

刘强,韩立国,李洪建. 2014. 混采数据分离中插值与去噪的同步处理. 地球物理学报, 57(5):1647-1654, doi:10. 6038/cjg20140527.

Liu Q, Han L G, Li H J. 2014. Synchronous interpolation and denoising in simultaneous-source data separation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(5):1647-1654, doi:10. 6038/cjg20140527.

## 混采数据分离中插值与去噪的同步处理

刘强,韩立国\*,李洪建

吉林大学地球探测科学与技术学院,长春 130026

**摘要** 近年来,由于新兴的混合采集观测系统在很大程度上提高了采集效率,因此得到了很多学者和石油公司的青睐.但在实际应用中,这种特殊观测系统的采集质量却受到很多因素的影响.一方面,该观测系统采集到的炮记录会受到相邻炮记录的干扰;另一方面,复杂的采集环境使得地震记录中包含部分空道;另外,采集过程中的场地环境干扰会不可避免地带入随机噪音,它们都会影响采集质量.虽然已有一些学者对这些因素做了相关研究,但都是单独分析,未能综合考虑各种干扰因素.本文基于稀疏约束反演的基本原理,将混合炮数据的分离、缺失道集的插值以及对随机噪音的压制问题整合在一起,通过一步处理同时减小如上三方面因素的不利影响,在改善信噪比的同时极大地提高了地震资料的处理效率.文章利用模拟数据和实际数据对这种新方法进行了验证,均得到了比较满意的效果.

**关键词** 混合炮分离;地震道插值;压制随机噪音;稀疏约束反演

doi:10. 6038/cjg20140527

中图分类号 P631

收稿日期 2013-10-10,2014-03-21 收修定稿

### Synchronous interpolation and denoising in simultaneous-source data separation

LIU Qiang, HAN Li-Guo\*, LI Hong-Jian

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

**Abstract** Much concern has been given to the simultaneous shooting because this acquisition design can improve acquisition efficiency largely. However, there are many factors affecting the acquisition quality in seismic exploring field. First of all, the seismic records may include some adjacent shot gathers destroying the seismic records. Secondly, some blank traces will be contained in records because of the complex acquisition environment; last, the disturbance around the survey field will introduce random noise which will contaminate the seismic record. The three cases mentioned above have been studied by many researchers separately before. On the basis of sparse constrained inversion we will accomplish these three cases simultaneously. To a large extent, it will increase the efficiency of the seismic data processing and improve the SNR. In this paper, we apply the simulated dataset and real dataset respectively to verify our method and have achieved promising results.

**Keywords** Deblending; Interpolation; De-noising; Sparse constrained inversion

**基金项目** 国家自然科学基金项目(41374115),国家科技重大专项子课题(2011ZX05025-001-04)资助.

**作者简介** 刘强,男,1988年生,博士生,主要从事混合震源数据处理. E-mail:liuqiang19881212@163.com

\* **通讯作者** 韩立国,男,1961年生,教授,博士生导师,主要从事地震数据处理解释工作. E-mail:hanliguo@jlu.edu.cn

## 1 引言

20 世纪 70 年代末, Silverman(1979)首次在陆地勘探中提出使用可控震源同时激发采集的思想. 2008 年, Berkhout(2008)在此基础上发展并提出了混合激发的概念, 使得混合采集技术得到了迅速发展. 由于混合采集中单炮之间的激发间隔远小于常规采集的情况, 因此得到的炮集记录中会不可避免地采集到其它炮激发的信号, 这些不属于待研究的其他炮激发的信号, 即混合噪声. 混合噪声在很大程度上降低了地震记录的信噪比, 因此, 做进一步处理之前, 最重要的就是对混合噪声的压制, 实现混合炮的单炮分离.

混合噪声的压制可以看作滤波处理: 将共炮域的混叠数据转入共检波点域或其他域(共偏移距域, 共中心点域)中, 此时混合噪声以脉冲的形式随机分布, 进而, 混合噪声的压制过程就近似成随机噪声的压制问题. 基于这样的理论基础, 2009 年, Huo 等(2009)在共中心点域使用矢量中值滤波器移除混合噪声. Kim 等(2009)设计了新的思路: 基于地下速度模型和波动方程建立一个噪声模型, 然后在共偏移距域中自适应地减去混合噪声. Doulgeris 等(2010)和 Mahdad 等(2011)相继在 2010 年和 2011 年优化设计了迭代算法, 在共检波点域中压制混合噪声.

如上的滤波方法仅在一些情况下应用效果良好. 混合噪声属于有效信号的一部分, 它和有效信号具有相同的能量分布特征, 所以利用滤波原理消除混合噪声的过程会对有效信号产生潜在的不良影响. 因此, 一些学者提出了新的思路: 将压制混合噪声的问题视作反演问题处理. 同基于滤波压制混合噪声的方法相比, 基于反演的混合噪声压制方法能够更好地保持有效信号的基本特征, 并且更适合于振幅分析和延时处理(Akerberg et al., 2008; Moore et al., 2008; Lin and Herrmann, 2009; Herrmann et al., 2009; Abma et al., 2010; Ayeni et al., 2011; Doulgeris et al., 2012).

