



[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 97191277.7

[45] 授权公告日 2004 年 1 月 7 日

[11] 授权公告号 CN 1133882C

[22] 申请日 1997.9.19 [21] 申请号 97191277.7

[30] 优先权

[32] 1996.9.20 [33] US [31] 08/717,176

[86] 国际申请 PCT/US97/17001 1997.9.19

[87] 国际公布 WO98/12578 英 1998.3.26

[85] 进入国家阶段日期 1998.5.18

[71] 专利权人 美孚石油公司

地址 美国弗吉尼亚州

共同专利权人 大西洋里奇菲尔德公司

[72] 发明人 K·P·艾伦 D·科里根

J·J·萨拉斯

审查员 方波

[74] 专利代理机构 上海专利商标事务所

代理人 张政权

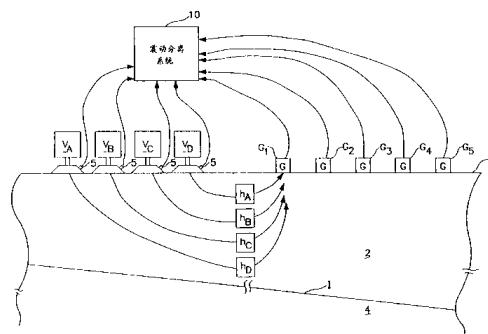
权利要求书 4 页 说明书 26 页 附图 12 页

[54] 发明名称 源分离的高保真度震源地震探矿法

[57] 摘要

本发明公开一种在产生地震勘测结果中分离大地响应对多个震源器($V_a - V_d$)中各震源器到地震检波器($G_1 - G_5$)震动能量的影响的方法。根据公开的方法,除在多次频率扫描上同时进行折射和反射震动的地震检波器测量外,还进行了源产生的实际震动的测量。采用离散傅里叶变换的方法,首先将源($V_a - V_d$)和地震检波器($G_1 - G_5$)的震动变换为频域表示。然后,产生每个频率的记录频域源震动的逆矩阵。当扫描的次数与震源器($V_a - V_d$)数目相等时,逆矩阵仅仅是源测量结果的乘法反演;如果扫描的次数大于震源器($V_a - V_d$)数目,逆矩阵是原始矩阵的广义反演。将频率的逆矩阵应用到该频率的记录地震检波器震动,可导出勘测中每条震源器-地震检波器路径的大地响应的传递函数($h_a - h_d$)。可以用加权因子减低扫描特性差的

影响,加权因子可以基于逆矩阵的最大与最小本征值之比。利用导出的传递函数($h_a - h_d$),通过在频率上把最小相位滤波器用于分离的震源器-地震检波器传递函数,可导出大地反射率函数。



1. 一种进行震动地震勘测的方法，其特征在于包括如下步骤：

激励大地表面上的多个震动器，使大地在多个频率扫描上震动，多个频率扫描的次数至少等于多个震动器的个数；

在激励步骤中，测量多个震动器原位或附近的源震动；

将测得的源震动的表示存入计算机存储器；

检测大地表面多个检测位置上的场震动，检测位置与多个震动器位置间隔一段距离，限定多条震动器-检波器路径，每条路径与多个震动器中的一个和多个检测位置中的一个有关；

将测得的场震动的表示存入计算机存储器；

对于多条震动器-检测器路径中的每条路径，根据该震动器-检测器路径的检测位置测得的由该震动器-检测器路径的震动器产生的场震动的表示和从相关震动器测得的源震动的表示，确定多个频率上的大地响应传递函数，包括：

从计算机存储器中检索所存储的测得源震动和测得场震动的表示；

计算机将所存储的测得源震动和测得场震动的表示变换为频域表示；以及

对于多条震动器-检测器路径中的每条路径，计算机进行多步运算操作，包括：

定义一个频率上测得源震动的频域表示的第一矩阵和该频率上检测震动的频域表示的第二矩阵；

确定第一矩阵的逆矩阵；

将第二矩阵乘以第一矩阵的逆矩阵，得出该频率的大地响应传递函数；

以及

对多个频率重复定义、确定和相乘；

通过计算机执行多步运算操作，确定多条震动器-检测器路径中每条路径的大地反射率函数，计算机运算操作步骤包括：

在多个频率上对有关该震动器-检测器路径的大地响应传递函数进行检索；以及

用最小相位滤波器对检索的大地响应传递函数进行滤波，得到该震动器-检

测器路径的大地反射率函数。

2. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于：进一步包括：

对多个震动器中的每一个和检测位置中的每一个，重复进行分离和滤波的步骤，重复对下一个震动器的分析，以及重复对下一个地震检波器的分析。

4. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于进一步包括：在多个频率的每个频率上，

确定第一矩阵逆矩阵的本征值；以及

确定与上述确定本征值步骤中本征值相对应的加权因子。

5. 如权利要求 4 所述的方法，其特征在于：加权因子对应于上述确定本征值步骤中本征值的最大值与最小值之比。

6. 如权利要求 3 所述的方法，其特征在于：激励步骤包括：

在数目与多个震动器数目相等的多个频率扫描上激励多个震动器；

确定第一矩阵逆矩阵的步骤确定第一矩阵的乘法逆元素。

7. 如权利要求 3 所述的方法，其特征在于：激励步骤包括：

在数目大于多个震动器数目的多个频率扫描上激励多个震动器；

确定第一矩阵逆矩阵的步骤确定第一矩阵的广义逆矩阵。

8. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于：激励步骤包括：

以第一相位关系在第一频率扫描下同时激励多个震动器中的每一个；以及

以不同于第一相位关系的第二相位关系在第二频率扫描下同时激励多个震动器中的每一个。

9. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于：在多个扫描中每一个期间，选择多个震动器中的一个不激励。

10. 一种根据以前获得的震动地震测量结果，包括同时在多个扫描下激励的大地表面震动器原位或附近的源震动测量结果和离开震动器的检测器位置上检测到的震动的测量结果，进行地震勘测的方法，以前获得的震动地震测量结果以数字形式存在计算机存储器中，其特征在于所述的方法包括：

通过计算机运行下列步骤，确定多个震动器中一个与多个检测位置中一个之间的每个地震路径的大地响应传递函数，通过计算机实现下列步骤：

从计算机存储器中检索所存储的测得源震动和得到场震动的表示；

将所存储的测得源震动和得到场震动的表示变换为频域表示；

定义一个频率上测得场震动的频域表示的第一矩阵和该频率上检测到震动的频域表示的第二矩阵；

确定第一矩阵的逆矩阵；

将第二矩阵乘以第一矩阵的逆矩阵，得出该频率上的大地响应传递函数；以及

对多个频率重复定义、确定和相乘的步骤；以及

对多个频率，用最小相位滤波器对大地响应传递函数进行滤波。

11. 如权利要求 10 所述的方法，其特征在于进一步包括：

对于多个震动物中一个与多个检测位置中一个的每一对，在多个频率中的每一频率下，

确定第一矩阵逆矩阵的本征值；以及

确定与所述确定步骤中本征值相对应的加权因子。

12. 如权利要求 11 所述的方法，其特征在于：加权因子对应于所述确定步骤中本征值的最大值与本征值的最小值之比。

13. 如权利要求 10 所述的方法，其特征在于：

多个频率扫描的次数等于多个震动器的个数；

所述的确定第一矩阵逆矩阵的步骤确定第一矩阵的乘法逆元素。

14. 如权利要求 10 所述的方法，其特征在于：

多个频率扫描的次数大于多个震动器的个数；

所述的确定第一矩阵逆矩阵的步骤确定第一矩阵的广义逆矩阵。

15. 如权利要求 14 所述的方法，其特征在于：利用大地响应传递函数和测得的源震动的频域表示进行组合步骤。

16. 如权利要求 15 所述的方法，其特征在于：利用大地响应传递函数和测得的源震动的时域表示进行组合步骤。

17. 一种使一个检测位置同时接收的由多个震动器产生的震动信号多次扫描的大地响应相互分离的装置，其特征在于包括：

存储多个震动器中每一个原位或附近记录的源震动的表示的存储器；

存储检测位置上检测到震动的表示的存储器；

一台与所述存储器耦合的计算机，以运行下列步骤的方式编制程序，所述运行步骤包括：

检索所存储的得到源震动和测得场震动的表示；
将所存储的得到源震动和测得场震动的表示变换为频域表示；
定义一个频率上测得场震动的频域表示的第一矩阵和该频率上检测到震动的频域表示的第二矩阵；
确定第一矩阵的逆矩阵；
将第二矩阵乘以第一矩阵的逆矩阵，得出该频率上的大地响应传递函数；
对多个频率，重复定义、确定和相乘的步骤；以及
将最小相位滤波器应用于重复步骤的结果；以及
与所述计算机耦合的输出装置，用于显示基于大地响应传递函数的地震勘测信息。

18. 如权利要求 17 所述的装置，其特征在于：在多个频率中的每个频率下还对所述计算机编程，执行下列步骤：

确定第一矩阵逆矩阵的本征值；以及
确定与所述确定本征值步骤中本征值相对应的加权因子。

19. 如权利要求 18 所述的装置，其特征在于：加权因子对应于所述确定本征值步骤中本征值的最大值与本征值的最小值之比。

20. 如权利要求 18 所述的装置，其特征在于：多个频率扫描的次数等于多个震动器的个数；

所述的确定第一矩阵逆矩阵的步骤确定第一矩阵的乘法逆元素。

21. 如权利要求 18 所述的装置，其特征在于：在激励步骤中多个频率扫描的次数大于多个震动器的个数；

所述的确定第一矩阵逆矩阵的步骤确定第一矩阵的广义逆矩阵。

源分离的高保真度震动源地震探矿法

根据美国法典第 35 编第 120 条，本申请要求 1995 年 9 月 29 日提交的题目为“地震震动信号源分离的方法和装置”的第 08/556302 号未审定申请的优先权。本申请还与 1995 年 5 月 5 日提交的第 08/435940 号未审定申请，现在为第 5550786 号美国专利有关。

技术领域

本发明涉及地质勘探领域，尤其涉及地震勘测中记录的震动信号的分析。

背景技术

众所周知，在石油和天然气勘探领域中，常常对大地进行地震勘测，以确定勘测区下面是否可能有石油储油层。在通常意义上，传统的地震勘测是在大地一处或多处产生已知的声能或震动能，在离开能量产生位置的地方检测这一能量。所产生的能量从源位置传播到在大地中，并被地下的地层所折射以及被地层之间的界面所反射。测量能量从源传播到接收器所需的时间可以指示能量传播路径的长度，由此可导出各地质形成的深度。

人们还熟知，通常可以采用不同类型的震动源能量和震动源设备。一种重要的陆上地震勘测法采用地震震动器源。在这种勘测中，将多个震动器放在勘测区中所需的位置上，同时对大地施加强震动。通常，震动器为一辆其底板与大地接触的大型卡车或其它车辆。每个震动器中液压起重器与重型(例如，两吨量级)的反作用质量块一起工作，产生的震动通过底板进入到大地上，由与震动器阵列相隔一定距离的地震检波器阵列进行检测。1991 年 3 月 19 日颁发的第 5000285 号美国专利描述了传统的安装在卡车上的地震震动器的一个例子，该专利已转让给大西洋里奇菲尔德公司，这里引作参考。这种测量在大地中产生的震动能量通常是变频的，以便能够确定从源到检测器的传播时间，这也是众所周知的。通常，在下限(如 5Hz)与上限(如 150Hz)之间，或是采用固定幅度或是采用与频率有关的幅度“包络”，震动随时间线性变化。根据这种变频的产生能量的每一序列通常被称为“扫描”或是“线性调频脉冲”。

地震勘测是费时的任务，所花费的时间主要与产生和记录震动能量所需的时间

间直接有关，这也是众所周知的。照此，许多的现代震动地震勘测是这样进行的，从多个源位置同时向大地施加能量，以致每一个地震检波器将检测来自多个源的被折射和反射的能量复合。然后在位于勘测区中的记录站，在时间窗口上记录下检测到的复合能量，提供每个地震检波器位置的扫描的地震记录。在这种同时激励多个源的勘测中，对地震检波器的地震记录的处理必须把检测到的能量从多个源中的每个源分离出来，以便提供有关能量经地下路径从每个源到地震检波器的信息。

根据复合记录能够轻易地确定多个源中每个源的贡献，用这种方法，通过对源能量进行编码通常有助于根据源的复合记录的分离。这种编码的一个例子被称作 0° - 180° 编码，在第 4159463 号美国专利中对此作了描述。在这个例子中，两次同时激励两个震动源，在大地中产生两次震动扫描。在第二次扫描中，两个源中每个源的能量与第一次扫描中相等，不同的是第一个源的能量的相位相对第一次扫描相差 180° 。将两次扫描的两个记录相加将隔离第二个源的贡献 (180° 的相位差消除第一个源的贡献)；两个记录相加前让记录中的一个记录相移 180° ，那么将隔离第一个源的贡献。第 4715020 号美国专利描述了一种更通用的对两个以上的多个震动源进行相位编码的方法，根据这种方法，再次扫描的次数等于同时激励的震动器的数目。

根据另一种已知的相位编码方案，选择给定扫描中每个源的相移，以致通过对多次扫描记录的相移和求和可以隔离每个源的贡献。根据这个例子，下表列出了在 1 至 4 次扫描中四个震动 A、B、C、D 的相移 (这种相移以度表示，相对第一次扫描中震动器 A 的相位而言)：

	震 动 器			
	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>	<u>D</u>
扫描 1	0	90	90	180
扫描 2	90	0	180	90
扫描 3	90	180	0	90
扫描 4	180	90	90	0

根据这种方法，通过使扫描 2 的记录相移 -90° 、扫描 3 的记录相移 -90° 、扫描 4 的记录相移 180° ，以及将四条记录加在一起，可隔离震动器 A 的贡献；在这

种情况下，经求和的记录是震动器 A 记录的四倍，所有其它贡献相互抵消。同样，为了分辨震动器 B，在求和前，使扫描 1 和 4 的记录相移 -90° ，扫描 3 的记录相移 180° 。通过相移与相加的组合，从而隔离四个震动源中每个源的贡献，同样可确定其它源的贡献。

作为进一步的背景，第 4545039 号美国专利描述了一种利用震动脉冲的伪随机选择的震动地震勘测技术。根据这种方法，由每个震动器产生不同的非相关的扫描，对每条记录进行多次相关(对应每个震动器/编码采用一次)，在这之后，将对应于每个震动器的分离的记录叠加起来，以分离每个源对记录的贡献。

根据这些技术中的每种技术，通过确定地震记录中出现源震动的时间，可确认从源到地震检波器的传播时间。这种确定可通过检查地震记录，识别其中频率-变量的源震动的贡献来进行。这种识别可以通过时域中源震动波形与地震检波器检测到震动(分离之后)的互相关以自动方式来进行。相关图的幅度最大值(源和接收器震动的最大相关度的指示)出现在对应于震动传播时间的相关时间滞后处。在对源震动和检测震动进行傅里叶变换运算后，在频域中也能够进行这种相关。在频域中，将源频谱的复共轭乘以检测震动的频域表示，这个乘积的逆变换产生时域的相关输出。

