(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国 际 局

(43) 国际公布日
2025 年 7 月 3 日 (03.07.2025)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2025/138985 A1

(51) 国际专利分类号:
G01V 1/28 (2006.01) *G01V 1/30* (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2024/115885

(22) 国际申请日: 2024 年 8 月 30 日 (30.08.2024)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202311841469.3 2023年12月28日 (28.12.2023) CN

(71) 申请人: 中国石油天然气集团有限公司 (**CHINA NATIONAL PETROLEUM CORPORATION**) [CN/CN]; 中国北京市东城区东直门北大街 9 号 100007 (CN)。 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司 (**BGP INC., CHINA NATIONAL PETROLEUM CORPORATION**) [CN/CN]; 中国河北省保定市涿州市范阳西路189号 072751 (CN)。

(72) 发明人:陈鹰鹏(**CHEN, Yingpeng**); 中国河北省保定市涿州市范阳西路189号 072751 (CN)。 叶再兵(**YE, Zaibing**); 中国河北省保定市涿州市范阳西路189号 072751 (CN)。 宋家文(**SONG, Jiawen**); 中国河北省保定市涿州市范阳西路189号 072751 (CN)。 胡军辉(**HU, Junhui**); 中国河北省保定市涿州市范阳西路189号 072751 (CN)。 戚群丽(**QI, Qunli**); 中国河北省保定市涿州市范阳西路189号 072751 (CN)。 赵珉(**ZHAO, Min**); 中国河北省保定市涿州市范阳西路189号 072751 (CN)。

(74) 代理人: 北京润平知识产权代理有限公司 (**RUNPING & PARTNERS**); 中国北京市海淀区北四环西路9号银谷大厦515室 100190 (CN)。

(54) **Title:** FREE SURFACE MULTI-WAVE SUPPRESSION METHOD AND APPARATUS FOR OCEAN BOTTOM NODE DATA

(54) 发明名称: 海底节点数据自由表面多次波压制方法及装置

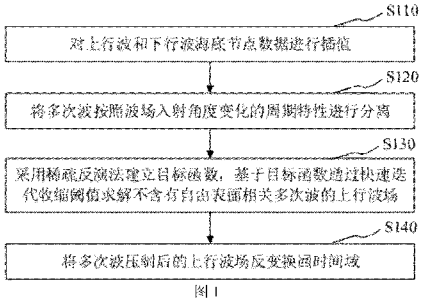

图 1

S110 Perform interpolation of upgoing wave and downgoing wave ocean bottom node data
S120 Separate multiple waves according to periodic characteristics of a wave field incident angle change
S130 Use a sparse inversion method to establish a target function, and, on the basis of the target function and by means of a fast iterative shrinkage threshold, solve for an upgoing wave field that does not contain multiple waves related to a free surface
S140 Inversely transform the upgoing wave field after multi-wave suppression back to the time domain

(57) **Abstract:** A free surface multi-wave suppression method for ocean bottom node data, relating to the technical field of seismic exploration. The method comprises: performing interpolation of upgoing wave and downgoing wave ocean bottom node data (S110); separating multiple waves according to periodic characteristics of a wave field incident angle change (S120); and using a sparse inversion method to establish a target function, and, on the basis of the target function and by means of a fast iterative shrinkage threshold, solving for an upgoing wave field that does not contain multiple waves related to a free surface (S130), so as to remove multiple waves on the free surface. According to the method, multiple waves on a free surface in an upgoing wave field of ocean bottom node data of an ultra-shallow water area can be removed, and primary wave imaging quality of seismic data is improved. Further provided is a free surface multi-wave suppression apparatus for ocean bottom node data, a computer device, and a computer program product.

(57) 摘要: 一种海底节点数据自由表面多次波压制方法，涉及地震勘探技术领域，包括：对上行波和下行波海底节点数据进行插值（S110）；将多次波按照波场入射角度变化的周期特性进行分离（S120）；采用稀疏反演法建立目标函数；基于目标函数通过快速迭代收缩阈值求解不含有自由表面相关多次波的上行波场（S130），以去除自由表面多次波。方法可以去除超浅水域海底节点数据上行波场中的自由表面多次波，提高地震资料一次波成像品质。还提供一种海底节点数据自由表面多次波压制装置、计算机设备和计算机程序产品。

WO 2025/138985 A1

[见续页]

(81) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:
— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

海底节点数据自由表面多次波压制方法及装置

技术领域

本发明涉及地震勘探技术领域，具体地涉及一种海底节点数据自由表面多次波压制方法及装置。

背景技术

与传统的窄方位（NAZ）拖缆采集相比，海底节点（OBN）勘探具有采集施工灵活、超长偏移距接收、全方位、高覆盖、可重复性和宽频、多分量的优点，在海洋复杂油气田勘探和油气藏开发中发挥重要作用，逐渐替代拖缆采集。

在海底节点（OBN）采集中，将水检和陆检三分量检波器埋置到海洋底部来记录压力和速度数据，水检 P 分量的检波器为压力检波器，没有方向性；陆检三分量为速度检波器，具有方向性，包括 X、Y、Z 三个分量，其中 Z 分量垂直于海底接收纵波信号。通过水检 P 分量和陆检 Z 分量进行波场分离可以分为上行波和下行波。然而上行波场仍然存在大量与自由表面（海面）相关的多次波，包括炮点鬼波、水层多次波以及与反射层相关的自由表面多次波等，这些多次波严重影响了勘探资料品质，导致产生构造假象，增加了勘探风险，因此在数据处理中必须对其进行去除。

现有技术采用上下行波场反褶积技术，在海水相对较深（大于 20 米）且海底较为平坦的水域能较好地去除上行波场的自由表面多次波，然而在超浅水域（1-20 米）采集的 OBN 数据处理中，直达波（下行波）道数非常稀少，且被强能量噪音掩盖，同时波场传播距离和枪阵尺寸规模相当，海底节点记录的波场异常复杂，超浅水域 OBN 数据的上行波成像精度会受到多次波的严重影响，现有的上下行波场反褶积技术难以取得理想的效果。

