

(19) 中华人民共和国国家知识产权局



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104115033 A

(43) 申请公布日 2014. 10. 22

(21) 申请号 201380009625. 8

G01V 1/26 (2006. 01)

(22) 申请日 2013. 02. 15

(30) 优先权数据

13/397, 378 2012. 02. 15 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2014. 08. 15

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2013/026254 2013. 02. 15

(87) PCT国际申请的公布数据

W02013/123276 EN 2013. 08. 22

(71) 申请人 格库技术有限公司

地址 荷兰格雷文海格

(72) 发明人 B · P · 杰弗里斯

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司

72002

代理人 陈松涛 王英

(51) Int. Cl.

G01V 1/02 (2006. 01)

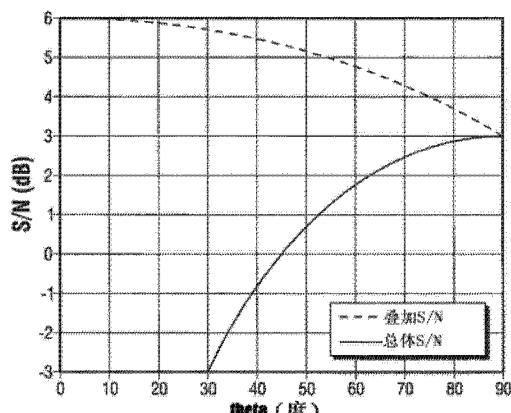
权利要求书2页 说明书10页 附图5页

(54) 发明名称

同步可控震源采集的相位调制及噪声最小化

(57) 摘要

本发明的一个实施例包括同步驱动信号，所述信号各自的相位角偏移在同步扫描的部分或（全部）持续时间内变化。本文讨论了其他的实施例。



1. 一种方法,包括:

以彼此间具有相对相位偏移的方式同步执行第一和第二地震扫描;
其中所述相位偏移在所述同步扫描过程中变化。

2. 如权利要求1所述的方法,包括:

确定第一扫描的第一相位,以及第二扫描的第二和第三相位;以及
以所述第一相位执行所述第一扫描,同时以所述第二相位同步执行所述第二扫描,并
且然后,当所述第一扫描仍然在被执行时,以所述第三相位同步执行所述第二扫描。

3. 如权利要求2所述的方法,包括从预先存在的矩阵选择所述第二和第三相位。

4. 如权利要求1所述的方法,其中,所述相位偏移在所述同步扫描过程中基于用于所
述第一和第二扫描之一的频率而变化。

5. 如权利要求4所述的方法,其中,在执行所述第一和第二扫描时,所述第一和第二扫
描各自的振幅被保持相对稳定。

6. 如权利要求1所述的方法,其中,对于所述同步扫描的至少一部分,所述相位偏移以
恒定的变化率变化。

7. 如权利要求1所述的方法,包括以彼此间具有附加的相对相位偏移的方式同步执行
第一扫描和第三地震扫描,其中所述附加的相位偏移在第一和第三扫描的同步扫描过程
中变化。

8. 如权利要求1所述的方法,包括以彼此同相位的方式同步执行第一扫描和第三地震
扫描。

9. 如权利要求1所述的方法,其中,所述第一扫描包括升频扫描和降频扫描之一,并且
所述第二扫描包括升频扫描和降频扫描之一。

10. 如权利要求1所述的方法,包括,在执行所述第一和第二扫描以产生地震数据以
后,对应于多个相位偏移值分析所述地震数据。

11. 如权利要求1所述的方法,包括:

确定分别用于所述第一和第二扫描的第一和第二地震源驱动信号:

$$\text{其中, (a) 第一驱动信号基于 } F_A = W(t) \cos\left(2\pi\left[f_0 t + \frac{1}{2}\phi t^2\right]\right),$$

$$\text{(b) 第二驱动信号基于 } F_B = W(t) \cos\left(2\pi\left[f_0 t + \frac{1}{2}\phi t^2 + \Theta[t]\right]\right), \text{ (c) } \Theta(t) \text{ 是当所述第一和}$$

第二扫描被同步执行时变化的相位角,(d) ϕ 是每一扫描各自的频率变化率, f_0 是每一扫描
各自的起始频率,并且 W 是平滑函数。

12. 如权利要求1所述的方法,包括:

确定所述第一扫描的第一相位,以及所述第二扫描的第二和第三相位;

以所述第一相位执行所述第一扫描,同时以所述第二相位同步执行所述第二扫描,并
且然后,当所述第一扫描仍然在被执行时,以所述第三相位同步执行所述第二扫描;并且

在执行所述第一和第二扫描之后,在基本上与所述第一和第二扫描相同的位置执行第
三和第四扫描,其中所述第三和第四扫描之间的相位变化不同于所述第一和第二扫描之
间的相位变化。

13. 如权利要求 1 所述的方法,包括 :

记录对所述第一和第二扫描的响应;并且

将所述响应分离成对所述第一扫描的第一响应的第一近似,以及对所述第二扫描的第二响应的第二近似。

14. 一种物品,包括存储有指令的非易失性介质,所述指令能够使基于处理器的系统:

确定第一和第二驱动信号,所述第一和第二驱动信号被配置为以彼此间具有相对相位偏移的方式驱动同步的第一和第二地震扫描,

其中所述相位偏移在所述同步扫描过程中变化。

15. 如权利要求 14 所述的物品,存储有指令,所述指令能够使所述系统:

确定第一扫描的第一相位,以及第二扫描的第二和第三相位;

其中所述驱动信号被用于以所述第一相位驱动所述第一扫描,同时以所述第二相位同步驱动所述第二扫描,并且然后,当所述第一扫描仍然在被执行时,以所述第三相位同步驱动所述第二扫描。

16. 如权利要求 14 所述的物品,其中所述相位偏移在所述同步扫描过程中基于用于所述第一和第二扫描之一的频率而变化。

17. 如权利要求 14 所述的物品,其中对于所述同步扫描的至少一部分,所述相位偏移以恒定的变化率变化。

18. 如权利要求 14 所述的物品,其中所述驱动信号被用于以彼此同相位的方式同步驱动第一扫描和第三地震扫描。

19. 一种系统,包括:

存储器;以及

处理器,其耦合到所述存储器,以确定第一和第二驱动信号,所述第一和第二驱动信号被配置为以彼此间具有相对相位偏移的方式驱动同步的第一和第二地震扫描;

其中所述相位偏移在所述同步扫描过程中变化。

20. 如权利要求 19 所述的系统,其中所述处理器用于:

确定第一扫描的第一相位,以及第二扫描的第二和第三相位;并且

其中所述驱动信号用于以所述第一相位驱动所述第一扫描,同时以所述第二相位同步驱动所述第二扫描,并且然后,当所述第一扫描仍然在被执行时,以所述第三相位同步驱动所述第二扫描。

