120、124。距离 128 通常在毫米的范围内,因为剪切波 115 随传播距离衰减。测量如在 y 轴 136 上表示的振幅(或位移) 132。假如采样频率满足奈奎斯特阈值,则基于振幅 132 可以导出位置 120 处的相位 140、 Φ_1 。可以通过以足够帧率(即以足够的频率在位置 120 上的多个采样传送(pass))来满足该奈奎斯特阈值。

[0051] 图 2 描绘了 SDUV 顺序跟踪的一个范例。在任何推动脉冲 114 振动感兴趣区域(ROI)之前,参考跟踪脉冲 202、204、206、208 发出,并被靶向到相应的采样位置 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 。位置 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 从点 x_0 向外放射性排列(aligned radially),即排列在将由推动脉冲建立的剪切波 115 的传播方向上。参考跟踪脉冲 202、204、206、208 每个都分别跟随有其各自的回波 210、212、214、216。然后在位置 x_0 (即激励点的位置)建立剪切波 115。这通过以推动频率 219 (可能通常为大约 100Hz)发射的推动脉冲 218 的初始系列(在图 2 中未示出)来完成。一旦波 115 已经建立,则可以发出推动脉冲 218 中的跟踪序列开始的一个(onet)。接着是逐个脉冲地顺次导引的跟踪脉冲 222、224、226、228 的传送 220。跟踪脉冲 222、224、226、228 被靶向到相应的采样位置 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 。脉冲 222、224、226、228 中的每个跟随有其相应的回波 230、232、234、236,然后从其相应的回波 230、232、234、236 波束形成相应的接收 A 线。以 2KHz 的相同位置跟踪频率 238 发出传送 220。由此,推动脉冲 218 后跟随 20 个

传送(即“帧”)220。并且,2KHz 的相同位置跟踪频率 238 允许对达到约 1kHz (奈奎斯特阈值)的频率分量 116 进行相位测量。跟踪脉冲 222、224、226、228 中的每个都可以用于在奈奎斯特阈值的内在极限内同时提供对每个频率分量的测量。

[0052] 利用常规 B 模式成像,即,将跟踪脉冲 222、224、226、228 在两个邻近的推动脉冲 218 之间的不同位置 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 上进行电子聚焦并且横向往复导引。因此顺序形成在不同位置 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 上的接收 A 线。

[0053] 应当限制在每个 B 模式帧内的传输线的数量,以使剪切波 115 的采样 RPF (脉冲重复频率)足够高。如在图 2 中看到的,例如,对于每个位置 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 ,相同位置跟踪频率 238 为 2KHz (PRF_2),同时传输 A 线频率 242 为 8KHz (PRF_3)。这仅仅是说明性的。如果所测量的最高次谐波为 400Hz,这表明检测脉冲(在给定方向上同样是横向的)应当在假定 1000Hz 的最小速率下发射(允许在奈奎斯特上的小余量)。在该情况下, PRF_2 将被设定为 1kHz。因此,将有可能传输波束到 $8\text{kHz}/1\text{kHz}=8$ 个位置。

[0054] 仅仅需要单个推动 / 跟踪序列 240 来获得剪切波速度估计所需要的所有 SDUV 信息。更快的数据采集是将 SDUV 技术从单点“虚拟活检”工具改进到可能的实时成像模态的关键要求。同样显著的是,当维持剪切波跟踪所观察的横向位置 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 ……的数量时,可以减小在组织和换能器中产生的热。更快的数据采集还可以进一步减小在剪切波位移估计中的噪声,因此尤其避免了大的时间 - 尺度噪声,例如在不同的推动 / 跟踪序列 240 的过程中组织可能以其他方式经历的呼吸运动。

[0055] 图 3 为对应于图 2 中的时间线的流程图。焦点被设定在第一位置 x_1 (步骤 S304)。发射当前参考跟踪脉冲 202 (步骤 S308)。跟着是其回波 210 (步骤 S312)。如果存在更多待测位置(即 x_2 、 x_3 、 x_4) (步骤 S316),焦点被导引到下个位置(步骤 S320),并且进程返回到参考跟踪脉冲发射步骤 S308,其中将下个位置作为当前位置。另一方面,如果不存在其他待测位置(步骤 S316),则连续发射推动脉冲 218 以建立剪切波 115(步骤 S324)。焦点然后被设定到第一位置 x_1 (步骤 S328)。发射当前跟踪参考脉冲 222 (步骤 S330),并且返回其回波 230 (步骤 S332)。如果存在更多的跟踪脉冲(即 224、226、228)以在当前传送 220 中发出(步骤 S333),则焦点被设定到对应的下个位置(步骤 S334),并且进程返回到跟踪脉冲发射步骤 S330,其中将下个位置作为当前位置。否则,如果不存在下个待发射的跟踪脉冲,询问是否将在位置 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 上进行下次传送(步骤 S336)。如果将进行下次传送,将该下次传送作为当前传送(S340),并且进程返回到下次传送 220 的开端,到步骤 S328。然而,如果(在当前推动 / 跟踪序列 240 中)不存在待进行的下次传送 220,则采样完成。在本文提出的技术中,单个推动 / 跟踪序列 240 足够提供剪切波速度的 SDUV 确定(在实际实施例中,组织弹性和粘度的计算)所需要的所有采样。

[0056] 图 4 表示如在 16x 多线波束形成器(即从一个传输波束(或简称“传输”)形成 16 条接收线的波束形成器)中实施的,使用回顾性动态传输(RDT)的 SDUV 采样采集方案 400 的一个范例。

[0057] 利用多线波束形成器,SDUV 采样将仍然为顺序的,但是采用成组的空间位置。将传输波束发送到每个组。如果 ROI 位于与传输波束的焦点不同的深度,那么传输波束将比在焦点处更宽,并且将声透射(insonify)该组空间位置。或者,波束可以以对于声透射该组空间位置来说足够的宽度来被微弱聚焦到与 ROI 相同的深度。

[0058] 从单个跟踪脉冲 404 建立的传输波束的回波, 16x 波束形成电路形成 16 条平行取向的接收线 411-426, 以用于对单色剪切波 116 进行测量。如由斜线的子孔径跟踪线 427 所表示的, 前八条接收线 411-418 在传输中心的一侧, 而后八条接收线 419-426 在另一侧。

[0059] 其他跟踪脉冲 428、429、430 以及第一跟踪脉冲 404 都是不同时间的。如果传输 A 线(或“跟踪脉冲”) PRF242 被设定为等于例如 10kHz, 单个跟踪脉冲 404 在下个跟踪脉冲 428 之前 100 μ s 发出。100 μ s 后, 发射下个脉冲 429, 以此类推。