发明内容

为了解决现有技术缺陷，本发明提供一种海底节点数据自由表面多次波压制方法，针对超浅水域海底节点数据上行波场中的自由表面多次波进行有效去除。

本发明一方面提供一种海底节点数据自由表面多次波压制方法，包括：

对上行波和下行波海底节点数据进行插值；

将多次波按照波场入射角度变化的周期特性进行分离；

采用稀疏反演法建立目标函数；

基于目标函数通过快速迭代收缩阈值求解不含有自由表面相关多次波的上行波场，以去除自由表面多次波。

本发明实施例中，所述对上行波和下行波海底节点数据进行插值，包括：利用傅里叶变换在频率-波数域对上行波和下行波海底节点数据进行高密度插值。

本发明实施例中，将稀疏空间采样的波场从稀疏时空域正变换到 FKK 域；设置相关门槛值，通过迭代方式提取波场的有效信息，进行高密度插值；将上行波和下行波反变换回高密度空间采样的时空域。

本发明实施例中，所述将多次波按照波场入射角度变化的周期特性进行分离，包括：分别对多次波的 P 分量和 Z 分量进行三维 Taup 变换，将多次波按照波场入射角度变化的周期特性进行分离。

本发明实施例中，所述三维 Taup 变换的公式为：

$$U(\tau,p_x,p_y)=\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}u(t=\tau+p_xx+p_yy,x,y)dxdy;$$

式中，

$$\tau=t-px;$$

$$p=\frac{dt}{dx}=\frac{1}{V^*}=\frac{sin\theta}{V};$$

其中，V^*表示视速度，θ 表示地震波射线的入射角，V 表示介质中的波速，t 为时间域样点，P_x 为 x 方向的 P 值采样，P_y 为 y 方向的 P 值采样，P 值代表波场的入射角。

本发明实施例中，所述采用稀疏反演法建立的目标函数为：

$$J(r)=\| U-Dr \|_2^2+\lambda \| r \|_0;$$

其中，

$$U=D*r;$$

$$r_{i+1}=T_\tau[r_i+D^H(U-Dr_i)];$$

U 表示上行波场，D 表示下行波场，r 是地下反射系数序列，λ 是正则化参数，T_τ 是变换域阈值算子，i 指第 i 次迭代。

本发明实施例中，所述海底节点数据自由表面多次波压制方法还包括：将

多次波压制后的上行波场反变换回时间域，获得时间域自由表面相关多次波衰减后的上行波场。

本发明实施例中，通过三维 Taup 反变换将多次波压制后的上行波场反变换回时间域，获得时间域 Vz 噪声模型；

所述三维 Taup 反变换的公式为：

$$u(t,x,y)=\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}U(\tau=t-p_x-p_y,p_x,p_y)dp_xdp_y;$$

其中，t 为时间域样点，P_x 为 x 方向的 P 值采样，P_y 为 y 方向的 P 值采样，P 值代表波场的入射角。

本发明另一方面提供一种海底节点数据自由表面多次波压制装置，包括：

插值模块，用于对上行波和下行波海底节点数据进行插值；

多次波分离模块，用于将多次波按照波场入射角度变化的周期特性进行分离；

多次波压制模块，用于采用稀疏反演法建立目标函数，基于目标函数通过快速迭代收缩阈值求解不含有自由表面相关多次波的上行波场，以去除自由表面多次波。

本发明还提供一种计算机设备，包括：存储器、处理器以及计算机程序，该计算机程序存储在存储器中，并被配置为由处理器执行以实现上述的海底节点数据自由表面多次波压制方法。

本发明基于 OBN 数据下行波场褶积地下反射系数序列等效于上行波场的模型，对 OBN 数据进行高密度插值后，在高精度三维 TauP 域综合利用上行波场和下行波场信息，通过稀疏反演法建立相关目标函数，通过快速迭代收缩阈值法求解不含有自由表面相关多次波的上行波场，避免了传统反褶积算法中信号相除带来的不稳定性，可以有效去除超浅水域 OBN 数据上行波场中的自由表面多次波，为地质研究提供真实可靠数据基础，减少勘探风险。

本发明技术方案的其它特征和优点将在下文的具体实施方式部分予以详细说明。

附图说明

此处所说明的附图用来提供对本发明的进一步理解，构成本发明的一部分，本发明的示意性实施例及其说明用于解释本发明，并不构成对本发明的不当限定。在附图中：

图 1 是本发明实施例提供的海底节点数据自由表面多次波压制方法的流程图；

图 2 是时空域多次波（左）与 Taup 域多次波（右）的示意图；

图 3 是多次波衰减前道集（左）与多次波衰减后道集的示意图（右）；

图 4 是多次波衰减前叠加剖面的示意图；

图 5 是多次波衰减后叠加剖面的示意图；

图 6 是实际资料传统波压制方法多次波衰减后剖面与本发明多次波衰减后剖面的对比图；

图 7 是实际生产项目中采用本发明多次波压制方法的应用效果对比图。

具体实施方式

为了使本发明实施例中的技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图对本发明的示例性实施例进行进一步详细的说明，显然，所描述的实施例仅是本发明的一部分实施例，而不是所有实施例的穷举。需要说明的是，在不冲突的情况下，本发明中的实施例及实施例中的特征可以相互组合。

在本发明的描述中，需要理解的是，术语“中心”、“纵向”、“横向”、“长度”、“宽度”、“厚度”、“上”、“下”、“前”、“后”、“左”、“右”、“竖直”、“水平”、“顶”、“底”“内”、“外”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系，仅是为了便于描述本发明和简化描述，而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作，因此不能理解为对本发明的限制。此外，术语“第一”、“第二”仅用于描述目的，而不能理解为指示或暗示相对重要性或者隐含指明所指示的技术特征的数量。由此，限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或者隐含地包括一个或者更多个该特征。在本发明的描述中，“多个”的含义是至少两个，例如两个，三个等，除非另有明确具体的限定。

如背景技术所介绍的，现有技术采用上下行波场反褶积技术，在海水相对较深（大于 20 米）且海底较为平坦的水域能较好地去除上行波场的自由表面多次波，然而在超浅水域（1-20 米）采集的 OBN 数据处理中，直达波（下行波）

道数非常稀少，且被强能量噪音掩盖，同时波场传播距离和枪阵尺寸规模相当，海底节点记录的波场异常复杂，超浅水域 OBN 数据的上行波成像精度会受到多次波的严重影响，现有的上下行波场反褶积技术难以取得理想的效果。

