

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
A61B 8/00 (2006.01)
G06F 17/10 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200810063966.4

[43] 公开日 2008年8月13日

[11] 公开号 CN 101238992A

[22] 申请日 2008.2.1
 [21] 申请号 200810063966.4
 [71] 申请人 哈尔滨工业大学
 地址 150001 黑龙江省哈尔滨市西大直街 92 号
 [72] 发明人 王强 沈毅 王艳 冯乃章 王沛东

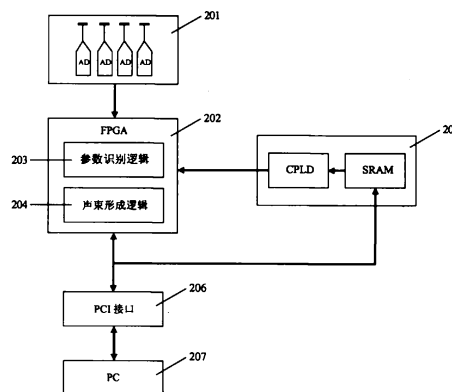
权利要求书 1 页 说明书 6 页 附图 4 页

[54] 发明名称

基于相关性分析的超声成像系统自适应波束形成器

[57] 摘要

一种自适应波束形成器，属于医学超声成像领域。本发明针对传统的波束形成器不能充分抑制通道间随机相位误差引起的旁瓣效应和不能随探测位置动态调整影响聚焦效果的困难，提供一种基于相关性分析的自适应波束形成技术，该技术将各通道获取的回波信号分成若干段，针对每一段，首先利用经典的波束形成方法获取基准信号，然后将每个通道的信号与基准信号做互相关，再利用相关性系数对通道在该分段内的权重作动态调整，最后利用调整后的权重对各通道信号合成得到最终的波束输出。本发明用动态变迹方法适应探测环境的变化，抑制了随机相位误差引起的旁瓣效应。本发明在超声成像领域有着广泛的应用前景。



1. 一种用于数字超声成像的动态自适应波束形成器，其特征在于：将各通道获取的回波信号分成若干段，针对每一段，首先利用经典的波束形成方法获取一个基准信号，然后将每个通道的信号与基准信号做互相关，再利用相关性系数对通道在该分段内的权重作动态调整，最后利用调整后的权重对各通道信号合成得到最终的波束输出。
2. 根据权利要求1所述的自适应波束形成器，其特征在于：采用 I/Q 解调模块对射频回波数据进行正交解调，正交参考正弦和余弦信号的频率与超声发射频率相同，解调后得到同相 I 和正交 Q 两个通道的数据，将 I、Q 数据均匀分割成若干段，段与段之间有交叠，以便使结果更加平滑，分段后的数据进行复数自相关估计。
3. 根据权利要求1所述的自适应波束形成器，其特征在于：利用经典的波束形成方法获取一个基准信号，该基准信号相当于一个有差的先验知识源，对于回波信号与基准信号相近的通道，设置大的相关性系数，该通道在自适应波束形成中的权重也较大，反之则设置小的相关性系数，该通道在自适应波束形成中的权重也较小。
4. 根据权利要求1所述的自适应波束形成器，其特征在于：利用相关性系数对通道在该分段内的权重作动态调整，权重调整方法是将原来的权重系数与相关系数相乘，计算得到新的权重系数。
5. 根据权利要求1所述的自适应波束形成器，其特征在于：系统的上位机为计算机，该计算机中存有 FPGA 的逻辑代码和系统所有的扫查控制参数，计算机与超声系统交换数据，在工作中，计算机先将逻辑代码通过配置电路配置给 FPGA，然后将一些必要的扫查控制参数下载到 FPGA，一帧图像扫查完成后，计算机读取图像并显示。

基于相关性分析的超声成像系统自适应波束形成器

技术领域

本发明涉及医疗超声成像技术领域，尤其涉及一种自适应波束形成器。

背景技术

超声成像是一种适用范围很广的诊断方法，具有无损伤、无电离辐射、使用方便等优点。波束形成是超声成像系统中最为关键的环节，直接影响着超声成像的质量。低的旁瓣级一直是波束形成器设计中追求的目标。从 20 世纪 60 年代至 80 年代末，超声成像系统主要采用模拟波束形成技术，体积庞大而且聚焦精度较低。20 世纪 90 年代初，随着大规模集成电路以及高速、高分辨率模数(A/D)转换器的发展，数字波束形成技术逐渐占据了主导地位；它利用数字存储技术对回波信号进行采样并记录下来，然后通过数字延时累加的方式实现聚焦。

