



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 103229075 B

(45)授权公告日 2016.10.26

(21)申请号 201280003864.8

(22)申请日 2012.02.21

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 103229075 A

(43)申请公布日 2013.07.31

(30)优先权数据

13/069,951 2011.03.23 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2013.05.28

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/US2012/025891 2012.02.21

(87)PCT国际申请的公布数据

W02012/128879 EN 2012.09.27

(73)专利权人 雪佛龙美国公司

地址 美国加利福尼亚

(72)发明人 张林彬 单国建 王躍

(74)专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利
商标事务所 11038

代理人 李向英

(51)Int.Cl.

G01V 1/28(2006.01)

G06F 19/00(2011.01)

审查员 孙珍珠

权利要求书1页 说明书5页 附图6页

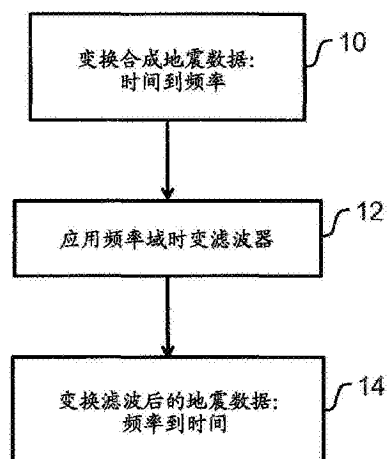
(54)发明名称

地震数据模拟和偏移的系统和方法

(57)摘要

公开了解决低阶有限差分地震波传播中时间频散的系统 and 计算机实施的方法。本方法的实施例包括把地震数据集从时域变换到频域以获得频域地震数据集;将频域时变滤波器应用到频域地震数据集以获得滤波后的频域地震数据集;以及把滤波后的频域地震数据集从频域变换到时域以获得时域的滤波后的地震数据集。所述频域时变滤波器基于波动方程有限差分解中固有的有效相速度。

100



1. 一种用于解决低阶有限差分地震波传播中的时间频散的方法,包括:
 - a. 把地震数据集从时域变换到频域以获得频域地震数据集;
 - b. 将频域时变滤波器应用到所述频域地震数据集以获得滤波后的频域地震数据集;以及
 - c. 把所述滤波后的频域地震数据集从所述频域变换到所述时域以获得时域的滤波后的地震数据集,其中,所述频域时变滤波器基于有效相速度。
2. 根据权利要求1的方法,其中,所述地震数据集是由低阶有限差分模拟算子产生的合成地震数据集。
3. 根据权利要求2的方法,其中,所述低阶有限差分模拟算子是二阶有限差分模拟算子。
4. 根据权利要求1的方法,其中,所述地震数据集是记录的地震数据集。
5. 根据权利要求4的方法,进一步包括使用所述时域的滤波后的地震数据集作为逆时偏移的输入。
6. 根据权利要求4的方法,进一步包括使用所述滤波后的频域地震数据集作为逆时偏移的输入。
7. 根据权利要求5的方法,其中,所述逆时偏移使用低阶有限差分模拟算子。
8. 根据权利要求7的方法,其中,所述低阶有限差分模拟算子是二阶有限差分模拟算子。
9. 一种用于解决使用低阶有限差分模拟地震处理方法中的时间频散的系统,包括:
 - a. 用于提供表示受关注地下区域的信息的设备;以及
 - b. 计算机处理器,与所述设备通信并且被配置为接收所述信息和响应所述信息执行下面的过程:
 - i. 从时域变换到频域和从所述频域变换到所述时域,或者从所述时域变换到所述频域;以及
 - ii. 应用频域时变滤波器,其中,所述频域时变滤波器基于有效相速度。
10. 根据权利要求9的系统,进一步包括用户接口。
11. 根据权利要求9的系统,其中,表示所述受关注地下区域的信息包括由低阶有限差分模拟算子产生的合成地震数据集。
12. 根据权利要求9的系统,其中,表示所述受关注地下区域的信息包括记录的地震数据集。
13. 根据权利要求9的系统,进一步包括执行逆时偏移。
14. 根据权利要求13的系统,其中,所述逆时偏移使用低阶有限差分模拟算子。

地震数据模拟和偏移的系统和方法

技术领域

[0001] 一般来说,本发明涉及使用有限差分模拟算子对地震数据进行模拟和偏移的方法和系统,尤其是为了解决使用用于地震数据模拟和偏移的低阶有限差分模拟算子而导致的时间频散的方法和系统。

背景技术

[0002] 3D地震数据的准确偏移实现了地下油气藏的正确解释。地震偏移本质上是地震波传播的逆过程;所以,对尽可能准确地模拟地震波传播已经投入了许多努力。模拟地震波传播的一种方法是有限差分模拟。

[0003] 在有限差分模拟中,使用有限差分(FD)方法近似波动方程的解。这种方法能够产生多个近似解,根据其阶数命名,例如二阶FD和四阶FD,这指明了它们如何准确地表示波动方程的真实解。当使用二阶FD解模拟地震波传播时,由于FD解的准确度低所以最终的合成地震数据具有严重的时间频散。更高阶的FD解比如四阶FD产生时间频散更少的合成地震数据。更高阶解的改进准确度以计算成本高为代价。例如,四阶FD地震模拟要求二阶FD两倍的计算操作。

