

(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101535840 B

(45) 授权公告日 2012. 09. 26

(21) 申请号 200780022188. 8

(22) 申请日 2007. 05. 29

(30) 优先权数据

11/453, 756 2006. 06. 15 US

(85) PCT申请进入国家阶段日

2008. 12. 15

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2007/069843 2007. 05. 29

(87) PCT申请的公布数据

W02008/066957 EN 2008. 06. 05

(73) 专利权人 KJT 企业有限公司

地址 美国德克萨斯州

(72) 发明人 K·M·斯特拉克 N·C·阿勒加

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

司 72001

代理人 王庆海 蒋骏

(51) Int. Cl.

G01V 1/28(2006. 01)

(56) 对比文件

US 6476608 B1, 2002. 11. 05, 全文.

US 5486764 A, 1996. 01. 23, 全文.

US 2006/0028208 A1, 2006. 02. 09, 说明书第 [0033] 段到第 [0084] 段、附图 1-10.

CN 1245639 C, 2006. 03. 15, 全文.

审查员 潘聪

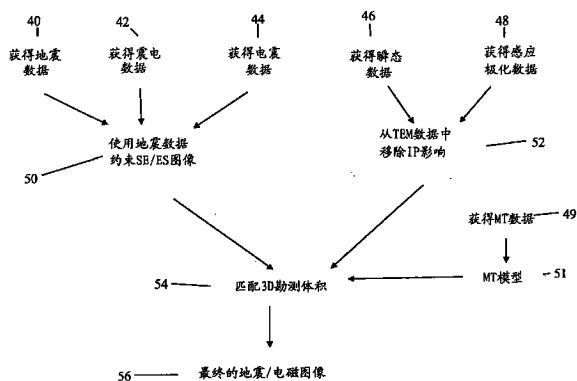
权利要求书 3 页 说明书 15 页 附图 13 页

(54) 发明名称

用于获取和解释震电和电震数据的方法

(57) 摘要

一种用于地面下地球勘测的方法, 包含获取地球表面下的选定区域上的地震数据。在地球表面下的选定区域上获取震电数据。同样在地球表面下的选定区域上获取电震数据。在地球表面下的选定区域上获取至少一种电磁勘测数据。勘测体积的地震数据、震电数据、电震数据和电磁数据经过匹配, 并且产生地球表面下面的模型, 该模型考虑了所有的地震数据、震电数据、电震数据和电磁数据。



1. 一种地面下的地球勘测方法,包括:
获取地球表面下的选定区域上的地震数据;
获取地球表面下的选定区域上的震电数据;
获取地球表面下的选定区域上的电震数据;
获取地球表面下的选定区域上的至少一种类型瞬态电磁勘测数据;
匹配勘测体积的所述地震数据、所述震电数据、所述电震数据和瞬态电磁勘测数据;以
及

产生地球表面下的模型,该模型考虑了所有的所述地震数据、所述震电数据、所述电震数据和所述瞬态电磁勘测数据,

其中所述获取地球表面下的选定区域上的至少一种类型瞬态电磁勘测数据包括:

在待勘测的地球表面下的一部分上以预定模式部署多个电磁传感器;

在多个不同位置的电磁传感器附近将电场和磁场中的至少一个应用到地球,通过使电流穿过电极产生所述电场,通过使电流穿过天线产生所述磁场;

每次将所述电场和所述磁场中的至少一个应用到地球时,在每个所述电磁传感器中记录电场幅度和磁场幅度中的至少一种;

对于采集几何结构调整每个记录;以及

使用至少两个堆叠的、经调整的记录来产生对应于至少一个电磁传感器位置的图像。

2. 权利要求 1 所述的方法,进一步包括获取地球表面下的相同区域上的感应极化数据作为所述至少一种类型瞬态电磁勘测数据,对于感应极化效应校正所述瞬态电磁勘测数据。

3. 权利要求 1 所述的方法,其中所述产生地球表面下的模型的步骤包括所述震电数据和所述电震数据的联合反演。

4. 权利要求 1 所述的方法,进一步包括选择在地球表面下的至少一个区域,并且通过波束形成沿着至少两个方向照射所选择的区域。

5. 权利要求 4 所述的方法,其中所述波束形成包括激励多个地震源,在所述多个地震源的各自的激活之间包含有选定的延迟时间。

6. 权利要求 4 所述的方法,其中所述波束形成包括激励多个电磁源,在所述多个电磁源的各自的激活之间包含有选定的延迟时间。

7. 权利要求 1 所述的方法,其中所述匹配勘测体积包括使用所述电震数据和所述震电数据两者产生地球表面下的初始模型,其中使用所述地震数据约束所述初始模型。

8. 权利要求 1 所述的方法,进一步包括获取地球表面下的选定区域中的大地电磁数据,并且对于大地电磁效应调整所述瞬态电磁勘测数据。

9. 权利要求 1 所述的方法,其中通过切换直流电流来瞬态产生所述电流。

10. 权利要求 9 所述的方法,其中所述切换包括关断所述直流电流。

11. 权利要求 9 所述的方法,其中所述切换包括接通所述直流电流。

12. 权利要求 9 所述的方法,其中所述切换包括翻转所述直流电流的极性。

13. 权利要求 9 所述的方法,其中所述切换包括以伪随机二进制序列方式改变所述直流电流的极性。

14. 权利要求 1 所述的方法,其中沿着两个正交方向检测电场的幅度。

15. 权利要求 1 所述的方法,其中沿着三个相互正交的方向检测磁场的幅度。
16. 权利要求 1 所述的方法,其中以规则网格模式部署所述多个电磁传感器,多个电磁传感器之间具有 100 到 500 米的间距。
17. 权利要求 1 所述的方法,其中所述应用包括沿着平行于所述电磁传感器部署方向的方向进行应用。
18. 权利要求 1 所述的方法,其中所述应用包括沿着垂直于所述电磁传感器部署方向的方向进行应用。
19. 权利要求 1 所述的方法,其中所述应用包括沿着倾斜于所述电磁传感器部署方向的至少一个选定方向进行应用。
20. 权利要求 1 所述的方法,其中所述图像产生于一组具有公共中点的记录。
21. 权利要求 1 所述的方法,其中所述堆叠的、经调整的记录包括中值堆叠。
22. 权利要求 1 所述的方法,其中以十米或者更多的间隔执行所述应用电场和磁场中的至少一个。
23. 权利要求 1 所述的方法,其中将所述电流应用到处于基本上水平方向的偶极子电极。
24. 权利要求 1 所述的方法,其中将所述电流应用到处于基本上垂直方向的偶极子电极。
25. 权利要求 1 所述的方法,其中所述磁场基本上垂直地定向。
26. 权利要求 1 所述的方法,其中所述磁场基本上水平地定向。
27. 权利要求 1 所述的方法,其中所述地球表面下面的顶部为水体的底部。
28. 权利要求 1 所述的方法,其中在所述电磁传感器附近将电场和磁场中的至少一个应用到地球包括应用旋转电场和旋转磁场中的至少一种。
29. 权利要求 1 所述的方法,所述方法进一步包括使用从至少一个井筒获取的数据约束所述模型,所述井筒钻孔穿过靠近所选区域的地球表面下层。
30. 权利要求 1 所述的方法,所述方法进一步包括在产生地球表面下的模型之后确定地面下的储藏体中流体接触的空间分布。
31. 权利要求 30 所述的方法,所述方法进一步包括在选定时间之后,重复获取地震数据、获取震电数据、获取电震数据、获取至少一种类型瞬态电磁勘测数据、匹配所述勘测体积的地震数据、震电数据、电震数据和瞬态电磁勘测数据、产生地球表面下面的模型以及确定所述流体接触的空间分布从而确定其空间分布的变化。
32. 权利要求 31 所述的方法,所述方法进一步包括:
根据空间分布的变化确定从所述地面下的储藏体移除的流体体积或者注入所述地面下的储藏体的流体体积;
将所确定的流体体积与从所述储藏体产生的流体体积或者注入所述储藏体的流体体积进行比较;以及
调整所述空间分布,从而所确定的流体体积基本上匹配所测量的流体体积。
33. 权利要求 31 所述的方法,所述方法进一步包括:
将所确定的空间分布与来自储藏体仿真程序的模型化空间分布进行比较;以及
校正所确定的空间分布以基本上匹配所述模型化空间分布。

34. 权利要求 1 所述的方法,其中所述获取震电数据包括检测由地震能量源的激励产生的震电信号,所述激励与执行所述获取地震数据使用的地震能量源的激励相同。

35. 权利要求 1 所述的方法,其中所述获取电震数据包括检测由电场源和磁场源中至少一种的激励产生的电震信号,所述激励与执行所述获取电磁数据使用的电场源和磁场源中至少一种的激励相同。

36. 权利要求 1 所述的方法,其中所述瞬态电磁勘测数据包括瞬态的受控源电磁勘测数据。

用于获取和解释震电和电震数据的方法

技术领域

[0001] 本发明总的来说涉及地球表面下的震电 (seismoelectric) 和电震 (electroseismic) 勘测领域。尤其是,本发明涉及用于获取电震和震电勘测、从而可以更加易于识别地下特征的方法。

背景技术

[0002] 本领域已知的电磁地球物理勘测包含“受控源”电磁勘测。受控源电磁勘测包含将电场或者磁场引入地球构造,这些构造位于海洋勘测的海底,并且测量作为响应感应产生的电场和 / 或磁场属性。所述电场和 / 或磁场属性通过测量感应产生的电压进行测量,所述电压产生于布置在地球表面、或者在海底上面或上方的电极、天线和 / 或查询磁力计。所述电场和 / 或磁场属性用于对地球表面下的导电性空间分布进行推断。

[0003] 本领域已知的受控源电磁勘测包含将交流电引入到海底以下的构造。交流电具有一个或多个选定频率。这样的勘测已知称为频域受控源电磁 (f-CSEM) 勘测。f-CSEM 勘测技术例如描述在 Sinha, M. C. Patel, P. D., Unsworth, M. J., Owen, T. R. E. 和 MacCormack, M. G. R. 在 1990 年的文章 An active source electromagnetic sounding system formarine use 中,发表于 Marine Geophysical Research, 12 第 29-68 页。描述电磁地面下勘测的物理性质和解释的其他公开物包括: Edwards, R. N., Law, L. K., Wolfgram, P. A., Nobes, D. C., Bone, M. N., Trigg, D. F. 和 DeLaurier, J. M. 在 1985 年的文章 First results of the MOSEsexperiment: Sea sediment conductivity and thickness determination, Bute Inlet, British Columbia, by magnetometric offshoreelectrical sounding, 发表于 Geophysics 50, No. 1 第 153-160 页; Edwards, R. N. 在 1997 年的文章 On the resource evaluation of marinegas hydrate deposits using the sea-floor transient electricdipole-dipole method, 发表于 Geophysics, 62, No. 1 第 63-74 页; Chave, A. D., Constable, S. C. 和 Edwards, R. N. 在 1991 年的文章 Electrical exploration methods for the seafloor, 发表于 Investigation in geophysics No 3, Electromagnetic methods inapplied geophysics 第 2 卷 application, part B 第 931-966 页; 以及 Cheesman, S. J., Edwards, R. N. 和 Chave, A. D. 在 1987 年的文章 On thetheory of sea-floor conductivity mapping using transientelectromagnetic systems, 发表于 Geophysics, 52, No. 2 第 204-217 页。

[0004] 下面描述了多个专利公开,描述了电磁地面下地球勘测的各个方面。授予 Constable 的美国专利 5770945 描述了一种用于海底石油勘探的大地电磁 (MT) 系统。所公开的系统包含容纳着处理器的第一防水压力箱、AC 耦合的磁场后置放大器和电场放大器、容纳着声学导航 / 释放系统的第二防水压力箱、安装在吊杆上的四个银 - 氯化银电极以及至少两个磁感应线圈传感器。这些元件一起安装在塑料和铝的框架上,随同漂浮装置和用于海底布置的锚一起。声学导航 / 释放系统用于通过响应由船载单元产生的声音“砰”对测量系统进行定位,并且接收启动从锚脱离的释放指令从而浮标封装漂浮到表面用于回收。

用于检测电场的电极配置为接地的偶极子天线。电极通过吊杆安装在框架上,吊杆以一定结构放置以产生两个正交的偶极子。两个正交的偶极子用于测量完备矢量电场。磁场传感器是多匝的、镍铁高导磁率合金 (Mu-metal) 核心线圈,检测典型用于以地面为基地的 MT 勘测的频率范围中的磁场。磁场线圈被包装在防水压力箱中,并且通过高压防水线缆连接到记录器封装。记录器单元包含用于对从各个传感器接收的信号进行放大的放大器,然后将信号提供给处理器,该处理器控制定时、记录、存储和电源切换操作。在处理器中和 / 或在其外围提供有临时的和大容量存储器。在这样的 MT 方法中没有活动的源,依赖于自然存在的 EM 场。