[0060] 由跟踪探头的相应的当时(then-currently)有效的子孔径形成跟踪脉冲 404、428、429、430 中的每个。有效的子孔径为对于传输超声当前有效的换能器元件的子集。因而, 例如, 在跟踪脉冲 404 发射之后, 当前有效的子孔径移位(例如, 排除在孔径一侧的一个或多个元件并且包括在另一侧的一个或多个元件)。当下个跟踪脉冲 428 稍后发射时, 其从经移位的子孔径发生。邻近的孔径之间的空间距离在下文被称为传输间隔 434, 该传输间隔 434 在当前范例中为 0.5mm。跟踪脉冲的焦点也移位连续跟踪脉冲之间的传输间隔 434。

[0061] 从传输 404 之后接收的回波数据中形成 16 条平行取向的接收线 411-426 (即, 动态形成的接收线在空间上是平行的)。由接收子孔径形成接收线 411-426 中的每条。接收子孔径为促成给定接收线的换能器元件中的子集。

[0062] 接收线 411-426 之间的空间距离在下文被称为接收间隔 438。在该范例中, 其为 0.125mm, 或者为 0.5mm 传输间隔 434 的四分之一。

[0063] 如将在下文更详细讨论的, 使接收间隔 438 为传输间隔 434 的一部分允许更加密实的采样。

[0064] 所有所获取的回波射频数据被保存在暂存器中。所获取数据的保存将随着子孔径移位并且最终假定其最终位置在变换器阵列中而继续, 即使得获取整个传送的数据。此外, 将逐个传送来保存数据。

[0065] 由于在发射第一跟踪脉冲 404 和下一跟踪脉冲 428 之间的子孔径移位, 所以该第一脉冲的最后十二条接收线 415-426 与该下一脉冲的前十二条接收线分别在空间上重叠。同样的, 由于每个随后的跟踪脉冲的子孔径移位, 跟踪脉冲 428 的最后十二条接收线与下一跟踪脉冲 429 的前十二条接收线重叠, 以此类推。

[0066] 在第四跟踪脉冲 430 发射时, 所有四个跟踪脉冲 404、428、429、430 的相应接收线重叠, 并且可以被组合形成四条重建 A 线 441-444。

[0067] 例如, 第一重建 A 线 441 由第一接收线 423 组合紧接着的跟踪脉冲 428-430 的三条相应接收线形成。根据回顾性动态传输(RDT)进行该组合。可使用由 Passman 和 Ermert 在 1996 年提出的虚拟换能器近似法来分析 RDT 聚焦的效果。参见 C. Passmann 和 H. Ermert, “A100-MHz ultrasound imaging system for dermatologic and ophthalmologic diagnostics”, IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 第 43 卷, 第 4 期, 第 545-52 页(1996)。在共同待决的 Burcher 等人的名为“Retrospective Dynamic Transmit Focusing for Spatial Compounding”的美国专利公开文本 US2009/0069693 (下文称为“‘693 公开文本”)中进一步讨论该技术。这两份出版物的公开内容以引用方式并入本文。

[0068] 第一重建 A 线 441 用于测量空间位置 451 处的剪切波 115。同样地, 紧接着的重建 A 线 442-444 (其与第一重建 A 线 441 横向偏移)用于测量相应空间位置 452-454 处的剪切

波 115。

[0069] 虽然在此每个重建 A 线可组合四条接收线,但是可以组合更少的接收线。实际上进行组合的数量依赖于 ROI 的深度以及其随之的由跟踪脉冲的声透射范围。而且,该范例是非限制性的。因此,孔径移位可以到以下程度:更多或更少的接收线可以组合形成重建 A 线。

[0070] 凭借所述组合,提高了场深(DOF)(传输良好聚焦所在的区域)和信噪比(SNR)。在重建 A 线 441 与重建出该重建 A 线 441 的任意接收 A 线进行比较中,其有用的空间分辨率的长度已经通过 RDT 提供的更大 DOF 得到增加。

[0071] 基于可能的四条接收线的 A 线重建开始于前四条重建 A 线 441-444,并且以每个新跟踪脉冲继续。因此,下一跟踪脉冲允许在相应空间位置上形成四条新的重建 A 线。同样地,对于其余的帧,每个随后的跟踪脉冲形成相应的多条重建 A 线,该多条重建 A 线在当前范例中由四条重建 A 线构成。

[0072] 剪切波 115 因此被精细地采样,而不会降低发出跟踪脉冲的节奏。

[0073] 应当注意的是,非 RDT 的实施例是可能的,其中它们的接收焦点位置不交错重叠但是仅仅是彼此邻接。剪切波 115 仍旧被精细地采样,而不会降低发出跟踪脉冲的节奏。每个跟踪脉冲的平行取向的接收线的数量可以为四个,例如两个在跟踪波束的一侧并且两个在另一侧。

[0074] 图 5 例示了在 RDT 的背景下由跟踪脉冲 404 形成的检测波束 508 的焦点 504 的可能放置。如由方形轮廓指示的感兴趣区域(ROI) 512 是存在剪切波 516 的位置。为了保证检测波束 508 的声透射借助于待获取的接收线跨越待采样的位置,有利的是将焦点 504 在深度上放置到 ROI 512 中。图 5 示出的物理焦点位置在 70mm,用于声透射在 ROI 中的给定点并且因此将被 RDT 组合的传输的共同深度 518。虽然检测波束 508 在 ROI 512 的深度 520 处是宽的,但是 RDT 重建检测波束在该深度将是窄的(具有与在(物理)焦点 504 的宽度相同的宽度)。实际上并且通过范例的方式,从时间上最初的跟踪脉冲 404 以及形成将被与时间上最初的跟踪脉冲进行 RDT 组合的传输的至少一个横向偏移的跟踪脉冲 428-430 之中,至少一些被聚焦到共同深度 518。比深度 520 更浅的传输焦点基于来自那些聚焦到共同深度 518 的脉冲 404、428、429、430 的回波数据进行重建。

[0075] 这还允许使用更大的传输孔径 524,这可以增大可以在检测波束 508 中被传输的总功率。更高的功率提供了对小(minute)波振幅位移 132 (大约为 $10\ \mu\text{m}$) 的更大的灵敏度。

[0076] 或者,检测波束 508 的焦点 504 可以被放置到比 ROI 512 浅的位置。

[0077] 在将 RDT 应用于 SDUV 时有附加的考虑。

[0078] 首先, RDT 假定:组织在传输事件之间并不移动。如果发生位移,那么其将减小在被组合的传输之间的相干性并且导致信号相消。因此,这将表现为与 SDUV 不相容,因为组织正在被剪切波位移。然而,实际上,位移 132 的量很小(通常 $<10\ \mu\text{m}$),以致其是跟踪脉冲的波长(例如在 5MHz 下的 $300\ \mu\text{m}$)的小部分。因此,在传输重建期间,剪切波位移 132 将不引起相干性的任何显著损失。

[0079] 其次,即使利用非多线序列 220,因为连续发射不同横向位置 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 的波束,所以在不同时间 t_1 、 t_2 ……采样不同横向位置的位移估计。