之前的学者在处理混合震源数据时, 仅仅对信噪分离本身进行了研究, 未能进一步考虑含有随机噪声和地震道缺失等情形. 本文将含有混合噪声、随机噪声以及缺失道集的地震记录转入稀疏域, 进而利用稀疏约束反演将这些采集过程中遇到的实际问题在统一的框架内解决, 不仅提高了地震资料的处

理效率, 也提高了地震资料的信噪比. 文章首先介绍该方法的原理, 其次论述了实现流程, 然后分别利用模拟数据和实际数据对本方法进行了验证, 并和常规方法在分离方面做了对比, 最后得出结论.

## 2 方法原理

一个基本的线性问题可以写成

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} + \mathbf{c}, \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{A}$  代表变换算子, 一般情况下是近似已知的;  $\mathbf{x}$  是模型, 一般是待求解;  $\mathbf{b}$  为观测数据;  $\mathbf{c}$  是随机噪声. 炮分离, 压制随机噪声和插值都可以利用式(1)描述的线性问题反演求解.

具体来讲, 在炮分离过程中, 式(1)中  $\mathbf{A}$  即代表混合算子矩阵,  $\mathbf{x}$  代表原始单炮记录,  $\mathbf{b}$  代表混合炮数据; 在压制随机噪声过程中,  $\mathbf{A}$  代表产生随机噪声的算子矩阵,  $\mathbf{x}$  是不含随机噪声的数据,  $\mathbf{b}$  是伴随随机噪声的地震记录; 在插值的情况下,  $\mathbf{A}$  代表使记录缺失道集的算子矩阵,  $\mathbf{x}$  是完整的炮集数据,  $\mathbf{b}$  是缺失道集的地震记录. 在以上三种情况下,  $\mathbf{c}$  都是未知的噪声数据. 将以上情况汇总为表 1.

表 1 式(1)中  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{b}$  的物理意义

Table 1 The physical significance of  $\mathbf{A}$  and  $\mathbf{b}$  in equation (1)

	炮分离	缺道插值	压制随机噪声
$\mathbf{A}$	混合算子矩阵	缺道因子矩阵	加随机噪声因子矩阵
$\mathbf{b}$	含有混合噪声的数据	有缺失道集的数据	含有随机噪声的数据

一般地, 由于采集信息不足以及噪声(本文中涉及的混合噪声和随机噪声)的影响, 会使得线性问题求解存在多解性, 为降低多解性, 需要引入正则化方法(Scales and Gersztenkorn, 1988)对求解进行约束. 稀疏约束反演(Malioutov et al., 2005; Beck and Teboulle, 2009; Han et al., 2012)就是随着压缩感知技术的兴起而迅速发展起来的一种正则化反演方法, 并已被应用于地震数据去噪、插值等方面.

本文将数据变换到稀疏域, 将式(1)转化为下式, 即只需使目标函数  $J$  最小, 便可求得待求解:

$$J = \|\mathbf{Dm} - \mathbf{b}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{m}\|_1, \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{m}$  是式(1)中的  $\mathbf{x}$  在某一稀疏域中的稀疏系数;  $\mathbf{D} = \mathbf{AR}$ ,  $\mathbf{R}$  是  $\mathbf{x}$  转变至稀疏域的逆变换, 即  $\mathbf{x} = \mathbf{Rm}$ .  $\lambda$  是正则化参数, 控制  $L1$  范数的约束项与  $L2$  范数的误差项之间的权重. 式(2)的使用前提是待解数据在某一个域中呈稀疏分布. 由于式(2)中的  $\mathbf{D}$

可以表示为  $\mathbf{AR}$ , 可将式(2)写成下式:

$$\mathbf{J} = \|\mathbf{ARm} - \mathbf{b}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{m}\|_1, \quad (3)$$

本文采用的稀疏域是 Radon 域, 所以式(3)中的  $R$  代表的是 Radon 逆变换,  $\mathbf{m}$  是待求信号在 Radon 域的 Radon 系数,  $\mathbf{b}$  是含有缺失道集以及随机噪声和混合噪声的地震数据。

本文采用 FISTA (Fast Iterative Shrinkage-Thresholding Algorithm) (Beck and Teboulle, 2009) 求解式(2)。FISTA 基于 ISTA (Iterative Shrinkage-Thresholding Algorithm) (Daubechies et al., 2004; Figueiredo and Nowak, 2003) 改进而来。ISTA 作为一种有效的解决线性反演问题的算法, 其最大的优点是实现简单, 但在一些情况下, ISTA 的收敛速度非常慢, 严重影响了计算效率。为了弥补这个缺点, 很多学者提出了优化的算法, FISTA 即是其中一种, 它可以以很少的迭代次数得到理想的预期效果。

ISTA 定义了一种软阈值的迭代公式求取式(2)中的  $\mathbf{m}$ :

$$\mathbf{m}_{i+1} = \text{soft}\left[\mathbf{m}_i + \frac{1}{\alpha}\mathbf{D}^H(\mathbf{b} - \mathbf{Dm}_i), \frac{\lambda}{2\alpha}\right], \quad (4)$$