数字波束形成器的聚焦精度与 A/D 转换器的采样速率有关，目前商用机使用的采样速率通常为 40MHz，经过插值处理后聚焦精度可达 10ns。然而在实际系统中，由于制造工艺的限制以及通道失配等原因，探头阵元间不可避免地存在相位误差，同时被测组织的非均质性也会带来相位误差，这些随机分布的相位误差使得波束旁瓣增高。通常相位误差远大于聚焦精度，再提高采样速率已没有任何意义。此种情况下，为了进一步降低旁瓣、提高信噪比，只能增加系统的通道数，然而通道数每增加一倍，信噪比至多提高 3dB，性价比是相当低的。

孔径变迹是波束形成中的一项重要技术，其基本原理就是对中心阵元接收到的回波信号赋予较大的权系数，向两边权系数逐渐减小，以便抑制波束旁瓣和栅瓣。传统的波束形成技术通过在接收孔径上施加高斯窗、汉宁窗等实现变迹，当通道相位误差随机分布时，固定变迹函数对于旁瓣的抑制能力也随之变化。此外，当变迹函数确定以后，其抑制旁瓣的能力随探测深度变化：在变迹有效的扫查深度范围能够很好地抑制轴外旁瓣，而在变迹有效的深度范围以外抑制旁瓣的能力减弱，甚至使旁瓣增加。由此可见，传统的波束形成器对于通道间随机相位误差引起的旁瓣效应并不能充分地抑制，而且不能随探测位置的变化动态调整，从而影响了聚焦效果。

发明内容

本发明针对传统的波束形成器不能充分抑制通道间随机相位误差引起的旁瓣效应和不能

随探测位置动态调整影响聚焦效果的困难，提供一种超声成像中的基于相关分析的波束形成技术，该技术利用动态变迹方法适应探测环境的变化，当探头结构和系统参数变化时，各通道的权重根据回波信号的到达时间自适应地调整，即使存在随机相位误差，也能在整个超声扫查范围内取得较好的旁瓣抑制效果。这种自适应动态变迹技术对于不同的探测对象以及同一对象的不同检测部位，都能够达到较好的聚焦效果，图像的横向分辨率和对比分辨率相对于传统波束形成技术能有较为明显的提高。

本发明提出的自适应波束形成方法是基于相关性分析的。在信号分析和处理中，相关性是一个非常重要的概念。所谓“相关”，是指变量之间的一种线性关系。对于确定性信号而言，两变量之间的关系可用函数来描述，两者具有一一对应的关系。而对于随机信号，则只能通过相关性分析来描述它们之间的关系。在超声系统中，探头相位误差和系统噪声通常都是随机信号，使得回波信号也具有一定的随机性。

在超声回波信号中，包含组织信息的有用信号之间的相关性很强，而不同通道之间由于相位误差和噪声具有随机分布特性，相关性较弱。因此可以利用相关性系数来对各通道的权重作动态调整，以便更好地抑制旁瓣，提高信噪比。

本发明提供的波束形成器通过以下步骤实现：

第一步，将各通道获取的回波信号分成若干段，针对每一段，首先利用经典的波束形成方法获取一个基准信号，然后将每个通道的信号与基准信号做互相关，计算相关性系数。

假设每个分段内的采样点个数为 K ，第 n 个通道接收到的以深度 k_0 为中心的段回波信号可表示为：

$$\mathbf{x}_n(k_0) = [x_n(k_0 - \frac{K}{2}), x_n(k_0 - \frac{K}{2} + 1), \dots, x_n(k_0 + \frac{K}{2})]^T \quad (1)$$

基准信号通过经典的波束形成方法来获取：

$$\mathbf{x}_b(k_0) = \sum_{n=1}^N a_n \mathbf{x}_n(k_0) \quad (2)$$

其中 a_n 是经典波束形成中第 n 个通道的权重，只要变迹函数确定， a_n 随之固定； N 是接收通道数。本发明采用高斯窗作为经典波束形成中的加窗函数。

将第 n 个通道的每段回波信号与此段的基准信号做互相关运算，得到相关系数为：

$$\rho_{n,b}(k_0) = \frac{\text{cov}(\mathbf{x}_n(k_0), \mathbf{x}_b(k_0))}{\sqrt{D(\mathbf{x}_n(k_0))D(\mathbf{x}_b(k_0))}} \quad (3)$$