21. 如权利要求 19 所述的系统,其中所述相位偏移在所述同步扫描过程中基于用于所述第一和第二扫描之一的频率而变化。

22. 如权利要求 19 所述的系统,其中对于所述同步扫描的至少一部分,所述相位偏移以恒定的变化率变化。

同步可控震源采集的相位调制及噪声最小化

背景技术

[0001] 在使用同步震动技术的地震勘探中,采用一系列地震能量源(例如可控震源)以向地下传送地震信号。部分这些信号从地下地层间的交界面被反射和/或在地层内部折射返回地表,在此它们通过一个或多个接收器被探测到。信号从一个特定的可控震源传播到达一个特定的接收器所需要的时间,给出了信号在所述可控震源和所述接收器之间行程长度的指标,由此可以推测得到地质构造结构。

[0002] 对于同步震动技术,可控震源从多个源位置一起同时将能量赋予到地球内部。从而,每一个接收器探测被整个系列的可控震源发射出的经折射和反射的能量。(顺便提及,“同步”扫描必须包括各次扫描间的重叠。所述扫描可以是或可以不是同时开始和/或结束,只要各次扫描之间有部分重叠即可。)各接收器记录的数据必须然后被处理,以便可以将每个单独可控震源产生的信号分离出来。

[0003] 所述分离可以如此完成,即,每个可控震源执行多次“扫描”或“发射”,其中由各可控震源发射的各信号间的相对相位在各可控震源之间和多次发射之间变化(尽管所述相对相位在各次扫描的持续时间内保持不变)。这可以通过两个可控震源同时操作两次的例子示出。如果它们在第一次扫描时相互同相的操作,而在第二次扫描的持续时间内 180° 异相,所述接收器将会记录到两个信号(即,在第二次扫描的持续时间内,两个可控震源驱动信号间的“相对相位角”是 180° 异相)。(顺便提及,所有四次所述扫描可以通过“驱动信号”或“控制信号”在相同幅度下使用扫频被驱动,所述扫频可能具有锥形端,因为所述幅度必须在开始时上升而在结束时下降。所述控制信号可以以低频开始并在高频结束,并且所述频率可以相对于时间线性增加。)合成的记录信号可以被加在一起以确定从第一个可控震源到达的信号,或者被去除以确定从第二个可控震源到达的信号。

[0004] 虽然信号分离在近年来已经改善了,然而噪声最小化和信号分离仍然可以被改进,以更好地定位感兴趣的地下区域。

附图说明

[0005] 从所附的权利要求、下文一个或多个示例性实施例的详细描述、以及对应的附图,本发明实施例的特征和优势将变得明显。其中

[0006] 图1包括对于 2×2 震动源矩阵相对于相位的叠加和总体信噪比(S/N)。

[0007] 图2包括对于 2×2 矩阵作为相位的函数的最大和最小噪声。

[0008] 图3包括在 2×2 矩阵中对于三个相位值的噪声频谱。

[0009] 图4包括对于目标函数相对于截止频率的最佳相位。

[0010] 图5包括对于目标函数相对于截止频率的矩阵相位。

[0011] 图6包括对于不同组的最优角度(3×3 矩阵)的噪声空间频谱,具有目标函数E2。

[0012] 图7包括对于不同组的最优角度(3×3 矩阵)的噪声空间频谱,具有目标函数E1。

[0013] 图8包括利用本发明的不同实施例进行操作的系统。

具体实施方式

[0014] 在下面的描述中,提出许多具体细节,但是即使没有这些具体细节也可实施本发明的实施例。没有详细示出公知的电路、结构和技术,以免影响对本描述的理解。“一个实施例”、“多个实施例”等表示这样描述的实施例可包括特定特征、结构或特性,但是并不一定每一个实施例都包括所述特定特征、结构或特性。一些实施例可具有部分、全部或者没有对于其它实施例所述的特征。“第一”、“第二”、“第三”等描述共同对象,并且表示涉及相似对象的不同实例。这种形容词不是暗示这样描述的对象必须按照给定顺序,无论是时间、空间上、按照等级还是按照任何其它方式。“连接”可表示元件相互进行直接物理或电接触,以及“耦合”可表示元件相互协作或者交互,但是它们可以或者可以不进行直接物理或电接触。另外,虽然相似或相同标号可在不同附图中用于标明相同或相似部件,但是这样做并不表示包括相似或相同标号的所有附图构成单个或者相同实施例。

[0015] 如上文提及的,在传统的同步可控震源采集中,不同可控震源控制信号间的相对相位角在整个扫描持续时间内保持不变。然而,本发明的一个实施例包括同步驱动信号,其相对相位角补偿值在同步扫描的部分(或持续时间)内变化。

[0016] 例如,对于传统的同步可控震源采集,多个可控震源通过控制机构扫描过一系列频率,所述控制机构力图保持不同可控震源间恒定的相对相位。考虑两个可控震源 V₁ 和 V₂,其具有企图维持地面力 F₁ 和 F₂ 的控制器。两个地面力的傅立叶变换是 f₁ 和 f₂。根据传统方法,f₁ 和 f₂ 的比率随频率是恒定的。(顺便提及,虽然控制量不必然是地面力,控制参数的比率也随频率恒定。)然而,在一个实施例中,多个可控震源的所述控制参数的相对相位(即“相位偏移”)被控制为随频率变化。例如,用相位驱动两个可控震源,所述相位的控制参数(例如,地面力)遵循下面的设计轨迹:

$$[0017] F_A = W(t) \cos\left(2\pi\left[f_0 t + \frac{1}{2}\phi t^2\right]\right)$$

$$[0018] F_B = W(t) \cos\left(2\pi\left[f_0 t + \frac{1}{2}\phi t^2\right] + \Theta[t]\right)$$

[0019] 其中可控震源 1 的第一次发射遵循 F_A,第二次发射遵循 F_B,而可控震源 2 的第一次发射遵循 F_B,第二次发射遵循 F_A,其中 ϕ 是频率变化率, f₀ 是起始频率, W 是平滑函数(其在很短时间内从 0 升至最大值,在最大值保持一段时间,然后在很短时间内降至 0),并且 Θ 是相位角补偿。根据传统的方法, Θ 是常数,然而在本发明的一个实施例中 Θ 作为时间的函数而变化。在一个实施例中, $\Theta(t)$ 在扫描开始时接近于 0,扫描中期升至 $\pi/2$,并且保持在 $\pi/2$ 直到扫描结束。因此,所述扫描的控制参数(例如,控制或驱动信号)的相对相位角 $\Theta(t)$,在两次或更多次同步扫描的全部或部分过程中变化。这些扫描不必同时开始和/或结束,但是在在一个实施例中是同步的(即,重叠)。