[0080] 再次参考图 1, 并且, 为便于示例假定例如非多线序列, 如果采样时间 t_1 、 t_2 是同时的, 来自跟踪脉冲 112 的返回数据(即回波数据)将建议与第一个波形 116 上的采样点 148 对应的相位 142。

[0081] 然而, 如果针对这两个位置 120、124 顺序发射跟踪脉冲, 采样时间 t_1 、 t_2 是非同时的。(同样地, 在帧中重建 A 线 444 后面的重建 A 线将是在不同时间的波 115 的采样。)

[0082] 实际上, 在时间 t_2 , 剪切波分量 116 已经向前传播, 如由第二轨迹 144 表示的具有频率分量的波形。

[0083] 在第二轨迹 144 上, 对应的采样相位 152、 Φ_2 不同于在第一轨迹 116 上的相位 140、 Φ_1 , 其中相位差为 $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ 。

[0084] 如从图 1 中看到的那样, $\Delta\Phi$ 小于在提取同时跟踪脉冲的相位 140、142 之间的差别。

[0085] 如从图 1 中进一步看到的那样, 由基于采样间延迟的相位校正 156、 $\omega \Delta t$ 使 $\Delta\Phi$ 更小, “ ω ”表示单色剪切波 116 的角频率, “ Δt ”表示在相应采样时间 t_1 、 t_2 进行的两个采样之间的延迟。

[0086] 另外, 相位 140、142 之间的差别, 连同 ω 和 Δr , 定义了剪切波频率分量 116 的传播速度。

[0087] 相位 140、142 之间的差别是通过将相位差 $\Delta\Phi$ 加上基于采样间延迟的相位校正 $156 \omega \Delta t$ 而计算得到的。

[0088] 单色剪切波 116 的速度由以下公式给出：

$$[0089] \quad c_s(\omega) = \frac{\omega \Delta r}{\Delta\phi + \omega \Delta t} \quad (\text{公式 1})$$

[0090] 公式 1 的推导如下：

[0091] $c_s(\omega) = \lambda f$, 其中 c_s 为传播速度, λ 为波长, “ ω ”表示单色剪切波 116 的角频率并且 f 为该波的频率。

[0092] 同样, $\omega = 2\pi f$, 并且 $\Delta r = \lambda \Delta\Phi / 2\pi$, 其中 $\Delta\Phi$ 表示对于给定时刻在同时进行的两个采样之间的相位差。

[0093] 假定所有参数都是正的。

$$[0094] \quad \text{代入值得出 } c_s(\omega) = \frac{\omega \Delta r}{\Delta\phi}。$$

[0095] 如上文参考图 1 所解释的, 为了考虑在时间 t_1 、 t_2 进行的两个不同时间采样之间的采样间延迟, 将基于采样间延迟的相位校正 $156 \omega \Delta t$ 加上 $\Delta\Phi$ 来得到公式(1)。

[0096] RDT 序列发生相同现象, 并且当基于不同取向且在不同时间获取的 A 线(例如, 重建 A 线 444 以及在帧中稍后获取的重建 A 线)来提取振幅信息时必须考虑该现象。

[0097] 为了在公式 1 的应用中考虑该现象, 当 RDT 组合传输以对即时传输位置插值时(如在 ‘693 出版物中公开的), 在传输之间对采样时间(以及采样位置)插值。换言之, 在脉冲发射时间的情况下, 并且在发射时的传输位置的情况下(例如, 沿着重建中使用的用于传输的子孔径跟踪线 427 的那些传输位置), 这些传输位置被插值相同 RDT 插值权重。因此, 可以计算出 Δt 和 Δr 来用于代入方程(1)。

[0098] 注意, 公式(1)假定在剪切波传播的(径向)向外方向上进行跟踪(即跟踪脉冲的发

射)。如果在相反方向上执行跟踪,在分母上的“+”号变为“-”号。通过类似推理,如果跟踪方向随着传送 220 交变,一对空间位置 120、124 的 $\Delta \Phi$ 计算可以用基于邻近的传送做出的相同计算来求平均,使得分母为简单的 $\Delta \Phi_{\text{平均}}$ 。

[0099] 公式(1)还假定在不同时间获取两个不同位置的采样。

[0100] 在图 2 和图 3 示出的非 RDT、非多线的范例中,在不同时间获取不同位置的采样。

[0101] 在非 RDT、多线的实施例中,给定传输的接收线是不同时间的。因此,如果存在,基于给定传输的接收线,从用于那些速度计算的公式(1)的分母中略去基于采样间延迟的相位校正 156 、 $\omega \Delta t$ 。然而,否则按照原样来使用公式(1)。

[0102] 在 RDT 的背景下,在帧中重建 A 线 444 之后的重建 A 线将是在不同时间的波 115 的采样。同样地,重建 A 线 441-444 通常将具有不同的采样时间,后者基于传输发射时间的相应插值。那些相应插入中的每个使用不同插值权重,该权重与在沿着待重建的 A 线的靶标位置处的传输场强成比例。那么,通常,第一重建 A 线 441 与紧接着的重建 A 线 442 相比将具有更早的采样时间,以便于速度计算。因此,公式(1)可按照原样应用。

[0103] 图 6 例示了交错采样方案 600。其不依赖于多线波束形成器或 RDT。简单起见,因此其将针对基本波束形成器进行描述,该基本波束形成器仅为每个跟踪脉冲 222 形成单条接收线。x 轴 604 为从第一采样位置 x_1 出发的横向位置,单位为毫米。y 轴 608 为自第一跟踪脉冲 222 过去的时间。表示了所测量的位移 616 的运动场 612,其位移量级未示出。指示出在采样位置 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 ……上的若干采样传送的观察(observation) 616。

[0104] 本发明人已经观察到期望创建这样的采样方案,其中,依次匹配适当间隔开的模式的采样(例如 1^{st} 、 4^{th} 、 7^{th} 、 10^{th} ……)以相位的方式在适当位置“骑”在传播波上,或者与此近似。因此,相应位移 616 中的每个将几乎相同,由此减小采样伪影。这样的设备在面对紧密(tight)的 PRF 和其他实施约束时特别有利。

[0105] 如上所述,时间采样的速率受限于剪切波的最大频率。为了很好地采样 400Hz 的剪切波,要求至少 1000Hz 的时间采样速率。反过来,成像深度所允许的最大 PRF 242 约束了(在所有位置上的)总采样率。如上文参考范例所述,最大 PRF 242 可以为 10kHz,这表明,可以最多采样 10 个空间位置,在不会有出现采样伪影(例如混叠)的风险。

[0106] 总之,为了鲁棒性,期望采样很多横向位置 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 以增加测量的数量。如上所述,横向位置的数量受限于最大 PRF 242,虽然 PRF 应当足够大以允许采样足够的位置,而没有采样伪影。