其中 $\text{cov}(\mathbf{x}_n(k_0), \mathbf{x}_b(k_0)) = \frac{1}{K} \sum_{k=k_0 - \frac{K}{2}}^{k_0 + \frac{K}{2}} [x_n(k) - \overline{x_n(k)}] \times [x_b(k) - \overline{x_b(k)}]$,

$$D(\mathbf{x}_n(k_0)) = \frac{1}{K} \sum_{k=k_0-K/2}^{k=k_0+K/2} [x_n(k) - \overline{x_n(k)}]^2,$$

$$D(\mathbf{x}_b(k_0)) = \frac{1}{K} \sum_{k=k_0-K/2}^{k=k_0+K/2} [x_b(k) - \overline{x_b(k)}]^2$$

这里基准信号相当于一个有差的先验知识源。若某个通道的回波信号与基准信号越相近，对应的相关性系数就越大，此通道在自适应波束形成中的权重也越大。也就是说，如果某通道的信号与有用信号相关性较强，对其进行增强；反之，如果与有用信号相关性较弱，则对其进行抑制。

第二步，利用相关性系数对每个通道在该分段内的权重作动态调整，合成回波信号。每个通道权重的动态调整通过权重系数实现。每个通道将原来的权重系数与相关系数相乘，得到新的权重系数：

$$a'_n(k_0) = \rho_{n,b}(k_0)a_n \quad (4)$$

因此深度 k_0 处的新的合成回波信号为：

$$\mathbf{x}(k_0) = \sum_{n=1}^N a'_n(k_0)\mathbf{x}_n(k_0) = \sum_{n=1}^N \rho_{n,b}(k_0)a_n\mathbf{x}_n(k_0) \quad (5)$$

可以看出，各通道阵元接收到的回波信号经过高斯窗加权并累加以后，又经过了动态匹配滤波处理，使得基准信号在近场和远场都具有较高的信噪比。动态匹配滤波器的输出即为基准信号。当系统参数和探测环境变化时，各个通道的权重也随着回波信号的到达时间自适应地变化，从而使得每个探测深度处的旁瓣都能得到较好的抑制。

根据以上分析，由传统波束形成技术形成的基准信号实际上是波束特性的一个反馈，本发明所提出的自适应波束形成器就相当于一个闭环反馈控制系统。传统的波束形成技术将波束形成过程看成是一个空间滤波过程，同相叠加、异相衰减，而本发明所提出的自适应波束形成方法考虑更多的随机性因素，利用相关性系数对各通道权重系数进行动态最优分配，从而确保在变化的环境中获取最佳的波束。

本发明中的聚焦延时参数可以通过下面的方法计算得到：首先建立超声衰减特性与声速的对应关系曲线，然后根据超声波在被测目标中的衰减特性通过建立的关系曲线查找得到被测目标的即时声速，基于这一即时声速就可以计算出当前被测目标的确切聚焦延时参数。这里的曲线建立、查找和延时参数计算过程都能够在计算机上实现。

本发明的自适应波束形成器可以采用现场可编程门阵列(FPGA)来实现。利用FPGA的在线可重构特性，系统的工作过程可划分为参数识别和正常扫描两个阶段。参数识别阶段，将以

I/Q 解调和复数自相关估计为核心的参数识别逻辑配置给 FPGA，对于同一检测部位而言，只需要进行一次参数识别过程就可以了。正常扫查阶段，将声束形成逻辑配置给 FPGA，结构上与传统波束形成器完全相同，只有聚焦延时参数是经过参数识别过程获取的。由于利用了 FPGA 可重构的特点，参数识别和波束形成可分时共用同一个 FPGA 芯片，所以本发明与传统的波束形成装置相比，硬件成本不会有任何增加。

附图说明

图 1 为自适应波束形成器原理框图。

图 2 为自适应波束形成器功能框图。

图 3 为阵元间相位误差服从均值为 0、方差为 0.064π 的正态分布时，不同波束形成方法下的波束指向图。实线对应本发明中提出的自适应波束形成方法，虚线对应传统的波束形成方法。