[0005] 授予 Srnka 的美国专利 6603313 B1 公开了一种用于储藏体属性的表面估计的方法,其中首先确定或者估计特别定位的地面下地质构造之上、之下以及与其水平靠近的平均接地电阻率,使用地面下地质构造附近的地质和地球物理数据。然后确定用于电磁源的尺寸和探测频率,使用位置和平均接地电阻率,以使地面下地质构造处所发射的垂直和水平电流基本上最大化。接下来,在海底处或海底附近激活电磁源,近似中心定位在所述地面下地质构造上,并且使用接收机阵列测量多个电磁响应组分。使用地质和地球物理数据,确定几何的和电的参数约束。最后,使用几何的和电的参数约束处理电磁响应,以产生反演的垂直和水平电阻率深度图像。可选地,反演的电阻率深度图像可以与地质和地球物理数据相组合,以估计储藏体的流体和页岩化(含有黏土的岩石构造中的碎片体积称为“页岩”)属性。

[0006] 授予 Eidesmo 等人的美国专利 6628119 B1 公开了一种用于确定地下储藏体的特性的方法,储藏体的近似几何形状和位置是已知。所公开的方法包含:将时变电磁场应用到容纳储藏体的岩层;检测电磁波场响应;并且分析有储藏体引起的对所检测场特性的影响,由此基于所述分析确定储藏体的内容。

[0007] 授予 Strack 的美国专利 6541975 B2 公开了一种用于产生钻孔周围地球构造的图像的系统,所述钻孔穿透所述构造。利用 DC 测量来测量构造的电阻率,以及使用时域信号或 AC 测量来测量构造的电导率和电阻率。同样测量构造的声速。使用时域电磁信号进行的 DC 电阻率测量、电导率测量,使用时域电磁信号进行的电阻率测量以及声速测量,这些测量组合用于产生地球构造的图像。

[0008] 国际专利申请公开 W00157555 A1 公开了一种用于检测地面下储藏体或者确定地面下储藏体特性的系统,所述储藏体的位置和几何形状根据先前的地震勘测是已知的。通过发射机将电磁场应用到海床上,并且由同样位于海床上的天线检测电磁场。在波场响应中寻找折射的波成分,以确定任何储藏体存在特性。

[0009] 国际专利申请公开 W003048812 A1 公开了一种用于对区域进行勘测的电磁勘测方法,所述区域先前已经被识别为可能包含海底碳氢化合物储藏体。该方法包含获取第一和第二勘测数据集合,电磁源相对于相同或不同的接收机在端点和侧面对齐。该发明还涉及使用这种方法来规划勘测,以及涉及勘测数据的组合分析以便允许将对接收机所收集信号的电化贡献与感应效应和信号衰减效应(其高度依赖于水体下岩石构造和勘测区域中空气的局部属性)进行对照。这对于使用电磁勘测的成功是非常重要的,用于识别碳氢化合物储藏并且将其与其他种类地面下构造相区分。

[0010] 授予 Conti 等人的美国专利 6842006 B1 公开了一种海底电磁测量装置,用于获得

地球构造的水下大地电磁 (MT) 测量。该装置包含中心结构,以及枢轴连接在中心结构上的臂。枢轴旋转臂使得该装置易于展开和存储。电极和磁力计连接到每个臂,分别用于测量电场和磁场,磁力计远离中心结构从而不感测存在于其中的磁场。一种用于从事海底测量的方法包含,在原理结构处测量电场以及在相同位置测量磁场。

[0011] 美国专利申请公开 2004/232917 涉及一种对地面下电阻率对比进行测绘的方法,通过使用至少一个源在地球表面处或者靠近地球表面进行多通道瞬态电磁 (MTEM) 测量,接收装置用于测量系统响应以及至少一个接收机用于测量合成的接地响应。对来自每个源-接收机配对的全部信号进行处理,以恢复陆地的相应电磁脉冲响应,并且显示这些脉冲响应或这些脉冲响应的任何变换,以产生电阻率对比的地面下表示。该系统和方法允许地面下流体沉积物的定位和识别,以及监测这些流体的运动。

[0012] 授予 Rueter 等人的美国专利 5467018 公开了一种基岩勘探系统。该系统包含随着传输流中突变所产生的瞬态现象,所述传输流由发射机发射进入地球表面下。如此产生的感应电流由多个接收机单元测量。来自接收机单元的测量值传送到中央单元。从接收机单元获取的测量值在测量点被数字化并且存储,中央单元通过遥测连接与测量点相连。通过遥测连接,来自接收机单元中数据存储器的数据可以连续传送到中央单元。

[0013] 授予 Tasci 等人的美国专利 5563913 公开了一种方法和设备,用于提供沉积性地面下的电阻率测量数据。该数据用于开发和测绘增强的异常电阻率图形。所述增强的地面下电阻率图形相关于并且有助于发现各个深度的油和 / 或气,下至沉积性地面下的基础。该设备布置在地面上,包含连接到发射机的发电机,具有接地电极的线长度。当从发送地点通过发射机和电线发送大幅度、长周期、方波电流时,在地面下感应产生次级涡流。涡流在地面下感应产生磁场变化,可以使用磁力计和感应线圈在地球表面进行测量。在每个探测地点作为时变电压接收并且记录磁场变化。在应用适当数学方程式后,根据所测量磁场信号的幅度和形状推断有关地面下构造电阻率变化的信息,所测量的磁场信号作为时间的函数曲线。探测地点以类似曲线的方式排列,以保证可以制定地面下构造电阻率变化的面轮廓图和截面图。

[0014] 本领域已知的 f-CSEM 技术局限在于,其典型地限制于相对大的水体深度,大约为 800-1000 米,或者海洋水体深度于地面下储藏体深度 (从海底测量的储藏体深度) 的比值大于约 1.5 到 2.0。

[0015] 典型的 f-CSEM 海洋勘测可以描述如下。记录船只包含线缆,其连接布置靠近海底的电极。船只上的电功率源对电极充电,从而选定的一个或多个频率、选定幅度的交流电流经海底进入海底下面的地球构造。在离开源电极的选定距离 (“偏移”),在海底上布置接收机电极并且将电极连接到电压测量电路,电压测量电路可以不是在所述船只或不同的船只上。然后分析引入接收机电极的电压,以推断地面下地球构造的接收和电属性。

[0016] 本领域已知的用于地面下地球构造电磁勘测的另一种技术时瞬态受控源电磁勘测 (t-CSEM)。在 t-CSEM 中,以类似于 f-CSEM 的方式在地球表面 (或海底) 将电流引入地球。所述电流可以是直流电流 (DC)。在选定时间,关断、接通电流或改变其极性,并且在地球表面或水体表面测量感应产生的电压和 / 或磁场,典型地关于时间以选定的时间间隔。交替切换策略可以接受的;如下面将更加详细说明的。通过感应产生电压和 / 或磁场的分布,可以推断地面下的结构。t-CSEM 技术例如描述于 Strack, K. -M. 在 1992 年的著作

Exploration with deep transient electromagnetics, Elsevier 出版, 第 373 页 (1999 年重印)。

[0017] 用于推断地球表面下构造结构和组成的其他技术包括震电勘测和电震勘测。电震勘测描述于授予 Thompson 等人的美国专利 5486764 中, 其中的方法和设备估计地球阻抗 (电导率) 作为深度的函数。通过反射电磁 (EM) 信号基于频率的衰减来确定阻抗, 所述电磁 (EM) 信号通过对地球应用地震信号产生。地震波通过常规方式应用于地球, EM 波从位于地面下不同深度等级的不同反射体向回传播到地球表面。返回传播穿过地球优先是高频衰减。在较低深度产生的 EM 波相对于较浅深度产生的波衰减更多。Thompson 的 '764 专利中描述的方法和设备基于相对衰减来确定来自不同地平线的反射 EM 信号之间频谱成分的差异, 并且使用这些差异作为反射地平线之间电导率的直接测量。反向电震勘查技术可以用于将 EM 波引入地球, 并且使用反射地震波确定电阻作为深度的函数。'764 专利还描述了反演的过程, 称为震电勘查, 其中地震波被引入地球并且作为其响应检测感应产生的电压。

[0018] 授予 Yu 等人的美国专利 5841280 描述了一种震电钻井日志仪器以及使用这种仪器的方法。所公开的方法用于估计陆地构造的多孔性, 根据通过陆地构造的声学能量测量以及根据响应于声学能量在构造中产生的震电电压测量。该方法包含测量通过陆地构造的声学能量的步骤, 以及测量响应于通过构造的声学能量产生的震电电压的步骤。使用多孔性的初始数值, 根据声学能量的测量合成震电信号。确定合成的震电电压和所测量震电电压之间的差异。调整多孔性的初始数值, 并且重复根据声学信号合成震电电压、确定差异、以及调整多孔性数值的步骤, 直到所述差异下降到低于预定的阈值或者所述差异达到最小值。将调整后的导致差异最小的多孔性数值作为构造的孔隙率。在特定实施例中, 可以计算陆地构造的细孔空间中流体的电导率。该特定实施例包括以下步骤, 测量通过陆地构造的声学能量, 以及测量响应于通过构造的声学能量产生的震电电压。使用流体电导率的初始数值, 根据声学能量的测量合成震电信号。确定合成的震电电压和所测量震电电压之间的差异。调整流体电导率的初始数值, 并且重复根据声学信号合成震电电压、确定差异、以及调整电导率数值的步骤, 直到差异下降到低于预定的阈值或者差异达到最小值。将调整后的导致差异最小的流体电导率数值作为流体的电导率。

[0019] 在图 1A 和 1B 中显示了震电信号的起源。图 1A 显示了传播通过钻孔穿过渗透性地球构造的钻孔的斯通利波如何在构造的孔空间中转移导电流体。孔空间中的流体位移造成电场产生。图 1B 显示了沿着钻孔移动的斯通利波, 该钻孔穿透断裂的地球构造。断裂中的流体由斯通利波的活动而转移, 并且作为响应产生电磁场。图 2A 显示了对于所引入地震能量的来自地球的地震 (声压或压缩波) 反射响应。图 2B 显示了相同地球表面下区域的震电响应, 显示了地球的地震响应和震电响应之间的一致程度。

[0020] 将前述电震和震电技术适用于来自地球表面的或者来自水体表面的勘测是本领域已知的。上面描述的每种技术包含受控源电磁勘测、电震勘测和震电勘测, 以及虽然上面没有描述但同样适用于这一描述的本领域已知地震勘测, 每一种都响应于地球表面下的不同构造特性。所有前述勘测技术结果的组合可以提供该上的地球表面下构造的结构和组成分析。然而, 在相同的地球表面下区域上实施四个或更多不同类型的勘测可能是耗时并且昂贵的。每种前述技术也研究地球表面下的不同体积, 关于相应能量源和随其使用的检测装置的放置。这种不同的研究体积使得组合采集以及组合技术的结果变得不切实际。需要

一种方法和系统来组合各种表面电子和地震勘测技术,以改善地球表面下分析的质量。同时,解释和钻孔或流体注入 / 生产测量的这种综合是需要的,以提供作为实际地面下测量和 / 或流体生产信息的基础的结果。

发明内容

[0021] 本发明的一个方面是一种用于地面下地球勘测的方法。依照本发明这个方面的方法包含获取地球表面下选定区域上的地震数据。在地球表面下的选定区域上获取震电数据。同样在地球表面下选定区域上获取电震数据。在地球表面下选定区域上获取至少一种电磁勘测数据。勘测体积的所述地震数据、所述震电数据、所述电震数据和所述电磁数据经过匹配,并且产生地球表面下的模型,该模型考虑了所有的所述地震数据、所述震电数据、所述电震数据和所述电磁数据。

[0022] 以系统方式结合各种勘测方法的特性,获得了一种地面下成像的协同方法。

[0023] 根据下面的描述和所附的权利要求,本发明的其他方面和优点将是显而易见的。

附图说明

[0024] 图 1A 显示了渗透性地球构造的震电响应的图形表示。

[0025] 图 1B 显示了断裂地球构造的震电响应的图形表示。

[0026] 图 2A 以传统方式显示了地球表面下体积的地震幅度响应。

[0027] 图 2B 显示了关于图 2A 地震响应的地球表面下相似体积的震电响应。

[0028] 图 3A 显示了使用水平电偶极子电流源的海洋瞬态电磁勘测系统。该系统还包含地震源和地震接收机。

[0029] 图 3B 显示了使用垂直电偶极子电流源的海洋瞬态电磁勘测系统。

[0030] 图 3C 显示了切换设备,用于将间隔离开的采集节点选择性地彼此连接以及连接到电压或速度 / 加速度测量装置。

[0031] 图 3D 显示了水体表面条幅类型的采集系统的实施例。

[0032] 图 4 显示了 t-CSEM 传感器阵列,布置在多个海底线缆中或者作为获取依照本发明的勘测的节点。

[0033] 图 5 显示了单一海底 t-CSEM 采集系统的一个实施例。

[0034] 图 6 显示了使用磁场激励地球的水平偶极子的替代方式。

[0035] 图 7 显示了依照本发明处理和解释方法的一个实施例的流程图。

[0036] 图 8A 到 8D 分别显示了用于地震产生和检测的能量路径以及震电能量、地震轨迹、震电检测、和电震能量产生和检测。

具体实施方式

[0037] 除了逻辑上的细节,这里讨论的技术同样地适用于海洋和陆地勘测,尽管这里的描述大部分参照海洋勘测。因而,本发明不限于仅仅用于海洋勘测的范围。

[0038] 通常,可以用于本发明各个方面的采集系统包含地震能量源、地震传感器、电场和 / 或磁场源、以及电场和 / 或磁场传感器。图 3A 显示了这样的系统的一个实施例,与本发明的各个方面一起使用。该系统包含勘测船只 10,其沿着例如湖或海洋的水域 11 的表面以预