[0107] 还有利的是,横向位置尽可能靠近激励点 x_0 以避免剪切波振幅的衰减,剪切波振幅的衰减使得难以测量振幅,虽然由于近场效应,第一横向位置 x_1 受限于其与激励点的紧密度。然而,在位置 x_i 、 x_{i+1} 之间的紧密度受限于其他工程约束。

[0108] 在交错采样方案 600 中,一个传送中的采样与下个传送中的采样之间位置交错,该交错采样方案 600 首先利用以下事实,待测量的运动场是结构紧凑的:其包括具有有限速度范围的剪切波 116。

[0109] 其次,两个轴 604、608 (分别与位置和时间相关)的特性使得:采样的连续位置 x_i 、 x_{i+1} 、 x_{i+2} ……意味着恒定的跟踪脉冲平移(translation)速度。这是从图 6 中的观察的第一排 620 中看出的。因为它们意味着恒定斜率的线,所以暗示了恒定的跟踪脉冲平移速度。在该背景下并且关于恒定跟踪脉冲“平移”,如果以非平行的方式导引波束,可以认为“平移”

发生在横向位置 x_i 、 x_{i+1} 之间。

[0110] 然而,上述设计标准要求比任何单色波速 c_s 更高的平移速度。

[0111] 不过,可以通过借助分离的传送 220 将评核(scrutiny)限制到两个连续位置 x_i 、 x_{i+1} 的采样来辨别出较慢的恒定跟踪脉冲平移速度。这由斜线 624 例示出,其特征在于在两个位置 x_i 、 x_{i+1} 的感兴趣采样在连续的传送 220 中。

[0112] 对于非交错运动场(即其中在每个传送 220 中采样连续位置 x_i 、 x_{i+1} 而不跳过位置的场),存在更高速度模式和更慢速度模式的相同现象。

[0113] 然而,交错采样是一种这样的工具:通过其来制作(craft)更不同的恒定跟踪脉冲平移速度,由此增加实现与靶向剪切波 116 速度的匹配(或者如从线 624 看接近匹配)的可能性。由于在假设上述设计约束的情况下,难以以其他方式操纵参数以改变平移速度,因此增加了对这种技术的需求。同样显著地,交错采样得到相同数量的采样。并且,不会对跟踪脉冲的 RPF242 (其保持恒定)产生不利影响。

[0114] 如从图 6 看出的,运动场 612 可被分割为与中央斜线 624 平行的观察线。

[0115] 采样伪影的随之减少可以用于缓和更精细空间采样的任何潜在副作用。

[0116] 图 7 示出了作为如何确定组织剪切弹性和粘度的范例的具体实施例。将剪切波 115 的第一分量 116 (例如基本分量)选择为当前分量(步骤 S704)。

[0117] 根据作为范例的多线采样采集方案 400,获取回波 RF 数据(步骤 S708),所述回波 RF 数据在 RDT 背景下由时间上最初的重建 A 线 441-444、在帧中后续的复数条重建 A 线以及在其他帧中的复数条重建 A 线构成。对于空间位置 451-454……中的每个,在该位置的重建 A 线中的每个与对应的参考重建 A 线进行比较,以确定在该位置的当前波分量 116 的位移 132。可以使用诸如互相关或多普勒方法的若干已知方法来计算位移 132。

[0118] 同样地,在非 RDT、多线和非多线的背景下,比较相同位置的采样(步骤 S712)。

[0119] 由于根据本文提出的方法的更精细采样,在一些实施例中任选地对测量 132 应用低通滤波器(LPF),以减小测量中的噪声。LPF 可以为作用于位置和时间维度 604、608 上的二维滤波器。这种滤波器的范例将是各向异性滤波器,例如高斯核(Gaussian kernel):

[0120] $kg = \exp(-(r^2/\sigma_1^2 + t^2/\sigma_2^2))$ 公式(2)

[0121] 其中,“r”表示位置,“t”表示时间,并且 σ_1 和 σ_2 分别控制滤波器在空间和时间维度上的尺寸。

[0122] 如果运动场 612 由单个剪切波 116 构成,那么具有恒定位移的运动场的轮廓(即,由于通过在轴 604、608 上适当的采样间隔来布置交错方案 600,以产生基本恒定的位移 616 的斜线 624)为向右下倾斜的直线,并且该直线的斜率或“梯度”由剪切波 116 的速度来确定。

[0123] 可以通过位移 616 的二维矩阵来表示运动场 612,一维是位置并且另一维是时间。类似地,估算公式(1)的右侧的表达式以建立另一二维矩阵,将这两个矩阵进行卷积以减小测量 616 中的噪声。

[0124] 可替代的滤波器为导引(steered)滤波器:

[0125] $ks = \exp(-(u^2/\sigma_3^2 + v^2/\sigma_4^2))$, 公式(3)

[0126] $u = r + cs \times t$

[0127] $v = r - cs \times t$

[0128] 其中 c_s 为滤波器的角度(其表示速度),“u”为与以速度 c_s 向前传播的波的轮廓对准的方向,并且“v”为与可以想象为以速度 c_s 向后(即朝向激励点 x_0)传播的假想波的轮廓对准的相反方向。尺寸参数 σ_3 、 σ_4 控制滤波器在两个方向 u 和 v 上的尺寸。通常, σ_3 将比 σ_4 更大,使得与 u 方向相比,在 v 方向上应用更多的平滑。

[0129] 如果运动场 612 由以速度 c_s 向前传播的单个剪切波 116 构成,那么恒定 v 的线将沿着具有恒定位移的运动场的轮廓。公式(3)中的滤波器核 k_s 将与运动场 612 对准。在该背景下,滤波器的角度由剪切波 116 的先验速度给出。任选地,可以使用剪切波速度的当前估计迭代地调节滤波器角度。

[0130] 用核 k_s 与测量 132 进行卷积将使在与轮廓的平行方向上比起在垂直方向上更加平滑。因此对于给定的噪声减小量,将倾向于保存运动场 612 的结构,而不是各向异性滤波器(步骤 S716)。

[0131] 如根据公式(1),一种确定在不同空间位置 x_i 、 x_j 的剪切波 116 的相位差的替代方案为应用一组(bank)二维滤波器,每个滤波器被调谐到特定候选波速。

[0132] 如果要应用该滤波器组(步骤 S720),使用若干滤波器,覆盖期望的波速范围。将运动场 612 与每个滤波器进行卷积(依次或并行)。将具有最大输出的滤波器当作波速的最佳估计。围绕当前估计,可以迭代该进程,通过将滤波器调谐到与波速的更加紧密间隔选择来使估计更加精确。

[0133] 作为一个范例,以下列形式表示运动场:

[0134] $d(r, t) = d(n \Delta r, m \Delta t)$ 公式(4)