[0004] 能够用于改进模拟准确度的另一种方法是伪解析算子比如伪拉普拉斯算子。这种方法类似于二阶FD模拟只不过它修改了空间和时间导数,所以它们具有相反的符号,并且通过调整系数,导数误差将彼此抵消,从而降低结果的不准确度。这种方法比二阶FD模拟更准确并且计算成本不如四阶FD模拟昂贵。不过,伪解析方法仍然比二阶FD模拟昂贵。

[0005] 当根据逆时偏移(RTM)考虑时,与使用更高阶FD模拟或伪解析方法相关联的计算成本变得甚至更重要。在逆时偏移中,震源波场向前传播到地下,往往使用FD或伪解析模拟,而记录的地震数据集向回传播到地下。两个波场经由成像条件在地下位置匹配,往往为零延迟互相关,以产生图像。记录的地震数据集是已经穿过了地下的地震能量的真实结果,因此没有从近似的FD或伪解析模拟产生的时间频散。为了使向前传播的合成地震数据与向回传播的记录地震数据匹配,必须解决时间频散。所以,当前的RTM方法使用更高阶的FD或伪解析模拟。

[0006] FD地震模拟和RTM的当前实践使用伪拉普拉斯算子或更高阶的FD方法。这些方法比常规的二阶FD模拟更准确并且计算成本更昂贵。

发明内容

[0007] 根据本发明的一个实施例,解决时间频散的方法包括把地震数据集从时域变换到傅里叶频域以获得频域地震数据集,将频域时变滤波器应用到所述频域地震数据集以获得滤波后的频域地震数据集,以及把所述滤波后频域地震数据集从所述频域变换到所述时域以获得时域滤波后地震数据集。所述频域时变滤波器基于所述波动方程有限差分分解中固有的有效相速度。所述频域时变滤波器可以被应用到由低阶有限差分模拟产生的合成地震数据集。

[0008] 在一个实施例中,所述频域时变滤波器可以在逆时偏移以前被应用到记录的地震数据。然后所述逆时偏移可以使用低阶有限差分模拟向前传播所述震源波场。

[0009] 本发明也可以被实践为解决使用低阶有限差分模拟地震处理方法中的时间频散的系统。所述系统可以包括提供表示受关注地下区域信息的设备,以及与所述设备通信并被配置为接收所述数据和响应所述数据执行计算机可执行代码的计算机处理器。所述计算机可执行代码可以包括域变换模块,能够从时域变换到频域和/或从所述频域变换到所述时域,以及应用频域时变滤波器的频域滤波器应用模块。所述系统还可以包括用户界面。在一个实施例中,所述系统可以包括逆时偏移模块。

[0010] 本发明也可以被实践为包括计算机可读介质的制成品,所述计算机可读介质上具有计算机可读代码,所述计算机可读代码被配置为实施解决低阶有限差分波动传播中时间频散的方法。所述方法可以包括把地震数据集从时域变换到傅里叶频域以获得频域地震数据集,将频域时变滤波器应用到所述频域地震数据集以获得滤波后的频域地震数据集,以及把所述滤波后频域地震数据集从所述频域变换到所述时域以获得时域滤波后地震数据集。所述频域时变滤波器基于所述波动方程有限差分解中固有的有效相速度。

[0011] 提供以上发明内容段落是为了以简化形式引入选定的若干概念,以下在具体实施方式段落中将进一步介绍。发明内容不意味着标识权利要求主题的关键特征或本质特征,也不意味着用于限制权利要求主题的范围。不仅如此,权利要求主题不被限制为解决本公开的任何部分中指出的任何或全部缺点的实施。

附图说明

[0012] 关于以下说明、随后的权利要求书和附图,本发明的这些和其他特征将变得更好理解,其中:

[0013] 图1是流程图,展示了根据本发明实施例,进行地震数据模拟的方法;

[0014] 图2显示了使用常规二阶FD方法传播的子波,以及对该子波应用本发明的频域时变滤波器的结果;

[0015] 图3是使用常规二阶FD方法的地震数据模拟与使用本发明的地震数据模拟的对比实例;

[0016] 图4是流程图,展示了根据本发明实施例进行逆时偏移(RTM)的方法;

[0017] 图5是使用常规二阶FD方法的逆时偏移与使用本发明的逆时偏移的对比实例;

[0018] 图6示意地展示了执行根据本发明实施例的方法的系统。

具体实施方式

[0019] 本发明可以在系统和由计算机执行的计算机方法的一般语境中介绍和实施。这样的计算机可执行指令可以包括若干程序、例程、对象、组件、数据结构和计算机软件技术,能够用于执行具体的任务和处理抽象的数据类型。本发明的软件实施可以以不同的语言编写,在各种各样的计算平台和环境中的应用。应当认识到,本发明的范围和基本原理不限于任何具体的计算机软件技术。

[0020] 不仅如此,本领域技术人员将认识到,使用硬件和软件配置的任何一种或结合都可以实践本发明,包括但不限于具有单和/或多计算机处理器的系统、手持设备、可编程