定的模式移动。船只 10 在其上包含地震和电磁 (EM) 源激励、信号记录和导航设备,以 12 概括示出并且在此共同称为“控制 / 记录系统”。该控制 / 记录系统 12 包含可控制的电流源 (没有单独示出),用于激励在水体 11 中、优选靠近其底部 13 拖曳的发射机电极 16A 和 16B,以便将电场引入水体 11 的底部 13 下面的地下构造 15、17。该控制 / 记录系统 12 典型地包含用于在任何时刻确定船只 10 的测量位置的仪器 (没有单独示出),例如可以使用全球定位系统 (GPS) 接收机或类似装置实现。

[0039] 当前实施例中的控制 / 记录系统 12 可以包含用于在记录系统 12 和一个或多个记录浮标 22 之间传输信号的设备。记录浮标 22 接收并且存储来自多个电磁 (EM) 传感器 20 中每一个的信号,这些传感器位于水体底部 13 的选定位置上。所述传感器 20 可以沿着线缆 18 布置。线缆 18 可以是与部署在水体底部的地震传感器相连接通常使用的类型,在本领域公知称作“海底线缆”。EM 传感器 20 被配置成用于检测电场和 / 或磁场,该电场和 / 或磁场由通过发射机电极 16A、16B 的电流在地球表面下感应产生的电场产生。在下面将参照图 5 更加详细的解释 EM 传感器 20。记录浮标 22 可以包含遥测装置 (没有单独示出),用于将检测到的信号发送到船只 10 上的记录系统 12,以及 / 或者可以将信号进行本地存储以便稍后用于控制 / 记录系统 12 或者其他询问装置的询问。作为替代,传感器的信号可以在本地自主地记录,并且这样的记录可以在勘测结束时取回。

[0040] 控制 / 记录系统 12 中的电流源 (没有单独示出) 通过线缆 14A 连接到电极 16A、16B。线缆 14A 被配置为电极 16A、16B 可以在靠近水体底部 13 基本水平地拖曳,如图 3A 中所示。在当前实施例中,电极 16A、16B 可以间隔离开大约 50 米,并且可以被激励为使得大约 1000 安培的电流通过电极 16A、16B。前述的间隔和电流产生的源力矩等效于已知在本领域使用 100 米长发射偶极子以及使用 500 安培的电流的典型电磁勘测实践中产生的源力矩。在上述两种情况下,源力矩都为大约 5×10^4 安培 - 米。用于激励发射机电极 16A、16B 的电流可以是直流 (DC),在信号记录时间索引等于零时切断。然而应当理解,切断 DC 仅是可操作地用于产生瞬态电磁效应的电流控制的一种实现方式。在其他实施例中,电流可以接通、可以从一种极性切换为另一种极性 (双极性开关)、或者可以以伪随机二进制序列 (PRBS) 方式或这种切换序列的任意混合派生方式进行切换。例如参见 Duncan, P. M., Hwang, A., Edwards, R. N., Bailey, R. C. 和 Garland, G. D. 在 1980 年发表的文章, The development and applications of a wide band electromagnetic sounding system using pseudo-noise source。发表于 Geophysics, 45, 第 1276-1296 页,描述了 PRBS 切换。

[0041] 在当前实施例中,随着通过发射机电极 16A、16B 的电流被切换,对由各个 EM 传感器 20 检测的电场和 / 或磁场进行时间索引记录,或者在记录浮标 22 中以及 / 或者在控制 / 记录系统 12 中,这取决于记录浮标 22 中和控制 / 记录系统 12 中记录和 / 或遥测设备的特定配置。

[0042] 图 3B 显示了信号产生和记录的另一个实施方式,其中发射机电极 16A、16B 布置为其沿着线缆 14B 基本垂直地定向,线缆 14B 被配置成用于使电极 16A、16B 基本垂直地定向,如图 3B 中所示。以基本相同于如上面参照图 3A 所说明的方式来激励电极 16A、16B、检测以及记录信号。某些实施例可以既包含如图 3B 所示的线缆 14B,也包含如图 3A 所示的线缆 14A,从而能够获得由垂直电极化以及水平电极化产生的信号。再一些其他实施例可以包含所引入地下的电场的旋转,这通过将所选择的电流部分应用于垂直电偶极子 (图 3B 中的线

缆 14B) 和水平电偶极子 (图 3A 中的线缆 14A) 两者来实现。

[0043] 再次参见图 3A, 在当前实施例中, 船只 10 或另一个船只 (未示出) 也可以拖曳地震能量源, 以 9 概括示出。地震能量源 9 典型地为空气枪阵列, 但可以是本领域已知的任何其他类型地震能量源。控制 / 记录系统 12 可以包含用于在选定时间激励地震源 9 的控制电路 (没有单独示出), 以及用于记录由地震传感器产生的信号的记录电路 (没有单独示出)。在当前实施例中, 海底线缆 18 同样可以包含地震传感器 21。所述地震传感器 21 优选为“四组件”传感器, 其在本领域是已知的, 包含三个正交的地震检波器或类似的运动或加速度传感器, 配置有水中听音器或类似的压力响应传感器。四组件海底线缆地震传感器在本领域是公知的。例如参见授予 Gaiser 等人的美国专利 6021090。

[0044] 图 4 显示了海底线缆 18 的典型排列, 依照本发明, 海底线缆 18 在其上间隔分开的位置上具有 EM 传感器 20 和地震传感器 21, 用于获取三维勘测。每个线缆 18 可以基本上沿着在待勘测的地球表面下的一部分之上的选定方向直线上定位。每个线缆 18 上的 EM 传感器 20 和地震传感器 21 之间的纵向距离在图 4 中由 x 表示, 在当前实施例中可以大约为 100 到 200 米。为了实践目的, 个体的传感器 20 和 21 可以位于相同位置。每个线缆 18 显示为终止于相应的记录浮标 22, 如上面参照图 3A 所说明的。线缆 18 优选定位为彼此基本平行, 并且以显示为 y 的横向间隔分开。在当前实施例中, y 优选为基本等于 x , 大约为 100 到 500 米。在某些实施例中, EM 传感器 20 和地震传感器 21 可以任意分布, 就是说, 相邻传感器之间的间隔 x 和 y 可以是随意的。传感器 20、21 也可以自主记录装置, 没有与各自记录浮标的线缆连接。在这样的实施例中仅需要知道每个 EM 传感器和每个地震传感器的测量位置, 平均间距如上面所述。不规则的间隔被认为可以改善信噪比, 特别是在电磁勘测的结果中。对于二维勘测, 仅需要一个这样的条幅, 船只 10 可以仅沿着这条线通过一次。

[0045] 可以用于本发明各个实施例的地震和电磁勘测数据还可以使用表面采集设备获取, 如图 3D 中所示。图 3D 中所示的采集系统包含勘测船只 10 以及其上的记录系统 12。船只 10 可以在水中拖曳一个或多个地震能量源 9 或者这种源的阵列。船只 10 拖曳多个传感器条幅 23, 每个条幅在其上具有多个间隔分开的传感器 21A。传感器 21A 可以是地震传感器、电场或磁场传感器、或者其任意组合。通过包含连接到船只 10 的线缆 25 中引线的拖曳设备, 条幅 23 相对于彼此保持横向位置。通过耦合到引线线缆 25 的远端的扫雷器 27A 在水中的活动, 线缆 25 中的引线横向分离。所述扫雷器 27A 由扩展线缆 27 以选定的横向间隔被固定。条幅 23 附着于扩展线缆 27。如果包含地震传感装置, 传感器 21A 可以包含水中听音器或者其他压力或压力梯度传感器, 或者可以是结合各种形式粒子运动传感器的压力响应传感器, 例如地震检波器或加速度计。例如参见 Tenganm 等提交的美国专利申请公开 2004/0042341, 描述了“双传感器”条幅及其应用。其他实施例可以包含更多或者较少的这种条幅 23。因而, 上面描述的地震数据采集系统的配置不是对本发明范围的限制。虽然没有在图中示出, 图 3D 中所示的实施例还可以包含水平和 / 或垂直偶极子布置的电流源电极, 如分别参考图 3A 和图 3B 说明的。

[0046] 再次参见图 3A, 在进行勘测过程中, 船只 10 沿着水体 11 的表面移动, 并且周期性地, 控制 / 记录系统 12 如上所述地激励发射机电极 16A、16B。在当前实施例中, 发射机电极 16A、16B 在选定的时间被激励, 从而船只 10 在发射机电极 16A、16B 的连续激励之间移动大约 10-100 米。各个 EM 传感器 20 所检测的信号关于时间进行记录, 并且对这些时间关于激

励电极 16A、16B 的时间进行索引。通过使用这样的时间索引进行记录,根据记录可以对地球表面下的结构和组成进行参考。

[0047] 在当前实施例中,船只 10 显示为基本平行于线缆 18 进行移动。在另一个实施例中,在船只 10 在平行于线缆 18 的方向上、基本上在水体底部 13 上每个线缆 18 的位置上面移动之后,然后船只 10 可以相对于线缆 18 沿着基本位于每个线缆 18 上相应 EM 传感器 20 和地震传感器 21 在水体底部 13 上的位置上的航线横向移动。

[0048] 在一些实施例中,基本上同时期的地震勘测可以通过周期性地激励地震能量源 9、并且记录由地震传感器 21 所检测到的信号来实施。因而在当前实施例中,在每个 EM 传感器 20 进行多个测量,每个代表发射机电极 16A、16B 关于每个 EM 传感器 20 的唯一几何结构。所述的多个电磁测量每个具有发射机-传感器几何结构的唯一排列,可以在一些实施例中用于产生各种形式的组合或“堆叠”测量,从而改善使用 t-CSEM 测量所产生图像的质量。类似地,对三维地震勘测进行记录。

[0049] 在当前实施例中,震电勘测也可以通过周期性地激励地震能量源 9 并且记录由 EM 传感器 20 所检测的电压和 / 或磁场来进行。为方便起见,可以使用与上面所涉及的实施地震勘测所使用的地震能量源 9 的相同激励来记录震电勘测。从而在这样的实施例中,对于每个地震能量源激励,记录 EM 传感器测量和地震传感器测量,这些记录关于地震能量源 9 的激励时间进行索引。

[0050] 在当前实施例中,可以在跨越电极 16A、16B 引入的电流被切换时,通过测量由地震传感器 21 所检测的信号来进行电震勘测。为方便起见,可以使用与用于在地球表面下产生瞬态电场以实施 EM 勘测的相同电流切换来记录电震勘测。从而在这样的实施例中,对于每个电流切换,关于电流切换时间对 EM 传感器记录和地震传感器记录进行索引。

[0051] 图 5 更加详细地显示了 EM 传感器 20 的一个实施例。EM 传感器 20 可以封装在由致密、绝缘、非磁性材料制成的外壳 23 中,例如高密度塑料,从而 EM 传感器 20 可以沉入水中并且静止在水体底部(图 3A 中的 13)上。电极 26A、26B、28A、28B 放置在外壳 23 的底部上,从而其接触水体底部(图 3A 中的 13)。电极排列为偶极子对。其中的一对 26A、26B 可以沿着线缆的长度方向定向(图 4 中的 18),并且沿着线缆方向测量电压。其他的电极对 28A、28B 测量在横向于线缆(图 4 中的 18)的方向上产生的电压。电极对可以跨越大约 1 到 10 米的距离。电极对 26A、26B 和 28A、28B 可以耦合到组合放大器 / 数字信号处理器 24,用于在选定的时刻将所检测的电压转换为对应于电压幅度的数字字。在一些实施例中,来自多个传感器的电极对可以选择性地连接在一起,或者可以选择性地横跨耦合在一个传感器 20 中所选一个组合放大器 / 数字信号处理器 24 的输入端上。通过这种选择性地组合耦合和选择性放大器输入耦合,可以通过将这样的电极与其他的电极进行电求和,改变有效电极阵列长度并且降低局限在一个或多个单独电极的特定噪声种类。地震勘测领域的技术人员应当理解,相似的将间隔离开的电极耦合在一起以对来自海洋地震条幅中多个间隔离开的水中听音器的信号进行电求和,以消弱沿着条幅移动的声能的影响。图 3C 中显示了可以执行前述功能的适当切换装置的实施例。基本上如上面参照图 5 所说明的传感器 20 显示为处于间隔离开的位置上。每个传感器 20 包含一个或多个电极,在图 3C 中以 27 示出。电极 27 可以使用线缆(图 4 中的 18)中的适当线路连接到多极开关 29 的输入。开关 29 的输出连接到多个放大器 / 数字信号处理器 24 中的一个。通过适当的选择,一些电极 27 可