[0135] 其中,“r”为横向位置,“t”为采集时间,并且“n”和“m”为采样指数, Δr 为横向采样间隔并且 Δt 为相同横向位置的位移采样之间的时间。

[0136] 为了便于例示,在该范例中运动场特征为有规律的、均匀间隔的网格,其中初始值“t”(如果“r”)隐含地初始为零。然后,这对应于非交错模式的采样,而不是交错采样方案 600 中的采样。然而,通过适当修改上述公式(4)以及下面的公式(5)和(6),可以将该范例调整为交错采样方案。

[0137] 继续参考该范例,对应于波速 c_{si} 的滤波器具有同相(in-phase)核:

[0138] $ki(c_{si}, r, t) = \sin(2\pi / \lambda_s * (n \Delta r - c_{si} * m \Delta t))$; 公式(5)

[0139] 以及正交核:

[0140] $kq(c_{si}, r, t) = \cos(2\pi / \lambda_s * (n \Delta r - c_{si} * m \Delta t))$ 公式(6)

[0141] 其中 λ_s 为剪切波 116 的波长。

[0142] 滤波器的输出由下式给出:

[0143] $y(c_{si}) = (\sum_{r,t} d(r, t) \times ki(c_{si}, r, t))^2 + (\sum_{r,t} d(r, t) \times kq(c_{si}, r, t))^2$ 公式(7)

[0144] 在公式(5)和(6)中使用 c_{si} 的先验估计来推导出第一滤波器的核。然后将该核用于公式(7)以得出第一输出。通过改变公式(5)和(6)中 c_{si} 的值并且重新计算公式(7)中的 $y(c_{si})$ 来产生在该组中的其他滤波器。由与 $y(c_{si})$ 为最大值的 c_{si} 值来给出具有剪切波 116 的速度。

[0145] 可以通过对核进行加窗来得到改进的结果。这缓和了由截断引起的偏置(步骤 S724),该截断由采样数据和核的有限程度导致。

[0146] 再次参考步骤 S720,如果不用滤波器组进行基于相位差的波速计算,推导出该计

算的输入参数。具体而言,确定位移 132 的相位 Φ 。这可以通过基于在给定空间位置 451、452、453、454……上观察的位移 132 的奈奎斯特重建来实现,并且这要针对每个不同空间位置执行。成对地计算相位差 $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ 以估计将被代入公式(1)的相位差 $\Delta\Phi$ 。对于在不同时间获取的相应采样执行这些相位差计算,例如在时间上第一的重建 A 线 444 和在帧中任何后续的一个重建 A 线的情况下。使用基于采样间延迟的相位校正 156、 $\omega \Delta t$ 分别校正针对不同时间采样的所计算的相位差 $\Delta\Phi$ 。所选择的对中的至少一些可以在空间上相对远离,以便提高计算的精度。可以对相位差(经校正或未经校正,根据可能的情况)以及它们的相应位置间距离 128、 Δr 使用最小二乘分析。然后应用公式(1)(具有或不具有校正 156,根据可能的情况)以估计当前波分量 116 的速度(步骤 S728)。

[0147] 对于任一路径(即,经由步骤 S724 或 S728),如果当前波分量不是要进行速度估计的最后一个(步骤 S732),将下个分量作为当前分量(步骤 S736)。

[0148] 如果将针对前一分量的波速确定中使用的相同 RF 数据用于当前分量,例如因为跟踪脉冲 PRF242 对于最高次谐波是足够的(步骤 S740),所以进程返回到步骤 S712。否则,如果针对当前分量要进行进一步的采集,进程替代地返回到步骤 S708。

[0149] 在步骤 S732,如果当前波分量(替代地)是要进行速度确定的最后一个,应用(本领域熟知的)沃伊特模型以确定剪切弹性和粘度(步骤 S744)。

[0150] 在一些实施例中实施剪切波分散超声振动测定(SDUV)以从单个跟踪脉冲形成平行取向的接收线,以用于对单色剪切波进行测量。在一些实施例中,以交错模式,通过在空间位置上的传送来在空间位置上执行采样,以用于进行波的测量。在一些实施例中,对波进行测量,并且在该测量中应用一组被调谐到相应候选波速的滤波器,所有这些不需要确定在不同空间位置的波相位之间的差别。

[0151] 通过从每个发射的跟踪脉冲提取更多的信息,本文提出的方法和装置提供了对剪切波位移场的更完整采样。因此这允许对剪切波速以及介质的弹性属性更加鲁棒的估计。

[0152] 本文提出的方法可以在软件或者例如在包括设备在内的制造物品中实施,该设备可以被实现为一个或多个集成电路。

[0153] 采用 RDT 的实施例可以被实施为例如单个波束形成器(例如 16x 或 32x 的多线波束形成器)、被加入的仅用于缓冲的硬件以及重叠的接收线的组合。

[0154] 应当注意的是,上述实施例说明而不是限制本发明,并且本领域技术人员将能够在不脱离权利要求书的保护范围的情况下设计出很多替代的实施例。例如,可以在各种扫描几何结构(线性的、相控的或弯曲的)中实施本发明所公开的方法。在权利要求书中,任何置于括号内的附图标记不应解释为对权利要求保护范围的限制。动词“包括”及类似词的使用并不排除存在权利要求未记载的那些部件或步骤。部件之前的不定冠词“一个”或“一种”并不排除存在多个或多种这样的部件。本发明可以实现为包括若干分立部件的硬件,并且可以实现为具有计算机可读介质的适当编程的计算机。在相互不同的从属权利要求中记载某些手段并不代表不能使用这些手段的组合以获得优点。

