

· 处理技术 ·

单点地震数据的一致性组合叠加方法

孙成禹^{*①} 孙甜甜^① 彭洪超^② 肖云飞^①

(①中国石油大学地球资源与信息学院, 山东青岛 266555; ②东方地球物理公司, 河北涿州 072751)

孙成禹, 孙甜甜, 彭洪超, 肖云飞. 单点地震数据的一致性组合叠加方法. 石油地球物理勘探, 2009, 44(增刊1): 23~28

摘要 为了解决常规野外检波器组合引起的高频振幅衰减、组合内道间差异等方面问题, 本文在分析影响组合叠加效果的诸因素基础上, 针对单点高密度采集数据, 阐述了基于自适应匹配滤波的一致性组合叠加方法; 通过构建标准道, 采用自适应匹配滤波方法对子波波形和道间时差同时进行一致性校正, 改善了组合叠加的效果。校正后地震记录的组合叠加响应能够较好地保持反射波原有的振幅和波形特征。模型和实际资料的处理效果验证了该方法的有效性和可行性。

关键词 子波校正 一致性组合叠加 地震数据处理 匹配滤波 高密度数据

1 引言

与有效反射波存在明显视速度差异的规则干扰(如面波)和其他随机噪声是影响地震资料信噪比的主要因素^[1], 在野外地震数据采集中采用检波器组合是压制面波及随机干扰的有效方法。但利用检波器组合在压制干扰波的同时, 也会带来高频振幅衰减及因组合内道间差异导致的子波畸变等问题。基于单点高密度采集, 再进行室内组合的方法与常规的野外检波器组合相比, 在压制面波干扰及随机噪声方面有一定的优势^[2]。研究表明, 野外检波器组合响应受地表引起的相位变化的影响, 如在起伏地表区, 应用检波器组合技术会使地震信号失真。在这种情况下, 反射波会被拉伸, 从而使振幅能量减弱。另外, 与地震波传播机制有关的因素、检波器与大地的耦合效应等都会引起振幅的改变^[3]。因此, 在这些地区使用单检波器记录再进行室内组合, 能够在保持反射波信息保真度的同时提高资料的信噪比。由于在室内组合之前可以对资料做相应的预处理, 所以单点接收技术在地震资料(尤其是浅层)采集和处理中受到普遍关注。

单点高密度资料的组合叠加技术近年得到较快

发展, 国内外诸多学者在这一领域做了卓有成效的工作。Levy 等^[4]研究了自动相位校正法; Eisner 等^[5]提出了相位分解法。随着近年高密度采集技术在中国西部准噶尔盆地的成功应用, Xiao 等^[6]及时总结了该技术的优点及其应用效果。Panea 等^[7]的研究表明, 单点检波器采集技术与其他(如射线束形成)技术相结合能显著提高室内组合对噪声压制的效果。Panea^[8]还对相位变化情况下的室内组合技术进行了分析, 指出组合道集内相位的变化会对地震反射波产生影响, 而单道接收的室内组合法可在组合前通过相位校正处理解决此问题。郭向宇等^[9]曾提出过子波剩余相位估计和校正方法, 即采取相位扫描方式进行子波估计及相位校正。刘金俊等^[10]在以子波各个频率成分与零相位子波相位差为常数的假设条件下, 提出了子波相位谱消去法。陈必远^[11]在时间和空间变化的条件下采用分频扫描方法实现了地震记录的常相位校正。李合群等^[12]对利用双参数校正后的各道进行加权叠加, 以提高地震资料信噪比。笔者^[13]也曾对空变地震子波提取方法进行了研究。张广智等^[14]提出了井旁道地震子波的精细提取方法。曹务祥^[15]研究了单道接收地震资料的室内组合方法, 为单点接收地震资料的室内组合处理提供了技术基础。目前常用的

* 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号中国石油大学地球资源与信息学院, 266555

本文于 2009 年 4 月 23 日收到。

本课题由国家高技术研究发展计划(2007AA060502)和国家重点基础研究发展计划(2007CB209605)资助。

一致性处理方法大多是基于“子波为常相位差”这一假设,但在近地表结构变化剧烈区难以满足该条件。为此,本文提出首先构建标准道,然后采用自适应匹配滤波方法,对子波波形和时差同时进行校正,以达到改善组合叠加效果的目的。