图 4 为阵元间相位误差服从均值为 0、方差为 0.64π 的正态分布时，不同波束形成方法下的波束指向图。实线对应本发明中提出的自适应波束形成方法，虚线对应传统的波束形成方法。

图 1 中：

- 101 先进先出(FIFO)缓存器
- 102 乘法器 1
- 103 累加器 1
- 104 匹配滤波器 1
- 105 互相关运算器
- 106 权重调整器
- 107 乘法器 2
- 108 累加器 2
- 109 匹配滤波器 2

图 2 中：

- 201 A/D 采样阵列
- 202 现场可编程门阵列 (FPGA)
- 203 参数识别逻辑
- 204 声束形成逻辑
- 205 FPGA 配置电路

206 PCI 接口

207 计算机 (PC)

具体实施方式

以下结合附图对本发明的具体实施方式作进一步的详细说明。

整个自适应波束形成器原理框图如图 1 所示。回波信号进入自适应波束形成器后首先在先进先出 (FIFO) 缓存器 101 中缓存, 缓存后分为三路处理: 一路利用传统的方法进行波束形成, 一路与基准信号作互相关运算, 另一路等待调整后的通道权重系数计算出来以后进行自适应波束形成。在传统的波束形成环节, 各通道回波信号首先与固定窗的窗系数通过乘法器 102 相乘, 然后通过累加器 103 累加, 累加和即为传统波束形成方法的合成值, 然后再经过动态滤波环节 104, 进行匹配滤波, 消除带外噪声。动态滤波后的信号即为基准信号, 将各通道信号与基准信号通过互相关运算器 105 进行互相关计算, 得到互相关系数。然后, 利用互相关系数对原来的窗系数通过权重调整器 106 进行调整, 将调整后的权重系数与缓存的各通道回波信号通过乘法器 107 相乘, 然后通过累加器 108 进行累加求和, 累加后的和再通过匹配滤波器 109 进行动态滤波, 滤波器输出即为自适应波束形成器所得到的合成波束。

自适应波束形成器功能框图如图 2 所示, 超声回波信号经 A/D 采样阵列 201 进入现场可编程门阵列 (FPGA) 202, 具体采用 Xilinx 公司的 XC3S4000, 每个通道配一个分辨率为 8bit 的 A/D 转换器, 具体采用 AD9057。在参数识别阶段, 计算机 207 通过 PCI 接口 206 将参数识别逻辑下载到 FPGA 配置电路 205 的 SRAM 中, 然后 FPGA 配置电路 205 中的 CPLD 从 SRAM 读取逻辑代码并按一定的时序规则配置给 FPGA 202, 此时 FPGA 202 实现参数识别逻辑 203。在正常扫查阶段, 计算机 207 通过 PCI 接口 206 将声束形成逻辑下载到配置电路 205 的 SRAM 中, 然后配置电路 205 中的 CPLD 从 SRAM 读取逻辑代码并按一定的时序规则配置给 FPGA 202, 此时 FPGA 202 实现声束形成逻辑 204。

图 3 显示了通道间存在服从均值为 0、方差为 0.064π 的正态分布随机相位误差时, 两种波束形成方法的性能对比。实线对应本发明中提出的自适应波束形成方法, 虚线对应传统的波束形成方法。当不采用变迹技术时, 波束旁瓣较大, 主瓣特性也不好, 严重影响了图像的横向分比率和对比分辨率。传统的对接收孔径加固定窗的波束形成方法能够在一定程度上抑制旁瓣, 伴随而来的是主瓣宽度的增大, 但旁瓣抑制效果并不令人满意。相比之下, 自适应波束形成方法能够充分地抑制旁瓣, 提高了图像的横向分辨率。

图 4 显示了通道间存在服从均值为 0、方差为 0.64π 的正态分布随机相位误差时, 两种波束形成方法的性能对比。此时, 如不采用任何变迹技术时, 波束特性严重恶化, 很难区分主

瓣和旁瓣，聚焦波束几乎没有指向性。如图所示，传统的波束形成技术可以在一定程度上抑制旁瓣，但旁瓣级仍然很大，几乎和主瓣在一个数量级上，而自适应方法则能够将旁瓣幅度抑制在一个较低的水平，在一定程度上保证图像的横向分辨率和对比分辨率。图中的旁瓣效应和波束特性的恶化是不可避免的，这是由于相位误差太大的原因。