[0020] 尽管在上面的例子中,有两个可控震源在恒定的频率变化率下执行升频扫描(频率随时间增加),实施例可以被用于任何数量的可控震源,可变频率变化率,以及升频扫描或降频扫描(频率随时间降低)。而且,尽管在上面的例子中,所述可控震源在陆地上且通过地震检波器接收所述信号,然而所述可控震源可以被定位于其他的环境中,例如海底或悬浮于水中。来自可控震源的反射波或折射波可以通过其他方法来接收,例如,加速度仪或

水中检波器。进一步地，同步扫描可以通过不同的扫描被执行，例如滑动扫描测量，高保真可控震源 (HFVS) 技术，等等。

[0021] 在下文中，展示了本发明的不同实施例的更多的细节。

[0022] 相位的作用及相位调制

[0023] 在同步可控震源采集中，多个可控震源 (N) 可以固定地扫描多次。所述扫描可以在所有的方面完全相同（至少在设计上），除了一个方面，也即，可控震源起始相位。在频域中，于接收器处测量到的信号与来自单一可控震源点 (VPs) 的传递函数之间的关系，可以由矩阵方程 $G = SI$ 的形式描述，其中 G 是接收器信号（对于每一个接收器是一 $M \times 1$ 向量）， S 是一个 $(M \times N)$ 矩阵， I 是单一脉冲响应的 $(N \times 1)$ 向量。由于所有的扫描具有相同的振幅但是不同的相位， S 矩阵的元素可以规范化为振幅为 1，从而仅以相位为特征。在其其他的实施例中，所述振幅不需要相同。

[0024] 在同步可控震源中的一些战略决策围绕着相位的“最优”选择。决定使用哪个相位的准则可以集中于矩阵求逆后对于噪声（例如，产生自可控震源谐波的环境噪声或相干噪声）的影响。

[0025] 单独考虑环境噪声的影响，并且假设来自一次发射的噪声与下一次发射的噪声间不相关；最小化来自分开考虑的每一个 VP 的估计脉冲响应的总体噪声，等价于选择一个所有奇异值具有相同振幅的矩阵 S 。然而，如果不是分开考虑来自每一 VP 的总体噪声，而是考虑经进一步过滤（例如，对来自多个 VPs 的数据求平均，应用空间低通滤波，等）后的噪声，则其他的相位可能是最优的，并且选择一个随频率变化的相位矩阵（即，不同可控震源的相对相位依赖于频率）可能是有利的。在同步激发过程中，最优化还可以考虑来自随后进行的发射的谐波噪声。

[0026] 因此，在同步采集中，改变各次扫描间的相对相位可能是有利的，即使来自单独的 VPs 的记录随后被叠加以形成一组。可能来自利于改进的炮点静力学以及震源特征变校正的数据改进，可以比对涉及随机环境噪声的信噪比的任何减少更为重要。

[0027] 同样，可控震源相位最优化（即，可变相对相位角）与串接同步激发的联合使用，可以产生更好的空间采样、单一炮点静力学和特征调整，以及在同一时间内每一 VP 相对于传统的成组激发总体上更好的数据质量。

[0028] 相位及信噪比水平

[0029] 虽然下面（的方法）可以对于任何尺寸的矩阵 S 进行解析分析，然而为了进行说明的目的，下面的例子涉及一个 2×2 震动源矩阵 S （2 个可控震源，激发两次），其表达如下：

[0030]

$$S = \begin{pmatrix} 1 & e^{i(\Theta+\varphi)} \\ e^{i(\Theta-\varphi)} & 1 \end{pmatrix}$$

[0031] 对于每一个可控震源和每一次发射，在一个实施例中实际执行的扫描是 S 矩阵适当分量的实部乘以同一个扫频信号。因此，如果来自第一可控震源的第一次发射是方程 1 中的 F_A 给出的形式，则第二可控震源的第一次发射可以是：

[0032]

$$F_{21} = W(t) \left[\cos(\Theta + \varphi) \cos\left(2\pi \left[f_0 t + \frac{1}{2} \phi t^2 \right]\right) - \sin(\Theta + \varphi) \sin\left(2\pi \left[f_0 t + \frac{1}{2} \phi t^2 \right]\right) \right]$$

[0033] 而第一可控震源的第二次发射可以是：

[0034]

$$F_{12} = W(t) \left[\cos(\Theta - \varphi) \cos\left(2\pi \left[f_0 t + \frac{1}{2} \phi t^2 \right]\right) - \sin(\Theta - \varphi) \sin\left(2\pi \left[f_0 t + \frac{1}{2} \phi t^2 \right]\right) \right]$$

[0035] 每一行 (row) 的相位可以独立的旋转。(这包括一个假定, 即所述可控震源相互独立并且重复进行激发。两个可控震源不一定 100% 相同)。将此矩阵求逆得到：

[0036]

$$S^{-1} = \frac{1}{1 - e^{(2i\Theta)}} \begin{pmatrix} 1 & -e^{i(\Theta+\varphi)} \\ -e^{i(\Theta-\varphi)} & 1 \end{pmatrix}$$

[0037] 如果第一次发射的噪声是 n_1 , 第二次发射的噪声是 n_2 , 则显示于分离信号上的噪声 (g_1 和 g_2) 将分别是：

[0038]

$$g_1 = \frac{1}{1 - e^{(2i\Theta)}} (n_1 - e^{-i(\Theta+\varphi)} n_2)$$

[0039]

$$g_2 = \frac{1}{1 - e^{(2i\Theta)}} (n_2 - e^{-i(\Theta-\varphi)} n_1)$$

[0040] 假设每一个记录上的噪声是独立的, 并且具有相同的期望值, 则所述总体噪声功率如下给出：

$$[0041] n_T^2 = |g_1|^2 + |g_2|^2 = \frac{2}{1 - \cos(2\Theta)} \langle n^2 \rangle$$

[0042] 然而, 如果两个记录首先被叠加, 则所述噪音如下给出：

[0043]

$$n_s^2 = |g_1 + g_2|^2 = \frac{4(1 - \cos(\Theta) \cos(\varphi))}{1 - \cos(2\Theta)} \langle n^2 \rangle$$

[0044] 因此, 如图 1 所示, 对于 Θ 值小于 $\pi/2$ (90 度), 叠加功率的最低值在 $\Theta = 0$ 时得到, 其对于总体功率没有影响。因此, 不失一般性, 噪声可以相对于角度 Θ 作图。图 1 参考能从一个可控震源以相同扫描从第一 VP 激发, 接着从一个可控震源以相同扫描从第二 VP 激发得到的信噪比水平, 示出了叠加信噪比的关系, 以及总体信噪比的关系。

