

文章编号: 1001-1749(2023)03-0317-09

海洋拖缆地震连续记录有限差分计算机模拟

秦越^{1,2}, 刘斌^{1,2}, 李京涛³

(1. 广州海洋地质调查局, 广州 511458;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458;

3. 山东省煤田地质局物探测量队, 济南 250104)

摘要: 连续记录技术能够提高采集效率, 降低采集成本, 但该技术采集的数据比较复杂, 其处理方式与传统非连续记录采集的数据不相同。为理解连续记录采集数据的特征, 并为数据的分离和处理研究提供测试数据, 需要开展正演模拟。基于传统的正演模拟技术及有限差分算法, 提出在每一炮模拟之前, 保存前一炮最后两个时刻的波场作为初始波场来实现连续记录技术的模拟。数值例子考虑深拖多道地震系统连续记录采集数据的情形, 实现了水平层状模型和修改后的 Marmousi 模型的模拟, 结果表明: 该方法能够正确地模拟多道地震连续记录技术。该方法不仅适用于深拖多道地震连续记录的模拟, 还可用于其他地震手段连续记录采集的模拟(如海底地震仪 OBS)。

关键词: 非连续记录; 连续记录; 声波方程; 计算机模拟; 有限差分

中图分类号: P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.03.05

0 引言

通常在采集海洋地震数据时, 需要设定较大的震源激发间隔, 以保证上一炮震源产生的波场不至于影响当前炮的波场, 这极大地限制了采集的效率。连续记录采集技术是一种非常有吸引力的技术^[1-2], 不同于传统的采集方式, 采用连续记录方式时, 震源每隔一段时间激发, 而检波器一直在记录。由于不需要避免炮与炮之间的影响, 震源激发间隔可以更小。连续记录采集不仅能够极大地提高采集效率, 而且能够记录更加丰富的波场。这种采集方

式对于深拖系统^[3-7]以及新近提出的耙缆系统^[8]尤为重要。通过连续记录, 深拖系统与耙缆系统较短的接收缆也有可能记录到远偏移距的信息。

由于检波器一直在记录, 震源之间相互影响。连续记录方式采集的数据既包含当前炮激发的波场信息, 也包含已激发炮(上一炮, 甚至上几炮)的波场信息, 后者主要是远偏移距和深层反射的。由此可知, 连续记录的波场存在混叠, 也更加复杂。为认识连续记录采集数据的特征, 需要开展地震正演模拟工作。此外, 目前的大部分的处理方法不适用于连续记录的情形, 因此需要对连续进行分离, 分离的好坏直接决定了后续处理的效果。开展连续记录的正

收稿日期: 2022-03-04

基金项目: 广东省“2020 年省级促进经济高质量发展专项资金”项目 (GDNRC[2020(045)]); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项项目 (GML2019ZD0207)

第一作者: 秦越(1991-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋数据信息化以及深度学习、最优化技术在海洋地质调查应用方面的工作, E-mail: 15975588450@163.com。

通信作者: 刘斌(1988-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事 OBS 数据处理与反演, 全波形反演以及深部地球物理参数估计方面的研究工作, E-mail: liugele@163.com。

演模拟工作也是连续记录分离算法研究的需要。

地震正演模拟是一种非常有力的技术,它通过数值或者物理的方法来模拟给定模型和观测系统下的地震数据^[9]。该项技术广泛应用于地震勘探的各个领域中,用于指导地震数据的采集,处理和解释^[10]。物理模拟方法成本较高,且操作流程复杂。数值方法成本低,能够灵活使用,适应性强。数值模拟方法通过数值求解波动方程来模拟地震数据,主要的数值求解方法包括有限差分^[11],有限元^[12]以及有限体积法等。其中有限差分由于其实现简单,应用最为广泛。

笔者采用有限差分法模拟多道地震连续记录采集地震数据的情形。如前所述,连续记录采集地震数据时,检波器一直处于接收状态,在接收当前激发炮产生的波场时还会受过往激发炮的影响。模拟连续记录采集地震数据的前提是能够正确地模拟炮与炮之间的影响。传统的地震正演模拟算法,主要考虑的是非连续记录的问题,在正演模拟时假设炮与炮之间相互独立,没有相互影响。为此,我们提出了一种方法来模拟这种炮与炮之间的相互影响,实现连续记录采集的模拟。数值例子考虑的是深海环境下,深拖多道地震系统连续记录采集地震数据的情形。

1 方法原理

1.1 波场更新

根据模拟目标的不同,采用不同的波动方程来控制波场的传播过程。这里仅考虑纵波数据,因此采用最常用的声波方程来模拟地震波的传播。二维的声波方程为式(1)。

$$\frac{1}{c^2(x, z)} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

其中: u 为地震波场; $c(x, z)$ 为速度模型。

采用有限差分方法来求解声波方程,对波动方程(1)进行空间二阶和时间二阶的有限差分近似得到离散公式(2)。

$$\frac{u^{i+1}(iz, ix) - 2u^i(iz, ix) + u^{i-1}(iz, ix)}{\Delta t^2} = c^2(iz, ix) \left[\frac{u^i(iz, ix+1) - 2u^i(iz, ix) + u^i(iz, ix-1)}{\Delta x^2} + \frac{u^i(iz+1, ix) - 2u^i(iz, ix) + u^i(iz-1, ix)}{\Delta z^2} \right] \quad (2)$$

