

基于反距离加权法的混采地震数据分离方法

杨帆, 韩立国, 封强

吉林大学 地球探测科学与技术学院, 长春 130026

摘要：为将混合地震记录分离为单炮地震记录，笔者采用基于反距离加权的迭代分离方法，在非共炮点域对伪分离数据进行混叠噪声的压制，将其变换回共炮点域，得到分离后的单炮地震记录。模拟数据和实际数据的处理结果证明，本方法能够有效地实现混合数据分离。相较于单独使用多级中值滤波方法，本分离方法能更好的保留有效信息。

关键词：多源地震混合采集；混叠噪声；炮分离；反距离加权法

Separation of blended source seismic data based on IDW method

YANG Fan, HAN Li-guo, FENG Qiang

College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: To separate the blended seismic data into single shot seismic data, a method using iterative separation based on IDW (Inverse Distance Weight) is proposed, which suppresses the noise of pseudo-separated data in non-common-shot domain. The data is then transformed into the common shot domain to get the separated single shot seismic data. The method is proven to be able to separate the blended data more effectively by the processing results of simulated data and actual data. Compared with using multi-level median filtering method alone, more effective information can be preserved by this method.

Keywords: multi-source blended seismic acquisition; blending noise; separation of multi-source; IDW method

0 引言

地震勘探，在保持采集质量的前提下，提高采集效率是降低成本、提高经济效益的方法之一，混合地震采集是一种既能提高采集效率，又能保证采集质量的地震勘探方法。常规地震采集是逐炮激发，为防止前炮的激发对下一炮造成影响，炮与炮的激发具有一定的时间间隔。这就造成采集时间过长，采集成本较高。而混合地震采集则是不同空间

位置的震源按照设定的延迟进行激发，采集到的是波场混叠的混合数据。

国外的专家学者早在 20 世纪 70 年代就对混合地震采集技术进行了研究。Sliverman^[1]最早提出同时激发震源采集地震数据的构想并为其申请了专利；Beasley et al.^[24]将同步震源改进为脉冲型；Bagaini^[5]对各种方法进行了横向比较并进行了分类，多源地震混合采集技术便是由此一步步完善；Vaage^[6]在研究海上混合采集的基础上提出延迟激

发; Berkhout^[7]提出了一个关于混合三维地震勘测的理论框架,并提出了双重混合激发采集概念^[8]; Blacquiere et al.^[9]阐述了与常规采集相比,混合激发采集具有提高成像质量的优点。

与常规地震采集相比,混合地震采集的震源为多炮激发,因此在数据处理过程中就存在着一个炮分离的过程,即将混合采集记录分离成单炮记录。目前存在两种分离方式:一是对混采数据直接偏移成像, Tang et al.^[10]首次提出使用最小二乘法压制混采数据直接成像,卢昕婷等^[11]基于全变分原理实现混采数据的直接偏移;二是通过混合噪声在不同域具有不同特点,进行数据分离, Huo et al.^[12]提出了在共中心点域使用多方向中值滤波方法实现噪声压制,韩立国等^[13]使用迭代去噪方法分离混合地震记录,刘强等^[14]基于稀疏约束反演理论,将混合地震数据的分离、缺失道集的插值以及对随机噪声的压制问题整合在一起,提高了分离质量与处理效率, Cheng et al.^[15]采用了一种奇异谱分析的降秩算法,实现混采数据的分离, Zu et al.^[16]提出了相干通过整形算子分离混合数据的方法,通过在迭代过程中调整秩和阈值的大小实现数据的分离,张显娜等^[17]将稀疏反演方法应用于三维混采数据的分离,李宇等^[18]联合中值滤波和 F-K 滤波实现了混采数据的分离。

但前人研究的混合地震数据分离方法在压制混叠噪声的同时会造成有效信号的损失,因此本文将共炮域的混合地震记录转换至共检波点域、共偏移距域,其中干扰炮造成的混叠噪声全部转换为随机分布的脉冲型噪声,采用基于反距离加权方法^[19]的迭代方法将噪声进行压制,再转换回共炮域,完成混采地震数据的分离工作的同时很好地保护了有效信号。