本发明实施方式提供一种海底节点数据自由表面多次波压制方法，基于 OBN 数据下行波场褶积地下反射系数序列等效于上行波场的模型，对 OBN 数据进行高密度插值后，在高精度三维 TauP 域综合利用上行波场和下行波场信息，通过稀疏反演法建立相关目标函数，通过快速迭代收缩阈值法求解不含有自由表面相关多次波的上行波场，避免了传统反褶积算法中信号相除带来的不稳定性，可以有效去除超浅水域 OBN 数据上行波场中的自由表面多次波，为地质研究提供真实可靠数据基础，减少勘探风险。

图 1 是本发明实施例提供的海底节点数据自由表面多次波压制方法的流程图。如图 1 所示，本实施例提供的海底节点数据自由表面多次波压制方法，包括以下步骤：

S110，对上行波和下行波海底节点数据进行插值；

S120，将多次波按照波场入射角度变化的周期特性进行分离；

S130，采用稀疏反演法建立目标函数，基于目标函数通过快速迭代收缩阈值求解不含有自由表面相关多次波的上行波场，以去除自由表面多次波；

S140，将多次波压制后的上行波场反变换回时间域。

在上述步骤 S110 中，利用傅里叶变换在频率-波数域（FK 域）对上行波和下行波海底节点数据进行高密度插值，将上行波场和下行波场均插值成高密度空间采样（采样间隔小于等于 6.25 米）。

具体的，将稀疏空间采样的波场从稀疏时空域正变换到 FKK 域，设置相关门槛值，通过迭代的方式提取波场的有效信息，然后将其反变换回高密度空间采样的时空域，完成高密度插值处理。即分别对上行波和下行波进行正变换、高密度插值和反变换，正变换的公式如下：

$$\hat{f}(k)=\frac{1}{\Delta x}\sum_{l\in N_p}\Delta x_l\, f(x_l)e^{-2\pi ikx_l} \qquad (1)$$

反变换的公式如下：

$$f^k(x_l)=\hat{f}(k)e^{2\pi ikx_l} \qquad (2)$$

其中，正变换中 x 代表时间域采样点或者空间域采样点，反变换中 k 代表

频率域样点或者波束域样点。

在上述步骤 S120 中，利用 Taup 变换将多次波按照波场入射角度变化导致的周期特性进行分离。具体包括：分别对多次波的 P 分量和 Z 分量进行三维 Taup 变换，以二维 Taup 变换为例，其公式为：

$$U(\tau,p)=\int_{-\infty}^{+\infty}u(x,\tau+px)dx; \quad (3)$$

式（3）中，

$$\tau=t-px; \quad (4)$$

$$p=\frac{dt}{dx}=\frac{1}{V^*}=\frac{sin\theta}{V}; \quad (5)$$

其中，V^*表示视速度，θ 表示地震波射线的入射角，V 表示介质中的波速；

扩展为三维 Taup 变换，其公式为：

$$U(\tau,p_x,p_y)=\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}u(t=\tau+p_xx+p_yy,x,y)dxdy; \quad (6)$$

式（6）中，

$$\tau=t-px;$$

$$p=\frac{dt}{dx}=\frac{1}{V^*}=\frac{sin\theta}{V};$$

其中，V^*表示视速度，θ 表示地震波射线的入射角，V 表示介质中的波速，t 为时间域样点，P_x 为 x 方向的 P 值采样，P_y 为 y 方向的 P 值采样，P 值代表波场的入射角。

在上述步骤 S130 中，在三维 Taup 域采用稀疏反演法，建立相关目标函数，并通过快速迭代收缩阈值求解不含有自由表面相关多次波的上行波场，有效避免了传统上下行波场反褶积算法里面信号相除带来的不稳定性。采用稀疏反演法建立的目标函数为：

$$U=D*r; \quad (7)$$

$$J(r)=\| U-Dr \|_2^2+\lambda \| r \|_0; \quad (8)$$

$$r_{i+1}=T_\tau[r_i+D^H(U-Dr_i)]; \quad (9)$$

式（7）基于 OBN 数据下行波场褶积地下反射系数序列等效于上行波场的模型得到的，其中 U 表示上行波场，D 表示下行波场，r 是地下反射系数序列；从式（7）可以推导出：$r=U\overline{D}/(D\overline{D}+\varepsilon^2)$；

式（8）为目标函数，λ 是正则化参数；

式（9）中，T_τ 是变换域阈值算子，i 指第 i 次迭代。

在上述步骤 S140 中，通过三维 Taup 反变换将多次波压制后的上行波场反变换回时间域，获得时间域 Vz 噪声模型，从而获得时间域自由表面相关多次波衰减后的上行波场。三维 Taup 反变换的公式为：

$$u(t,x,y)=\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}U(\tau=t-p_x-p_y,p_x,p_y)dp_xdp_y; \quad (10)$$

式（10）中，t 为时间域样点，P_x 为 x 方向的 P 值采样，P_y 为 y 方向的 P 值采样，P 值代表波场的入射角。

在一具体应用场景下，利用 Taup 变换将多次波按照波场入射角度分离，如图 2 所示，左部分为时空域多次波，右部分为 Taup 域多次波。基于理论数据的测试效果如图 3 所示，左部分为多次波衰减前道集，右部分为多次波衰减后道集。多次波衰减前叠加剖面如图 4 所示，多次波衰减后叠加剖面如图 5 所示，从图 4 与图 5 对比可以看出，多次波衰减后的成像效果更好。基于实际资料，采用传统多次波压制方法与本发明多次波压制方法的测试结果对比如图 6 所示，图中左部分为传统波压制方法多次波衰减后剖面，图中右部分为本发明多次波衰减后剖面。在一实际生产项目中，采用本发明多次波压制方法的应用效果对比如图 7 所示，图中上部分为多次波衰减前剖面，图中下部分为多次波衰减后剖面，从图 7 可以看出多次波衰减后的成像效果更好。

使用上述实施例提供的方法进行多次波压制后，由于强反射的海面带来的所有相关多次波噪音得到有效衰减，明显提高地震资料一次波成像品质，获得能够准确反映地下地质情况的处理成果，为解释井位落实提供高保真数据基础，有效提高钻探成功率，将低勘探风险。