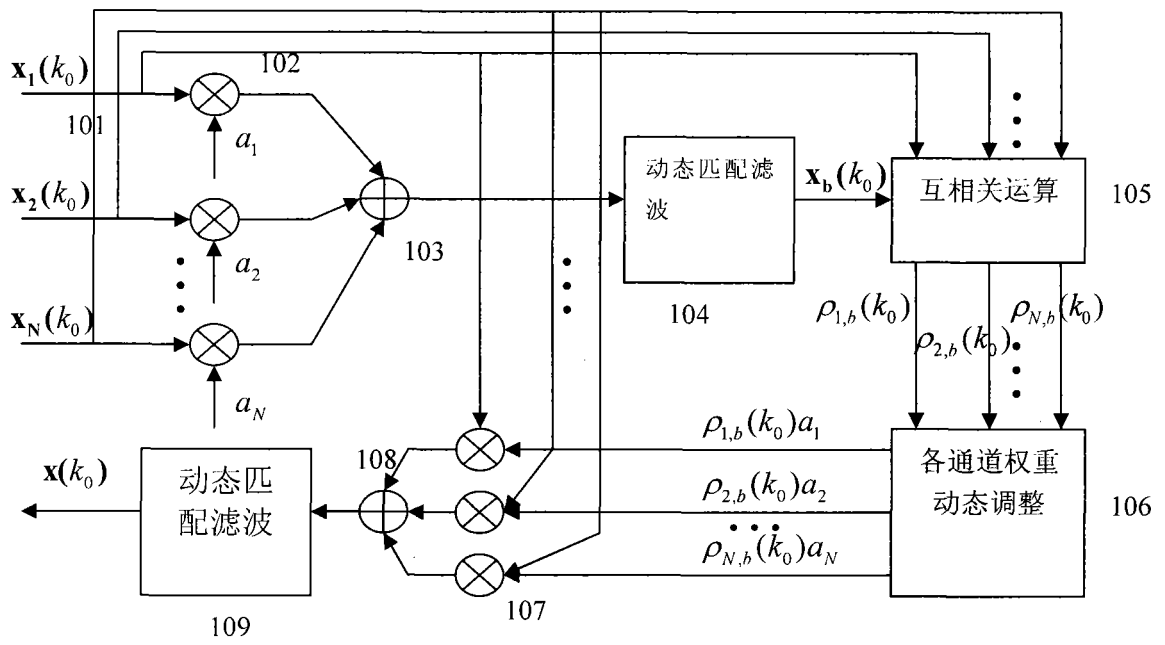


图 1

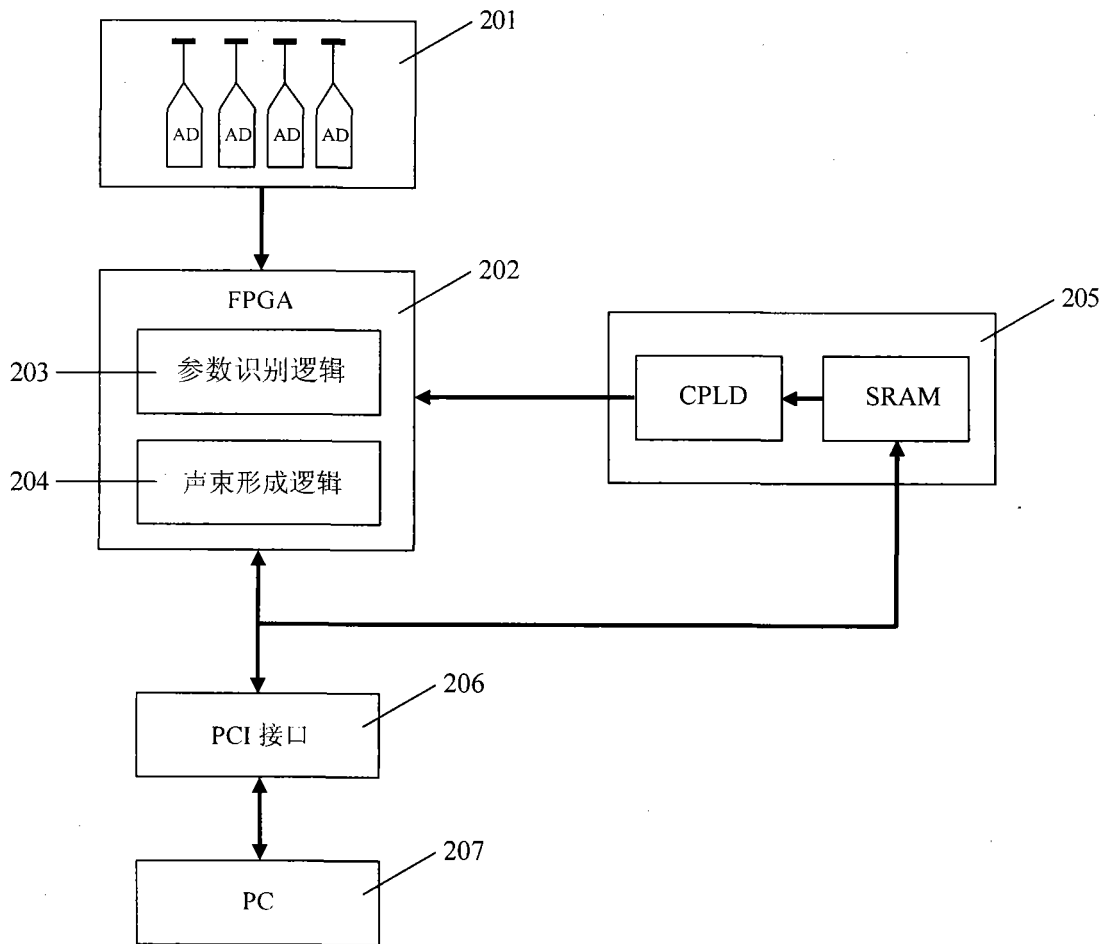


图 2

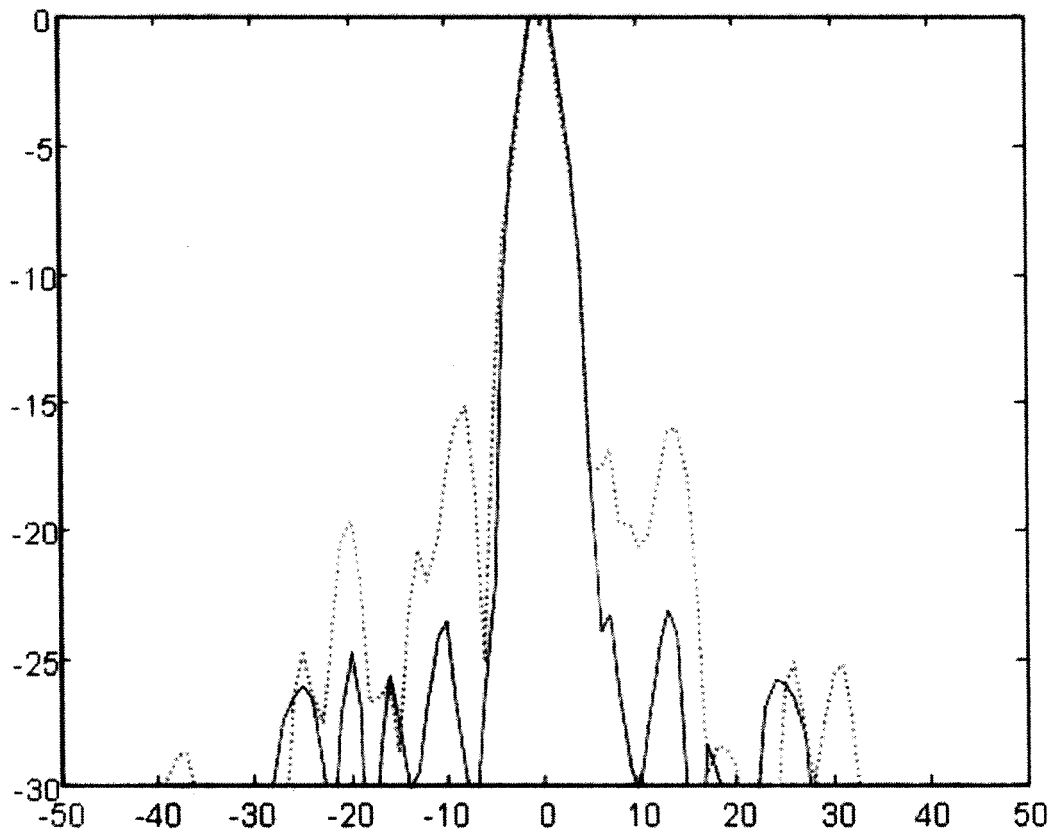


图 3

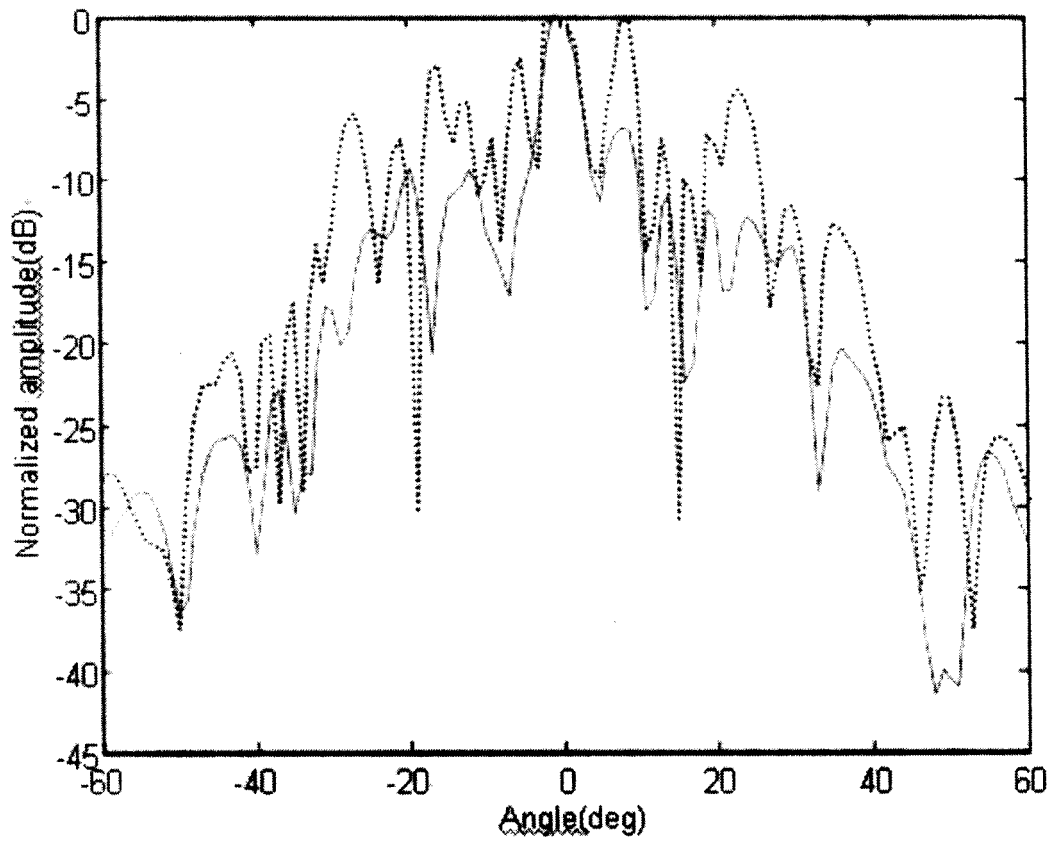


图 4

专利名称(译)	基于相关性分析的超声成像系统自适应波束形成器		
公开(公告)号	CN101238992A	公开(公告)日	2008-08-13
申请号	CN200810063966.4	申请日	2008-02-01
[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	王强 沈毅 王艳 冯乃章 王沛东		
发明人	王强 沈毅 王艳 冯乃章 王沛东		
IPC分类号	A61B8/00 G06F17/10		
其他公开文献	CN100589761C		
外部链接	Espacenet SIPO		

摘要(译)

一种自适应波束形成器，属于医学超声成像领域。本发明针对传统的波束形成器不能充分抑制通道间随机相位误差引起的旁瓣效应和不能随探测位置动态调整影响聚焦效果的困难，提供一种基于相关性分析的自适应波束形成技术，该技术将各通道获取的回波信号分成若干段，针对每一段，首先利用经典的波束形成方法获取基准信号，然后将每个通道的信号与基准信号做互相关，再利用相关性系数对通道在该分段内的权重作动态调整，最后利用调整后的权重对各通道信号合成得到最终的波束输出。本发明用动态变迹方法适应探测环境的变化，抑制了随机相位误差引起的旁瓣效应。本发明在超声成像领域有着广泛的应用前景。