2 常规组合方法分析

为了压制面波及随机干扰,野外地震数据采集时通常使用各种类型的检波器组合。随着地震仪器带道能力的增强,排列长度加长,使得地震有效波视速度在远道显著减小,并受到不同程度的检波器组合压制,尤其是对高频有效信号的压制。

对于组内距为 Δx 的 N 个检波器的组合,其组合频率响应为

$$\Phi(n, f) = \frac{\sin(N\pi f \Delta x / v_a)}{N \sin(\pi f \Delta x / v_a)} \quad (1)$$

式中: v_a 为视速度; f 为频率。根据组合的响应曲线,组合旁瓣使干扰波发生泄露,而组合的主瓣并非平直,使非垂直入射的地震波能量削弱。图 1 是组合频率响应分析图(图中 $v_a = 8000\text{m/s}$, 近似于反射波视速度),可见随着组合频率的增加,地震波高频对应的频响逐渐衰减^[15]。

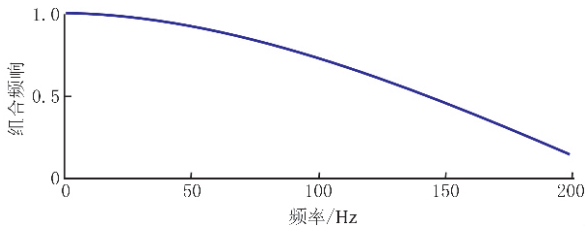


图 1 组合频率效应分析

检波器个数为 7, 检波器间距为 5m, 视速度为 8000m/s

式(1)关于视速度的偏导数为

$$\frac{\partial \Phi}{\partial v_a} = \frac{\cos(N\pi f \Delta x / v_a)}{\cos(\pi f \Delta x / v_a)} > 0 \quad (2)$$

由式(2)可知,组合频率响应函数 Φ 是关于自变量 v_a 的增函数。因此随着地震波视速度的减小,组合的频率效应也呈非线性减小,并造成低视速度地震波的能量衰减。由于地震波的视速度随炮检距的增加而减小,所以组合的高频振幅衰减作用随炮检距的增大而加强。

若原始炮集记录内子波的振幅和相位都相同,则组合叠加就具有更强的压制噪声、提高信噪比的

作用。在实际资料中,这一假设往往难以满足。其主要原因有两点:①同一道集内各子波存在时差;②子波的振幅谱或相位谱存在差异^[12]。

常规处理中的时差校正能够提高组合叠加的效果,但它默认子波波形相同这一假设。对于子波波形,特别是相位差所造成的子波形态差异给组合叠加造成的影响,目前还没有很好的解决方法。而同一道集内子波间的相位差会给时差校正技术带来误差,其误差随相位差的增加而增大。这种误差会影响组合叠加的效果,特别是对分辨率要求更高的目标处理层段。将从道集上拾取的道间时差与理论时差进行对比(图 2),可看出相位差异对拾取的时差值的准确性有一定影响。当道集中只存在时差、不存在相位差时,拾取的时差值与理论计算时差值相等,则根据拾取的时差值进行校正得到的校正结果就很准确。而当同时存在道间时差和相位差异时,从道集上拾取的时差与理论计算时差之间存在误差,且该误差也随着相移角度的增加而增大。