以彼此电连接,以及连接到两个放大器输入端之一。连接电极的数量以及横跨到放大器输入端的其间距可以被选择为获取对应于来自地球表面下不同体积的电场的测量。

[0052] 再次参见图 5,传感器 20 的当前实施例可以包含沿着彼此正交的方向定向的一个或多个磁强计 30、32、34。在当前实施例中,两个磁强计 30、32 可以定向为其敏感轴定向沿着与相应电极对 26A、26B 和 28A、28B 的偶极子力矩相同的方向。每个磁强计 30、32、34 的信号输出可以耦合到数字信号处理器 24。信号处理器 24 的数字化信号输出可以耦合到记录浮标(图 4 中的 22)以用于传输到控制/记录系统(图 3A 中的 12),例如通过无线电遥测,或者在记录浮标 22 重新回到船只上时构成控制/记录系统(图 1A 中的 12)后来的询问。

[0053] 图 3A 和图 3B 中显示的系统实施例使用施加到电极的电流以将电场引入到地球表面下。引入电场的一种替代方法是引入磁场,这将参考图 6 进行说明。在图 6 中,船只 10 拖曳线缆 14C,线缆 14C 连接到两个环形发射机 17A 和 17B。第一环形发射机 17A 围起了垂直于水体底部 13 的一个区域。控制/记录系统 12 周期性地促使电流流经第一环形发射机 17A。电流可以是相同于参照图 3A 描述的任意形式,包含切换 DC、PBRs、以及交替极性 DC。当电流改变时,具有沿着方向 M_a 偶极子力矩的瞬态磁场引入到地球中。在相同或者不同的时间,施加电流到第二环形发射机 17B。第二环形发射机可以是螺线管或线圈的形式,具有沿着方向 M_b 的磁力矩。使用磁场环形发射机 17A、17B 进行勘测可以基本上依照上面参照图 3A 所说明的勘测模式进行。此外,图 3A 显示了地震源 9,其可以与电磁源基本同时期地或者顺序地使用,从而产生地震信号和震电信号。

[0054] 上面参照图 6 说明的实施例,以及先前参照图 3A 和 3B 说明的实施例,显示了各自沿着彼此正交的方向定向的磁和/或电偶极子。在一些实施例中,正交偶极子天线和/或电流环可以同时由船只拖曳,并且被激励以便在地球表面下产生旋转电场和/或磁场。产生旋转电场和/或磁场的方法是本领域已知的,包含将总电流的所选择部分数量施加到正交天线和/或电流环中的每一个。

[0055] 在海洋电磁勘测的背景下说明了前述实施例。应当清楚地理解,前述实施例同样地适用于在地球表面陆地上进行的勘测。当在地球表面陆地上进行时,可以以基本与图 3A 中所示模式类似的方式配置传感器。勘测电流源可以以电流的形式施加在地球表面处,如图 3A 中所示,或者以参照图 6 显示和描述的磁场形式。为了定义本发明范围的目的,可以说各种勘测装置可以布置在待勘测的地球表面下的区域的顶部。地球表面下的顶部在海洋勘测中为水体底部,在基于陆地的勘测中为地球的表面,或者是将进行这种勘测的浮冰层的顶部上。

[0056] 本领域技术人员将理解,这里描述的各个实施例包含移动的电磁和地震能量源以及固定的传感器,功能等效于其中电磁能量源和地震能量源固定的相应实施例,从而以图 3A 中所示的类似模式放置在水体底部上,EM 传感器 20 和地震传感器 21 位于其中,而电磁传感器和地震传感器移动穿过水体。因而在所附权利要求中,对电磁和地震源以及传感器的引用意图包含其范围内的这些相应源以及传感器位置。功能等效是互易性原理的结果,对本领域技术人员来说是已知的。同样应当清楚地理解,并且如上面参照图 3D 所说明的,地震能量源和传感器两者、以及电磁源和 EM 传感器都可以由船只(图 3A 中的 10)拖曳。在地震源和传感器的情况下,这样的排列对于地震勘测领域技术人员来说将是熟悉的,包含

拖曳源阵列和一个或多个条幅。条幅基本上为其中内置有传感器的线缆,内置在沿着线缆长度间隔离开的位置上。对于电场和 / 或磁场感应和测量,源电极线缆或环形天线线缆例如分别在图 3A、3B 和 6 中显示的,可以从上面所说明的地震勘测装置相同的船只拖曳。类似地,EM 传感器例如上面参考图 5 所说明的,可以附着于由船只(图 3A 中的 10)在水中拖曳的线缆,同样如参照图 3D 所说明的。从而,使用这样的系统可以相对高效地在地球表面下的大面积区域上基本同时地获取地震数据、电震数据、震电数据和瞬态电磁数据。

[0057] 使用图 3A 中所示系统可以获得的另一种类型数据称为感应极化数据。感应极化指的是地球表面下的一种电性异常,由在地球中引入电场所造成。在其他电极的位置之间布置的电极上所施加电压的特定性质的测量用于推断能够出产碳氢化合物的结构的存在,所述其他电极用于引入电场。在授予 Sternberg 的美国专利 4446434 中描述了获取感应极化(IP)数据的过程以及处理这些数据的过程,通过引用将其结合在此。图 3A 中所示的系统可以用于获取 IP 数据,通过横跨电极 16A、16B 施加电压并且测量横跨在选定电极上的所引入电压,所述选定电极是从在线缆 14 上的电极 16A、16B 之间布置的各个 EM 传感器 20 中的多个电极中选择的。获取 IP 数据的目的将在下面参考图 7 进行说明。

[0058] 图 7 显示了依照本发明一个方面的处理过程,使用上面描述的数据形式推断地球表面下选定体积的结构和组成。在 40,如上面参照图 3A 和 3B 所说明的获取地震数据。如本领域技术人员理解的,地震数据的各个数据记录中每一个涉及地球表面下的特定测量位置。测量位置取决于地震数据中每个轨迹的特定采集几何结构。更特别地,地震数据中的各个活动将对应于地面下的声阻抗边界,称为反射体。这些反射体的测量位置可以通过地震能量的已知传播特性来推断,地震能量从源(图 3A 中的 9)传播通过地球、反射向上返回并且最终由各个地震传感器(图 3A 中的 21)检测。地震能量从地震源到反射体再回到地震传感器的这一传播路径与进行采集时地震源和特定地震传感器的测量位置相关联。为了改善所获取地震数据中信噪比的目的,本领域中已知将对应于相同传播路径单元的地震信号记录进行求和或“堆叠”。其中最常见的是称为公共中点(CMP)堆叠,其中进行求和的记录对应于各个源和传感器位置中点的测量位置。在 CMP 堆叠中,由于采集的几何结构,很可能地震轨迹中的反射活动对应于沿着这些反射体的空间中相同点。

[0059] 在 42 和 44,分别获取震电和电震数据,基本上如上面参照图 3A 和 3B 说明的。由于地震能量源(图 3A 中的 9)的位置对于其每个激励是已知的,可以确定地球表面下产生震电信号的活动的测量位置。在一些实施例中,通过确定数据中由压缩地震能量引起的活动与由切变能量引起的活动之间到达时间(到达时间为从激励相应源到检测到活动所消逝的时间)的差,可以推断震电和电震数据中各个活动的测量位置。如 50 所显示的,这样的测量信息可以与地震数据一起用于将使用震电数据产生的图像限制为地球表面下的相同三维体积。类似的处理可以应用于电震数据,因为电极(图 3A 中 16A、16B)的测量位置对于每个电流激励是已知的。在下面参照图 8A 到 8D 将进一步地说明将震电数据和电震数据限制为地球表面下相同三维体积。

[0060] 仍然参见图 7,在 46,如上面参照图 3A 和 3B 所说明的、以及或者作为替代如参照图 6 所说明的获取 t-CSEM 数据。在 48,可以使用参照图 3A 和 3B 所说明的系统获取 IP 数据。在 52,该 IP 数据用于从 t-CSEM 数据中移除其影响。如本领域技术人员理解的,t-CSEM 数据涉及地球表面下的特定体积,取决于电极(图 3A 或 3B 中的 16A、16B)或者环形天线

(图 6 中的 17A、17B) 的测量位置,取决于使用何种类型的 EM 源装置。然后 IP 校正后的 t-CSEM 数据可以用于产生地球表面下电传导性的空间分布的模型。在 54,使用 t-CSEM 数据产生的模型可以与使用震电数据产生的表面下的地球模型进行体积匹配。最后在 56,根据 t-CSEM 数据确定的地球表面下的选定体积中电传导性分布可以与对应的震电数据一起用于产生震电图像,该图像考虑了所确定的传导性分布。

[0061] 依照本发明的当前方面,在方法的一些实施例中,可以如 49 所示获取大地电磁 (MT) 数据。MT 数据可以用于确定背景电磁场分布以校正 TEM 数据,或者可以用于产生地球表面下的分离模型。典型地,使用 MT 数据产生的地球表面下模型显示了所谓“基础”岩石的分布,意味着这些构造位于沉积岩石底部以下。

[0062] 为了改善 t-CSEM 数据的信噪比,可以以类似于地震数据的方式将数据求和或者堆叠。类似于堆叠地震数据,通过将其中具有对应于地球表面下相同测量位置的活动的各个数据记录进行求和来执行堆叠 EM 数据。为了对电极 (图 3A 中的 16A、16B) 或环形天线 (图 6 中的 17A、17B) 关于 EM 传感器处于不同相对位置时的数据记录进行求和,需要在采集几何结构 (对应于每个数据记录的电极和传感器位置) 中调整个体记录差异。地震勘探的领域技术人员应当理解,这样的采集几何结构校正对于恰当地堆叠地震记录来说是必需的。通过选择代表具有“公共中点”的地震信号采集的地震数据记录,在堆叠之前通常先校正地震记录。公共中点意味着,任意两个记录中地震能量源和地震接收机的位置在其之间具有相同的中点,而与在各自记录时间的源和接收机的位置无关。在本发明中,选择来自 EM 传感器 (图 4 中 20) 的信号记录用于堆叠,从而信号记录也具有公共中点。

[0063] 在地震勘探中,公共中点记录然后被已知称作动校正 (normal moveout correction) 的过程处理。动校正将任意地震记录中的活动定时调整为,假设地震能量源和地震接收机共同位于公共中点之上情况下将发生的情形。从而时间校正调整每个记录中的活动时间,以考虑对于较长“偏移”记录来说越来越长的能量传播路径。这样的记录为在地震能量源和该接收机之间沿着地球表面越来越长的距离产生的记录。

[0064] 作为一般性的原理,对于公共中点记录中源-接收机偏移的校正可以应用于电磁信号记录。然而,关于传播时间进行校正是不必要的。例如,对于采集几何结构来校正信号记录的一个基础是信号幅度。对于使用由 I 表示的电流幅度、由 Δl 表示的电极间距进行的信号记录,同线方向上的 DC 电场强度 E 可以由下式确定:

$$[0065] \quad E(\rho) = \frac{I\Delta l}{\pi\sigma_0(1+\sigma_1/\sigma_0)\rho^3} \quad (1)$$

[0066] 其中 σ_1 表示地面下的电导率, σ_0 表示水体的电导率,而 ρ 表示发射机到接收机的距离或偏移 (见 Edwards, R. N. 和 Chave, A. 1986 年发表的 A transient electric dipole-dipole method for mapping the conductivity of the sea floor, 发表于 Geophysics 51, 第 984-987 页)。横向方向上的电场幅度通过类似于偏移关系的公式来计算。对于磁场强度也可以得到类似的公式。结果,偏移 ρ 处的电场可以校正为在 ρ_0 (零偏移) 处的电场,等式为

$$[0067] \quad E(\rho_0) = E(\rho) \frac{\rho^3}{\rho_0^3} \quad (2)$$

[0068] 如此校正之后,可以对使用不同偏移所获取的记录进行堆叠。在一些实施例中,堆

叠可以为已知的称作中值堆叠 (median stacking) 的堆叠形式,从而进一步降低所堆叠记录中瞬态噪声的影响。

[0069] 上面已经以概括的角度说明了可以用于依照本发明的方法的数据以及共同解释这些数据的方法,下面将更加详细地说明本发明的一个特定部分。这个特定部分匹配由每种类型数据表示的 3 维勘测体积,从而在匹配地球表面下的体积之上进行共同解释。

[0070] 图 8A 显示了随同震电数据采集一起的地震数据采集,以说明体积匹配的一个部分。地震源 60A 放置在地球表面 64 (或者在海洋勘测中为水体表面) 上的选定位置上。对源进行激励,在 61 处地震能量向下传播,直至在 66 处到达地面下声阻抗边界。典型地,边界处于构造组成发生显著程度变化的地方。地震能量反射向上 63,直至其到达一个或多个地震传感器 62S。参见图 8B,数据“轨迹”70 为地震传感器 (图 8A 中的 62S) 所检测的信号的图形表示。轨迹 70 包含明显的幅度活动 72,发生时间与地震能量在地面下构造 (图 8A 中的 68) 中的速度以及源 60A 和地震传感器 62S 之间的距离有关。典型地,在地震勘测中使用多个源和传感器位置,这些位置具有各种不同的“偏移”距离,偏移为源和特定传感器位置之间的距离。如上面所说明的,典型地对信号进行求和或“堆叠”,表示源位置和传感器位置之间的公共中点 (CMP),从而每个堆叠的轨迹表示地球表面下相同的反射点。CMP 轨迹分析也可以用于执行地震速度分析。地面下面中每个这样的边界 66 典型地与上部构造的地震速度相关联。对于发生在各个 CMP 轨迹中的每个这种活动 (图 8B 中的 72),可以分析“移出”或者关于偏移每个活动两路时间中的变化,从而可以估计每个构造“层”中的地震速度。通过使用大量的不同源和传感器位置执行这样的速度分析,可以获得地球表面下面的各个边界空间分布的合理图像。