的消费者电子设备、小型计算机、大型计算机等。本发明还可以在分布式计算环境中实施，其中任务由通过一个或多个数据通信网络链接的服务器或其他处理设备执行。在分布式计算环境中，在包括存储器存储设备的本地和远程计算机存储介质都可以有程序模块。

[0021] 同样，计算机处理器使用的制成品比如CD、预录制磁盘或其他等同设备，可以包括计算机程序存储介质及其上记录的程序装置，用于指挥计算机处理器促进本发明的实施和实践。这样的设备和制成品同样落入本发明的实质和范围之内。

[0022] 现在参考附图，将介绍本发明的实施例。本发明能够以无数种方式实施，包括例如作为系统(包括计算机处理系统)、方法(包括计算机实施的方法)、装置、计算机可读介质、计算机程序产品、图形用户界面、网络入口或者有形地固定在计算机可读存储器中的数据结构。以下讨论了本发明的几个实施例。附图仅仅展示了本发明的典型实施例，所以不应当视为对其范围和广度的限制。

[0023] 本发明涉及解决有限差分地震数据模拟中的时间频散，并且，例如而非限制，能够被用于降低由低阶有限差分模拟产生的合成地震数据中的时间频散，或者在使用低阶有限差分模拟作为其向前传播算子的逆时偏移以前把时间频散引入到记录地震数据中。时间频散通过频域时变滤波器表现其特征。

[0024] 本发明人已经确定，有可能根据在波动方程的有限差分解中固有的有效相速度产生频域时变滤波器。低阶有限差分解，比如二阶解，将是不准确的并将在由低阶有限差分(FD)模拟产生的合成地震数据中引入时间频散。另外，本发明人已经确定，通过对由低阶FD模拟产生的合成地震数据应用频域时变滤波器，能够降低时间频散。此外，有可能使用负的频域时变滤波器对记录的地震数据添加时间频散，使得它能够用作对利用低阶FD模拟作为其向前传播算子的逆时偏移方法的输入。

[0025] 在这点上，图1的流程图中展示了根据本发明方法100的实例。在步骤10，合成地震数据集从时域被变换到频域。例如由快速傅氏变换可以做到。在某实施例中，合成地震数据集由低阶有限差分(FD)模拟算子产生，比如而不限于二阶FD模拟算子。低阶FD模拟算子是基于波动方程的有限差分解并且已知是不准确的但是仍被使用的算子，因为它计算成本比高阶FD模拟算子低。

[0026] 在步骤12，把频域时变滤波器应用到现在在频域的合成地震数据。这种频域时变滤波器的设计基于波动方程有限差分解中固有的有效相速度。作为可以如何构造滤波器的实例，对于3D声波方程

$$[0027] \quad \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = V^2 \nabla^2 P \quad \text{等式1}$$

[0028] 其中P是波场，t是传播时间而V是速度，二阶有限差分解可以写为：

$$[0029] \quad P(t+\Delta t) - 2P(t) + P(t-\Delta t) = \Delta t^2 V^2 \nabla^2 P \quad \text{等式2}$$

[0030] 取等式2的傅里叶变换得出

$$[0031] \quad (2\cos(\omega \Delta t) - 2)P(\omega, k) = -\Delta t^2 V^2 k^2 P(\omega, k) \quad \text{等式3}$$

[0032] 其中k是波数。从这个结果有可能确定二阶FD解的有效相速度。在这种情况下，等式3的有效相速度 V_a 能够表示为：

$$[0033] \quad V_a = \frac{\omega}{k} = \frac{\omega \Delta t}{\sqrt{2-2\cos(\omega \Delta t)}} V \quad \text{等式4}$$

[0034] 从等式4,显然 V_a 是依赖于频率的并且不同于真实速度 V 。在根据这个FD解传播的波场中, V 与 V_a 之间的差产生了时间延迟,即时间频散。时间频散在数学上能够由下式描述:

$$[0035] \quad T - T_{true} = T \left(1 - \frac{T_{true}}{T} \right) = T \left(1 - \frac{v_a}{v} \right) = T \left(1 - \frac{\omega \Delta t}{\sqrt{2-2\cos(\omega \Delta t)}} \right) \quad \text{等式5}$$

[0036] 其中 T 表示由有限差分模拟计算的传播时间,而 T_{true} 是使用真实速度的传播时间。由于定义了时间频散,所以可以设计频域时变滤波器 $F(\omega, T)$ 以对其补偿:

$$[0037] \quad F(\omega, T) = \exp \left(-i\omega T \left(1 - \frac{\omega \Delta t}{\sqrt{2-2\cos(\omega \Delta t)}} \right) \right) \quad \text{等式6}$$

[0038] 对由二阶FD模拟产生的合成地震数据应用这个滤波器,正如在步骤12在所为,降低了时间频散。

[0039] 图2中能够看到等式6中滤波器的效果。在这个实例中,显示为曲线20的单子波已经由二阶FD模拟传播。该结果显示出预期相位畸变为先于主到达的小峰值和不等的正负大峰值,它们是由不准确的FD解导致的时间频散的特征。对曲线20应用等式6的滤波器产生了曲线22,它没有显示出时间频散的迹象。