本发明实施方式还提供一种海底节点数据自由表面多次波压制装置，包括：插值模块、多次波分离模块以及多次波压制模块。插值模块用于对上行波和下行波海底节点数据进行插值。多次波分离模块用于将多次波按照波场入射角度变化的周期特性进行分离。多次波压制模块用于采用稀疏反演法建立目标函数，基于目标函数通过快速迭代收缩阈值求解不含有自由表面相关多次波的上行波场，以去除自由表面多次波。

在一实施例中，插值模块利用傅里叶变换在频率-波数域（FK 域）对上行波和下行波海底节点数据进行高密度插值，将上行波场和下行波场均插值成高密

度空间采样（采样间隔小于等于 6.25 米）。

具体的，将稀疏空间采样的波场从稀疏时空域正变换到 FKK 域，设置相关门槛值，通过迭代的方式提取波场的有效信息，然后将其反变换回高密度空间采样的时空域，完成高密度插值处理。即分别对上行波和下行波进行正变换、高密度插值和反变换，正变换的公式如下：

$$\hat{f}(k)=\frac{1}{\Delta x}\sum_{l\in N_p}\Delta x_l\, f(x_l)e^{-2\pi ikx_l};\qquad(1)$$

反变换的公式如下：

$$f^k(x_l)=\hat{f}(k)e^{2\pi ikx_l};\qquad(2)$$

其中，正变换中 x 代表时间域采样点或者空间域采样点，反变换中 k 代表频率域样点或者波束域样点。

在一实施例中，多次波分离模块利用 Taup 变换将多次波按照波场入射角度变化导致的周期特性进行分离。具体包括：分别对多次波的 P 分量和 Z 分量进行三维 Taup 变换，其公式为：

$$U(\tau,p_x,p_y)=\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}u(t=\tau+p_xx+p_yy,x,y)dxdy;\qquad(6)$$

式（6）中，

$\tau=t-px$；

$p=\frac{dt}{dx}=\frac{1}{V^*}=\frac{sin\theta}{V}$ ；

其中，V^*表示视速度，θ 表示地震波射线的入射角，V 表示介质中的波速，t 为时间域样点，P_x 为 x 方向的 P 值采样，P_y 为 y 方向的 P 值采样，P 值代表波场的入射角。

在一实施例中，多次波压制模块在三维 Taup 域采用稀疏反演法，建立相关目标函数，并通过快速迭代收缩阈值求解不含有自由表面相关多次波的上行波场，有效避免了传统上下行波场反褶积算法里面信号相除带来的不稳定性。采用稀疏反演法建立的目标函数为：

$$U=D*r;\qquad(7)$$

$$J(r)=\|U-Dr\|_2^2+\lambda\|r\|_0;\qquad(8)$$

$$r_{i+1}=T_\tau[r_i+D^H(U-Dr_i)];\qquad(9)$$

式（7）基于 OBN 数据下行波场褶积地下反射系数序列等效于上行波场的

模型得到的，其中 U 表示上行波场，D 表示下行波场，r 是地下反射系数序列；从式（7）可以推导出：$r=U\bar{D}/(D\bar{D}+\varepsilon^2)$；

式（8）为目标函数，λ 是正则化参数；

式（9）中，T_τ 是变换域阈值算子，i 指第 i 次迭代。

通过三维 Taup 反变换将多次波压制后的上行波场反变换回时间域，获得时间域 Vz 噪声模型，从而获得时间域自由表面相关多次波衰减后的上行波场。三维 Taup 反变换的公式为：

$$u(t,x,y)=\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}U\left(\tau=t-p_x-p_y,p_x,p_y\right)dp_xdp_y; \quad (10)$$

式（10）中，t 为时间域样点，P_x 为 x 方向的 P 值采样，P_y 为 y 方向的 P 值采样，P 值代表波场的入射角。

本发明实施方式还提供一种计算机设备，包括：存储器及处理器，该存储器存储有计算机程序，该处理器用于执行该计算机程序以实现上述的海底节点数据自由表面多次波压制方法。

本发明实施方式还提供一种计算机程序产品，包括计算机程序，该计算机程序在被处理器执行时实现上述的海底节点数据自由表面多次波压制方法。

本发明实施方式还提供一种机器可读存储介质，其上存储有计算机程序指令，所述计算机程序指令被处理器执行时实现上述的海底节点数据自由表面多次波压制方法。

本领域内的技术人员应明白，本发明的实施例可提供为方法、系统、或计算机程序产品。因此，本发明可采用完全硬件实施例、完全软件实施例、或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且，本发明可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储介质（包括但不限于磁盘存储器、CD-ROM、光学存储器等）上实施的计算机程序产品的形式。本发明实施例中的方案可以采用各种计算机语言实现，例如，面向对象的程序设计语言 Java 和直译式脚本语言 JavaScript 等。

本发明是参照根据本发明实施例的方法、设备（系统）、和计算机程序产品的流程图和／或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程图和／或方框图中的每一流程和／或方框、以及流程图和／或方框图中的流程和／或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理

机或其他可编程数据处理设备的处理器以产生一个机器，使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实现在流程图一个流程或多个流程和／或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。

这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特定方式工作的计算机可读存储器中，使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指令装置的制造品，该指令装置实现在流程图一个流程或多个流程和／或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上，使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理，从而在计算机或其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和／或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

尽管已描述了本发明的优选实施例，但本领域内的技术人员一旦得知了基本创造性概念，则可对这些实施例作出另外的变更和修改。所以，所附权利要求意欲解释为包括优选实施例以及落入本发明范围的所有变更和修改。显然，本领域的技术人员可以对本发明进行各种改动和变型而不脱离本发明的精神和范围。这样，倘若本发明的这些修改和变型属于本发明权利要求及其等同技术的范围之内，则本发明也意图包含这些改动和变型在内。