作为进一步的背景，第 3332511 号美国专利描述了一种获得震动地震勘测的方法和系统，这里，通过测量震动器附近的大地位置上产生的源震动获得相关运算中使用的源信号。然而，将源能量与检测到地震记录进行相关的传统技术通常采用源能量波形(即“导频”信号)的理想表示作为相关算子，而不是利用相关中震动器实际产生的震动的测量结果。这是因为实际震动通常富含谐波，在相关结果主瓣的两侧产生旁瓣假信号；这些旁瓣的假信号使相关结果大大模糊，因而对勘测准确度产生不利影响。于是，阻碍了在现有技术中采用实际震动器测量作为震动地震勘测中的相关算子。

除了上述的谐波以外还观测到，实际的源能量波形被产生震动的液压机械系统中的非线性度、被震动系统通过震动系统底板弯曲与大地耦合的非线性度、以及被其它非线性因素而畸变，偏离理想的输入波形。源能量相对导频信号的这些畸变在实际传递到大地中时极大地增加了用传统相关技术精确确定能量从源到接收器的过渡时间的难度。有些非线性度的频率依变性使检测到的地震记录与导频波形之间的相关性在一些频率上更差，进一步增加了这一难度。考虑到检测到

的每条地震记录还包含来自所关心的源以外的其它源的能量，在同时激励多个源的震动地震勘测中，这种相关结果的不精确度尤其会带来麻烦。

作为进一步的背景，现已观察到，在地震勘测中，震动源的激励常常是不重复的。例如，多个震动源中的一个在给定的扫描期间可以不激励，或者激励中伴有大量噪声。如果在扫描时间在现场中检测到，这种失败会需要重新进行一次扫描；然而，如果在勘测期间在现场中未检测到，那么这种情况会损害该扫描的地震记录，相应地降低勘测中所获得的数据量。

即使在根据这些传统技术进行相对多个源的相关，勘测的分辨率通常被限于把多个震动源当作单个源来对待。照此，空间分辨率通常是相当粗的，不能提供地下地质的高分辨率描述。

作为进一步的背景，1987年2月24日颁发的第4646274号美国专利，现已转让给大西洋里奇菲尔德公司，描述了在研制相位畸变校正用的逆滤波器中采用震动地震源产生的地面力的实际测量结果。

发明内容

本发明的目的是提供一种计及非线性和与频率有关效应的分析震动地震记录的改进方法。

本发明的进一步目的是提供一种能够计及其中一个震动源已经失败或是噪声的扫描的方法。

本发明的进一步目的是提供一种能够对包含多个同时激发震动源引起的谐波效应的震动地震记录进行处理的方法。

本发明的进一步目的是提供一种能够提高勘测分辨率以致对震动源分别进行处理，而不是将分辨率限于震动源阵列的方法。

对本领域专业人员而言，参看以下说明并结合附图，本发明的其它目的和优点是显而易见的。

本发明可以被引入到同时激励多个震动源进行震动地震勘测的方法和系统中。根据源和扫描当中所选的编码方案，利用多个源进行多次扫描。在震动器以及与其隔开一段距离的位置上同时测量源震动被地质结构和界面反射和折射后的震动。对应每一次扫描，每个地震检波器产生一个记录，该记录是源震动被每个源与地震检波器之间路径反射和折射的复合。本发明根据震动器上实际测得的源震动，在每一个感兴趣的频率下，通过产生一个逆矩阵算符，在频域中对地震

记录进行分析。在该频率下将逆矩阵算符用于每一个记录，产生该频率下每条源-地震检波器路径的传递函数；然后，对于记录中的每一个感兴趣频率重复这一过程。本方法产生每个震动源的每个地震检波器位置的传递函数，将每个源的能量路径与阵列中的其它源相分离。该传递函数代表在源-地震检波器路径上大地对源震动的响应。本方法便于计及理想源波形与实际源震动之间的非线性和谐波畸变，并能够计及扫描中一个震动器是噪声或缺少一个震动器的扫描。根据本发明的另一个实施例，在每次扫描中切断一个源，以方便分离。根据本发明的又一个实施例，可以采用对扫描动作的测量来降低或消除勘测中动作差扫描的贡献。根据本发明的再一个实施例，进行多于震动器数目的多次扫描，在确定大地对源震动的响应中以提供更健全的解决办法。

根据本发明的另一方面，通过将被分离记录震动的矩阵表示除以在特定震动器上测得的信号的矩阵表示，进行分离检测记录的相关。然后应用最小相位滤波器产生沿指定震动器-检测器路径上大地反射率的表示。

附图说明

图 1 是依照本发明较佳实施例在大地上进行震动地震勘测的大地截面的示意图。

图 2 是依照本发明较佳实施例用于执行本方法的计算机系统的示意图。

图 3 是表明依照本发明较佳实施例进行震动地震勘测的方法的流程图。

图 4 是说明依照本发明第一替代实施例，在图 1 所示的勘测中分离多个震动器中每一个与地震检波器中每一个之间的每条路径的大地响应的方法的流程图。

图 5 是说明依照本发明第二替代实施例在图 1 所示的勘测中分离多个震动器中每一个与地震检波器中每一个之间的每条路径的大地响应的方法的流程图。

图 6a 和 6b 是说明根据本发明较佳实施例从分离过程结果产生地震勘测的另外两种方法的流程图。

图 7a 和 7b 分别是根据传统相位分离技术和根据本发明较佳实施例产生的一示范勘测的地震轨迹。

图 8 是说明根据本发明另一实施例从分离过程结果中产生地震勘测的方法的流程图。

图 9 是根据图 8 中所示的本发明实施例说明本方法所使用的逆过程的详细流程图。

图 10 是说明根据本发明的较佳实施例，在分离过程前进行的将记录数据变换到频域的另一替代方法的详细流程图。

具体实施方式

首先参考图 1，图中示出依照本发明的较佳实施例正在进行两维(2-D)震动地震勘测的大地截面。以下的描述将针对大地的陆上勘测，当然应当明白，本发明也可用于海中地震勘测。

在图 1 所示的示范勘测中，将四个震动器 V_A 至 V_D 放在大地表面 S 。震动器 V 是一般的震动源，如安装在卡车上的这种震动器。传统震动器 V 的例子有 1991 年 3 月 19 日颁发的第 5000285 号美国专利中所描述的，该专利已转让给大西洋里奇菲尔德公司，这里引作参考；另一方面可以采用其它的震动地震勘测性能传统震动器。此外，也可以采用以编码方式产生地震能量的其它类型的致动器代替震动器 V 。在这个示范勘测中，震动器 V_A 至 V_D 相互靠近，但是隔开一段短距离。相邻震动器 V 之间的距离根据勘测设计而定，但是通常在 40 英尺的量级上。此外，在图 1 所示的两维示范勘测中，示出的震动器 V_A 至 V_D 是相互共线的。为了三维测量，震动器 V 可以按照非共线方式放在勘测区中。此外，无论是两维勘测还是三维勘测，对于图 1 所示位置中的震动器 V 进行所需次数的扫描后，将震动器 V 移动到勘测区的不同位置，以同样的方式激励。

在本发明的这个实施例中，传感器 5 与每个震动器 V 以及震动分离系统 10 相连接；传感器 5 检测震动器 V 的运动或力，给震动分离系统 10 产生一个对应于其有关的震动器 V 传给大地的实际源能量的信号。每个传感器 5 可以是一个安装在震动器 V 反作用质量块或底板上或是直接与大地表面邻接的加速度计、测量震动器 V 激发腔体中压差的传感器、附着在震动器 V 底板上的负载单元、或是测量震动器 V 实际输出的其它传统传感器。由传感器 5 进行的测量通常是实际震动的最小相位相对值，因此代表了由有关震动器 V 传给大地的实际源震动。

还是如图 1 的勘测所示，在与震动器 V 间隔一定距离的勘测区中，在大地表面 S 上设置地震检波器 G_1 至 G_5 。地震检波器 G 具有传统的结构，与传统震动地震勘测中通常采用的一样；另一方面，当然根据具体的勘测位置(陆上或海上)和能量类型，可以采用其它的传统检测器代替地震检波器 G 。此外，在震动地震勘测中，通常采用 5 个以上的多个地震检波器 G ；为简便起见，图 1 中仅仅示出 5 个地震检波器 G 。另外，图中示出的这 5 个地震检波器 G 相互共线，地震检波器 G

也可以按照非共线的排列结构而排列，或者根据勘测设计和所需结果，地震检波器 G 按照行列阵列的形式排列。地震检波器 G 直接的间隔可以很小，如在 15 至 40 英尺的量级。震动器 V 与地震检波器 G 组之间的距离根据具体勘测情况以及震动器 V 通过勘测区的滚降而改变。确实，在某些地震检波器 G 以阵列排列的勘测中，在勘测中震动器 V 实际上可以几次位于地震检波器阵列的区域中。

正如图 1 所示，震动能量从每个震动器 V 传播到在勘测区中的地震检波器 G。每个地震检波器 G 实际接收到的震动由于受到与震动器 V 与地震检波器 G 之间震动路径地质特性相对应的传递函数 h 的影响，将依赖于每个震动器 V 给出的输入震动信号。通过震动能量被地质结构的折射和反射将可确定这一传递函数 h。以地震检波器 G_1 为例，如图 1 所示，各个传递函数 h_a 至 h_b 是由大地给出的，对应于一端为震动器 V_a 至 V_b 、另一端为地震检波器 G_1 的四条不同路径。因此，传递函数 h_a 对应于震动器 V_1 与地震检波器 G_1 之间路径上的大地响应，它包括大地上层(如层 2)中的折射效应和地下各层之间界面(如 2、4 层之间的界面 I)的反射效应。大地的这两种物理效应引起地震检波器 G_1 接收到的震动能量延迟以及与震动器 V_a 传给大地的震动能量有所改变。因此，传递函数 h_a 对应于当与源震动波形卷积时(在时域中)或者当与源震动频谱相乘时(在频域中)产生地震检波器 G_1 记录信号的函数，正如本领域众所周知的。

除了大地根据源震动产生的这些反射和折射效应以外，传递函数 h 还包括检测点(即传感器 5 置于特定震动器 V 上的位置)与大地表面之间存在的相应震动 V 的动力学效应。例如，如果传感器 5 作为测量震动器 V_a 激发腔体中差压的传感器，传递函数 h_a 还将包括通过监测差压测量源震动中不准确度的效应。由于这些动力学通常是最小相位效应，然而，如下所述，在接下来的滤波和处理中能够轻易地去除这些不准确性。

正如将要详细描述，在震动勘测中利用同时进行多次扫描提供勘测所需时间的缩短，但是，对于进行的每一次扫描，导致每个地震检波器 G 记录一条根据每个震动器 V 提供震动能量的复合地震记录。地震检波器 G 记录的地震记录被存入震动分离系统 10，由其进行分析。

现在参考图 2，根据本发明的较佳实施例，用于分析震动器 V 和地震检波器 G 所记录地震震动的震动分离系统 10，从每个地震检波器 G 中分离出每个震动器 V 对记录的地震信号的贡献。如图 2 所示，本发明较佳实施例的系统包括震动分

离系统计算机 24。系统计算机 24 可以用任何普通个人计算机或工作站来实现，较佳地采用基于 UNIX 的工作站，如 Sun Microsystems 公司提供的 SPARC 工作站，或是以独立方式或是作为网络配置的一部分来实现。根据本发明的较佳实施例，系统计算机 24 主要在图形显示器 27 上或是另外通过打印机 28 给出输出；进一步在另外实施例中，系统计算机 24 可以将以下所述的分析结果存在磁盘存储装置 29 中，供以后使用和进一步分析。给系统计算机 24 设置键盘 26 和点操作装置(例如，鼠标器、跟踪球等)25，以便能够进行交互操作。系统计算机 24 能够与磁盘存储装置，包括网络上的外部硬盘存储器和软磁盘驱动器进行通讯。正如图 2 所示，震动分离系统 10 既可以位于远离勘测区的数据中心，另一方面(较佳地)也可以位于勘测现场，提供对勘测结果的实时分析。

如图 2 所示，设置记录单元 21、23，记录勘测的震动信号。在这个例子中，记录单元 23 接收震动器 V 上加速度计的时域电信号，而记录单元 21 接收地震检波器 G 的时域电信号。记录单元 21、23 与磁盘存储装置 30(如果需要，或者通过系统计算机)通讯，将震动器 V 和地震检波器 G 的电信号转变为数字数据，存储在磁盘存储装置 30 上。照此，记录单元 21、23 具有本领域人员熟知的普通结构。在本发明的这个实施例中，系统计算机 24 能够从一个或多个磁盘存储装置 30 中对代表检测到震动的存储数据进行检索。虽然图 2 示出磁盘存储装置 30 直接与系统计算机 24 连接，也可以设想，磁盘存储装置 30 可以通过局域网或是通过遥控进行存取。此外，虽然磁盘存储装置 29、30 是作为分别的装置示出的，当然在适当的时候也可采用单个的磁盘存储装置来存储任何的和所有的测量数据。

现在参考图 3 并结合图 1 和 2，将详细描述根据本发明较佳实施例进行震动地震勘测和分析其结果的方法。图 3 的方法将针对图 1 所示的震动器 V 和地震检波器 G 单一布局而描述，当然将会明白，对于整个勘测区上的震动器 V 和地震检波器 G 的多种布局通常可以重复应用和执行图 3 所述的方法。照此，图 3 所示方法中数据处理部分既可以实时(即在进行下一位置的勘测前对每个布局的信息进行处理)进行也可以在完成整个勘测区的数据获取后接下来进行批处理操作。

根据本发明的较佳实施例，过程 32 通过同时激励震动器 V 进行第一次扫描而开始勘测，在这一步中，每个震动器 V 使大地在一段频率范围下震动。根据所需勘测类型，可以由任何已知技术确定震动器 V 扫描的特定频率。典型地，频率上扫描或下扫描将产生震动波形 $V(t)$ ，在线性情况下为：

$$V(t) = A(t) \sin\left(2\pi\left(\frac{SRt^2}{2} + f_0t\right) + \phi\right)$$

式中：SR 是从起始频率开始频率随时间的扫描率（正的 SR 为上扫描，负的 SR 为下扫描）；A(t) 是震动的幅度包络函数（通常为常量）。相位角 ϕ 对应于上述的分离特定几个震动器 V 震动贡献的震动相位编码。当然，在进行勘测中也可以采用非线性扫描（即源震动的频率随时间变化不是线性的）。另一方面，可以采用伪随机频率扫描（即每个震动器 V 震动的瞬时频率以伪随机方式变化），对于共振会引起附近结构破坏的都市和郊区区域的勘测尤其如此。