[0040] 再次参考图1,在对频域地震数据应用等式6的滤波器后,该数据在步骤14被变换回时域。图3中能够看到方法100的实例。画面30显示了由二阶FD模拟算子所传播的子波。时间频散由箭头31指明。画面32显示了执行方法100之后的数据。时间频散被大为降低。

[0041] 图4的流程图展示了本发明的另一个实施例。在这个实施例中,频域时变滤波器被用于准备由逆时偏移(RTM)算法偏移的记录地震数据。记录的地震数据集表示由地震源产生、经由地下传播、按照地下岩层的地震速度和密度的差异折射和反射以及由地震接收器记录的地震能量。因此,记录的地震数据集表示波动方程的真实解因而没有由FD模拟的不准确所导致的时间频散。在RTM中,记录的地震数据集或波场被向回传播到地下,而震源波场使用FD或伪解析方法向前传播。两种波场都经受成像条件以产生偏移后图像。典型的成像条件是零延迟的互相关:

$$[0042] \quad I(x, y, z) = S(x, y, z, t) \otimes R(x, y, z, t) \quad \text{等式7}$$

[0043] 其中 $I(x, y, z)$ 是偏移后图像, $S(x, y, z, t)$ 是由FD或伪解析方法向前传播的震源波场,而 $R(x, y, z, t)$ 是向回传播的记录波场。由于零延迟的互相关,仅仅在向前传播的震源波场中出现的任何时间频散都将导致偏移后图像中的假象和深度错位。典型情况下,RTM使用计算成本更昂贵的高阶FD或伪解析模拟以降低时间频散。不过,如果在震源和记录波场中的时间频散相同,零延迟的互相关成像条件将不导致假象。本发明的这个实施例在记录地震数据中产生了时间频散,所以它可以用作对震源波场使用计算成本更低廉的低阶FD模拟算子同时减少假象的RTM的输入。

[0044] 在方法400中,步骤40把记录的地震数据集变换到频域中。例如由快速傅里叶变换可以做到。在步骤42中把频域时变滤波器应用到频域数据。这个滤波器的产生是根据来自FD解的有效相速度,正如对方法100所导出的滤波器,但是在这个实施例中,该滤波器将引

入时间频散而不是降低它。对于二阶FD解,将被应用到频域记录地震数据的频域时变滤波器是

$$[0045] \quad F(\omega, T) = \exp \left(i \omega T \left(1 - \frac{\omega \Delta t}{\sqrt{2 - 2 \cos(\omega \Delta t)}} \right) \right) \quad \text{等式8}$$

[0046] 注意,这个滤波器与等式6所示的方法100的滤波器几乎一致;只有指数的符号不同。

[0047] 在步骤44,滤波后的记录数据集被变换回时域。在步骤46,滤波后的记录数据集被用作RTM的输入,它使用的FD模拟算子与导出频域时变滤波器的FD解的阶数相同。应当注意,如果该RTM方法准备采用频域的记录地震数据作为输入,步骤44就可以跳过。

[0048] 图5中可以看到方法400的实例。画面50显示了RTM结果,它使用二阶FD模拟算子传播震源波场并且使用未应用频域时变滤波器的记录地震数据集。画面52显示了由方法400产生的RTM结果。直线51是水平参考,有助于演示地震反射层的垂直定位。这个反射层位于画面52中的正确深度;在画面50中,使用低阶FD模拟算子和未滤波的记录地震数据已经导致了假象,使得反射层显现得比其应当的位置更浅,并且已经明显地改变了子波的相位。在该图像中更深的地震反射层的波组中也能够看到该效应。两个画面之间的深度差异在几十米的量级,试图布井时这是显著的差异。

[0049] 图6示意地展示了执行本发明的系统600。该系统包括数据源60,对于方法400它可以包含记录的地震数据集。对于方法100,数据源可以包含由低阶FD模拟算子产生的合成地震数据集。该数据源与计算机处理器62通信。处理器62被配置为接收数据并执行从计算机可读代码编译的模块。这些模块可以包括域变换模块65,它或许能够把数据从时域变换到频域,以及从频域变换到时域。例如通过正向和反向的快速傅里叶变换可以进行该变换。这些模块还可以包括滤波器应用模块66,它应用频域时变滤波器。对于方法400,这些模块还可以包括逆时偏移模块67。处理器62与用户接口69通信。用户接口69既可以用于显示数据和处理后的数据结果,又可以用于允许用户在若干选项当中选择以实施本方法的若干方面。来自处理器62的处理后的数据结果可以存储在数据源60上。

[0050] 虽然在以上说明书中已经关于本发明一定的优选实施例介绍了它,以及为了展示目的已经阐述许多细节,但是对于本领域技术人员来说显而易见,本发明能容许变化并且本文介绍的某些其他细节能够有相当大改变而不脱离本发明的基本原理。此外,应当认识到,在本文任何一个实施例中显示和介绍的结构特征或方法步骤也能够其他实施例中使用。