其中: ix, iz 为离散网格点的标号; it 为时间采样点; $\Delta t, \Delta x, \Delta z$ 分别为时间、采样间隔和空间采样间隔;

$u^i(ix, iz)$ 标识离散的波场; $c(ix, iz)$ 表示离散网格点上的速度值。对离散公式进行整理,得到波场更新的公式(3)。

$$u^{i+1}(iz, ix) = 2u^i(iz, ix) - u^{i-1}(iz, ix) + \Delta t^2 * c^2(iz, ix) * \left[\frac{u^i(iz, ix+1) - 2u^i(iz, ix) + u^i(iz, ix-1)}{\Delta x^2} + \frac{u^i(iz+1, ix) - 2u^i(iz, ix) + u^i(iz-1, ix)}{\Delta z^2} \right] \quad (3)$$

在式(2)和式(3)中, $\Delta t, \Delta x, \Delta z$ 的选择需要考虑算法的稳定性和数值频散的问题。为保证数值频散不影响模拟的效果, $\Delta x, \Delta z$ 的选择必须保证每个波长范围内有10个左右的空间采用点,即 $\frac{V_{\min}}{\max(\Delta x, \Delta z) * f_{\max}} > 10$;为满足稳定性, Δt 的选择必须满足 $\frac{V_{\max} * \Delta t}{\Delta x} < \sqrt{\frac{1}{2}}$ ^[13],其中 V_{\min}, V_{\max} 为速度模型中的最小和最大速度; f_{\max} 是模拟的最大频率。

为减少人工边界对内部波场的影响,地震波数值模拟的一个重要问题是人工边界条件的设置。基于不同的假设条件,人们发展了一系列不同的边界条件,包括各类吸收边界条件^[14-17]和各类最佳匹配层边界条件(PML)^[18-19]。我们采用cerjan边界条件,通过在目标区域外添加一个衰减层来减小边界反射的影响^[14]。

1.2 连续记录的实现

依据传统的正演模拟方法及原理,笔者提出一种新的策略,即在每一炮模拟结束之后,保存最后两个时刻的波场作为下一炮模拟时的初始波场,来实现连续记录模式。两者在原理上基本一致,但在实现方式上不同。传统的方法主要考虑的是非连续记录的问题,认为炮与炮之间是独立的,没有相互影响,因此在新的一炮开始模拟之前,都需要重新设置波场(一般重置为0值波场);笔者提出的策略主要实现连续记录的模拟,需要考虑炮与炮之间的影响。两者的参数也有不同的含义,假设 dt 为采样率, nt 为最大时间采样点数,对于非连续记录模式, $dt * nt$ 对应的是每一炮的记录长度,而对于连续记录模式, $dt * nt$ 对应的是放炮的时间间隔,可以设置成任意数值。两者在提取接收点上的波场时也有所不同,假设 nr 是检波器的个数, ns 为炮数,则对于非连续记录模式,每一炮形成一个记录,记录大小为 $nt * nr$,对于连续记录模式,检波器一直在记录,仅仅形成一个文件,文件大小为 $nt * nr * ns$,后续的处理中

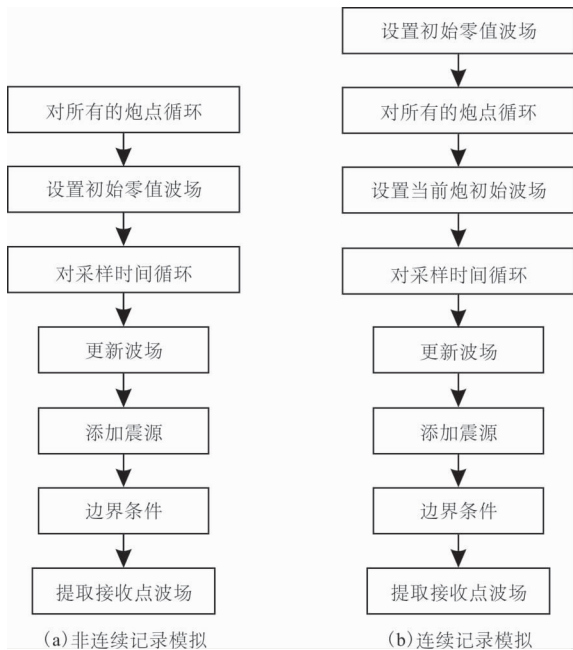


图 1 非连续记录与连续记录模拟的流程图

Fig. 1 Workflows for seismic modeling with non-continuous and continuous recording

需要按一定的时间长度把连续记录的文件分离成为单独的文件。图 1 为两种记录模式下有限差分模拟的伪代码。从图 1 可以看到,连续记录与非连续记录的主要区别在于新一炮模拟前初始波场的选择。