因此，过程 32 以传统方式按照所需方法激励震动器 V 扫描。在过程 34 中，由勘测中震动器 V 的传感器 5 还有每个地震检波器 G 二者在时域中记录震动。记录单元 21、23 在适当的时候（或是在下一次扫描前或是在完成所有扫描后）将记录的震动信号传送到震动分离系统 10 中的磁盘存储装置 30，完成过程 34。正如本领域众所周知，存储的震动信号将是时域中传感器 5 和地震检波器 G 接收的模拟震动的一系列数字取样值。

然后进行决断 35，确定勘测中在震动器 V 对地震检波器 G 的特定位置上是否要进行附加扫描，在这种情况下，在过程 36 中以传统方式调节下一次扫描的扫描编码。然后，对于其余扫描重复过程 32、34。根据本发明的第一实施例，进行扫描的次数（即经过过程 32、34 的次数）等于勘测中震动器 V 的数目。对于图 1 的例子而言，这里采用四个震动器 V_A 至 V_D ，进行四次扫描。

完成所需次数的扫描，震动分离系统 10，具体是指系统计算机 24 在过程 38 中根据震动器 V 记录的信号以及地震检波器 G 记录的信号，对记录的震动信号进行傅里叶变换，将存储的时域表示变换为频域的数字表示。过程 38 中采用的傅里叶变换技术是传统技术，通常称为离散傅里叶变换 (DFT) 或快速傅里叶变换 (FFT)。然后把过程 38 的结果存入震动分离系统 10 的存储器，或是在系统计算机 24 的随机存取存储器中或是在磁盘存储装置 30 中。

在一定的情况下，根据扫描编码，也可以对信号数据进行压缩，以便于进一步处理。现在参考图 10，过程 38' 不仅将记录的信号变换到频域而且还对信号数据进行压缩，现在将说明这种压缩。过程 38' 是过程 38 的另一个实施例，在对多

次扫描进行相互相位编码的情况下，它是特别有用的。

过程 38' 从过程 138 由系统计算机 24 从存储器中检索震动器 V 的导频信号开始；由于在这种情况下对扫描进行相位编码，对于一次次扫描，除了相移外，加到震动器 V 上的导频信号是互相相同的。然后，对于单个记录信号 R_i 进行过程 140，该信号或是一个地震检波器 G 记录的信号或是一个震动器 V 上传感器 5 监测的信号，将记录信号 R_i 与过程 138 中检索到的导频信号进行相关。根据传统技术进行过程 140 相关。然后在过程 142 中用系统计算机 24 框出所需“监听”时间内的这些相关结果，以便可以放弃关心范围以外时间的数据。然后，在过程 144 中，系统计算机 24 对框出的记录信号 R_i 的相关结果进行 DFT 或 FFT，将这些相关结果变换到频域中。决断 145 确定是否继续对附加记录信号 R_i 进行处理（包括地震检波器 G 记录的信号以及震动器 V 上传感器 5 记录的这些信号二者）；如果是，增加指数 i 并控制返回到相关过程 140。完成过程 144 对每条记录信号 R_i 的相关和框出结果的 FFT 后，完成过程 38'。

于是，根据以下所述的方法，任选过程 38' 能够大大地降低系统计算机 24 处理的数据量。过程 38' 的结果是导频信号和测量记录之间相关性的 FFT，仅限于关心的时间窗口。此外，在过程之前进行这个压缩，因此，大大地提高了这里所述分离方法的效率。

本领域的专业人员将会看到，任选过程 38' 可以根据系统计算机 24 的配置以及扫描编码的类型以不同的方法对信号数据进行变换和压缩。例如，可以在频域中而不是在时域中进行过程 140、142 的相关和框出，在这种情况下，可以在完成过程 144 后进行过程 140、142。对于本领域的专业人员而言从这一描述中显而易见，也可以进行其它类型的传统处理。

根据本发明的较佳实施例，在过程 40 中，根据过程 38 中产生的记录震动的频域表示，进行震动器 V 到地震检波器 G 每条路径的大地响应的分离。这个分离既利用地震检波器 G 的记录震动又利用震动器 V 检测的震动；这与包括相位编码分离的传统分离技术不同，它们是根据导频信号（即输入震动的理想表示）分离的。这使得本发明能够更准确地确定大地对震动的响应，在分离过程中计及了寄生噪声、非线性、耦合不完善、底板弯曲以及有关各个震动器的工作问题。此外，根据本发明较佳实施例的分离方法逐个频率地而不是象传统分离技术那样以与频率无关的方式确定每条路径上的大地响应。结果，本发明在分离过程中能够处

理与频率有关的效应，包括谐波耦合以及其它动作。

现在参考图 4 并结合图 1，对于多个震动器 V 与一个地震检波器 G 之间的多个大地响应路径，进一步详细描述分离过程 40；当然应当明白，对于勘测区中的每个地震检波器 G ，也可以进行这一过程。如图 1 所示，每一个震动器 V_A 至 V_D 产生震动，通过各条物理路径传给地震检波器 G_1 。每条路径对应于一个响应，或传递函数 h_A 至 h_D 分别对应于地震检波器 G_1 与震动器 V_A 至 V_D 之间的路径。不管采用的震动扫描类型，传递函数 h 当然表示大地对震动能量响应的贡献，包括反射和折射，因此在产生区域地震勘测以及确定地下界面位置和各种地质形成中是有用信息。

对于四个源 V_A 至 V_D 的四次一组震动扫描，可以考虑把地震检波器 G_1 记录的频域表示作为 DFT 中每个频率的一个方程式系，表示为：

$$\begin{aligned} R_1 &= A_1 \cdot h_A + B_1 \cdot h_B + C_1 \cdot h_C + D_1 \cdot h_D \\ R_2 &= A_2 \cdot h_A + B_2 \cdot h_B + C_2 \cdot h_C + D_2 \cdot h_D \\ R_3 &= A_3 \cdot h_A + B_3 \cdot h_B + C_3 \cdot h_C + D_3 \cdot h_D \\ R_4 &= A_4 \cdot h_A + B_4 \cdot h_B + C_4 \cdot h_C + D_4 \cdot h_D \end{aligned}$$

式中 R_n 是第 n 次扫描地震检波器 G 在规定频率下记录的复合频域表示系数， A_n 是第 n 次扫描震动器 V_A 测量的在规定频率下的源震动系数， B_n 是第 n 次扫描震动器 V_B 测量的在规定频率下的源震动系数，以此类推。当然，在这个系中每个系数是复数。由于对于每一次扫描，在过程 34 中已经记录了震动器 V 上震动，对于每一次扫描已经获得地震检波器 G_1 上地震记录，因此它们是已知的，上述系具有四个未知数的四个方程式，由此可以确定规定频率的传递函数 h_A 至 h_D 的解。

可以用矩阵形式将上述的系表示为：

$$\begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 & C_1 & D_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 & D_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 & D_3 \\ A_4 & B_4 & C_4 & D_4 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} h_A \\ h_B \\ h_C \\ h_D \end{pmatrix}$$

通过确定含有源震动表示 A_n 、 B_n 、 C_n 、 D_n 的矩阵 $[S]$ 的逆矩阵，可以求出规定频率下的传递函数 h 的解：

$$\begin{pmatrix} h_A \\ h_B \\ h_C \\ h_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 & C_1 & D_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 & D_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 & D_3 \\ A_4 & B_4 & C_4 & D_4 \end{pmatrix}^{-1} * \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \end{pmatrix}$$

以下的描述将源震动表示的逆矩阵称为 $[S^{-1}]$ 。

如上所述，在扫描中通常利用相位编码。在这种情况下，每个源震动表示 A_n 、 B_n 、 C_n 、 D_n 为复数。以上述的传统相位编码为例，理想的输入波形（即扫描的波形是严格地由震动器 V 产生的）将具有下表所给出的相位关系（以度表示）：

	震 动 器			
	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>	<u>D</u>
扫描 1	0	90	90	180
扫描 2	90	0	180	90
扫描 3	90	180	0	90
扫描 4	180	90	90	0

在这种理想情况下，矩阵 $[S]$ 由下式表示，式中 i 是虚数指示（即 -1 的平方根，对应于 90° 相移）：

$$[S] = \begin{pmatrix} 1 & i & i & -1 \\ i & 1 & -1 & i \\ i & -1 & 1 & i \\ -1 & i & i & 1 \end{pmatrix}$$

它的逆矩阵 $[S^{-1}]$ 由下式表示：

$$[S^{-1}] = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & -i & -i & -1 \\ -i & 1 & -1 & -i \\ -i & -1 & 1 & -i \\ -1 & -i & -i & 1 \end{pmatrix}$$

然而，已经观察到，由一般的震动器传给大地的实际震动能量略微偏离理想的输入波形。这是由于震动器 V 工作中的非线性使所需波形从控制信号到实际震动的不良转换、震动器 V 与大地的不良耦合、底板弯曲以及震动器 V 中的声耦合造成的。此外，已经观察到，传统的震动器 V 在一次次扫描中其输出不是完全重复的。当采用理想波形的相位矩阵时，这些效应中每一种都会把误差引入到分离和分析过程中。

于是，如上所述，根据本发明的这个实施例，过程 40 中采用的矩阵 [S] 及其逆矩阵 $[S^{-1}]$ 是基于震动器 V 的实际震动测量结果，例如用图 1 中传感器(加速度计)5 以及可用于测量震动器 V 实际工作的这类其它传统传感器获得的。此外，由于许多畸变效应(尤其是谐波效应)与震动的频率有关，依照本发明较佳实施例的方法，利用在震动器 V 和地震检波器 G 二者上测得的复数频域系数，分别根据范围内的离散频率进行工作。

参考图 4，照此分离过程 40 从过程 42 开始，在过程 42 中，确定第一频率 f_k 下的逆复数矩阵 $[S^{-1}]$ 。系统计算机 24 通过从存储器检索震动器 V 在频率 f_k 下的频域震动测量结果的幅度和相位，确定这个频率 f_k 下的逆矩阵，接着利用传统的数值分析技术确定原始矩阵 [S] 的行列式和余因子，产生逆矩阵 $[S^{-1}]$ 的系数。从以下，逆矩阵 $[S^{-1}]$ 是基于过程 32 中震动器 V 在产生震动能量中的实际动作。

例如，如果在第一次扫描中震动器 V_A 完全未能工作，如果震动器 V_0 在第四次扫描中具有相位和幅度误差，对于给定的频率 f_k ，对于上述相位编码的四次一组扫描，矩阵 [S] 将以下式出现：

$$[S] = \begin{pmatrix} 0 & i & i & -1 \\ i & 1 & -1 & i \\ i & -1 & 1 & i \\ -1 & i & i & 0.7 + 0.1i \end{pmatrix}$$

对于这个例子，在过程 42 中确定的频率 f_k 的逆矩阵 $[S^{-1}]$ 将产生下式：

$$\begin{pmatrix} 0.37 - 0.014i & 0.007 - 0.315i & 0.007 - 0.315i & -0.37 + 0.014i \\ 0.007 - 0.315i & 0.158 + 0.003i & 0.342 + 0.003i & -0.007 - 0.185i \\ 0.007 - 0.315i & -0.342 + 0.003i & 0.158 + 0.003i & -0.007 - 0.185i \\ -0.37 + 0.014i & 0.007 - 0.0185i & -0.007 - 0.185i & 0.37 - 0.014i \end{pmatrix}$$

如上所注明的以及如下将要说明的，可以利用逆矩阵 $[S^{-1}]$ 方便地确定频率 f_k 下震动物器 V_A 至 V_b 到地震检波器 G_i 的每条路径的大地响应。

根据本发明的较佳实施例，接着进行过程45，从过程42建立逆矩阵 $[S^{-1}]$ 的质量值。对于这里所述的分离过程30而言，过程45是任选的，相信对分辨这样的频率是有用的，即在这些频率下，解是如此不稳定以致对这里所述的频域处理打折扣。例如，在扫描范围以外的频率上，频率响应是乎是不可靠的，因为在这些频率上谐波效应是很严重的。在这里所述的过程45的例子中，确定质量值，作为频率 f_k 下传递或响应函数的结果能够与之相乘的加权因子(动作好的操作接收最大加权因子1)。另一方面，可以用质量因子导出施加到分离最终结果的滤波器，或作为现场质量控制测量，以致如果质量值太低，可以重新进行一次或多次扫描。

如图4所示，通过计算频率 f_k 下的矩阵 $[S]$ 的本征值 λ ，也称为特征值，过程44启动过程45。正如本领域人员所熟知的，根据本发明的这一实施例，复数矩阵，如矩阵 $[S]$ 的本征值本身就是复数。已经观察到，对于矩阵 $[S]$ 特性差的这些情况，即当矩阵 $[S]$ 的本征值 λ 中的一个或多个很小时的情况，大地响应函数 h 的确定是不可靠的。因此，根据本发明这个实施例，决断43是确定质量值 QV ，该值与矩阵 $[S]$ 本征值的大小有关，尤其与最小本征值的大小有关。例如，质量值 QV 可以定义为下式：

$$QV = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}$$

式中： λ_{\max} 和 λ_{\min} 是矩阵 $[S]$ 的本征值集的最大和最小绝对值；在这个例子中，质量值 QV 相当于矩阵 $[S]$ 的条件数。于是，当矩阵 $[S]$ 特性差时， QV 高。当然，另一方面，可以采用质量值 QV 的另一种定义来测量解的稳定性和准确度；例如，质量值 QV 可以对应于矩阵 $[S]$ 条件数的函数或本征值的另一个函数。因此，根据本发明的较佳实施例，决断43通过将质量值 QV 与极限进行比较确定对于频率 f_k

而言矩阵[S]是否特性很差。如果 QV 超过极限，那么在过程 46a 中产生矩阵[S]在频率 f_k 下的缩小加权因子；例如，加权因子可以是质量值 QV 的倒数。另一方面，如果矩阵[S]特性很好(即它的质量值 QV 小于规定极限)，那么它的加权因子可以保持为 1(过程 46b)。

根据本发明的较佳实施例，过程 45(如果进行的话)之后，接下来进行过程 47，确定勘测区中震动器 V_A 至 V_B 到地震检波器 G 的所有路径的传递函数 h_A 至 h_B (在这个例子中)。可以依照不同替代技术进行过程 47，现在将对此进行描述。

如上所讨论的，以地震检波器 G_i 为例，下面的矩阵方程式对应于给勘测区施加源能量：

$$[R] = [S] \cdot [h]$$

式中[R]是四次扫描时地震检波器 G_i 的地震记录集合，[S]是在四次扫描中由震动器 V_A 至 V_B 施加的源能量矩阵，[h]是传递函数矩阵。照此，由于通过过程 34 的测量，[R]和[S]是已知的，在过程 42 中找出逆矩阵 $[S^{-1}]$ ，通过下列矩阵相乘，可以由过程 47 求解频率 f_k 下的传递函数[h]：

$$[h] = [S^{-1}] \cdot [R]$$

通过上述的系统计算机 24 能够方便地进行这个矩阵相乘，对于本专业人员而言将是显而易见的。

然后进行决断 48，决定是否通过分离过程 40 继续对增大的频率进行分析。如果是，控制进到过程 49，在这个过程中，将频率指数 k 增大到测量震动频域表示的下一个离散频率。当然，如果没有另外的频率要分析，控制进到图 3 的过程 50。