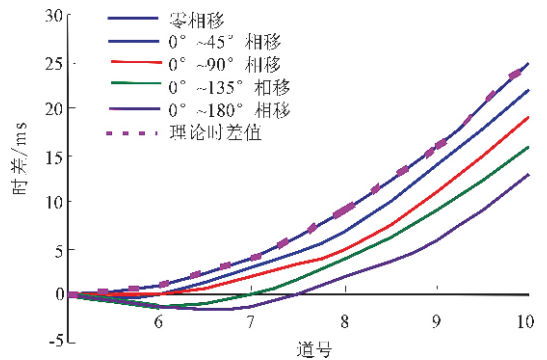


图 2 从道集上拾取的道间时差与理论时差值的对比曲线

3 自适应匹配滤波一致性校正方法

为了消除组内道间差异,需首先对参与组合的各道进行一致性校正,然后再进行叠加。常用方法是对各道子波以常相位差进行扫描校正,但这类方法在近地表变化剧烈区往往效果不佳。为此,本文设计了以标准道为基础,采用自适应匹配滤波的方法,对道间时差和子波波形同时进行校正,以改善组合叠加效果。选取道集内位于组合中心位置的道作为标准道,在各道有效信号的振幅、时差、频率及相位的差异不是很大时,匹配滤波法能同时消除这几方面的差异,实现子波的一致性校正,从而使得有效波的能量增强,干扰波的能量相对减弱^[16,17]。

选取组合道集内波形稳定,且与其他道之间总体时差较小的道作为标准道。不妨设第 j 道为标准道,记为 $G^j(t)$,其他各道信号记为 $G^i(t)$,以标准道记录为参考,使其他道记录与之匹配,选取归一化算子 P 使得目标泛函

$$E(t) = \| G^j(t) - PG^i(t) \| \rightarrow \min \quad (3)$$

极小。在此基础上将其离散化,即变为求一长度为 L 的匹配滤波器 $\{P(m), m=1, 2, \dots, L\}$,使误差泛函

$$E = \sum_k \left[G^j(k) - \sum_m P(m)G^i(k-m) \right]^2 \rightarrow \min \quad (4)$$

令泛函 E 关于 $P(m)$ 的 Frechet 导数 $\frac{\partial E}{\partial P(m)} = 0$, $m = 1, 2, \dots, L$,可以得到关于求解匹配滤波器 $\{P(m), m = 1, 2, \dots, L\}$ 的 L 个方程组

$$\begin{aligned} & \sum_m P(m) \left[\sum_m G^i(k-m)G^i(k-n) \right] \\ & = \sum_m G^j(k)G^i(k-n) \quad n = 1, 2, \dots, L \end{aligned} \quad (5)$$

再令

$$R_{ii}(m-n) = \sum_m G^i(k-m)G^i(k-n) \quad (6)$$

$$R_{ji}(n) = \sum_m G^j(k)G^i(k-n) \quad (7)$$

其中 R_{ii} 和 R_{ji} 分别为第 i 道的自相关函数及其与标准道的互相关函数。式(5)可进一步写成

$$\sum_m P(m)R_{ii}(m-n) = R_{ji}(n) \quad n = 1, 2, \dots, L \quad (8)$$

将式(8)写成矩阵形式,即

$$\begin{bmatrix} R_{ii}(0) & R_{ii}(1) & \cdots & R_{ii}(n) \\ R_{ii}(-1) & R_{ii}(0) & \cdots & R_{ii}(n-1) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ R_{ii}(-n) & R_{ii}(1-n) & \cdots & R_{ii}(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ji}(0) \\ R_{ji}(1) \\ \vdots \\ R_{ji}(n) \end{bmatrix} \quad (9)$$

该矩阵方程可简记为

$$\mathbf{M}\mathbf{P} = \mathbf{R} \quad (10)$$

其中: \mathbf{M} 为由各道地震记录的自相关函数序列组成的 Toeplitz 矩阵; \mathbf{R} 为该道与标准道的互相关向量。

式(10)可采用 Levinson 递推算法求解。求解式(8)或式(10)可得匹配滤波器算子

$$\{P(m), m = 1, 2, \dots, L\}$$

使用滤波因子对地震道进行的校正可表述为

$$G_{\text{nor}}^i(k) = \sum_{m=1}^L P(m)G^i(k-m) \quad (11)$$

4 模型试算

图 3 所示是一个水平层状模型及其炮集记录,共有 140 个检波器单点接收,按照设计的模型参数,每 7 个检波器的输出组合在一起作为一道,组合后共计 20 道。在组合叠加处理中,由于存在道间时差