1.3 检波器移动

在进行陆地地震勘探时,在采集一炮数据的时间范围内,检波器是固定不动的。与陆地地震勘探不同,在进行海上拖缆地震数据采集时,地震拖缆一直在移动。非连续记录时,一般不考虑检波器的移动,认为在两次震源激发之间,检波器是固定不动的。在连续记录时,下一次激发的波场还受到上一次激发的波场的影响,如果不考虑检波器的移动,将导致波场不连续,这里采用线性插值的方法来解决波场不连续的问题。如图 2 所示,相邻两炮之间的距离 D ,第 n 次激发对应的炮记录记为 $S(x_n, x_g, t)$ 。尽管在标识数据时,位置坐标 x_g 固定不变,但实际上检波器一直在移动,所以 t 时刻记录的实际上是 $x_g + d$ 位置上的波场 $S(x_n, x_g + d, t)$ (图 2 黑色虚线),其中 $d = v * t$, v 是船速。为获得实际的波场数据,采用如下的插值公式进行计算。

$$S(x_n, x_g + d, t) = d * S(x_n, x_g, t) + (D - d) * S(x_n, x_g + D, t) \quad (4)$$

从式(4)可以看出,与通常模拟仅仅记录一条固

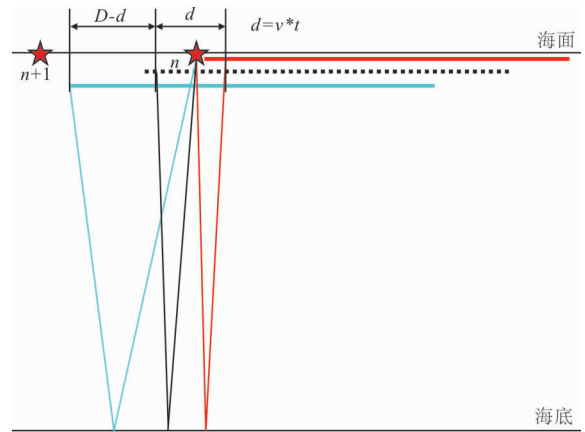


图 2 移动检波器波场示意图

Fig. 2 A illustration of the wave-fields of moving cable

定拖缆(图 2 红色拖缆)上的数据不同,本文的方法还记录了另一条拖缆上的数据(图 2 蓝色拖缆)两条拖缆,通过这两条拖缆的线性插值来获得移动检波器的波场。需要注意的是,在图 2 中拖缆的深度是一样的,在深度上错开仅仅是为了方便显示。

2 数值算例

数值算例的建立主要为检验上述方法的有效性,并识别连续记录模式下的数据特征。为了对比,对非连续记录模式进行了模拟。

2.1 水平层状模型

水平层状模型如图 3 所示,横向大小为 12 000 m,纵向大小为 3 000 m,纵横向离散间隔均为 25 m。海底深度为 1 000 m。震源和拖缆均布设在 900 m 的深度上。起始炮的横坐标为 8 000 m,共模拟 5 炮,放炮间隔时间为 4 s。按船速 5 节计算,炮间距大约为 10 m。最小偏移距为 100 m,最大偏移距为 3 000 m,道间距为 10 m,采样率为 4 ms。震源为雷克子波,主频为 4 Hz。海面设置为非自由边界,人工边界厚度为 20 个网格点。

图 4(a)和图 4(c)显示了非连续记录模式,图 4(b)和图 4(d)连续记录模式的波场快照。其中图 4(a)和图 4(b)对应第二炮激发后 0.2 s 时的波场快照,图 4(c)和图 4(d)对应第二炮激发后 1.2 s 时的波场快照。通过对比可以看到,在连续记录模式下第一炮的影响仍然存在(图 4(b)和图 4(d)),而这正是连续记录方式所希望的。由此可知,这里提出的策略能够正确地模拟已激发炮对当前炮的影响,从而实现对连续记录采集的模拟。