其中,  $\text{soft}(\mathbf{x}, t)$  为定义的软阈值, 当输入  $\mathbf{x}$  为复数时, 令  $\mathbf{x} = ze^{i\omega}$ 。软阈值可以表示为

$$\text{soft}(\mathbf{x}, t) = \begin{cases} (z - t)e^{i\omega}, & \text{if } z > t \\ 0, & \text{if } z \leq t \end{cases} \quad (5)$$

FISTA 通过改变式(4)中的  $\mathbf{m}_i$  提高收敛速度, 新建一个和  $\mathbf{m}_i$  与  $\mathbf{m}_{i-1}$  相关的参量  $\mathbf{l}_{i+1}$ ,

$$\mathbf{l}_{i+1} = \mathbf{m}_i + \left(\frac{\beta_i - 1}{\beta_{i+1}}\right)(\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_{i-1}), \quad (6)$$

其中,  $\beta_i$  是由下式定义的随迭代更新的参量,

$$\beta_{i+1} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4\beta_i^2}}{2}, \quad (7)$$

用  $\mathbf{l}_i$  代替式(4)中的  $\mathbf{m}_i$  计算  $\mathbf{m}_{i+1}$ , 就会得出新的模型更新迭代表达式:

$$\mathbf{m}_{i+1} = \text{soft}\left[\mathbf{l}_i + \frac{1}{\alpha}\mathbf{D}^H(\mathbf{b} - \mathbf{Dl}_i), \frac{\lambda}{2\alpha}\right]. \quad (8)$$

FISTA 在保留了 ISTA 算法实现简单的基础上, 同时也提高了算法的收敛速度, 并且将复数的运算也包括在运算范畴内, 扩大了使用范围。

### 3 实现流程

文章分别采用模拟数据和实际地震记录进行方法验证。首先, 进行模拟混合采集数据的伪分离; 其次, 在共偏移距域中进行普通小时窗的中值滤波; 最

后, 将数据转换入共中心点域采用稀疏约束反演, 一步完成混合噪声和随机噪声的去噪, 以及缺失道集的插值。

#### 3.1 混合炮数据的伪分离

混合炮数据的伪分离可以在频率域和时间域中进行。本文采用的是时间域。

混合炮人工拟合的示例如图 1 所示。如图, 左上角的炮集即是由其他 4 张单炮记录模拟合成的混合炮记录, 图中的箭头指示了每张单炮记录在混合炮集中所处的位置。

本文的混合算子采用相位编码。混合炮的伪分离处理过程如下: 假设一个混合炮中包含  $N$  个单炮, 首先将混合炮复制  $N$  次, 然后每个单炮按照混合编码中相应的延时反向移回初始位置即可。之所以称之为伪分离, 是因为每个单炮只是按混合编码反向移回初始位置, 每个单炮记录中仍旧含有其他炮集记录的数据, 并没有进行实质性的炮分离处理。

#### 3.2 小时窗中值滤波预处理

如果直接把数据转入稀疏域, 噪声尤其是混合噪声在稀疏域的稀疏系数可能接近甚至大于有效信号, 将会严重影响后续的反演结果, 所以在稀疏约束反演之前, 需要首先进行中值滤波。图 2 是共偏移距域中混合数据的分布, 其中呈规则分布的是有效信号, 呈随机分布的则是混合噪声。本文采用的小时窗滤波可以使有效信号的损失降低到最小。

信号的中值滤波 (Stork, 2003) 原理: 中值滤波是基于排序统计理论的一种能有效抑制噪声的非线性信号处理技术。其中式(9)是二维中值滤波的数学表达式:

$$M(x, y) = \text{med}[f(x - k, y - l), (k, l \in \omega)], \quad (9)$$

其中,  $f(x, y)$  为待处理数据,  $\omega$  是二维窗口,  $\text{med}$  的响应是选择窗口内待处理的所有数据, 然后将其排序, 取出中间的值代替窗口中心的值,  $M(x, y)$  是处理后的数据。

#### 3.3 采用稀疏反演压制混合噪声和随机噪声, 并对缺失道进行插值

将中值预处理后的数据转入共中心点域进行稀疏约束反演。在该域中, 有效信号呈抛物线状, 而噪声则呈随机分布。在程序中输入含有缺失道集以及随机噪声的伪分离数据。然后调节正则化参数  $\lambda$ , 选择合适的迭代次数, 观测对比最后的输出值, 最终得到去除了随机噪声和混合噪声, 以及插值补空后完