[0045] 如图 1 中所示, 对于总体噪声选择的最优角度可以小于叠加噪声的最优角度。当 Θ 从 90 度减少至 0 度, 所述叠加 S/N 改善了 3dB, 接近了成组激发 (即, 两个可控震源同相的激发两次) 的期望水平。改变角度对于总体噪声的影响更加夸张, 不同于接近有限值, 由于所述矩阵成为奇异矩阵, S/N 到达负无穷大。

[0046] 如果, 对于不同的频率, 对于叠加信噪比与总体信噪比的相对重要性有不同, 则在

一个实施例中, 随频率改变角度 Θ 是有利的。总体上, 如果两个可控震源物理上紧挨, 在频率范围的低端, 叠加信噪比可能更加重要, 而在频率范围的高端, 总体信噪比可能更加重要。

[0047] 空间噪声滤波

[0048] 图 1 的结果不依赖于震动源的空间分布, 并且图示出的不同震动源的贡献可以被单独分析, 且可以在形成组的总和前进行校正, 而不会对随机噪声的抑制产生严重影响。

[0049] 同步激发的一个应用是改善空间发射采样密度, 从而单独震动源的贡献不应该被简单的加在一起形成一组。而一些形式的空间滤波可以被用于共检波点域 (common-receiver domain) 中的数据。

[0050] 正如不同的震动源矩阵产生不同的叠加和总体 S/N 比, 当单独的震动源具有已知的空间分布时, 不同的震动源矩阵同样产生不同的空间噪声谱。例如, 考虑震动源沿一条线激发, 且震动源间具有固定的空间分隔的情况。使用如上参数化的 2×2 矩阵 S , 每个轨迹的噪声被如下给出:

[0051]

$$g_1 = \frac{n_1 - e^{-i(\Theta+\varphi)} n_2}{(1 - e^{2i\Theta})}$$

[0052]

$$g_2 = \frac{n_2 - e^{-i(\Theta-\varphi)} n_1}{(1 - e^{2i\Theta})}$$

[0053] 考虑噪声 (空间地) 作为不相关的标量, 并且假设所述 VPs 通过距离 d 被分隔开, 则对此进行空间傅里叶变换, 得到:

[0054] $\tilde{g}(k) = \frac{1}{(1 - e^{2i\Theta})} ([1 - e^{-i(\Theta-\varphi)} e^{ikd}] \tilde{n}_1 + [e^{ikd} - e^{-i(\Theta+\varphi)}] \tilde{n}_2)$, 从而, 所述空间功率谱是

$$|\tilde{g}(k)|^2 = \frac{2(1 - \cos(\Theta) \cos(\phi - kd))}{(1 - \cos(2\Theta))} |\tilde{n}|^2$$

[0055] 图 2 示出了对于 $(\varphi - kd) = 2n\pi$, $(\varphi - kd) = (2n+1)\pi$ (在右侧接近 y 轴上 -6dB 的曲线是前者, 在左侧接近 y 轴上 -6dB 的曲线是后者), 作为 Θ 的函数且以 dB 为单位的噪声,

其由总体噪声归一化。当 $\Theta = \pi/2$, 所述震动源矩阵是 $S = \begin{bmatrix} 1 & ie^{i\varphi} \\ ie^{-i\varphi} & 1 \end{bmatrix}$, 且所述噪声独立

于空间频率。对于 Θ 的其他值, 有一个最小值噪声的波数和一个最大值噪声的波数。当 Θ 离开 $\pi/2$, 最大值和最小值间的差距增大。

[0056] 一种情况是人们希望在低空间波数改善 S/N, 此情况下主反射信号可以被定位于空间频域中。在处理时, 较高的空间波数可以被滤出 (例如在低频), 所以如果在此空间频率上有随机噪声, 所述噪声可以随后从处理链中被去除。

[0057] 假设没有优选方向 (所以在 $k = 0$ 时, 噪声相对于为 0 的空间波数的对称曲线是可取的), 则 ϕ 可以被设为等于 0。

[0058] 图 3 示出了对于三个 Θ 值 ($\pi/6$, $\pi/3$ 和 $\pi/2$), 噪声作为空间频率的函数。对

于最大的角度,所述噪声独立于空间频率,而对于单个可控震源激发,噪声水平下降了 3dB。对于中间角度,所述噪声在原始噪声水平(在奈奎斯特空间波数)达到峰值,且在 0 波数时下降 4.75dB。而对于最小的角度,所述 0 波数噪声在 0 波数时下降了 5.7dB(接近于可能的最小值 6),但在奈奎斯特波数时上升了相似的量。

[0059] 如果所获得的数据所经过的处理链包括依赖于频率的空间滤波(例如 f_k 滤波),则相对相位角 Θ 在低频时较低,在包括完整的空间带宽的频率时升至 $\pi/2$ 是有利的。

[0060] 这个例子针对 2 个可控震源,且仅考虑了在一个方向上的空间频率,纯粹是为了描述清楚的目的。对于多于 2 个的可控震源,可控震源间的相对相位角在低频时比在高频时小可能是有利的。对于设置于二维空间形式中的多于 2 个的可控震源,角度可以被选择用于改善在低空间频率时在所有的空间频率方向上的噪声抑制。

[0061] 尽管简单的选择矩阵相位角,且其能够给出可接受的在空间频率上的噪声的变化是可能的,然而在一些实施例中,具有一个更客观的选择角度的过程可能是有利的。这可以通过数学优化来完成。

[0062] 使用空间噪声功率谱,对于给定的目标函数,人们可以找到具有特定尺寸的矩阵来最小化此函数。如果所述目标函数相对于 k 对称,其暗示了如果列的顺序被反向,则 S 是不变的(即,如果矩阵的一行是 $(a, b \dots c)$,则 M 同样还有一行形式为 $(c \dots b, a)$)。

[0063] 对于一些 K 值,目标函数的一个例子是用于在空间波数从 $-K$ 至 K 的范围内最小化噪声。为了在所有的波数上提供一些稳定性,其可以通过加上一个依赖于最大噪声的项来调节,从而例如:

$$[0064] E1 = \frac{1}{2K} \int_{-K}^K |\tilde{N}|^2 dk$$

$$[0065] E2 = \frac{1}{2K} \int_{-K}^K |\tilde{N}|^2 dk + \frac{1}{10} \max(|\tilde{N}|^2)$$