1 方法原理

1.1 混合地震采集与伪分离

混合地震采集是在常规采集的基础上,令多个震源以一个较小的激发延迟同时激发,使得在同一采样时间内,检波器可以接收到多个震源的地震记录。

混合地震采集记录可以由多个单炮地震记录合成,在频率域中可以表示为:

$$U_{bl} = U\Gamma \quad (1)$$

式(1)中, U 表示单炮地震记录, U_{bl} 表示混合地震记录, Γ 表示混合震源算子。

若上式是适定的,即混合炮数等于单炮数,那么由混合地震记录分离出单炮地震记录可以直接表示为:

$$U = U_{bl}\Gamma^{-1} \quad (2)$$

但是在实际的生产工作中,混合炮的激发数往往小于单炮数,因此式(1)是欠定的,意味着矩阵 Γ 不可逆,可以使用最小二乘反演求解^[20]:

$$\langle \Gamma^{-1} \rangle = [\Gamma^H \Gamma]^{-1} \Gamma^H \quad (3)$$

式(3)中, Γ^H 是 Γ 的共轭转置。若混合矩阵 Γ 以相位编码,其最小二乘反演类似于复共轭转置,得出:

$$U' = U_{bl}\Gamma^H \quad (4)$$

式(4)中, U' 是频率域混采数据的伪分离结果。但伪分离并没有完全分离出单炮记录,伪分离过程只是一个简单的反相编码过程,即将混合炮中具有随机延迟的每一炮在时间轴上按延迟时间校正回去。归位之后,每个伪分离单炮记录上仍然保留着其他炮的信息。

1.2 反距离加权法

反距离加权法是一种权重与距离成反比的插值方法,以插值点与样本点间的距离为权重进行加权计算,离插值点距离近的样本点被赋予较大权重,离插值点距离越远的样本点被赋予较小权重。反距离加权插值公式为:

$$Z(x, y) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i, y_i) \quad (5)$$

式(5)中, $Z(x, y)$ 代表插值点的计算值, $Z(x_i, y_i)$ 代表窗口内样本点的值, N 代表插值过程中所选取的窗口内样本点的数量, λ_i 代表计算过程中各样本点对应的权重,其大小随着距离的增加而较小,所有样本点对应权重的和为1。

权重的计算公式为:

$$\lambda_i = \frac{d_i^{-p}}{\sum_{j=1}^N d_j^{-p}} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (7)$$

式(6)中, p 为指数值, 经典取值为 2, d 为插值点与各已知样本点之间的距离, 在一般计算中, 点 (x, y) 到点 (x_i, y_i) 的距离 $d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$, 而对一个矩形窗口, 则

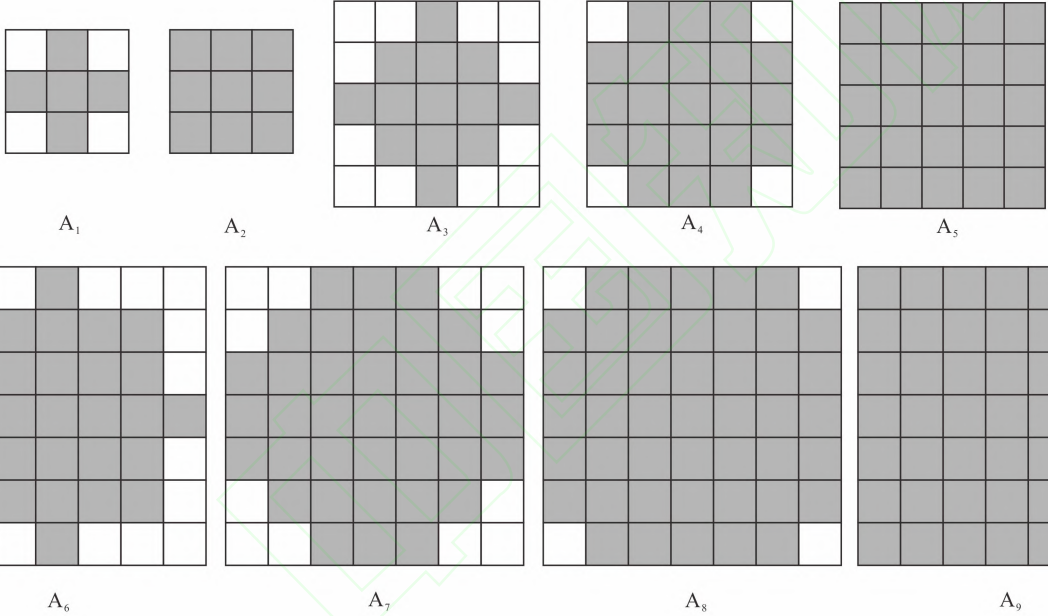


图 1 自适应拓展窗口图

Fig. 1 Adaptive expansion window

使用反距离加权法压制噪声遍历非共炮域的伪分离数据矩阵, 使用 ROAD 法^[21]检测数据噪点, 将噪点记为 $f_{i,j}$, 其中 i, j 为噪点在矩阵中的位置。对检测到的所有噪点 $f_{i,j}$ 均按图 2 流程进行处理, 以计算结果 $z_{i,j}$ 代替原噪点 $f_{i,j}$ 。所有噪点均被 $z_{i,j}$ 替代后的矩阵便是噪声压制的结果。