权利要求书

1.一种海底节点数据自由表面多次波压制方法，其特征在于，包括：

对上行波和下行波海底节点数据进行插值；

将多次波按照波场入射角度变化的周期特性进行分离；

采用稀疏反演法建立目标函数；

基于目标函数通过快速迭代收缩阈值求解不含有自由表面相关多次波的上行波场，以去除自由表面多次波。

2.根据权利要求 1 所述的海底节点数据自由表面多次波压制方法，其特征在于，所述对上行波和下行波海底节点数据进行插值，包括：

利用傅里叶变换在频率-波数域对上行波和下行波海底节点数据进行高密度插值。

3.根据权利要求 2 所述的海底节点数据自由表面多次波压制方法，其特征在于，所述利用傅里叶变换在频率-波数域对上行波和下行波海底节点数据进行高密度插值，包括：

将稀疏空间采样的波场从稀疏时空域正变换到 FKK 域；

设置相关门槛值，通过迭代方式提取波场的有效信息，进行高密度插值；

将上行波和下行波反变换回高密度空间采样的时空域。

4.根据权利要求 1 所述的海底节点数据自由表面多次波压制方法，其特征在于，所述将多次波按照波场入射角度变化的周期特性进行分离，包括：

分别对多次波的 P 分量和 Z 分量进行三维 Taup 变换，将多次波按照波场入射角度变化的周期特性进行分离。

5.根据权利要求 4 所述的海底节点数据自由表面多次波压制方法，其特征在于，所述三维 Taup 变换的公式为：

$$U(\tau, p_x, p_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u(t = \tau + p_x x + p_y y, x, y) dx dy;$$

式中，

$\tau = t - px$；

$p = \frac{dt}{dx} = \frac{1}{V^*} = \frac{sin\theta}{V}$ ；

其中，V^*表示视速度，θ 表示地震波射线的入射角，V 表示介质中的波速，t 为时间域样点，P_x 为 x 方向的 P 值采样，P_y 为 y 方向的 P 值采样，P 值代表波场的入射角。

6.根据权利要求 1 所述的海底节点数据自由表面多次波压制方法，其特征在于，所述采用稀疏反演法建立的目标函数为：

$J(r) = \| U - Dr \|_2^2 + \lambda \| r \|_0$；

其中，

$U = D * r$；

$r_{i+1} = T_\tau[r_i + D^H(U - Dr_i)]$；

U 表示上行波场，D 表示下行波场，r 是地下反射系数序列，λ 是正则化参数，T_τ 是变换域阈值算子，i 指第 i 次迭代。

7.根据权利要求 1 所述的海底节点数据自由表面多次波压制方法，其特征在于，所述方法还包括：

将多次波压制后的上行波场反变换回时间域，获得时间域自由表面相关多次波衰减后的上行波场。

8.根据权利要求 7 所述的海底节点数据自由表面多次波压制方法，其特征在于，所述将多次波压制后的上行波场反变换回时间域，包括：

通过三维 Taup 反变换将多次波压制后的上行波场反变换回时间域，获得时间域 Vz 噪声模型；

所述三维 Taup 反变换的公式为：

$u(t,x,y) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} U(\tau = t - p_x - p_y, p_x, p_y)dp_x dp_y$；

其中，t 为时间域样点，P_x 为 x 方向的 P 值采样，P_y 为 y 方向的 P 值采样，P 值代表波场的入射角。

9.一种海底节点数据自由表面多次波压制装置，其特征在于，包括：

插值模块，用于对上行波和下行波海底节点数据进行插值；

多次波分离模块，用于将多次波按照波场入射角度变化的周期特性进行分离；

多次波压制模块，用于采用稀疏反演法建立目标函数，基于目标函数通过快速迭代收缩阈值求解不含有自由表面相关多次波的上行波场，以去除自由表面多次波。

10.根据权利要求 9 所述的海底节点数据自由表面多次波压制装置，其特征在于，所述插值模块利用傅里叶变换在频率-波数域对上行波和下行波海底节点数据进行高密度插值。

11.根据权利要求 10 所述的海底节点数据自由表面多次波压制装置，其特征在于，所述插值模块利用傅里叶变换在频率-波数域对上行波和下行波海底节点数据进行高密度插值，包括：

将稀疏空间采样的波场从稀疏时空域正变换到 FKK 域；

设置相关门槛值，通过迭代方式提取波场的有效信息，进行高密度插值；

将上行波和下行波反变换回高密度空间采样的时空域。

12.根据权利要求 9 所述的海底节点数据自由表面多次波压制装置，其特征在于，所述多次波分离模块通过分别对多次波的 P 分量和 Z 分量进行三维 Taup 变换，将多次波按照波场入射角度变化的周期特性进行分离。

13.一种计算机设备，其特征在于，包括：

存储器，存储有计算机程序；

处理器，用于执行所述计算机程序以实现权利要求 1-8 任一项所述的海底节点数据自由表面多次波压制方法。

14.一种计算机程序产品，包括计算机程序，其特征在于，所述计算机程序

在被处理器执行时实现权利要求1-8任一项所述的海底节点数据自由表面多次波压制方法。

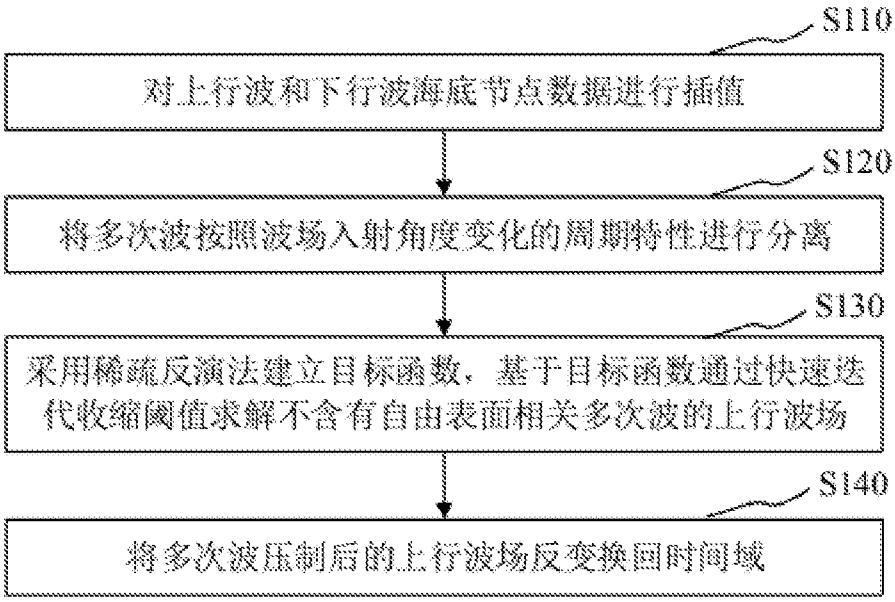
S110
对上行波和下行波海底节点数据进行插值
S120
将多次波按照波场入射角度变化的周期特性进行分离
S130
采用稀疏反演法建立目标函数，基于目标函数通过快速迭代收缩阈值求解不含有自由表面相关多次波的上行波场
S140
将多次波压制后的上行波场反变换回时间域