上面的方法采用传统相位编码方案，在该方案中，在每次扫描期间，在过程 32 中对每个震动器 V 进行激励。由于本发明的这个实施例考虑了在一定的扫描中失去震动器或震动器不工作，根据本发明的另一替代实施例，在过程 32 中每一次扫描期间有意地关闭一个震动器 V 或者不激励它。根据本发明的这个替代实施例，不必进行相位编码(即所有的震动是相互同相的)。于是，在本发明的这个替代实施例中，理想源震动矩阵[S](对于所有频率)则为：

$$[S] = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

当然，再次进行震动器 V 的震动测量，以计及非重复能力的问题、非线性、谐波耦合等等。在理想情况下，对于这个例子，在过程 42 中确定的频率 f_k 的逆矩阵 $[S^{-1}]$ 则为：

$$[S^{-1}] = \begin{pmatrix} -0.667 & 0.333 & 0.333 & 0.333 \\ 0.333 & -0.667 & 0.333 & 0.333 \\ 0.333 & 0.333 & -0.667 & 0.333 \\ 0.333 & 0.333 & 0.333 & -0.667 \end{pmatrix}$$

再说，矩阵 $[S^{-1}]$ 的实际值将依赖于震动器 V 上测得的震动。除了采用不同的编码方案外，根据本发明这个实施例的方法，其余的部分按照如上所述的过程进行。

现在参考图 5，将描述依照本发明另一替代实施例的分离过程 40'。过程 40' 与上述的过程 40 类似，是确定震动器 V_A 至 V_D 到地震检波器 G 的所有路径的传递函数 h。然而，根据过程 40'，通过对基于该过程的方程式系的过指定并结合利用震动源上测得的实际震动，可增大确定大地响应的可靠性。

在消除记录地震震动中噪声影响中，由本发明这个替代实施例获得的这个可靠性增加是特别有用的。众所周知，勘测中地震检波器 G 经常检测到与震动器 V 产生的震动能量无关的震动，或者会产生与任何震动无关的信号；这种无关震动或寄生信号通常被称为噪声，显然，它们降低了准确区分和分析所产生震动能量的勘测能力。

因此，在通常意义上，可以考虑下式表示的多次扫描中第 n 次扫描的单个地震检波器 G 记录的复合地震记录 R_n ：

$$R_n = A_n \cdot h_A + B_n \cdot h_B + C_n \cdot h_C + D_n \cdot h_D + N_n$$

如前所述， R_n 是第 n 次扫描的地震检波器 G 记录的复合频域表示， A_n 是第 n 次扫描的震动器 V_A 的源震动数据， B_n 是第 n 次扫描的震动器 V_B 的源震动数据，以此类推。此外，在这个方程式中有一个 N_n 项，表示噪声对扫描的贡献。由此可见，

对于大地响应或传递函数 h ，由于存在该噪声项 N_n ，上式所表示的方程式系的解将变得复杂化。因此，降低记录的地震记录中噪声影响，提高震动地震勘测的准确度和分辨率是有用的。

根据过程 40'，该过程是上式分离过程的另一替代实施例，降低记录的地震记录中噪声影响。现已观察到，震动地震勘测中记录的噪声最主要的是所谓的随机噪声；换句话说，一次扫描中记录的噪声通常与以后各次扫描中记录的噪声不相关。正如现在说明的，过程 40'利用记录的噪声的随机性消除它在多次扫描中的影响。

首先，根据本发明的这个实施例，在过程 32(图 3)中必须进行多于勘测中震动物器 V 个数的多次扫描。换句话说，必须对地震记录 R_n 的方程式系进行过指定。较佳地以某种方式，如上述的相位编码，对每个震动物器 V_A 至 V_D 的能量进行编码；多出的这次扫描(即四个震动物器的第五次扫描)可以简单地重复以前进行的一次扫描，或者代之以相位编码方案预计进行的第五次扫描。在图 1 所示的勘测中，激励四个震动物器 V_A 至 V_D ，由下式表示五次扫描的过指定：

$$\begin{aligned} R_1 &= A_1 \cdot h_A + B_1 \cdot h_B + C_1 \cdot h_C + D_1 \cdot h_D + N_1 \\ R_2 &= A_2 \cdot h_A + B_2 \cdot h_B + C_2 \cdot h_C + D_2 \cdot h_D + N_2 \\ R_3 &= A_3 \cdot h_A + B_3 \cdot h_B + C_3 \cdot h_C + D_3 \cdot h_D + N_3 \\ R_4 &= A_4 \cdot h_A + B_4 \cdot h_B + C_4 \cdot h_C + D_4 \cdot h_D + N_4 \\ R_5 &= A_5 \cdot h_A + B_5 \cdot h_B + C_5 \cdot h_C + D_5 \cdot h_D + N_5 \end{aligned}$$

式中 N_n 项对应于方程式系中的记录噪声。假设噪声项 N_n 是随机的，在关心的频率上 $\sum N_n = 0$ ，记录 R_n 表示为以下的系组：

$$\begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 & C_1 & D_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 & D_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 & D_3 \\ A_4 & B_4 & C_4 & D_4 \\ A_5 & B_5 & C_5 & D_5 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h_A \\ h_B \\ h_C \\ h_D \end{pmatrix}$$

或者，这里矩阵 $[S]$ 对应于震动物器 V_A 至 V_D 的源震动矩阵：

$$[R] = [S] \cdot [h]$$

然而，由于扫描次数大于震动物-地震检波器路径的数目(即矩阵[S]代表一个过指定的系)，矩阵[S]不是正方形矩阵。于是，必须经过几个步骤才能进行传递函数[h]的上述矩阵方程式的解。例如，可以在以上方程式的两边乘以转置矩阵[S^T]，得到下列方程式：

$$[S^T] [R] = [S^T S] \cdot [h]$$

因此，利用矩阵[S]的“广义逆”可以求每条震动物路径的传递函数[h]的解，表示为：

$$[h] = [S^T S]^{-1} \cdot [S^T] [R]$$

这些关系用在图 5 所示的分离过程 40'中，现在将对此进行描述。分离过程 40'从过程 52 开始，在这个过程中，系统计算机 24 对震动物 V 在频率 f_k 下测得的震动的幅度和相位信息(即矩阵[S])进行检索；过程 52 进一步包括从矩阵[S]确定转置矩阵[S^T]。众所周知，通过每个矩阵元的位置指数倒转(即行变成列)可以简单地过程 52 中转置矩阵[S^T]的确定，由系统计算机 24 能够方便地进行转置矩阵的确定。较佳地，只要系统计算机 24 编制的程序在接下来的步骤中能以转置方式检索矩阵[S]的复数系数，在过程 52 中不必增加对转置矩阵[S^T]的矩阵元的存储。

接着进行过程 54，在这个过程中，系统计算机 24 产生频率 f_k 下的逆矩阵 $[S^T S]^{-1}$ 。较佳地，过程 54 首先进行矩阵相乘 $[S^T] \cdot [S]$ ，然后在系统计算机 24 的能力范围内通过一般的数值步骤，确定逆矩阵 $[S^T S]^{-1}$ ，如上所述，它涉及乘积矩阵 $[S^T S]$ 的行列式和余因子的计算。如果需要那么可以进行任选过程 56，它与上述的分离过程 40 中过程 45 相类似，是确定频率 f_k 下勘测中进行的扫描正则性的加权因子指数(即“动作是如何好”)。正如针对过程 45 所述的，可以用这个加权因子调节这些频率下的勘测结果，这里，噪声、非线性、谐波或其它现象对该频率 f_k 下的结果带来一定疑问。

过程 54 或过程 56 之后，根据具体情况，分离过程 40'确定各个震动物 V 与地震检波器 G_i 之间每条路径的大地响应，按照传递函数矩阵[h]给出的。这是在过程 57 中进行的，在该过程中，通过系统计算机 24 进行一般数值矩阵乘法运算，将复数逆矩阵 $[S^T S]^{-1}$ 加在每次扫描的地震检波器 G_i 的记录上(即加到乘积矩阵上 $[S^T] [R]$)。于是，过程 57 的结果是，通过分离过程 40'确定地震检波器 G_i 对应

于每条震动器-地震检波器路径的传递函数 $[h]$ 集合。

当然，虽然以上所述的分离过程 40' 仅针对一个地震检波器 G_i ，但是应当明白，对于勘测区中的每个地震检波器 G 在频率 f_k 下都可进行过程 40'。

过程 57 之后，进行决断 58，确定是否继续根据分离过程 40' 对增大的频率进行分离。如果是，频率指数 k 增大到频域数据中对应震动器 V 和地震检波器 G 检测到震动数据的下一个离散频率。然后对于该频率重复过程 40'。一旦完成对所有的所需频率的分离(即决断 58 返回到“否”)，控制进入到过程 50，进行勘测数据的进一步处理。

反过来参考图 3，完成分离过程 40 或是 40'，现在可以利用地震勘测中产生的每条震动器-地震检波器路径的分离的大地响应函数进行过程 50。根据每条路径找出的传递函数和大地响应产生地震勘测结果的具体方法是本领域常用方法，根据地质专家的需要选择特定过程。

现在参考图 6a 和 6b，详细描述根据上述的分离过程 40、40' 结果进行地震勘测的过程 50 的另外两个实施例。图 6a 和 6b 所示的过程 50a 和 50b 相互分别等同，图 6a 所示过程 50a 是在频域中进行的，图 6b 所示的过程 50b 是在时域中进行的。从以下的描述中显而易见，过程 50a、50b 在系统计算机 24 的能力之内。

首先参考图 6a，先进行过程 62，在这一步中选择分析用的特定地震检波器 G_n ；然后，过程 64 选择第一震动器 V_i ，因此选择了过程 50a 第一步中分析用的震动器 V_i 与地震检波器 G_n 之间的路径。然后进行过程 66，在这个过程中，由系统计算机 24 从存储器中检索与震动器 V_i 与地震检波器 G_n 之间路径相对应的传递函数 h_{in} 的系数，作为频域表示中的每个频率点。照此，检索过程 66 对传递函数 h_{in} 复数系数的频域谱进行检索。如上所述，传递函数 h_{in} 中的这些系数也可以包括上述过程 45 产生的加权因子或者被这些加权因子修改，以致如果监测到的源震动系数矩阵特征不好可以对特定频率下的系数进行某个程度的折算。

在过程 68 中，频域系数 h_{in} 与第一次扫描 j 中震动器 V_i 监测到的源震动的频域系数 I_j 相乘。过程 68 中这个相乘仅仅是传递函数 h_{in} 中每个系数与扫描 j 监测到系数 I_j 集合中相同频率系数的点-点相乘。然后，过程 70 进行 $h_{in} \cdot I_j$ 这个乘积的逆离散傅里叶变换，将这个结果变换到时域中。因此，过程 70 的结果是利用它们之间路径的传递函数 h_{in} ，与地震检波器 G_n 上实际检测到的唯一基于震动器 V_i 源震动的震动相对应的震动的时域表示；因此，这个结果是实际检测到震动的理

想表示, 这里, 将震动器 V_i 的贡献从其它震动器 V 的贡献中分离出来。

然后进行过程 72, 通过这个过程, 扫描 j 中用于驱动震动器 V_i 的导频信号与乘积 $h_{in} \cdot I_j$ 的时域表示互相关。因此, 过程 72 的结果是震动能量到达地震检波器 G_n 的时基指示, 由此可导出反射界面的深度。当然, 众所周知, 通过将多条记录叠加(在这当中信号将得到加强, 而随机噪声趋于抵消)可以消除随机噪声对这种时基记录的影响。于是, 决断 71 确定是否继续对地震检波器 G_n 进行震动器 V_i 的附加扫描数据的分析; 如果是, 那么增大扫描指数(过程 73)控制进行到过程 68, 在这个过程中, 再次进行下一次扫描的传递函数 h_{in} 与源震动 I_j 的乘积, 重复以上的过程。

对于勘测中震动器 V_i 的所有次扫描, 完成频域相乘(过程 68)、逆 DFT(过程 70)和互相关(过程 72)后, 在过程 74 中系统计算机 24 将震动器 V_i 与地震检波器 G_n 之间能量的互相关记录叠加。因此, 产生的叠加记录适合在传统地震勘测方法中使用, 指示震动器 V_i 与地震检波器 G_n 之间产生的源震动的延时。

如图 6a 所示, 对于从每个震动器 V_i 到地震检波器 G_n 的能量可以重复这一过程, 通过决断 75 确定是否对地震检波器 G_n 进行增加的震动器 V_i 的分析; 如果是, 增大震动器指数 i (过程 76), 控制进行到过程 66, 重复对下一个震动器 V_i 的分析。如果对于地震检波器 G_n 已经进行了所有震动器 V 的分析, 那么决断 77 类似地确定是否以上述方式对增加的地震检波器 G 进行分析; 如果是, 那么增大地震检波器指数 n (过程 78), 控制返回到过程 64, 在这个过程中, 对于下一个地震检波器 G_n 敏感到其产生能量的所有震动器 V , 重复上述过程。

对勘测中所有震动器 V 和所有地震检波器 G , 在完成过程 50a 后, 然后进行过程 80, 通过这个过程, 按照所需方式安排地震勘测, 就象通常对震动地震勘测那样。例如, 过程 80 可以包括共深度点(CDP)收拢、正常时差(NMO)操作等, 它们给出更便于地质专家使用形成的勘测数据。然后完成图 3 所示的勘测方法。

在上述的过程 50a 中, 该方法中绝大部分是针对频域系数进行的。这种类型的运算尤其适合于对于装入数字信号处理器(DSP)的现代系统计算机 24, 因此, 这种计算机特别地适于进行频域运算和逆 DFT 运算。然而, 许多常规的系统计算机较为适合于时域运算, 如卷积运算。图 6b 所示的过程 50b 较为适合于这种类型的计算机。在图 6a 和 6b 中, 用相同标号表示过程 50a 中与过程 50b 中相同的步骤。

在图 6b 所示的过程 50b 中，与先前一样进行过程 62、64、66，从而由系统计算机 24 从存储器中检索所有频率下分析用的对应震动器 V_i 与地质检波器 G_n 路径的 h_{in} 传递函数系数。在过程 66 中检索到的系数已经被上述过程 45 产生的加权因子修改，对系统中特性差的这些频率上的系数进行折算。然后在过程 82 中，系统计算机 24 进行传递函数系数 h_{in} 的逆 DFT，产生一系列时域系数 δ_{in} ，代表大地对震动地震能量的时域脉冲响应。

对于第一次扫描 j ，进行过程 84，在这一步中，将脉冲响应序列 δ_{in} 与扫描 j 中震动器 V_i 监测到的源震动的时域记录 $I_j(t)$ 进行卷积。正如以上针对图 3 所讨论的，在过程 34 中记录传感器 5 监测到源震动，作为时域信号，然后通过过程 38 的 DFT，将其转换到频域中。因此，如果把过程 50b 当作分析过程，保留过程 34 的源震动的时域记录，供过程 84 之用是较佳的。当然，如果未保留时域表示（但是已经存储了频域转换表示），在进行过程 84 的卷积前，通过逆 DFT 运算可获得时域信号 $I_j(t)$ 。众所周知，脉冲响应序列 $\delta_{in}(t)$ 与扫描 j 中震动器 V_i 的源震动 $I_j(t)$ 的时域卷积将产生一个对应于震动器 V_i 对第 j 次扫描中地震检波器 G_n 记录震动的分离贡献的时域表示。