[0066] 对于上面考虑的 2 个可控震源的情况,图 4 示出了以 $E1$ 和 $E2$ 为目标函数时,作为空间频率截止值 K 的函数的最佳角度。

[0067] 相同的方法可以被用于多个可控震源的情况以及不同的形式。再一次,尽管上面的公式是用于一个方向上的空间频率,类似的目标函数可以被导出,在其中,在 $E1$ 和 $E2$ 表达式中的一维空间频率积分由在空间频率平面的一个合适的域上的二维积分替换。

[0068] 在另一个例子中,具有三个可控震源,每一个激励三次,其两两之间等距的被置于一条线上。有 3×3 的震动源矩阵 S ,其具有待选的三个角度参数,标记为 α , β , 和 γ 。

$$[0069] \text{ang}(S) = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & \beta \\ \beta & \alpha & 0 \\ 0 & \gamma & 0 \end{bmatrix}$$

[0070] 图 5 示出了对于 3×3 矩阵的相同优化结果、(图中的)线(分别)表示目标函数 $E1$ 和 $E2$ 及角度 α , β , 和 γ 。图 6 示出了根据函数 $E2$,对于最优角度值的噪声的空间波数变化,对于已经奈奎斯特空间频率归一化的 6 个 K 值,也即 $0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 0.9$ 和 1 。在 $K = 0$ 时具有最低噪声的曲线对应于 $K = 0.1$ 倍的奈奎斯特,在 $K = 0$ 时具有次最低值

的曲线对应于 $K = 0.25$ 倍的奈奎斯特，以此类推。图 7 示出了对于目标函数 E1 的同样的曲线（这些曲线的顺序相同）。因此，在目标函数中引入最大项仅在最低波数时（轻微地）降低性能，但是对高波数显著地提升性能。

[0071] 可能存在这样的情况，其中所述信号具有非对称的空间频谱分布。例如，如果激励线延伸至地震检波器列的一侧，所述信号可能被全部包含于所述空间频谱的一侧。在此情况下，要对其进行最优化的空间频谱范围将不是关于原点对称，或关于震动源的面积组合不等效，所述二维空间频域可能不以原点为中心。随着震动源的位置相对于接收器发生变化，相对角度应该改变的空间频率范围会发生变化，并且因此，随着震动源沿一条线移动，所述相对相位同样会变化。

[0072] 为了将来自于最优化的角度转化为扫描变化，例如考虑一种情况，其中有助于反射成像的压缩波能量的最低的波数是 $1/2000\text{s/m}$ 。如果在组内可控震源的间距是 25m ，则所述空间采样对于低于 40Hz 的频率并不模糊。当扫描参数是 $8\text{--}80\text{Hz}$ ，扫描范围的底部包含数据的最高空间波数是 $1/5$ 奈奎斯特。在此情况下，可以想象，使用以最小化所述空间噪声能量开始的具有少于 $1/5$ 奈奎斯特振幅的矩阵相位，并且随着频率上升，平滑地改变相位，以使所述信号带中的空间噪声能量被最小化，直至频率升高 40Hz ，所述噪声在整空间频谱内是平滑的。因此，例如，对于三个可控震源，原始角度 α ， β ，和 γ 可以选自图 5，并且然后随着频率的升高，可以遵循接近例如 $E2 : \alpha$ ， $E2 : \beta$ 及 $E2 : \gamma$ 曲线的轨迹。尽管非常缓慢地改变相位（如在一些实施例中的做法）可以对扫描频谱几乎没有影响，快速改变以及相位的快速改变率（如在一些实施例中的做法）可能会增加扫描频谱的振幅。

[0073] 虽然本部分的最优化已经使用了特殊的傅立叶域方法，然而可以使用其他的目标函数，包括傅立叶和非傅立叶域的。

[0074] 使用同步方法以允许单一可控震源采集的一个问题是需要额外的时间。所述额外的时间来自两个方向。首先，当使用同步技术时，为补偿对环境噪声的较低抑制，需要额外扫描时间。其次，在多次扫描之间需要多重监听时间。

[0075] 通过跟随所述扫描而不等待各次发射之间的所述监听时间，总的扫描序列可被充分地缩短。然而，这可能以来自一次扫描的谐波能量显示为在前扫描的噪声为代价。扫描定相方案可以通过相位叠加来消除 / 减少显示于在前扫描上的谐波噪声（滑动噪声），以及显示于同次扫描上的谐波噪声（谐波鬼线（ghosting）），同时还提供一个具有相等奇异值的矩阵。然而这在环境噪声抑制方面会有某些代价，因为它涉及使 $(N+1)$ 次扫描的合成序列与实际执行的 N 次扫描相关联，从而环境噪声增加了大约一个系数 $1+1/N$ （如果大部分环境噪声是不相关的由震动源产生的噪声（例如来自震动源发动机），则所述增加不会很大，以至于所述接收器不太可能具有来自环境噪声的信噪比问题）

[0076] 在前述计算的相同精神内，人们可以寻找不具有相等奇异值的震动源相位矩阵，但具有很好的叠加噪声抑制，足够的单独震源点分离（总体噪声），并且同样抑制谐波。相比于使用 $(N+1)$ 扫描的序列，如果可以忍受正常的谐波鬼线，则可以寻找滑动噪声的减少。

[0077] 所述问题的维度决定了，对于 M 个可控震源和 H 个谐波，如果希望达到谐波噪声的实质性减少，则需要扫描至少 $(M+H)$ 次。

[0078] 选择准确的价值函数（cost function），然后找到最小值（涉及标准尺寸矩阵）可能是困难的。更复杂的非线性约束优化方法可以简化问题的描述（例如，设置一个总体噪

声边界,最小化叠加和谐波噪声)。例如,对于具有如下相位矩阵(7次扫描)的两个可控震源:

[0079] 可控震源1:-8.5,-153.3,161.3,-157.2,-41.3,73.8,-173.5

[0080] 可控震源2:-44.3,-141.8,117.8,-145.0,-35.5,95.7,-18.3实现了对第2、第3、第4和第5谐波分别抑制13.6,20.0,4.2及26dB,叠加噪声比同相扫描的噪声差0.75dB,总体噪声比具有相同奇异值的矩阵的噪声差2.3dB。相比于对总体谐波噪声进行抑制,可以更注重减少叠加记录中谐波噪声,这允许使用减少数量的扫描来实现抑制。这些是固定角度,不随频率改变,与上面描述的类似的方法可以被用于寻找基于频率的一组角度,其用于在低频时以低的波数同时抑制环境噪声和谐波噪声,且在高频时,提供良好的总体噪声性能并且抑制总体谐波噪声。由于所述谐波噪声产生于不同的频率下,获取良好的基于频率的角度是一个复杂的问题。例如,在72Hz时使用的角度会抑制由36Hz的角度产生的第2谐波噪声,来自24Hz的角度的第3谐波噪声,来自12Hz的角度的第4谐波噪声,等等。仍然,在一个实施例中,当所述扫描的数量是M+H+1或更大时,可以在总体谐波抑制方面达到极好的性能。然而,对于串接扫描,还有其他的因素同样能影响优选的扫描数量和定相。