图 1

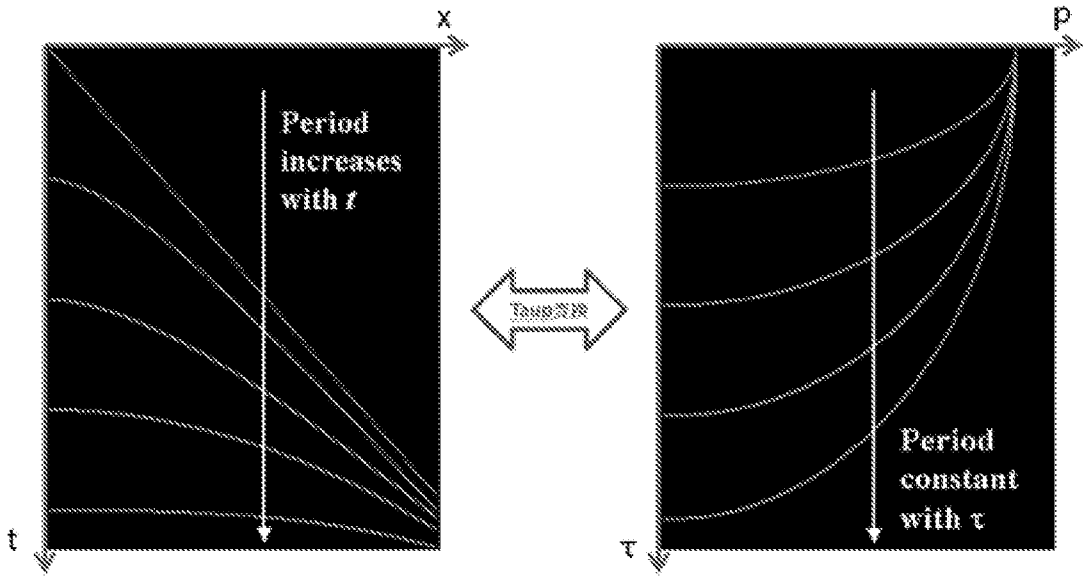
x
Period increases with t
t
Radon变换
p
Period constant with τ
τ