1.3 混合数据分离迭代过程

为了得到更好地分离结果, 本文采用反距离加权法压制噪声的基础上, 使用迭代的方式, 进一步提升分离质量。

(1) 伪分离记录 $P' = P_{bl} \Gamma^H$, 设初始单炮记录 $P_i = 0$;

(2) $i = i + 1$;

可以将窗口看作一个半径为 r 的圆形窗口, 如将一个 3×3 的窗口看作半径为 1 的圆形窗口, 最外层距插值点距离 d 为 1, 将 5×5 的窗口看作半径为 2 的圆形窗口, 最外层距插值点距离 d 为 2, 次外层距插值点距离 d 为 1。

在本文中, 为更高效进行计算, 同时为了更好的保留细节, 笔者采用可以拓展的窗口, 尽可能用较小的窗口进行计算 (图 1), A_k ($k = 1, 2, 3, \dots, 9$) 对应不同的窗口, k 值决定窗口的选择。

(3) 计算剩余混叠噪声 $R_i = P' - P_{i-1} \Gamma \Gamma^H$;

(4) 将剩余混叠噪声转换到共检波点域进行小步长中值滤波, 提取有效信号 R'_i ;

(5) 将结果与上次炮分离结果相加 $P_i'' = P_{i-1} - R'_i$;

(6) 将 P_i'' 转换到共偏移距域使用反距离加权法进行噪声压制, 再转回共炮点域, 得到分离炮 P_i ;

(7) 计算分离信噪比, 一般将期望设为 15, 符合期望输出结果, 否则重复第二步。

2 模拟数据

本文模拟一个 90 炮激发, 90 个检波器接收的

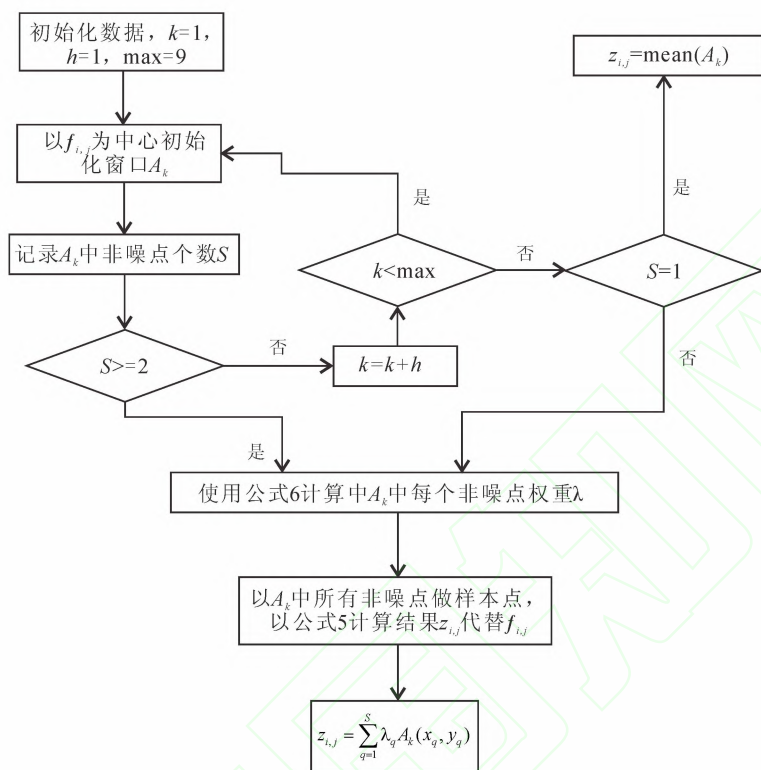


图 2 反距离加权法压制噪声流程图

Fig. 2 Flow of IDW method to suppress noise

正演地震记录, 炮间距等于道间距。选取间隔 45 道的两单炮合成混合地震记录, 即第 1 炮和第 46 炮混合, 第 2 炮与第 47 炮混合……第 45 炮与第 90 炮混合, 检波器采样时间 226 ms, 采样间隔 1 ms, 最大激发延迟 90 ms。

基于反距离加权的混合地震数据迭代分离方法分为:

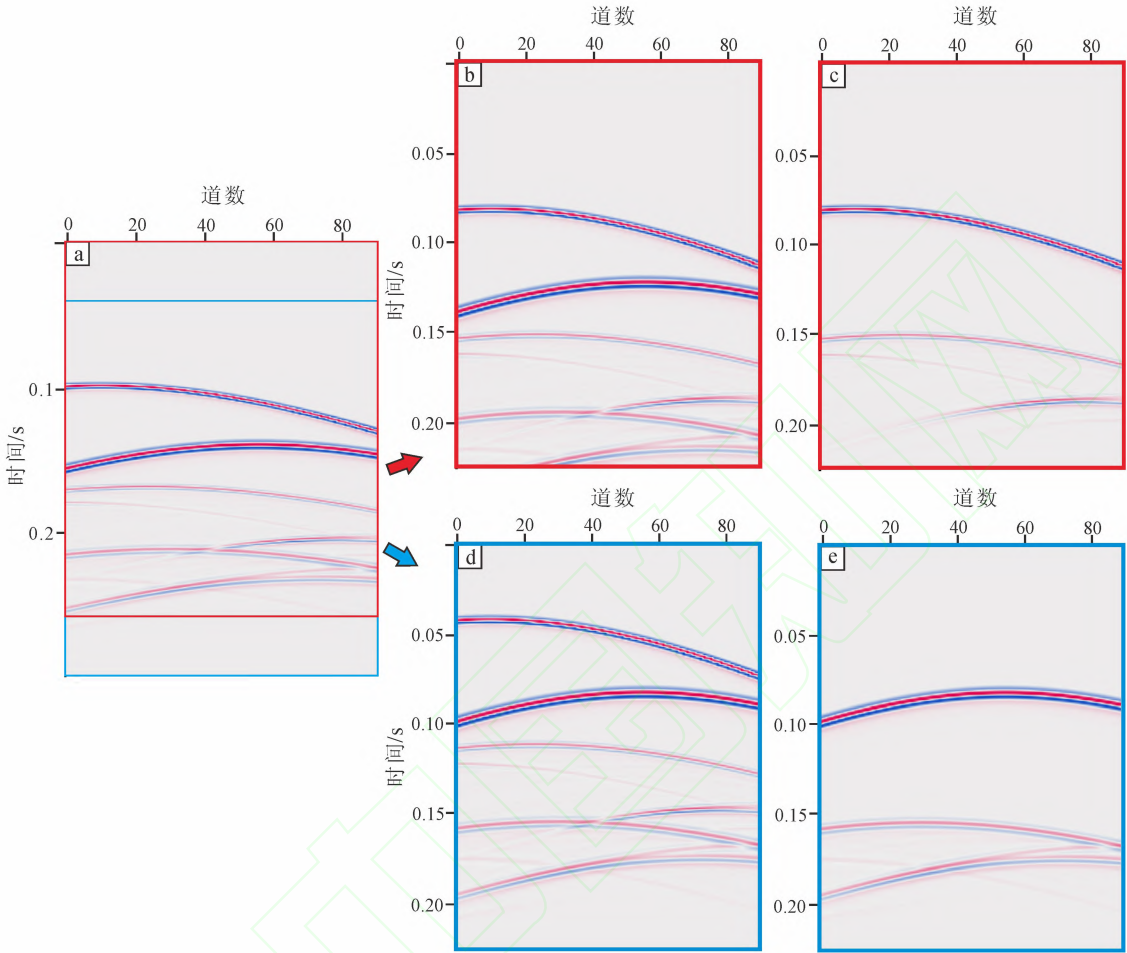
- (1) 将混合地震数据伪分离成单炮记录;
- (2) 将伪分离地震记录从共炮点域转换到非共炮域;
- (3) 使用基于反距离加权法的迭代分离方法压制共非共炮域的混叠噪声;
- (4) 将数据转换回共炮点域。

图 3 为第 11 混合炮的伪分离结果, 图 3a 为第 11 单炮和第 56 单炮的混合地震记录, 其中, 第 11 炮的激发延迟为 18 ms, 第 56 炮的延迟激发时间为 59 ms。比较图 3b 和图 3c 可以看出, 伪分离将混合地震记录按延迟激发时间归位, 在共炮点域上, 伪分离结果与常规采集的单炮地震记录相比, 叠加