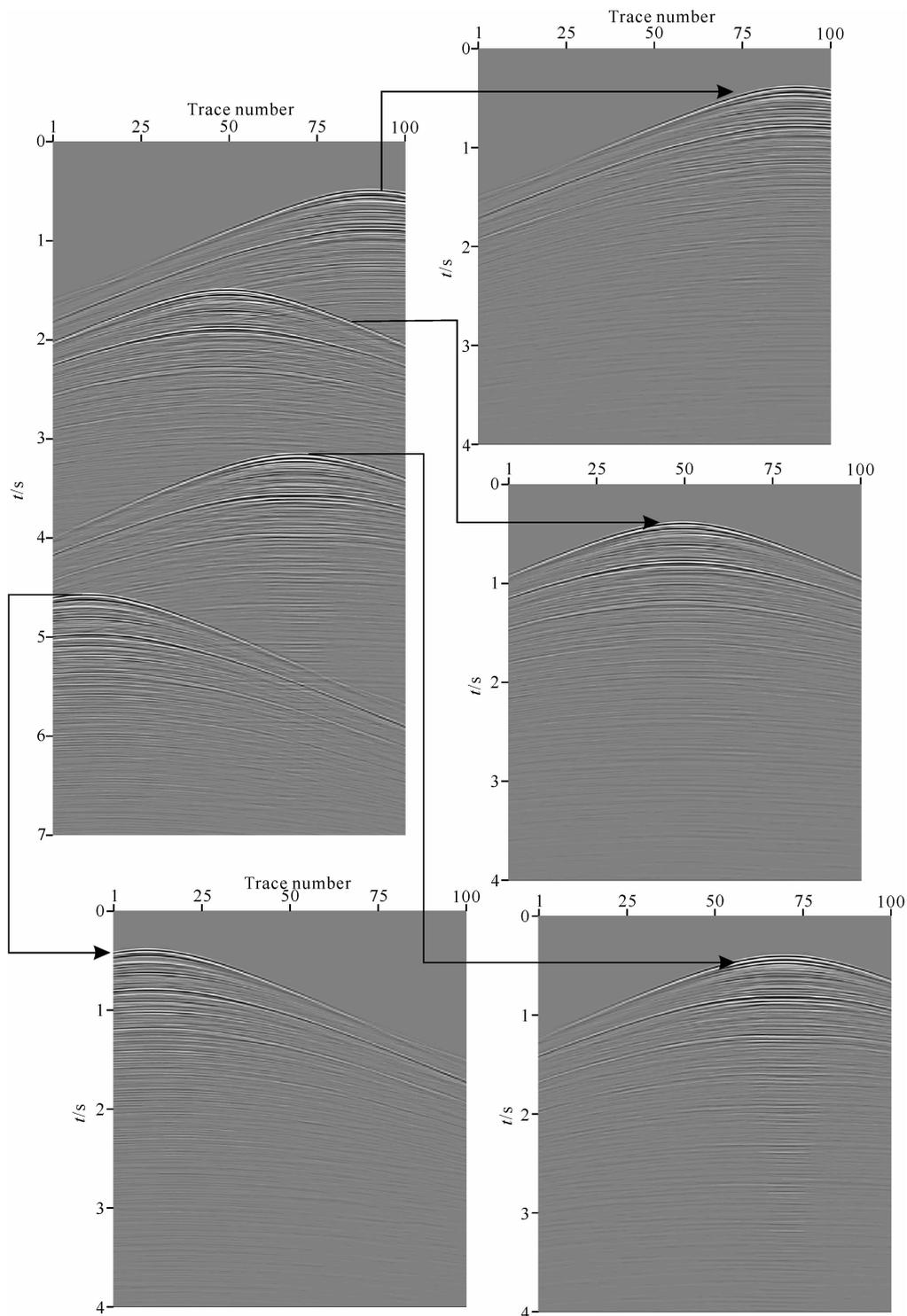


图 1 混合炮在时间域的合成图

Fig. 1 The composite diagram of blending shot in time domain

整的地震数据.

## 4 算例

文章分别用模拟数据和实际数据进行模拟混合采集,对本文提出的方法进行验证.

### 4.1 模拟数据

模拟采集参数:地表布置 90 个检波器,道间距 12 m. 第 1 个震源位于测线起始端,第 2 个与其相隔 18 个道间距,以此等距方式类推直到第 5 个震源. 5 个震源近乎同时(每 2 个震源激发间隔在 0~2 s 内随机选取)激发之后,集体沿测线向前移动一个道间

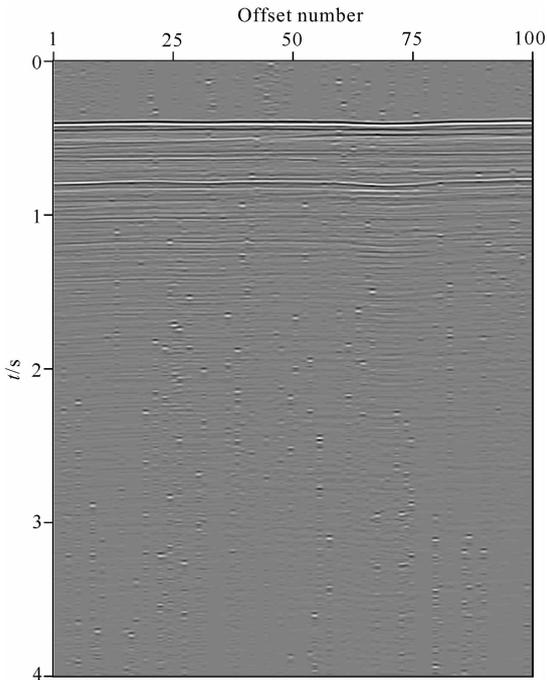


图2 共偏移距中混合数据的信号和噪声分布图

Fig.2 The distribution diagram of signal and noise in blending data in common offset domain

距,直至第5个震源在最后一个检波器上激发完成.最后得到的混合地震记录中,每个混合炮中包含5个单炮.