图 2

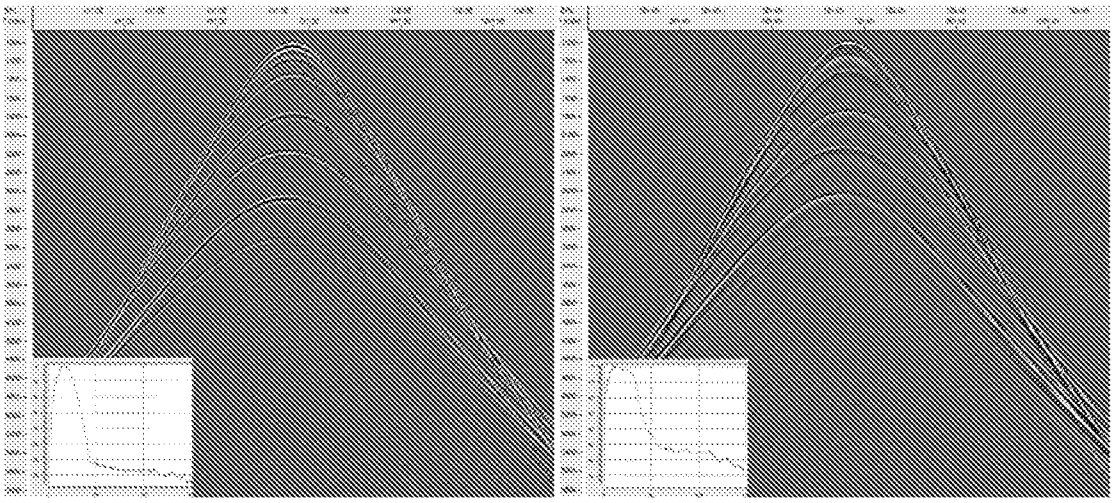

图 3

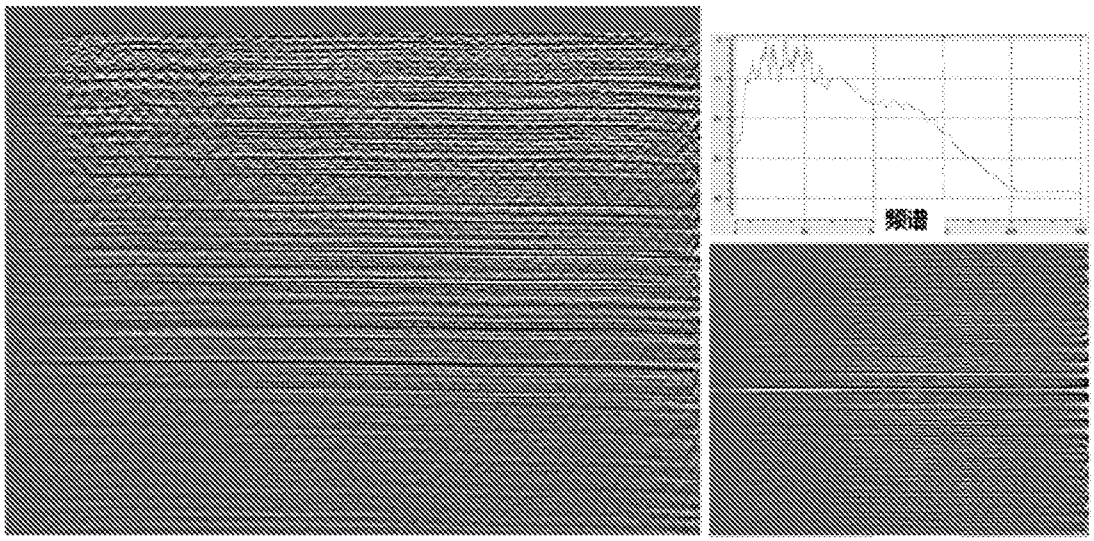

图 4

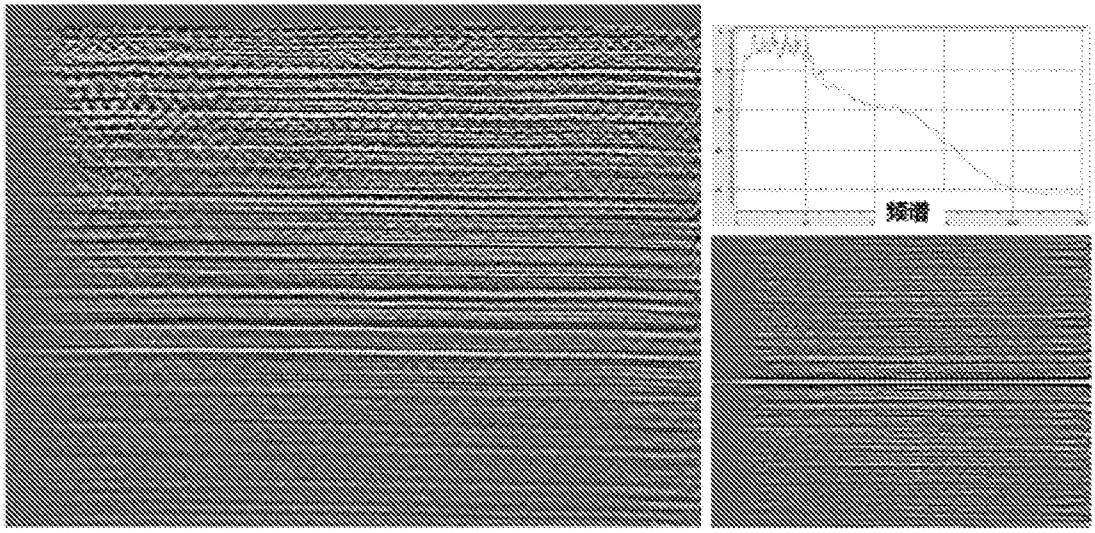

图 5

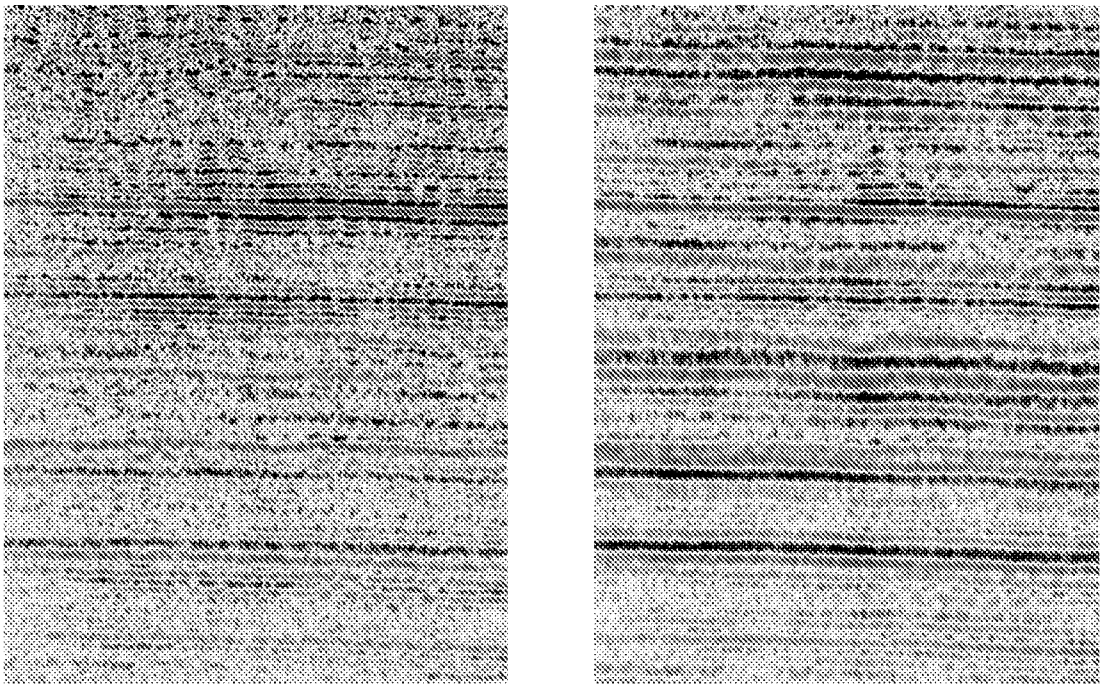

图 6

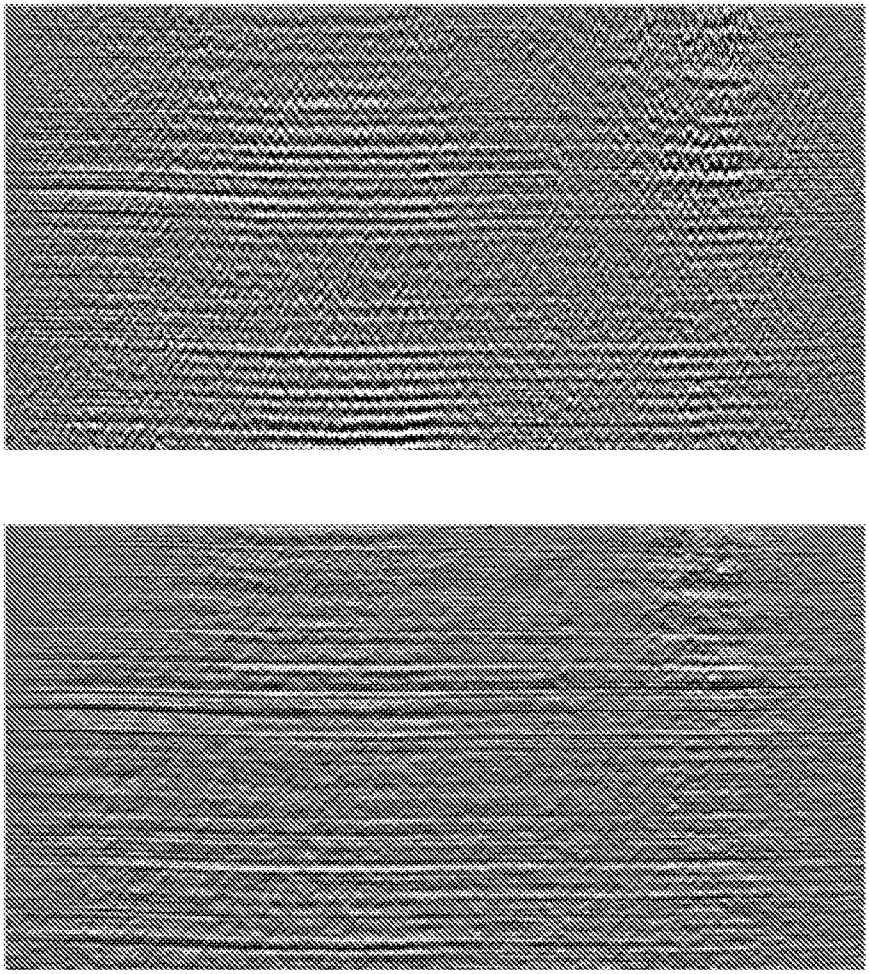

图 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2024/115885

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01V 1/28(2006.01)i; G01V 1/30(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC:G01V1

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNTXT, ENTXTC, ENTXT, VEN, CNKI: 海底节点, 自由表面多次波, 压制, 上行波, 下行波, 插值, 入射角, 周期, 稀疏反演, 目标函数, 快速迭代收缩阈值, OBN, SRME, seismic, marine, multiple, interpolation, sparse inversion, target function, upgoing, downgoing, period, incidence

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 115407392 A (TONGJI UNIVERSITY) 29 November 2022 (2022-11-29) entire document	1-14
A	CN 108363096 A (CHINA NATIONAL PETROLEUM CORP. et al.) 03 August 2018 (2018-08-03) entire document	1-14
A	CN 114325819 A (CCCC HIGHWAY CONSULTANTS CO., LTD.) 12 April 2022 (2022-04-12) entire document	1-14
A	CN 116047589 A (CNOOC (CHINA) LIMITED. et al.) 02 May 2023 (2023-05-02) entire document	1-14
A	CN 116088055 A (SHANGHAI PETROLEUM NATURAL GAS CO., LTD.) 09 May 2023 (2023-05-09) entire document	1-14
A	EP 4080250 A1 (CGG SERVICES SAS) 26 October 2022 (2022-10-26) entire document	1-14

☑ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"D" document cited by the applicant in the international application
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
25 December 2024	**26 December 2024**

Name and mailing address of the ISA/CN	Authorized officer
China National Intellectual Property Administration (ISA/CN) **China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing 100088**	Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2024/115885

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2006250890 A1 (VAN DEN BERG PETER M. et al.) 09 November 2006 (2006-11-09) entire document	1-14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2024/115885

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN 115407392 A	29 November 2022	None	
CN 108363096 A	03 August 2018	None	
CN 114325819 A	12 April 2022	None	
CN 116047589 A	02 May 2023	None	
CN 116088055 A	09 May 2023	None	
EP 4080250 A1	26 October 2022	None	
US 2006250890 A1	09 November 2006	GB 0606802 D0	17 May 2006