了混合炮的信息。图 3d 与图 3e 的比较也可以说明这一点。

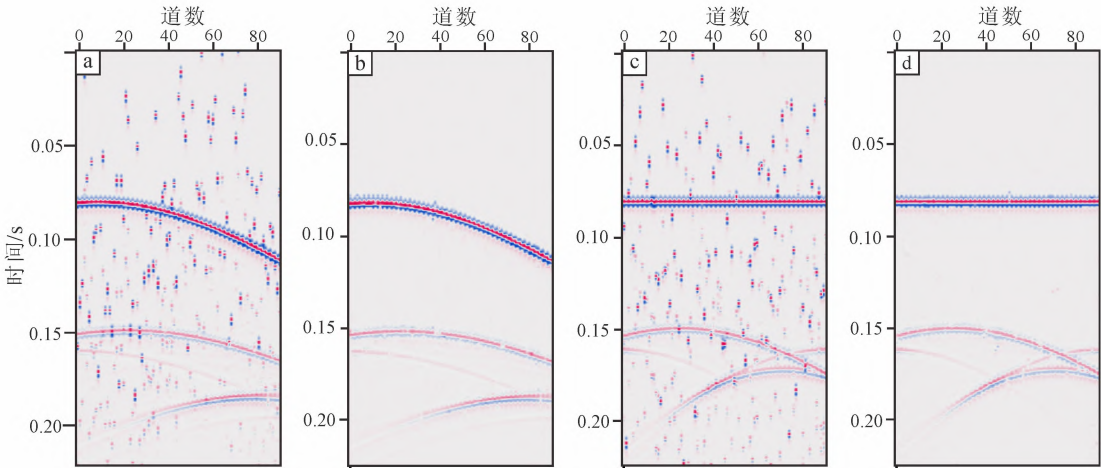
将第 11 炮的伪分离数据转换到共检波点域为图 4a, 可以看出, 在检波点域, 由混合炮造成的叠加噪声呈脉冲状随机分布, 用本方法进行噪声压制, 得到噪声压制结果图 4b, 分布在非共炮域的噪声均得到有效去除。而将伪分离数据转换到共偏移距域, 结果如图 4c 所示, 用本方法进行噪声压制得到的结果图 4d 也表明噪声得到有效去除。

图 5a 为混合地震记录, 伪分离地震记录在非共炮点域完成噪声压制后, 转换回共炮点域, 得到分离出的单炮地震记录图 5b, 由图 5a 与图 5b 可以看出, 有效信号经过处理被分离出来, 干扰炮的信号被基本消除, 单炮记录具有很好的分离效果。对比图 5b 与图 5c, 分离后的单炮记录十分接近原始单炮记录。为了更直观地表示分离质量, 由图 5b 与图 5c 做差可得图 5d, 表示分离结果与原始单炮记录的差值, 由此图可以看出, 分离出的单炮记录与原始记录差值较小。图 6a 为传统的多级中值



a. 混合地震记录（第11混合炮）；b. 伪分离地震记录（第11炮）；c. 单炮记录（第11炮）；d. 伪分离地震记录（第56炮）；e. 单炮记录（第56炮）.

图3 混合地震记录伪分离结果
Fig. 3 Pseudo separation results of blended seismic data



a. 共检波点域伪分离结果（11炮）；b. 共检波点域噪声压制结果（11炮）；c. 共偏移距域伪分离结果（11炮）；d. 共偏移距域噪声压制结果（11炮）.