图3是模拟数据的分步处理结果,选用第35炮作为示例.图3a是未混合的原始单炮数据;图3b是模拟混合采集之后,在混合数据中加入20%的高斯白噪,并随机将20%的地震道充零的数据;图3c是仅做了小时窗中值滤波的结果,如图3c所示,在仅经过普通小时窗中值滤波之后,混合记录中的混合噪声得到部分压制,这和一般炮分离方法的原理和结果类似,但是其对缺失道集的插值和随机噪声的衰减处理效果不理想(在下文展示的实际数据的例子中表现的更明显).图3d是在图3c的基础上在Radon域采用本文提出的稀疏约束反演处理的结果.由图3d和图3c对比可得,应用了本文提出的方法后,不仅混合噪声得到了进一步压制,而且同时完成了缺失道集的插值和随机噪声的衰减.

#### 4.2 实际数据

应用某一海域的实测地震资料进一步验证本方法的可行性和有效性.模拟混合观测系统参数:第1个震源位于首个检波器处,第2个震源和第1个相隔20个道间距,位于第21个检波点处,以此类推直至第71个检波点处的第5个震源.5个震源近乎同时(每2个震源激发间隔在0~2s内随机选取)激

发后,同时向前移动一个道间距,直至覆盖完所有的检波器为止.得到的混合炮记录中,每个混合炮中含有5个单炮记录.图4是分步处理结果图,为了便于对比,采用的时窗相同:横轴为100个检波器,纵轴为4s采集时间.

图中选用第50炮作为示例.过程分析与图3类似:图4a是未混合的单炮记录;图4b是模拟混合采集之后,在混合记录中加入20%的高斯白噪,并随机充零20%的地震道的记录;图4c是仅做完小时窗中值滤波的预处理结果,由图4c所示,仅有部分混合噪声得到压制,而缺失的道集和随机噪声没有得到理想的处理结果;而由图4d可得,在共中心点域应用本文提出的方法后,同时去除了这三种影响混合地震采集质量的因素,得到了满意的结果.

为了从微观上展示本方法的实际能力,选用理论数据(图4a)和结果数据(图4d)中的任意两道做了波形对比,如图5所示.图5a是第10道的波形对比,图5b是第70道的波形对比,其中,黑色线代表理论数据,红色线代表结果数据(为了清晰展示,选取的时窗是800~2400ms).从波形对比可以看出,理论数据和结果数据的吻合度较高,再一次论证了本方法的可行性和有效性.

## 5 对比讨论

目前国际上还没有正式规定判定混合炮分离质量的通用标准,大多数学者采用下式计算分离结果的质量:

$$\text{Signals/Blending Noise} = 20 \log_{10} \frac{Q_{\text{rms}}}{(Q_N - Q)_{\text{rms}}}, \quad (10)$$

其中, $Q_N$ 代表第 $N$ 次迭代后的分离结果, $Q$ 代表未混合的单炮记录.其中,下标rms代表方均根值.

按照式(10)的判定标准,从近几年提出的方法中挑出典型的5类与本方法进行对比,结果如下:第一类,混合炮的单炮个数是2,在共偏移距采用频率-波数( $f-k$ )滤波(Doulgeris et al., 2011; Mahdad et al., 2012)进行15次迭代后的分离信噪比是9.79;第二类,混合炮的单炮个数是2,结合一维中值滤波和频率-波数( $f-k$ )滤波(Mahdad et al., 2012)迭代15次后的分离信噪比是12.54;第三类,混合炮的单炮个数是2,应用频率-检波器方向波数-炮点方向波数( $f-k_r-k_s$ )滤波(Doulgeris et al., 2011; Mahdad et al., 2012)15次迭代后的分离信噪比是