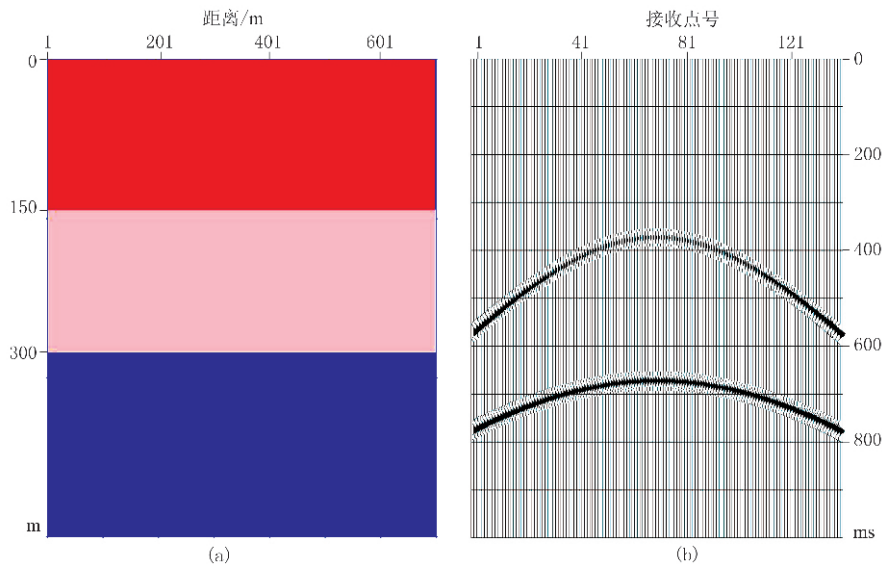


图 3 水平层状介质模型(a)及其炮集记录(b)

及相位差,直接组合后有效波的能量会有所降低,频带比组合之前变窄。为解决这一问题,在组合前对原始道集记录进行了一致性校正处理。

图 4a 和图 4b 分别是一致性校正前、后的组合效果对比。与处理前的叠加道集相比,一致性校正处理后叠加道集的目的层反射波能量得到了增强,特别是远炮检距处,其校正效果更明显。

图 5 是一致性校正前、后的频谱对比图。可见在地震有效信号频率范围内,直接进行组合叠加得到的地震信号与原来的标准道相比,其频带变窄、主频降低、能量相对削弱。而经过一致性处理后组合得到的信号,其频谱相对较宽,能量相对较强,几乎与标准道的频谱相一致。因此,经过一致性校正处理后叠加道集的分辨率有所提高。

图 6 是一致性校正前后组合道与标准道之间的

相似系数对比。可见在校正之前,炮检距越大相似系数越小,即组合引起的误差越大,下面对其做定量分析。

由反射波时距曲线方程 $t = \frac{1}{v} \sqrt{x^2 + 4h^2}$, 得到

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{v} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4h^2}{x^2}}} \quad (12)$$

可见,当 x 增大时, dt/dx 也增大。如果按照原始的炮集记录直接进行组合叠加,由于存在道间时差及相位差,因此会产生非同相叠加。从图 6 中可以看出,一致性校正之前,即直接从炮集记录上拾取的相似系数误差曲线与呈双曲线形状的反射波时距曲线基本一致,这种误差是由道间时差及相位差引起的,而经过一致性校正后,这种误差基本可消除。