根据图 6b 所示的过程 50b，然后将过程 84 的卷积乘积与第 j 次扫描中用于驱动震动器 V_i 的导频信号进行互相关。以在过程 50a 中所述的方式进行这个互相关，产生震动能量到达地震检波器 G_n 的时基指示，在推导反射界面深度中它是有用的。

与图 6a 所示过程 50a 的情况一样，对于一对震动器-地震检波器 V_i ， G_n 进行的每一次扫描，重复过程 68、70、72，接着将互相关记录叠加，去除随机噪声的影响，结束过程 50b。然后，对于勘测中所关心的每一个震动器 V 和每一个地震检波器 G 进行上述过程，接着根据所需格式、收拢和时差校正安排过程 80 中的勘测。

根据过程 50a、50b 中任一过程，从每个地震检波器 G 记录的复合震动中分离各震动器 V 的贡献，从而对地震勘测作出准确判定。具体说，根据本发明这个实施例的分离震动信号的能力大大改善了勘测的分辨率，因为，能够对各个震动器与地震检波器之间的路径进行分析，而不再象现有技术的通常情况那样，限于对整个源阵列与每个地震检波器之间路径的广义分析。当然，分辨率的提高将会改善地震勘测的准确度及其对比较小但是很重要的地质特征的灵敏度。

现在参考图 7a 和 7b, 介绍震动地震勘测的一个例子。图 7a 示出从排成一行距震动器位置 V_A 不同距离的地震检波器上记录的一系列轨迹。在图 7a 中, 每一条垂直轨迹对应于一个地震检波器的记录, 图中以常规方式显示, 图中时轴从图的上部到下部, 自震动器位置 V_A 的距离从右到左增大。图 7a 所示的例子表明在同时使四个震动器 V 工作并根据本发明背景中所给出的表进行相位编码的勘测中对震动器 V_A 的能量贡献。然后采用相对该相位编码技术的相位分离的传统方法产生图 7a 的曲线。

现在参考图 7b, 该图示出图 7a 的勘测中震动器 V_A 的贡献, 这里, 根据本发明的较佳实施例进行震动器 V_A 贡献的分离。然后, 在每个频率下对每个地震检波器, 通过将(震动器 V_A)传递函数 h_A 与震动器 V_A 测得的源震动相乘, 接着对其结果进行逆 DFT 产生时域轨迹, 产生图 7b 所示的轨迹。

将图 7a 与图 7b 进行比较, 表明通过上述的本发明较佳实施例得到的改善。首先, 图 7b 区域 88b 所示的首次到达时间比图 7a 区域 88a 所示的首次到达时间规则和一致得多, 因此, 当利用近表面层中折射波的速度进行静态校正时, 改善了计及近表面层厚度偏差的能量。图 7a、7b 中区域 90a、90b 分别对应正在发生反射情况(即检测到地下界面的时间和距离)的勘测部分; 比较图 7a、7b, 表明在这个情况上区域 90b 的保真度大大高于区域 90a 的保真度, 方便了反射情况的分析和识别。此外, 对图 7a 与 7b 之间区域 91a 与 91b、92a 与 92b 分别进行比较, 表明本发明的较佳实施例通过降低更深勘测部分的高频噪声而改善勘测结果。

根据本发明的另一实施例, 可以执行过程 50, 通过 1995 年 5 月 5 日提交的 S.N. 08/435940 申请中所述的逆过程, 应用频域传递函数 $[h]$, 该申请已转让给美孚石油公司, 美孚石油公司允许这里引作参考。

根据这个方法, 频域中的每个传递函数 $h_{v-g}(f)$ (这里 v 和 g 表示指定震动器-地震检波器路径的震动器和地震检波器指数) 对应于反射率函数 E 乘以最小相位函数 M 。最小相位函数 M 加入了大地的一些影响(例如, 风化的近表面层)以及在产生输入震动能量中的震动器 V 的阻抗。

如上讨论的, 根据本发明的较佳实施例, 由传感器 5 测得直接来自震动器 V 的与大地表面中产生的有效力有关的最小相位信号。照这样, 在这个分析过程中采用实际信号代替现有技术通常采用的理论导频信号。正如这里引用的 1996 年 8 月 27 日颁发的第 5550786 号美国专利中所述, 以不必知道实际施加的力的方法

进行震动运动的记录和对记录地震数据的处理。唯一重要的因素是测量量直接与施加的实际力成正比。用这种方式，能够通过除法消除实际力。

根据本发明的这个实施例发现，震动器 V 上传感器 5 测得的运动与通过频域中最小相位传递函数传到大地的实际输出力或信号有关。因此，在频域中，测得的输出力信号 S 对应于震动器真实输出 U 与最小相位传递函数 T 的乘积：

$$S = U \cdot T$$

式中：· 代表频域中的相乘。传递函数 T 是真实的震动器输出 U 与测得的震动器运动 U 关联的最小相位、因果、线性的系。在这个方程式中最小相位传递函数 T 和实际输出源的力 U 都是未知的。

在频域中用实际源的力 U 的时间导数与大地反射率 E 的卷积表示地震检波器 G 检测到的地震记录 R，如下式所示：

$$R = j\omega \cdot U \cdot E$$

式中：R 代表测得的地震数据， $j\omega$ 代表时间导数，E 代表大地反射率函数。

通过利用最小相位带通滤波器的反向滤波，能够方便地计算 R/S 比。这个比值从下式的方程式中消除未知的 U、源输出力：

$$\frac{R}{S} = \frac{j\omega \cdot U \cdot E}{U \cdot T} = \frac{j\omega}{T} \cdot E$$

由此可见，从该方程式中消除了未知的实际震动力 U。通过反向滤波过程保存总能量，也需要比例因子。

现在用 R/S 表示地震图，与最小相位函数 $j\omega/T$ 进行卷积(在时域中)，该图构成大地反射率 E 的所需答复。最小相位函数的特点是它们的导数和它们的倒数也是最小相位。用最小相位的反卷积能够对地震图进一步进行处理，以获得 E，频域中大地的反射率脉冲响应。本质上，R/S 地震图是频带限制的脉冲地震图。它是与大地响应有关的因果和最小相位。这种方法的准确度高，因为已经不依赖于实际的、还是未知的源震动运动。

参考以上所讨论的方法，主要是针对过程 47，系统计算机 24 进行矩阵运算，提供 $[R]/[S]$ ；换句话说，这个比是 $[S^{-1}] \cdot [R]$ ，或者传递函数 [h]。如上所述，传递函数 [h] 是在每个频率 f_k 下从震动器 V 传感器 5 测量结果的源震动逆矩阵 $[S^{-1}]$ 与基于地震检波器 G 记录的震动的矩阵 [R] 的乘积：

$$[h] = [S^{-1}] \cdot [R]$$

在这个例子中，对于频率 f_k 下震动物 V_A 至 V_B 与地震检波器 G_i 之间所有四条路径，这个乘积产生频率上的传递函数 h 的矩阵 $[h]$ 。实际上，对记录 R 进行分离，提供每个地震检波器对于各个震动物 V 的轨迹。当然，如上所述，对于勘测中所关心的每一个地震检波器 G 可进行类似的操作。

现在参考图 8 和 9，详细描述根据本发明的这个替代实施例由系统计算机 24 进行过程 50''，这里，对每个地震检波器 G 的分离传递函数 h 集合，通过上述矩阵反演确定反射率 E 。如图 8 所示，过程 50'' 从过程 100 开始，通过从存储器进行检索，系统计算机 24 (在过程 40 中) 产生记录数据。如上所述，这个数据包括在所有感兴趣的频率上震动物 V_A 至 V_B 与地震检波器 G_i 之间所有四条路径的传递函数矩阵 $[h]$ 。可以将根据每条路径和每个频率的质量值 QV 产生的加权因子加到这个检索数据中，从而对扫描频率特性差的贡献进行折算。

过程 52 对应于对地震检波器 G 测得的信号进行除法和逆运算过程。过程 52 代表本发明和传统处理之间存在明显区别。在传统处理中，检索数据与导频信号相关，该导频是对实际传给大地表面的震动的响应所假设的理想波形。然而，如上所述，诸如耦合不良、非线性、底板弯曲等畸变效应会导致偏离这种理想情况的畸变。在本发明中，正如将要图 9 所述的，逆过程 102 取消了以前关于注入到大地中震动物力所作的这些假设。

现在参看图 9，详细描述根据本发明这个实施例的逆过程 102 的操作。过程 102 从过程 120 开始，在这一步中，辨认首次通过该过程的感兴趣的地震检波器 G_n ；在过程 122 中，系统计算机 24 从存储器中检索频率上地震检波器 G_n 的特定传递函数 $[h]$ 。如上所述，利用以前确定的分离传递函数 h 对应地震检波器 G 记录的信号 R 除以震动物 V 测得的震动 S ，但是，这里是在分离特定震动物 V 对复合记录 R 的贡献后进行这种除法。过程 124 指明将要进行这个逆通过的特定震动物 V_i ，因而限定这个逆通过中所关心的震动物 V_i 到地震检波器 G_n 的特定路径。

一旦确定路径，对于感兴趣的所有频率，过程 126 选择震动物 V_i 对整个记录矩阵 $[D]$ 贡献的传递函数 h_i 。一旦确定频率上的传递函数 h_i ，在过程 127 中，应用球形发散滤波器校正每条轨迹中在以后时间上信号幅度的衰减 (即使得信号对应于统计静止过程)。然后，过程 128 将最小相位滤波器应用到频率上的传递函数 h_i (例如，用最小相位滤波器的时域反卷积)，因此消除其中的最小相位函数

$j\omega/T$ 的影响并隔离震动物 V_i 与地震检波器 G_n 之间路径的大地反射率 E 。这个滤波可以通过频域的除法或是通过时域的反卷积来完成，与具体的系统计算机 24 有关。

然后，以嵌套顺序以及指数增大步骤 130、132 进行决断 129、131，对于勘测中震动物 V_i 与地震检波器 G_n 的每一种组合，进行反演和最小相位滤波。结果，对于勘测中所关心的每条路径，提供一反射率记录 E 。

在过程 104 中，产生勘测中每条路径的模型轨迹。这个模型轨迹基本是一条用尖峰信号记录原始数据相位和幅度的轨迹。后来利用产生的这种模型轨迹可去除任何在本发明预处理中引入的相位误差。

在过程 106 中，根据过程 104 的除法过程结果进行接收器反卷积。在较佳实施例中，这个接收器反卷积具有公共接收器收拢格式。在本发明中采用了 Wiener-Levinson 尖峰信号群反卷积，然而，可以采用任何采用公共接收器收拢格式去除各个接收器之间偏差带来的影响的反卷积。

过程 108 对过程 106 的数据进行接收器静力学校正。在较佳实施例中，不变的源位置收拢去除接收器静力学(即内群静力学)。然后，在过程 110 中利用不变源位置，用可变接收器收拢去除地面滚动，进行 F-K 滤波。在较佳实施例中，对于静力学校正和 F-K 滤波的采用相同收拢。在过程 112 中，对已经过校正的数据进行散粒反卷积。这个反卷积也具有 Wiener-Levinson 尖峰信号群反卷积类型。然而，象以前进行接收器反卷积一样，任何具有去除散粒噪声的公共散粒收拢类型的反卷积都是可以接受的。然后，过程 114 对已经承受接收器和散粒反卷积和静力学校正的数据进行零相位尖峰信号反卷积。这个反卷积是降低单色噪声的光谱白噪声化反卷积。这群尖峰信号反卷积对滤除最小相位大地的高频和短时间周期以及阻抗效应是适用的；这些最小相位效应包括震动物 V 上监测点之间存在的相应震动物 V 的动力学、大地表面的风化层效应、以及特定反射效应。然后把经过滤波的传递函数应用到尖峰信号反卷积过程，如 Robinson 和 Treitel 在地球物理学第 29 卷第 3 册(1964 年 6 月)“数字滤波原理”以及 Peacock 和 Treitel 在地球物理学第 34 卷第 2 册(1969 年 4 月)“预计反卷积：理论与实践”中所述，这两册都由 Robinson & Treitel Reader(SSC, 1969)重印，对应于震动能量沿特定路径双程时间的时域表示(即反射序列)。

然后在过程 116 中进行模型相移，利用过程 104 中为每条路径产生的模型轨

迹，记录原始相位和幅度，去除任何通过以前的处理步骤可能引入的相位误差。

因此，现已描述了本发明对高分辨率震动源数据进行记录和预处理的方法，它包括对测得信号的逆变换、接收器和散粒群反卷积、静力学校正、噪声的 F-K 滤波、零相位尖峰信号反卷积和模型相移等步骤。如前所述，利用与测得震动器运动提供信号有关的有效震动器信号对数据进行处理。该数据除以频域中实际传输的信号。然后通过正常收集和叠加过程(即图 8 中过程 118)，象通常进行震动器地震勘测一样，进行这一过程，产生地下地质和岩层位置和深度的截面估计结果。

根据上述替代实施例中的任何一个，本发明勘测区中每个地震检波器提供了允许分离震动勘测中同时激励的各个震动器的大地响应的重要能力。这种经过改善的分离是以允许同时激励多个震动器的方法进行的，因此提高了勘测工作的总体效率。这种经过改善的分离考虑了震动器工作中的非线性、震动器与大地的不良耦合、震动器的非重复能力以及其它的不理想特性，因此提高了勘测结果的准确度和勘测的分辨率。通过采用本发明，一个或多个震动器工作的间歇故障或噪声不会迫使重复一次扫描。参考本说明书，对于本领域普通专业人员而言，本发明的其它好处和优点是显而易见的。

虽然这里针对本发明的较佳实施例对其进行了描述，当然可以预料到，参考本说明书及其附图能够对这些实施例进行改进和替代，对于本领域普通专业人员而言是显而易见的，这些改进和替代能够获得本发明的优点和好处。预期这些改进和替代将落在权利要求中所述的本发明的范围内。