[0071] 再次参见图 8A,如先前说明的,电场传感器 62E 可以放置在地球表面 (或者在海洋勘测中为水体表面) 上的选定布置位置。当地震能量到达声阻抗边界时,例如在 66 处显示的在下面具有渗透性构造,可以产生震电信号 68。震电信号 68 以电磁能量的速度向上传播穿过相同的构造 (其足够快速以便对于地震反射时间尺度的记录的影响可以忽略)。参见图 8C,从而电场传感器 62E 响应将对应于可以来自于沿着表面 74 的任意点的震电信号,由地震能量穿过相同地球构造的单程传播时间表示。通过估计地球构造从表面 64 到边界 (图 8A 中的 66) 的速度,可以估计表面 74 的半径。震电信号的实际起源可以被确定,其中表面 74 对应于地面下声阻抗边界的空间位置。通过使用来自大量不同地震源和电场传感器位置的震电数据,可以产生具有与地震勘测匹配的 3 维体积的震电图像。应当理解,作为电场传感器 62E 的补充或者替代,在一些实施例中可以使用磁场传感器。震电活动的幅度和相位特性将至少部分地取决于这些活动的源和电场传感器 62E 之间地球构造的传导性分布。如上面参照图 7 说明的,可以根据 t-CSEM 数据获取对应于震电勘测的地面下的地球体积中地球构造传导性分布的模型。这样的传导性分布可以用于联合反演处理,以校正根据震电数据产生的地球模型。

[0072] 参见图 8D,通过使用电场源 60B 将电场引入地球,电震勘测可以在地球表面下的相同匹配体积上进行。电场以电磁能量在地面下的传播速度从源向外辐射。如前面说明的,传播速度使得对地震数据记录的时间尺度的微小时间影响被测量。然而,电磁能量的相位和幅度特性将受到在其中进行电震勘测的地球表面下的体积的传导性分布的影响。各种地球构造的电震响应产生的地震信号可以在一个或多个地震传感器 62S 处被检测,这些传感

器可能已经部署在地球表面（或者在海洋地震勘测中为水体表面）上。应当理解，电震数据的特性将涉及到地球表面下各种构造的电磁能量的特性，如上面说明的，这将涉及传导性分布。如可以从图 8D 推断的，电震活动的到达时间将基本上取决于地球表面下的地震速度（在 63A 图示），以及关于产生电震活动位置的地震传感器位置。通过使用多个不同源 60B 和传感器 62S 的位置，可以估计在地球表面下产生电震活动的位置。

[0073] 在一些实施例中，可以对于每个震电和电震数据产生地球表面下的初始模型。如根据上面的描述可以推断的，这样的模型可以通过使用速度和结构分析进行约束，使用地震数据获得所述速度和结构分析。同样，这样的模型应当调整，以考虑根据 t-CSEM 数据确定的传导性分布。然后可以基于各个初始模型进行各个震电数据和电震数据的预期响应。将预期响应与所测量的响应进行比较、调整初始模型、并且重新计算预期响应，直到预期响应和所测量响应之间的差别最小。优选地，对于震电和电震数据的处理联合执行，从而产生最紧密考虑震电数据和电震数据的地球表面下的单一模型。

[0074] 前述的实施例从瞬态受控源电磁（t-CSEM）勘测数据的角度进行了说明，这样的数据用于产生地球表面下的模型。t-CSEM 勘测数据对于本发明的目的相比频域 CSEM 数据具有更多的优点，如本领域技术人员易于理解的。然而应当理解，频域电磁勘测数据可以用于其他的实施方式。

[0075] 在一个实施例中，地面下的地球构造分布模型可以进一步约束和改进，通过包含从穿过勘测区域中地球构造的井筒获取的数据。这样的数据可以包含例如钻井日志数据。在其他数据中，钻井日志数据可以包含关于地球中深度的声速、构造密度、电导性、以及中子孔隙率、粘土矿物成分的记录。与上面讨论的表面测量数据相比，钻井日志数据通常关于在地球中的深度具有非常高的分辨率；然而钻井日志数据相对地局限于其所属的（环绕钻井孔的）空间体积。因而，钻井日志数据可以用于进一步在钻井日志数据的轴向分辨率限度内约束地球模型。可以估计地球模型的组成和结构的横向变化，例如通过将钻井日志数据与地震数据和 t-CSEM 数据的属性进行相关。例如参见授予 Taner 等人的美国专利 6957146，描述了对钻井日志数据和地震属性进行相关的方法。其他涉及钻井的数据可以包含从钻孔获取的地球构造的核心采样的分析。钻孔数据也可以包含钻探岩性数据，例如构造组成和钻孔钻探率的相关性。钻孔数据还可以包含地球构造中流体压力的测量。前述的任何一种或者全部都可以用作对地球模型的约束。进一步约束解释的结果是，最终的地球模型包含各种地球构造属性的空间分布，例如岩性、多孔性、流体饱和度（及与其相反的碳氢化合物饱和度）、渗透性以及其他属性。这些地球表面下属性的空间分布可以用于在部分勘测数据中更加精确地定位地面下碳氢化合物储藏，仅使用从地球表面和 / 或海底获取的数据。

[0076] 在依照本发明的综合解释方法的特定实施方式中，t-CSEM 和 / 或地震测量可以在选定的时间在相同的地理区域上重复，以监测地面下储藏体中的碳氢化合物 / 水接触表面、或气 / 油接触表面的运动。在这样的实施方式中，基本如上面参照图 3A 到 6 说明的那样进行地球物理学测量。使用基本上如上所说明的组合解释技术，可以确定流体接触、例如碳氢化合物 / 水接触或气 / 油接触的空间分布。在从地面下储藏体开始碳氢化合物生产之后的选定时间，重复 t-CSEM 和地震测量中的至少一种，并且再次确定接触面的空间分布，例如通过如上说明的组合解释。在一些实施例中，可以在选定的时间重复重力测

量,以便协助确定特别是含有气体的地面下储藏体的空间分布变化。如果存在穿过储藏体的适当钻孔,可以根据这些钻孔进行构造属性的测量,从而可以提高所计算空间分布的分辨率。适当的钻孔可以包含流体生产或注入钻孔,流体生产或注入对于该钻孔暂时中止,从而可以通过这些钻孔进行测量。其他的实施例可以在地面下储藏体中提供永久的“监测”钻孔。例如参见授予 Strack 的美国专利 6739165,发明名称为 Combined surface and wellbore electromagnetic measurement system and method for determining formation fluid properties,转让与本申请的受让人,描述了适用于流体接触监测的钻孔测量类型。这样的测量包含但不限于间隔声速、构造电阻率、密度(散射伽马-伽马或者差分重力)以及热中子捕获横截面。

[0077] 在一些实施方式中,可以将联合解释匹配到来自模型化地面下储藏体的产量历史信息或者使之受产量历史信息的约束。产量历史匹配包含在储藏体压力和温度条件下从储藏体移除或者注入储藏体的流体体积测定,从而通过使用稍后获取的数据重复图 6 中所示处理计算的流体接触空间分布变化可以受到估计的约束或者匹配到该估计,所述估值为流体接触分布将如何关于从储藏体抽取的计算流体体积而变化。

[0078] 在一些实施方式中,根据图 6 所示综合解释的重复执行确定的流体接触模型化空间分布可以与根据储藏体仿真计算机程序确定的流体接触空间分布中的模型化变化相比较。这样的计算机程序可以接受作为输入的数据包括例如地震数据、钻井日志数据、核心分析数据、压力测量、流体压力/体积/温度(PVT)数据以及关于地面下储藏体中流体物理性质和空间分布的其他测量,以及各个钻孔的生产和注入历史。根据地面下储藏体关于贯穿储藏体的模拟或者实际井筒,储藏体仿真程序可以用于预测流体关于时间的生产率。仿真器结果可以与各个时间流体接触的模型化空间分布进行比较,从而约束或者调整综合解释的结果。储藏体仿真计算机程序可以通过商业途径获得,例如由德州休斯顿的 Landmark Graphics Corp. 在商标 VIP 下所销售的,或者由德州 Sugar Land 的 Schlumberger Technology Corp. 在商标 ECLIPSE 下所销售的。

[0079] 根据震电和电震数据产生的地球表面下模型优选地与电磁勘测数据联合反演,以产生包含电导率空间分布影响的地球表面下的震电模型。电磁勘测数据优选地通过使用 MT 数据进行约束以对基础岩石分布进行建模,并且优选地包含对如上说明的感应极化效应的调整。

[0080] 在一些实施例中,上面说明的解释技术的结果可以通过在任意或全部数据上进行波束形成来改善。波束形成的完成可以通过在沿着地球表面或水体表面的选定位置上布置多个(地震和/或电磁的)源,并且在每个单独的源以选定的激励时间延迟来激励这些源。时间延迟被选择为地震和/或电磁能量近似以平面波方式传播。平面波的传播方向可以通过各个源的激励之间时间延迟的恰当选取来被选择。通过选择地震和/或电磁能量的不同传播方向,可以从不同方向激发(“照射”)地球表面下的任意特定部分,这取决于在地球表面上(或者水体表面上)源和传感器的位置。可以对地震数据、震电数据和电震数据执行波束形成,例如在 Adler, G. 的文章 Beam steering and controlled illumination 中说明的,文章刊登在 2001 年的 CSEG Recorder 第 8-19 页。可以对电磁数据执行波束形成,例如在 Chen, J. C., Yao, K. 和 Hudson, R. E. 的文章 Source localization and forming 中说明的,文章刊登在 2002 年的 IEEE, Signal Processing Magazine 三月号第 30-39 页。在一些

实施例中,指示相对低电导率、并且由于震电信号具有渗透性指示的地面下的区域可以通过从各个方向照射这样的区域来确认。关于各个照射方向存在相同地面下的区域的指示可以用以提高这样的地面下的区域确实存在并且可能其中具有可生产的碳氢化合物的可能性。

[0081] 采集过程中波束形成/聚焦的基础是使用扩展的源和/或接收机阵列。这些阵列的各个能量源和/或接收机单元同时使用。对于地震源,这意味着多个发射是同时或者顺序进行的,序列的持续时间相对于信号持续时间较短。在基本相同的时间发射扩展的源阵列将产生垂直向下传播的平面波。在各个发射之间使用线性时间偏移,可以构成在任意预选倾斜方向传播的平面波。使用非线性时间偏移,可以构成非平面波,并且这样的波可以聚焦于地球表面下的特定目标。如根据反射定律易于推断的,垂直向下传播的平面波将不会被倾斜超过45度的反射体反射回地球表面。前面的例子显示,对于地面下的完全扫描需要大量照明,例如在不同方向倾斜的平面波。使用电子监控的源持续时间,可以实现大量更加复杂的波束形成方法。对于非平面波来说需要类似的多个发射。由于互易原理,所有的前述技术可以同样地应用于接收机阵列。

[0082] 在地震勘探中,广泛应用使用地震接收机的波束形成,并且安装巨大的永久站阵列(例如NORSAR)。这样的阵列使用复杂的实时波束形成程序。类似的系统用于地震报警(预警)系统中。

[0083] 在采集过程中和/或处理过程中,波束形成/聚焦是可能的。采集波束形成和处理波束形成技术两者都有各自的优点和缺点。处理过程中的波束形成/聚焦的主要优点是灵活性。可以选择和优化阵列的大小、单元之间的时间偏移。首要的缺点是需要处理较大的数据量,以及对应较低的信噪比。在弱反射区域,信噪比可能如此低以致于即使在信号处理情况中也不能在处理过程中发现充分的地震信息。

[0084] 采集过程中应用波束形成/聚焦具有缺点,例如阵列大小或时间偏移的这些技术规范是固定的。然而由于先验的较好的目标照明,在原始数据中信噪比可能好的多,从而可能获得成功的勘测。

[0085] 虽然已经涉及有限数量的实施例描述了本发明,受益于本公开启示的本领域技术人员将理解,可以设计不脱离这里所公开发明的范围的其他实施例。因而,本发明的范围应当仅由所附权利要求限定。