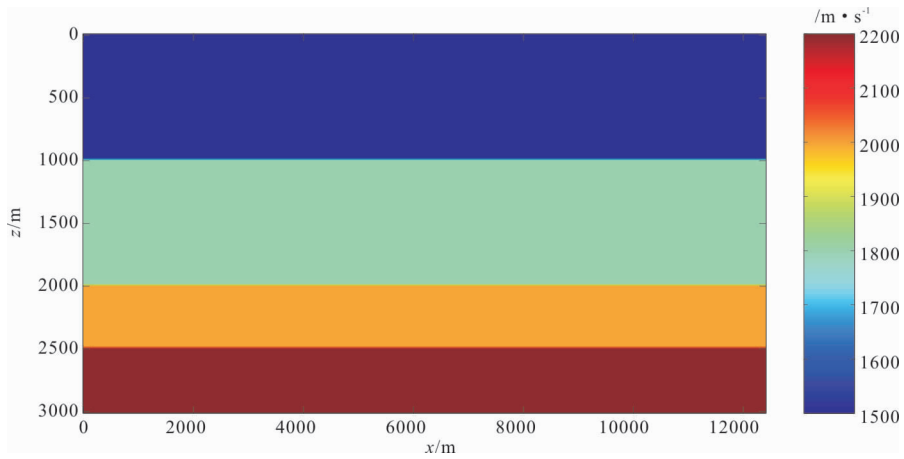


图 3 水平层状速度模型
Fig. 3 Horizontal layered velocity model

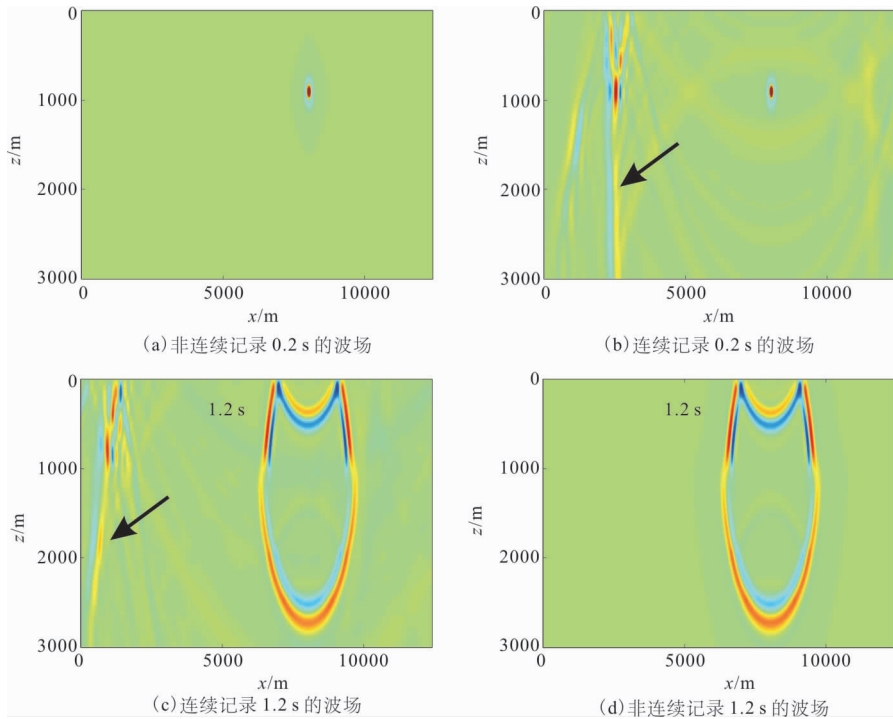


图 4 水平层状模型地震数值模拟的波场快照
Fig. 4 Snapshot of seismic data modeling of horizontal model

图 5(a)和图 5(b)显示了非连续记录以及图 5(c)连续记录模式的模拟数据。实际模拟中一共模拟了 5 炮,图 5 仅仅显示了两炮的结果。对于非连续记录的情形,炮数据是分开记录的,每一个炮记录长度为 4 s(图 5(a)和图 5(b))。而对于连续记录的情形,数据连续地记在一个文件中(图 5(c))。在图 5 中仅仅显示了连续记录 8 s 的结果。从图 5 可以看到,在非连续记录的数据(图 5(a)和图 5(b))中,由于记录时间不够,仅仅接收到了第一个和第二个反射界面反射回来的信息(反射 1 和反射 2),而且

缺乏远偏移距的信息。而在连续记录的数据中,在 4 s~5 s 之间,接收到了来自第三个反射界面的反射信息(反射 3)。并且对于反射 1 和反射 2,也增加了远偏移距的信息。

2.2 Marmousi 模型

原有的 Marmousi 模型海水层较薄,我们把 1 000 m 以内的范围替换为海水层,得到修改后的复杂模型,如图 6 所示。模型大小为 12 000 m×3 000 m,纵横向间隔均为 25 m,海底深度为 1 000 m,震源和拖缆均布设 900 m 的深度上。起始炮的