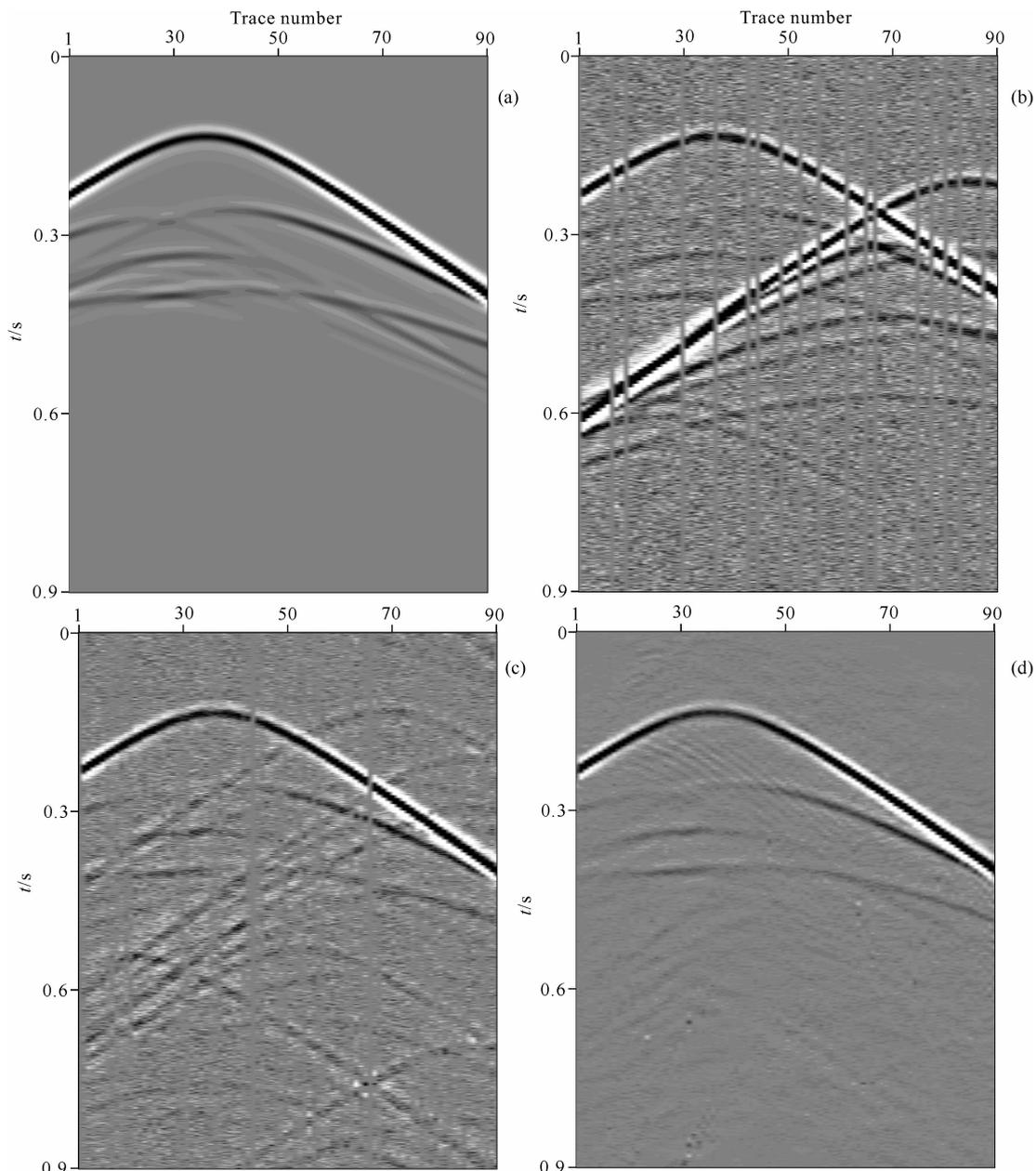


图3 (a)未混合的原始数据,选90炮中的第35炮作为示例;(b)含信噪比为20%的高斯白噪、有20%的缺失道集的伪分离数据;(c)经过小时窗中值滤波的数据;(d)反演后的最终结果

Fig. 3 (a) Shows the original data that is not blended. We choose the 35<sup>th</sup> shot record among 90 shots. (b) is the pseudodeblending result of the shot that is added with white Gaussian noise (SNR=20%) and has 20% missing traces.

(c) shows the shot record filtered by the small window median filtering in common offset domain. (d) is the final outcome that is processed by inversion in common mid-point domain after median filtering

14.37;第四类,混合炮的单炮个数是2,采用线性Radon( $\tau$ - $p$ )滤波(Doulgeris et al., 2011; Mahdad et al., 2012)进行15次迭代后的分离信噪比是18.11;第五类,混合炮的单炮个数是3,利用频率-波数( $f$ - $k$ )滤波(Mahdad et al., 2011)进行44次迭代后的分离信噪比是12.

采用本文方法对实际资料的处理中,混合的单炮数为5炮,迭代次数50次,分离信噪比为13.62.

可以看出,本方法在提高地震资料处理效率的同时,不仅炮分离个数的约束程度要小于上文提及的方法,而且保证了分离信噪比不受损失.