产生的断裂

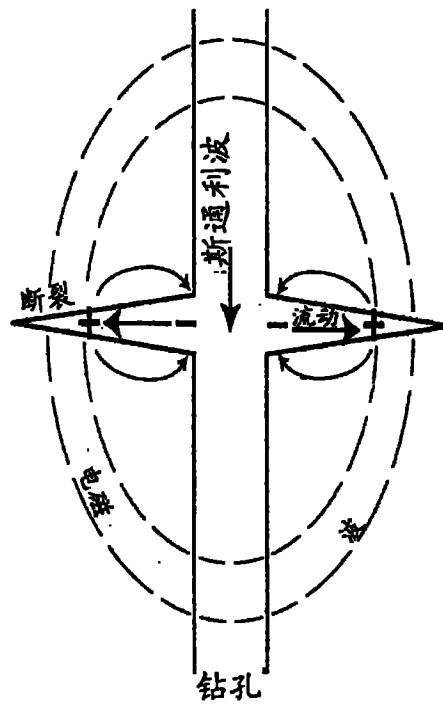


图 1B
(现有技术)

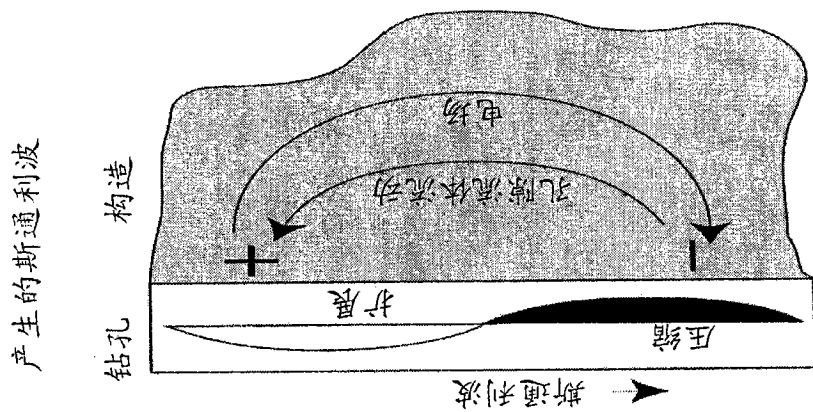


图 1A
(现有技术)

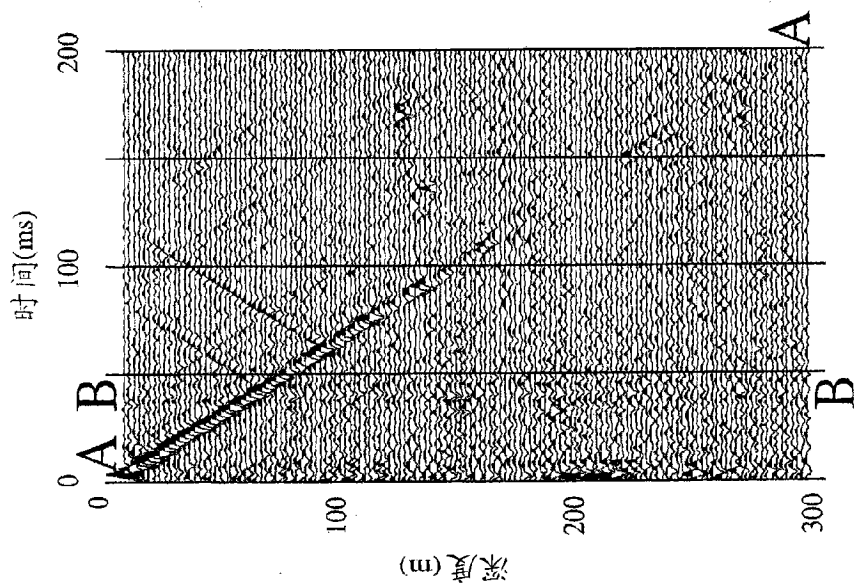
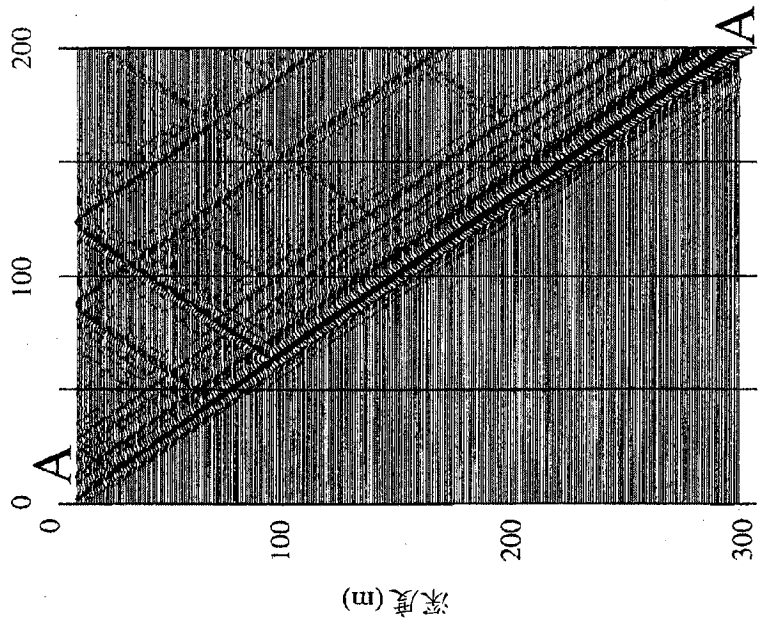