[0081] 对于全振幅固定总体扫描时间,增加扫描的次数会增加执行扫描的总时间,因为每一次都扫描需要斜升和斜降时间。在一个实施例中,扫描的最大次数可以比总扫描时间与监听时间的比值更小;否则,可能需要更多的时间。就滑动噪声而言,于其上呈现滑动噪声的地震记录(以时间频率平面观察)的部分反比于扫描长度,并且因此对于一个固定的总扫描时间,其将正比于扫描次数。因此在一个实施例中,在谐波衰减中的任何性能提升不应该仅在于平衡将要呈现的额外谐波噪声。与谐波噪声一样,在其他的方向,如果所述扫描相互开始得太快,由于从前次发射存留的混响地滚波将会增加噪声。此外,短扫描倾向于具有更糟糕的锁相,因此由与理论扫描模式的误差所引起的额外滑动噪声将会增加。由于所述误差随谐波数线性增加,所述噪声对于高次谐波将会最快的增加。然而,对于将总扫描时间分解成更多次扫描,非线性噪声抑制技术(例如分集反演(diversity inversion))减少了对于脉动噪声的敏感性。

[0082] 上面的一些讨论涉及抑制来自后续扫描的谐波噪声。在一些情况下,来自同次扫描的谐波噪声(谐波鬼线噪声)可能是有问题的(例如,对于串接扫描,在各次扫描间具有监听时间间隙的正常采集过程中,等等)。一个类似的最优化方案可以被用于这些情况,在最优化过程中或者仅包括鬼线噪声抑制,或者同时包括鬼线以及滑动噪声抑制。

[0083] 因此,通过选择(或扫过)合适的相位角,可以获取同步数据,并且在重组分组数据前对静力学以及震源特征变化进行校正,对于类似的激励时长,相比于传统的分组数据,对环境噪声的抑制具有易管理的效应。使用频变相位角及同步激励,可以在低空间频率下提供与从分组数据获得的同样好(或至少向着改进的方向)的环境噪声抑制(同时,通过改进的空间采样还能够抑制地滚波)。最后,在最优化中包括谐波滑动噪声,开辟了将采集时间减少至几乎与传统激励的时间相同的前景(但是具有在原始数据中的点源采集及易管理的滑动噪声的优势)。

[0084] 如在本文中指出的,一个实施例包括方法,所述方法包括在彼此间具有相对相位偏移(例如, $\Theta(t)$)的情况下同步执行第一和第二地震扫描。所述相位偏移在所述同步扫描过程中变化。所述相位偏移在全部或部分描述过程中可以平滑的增大或减小。然而,所

述相位偏移可以具有变化的增大率或减小率。有些变化可以是突变的（即，从一个变化率直接跳至明显不同的变化率）。所述相位变化可以发生于包括两次扫描间彼此有重叠（短时间或长时间内）的具有或不具有同步起始和 / 或结束时间的很多技术。基于地球物理学、时序或其他变量，所述相位偏移可以选自一个列表或矩阵。在扫描前用户可能无法预知理想的相位偏移。然而，所述用户可以（扫描结束且处理已经开始后）在不同的相位偏移下（这能够实现，由于变化的相位偏移已被嵌入扫描过程）分析所述数据，以便事后确定最佳相位偏移数据。所述相位偏移可以基于频率而变化。例如，相位偏移可以在扫描的低频部分（或高频部分）缓慢变化。所述扫描的振幅全部可以是常数，或者其中之一或全部可以在扫描过程中变化。所述方法不限于两次扫描，而是可以包括例如三次或更多次的扫描。所述第三或另外的扫描在所述扫描重叠区域的全部或部分上，可以与第一次扫描或第二次扫描同相，或者既不与第一次也不与第二次扫描同相。

[0085] 在此所描述的实施例实施随频率变化的相对相位，以在所述数据被分离后，实现在低空间频率下增强的噪声抑制。同样，在此所描述的实施例实施随频率变化的相对相位，以实现在低空间频率下增强的噪声抑制以及谐波噪声衰减。

[0086] 实施例可以在许多不同的系统类型中被实施。现在参考图8，其示出了根据本发明的一个实施例的系统的方框图。多处理器系统 500 是一个点对点互连系统，并且包括通过点对点互连 550 耦合的第一处理器 570 以及第二处理器 580。每一个处理器 570 和 580 可以是多核处理器。术语“处理器”可以指任何处理来自寄存器和 / 或存储器的电子数据，以将所述电子数据转换成其他的可以被存储于寄存器和 / 或存储器中的电子数据的设备或设备的一部分。第一处理器 570 可以包括存储控制集线器 (MCH) 及点对点 (P-P) 接口。类似地，第二处理器 580 可以包括 MCH 和 P-P 接口。所述 MCH 可以将所述处理器耦接至各自的存储器，即存储器 532 和存储器 534，所述各自的存储器可以是主存储器的一部分（例如，动态随机存取存储器 (DRAM)），且本地连接于各自的处理器。第一处理器 570 及第二处理器 580 可以分别通过 P-P 互连耦合到芯片组 590。芯片组 590 可以包括 P-P 接口。此外，芯片组 590 可以通过接口被耦合到第一总线 516。各种输入 / 输出 (I/O) 设备 514，连同将第一总线 516 耦合到第二总线 520 的总线桥 518 可以被耦合到第一总线 516。各种设备可以被耦合到第二总线 520，例如包括，键盘 / 鼠标 522、通信设备 526，以及数据存储单元 528（例如，磁盘驱动器或其他大容量存储设备，所述设备在一个实施例中可以包括代码 530）。进一步，音频 I/O 524 可以被耦合到第二总线 520。

[0087] 实施例可以通过代码实施，并且可以被存储于非易失性存储介质上，所述存储介质具有存储于其上的指令，此指令可以被用于对系统编程以执行所述指令。所述存储介质可以包括，但不限于，任何类型的磁盘，包括软盘，光盘，光盘，固态硬盘 (SSD)，光盘只读存储器 (CD-ROM)，可读写光盘 (CD-RW)，以及磁光盘，例如只读存储器 (ROM) 的半导体装置，例如动态随机存取存储器 (DRAM) 及静态随机存取存储器 (SRAM) 的随机存取存储器 (RAM)，可擦编程只读存储器 (EPROM)，闪存，电可擦编程只读存储器 (EEPROM)，磁或光卡，或任何适于存储电子指令的其他类型的介质。在此可以关于数据（例如指令，函数，流程，数据结构，应用程序，配置设置，编码，等等）描述本发明的实施例。当所述数据被机器访问时，所述机器可以以执行任务、规定抽象数据类型、建立低级别硬件上下文，和 / 或执行其他操作的方式反应，如在此描述的更多细节。所述数据可以被存储于非易失性数据存储中。术语“编