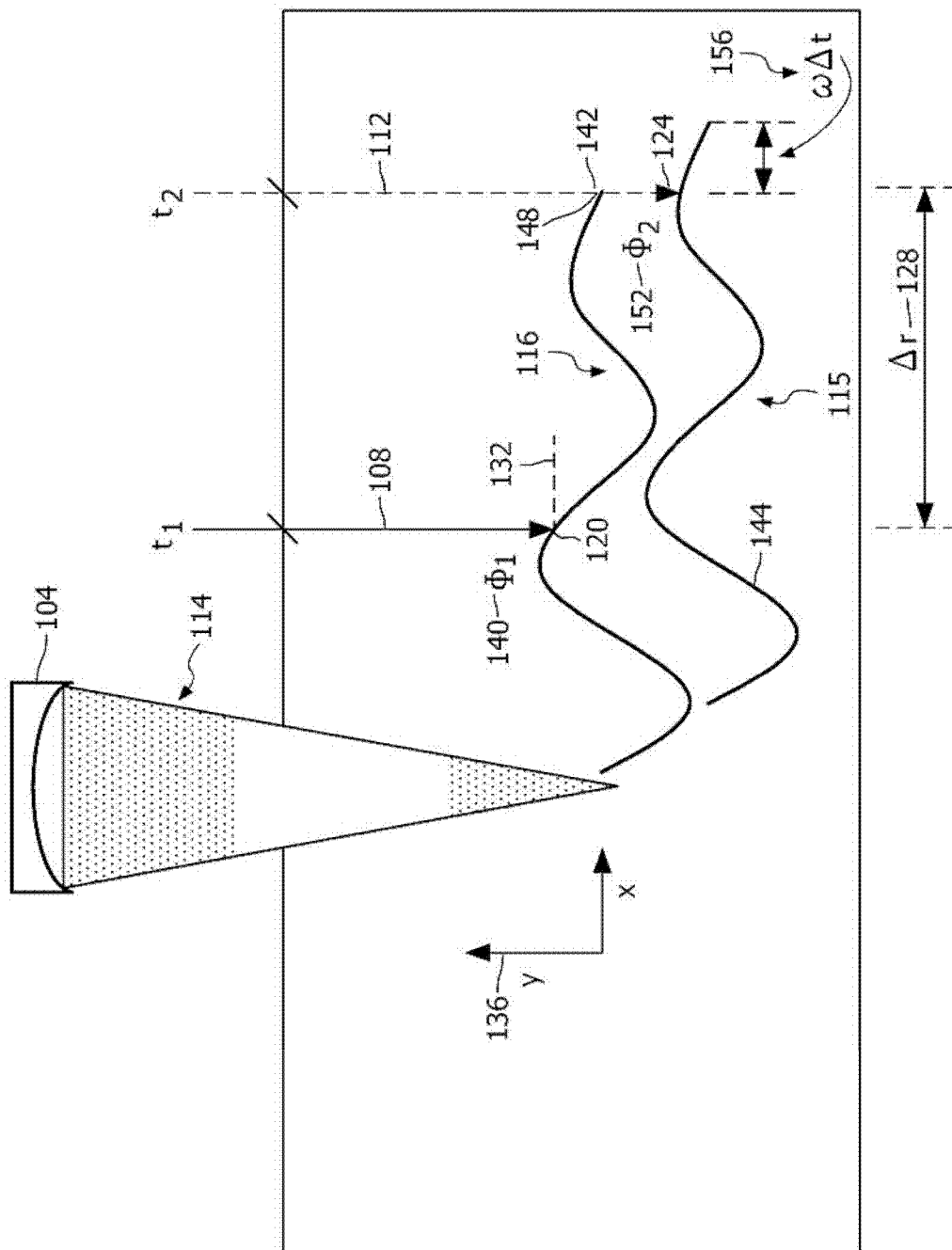


图 1

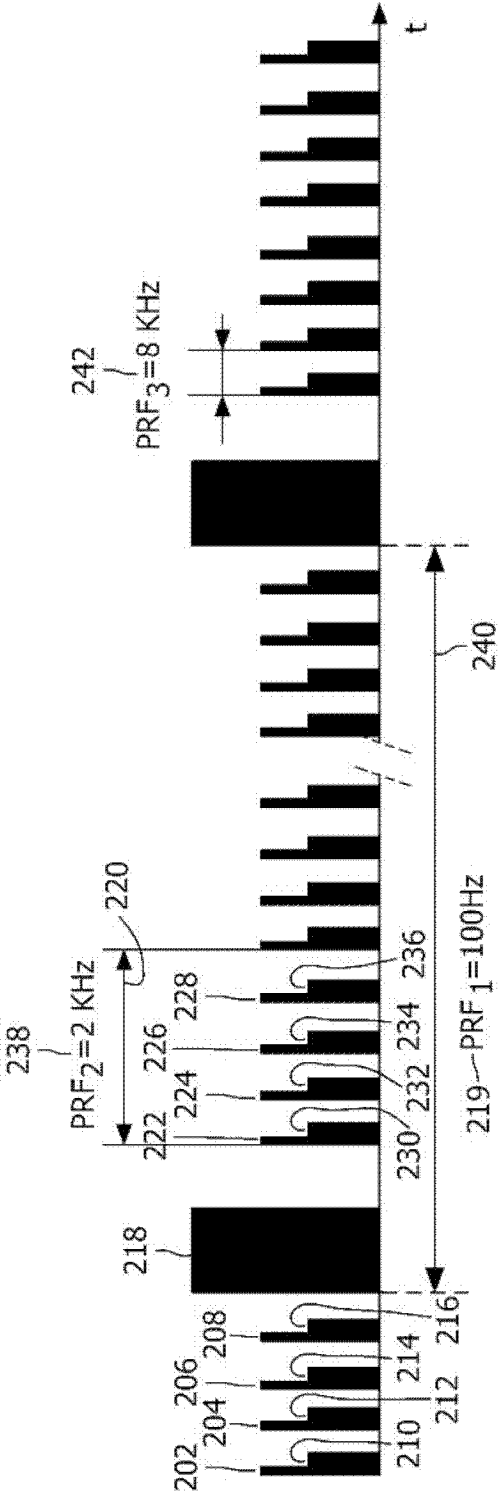


图 2

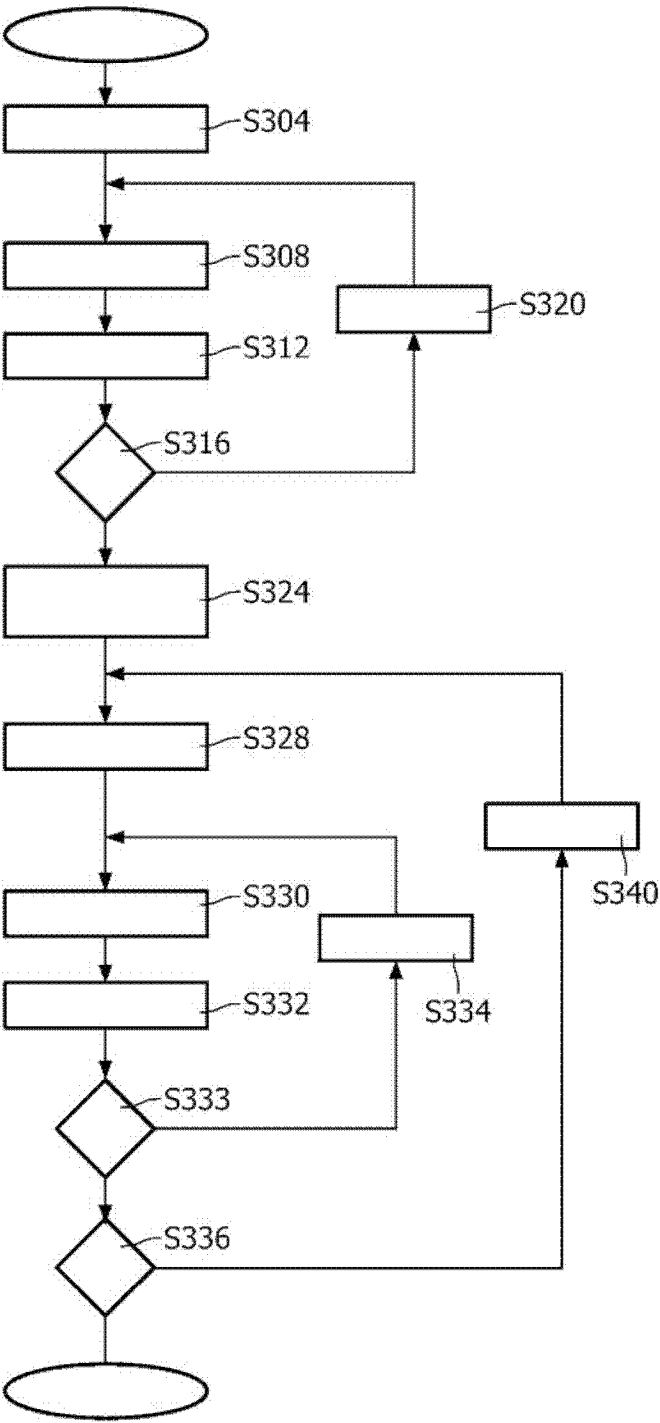


图 3

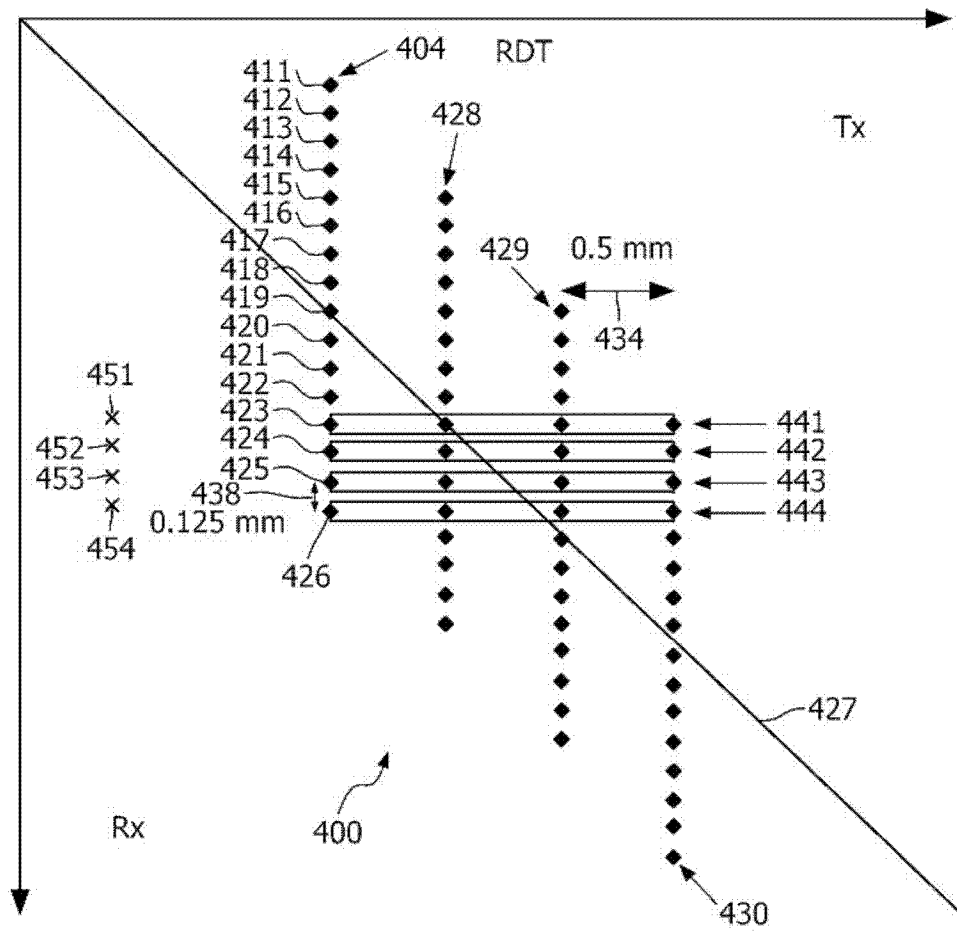


图 4

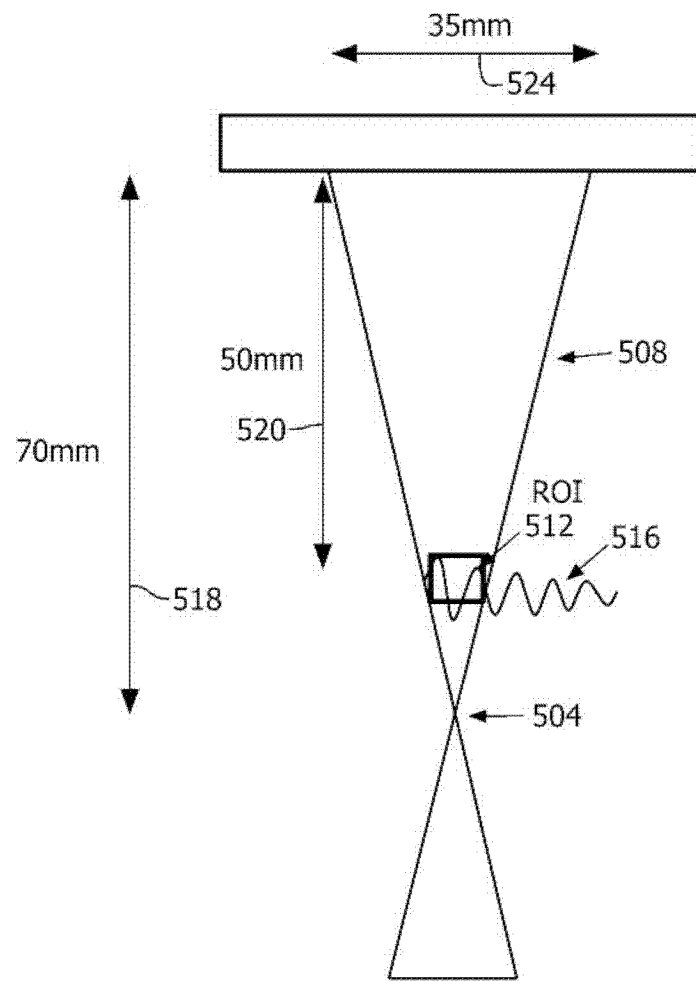


图 5

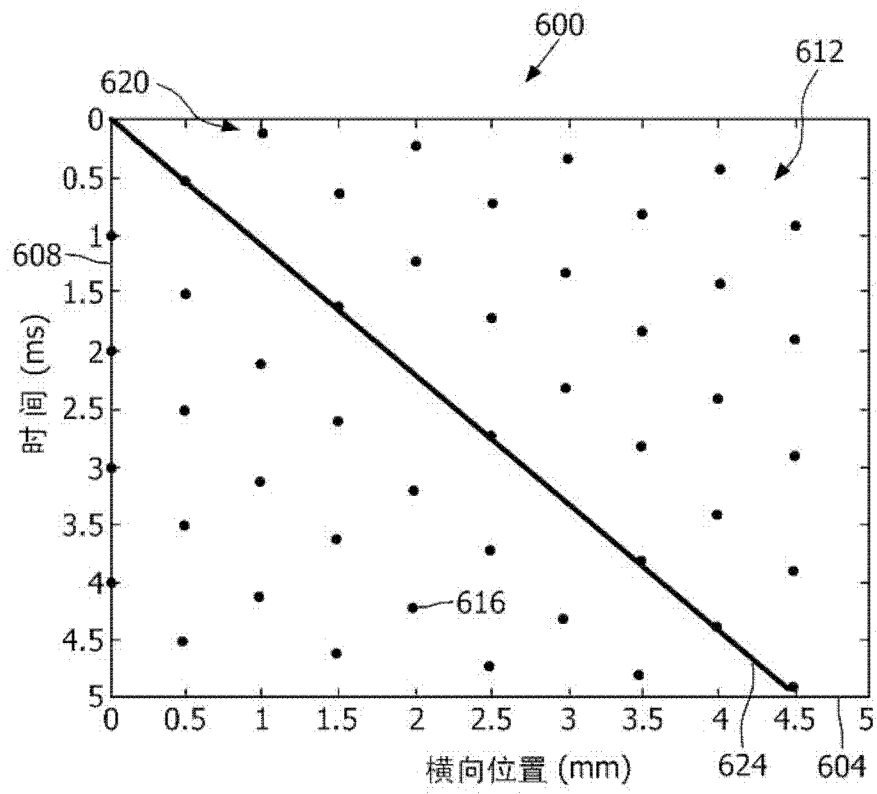


图 6

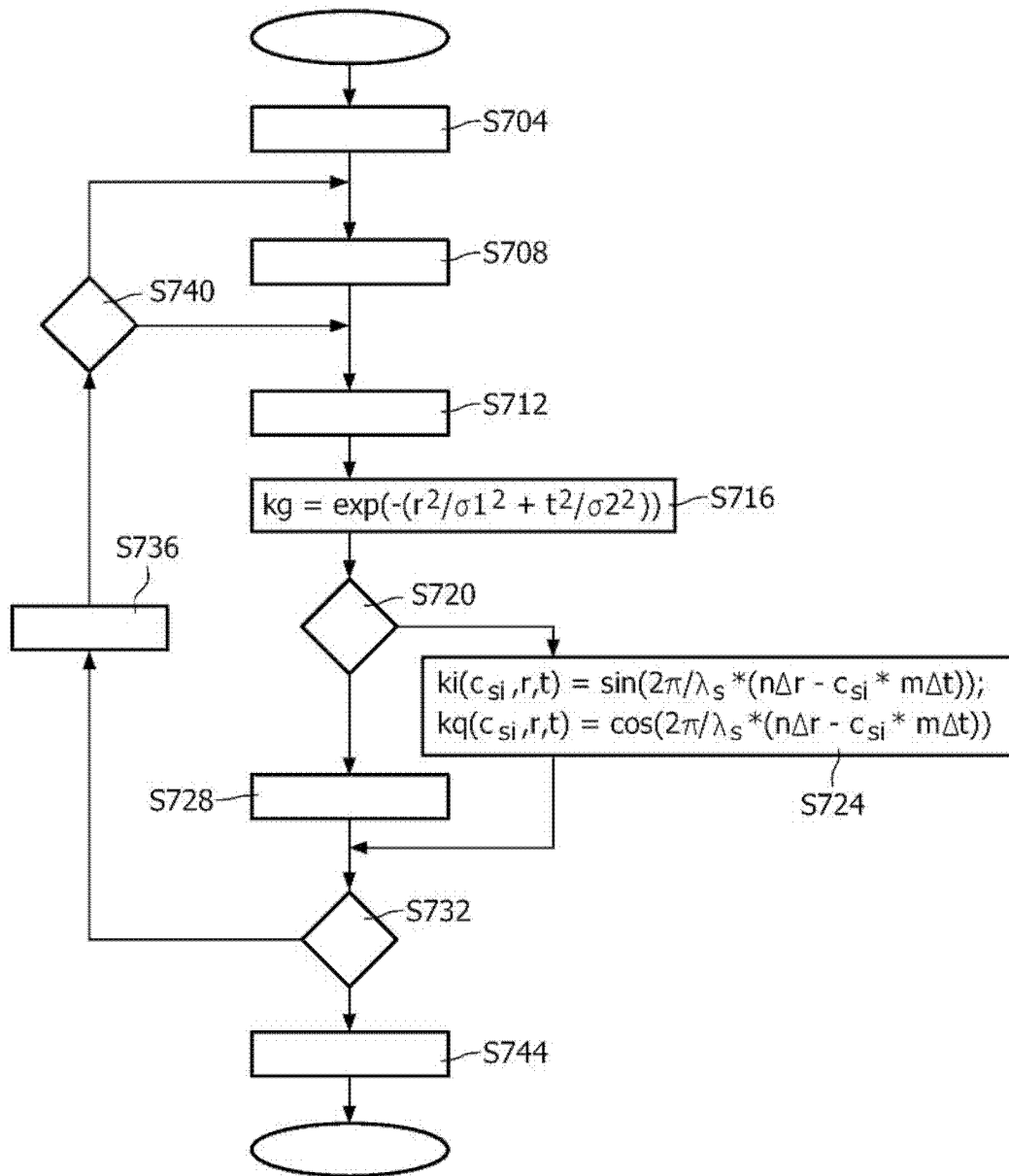