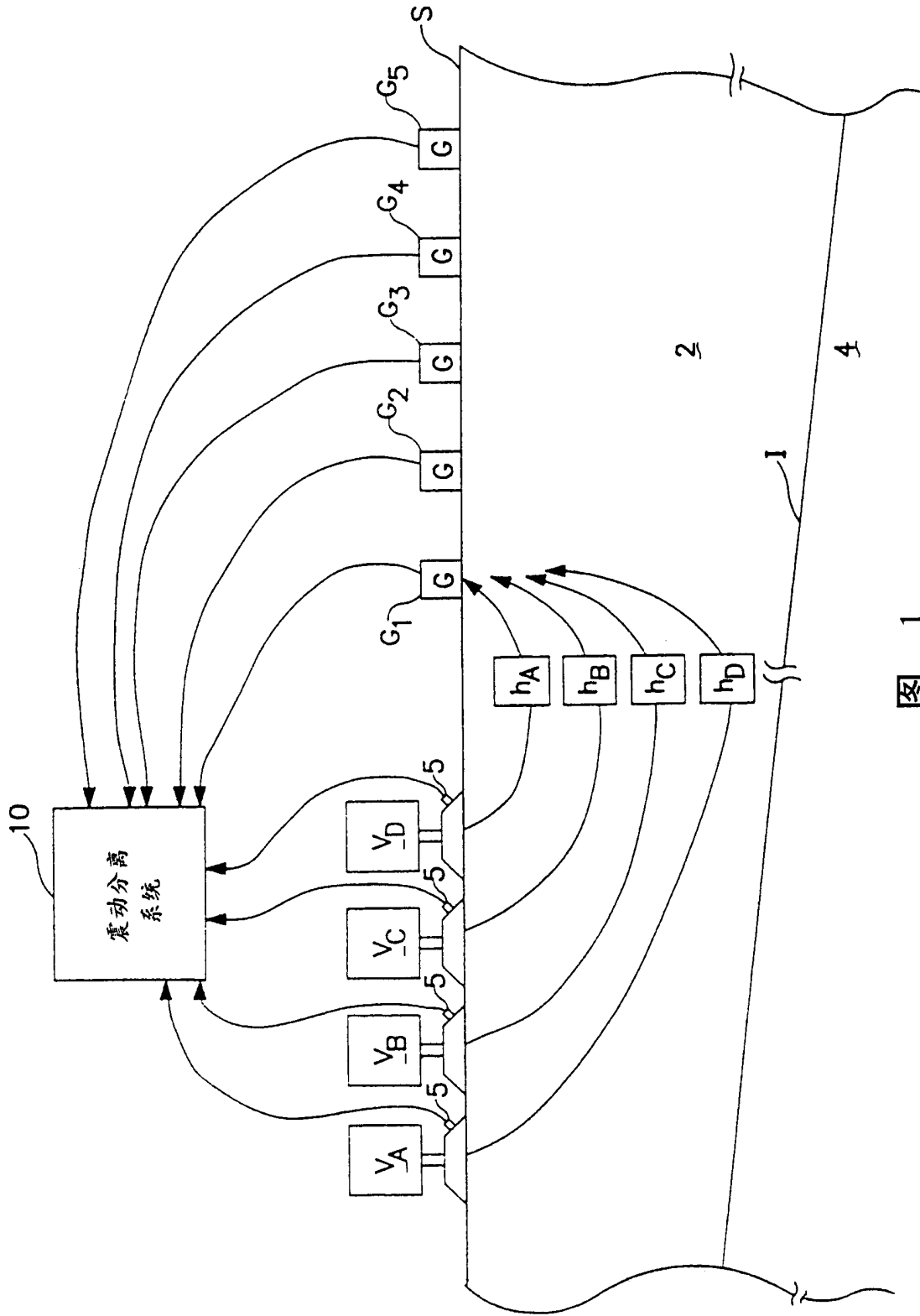


图 1

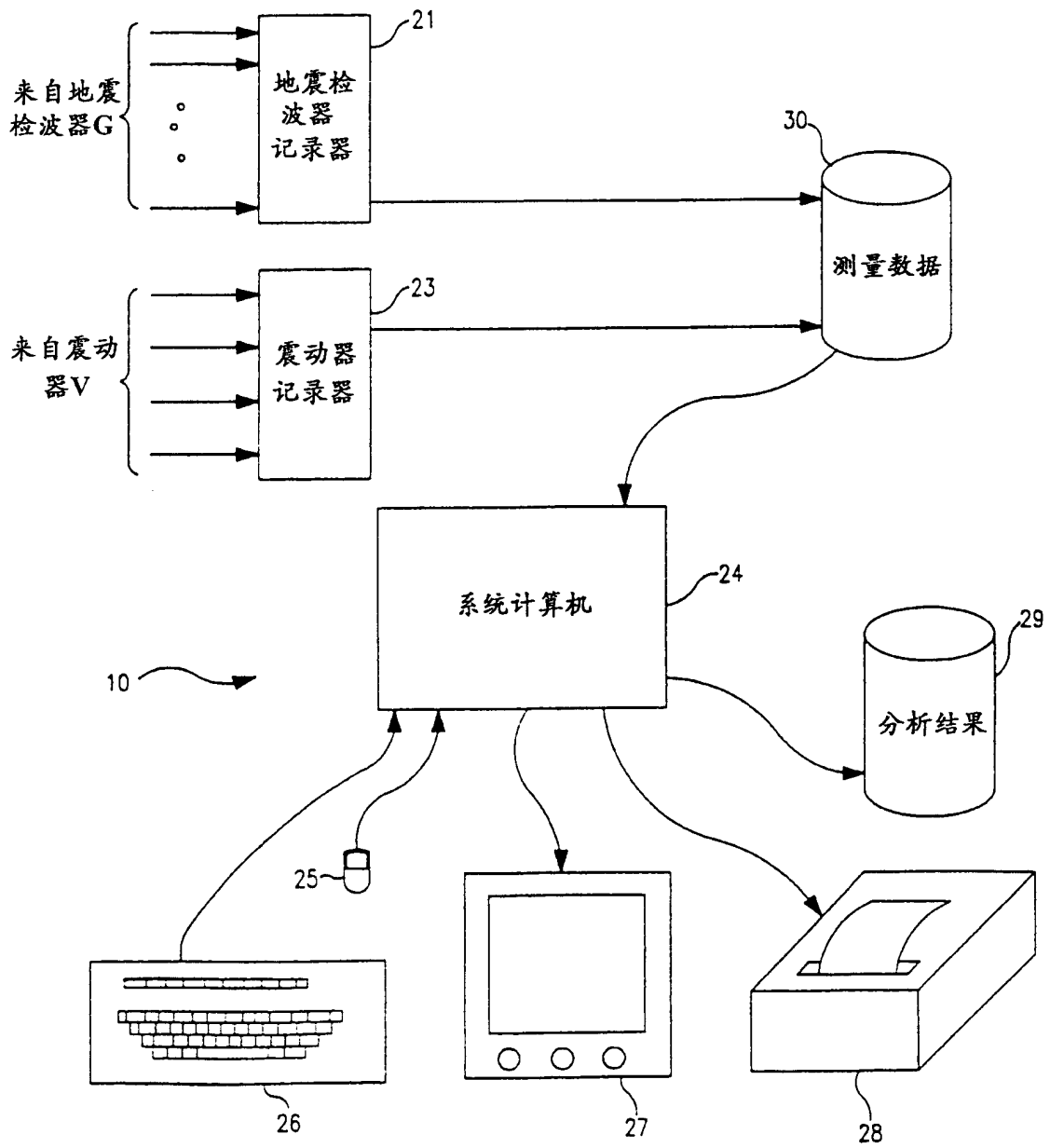


图 2

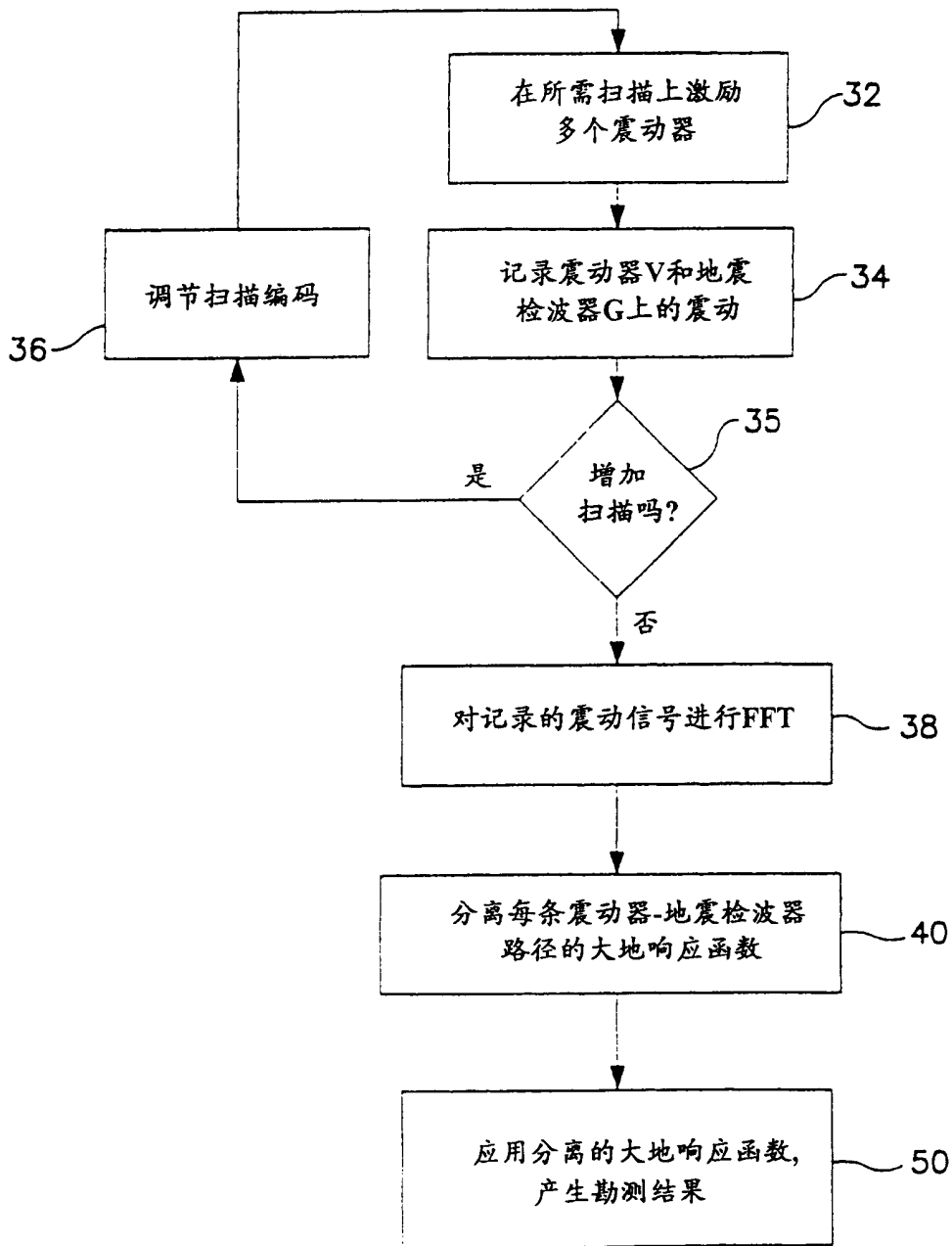


图 3

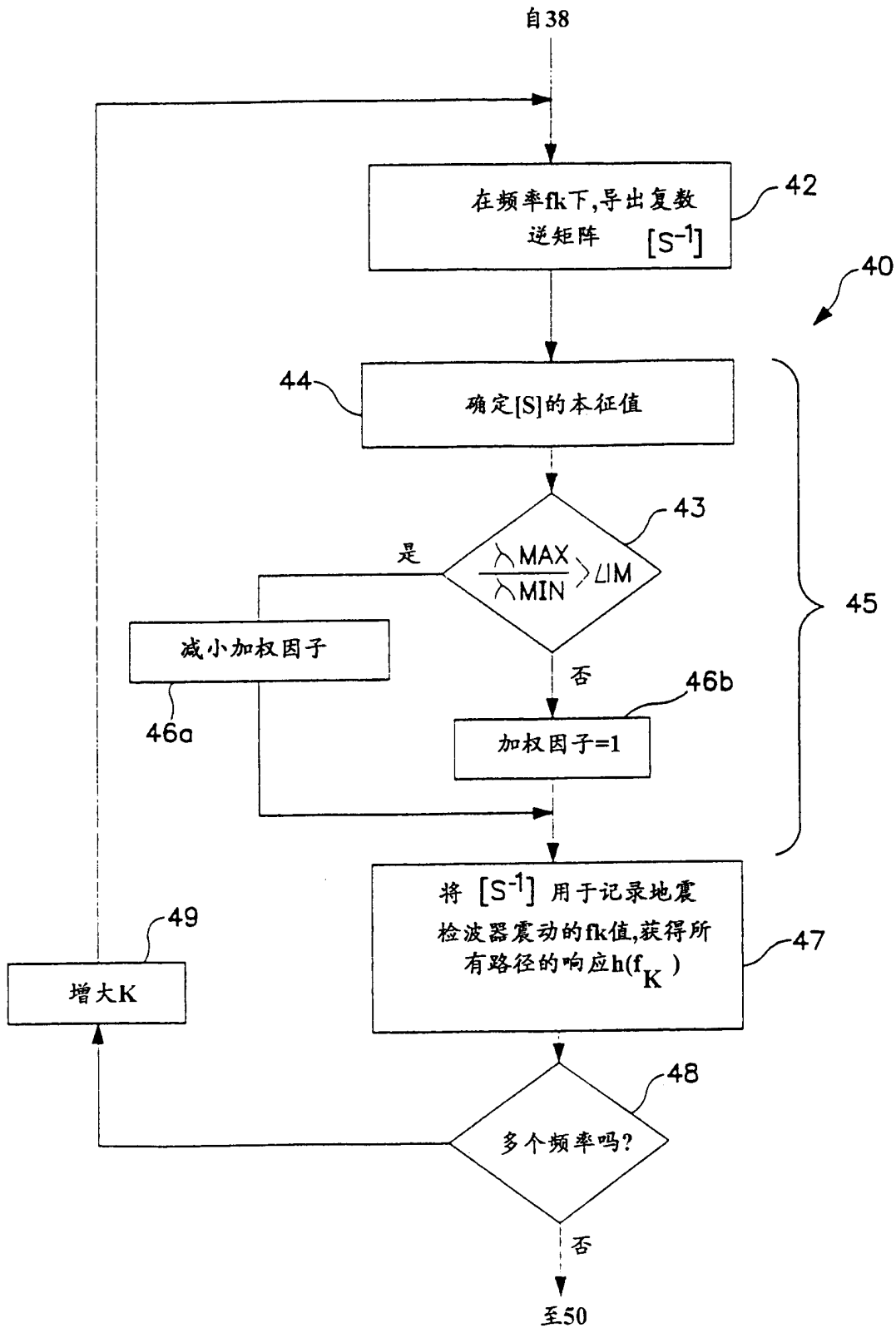


图 4