		GB 2425839 A	08 November 2006
		GB 2425839 B	26 November 2008
		US 2011058450 A1	10 March 2011
		US 8526268 B2	03 September 2013
		US 7768869 B2	03 August 2010

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2024/115885

A. 主题的分类

G01V 1/28(2006.01)i；G01V 1/30(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

IPC:G01V1

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称，和使用的检索词（如使用））

CNTXT,ENTXTC,ENTXT,VEN,CNKI：海底节点，自由表面多次波，压制，上行波，下行波，插值，入射角，周期，稀疏反演，目标函数，快速迭代收缩阈值，OBN，SRME，seismic，marine，multiple，interpolation，sparse inversion，target function，upgoing，downgoing，period，incidence

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 115407392 A (同济大学) 2022年11月29日 (2022 - 11 - 29) 全文	1-14
A	CN 108363096 A (中国石油天然气集团有限公司 等) 2018年8月3日 (2018 - 08 - 03) 全文	1-14
A	CN 114325819 A (中交公路规划设计院有限公司) 2022年4月12日 (2022 - 04 - 12) 全文	1-14
A	CN 116047589 A (中海石油（中国）有限公司 等) 2023年5月2日 (2023 - 05 - 02) 全文	1-14
A	CN 116088055 A (上海石油天然气有限公司) 2023年5月9日 (2023 - 05 - 09) 全文	1-14
A	EP 4080250 A1 (CGG SERVICES SAS) 2022年10月26日 (2022 - 10 - 26) 全文	1-14
A	US 2006250890 A1 (VAN DEN BERG PETER M 等) 2006年11月9日 (2006 - 11 - 09) 全文	1-14

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。

☑ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型：

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“D” 申请人在国际申请中引证的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件，或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件（如具体说明的）

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布，与申请不相抵触，但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件，单独考虑该文件，认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件，当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时，要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期
2024年12月25日	2024年12月26日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088	受权官员 荣扬名 电话号码 (+86) 010-62085724

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2024/115885

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	115407392	A	2022年11月29日	无			
CN	108363096	A	2018年8月3日	无			
CN	114325819	A	2022年4月12日	无			
CN	116047589	A	2023年5月2日	无			
CN	116088055	A	2023年5月9日	无			
EP	4080250	A1	2022年10月26日	无			
US	2006250890	A1	2006年11月9日	GB	0606802	D0	2006年5月17日
				GB	2425839	A	2006年11月8日
				GB	2425839	B	2008年11月26日
				US	2011058450	A1	2011年3月10日
				US	8526268	B2	2013年9月3日
				US	7768869	B2	2010年8月3日