码”或“程序”覆盖了组件和构件的广泛范围，包括应用程序，驱动程序，流程，进程，方法，模块和子程序，并且可以指任何指令集合，当被处理系统执行时，其执行期望的一个或多个操作。此外，可替换性实施例可以包括使用少于所公开的所有操作的流程，使用额外操作的流程，以不同顺序使用相同操作的流程，以及此处所公开的单个操作被组合、细分或者改变的流程。组件或模块可以按需要被组合或分离，并且可以被置于设备的一个或多个部分中。

[0088] 在一个实施例中，用于实施所述扫描的装置包含多于一个的震动设备，通常被称为可控震源，每一个被定位于不同的空间位置，且可以受控地向地下发射所需要的扫频信号。所述震动设备的常规形式是坐落于地球表面的液压致动质量，但其他形式也是公知的，且本发明可以使用，所述其他形式例如是在地球表面的电动质量，淹没于水面以下（被称为海洋震源）的可变体积（通过液压或电力驱动），或坐落于海床或湖床（海底震源）的震动装置。除所使用的震动源外，许多传感器被布置在地球表面上，地球表面下，在水下或水面上，或在海床上或海床下，以记录对所述震动源的地球响应。来自传感器的数据通过例如磁带、磁盘或其他方式的记录系统被记录，并且然后被计算机或其他的计算设备操作。

[0089] 虽然已经关于有限数量的实施例描述了本发明，然而本领域技术人员将会理解由这些实施例进行的许多修改和变化。所附的权利要求意在覆盖落入本发明的真正精神和范围内的所有这种修改和变化。