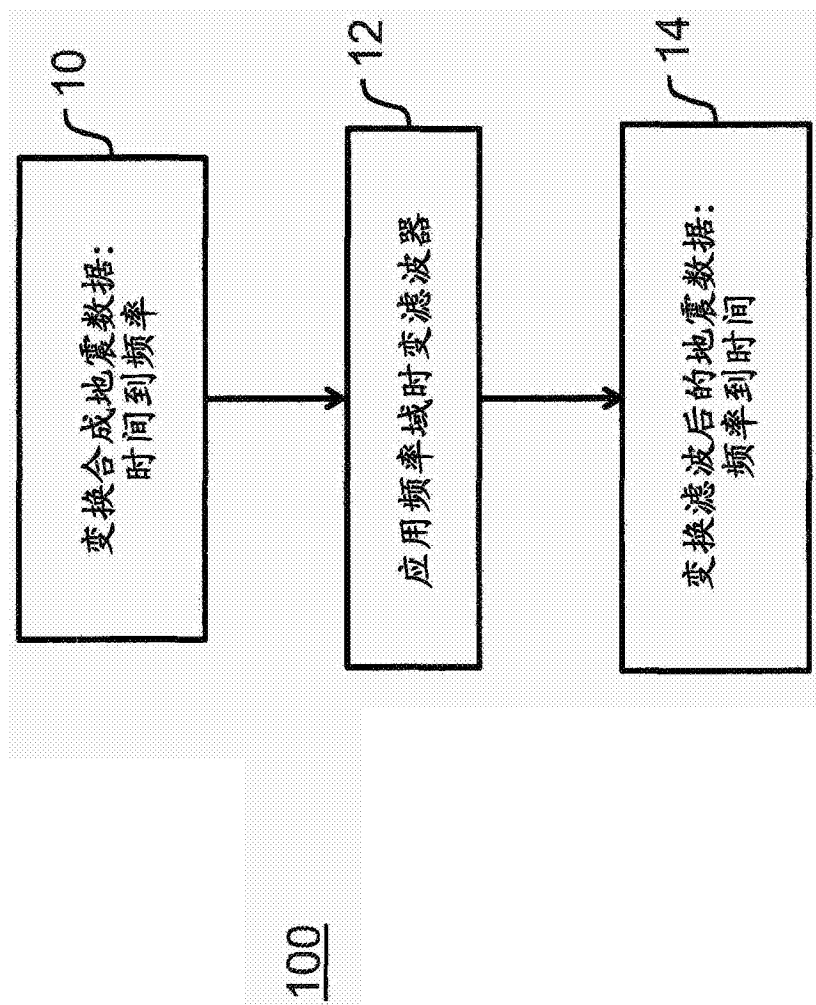


图1

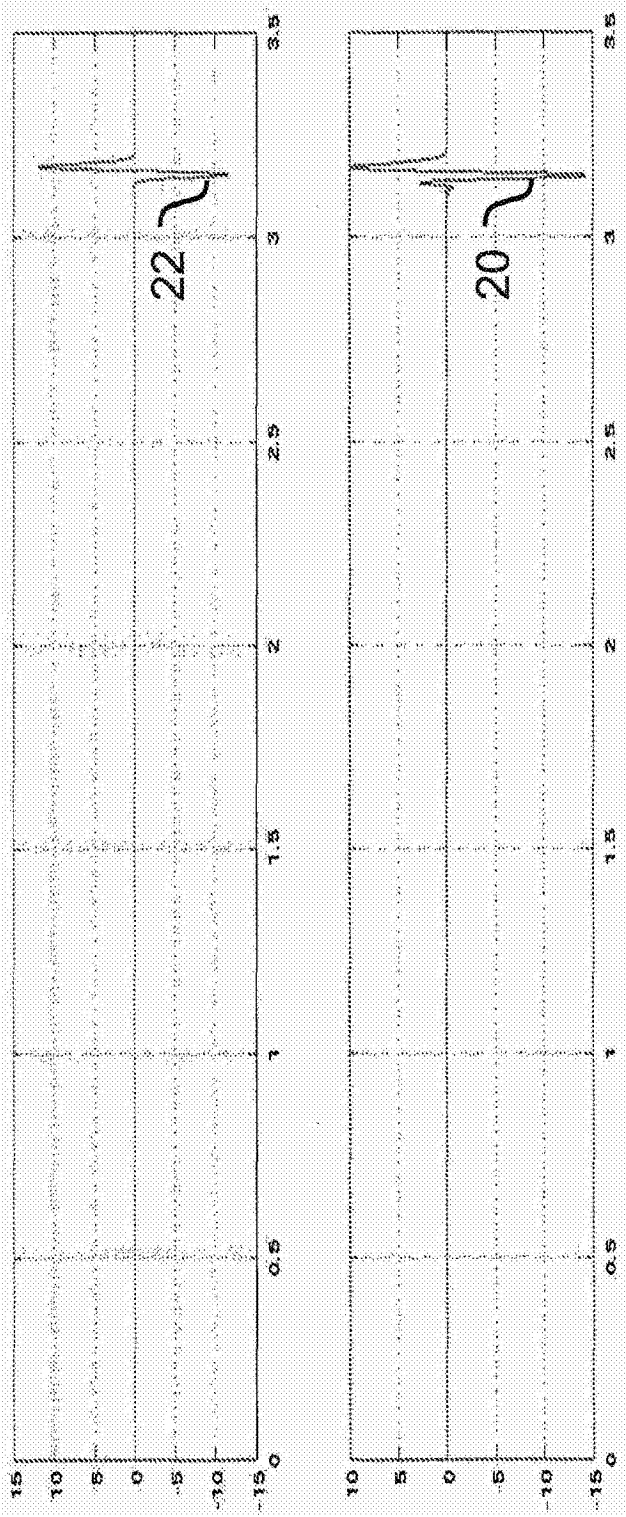