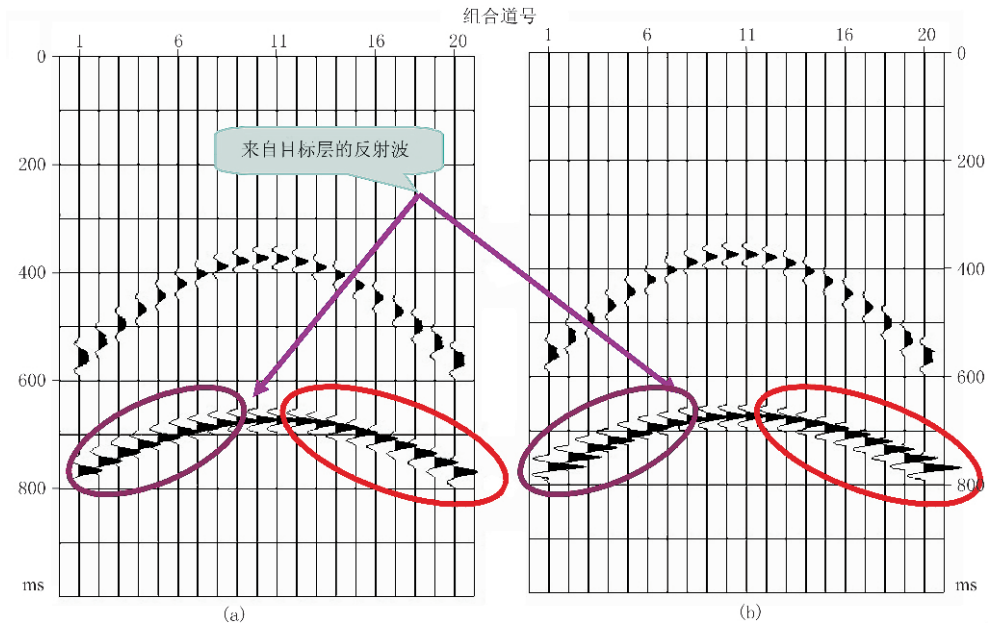


图 4 一致性校正前后的组合效果对比
(a) 未做一致性校正的叠加道集; (b) 一致性校正后的叠加道集

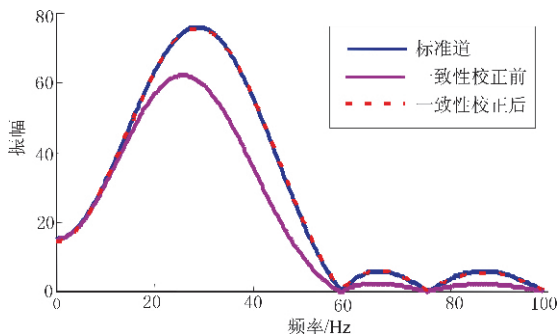


图 5 一致性校正前、后的组合道集与标准道频谱对比

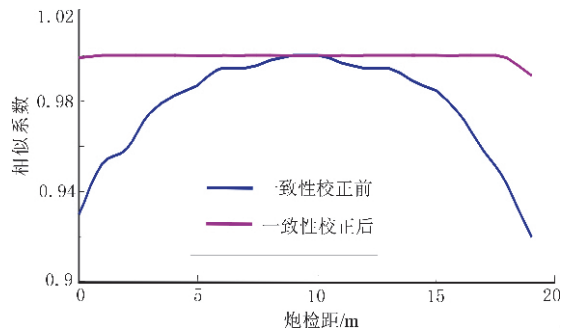


图 6 一致性校正前、后的相似系数对比

5 实际资料处理

图 7a 是 J 区单点高密度采集的常规处理后炮集记录,图 7b 是对其进行自适应匹配滤波一致性校正处理后结果。图 8a 和图 8b 分别是对图 7 中两图进行 5 道组合处理得到的结果,可见两种组合方法均能压制面波及随机干扰,提高地震资料的信噪比。但常规组合会引起分辨率降低,表现为反射波同相轴变粗,高频成分缺失,由于组合道集内道间差异的存在,还会使信号的振幅发生改变。经过自适应匹

配滤波一致性校正后,道间时差和子波差异明显减小,真正实现了有效波的同相叠加,从而使有效波能量明显强于常规组合叠加。

众所周知,地震数据采集中的野外组合接收的主要目的是压制面波。从处理结果可见,经过匹配滤波一致性组合叠加后,面波及随机干扰能量得到明显压制,信噪比得到提高,说明了本文方法的有效性和可行性。图 9 给出的常规处理及自适应匹配滤波一致性组合结果的频谱,无论是从单道频谱还是从整个记录的总频谱来看,一致性组合叠加得到的地震记录频谱均变宽、主频均变高、高频成分显著增