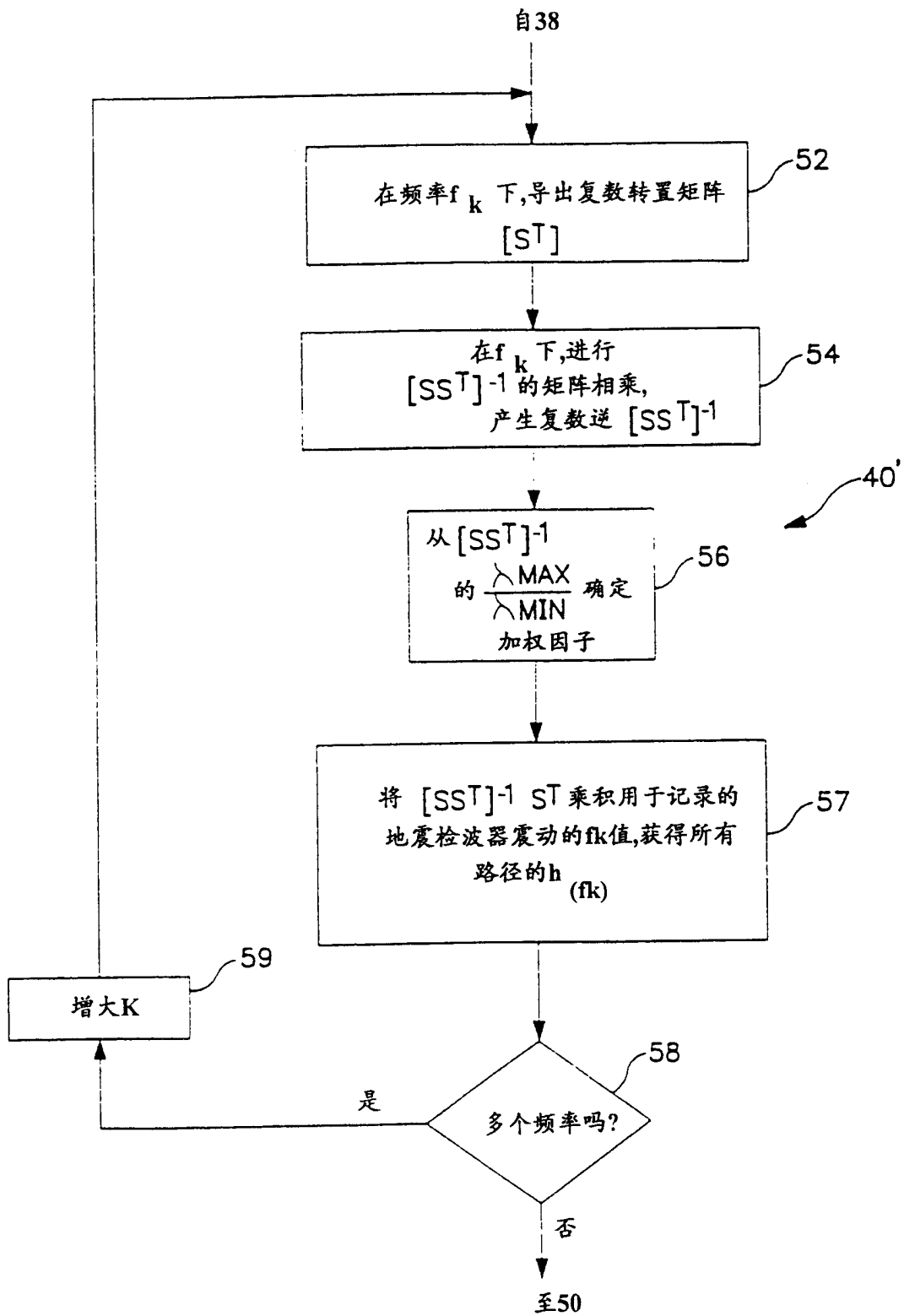


图 5

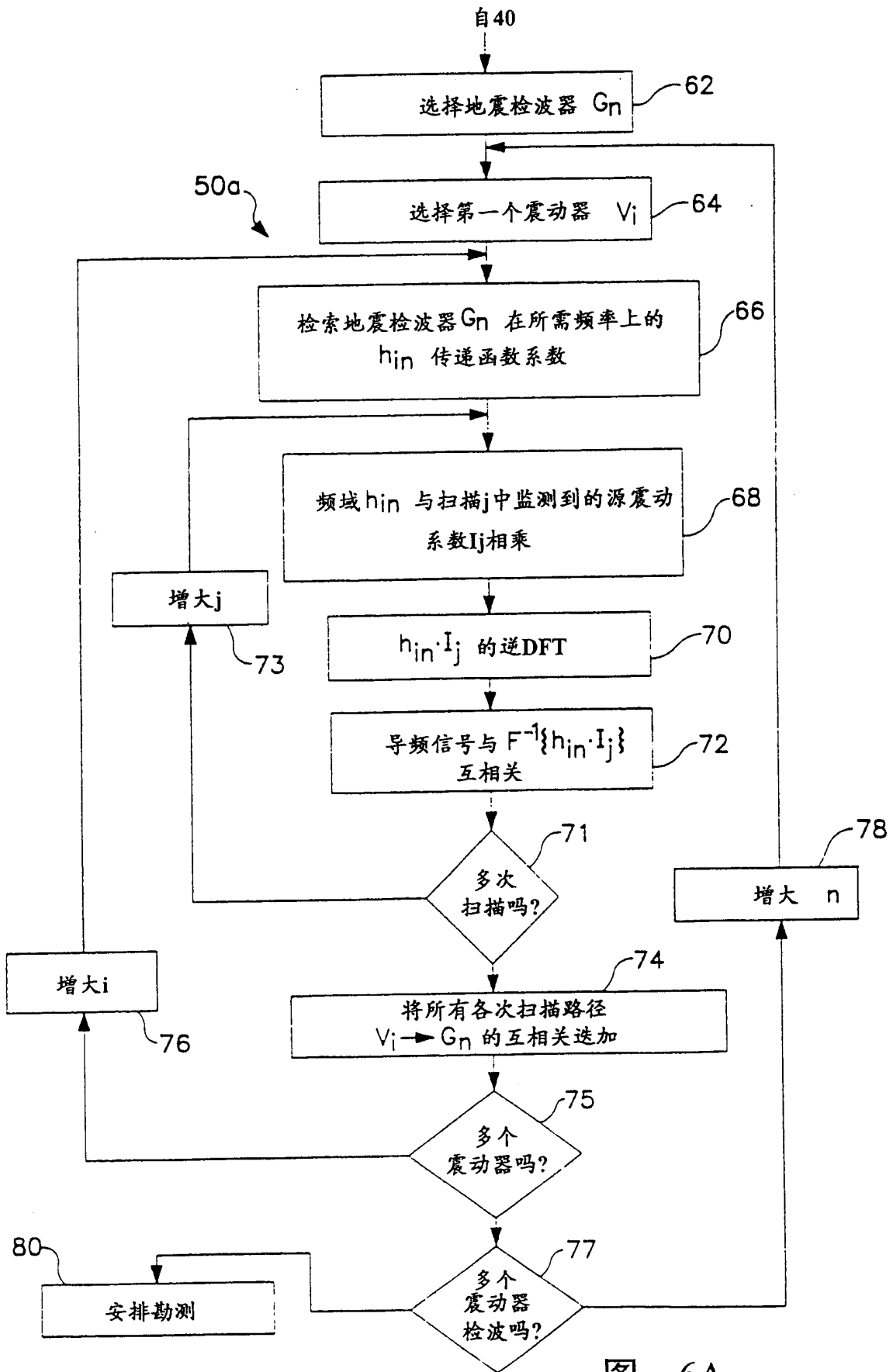


图 6A

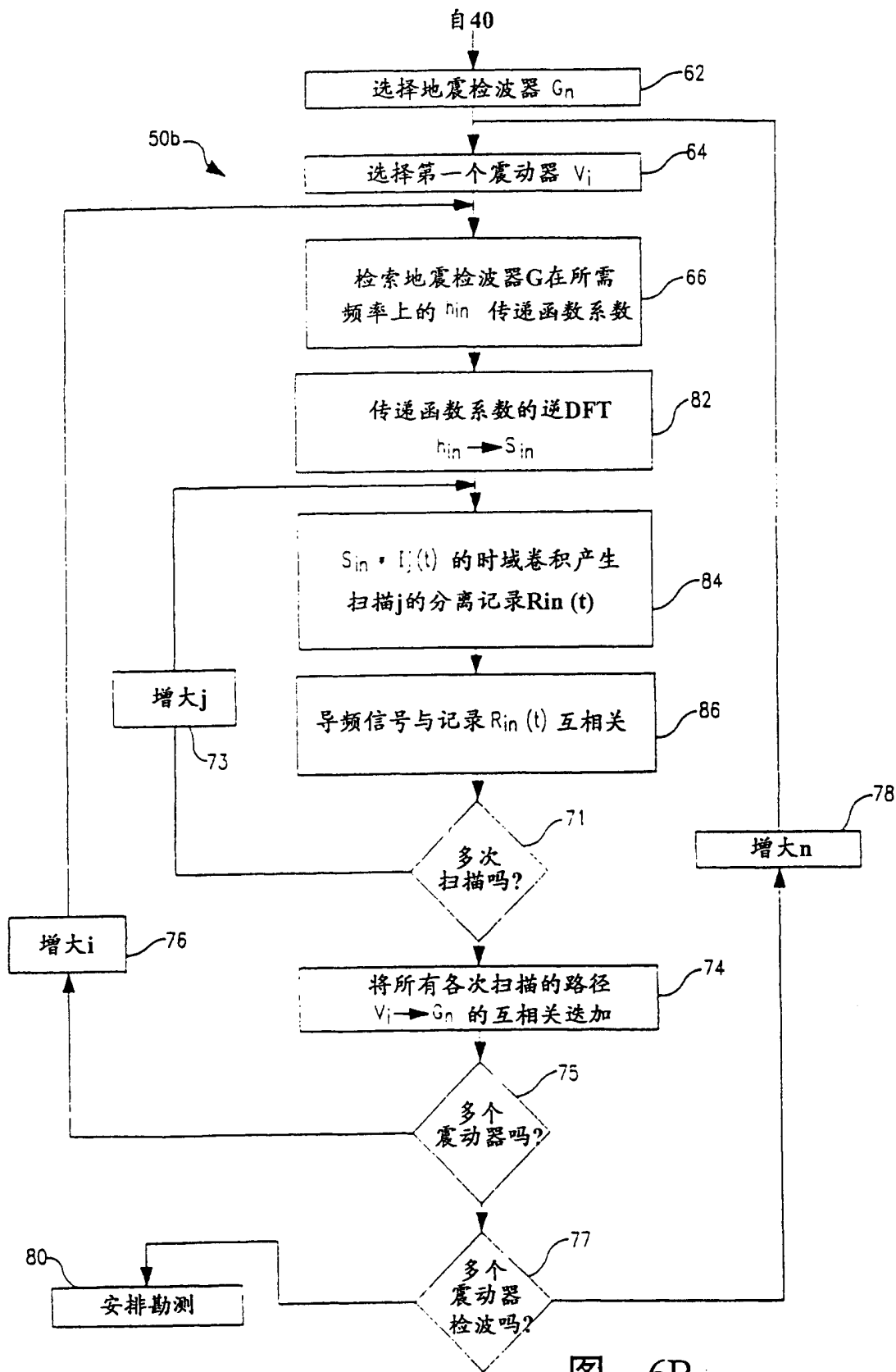
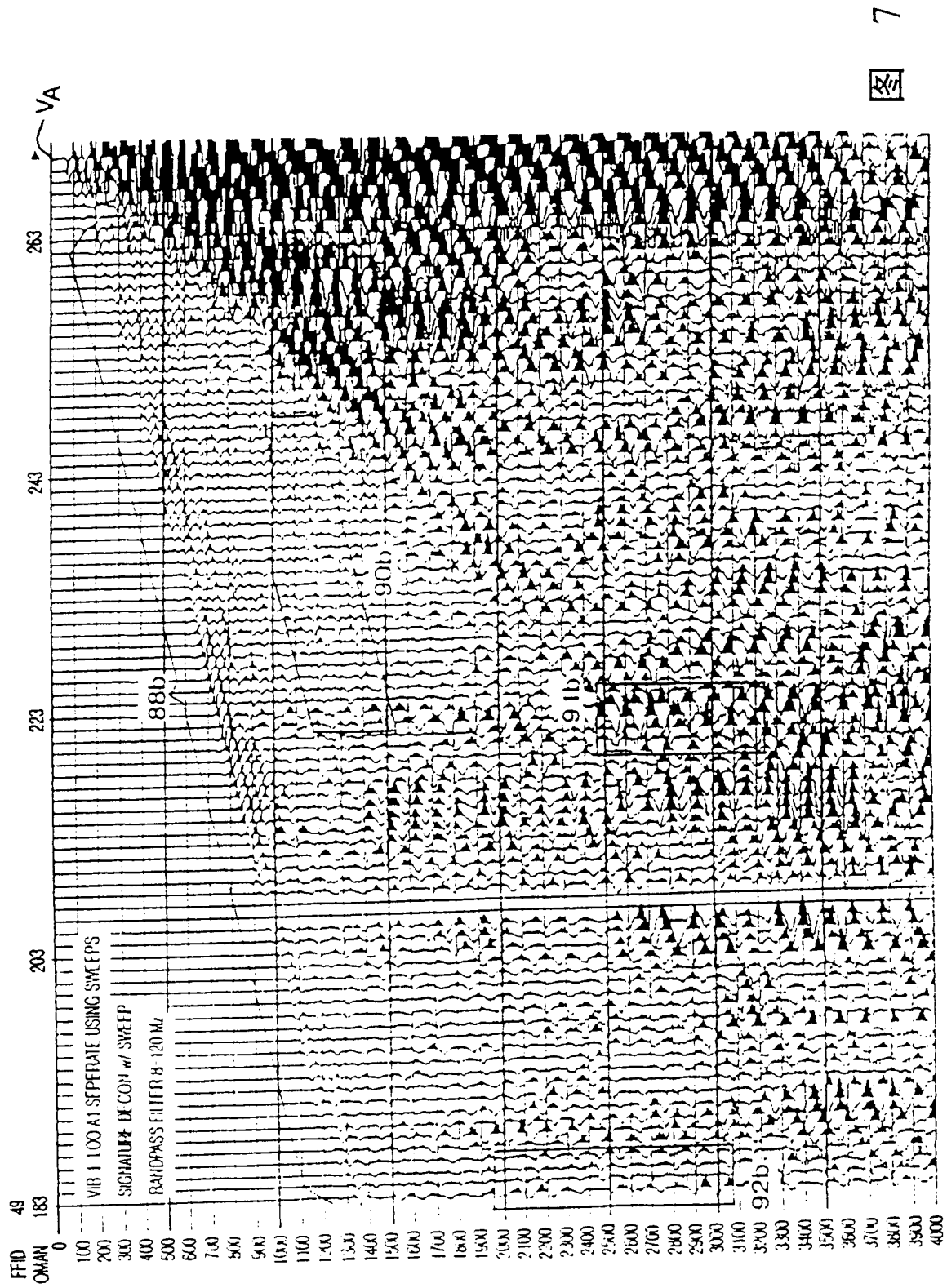
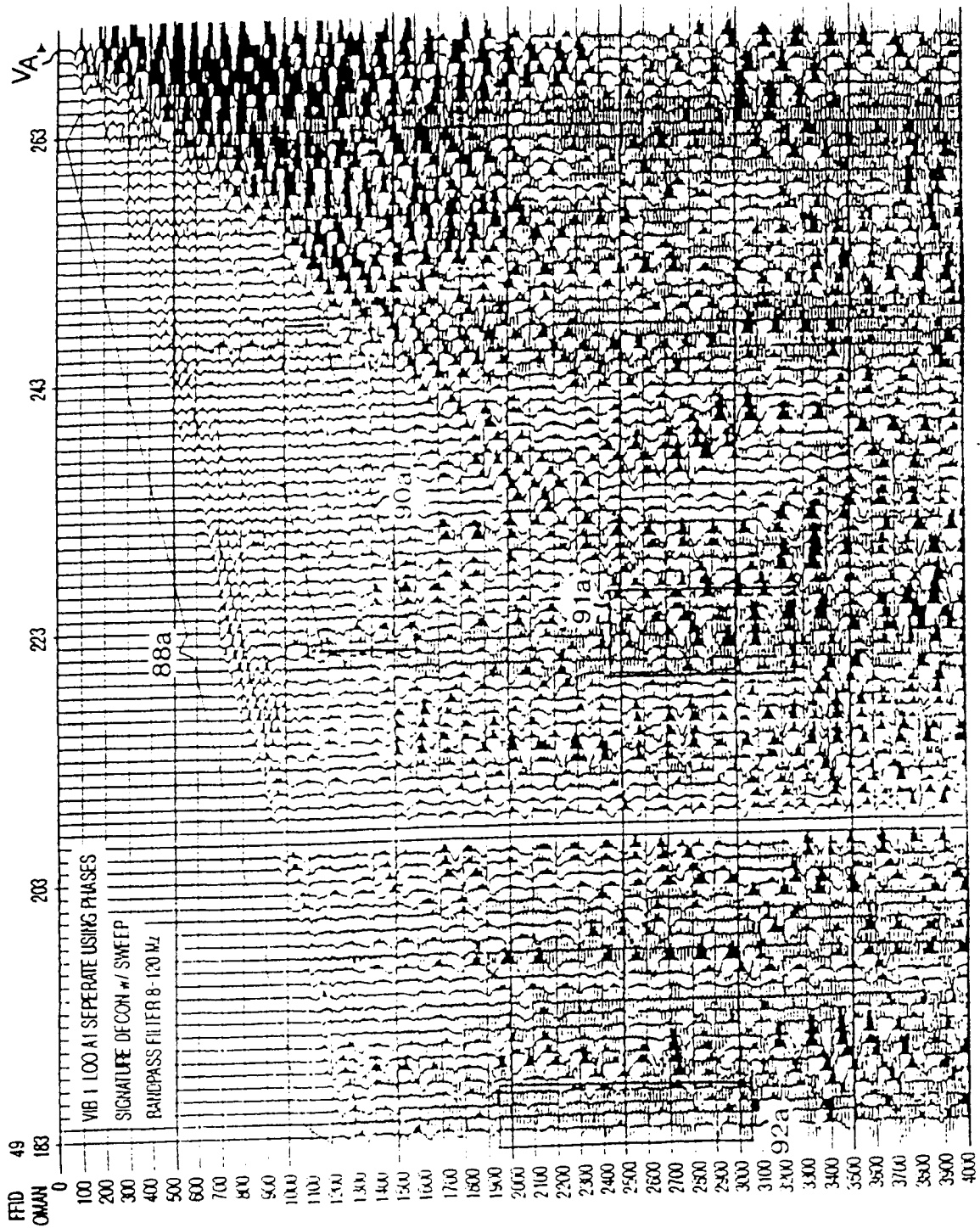