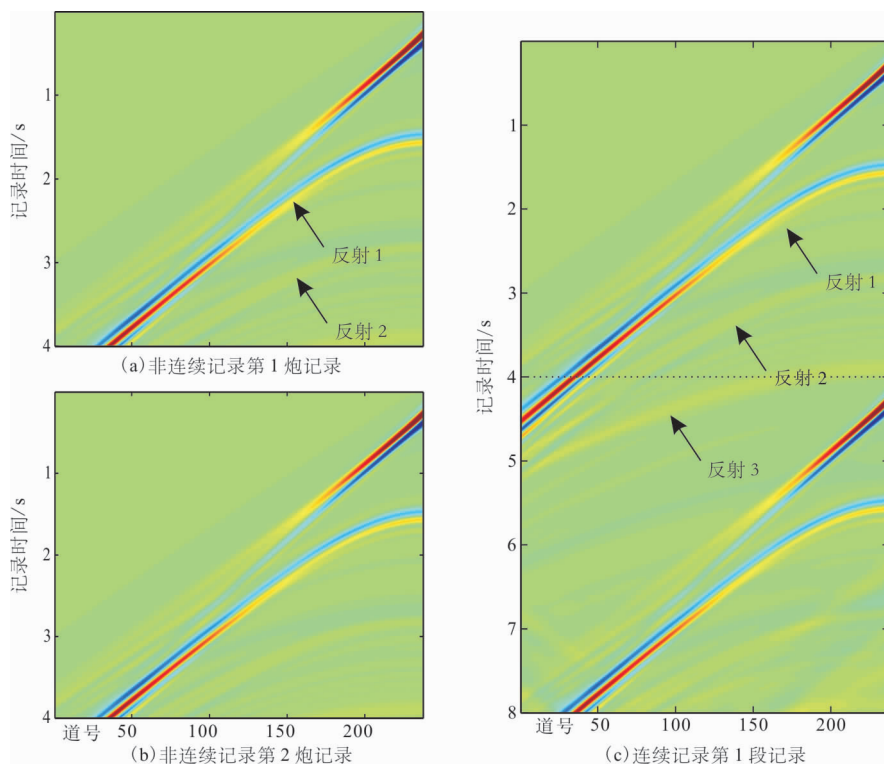


图 5 水平层状模型地震数值模拟的炮记录

Fig. 5 Record of seismic data modeling of horizontal model

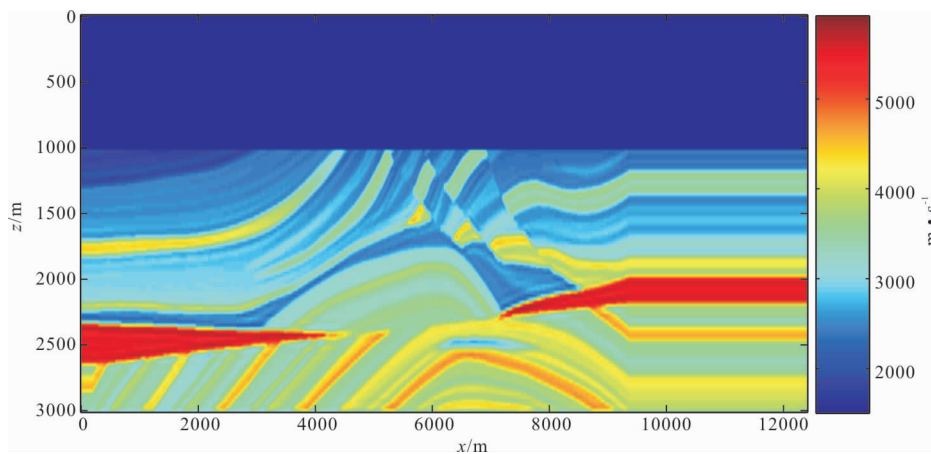


图 6 修改后的 Marmousi 速度模型

Fig. 6 The modified Marmousi model

横坐标为 8 000 m,共模拟 5 炮,放炮间隔时间为 4 s。按船速 5 节计算,炮间距大约为 10 m。最小偏移距为 100 m,最大偏移距为 6 000 m,道间距为 25 m,采样率为 4 ms。震源主频为 6 Hz,海面设置为非自由边界,人工边界厚度为 20 个网格点。

图 7(a)和图 7(c)显示了 Marmousi 模型非连续记录模式和连续记录模式图 7(b)、图 7(d)的波场快照。其中图 7(a)和图 7(b)对应第 2 炮激发后 0.2 s 时的波场快照,(c)和(d)对应第 2 炮激发后 1.2 s

时的波场快照。与水平层状模型的模拟结果一样,对于连续记录的情形,上一炮的波场仍然在传播。由此可知,对于复杂的模型,提出的策略也能有效地模拟连续记录的情形。

图 8 显示了 Marmousi 模型非连续记录以及连续记录模式的模拟数据。对于非连续记录的情形,炮记录是分开记录的,每一个炮记录长度为 4 s。而对于连续记录的情形,检波器一直在记录,记录是连续的。在图 8 中显示了连续记录 8 s 的结果。通过