## 6 结论

混采数据中包含的混合噪声不同于一般意义上的随机噪声,虽然它在非炮域显示了随机分布的特

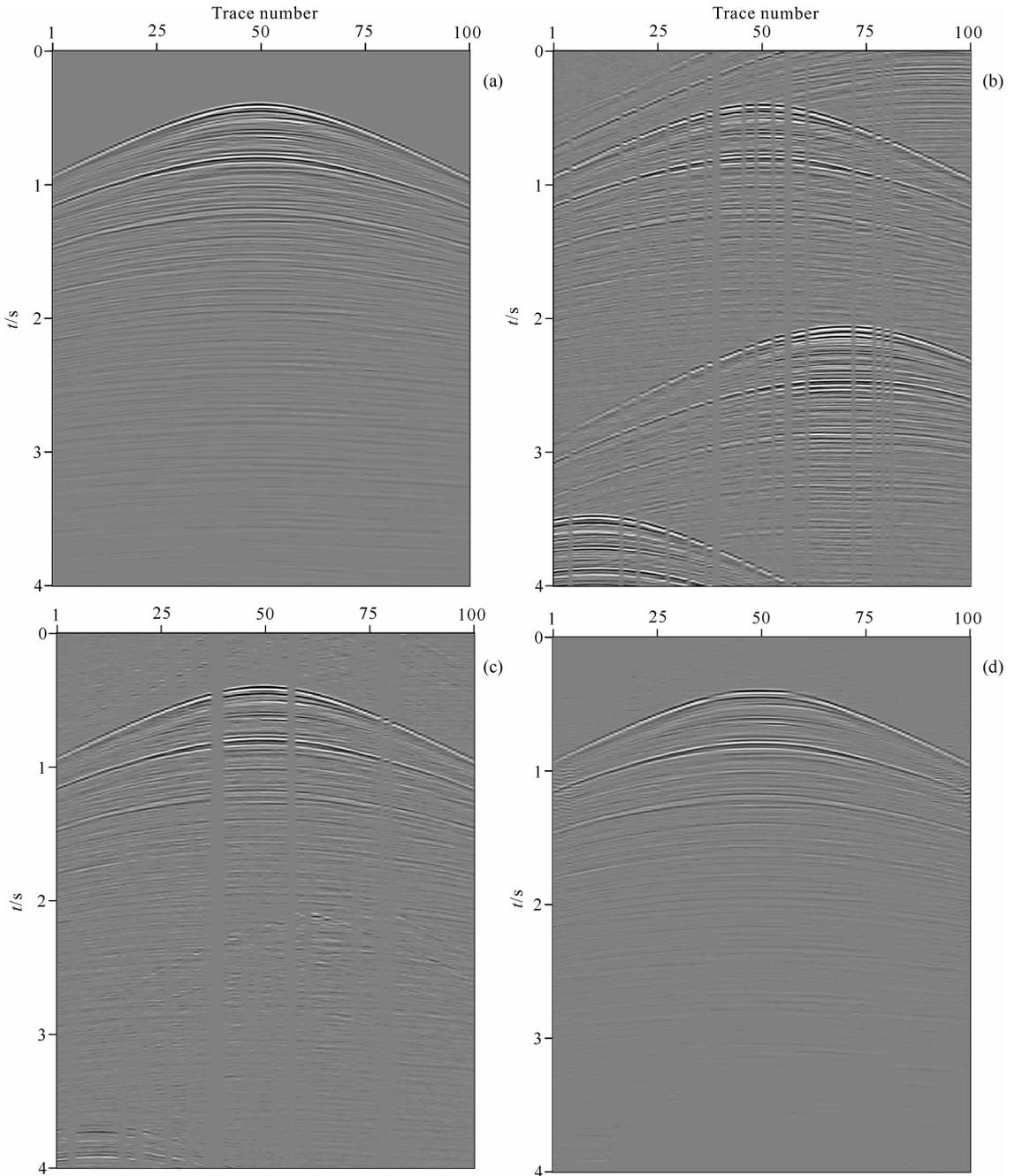


图 4 (a)未混合的原始数据,选了 100 炮中的第 50 炮作为示例;(b)含信噪比为 20%的高斯白噪、有 20%的缺失道集的伪分离数据;(c)经过小时窗中值滤波的数据;(d)反演后的最终结果

Fig. 4 (a) Shows the original data that is not blended. We choose the 50<sup>th</sup> shot record among 100 shots. (b) is the pseudodeblending result of the shot that is added with white Gaussian noise (SNR=20%) and has 20% missing traces. (c) shows the shot record filtered by the small window median filtering in common offset domain. (d) is the final outcome that is processed by inversion in common mid-point domain after median filtering

点,其能量大小却与随机噪声大相径庭,尤其值得注意的是,一些混合噪声的能量甚至大于有效信号;混合采集中,每个检波器携带的地震信号较常规采集更多,所以缺失道集产生的影响更大,因此插值对混合采集更为重要;由于采集环境的干扰而引入的随机噪声对地震记录的影响也不容忽视.

本文将混合噪声的去除,缺失道集的插值以及随机噪声的衰减描述为同类反演问题,利用 FISTA (Fast Iterative Shrinkage-Thresholding Algorithm) 算法,将这三类反演问题同时带入反演迭代算法中,输出的数据不仅完成了混合噪声的去除,实现了混合炮中单炮的分离,而且去除了随机噪声并补充了缺