图2

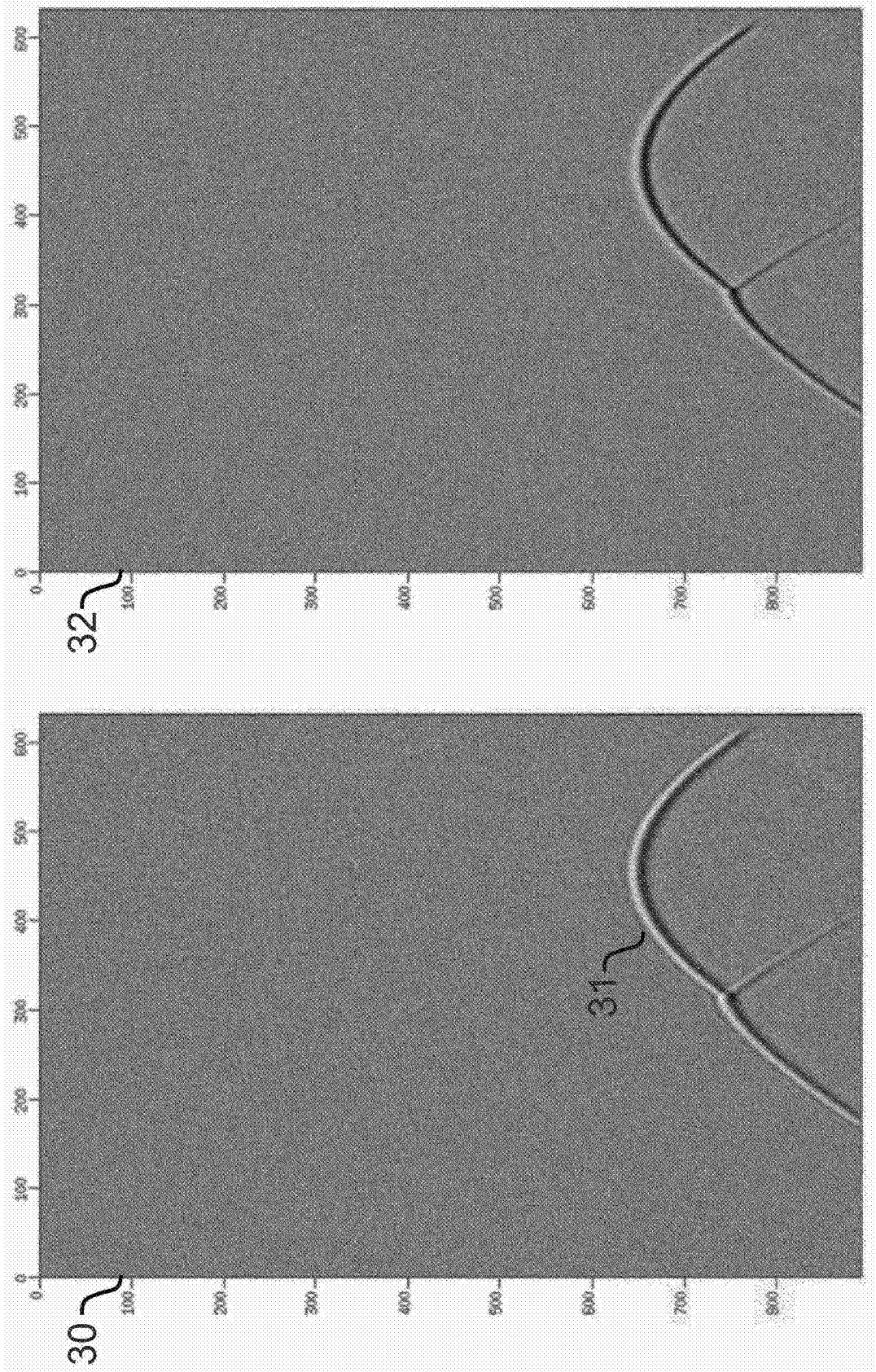


图3