图4 噪声压制结果
Fig. 4 Noise suppression results

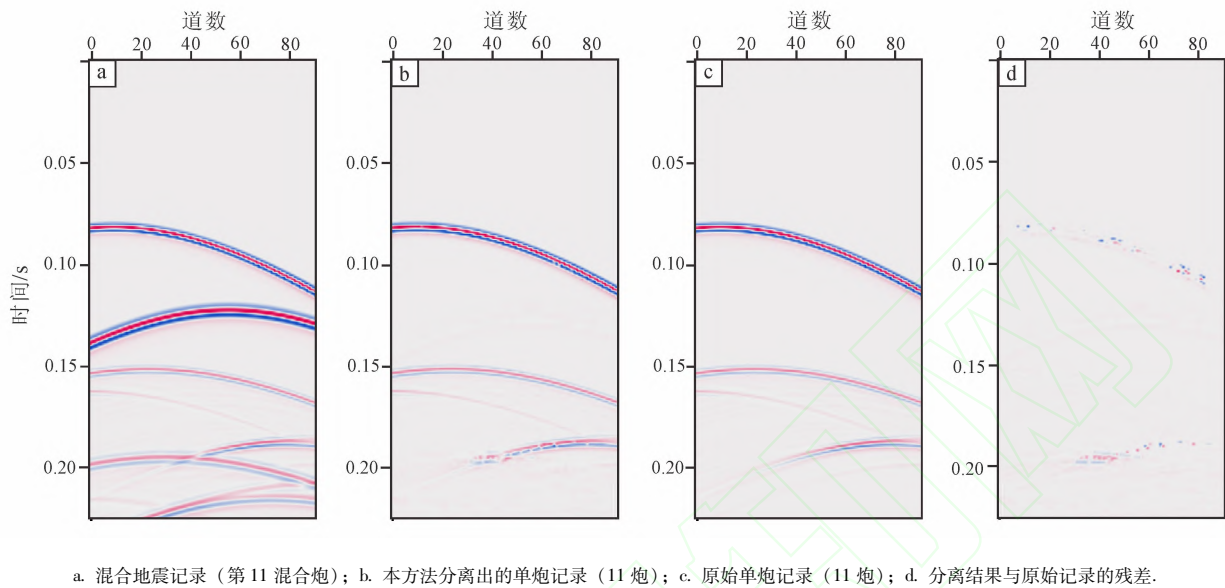


图 5 分离成果图

Fig. 5 Separation results

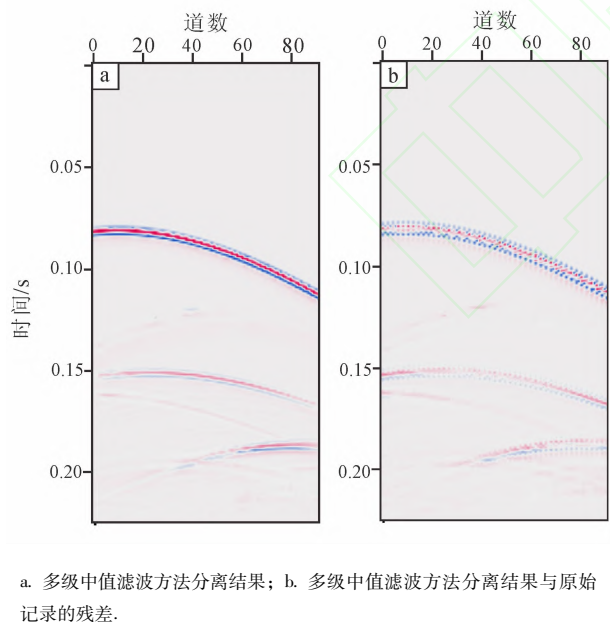


图 6 多级中值滤波分离结果

Fig. 6 Separation results based on multi-level median filter

滤波方法^[12]分离出的单炮记录, 由图 5d 和图 6b 相比较可以看出, 使用本方法分离出的结果更接近原始单炮记录, 说明本方法不但可以有效地分离出单炮记录, 还能够更好地保留有效信息。

3 实际数据

本文选取了一套某海域实测地震数据对本文方法的实际应用价值进行验证, 本数据包含 150 个震源, 150 个检波器。每个混合炮由两个单炮混合组成, 第 1 炮与第 76 炮混合, 第 2 炮与第 77 炮混合, 以此类推, 至第 75 炮与第 150 炮混合。激发过程中, 每个混合炮的两单炮以一定时间延迟混合激发。检波器采样时长 4 s, 采样间隔 4 ms, 最大激发延迟设定为 1 s。

图 7 为对实际数据共检波点域的混叠噪声压制结果, 伪分离结果图 7a 经过本方法处理得到结果图 7b, 可以看到伪分离后的共检波点域存在大量随机分布的脉冲噪声, 而通过本方法处理后, 混叠噪声得到有效压制。

图 8a 为第 36 炮与第 111 炮混合激发的混合地震记录, 图 8b 和图 8c 为使用本方法分离出的单炮记录, 可以看出, 经本方法处理后, 叠加在一起的两炮被有效地分离成两单炮地震记录, 具有较好的分离效果。分离出的单炮记录均消除了另一炮的叠加影响, 并且通过观察同相轴可以看出, 本方法很好地保留了有效信息。可以验证基于理论模拟研究的分离方法适用于实际数据。