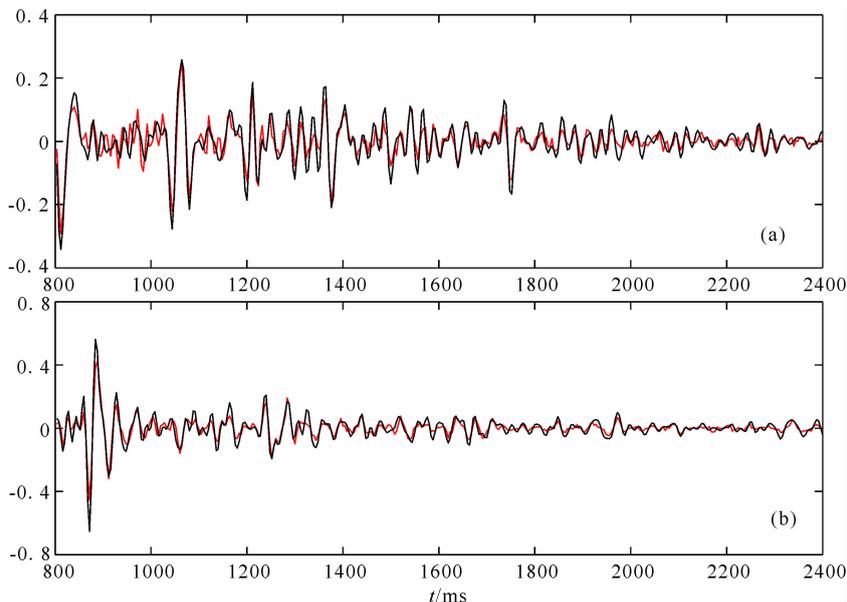


图 5 理论数据(黑色线)和结果数据(红色线)的波形对比图,其中,图 a 是第 10 道的数据,图 b 是第 70 道的数据,纵坐标为振幅,无量纲  
Fig. 5 The waveform comparison of theoretical data (black line) and result data (red line):

(a) is the data of the 10<sup>th</sup> trace, (b) is the data of the 70<sup>th</sup> trace

失道集的地震数据. 模拟数据和实际数据的算例均表明,本方法在很大程度上提高了工作效率,并且得到了信噪比较高的预期效果.

## References

- Abma R L, Manning T, Yu J, et al. 2010. Sparse inversion of simultaneous sources. 72nd Annual International Meeting, EAGE, Extended Abstracts, B06.
- Akerberg P, Hampson G, Rickett J, et al. 2008. Simultaneous source separation by sparse radon transform. 78th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2801-2805.
- Ayeni G, Almomin A, Nichols D. 2011. On the separation of simultaneous-source data by inversion. 81st Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 20-25.
- Beck A, Teboulle M. 2009. A fast iterative shrinkage-thresholding algorithm for linear inverse problems. *SIAM J. Imag. Sci.*, 2(1):183-202.
- Berkhout A J. 2008. Changing the mindset in seismic data acquisition. *The Leading Edge*, 27(7):924-938.
- Daubechies I, Defrise M, Mol C D. 2004. An iterative thresholding algorithm for linear inverse problems with a sparsity constraint. *Commun. Pure Appl. Mathe.*, 57(11):1413-1541.
- Dougeris P, Mahdad A, Blacquièrre G. 2010. Separation of blended data by iterative estimation and subtraction of interference noise. 80th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 3514-3518.
- Dougeris P, Mahdad A, Blacquièrre G. 2011. Iterative separation of blended marine data: discussion on the coherence-pass filter. 81st Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 26-31.
- Dougeris P, Verschuur D J, Blacquièrre G. 2012. Separation of blended data by sparse inversion utilizing surface-related multiples. 74th Annual International Meeting, EAGE, Extended Abstracts, A041.
- Figueiredo M A T, Nowak R D. 2003. An EM algorithm for

wavelet-based image restoration. *IEEE Trans. Image Process.*, 12(8):906-916.

- Han L, Han L G. 2012. Seismic spectral decomposition and denoising with in-crowd algorithm. 82nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 31:1-5.
- Herrmann F J, Erlangga Y A, Lin T T Y. 2009. Compressive simultaneous full-waveform simulation. *Geophysics*, 74:35-40.
- Huo S D, Luo Y, Kelamis P. 2009. Simultaneous sources separation via multi-directional vector-median filter. 79th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 31-35.
- Kim Y, Gruzinov I, Guo M H, et al. 2009. Source separation of simultaneous source OBC data. 79th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 51-55.
- Lin T T Y, Herrmann F J. 2009. Designing simultaneous acquisitions with compressive sensing. 71st Annual International Meeting, EAGE, Extended Abstracts, S006.
- Mahdad A, Dougeris P, Blacquièrre G. 2011. Separation of blended data by iterative estimation and subtraction of blending interference noise. *Geophysics*, 76:9-17.
- Mahdad A, Dougeris P, Blacquièrre G. 2012. Iterative method for the separation of blended seismic data: discussion on the algorithmic aspects. *Geophysical Prospecting*, 60(4):782-801
- Malioutov D M, Cetin M, Willsky A S. 2005. Homotopy continuation for sparse signal representation; Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics Speech Signal Process (ICASSP), 5.
- Moore I, Dragoset W B, Ommundsen T, et al. 2008. Simultaneous source separation using dithered sources. 78th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2806-2809.
- Scales J A, Gersztenkorn A. 1988. Robust methods in inverse theory: Inverse Problems, 4(4):1071-1091.
- Silverman D. 1979. Method of three dimensional seismic prospecting. US Patent, 4,159,463.
- Stork M. 2003. Median filters theory and applications. Third International Conference on Electrical and Electronics Engineering Papers, 3:1-5.