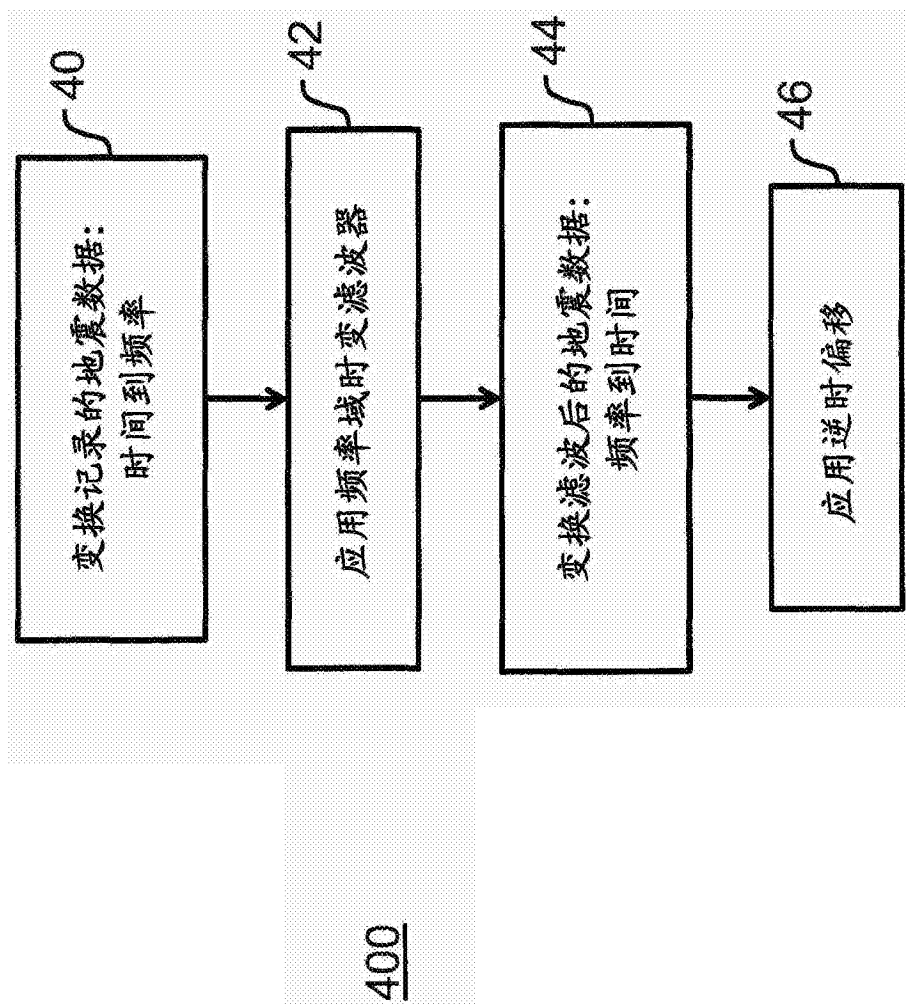


图4

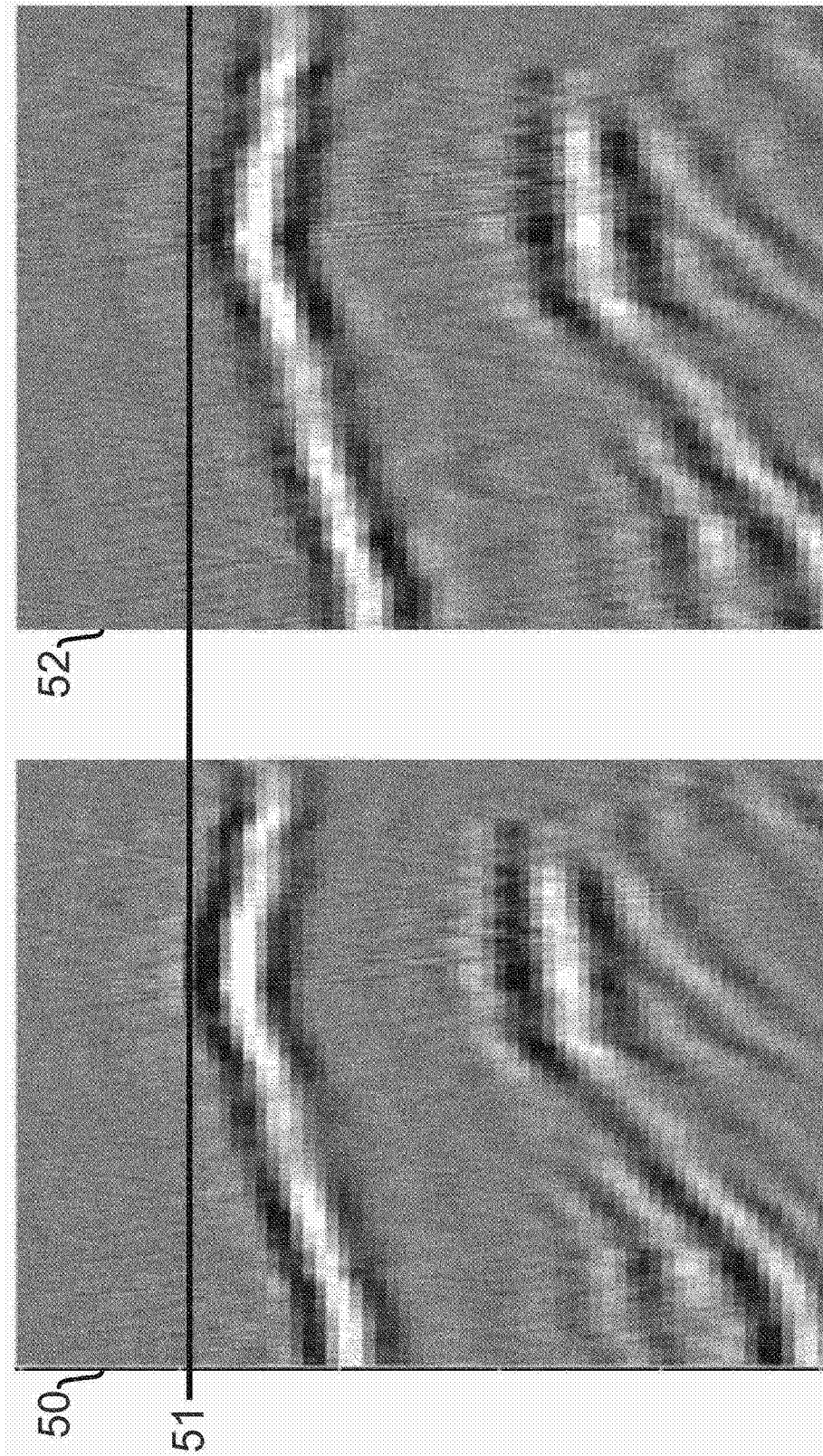