图 2B



压力

图 2A

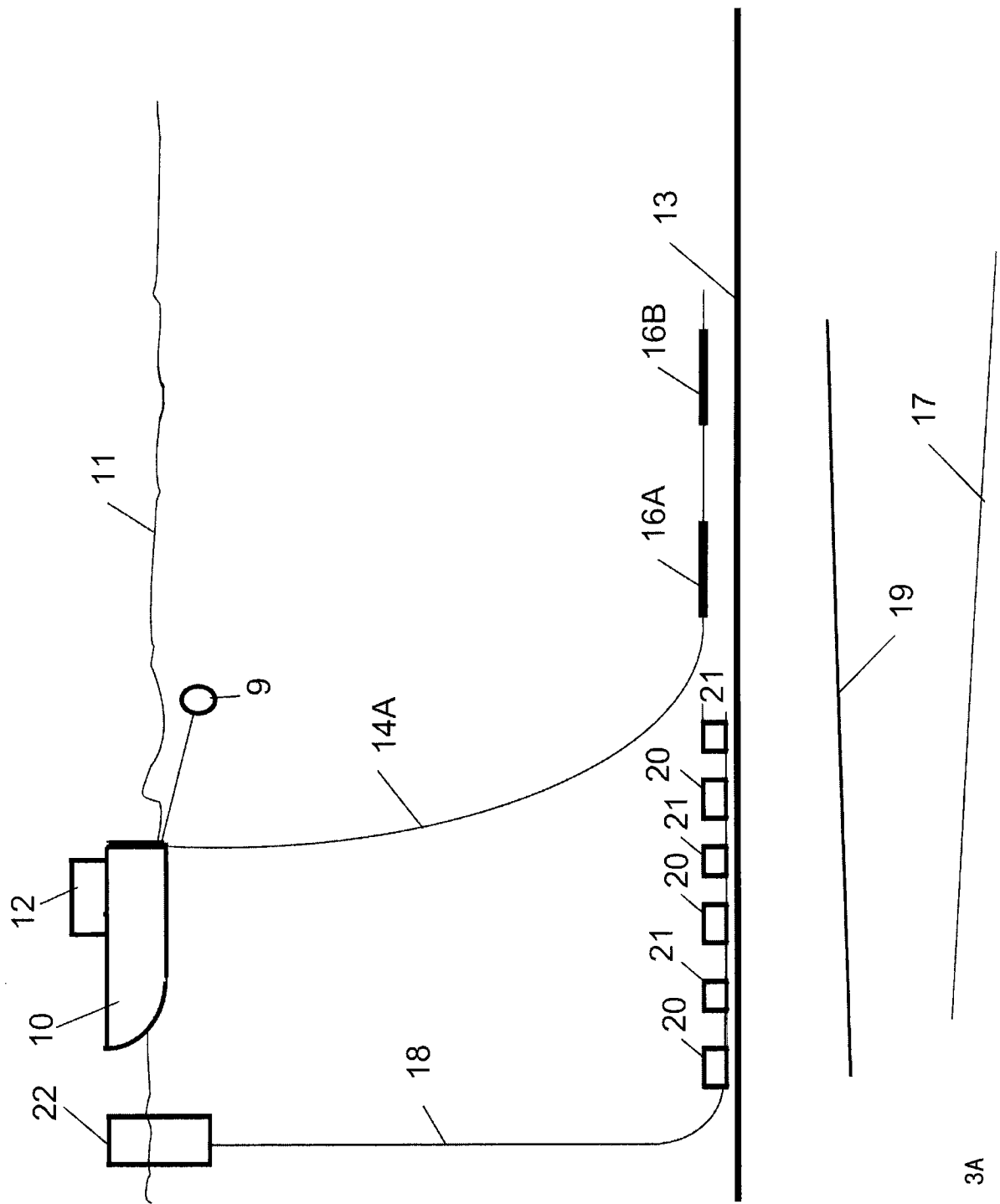


图 3A

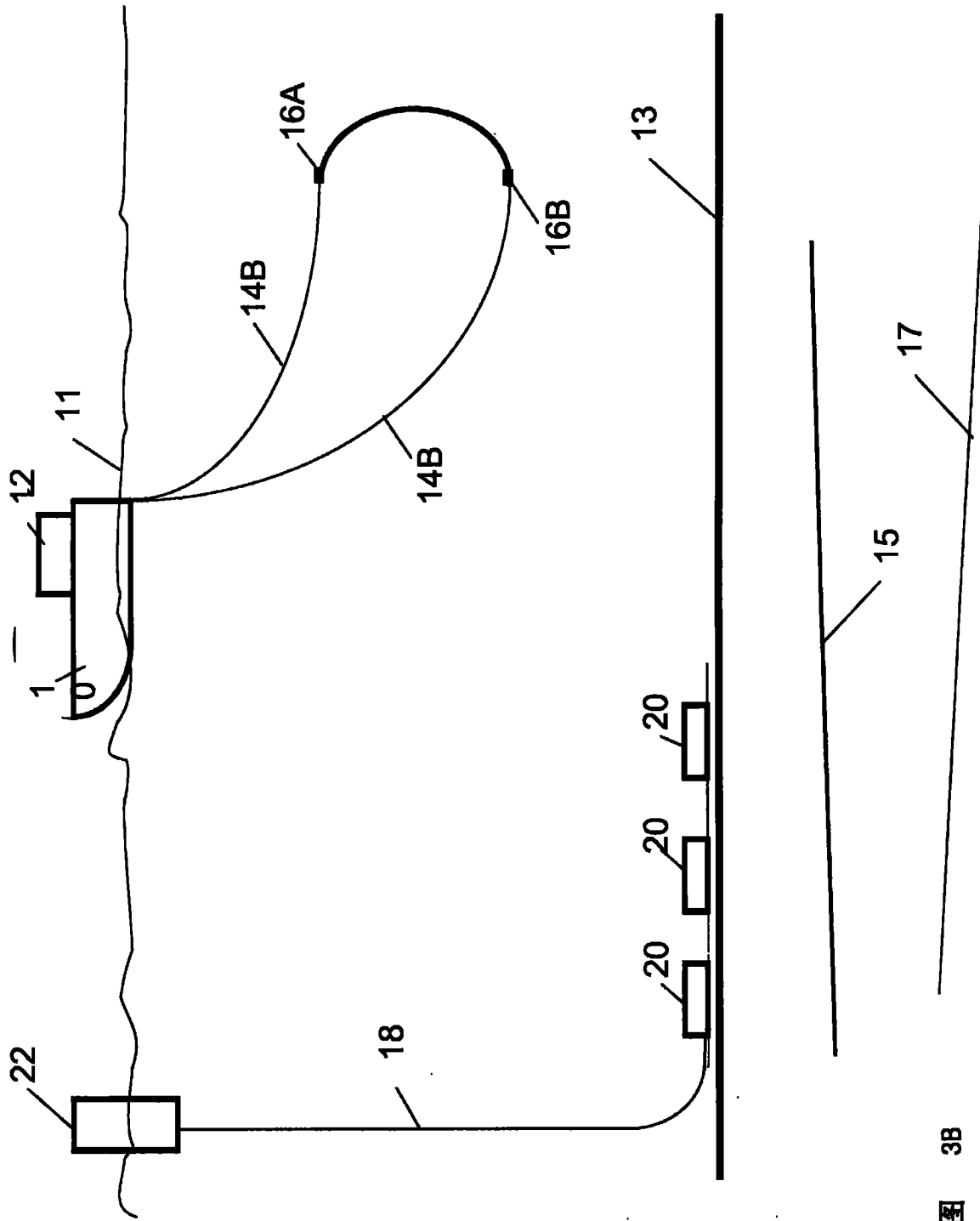


图 3B

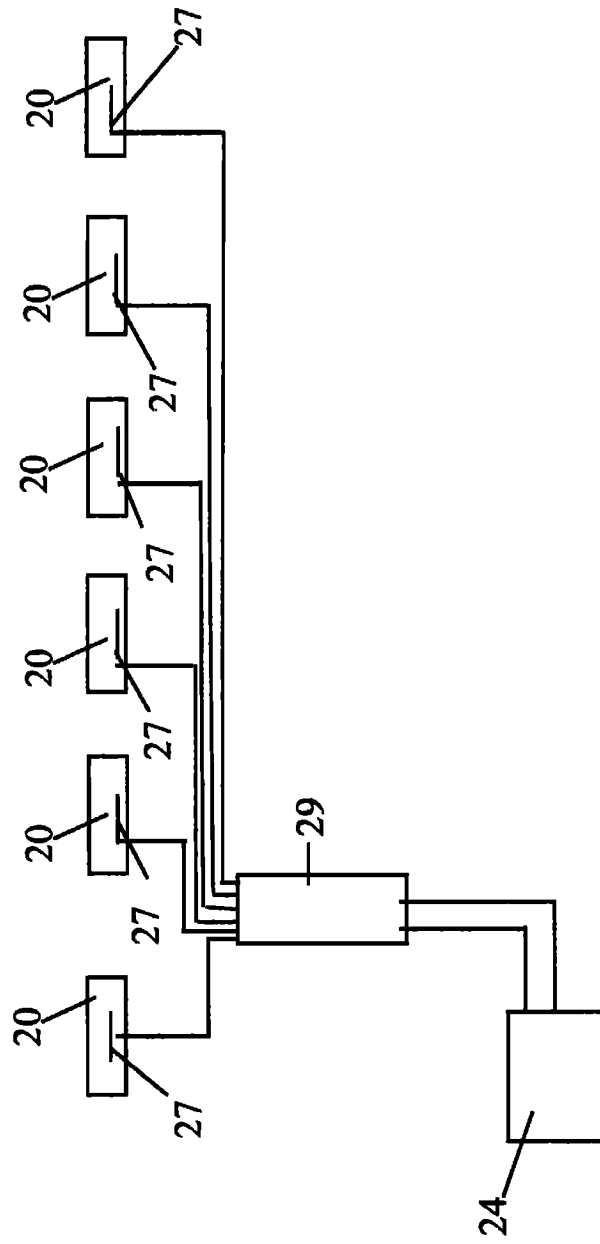


图 30

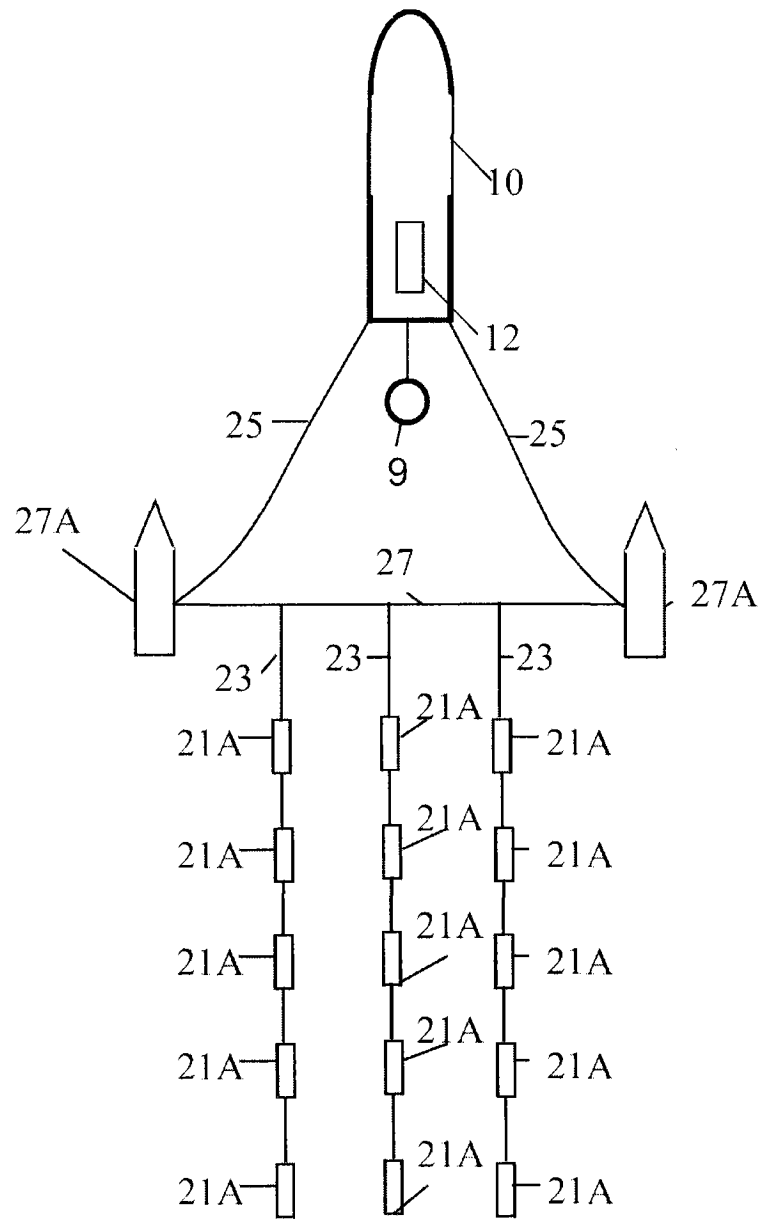


图 3D

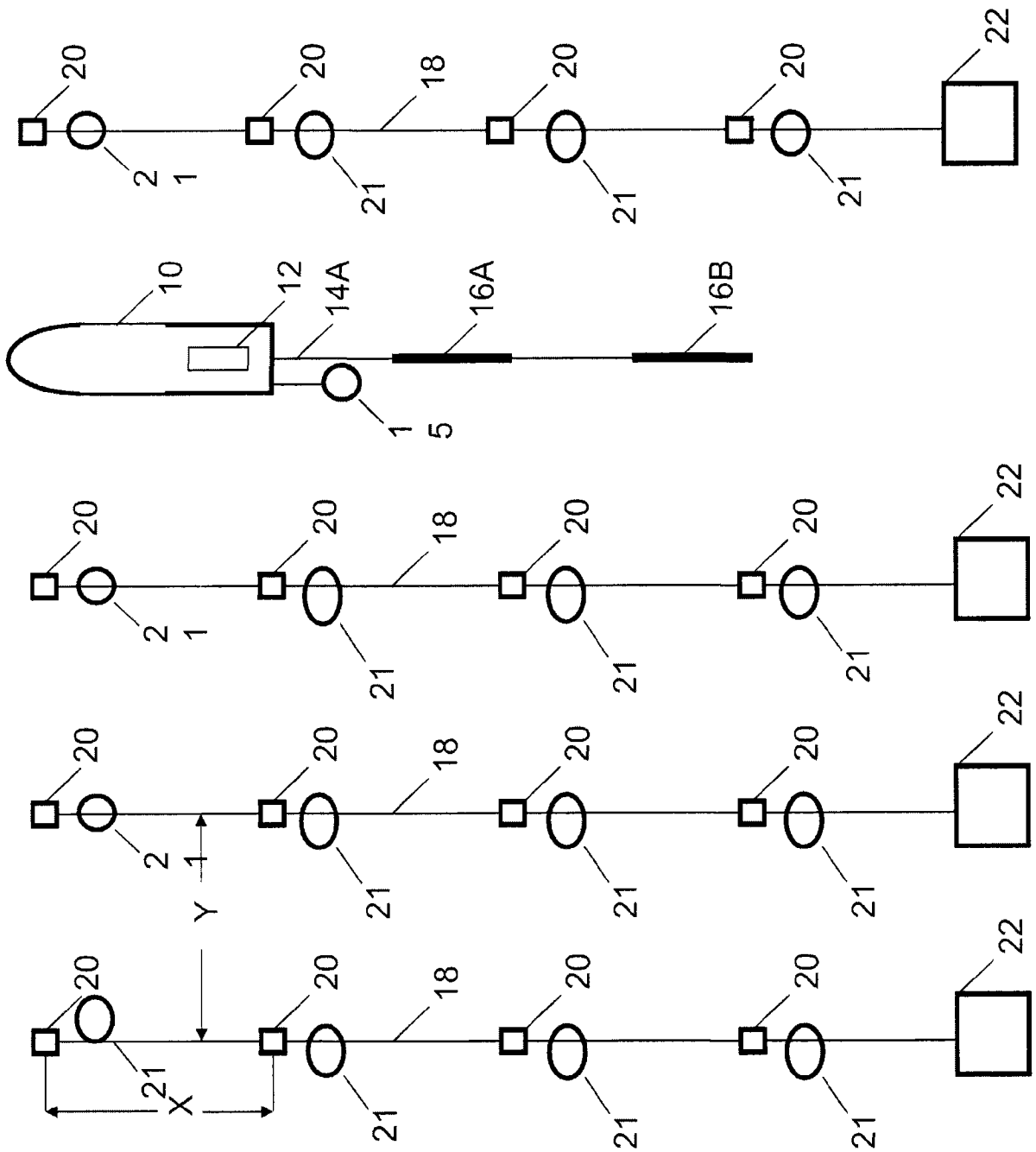


图 4

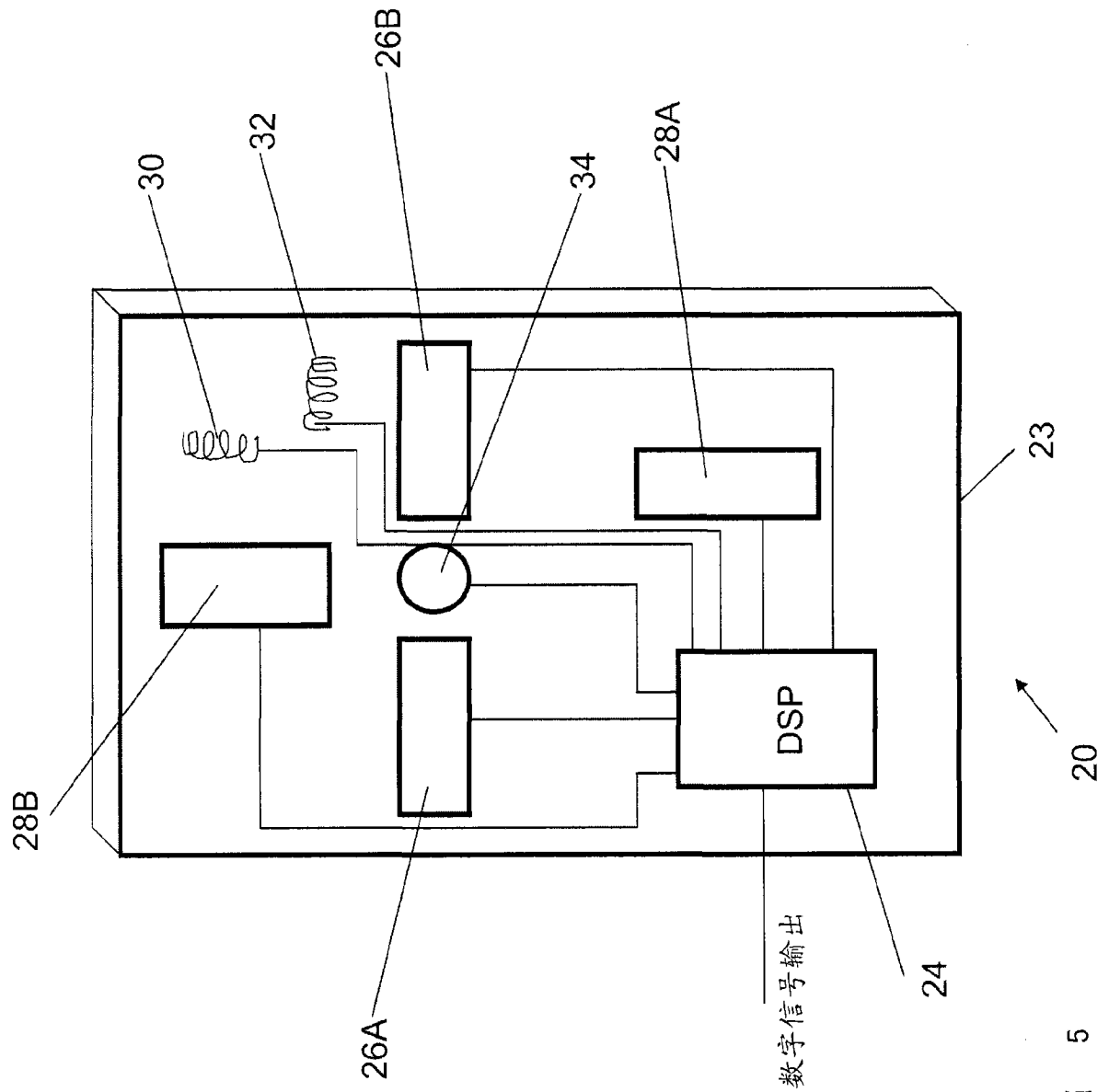