图 6B





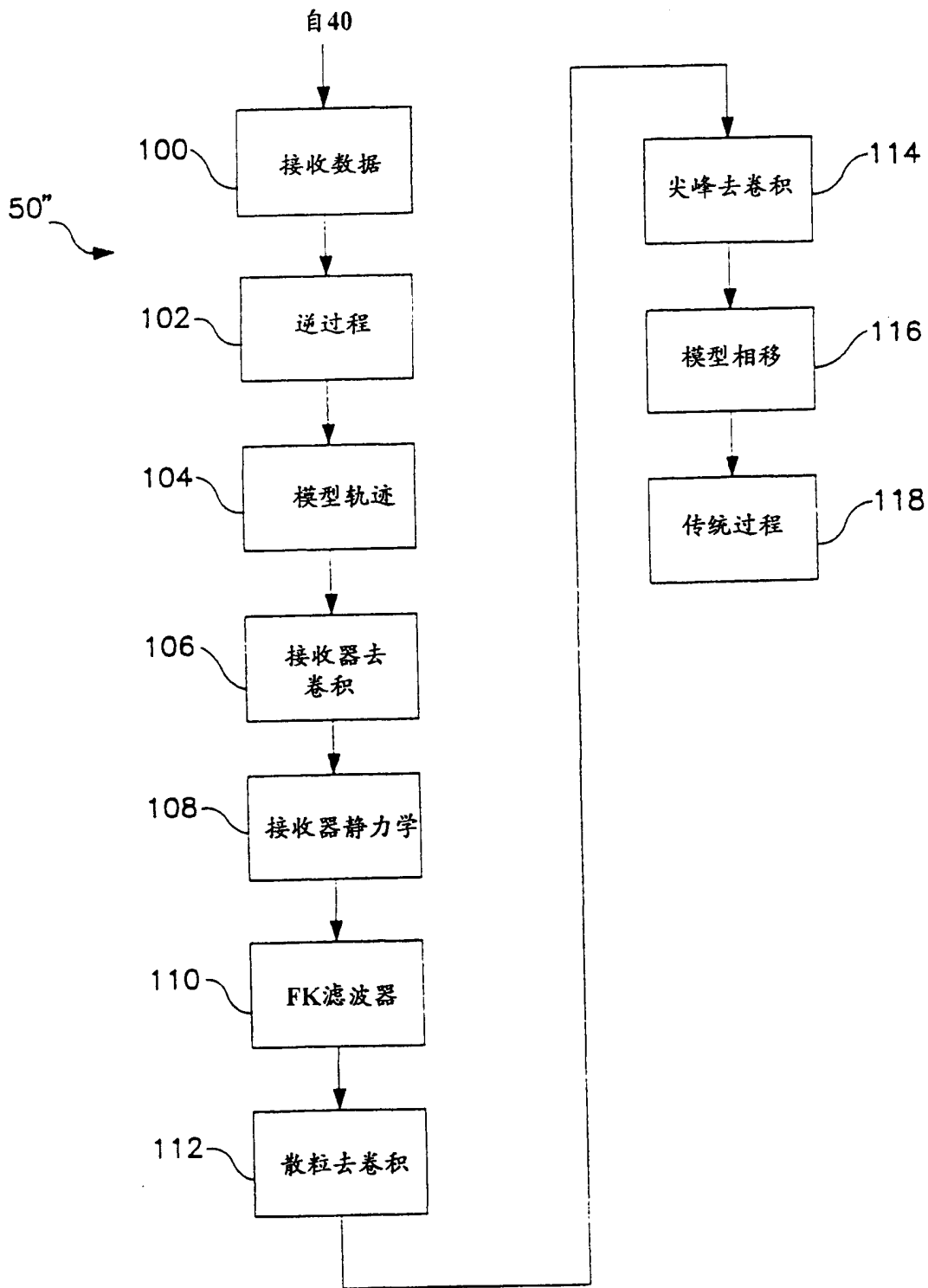


图 8

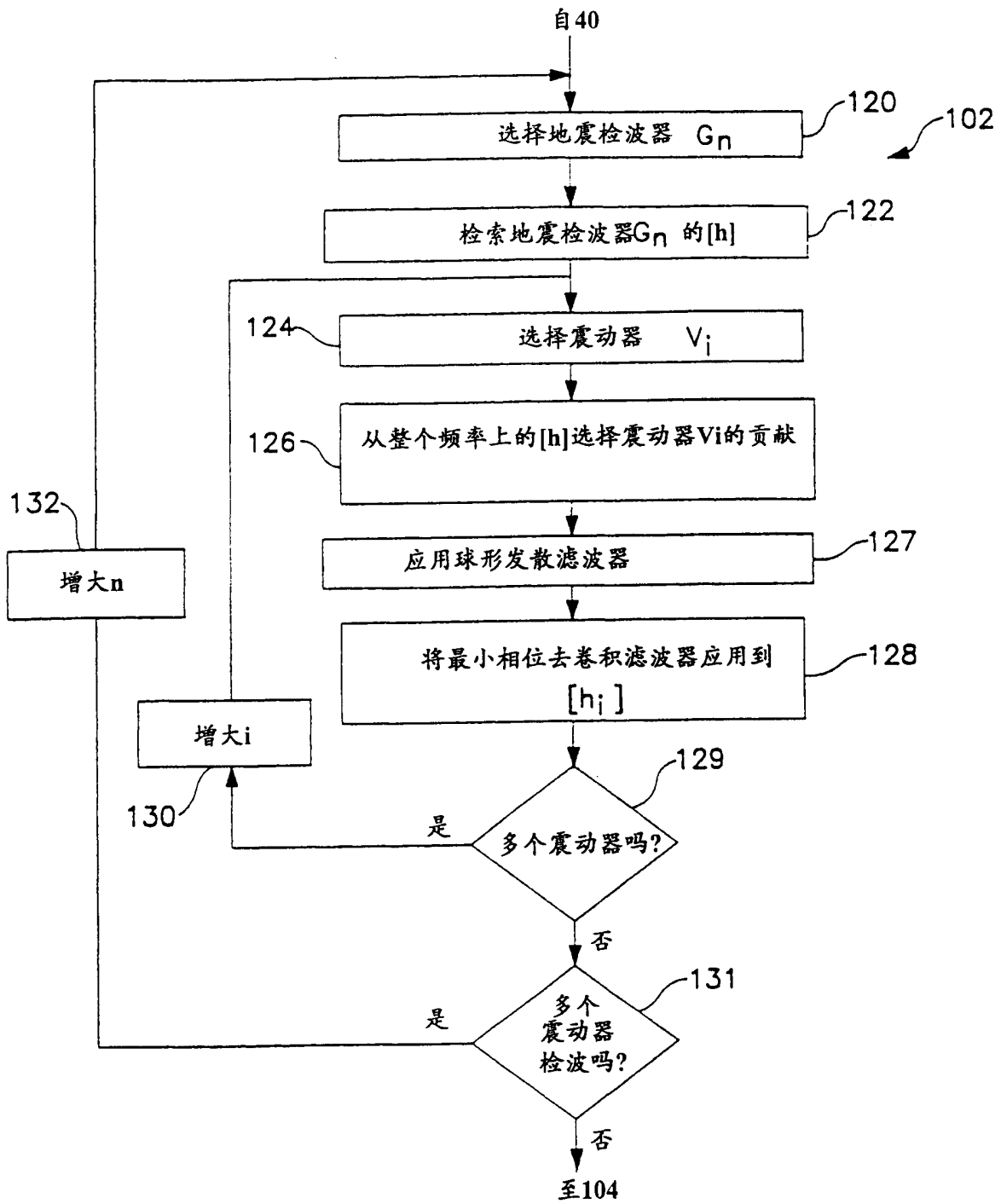


图 9

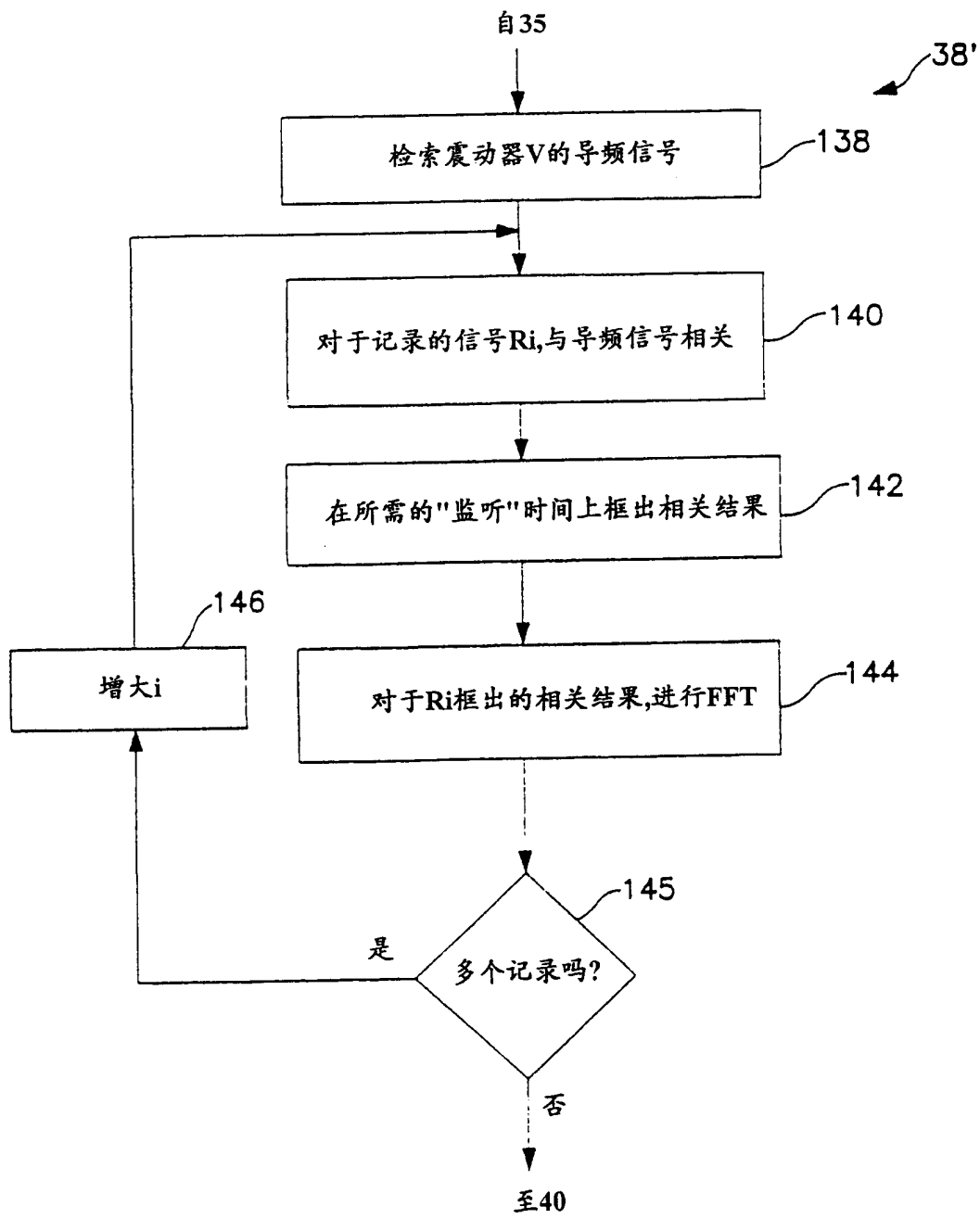


图 10