图5

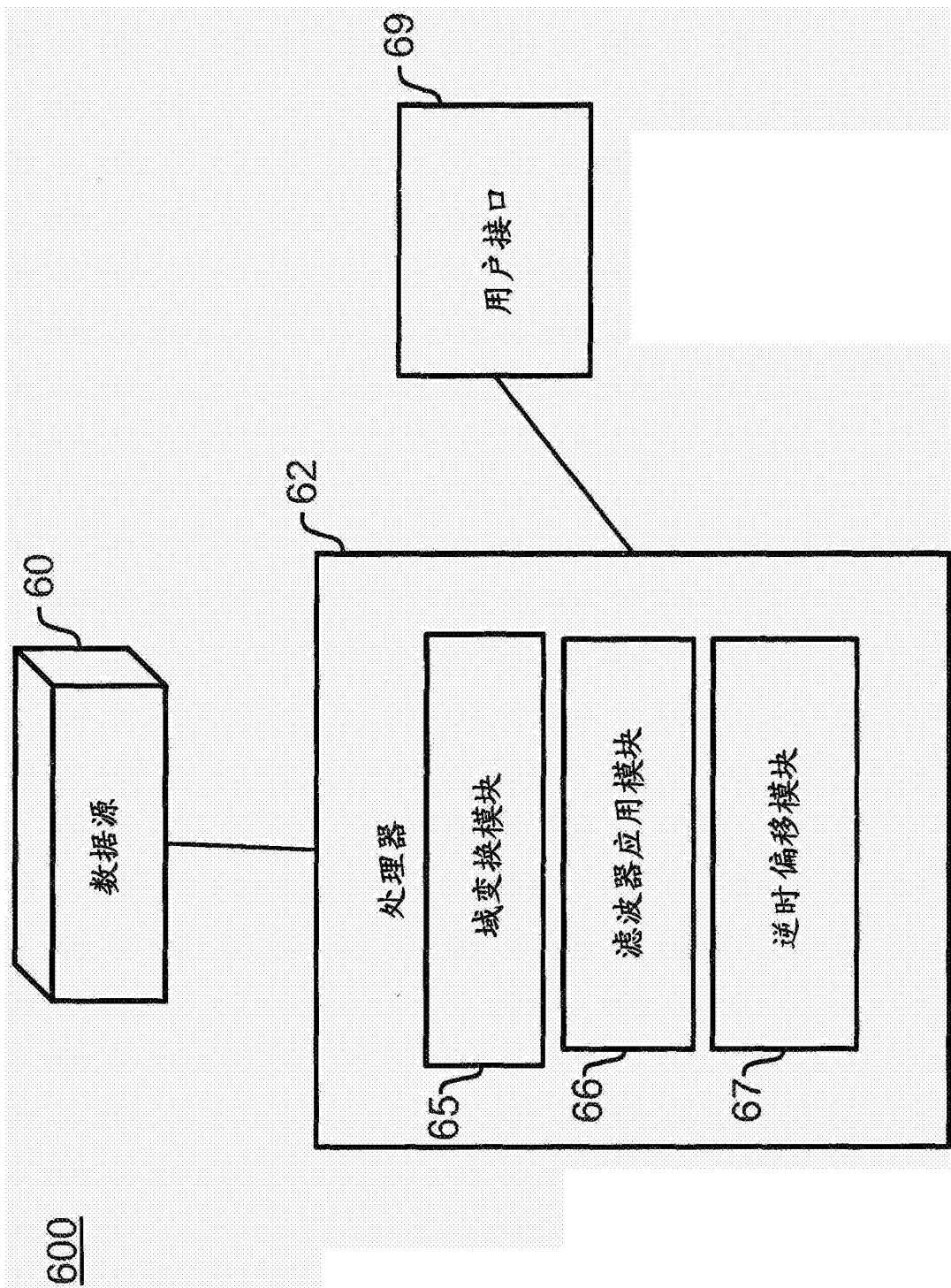


图6