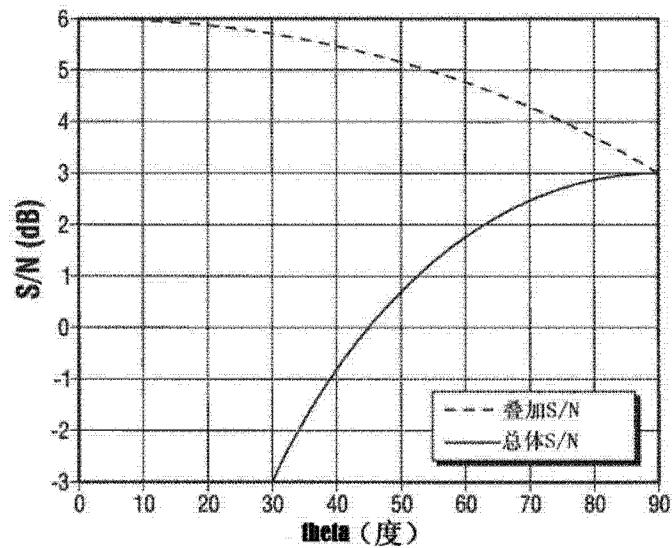


图 1

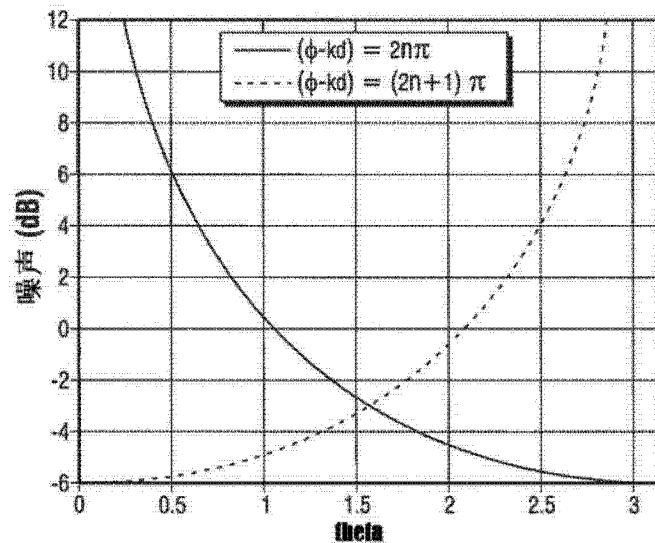


图 2

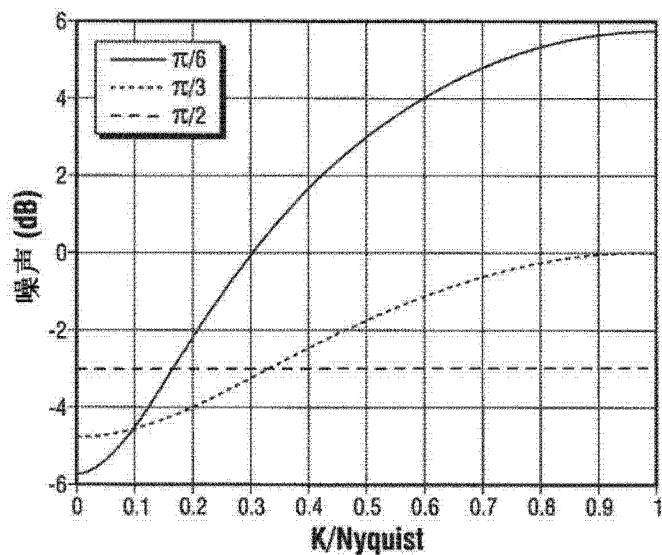


图 3

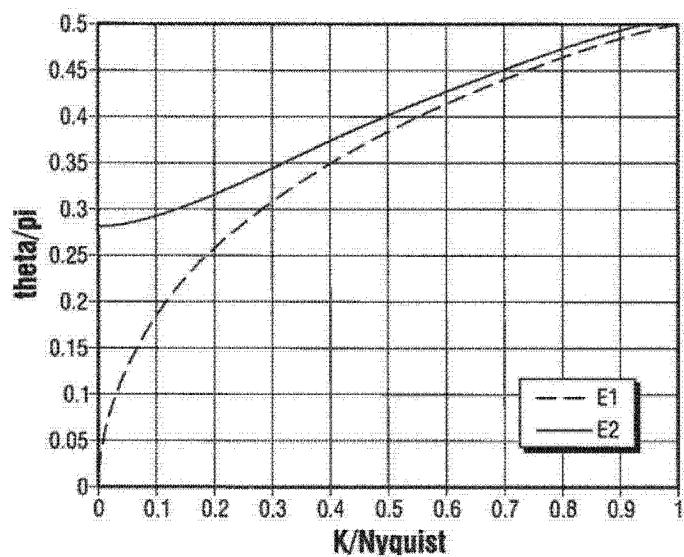


图 4

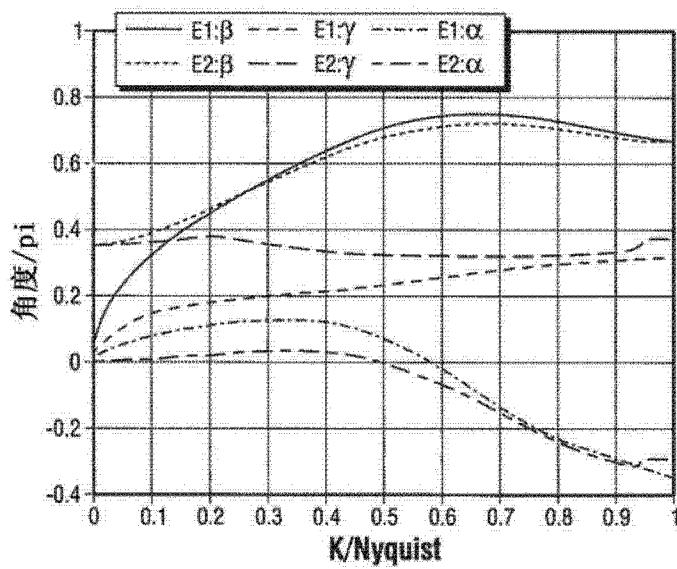


图 5

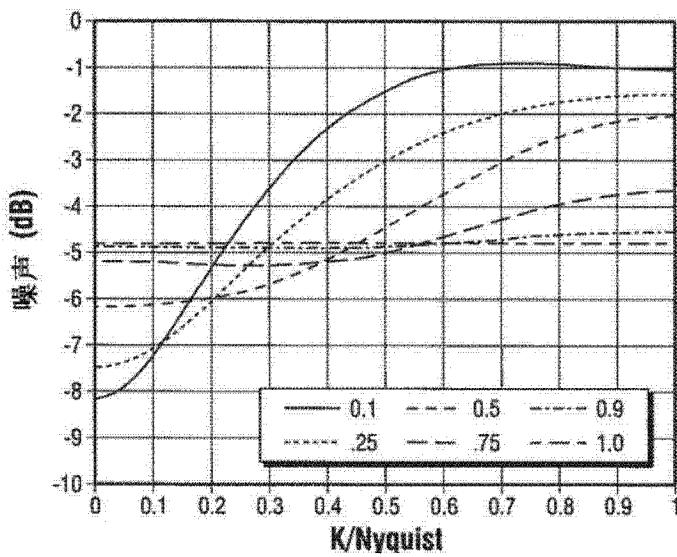


图 6

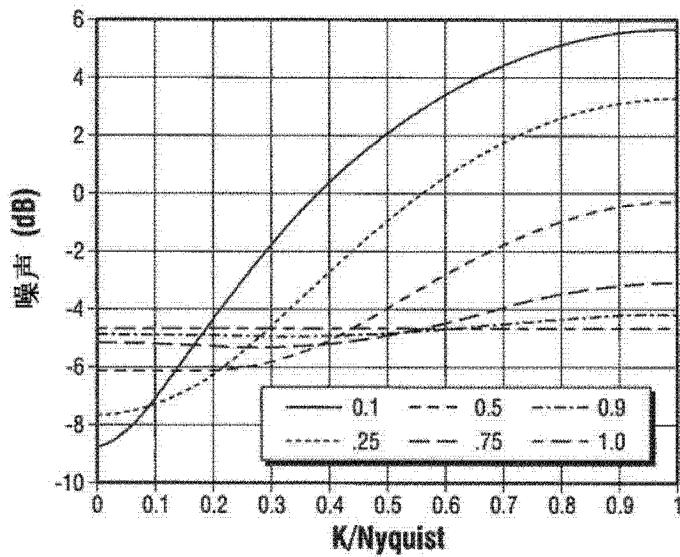


图 7

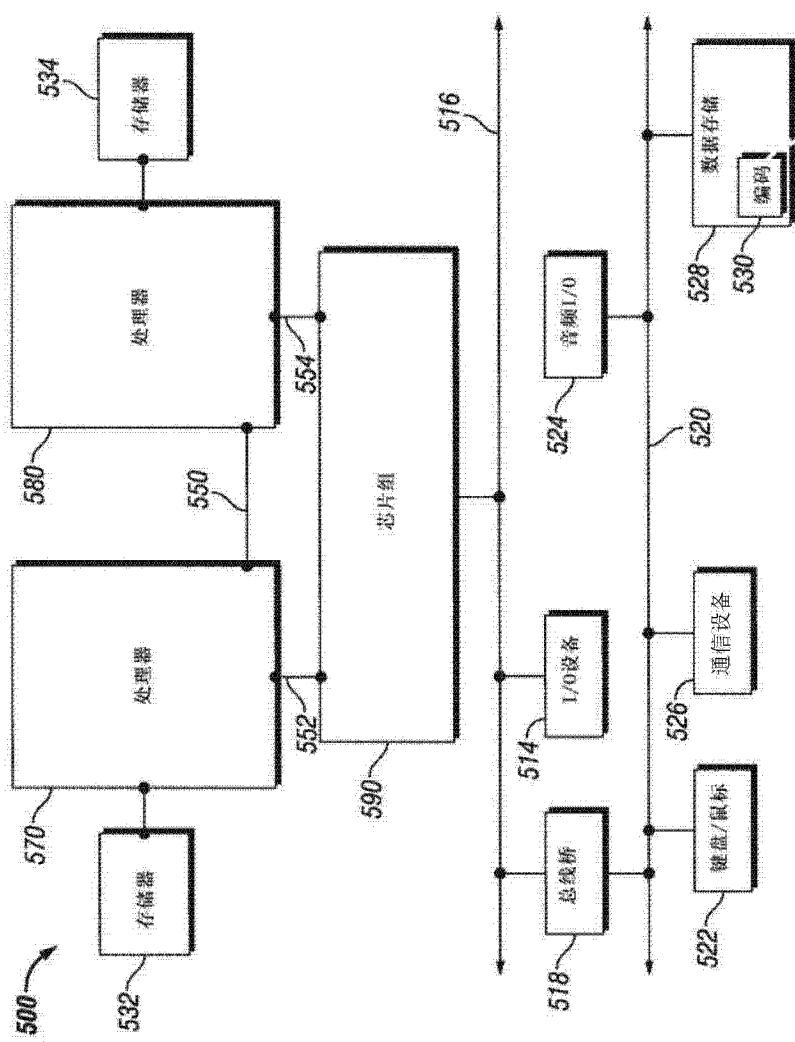


图 8