图 5

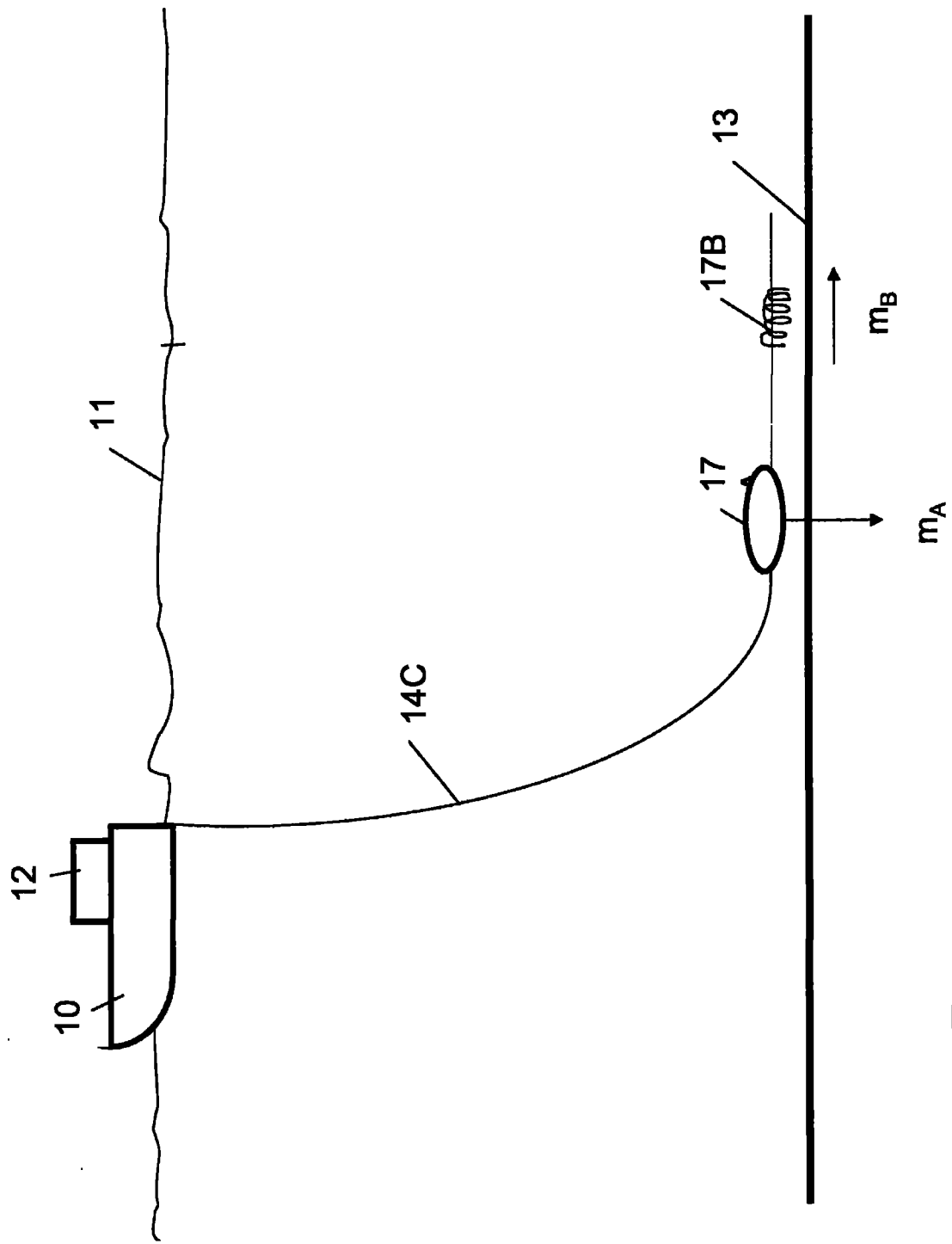


图 6

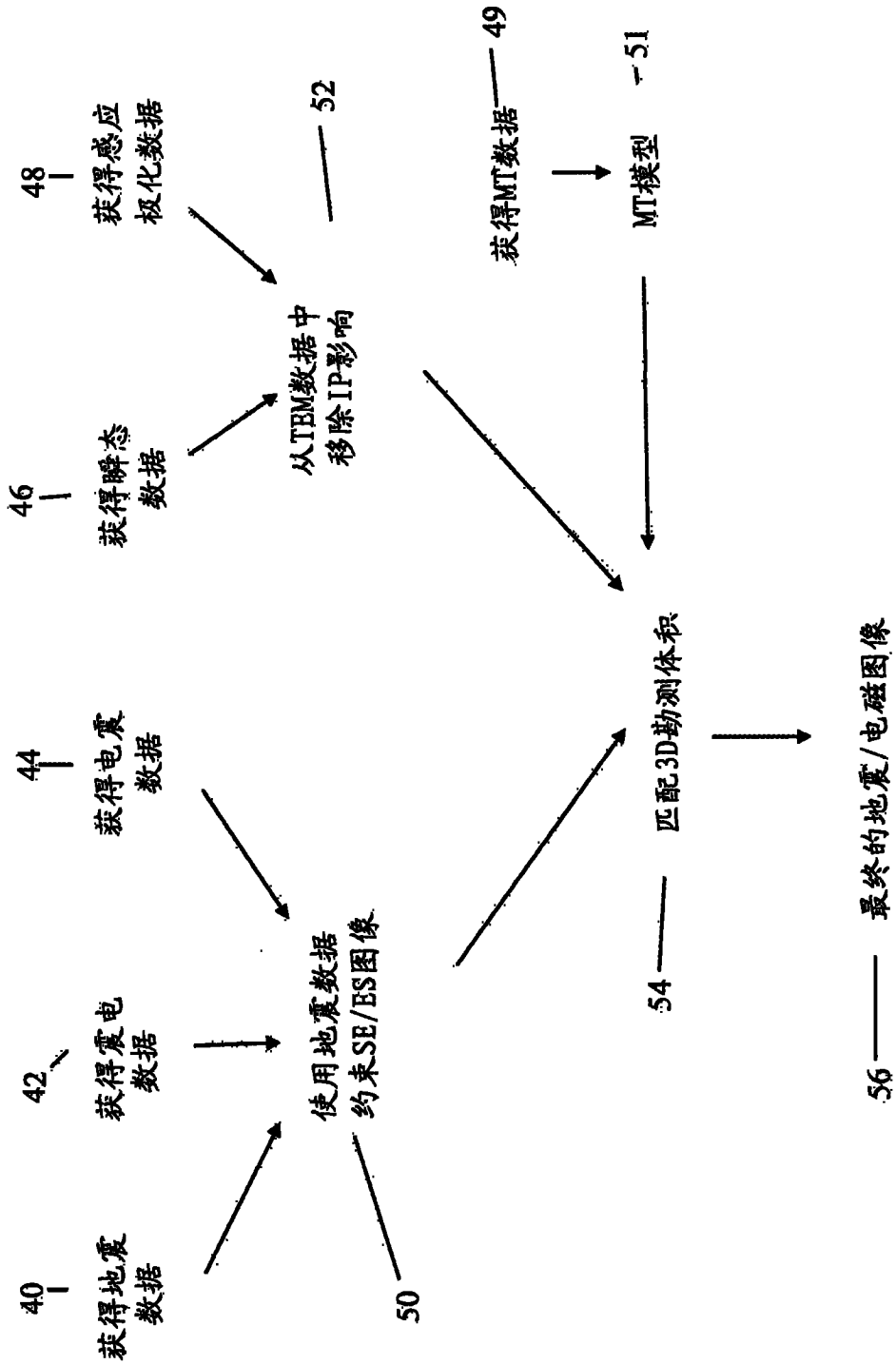


图 7

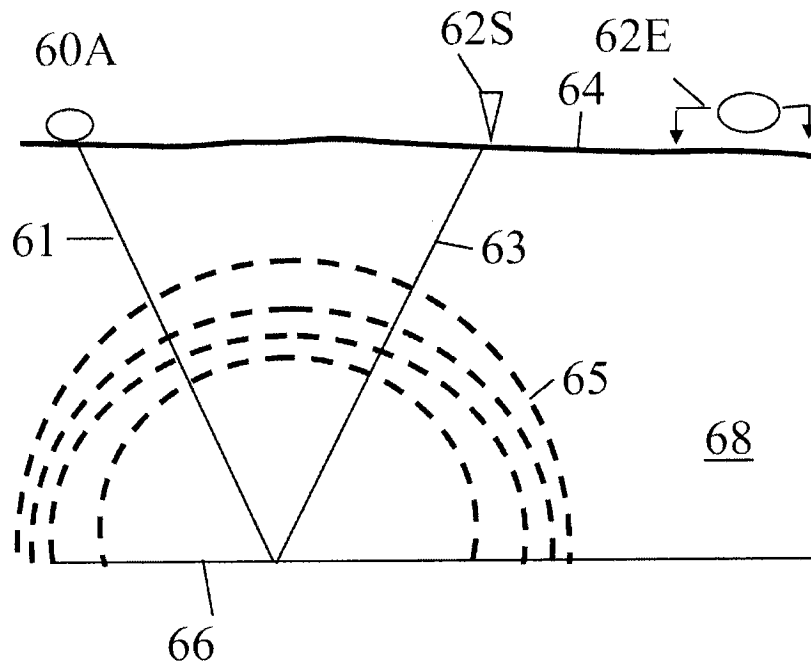


图 8A

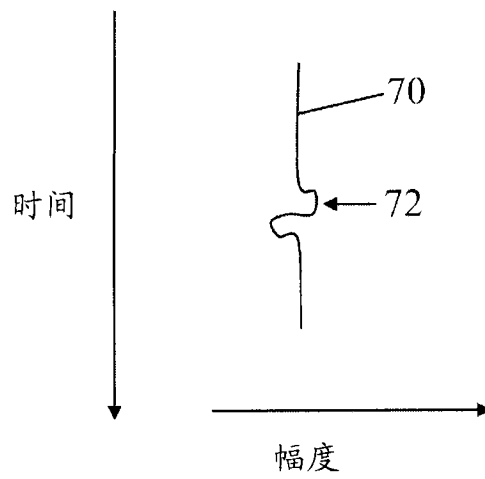


图 8B

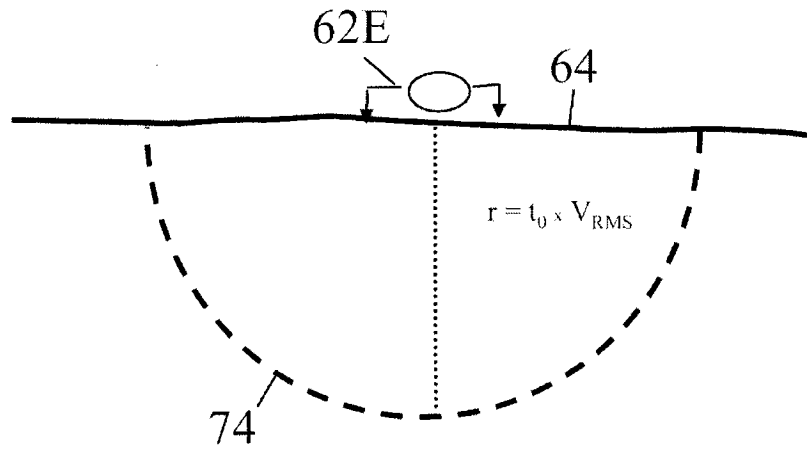


图 8C

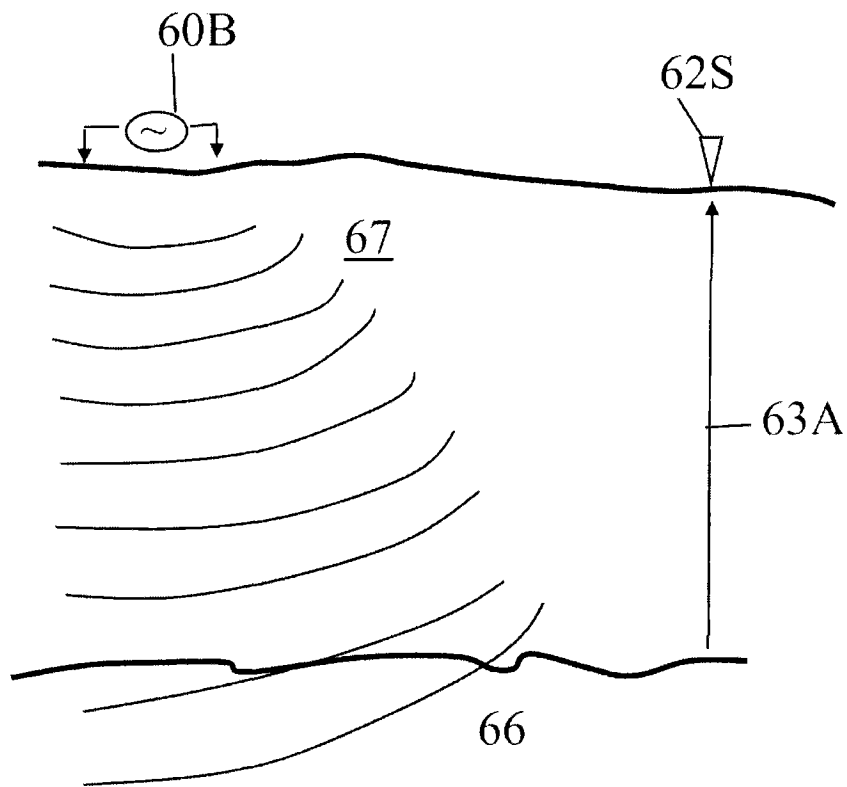


图 8D