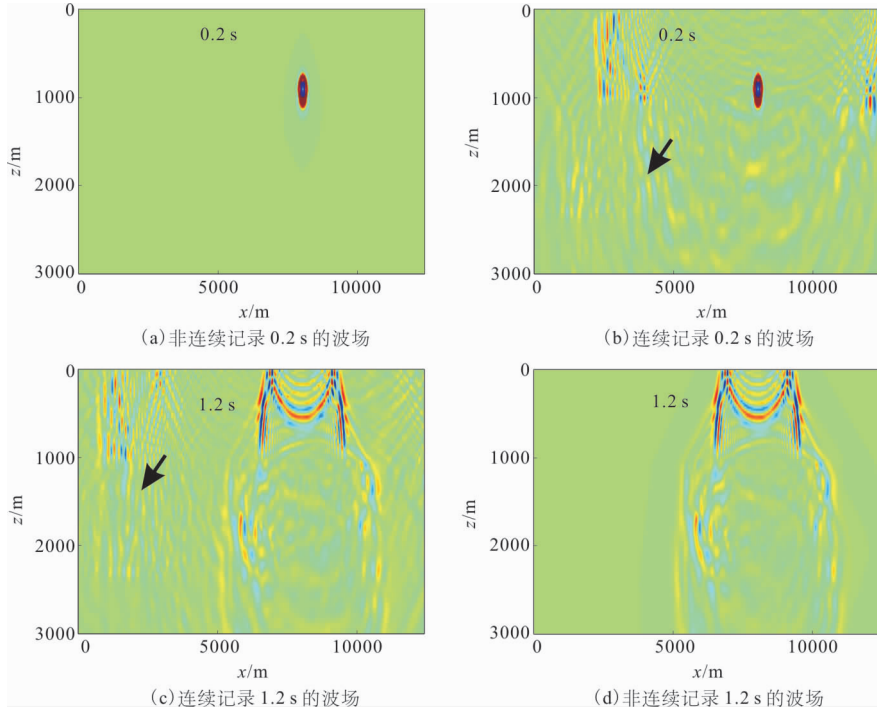


图 7 Marmousi 层状模型地震数值模拟的波场快照

Fig. 7 Snapshot of seismic data modeling of Marmousi model

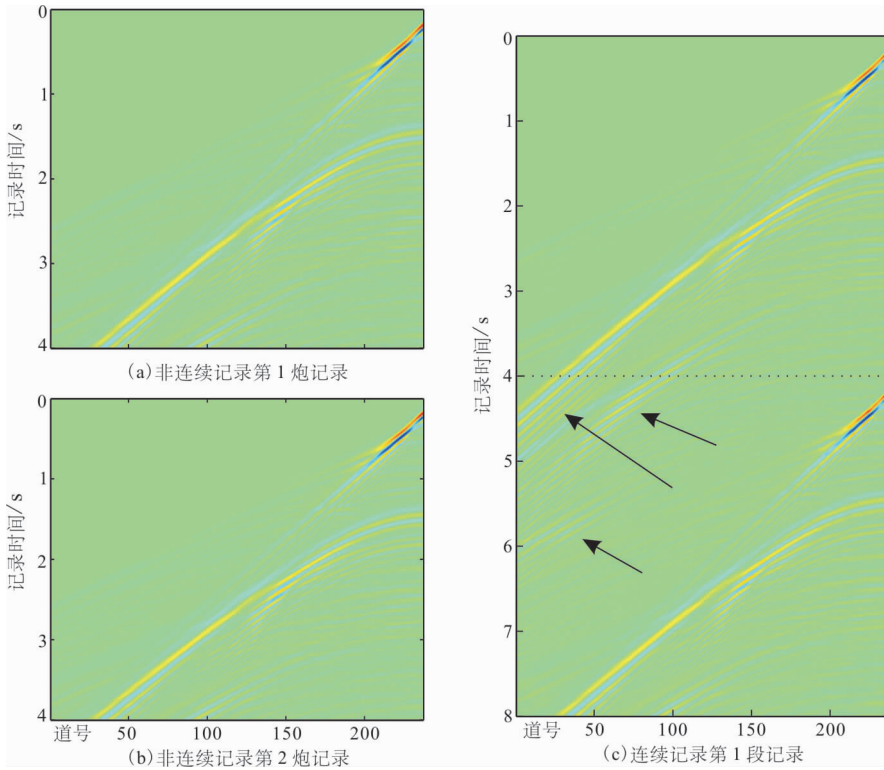


图 8 Marmousi 模型地震数值模拟的炮记录

Fig. 8 Record of seismic data modeling of Marmousi model

对比非连续记录和连续记录的数据明显可以看到,连续记录模式下记录了远偏移距的信息(4 s~5 s之间的箭头)。

3 讨论

从原理上讲,连续记录是一种非常有吸引力的技术。其最大的优势在于提高采集效率的同时记录更为丰富的波场信息,我们的数值模拟结果也说明了这一点。对于非连续记录的情形,其放炮间隔一定要大于4 s,而连续记录情形则没有这个要求,这就提高了采集效率。从图5和图8的模拟结果可以看出,同样是8 s的记录长度,连续记录模式下,检波器接收到了浅部反射界面远偏移距的信息,也接收到了来自更深层反射界面的信息。从数值模拟结果还可以看到,连续记录采集的数据比较复杂。此外,连续记录的数据存在炮与炮的混叠,用现有的处理方法和处理系统不能直接处理。

为认识连续记录采集数据的特征,同时也为后续分离和处理算法的研究提供测试数据,需要开展连续记录采集的正演模拟工作。传统的正演模拟算法考虑的是非连续记录的情形,炮与炮之间是相互独立的。我们对原有的正演算法进行改进,使之能够模拟连续记录的情形。从图1可以看出,连续记录与非连续记录在原理及程序实现上非常接近。但是两者在观测系统设定及模拟效率和方法上存在本质的不同。