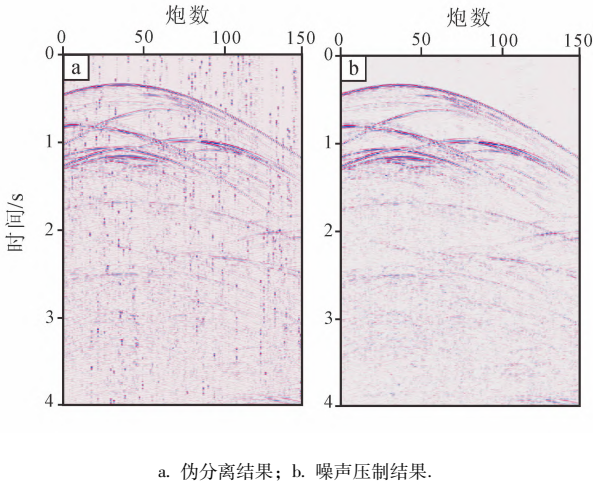


图 7 实际数据共检波点域噪声压制结果
Fig. 7 Noise suppression results of actual data in common detector domain

4 结论

(1) 基于反距离加权法的混采数据分离方法有效地压制了非共炮域的混叠噪声，减弱了混合炮之间的相互影响，通过与中值滤波分离方法进行对比，证明本方法能够更好地保留有效信息，提高了分离质量。

(2) 通过对模拟数据的处理可以看出，本方法能够很好地将混采地震数据进行分离，同时对某海域的实际数据进行处理，其噪声压制结果和分离结果也能证明本方法具有很好的可行性。

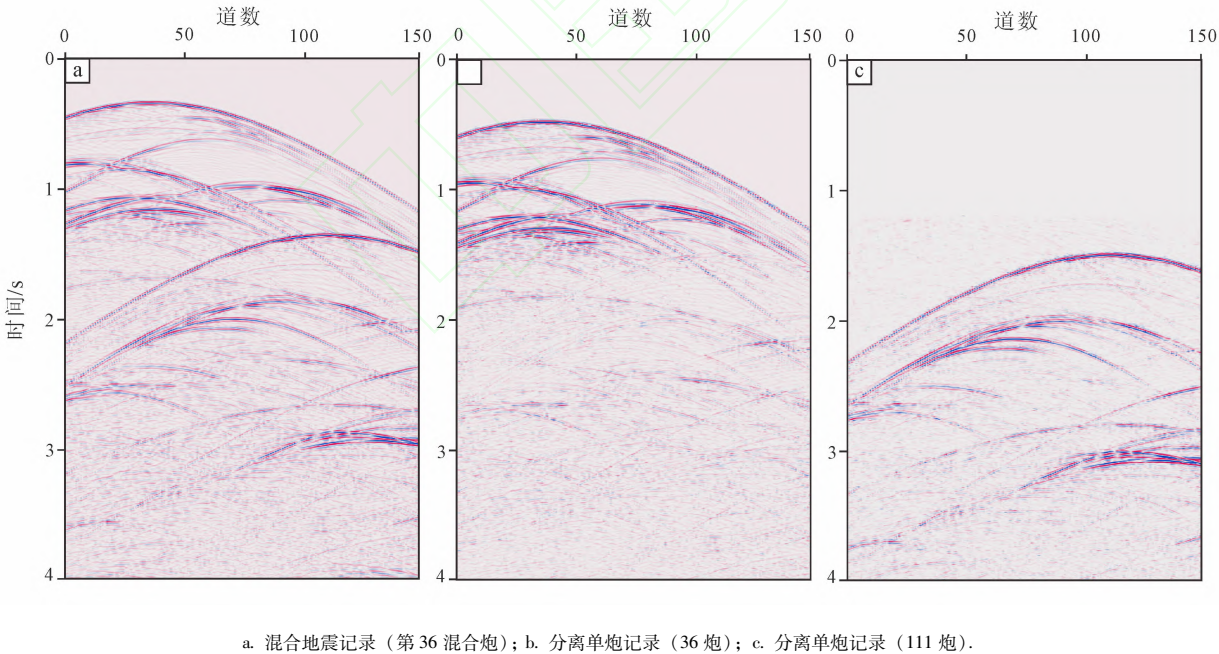


图 8 实际数据分离成果图
Fig. 8 Separation results of actual data

参考文献：

[1] Silverman D. Method of three dimensional seismic prospecting [P]. USA, 4159463. 1979.

[2] Beasley C J, Chambers R E, Jiang Z. A new look at simultaneous sources [C] //SEG Technical Program Expanded Abstracts. (1998 SEG Annual Meeting. New Orleans, Louisiana). Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1998: 133-135.