图 7

专利名称(译)	空间上精细的剪切波分散超声振动测定采样		
公开(公告)号	CN102469980B	公开(公告)日	2014-11-26
申请号	CN201080031809.0	申请日	2010-06-23
[标]申请(专利权)人(译)	皇家飞利浦电子股份有限公司		
申请(专利权)人(译)	皇家飞利浦电子股份有限公司		
当前申请(专利权)人(译)	皇家飞利浦电子股份有限公司		
[标]发明人	MR伯切 H谢 AT费尔南德斯 J L罗贝尔		
发明人	M·R·伯切 H·谢 A·T·费尔南德斯 J·L·罗贝尔		
IPC分类号	A61B8/00		
CPC分类号	A61B5/0048 A61B8/00 A61B8/485 G01S7/52042		
代理人(译)	王英 刘炳胜		
优先权	61/226485 2009-07-17 US		
其他公开文献	CN102469980A		
外部链接	Espacenet SIPO		

摘要(译)

在一些实施例中实施剪切波分散超声振动测定(SDUV)以从单个跟踪脉冲形成平行取向的接收线(411-426)，以用于对单色剪切波进行测量。在一些实施例中，以交错模式(600)，通过在空间位置上的传送来在空间位置上执行采样，以用于进行波的测量。在一些实施例中，对波进行测量，并且对该测量应用一组被调谐到相应候选波速的滤波器(S724)，所有这些不需要确定在不同空间位置(451-454)的波相位之间的差别。