3.1 连续记录模拟的参数设定

对于传统非连续记录采集的情形,一般是根据地质目标以及分辨率要求等因素确定最小、最大偏移距以及炮间距。炮间距一般是固定的(如25 m),通过调整船速来保证震源的激发间隔,使之大于单炮记录的长度,保证炮与炮之间不存在混叠。对于连续记录采集的情形,除了最小、最大偏移距之外,一个非常重要的参数是震源激发的时间间隔,此时炮点之间的实际距离取决于激发时间间隔和船速。震源激发时间间隔可以不等间距,只需要保证激发的时间间隔大于震源重新工作所需要的准备时间即可。激发间隔甚至可以设置成随机间距,随机的激发间隔对于后续的数据分离可能有一定的好处。

3.2 连续记录模拟的效率

在模拟传统非连续记录的地震采集时,炮与炮之间相互独立,相互之间没有影响,并行程度非常高。除了炮与炮之间的并行,传统的正演模拟还存

在区域分解的并行算法。得益于炮之间的高度并行性以及区域分解方法,借助于大型的并行集群以及GPU等硬件,传统的非连续记录采集模拟的效率非常高。在模拟连续记录的地震采集时,由于已激发的炮会对当前炮产生影响,不存在炮与炮之间的并行,只能顺序进行。其计算效率的问题就显得很突出,为提高模拟的效率,只能采用区域分解技术,分解单炮模拟的任务。

3.3 连续记录与多震源技术的对比

多震源地震采集技术是近几年得到快速发展的另一项提高采集效率,降低采集成本的技术^[20-23]。在野外采集时,多震源技术同时^[21]或者延迟激发^[22]多个震源。从原理上可以看到,连续记录技术是从检波器的角度来提高采集效率,而多震源采集技术主要是从震源的角度来提高采集技术。对于野外采集来说,多震源采集技术主要考虑的是多个震源之间的协调问题,而连续记录主要是接收系统设备方面的问题。由此看出,连续记录和多震源技术是两个独立的技术,既可以单独使用,也可以组合使用。实际上,当多个震源激发存在一定的延迟时,即使采用非连续记录的模式,也已经具有连续记录的一些特点。从处理的角度看,两者的一个共同点是都需要进行分离之后才能使用现在的处理方法和处理系统进行处理。从数值模拟来看,两者存在很大的不同。对于多震源同时激发,非连续记录的情形,其数值模拟与常规的数值模拟是一致的,仅仅是在处理震源时需要考虑多个位置上的震源。对于这种情形,一次激发与下一次激发是没有影响的,数值模拟仍然是高度并行的。对于多震源延迟激发的情形,可采用本文的策略来模拟。

3.4 适用性

数值例子模拟的是深拖多道地震系统连续记录采集地震数据的情形,但所提出的策略也适用于其他以连续记录的方式采集数据的情形(海底地震仪(OBS)的情形)。OBS采集地震数据是典型的连续记录的情况,它直接接收海面震源激发的波场。目前,在OBS数据的模拟时一般不考虑连续记录的情形,而是通过震源和检波点互换的方式,采用非连续记录的方式来模拟^[24]。采用本文的策略模拟OBS数据更符合OBS数据的实际情况,为此只需要把控制波场传播的方程换成弹性波方程即可。对于海面拖缆多道地震连续记录的情形,只需要把检波器和震源的位置设置在海面附近即可。

4 结论

这里提出一种策略来模拟多道地震系统以连续记录的方式采集地震数据的情形。该策略在每一炮的模拟结束之后保存最后两个时刻的波场作为下一炮模拟时的初始波场。震源激发的时间间隔是非常重要的一个参数,既可以是固定的值,也可设置成随机值。由于模拟的过程只能依炮的顺序串行执行,连续记录模拟的效率问题比较突出,只能通过分解单炮内的任务来提高。深拖多道地震系统连续记录的数值例子表明了算法的有效性,所提出的策略也适用于其他采用连续记录方式采集数据的情形(如海底地震仪(OBS))。

参考文献:

- [1] KARIMI H, GHOLAME A. Blending and deblending in seismic data acquisition and processing[J]. *Journal of the Earth and Space Physics*, 2015, 41(2): 13-29.
- [2] SEHER T, CLARKE R. Accelerating deep water seismic acquisition through continuous recording[J]. *Expanded Abstracts of 78th Annual international SEG Meeting*, 2016, 78: 82-86.
- [3] CHAPMAN N, GETTRUST J, WALIA G, et al. High-resolution, deep-towed, multichannel seismic survey of deep-sea gas hydrates off western Canada[J]. *Geophysics*, 2002, 67(4): 1038-1047.
- [4] KER S, MARSSET B, GARZIGLIA S, et al. High-resolution seismic imaging in deep sea from a joint deep-towed/OBH reflection experiment: application to a Mass Transport Complex offshore Nigeria[J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 182(3): 1524-1542.
- [5] KER S, GONIDEC L, MARSSET B, et al. Fine-scale gas distribution in marine sediments assessed from deep-towed seismic data[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 96(3): 1466-1470.
- [6] WOOD W T, HART P E, HUTCHINSON D R, et al. Gas and gas hydrate distribution around seafloor seeps in Mississippi Canyon, Northern Gulf of Mexico, using multi-resolution seismic imagery[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008(25): 952-959.
- [7] HE T, SPENCE G D, WOOD W T, et al. Imaging a hydrate-related cold vent offshore Vancouver Island from deep-towed multichannel seismic data[J]. *Geophysics*, 2009, 74(2): B23-B36.
- [8] 文鹏飞, 刘斌, 徐云霞, 等. 面向海域水合物精细刻画的地震勘探技术——耙缆式地震勘探[J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(5): 2215-2221.
- [9] WEN P F, LIU B, XU X X, et al. Novel seismic exploration technique targeting fine characterization of marine gas hydrates: seismic exploration with a harrow-like acquisition geometry[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(5): 2215-2221. (In Chinese)
- [10] ROBERTSSON J, BEDNAR B, BLANCH J, et al. Introduction to the supplement on seismic modeling with applications to acquisition, processing, and interpretation[J]. *Geophysics*, 2007, 72(5): SM1-SM4.
- [11] ALFOR R M, KELLY K R, BOORE D M. Accuracy of finite-difference modeling of the acoustic wave equation[J]. *Geophysics*, 1974(39): 834-842.
- [12] 冯英杰, 杨长春, 吴萍. 地震波有限差分模拟综述[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(2): 487-491.
- [13] FENG Y J, YANG C C, WU P. The review of the finite-difference elastic wave motion modeling[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 2(2): 487-491. (In Chinese).
- [14] 薛东川, 王尚旭, 焦淑静. 起伏地表复杂介质波动方程有限元数值模拟方法[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(2): 522-529.
- [15] XUE D C, WANG S X, JIAO S J. Wave equation finite-element modeling including rugged topography and complicated medium[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(2): 522-529. (In Chinese)
- [16] KELLY K R, WARD R W, TREITEL S, et al. Synthetic seismograms: A finite-difference approach[J]. *Geophysics*, 1976(41): 2-27.
- [17] CERJAN C D, KOSLOFF R, RESHEF M. A non-reflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic wave equations[J]. *Geophysics*, 1985(50): 705-708.
- [18] CLAYTON R, ENGQUIST B. Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equations[J]. *Bulletin Seismological Society of America*, 1977(67): 1529-1540.
- [19] ENGQUIST B, MAJDA. Absorbing boundary conditions for the numerical simulation of waves[J]. *Math. Computation*, 1977(31): 629-651.
- [20] KOSLOFF R, KOSLOFF D. Absorbing boundaries for wave propagation problems[J]. *Journal of Computational Physics*, 1986(63): 363-376.
- [21] FESTA G, NIELSEN S. PML absorbing boundaries[J]. *Bulletin Seismological Society of America*, 2003(93): 891-903.
- [22] KOMATITSCH D, TROMP J. A Perfectly Matched

- Layer (PML) absorbing condition for the second-order elastic wave equation[J]. *Geophysical Journal International*, 2003(154):146-153.
- [20] 朱立华. 基于稀疏反演的多震源地震混合采集数据分离技术[J]. *石油物探*, 2018, 57(2): 208-212.
ZHU L H. Deblending simultaneous-source seismic data using sparse inversion[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2018, 57(2): 208-212. (In Chinese).
- [21] BEASLEY C J, CHAMBERS R E, JIANG Z. A new look at simultaneous-sources[J]. *EAGE Conference and Exhibition*, 1998: 133-135.
- [22] HAMPSON G, STEFANI J, HERKENHO F. Acquisition using simultaneous-sources[J]. *Expanded Abstracts of Annual international SEG Meeting*, 2008 (78):2816-2820.
- [23] BEASLEY C J. A new look at marine simultaneous-sources[J]. *The Leading Edge*, 2008, 27(7): 914-917.
- [24] MOGHADDAM P P, LIBAK A, KEERS H, et al. Efficient and accurate modeling of ocean bottom seismometer data using reciprocity[J]. *Geophysics*, 2012, 77(6): T211-T220.

Computer simulation of continuous recording of marine seismic streamer with finite difference method

QIN Yue^{1,2}, LIU Bin^{1,2}, LI Jingtao³

(1. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 511458, China;

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China;

3. Geophysical Prospecting and Surveying Team of Shandong Coal Geology Bureau, Jinan 250104, China)

Abstract: The technique of continuous recording can improve acquisition efficiency and reduce cost. The data acquired with this technique is more complex and contains more information. Seismic modeling is necessary to understand the characteristics of this type of data and create data for testing the separation and processing method. Based on the principle of traditional forward simulation and finite difference algorithm, a strategy is proposed which suggests using the last two moments' wave field of the previous shot as the initial wave field before simulating every shot to achieve the simulation of continuous recording technology. The proposed strategy is used to model the data recorded by a deep-towed multi-channel seismic system in a continuous way. The numerical examples from simple layered and complex modified the Marmousi models show that the method can accurately achieve the simulation. The approach can also be applied to cases where continuous recording is used, such as ocean bottom seismometer.

Keywords: non-continuous recording; continuous recording; acoustic wave equation; computer simulation; finite difference