[3] Beasley C J. A new look at marine simultaneous sources

- [J]. The Leading Edge, 2008, 27 (7): 914-917.
- [4] Beasley C J. Simultaneous sources: a technology whose time has come [C] //SEG Technical Program Expanded Abstracts. (2008 SEG Annual Meeting. Las Vegas, Nevada). Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2008: 2796-2800.
- [5] Bagaini C. Overview of simultaneous vibroseis acquisition methods [C] //SEG Technical Program Expanded Abstracts 2006. (2006 SEG Annual Meeting. New Orleans, Louisiana. 2006). Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2006: 70-74.
- [6] Vaage S T. Method and system for acquiring marine seismic data using multiple seismic sources [P]. US, B2, 6906981. 2005.
- [7] Berkhout A J. Changing the mindset in seismic data acquisition [J]. The Leading Edge, 2008, 27 (7): 924-938.
- [8] Berkhout A J, Blacqui re G, Verschuur D J. The concept of double blending: combining incoherent shooting with incoherent sensing [J]. Geophysics, 2009, 74 (4): 59-62.
- [9] Blacqui re G, Berkhout G, Verschuur E. Double illumination in blended acquisition [C] //SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011. (2011 SEG Annual Meeting. San Antonio, Texas, 2011). Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2011: 11-15.
- [10] Tang Y, Biondo B. Least-squares migration/inversion of blended data. [C] //SEG Technical Program Expanded Abstracts 2009. (2009 SEG Annual Meeting. Houston, Texas. 2009). Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2009. 2859-2863.
- [11] 卢昕婷, 韩立国, 张盼, 等. 基于全变分原理的多震源混合数据直接偏移方法 [J]. 地球物理学报, 2015, 58 (9): 3335-3345.
LU Xin-ting, HAN Li-guo, ZHANG Pan, et al. Direct migration method of multi-source blended data based on total variation [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58 (9): 3335-3345.
- [12] Huo S, Luo Y, Kelamis P G. Simultaneous sources separation via multidirectional vector-median filtering [J]. Geophysics, 2012, 77 (4): 123-131.
- [13] 韩立国, 谭尘青, 吕庆田, 等. 基于迭代去噪的多源地震混合采集数据分离 [J]. 地球物理学报, 2013, 56 (7): 2402-2412.
HAN Li-guo, TAN Chen-qing, LYU Qing-tian, et al. Separation of multi-source blended seismic acquisition data by iterative denoising [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56 (7): 2402-2412.
- [14] 刘强, 韩立国, 李洪建. 混采数据分离中插值与去噪的同步处理 [J]. 地球物理学报, 2014, 57 (5): 1647-1654.
LIU Qiang, HAN Li-guo, LI Hong-jian. Synchronous interpolation and denoising in simultaneous-source data separation [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57 (5): 1647-1654.
- [15] Cheng J, Sacchi M D. Separation and reconstruction of simultaneous source data via iterative rank reduction [J]. Geophysics, 2015, 80 (4): 57-66.
- [16] Zu S, Zhou H, Mao W, et al. Iterative deblending of simultaneous source data using a coherency pass shaping operator [J]. Geophysical Journal International, 2017, 211 (1): 541-557.
- [17] 张显娜, 韩立国, 刘强, 等. 三维多震源混合采集数据波场分离方法研究 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17 (5): 147-151.
ZHANG Xian-na, HAN Li-guo, LIU Qiang, et al. Research on method of wave-fields separation for 3D multi-source blended acquisition data [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17 (5): 147-151.
- [18] 李宇, 韩立国, 叶林, 等. 基于 F-K 域和 Curvelet-中值滤波联合去噪的混采数据分离方法 [J]. 世界地质, 2017, 36 (2): 609-615.
LI Yu, HAN Li-guo, YE Lin, et al. Blended acquisition data separation method based on F-K domain and Curvelet-median filter joint denoising [J]. Global Geology, 2017, 36 (2): 609-615.
- [19] 龙敬文, 蒲亦非, 周激流. 基于 BPANN 噪声检测的反距离加权法滤除椒盐噪声 [J]. 计算机应用研究, 2018, 35 (4): 1266-1269, 1273.
LONG Jing-wen, PU Yi-fei, ZHOU Ji-liu. Removal of salt and pepper noise by inverse distance weighted based on BPANN noise detection [J]. Application Research of Computers, 2018, 35 (4): 1266-1269, 1273.
- [20] Araz M, Panagiotis D, Gerrit B. Iterative method for the separation of blended seismic data: discussion on the algorithmic aspects [J]. Geophysical Prospecting, 2012, 60 (4): 782-801.
- [21] Garnett R, Huegerich T, Chui C, et al. A universal noise removal algorithm with an impulse detector [J]. Transactions on Image Processing, 2005, 14 (11): 1747-1754.