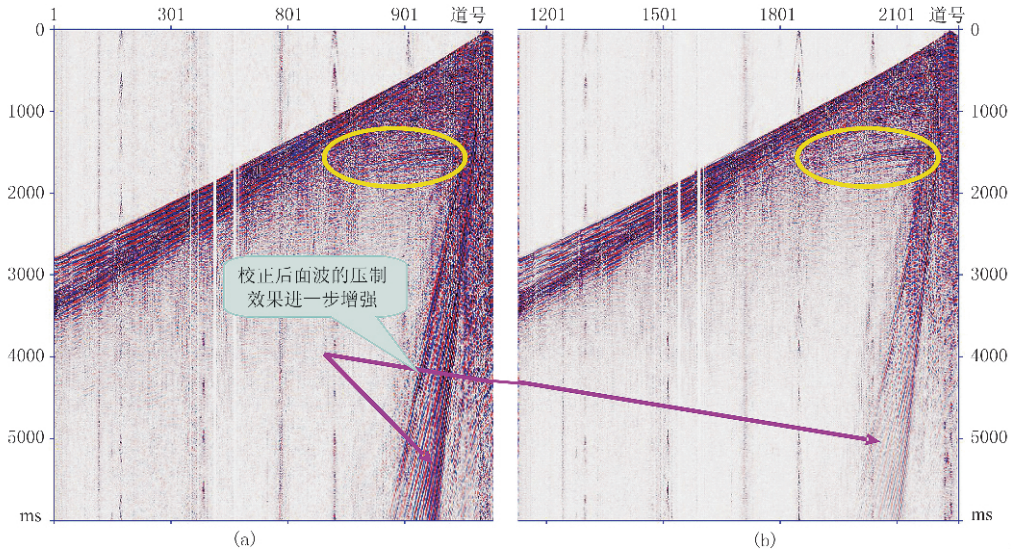


图 7 常规处理与自适应匹配滤波一致性校正后的炮集记录对比

(a) 常规处理后炮集记录; (b) 自适应匹配滤波一致性处理后炮集记录

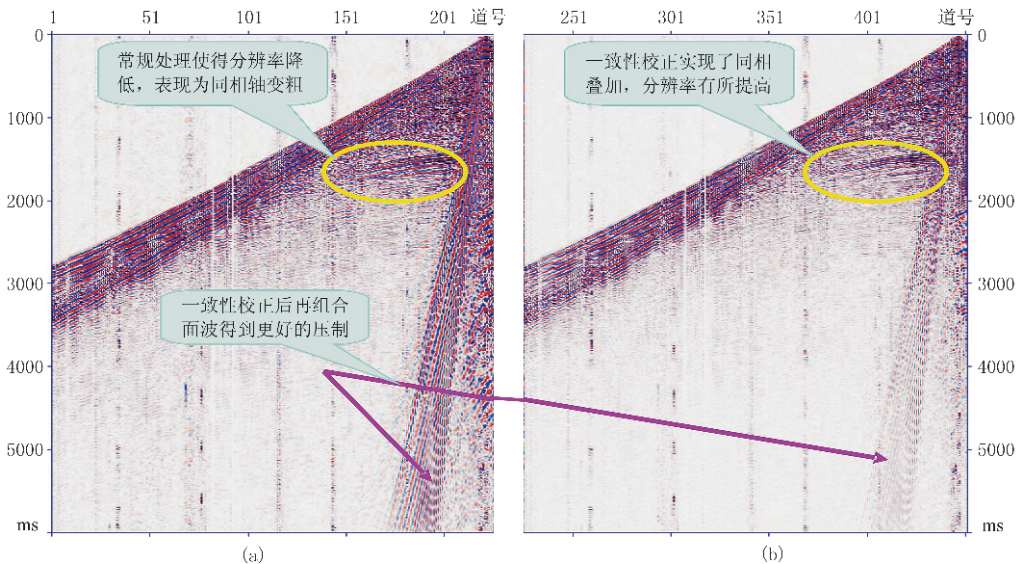


图 8 常规处理与自适应匹配滤波一致性校正五点组合结果对比

(a) 常规处理后的组合结果; (b) 自适应匹配滤波一致性处理后的组合结果

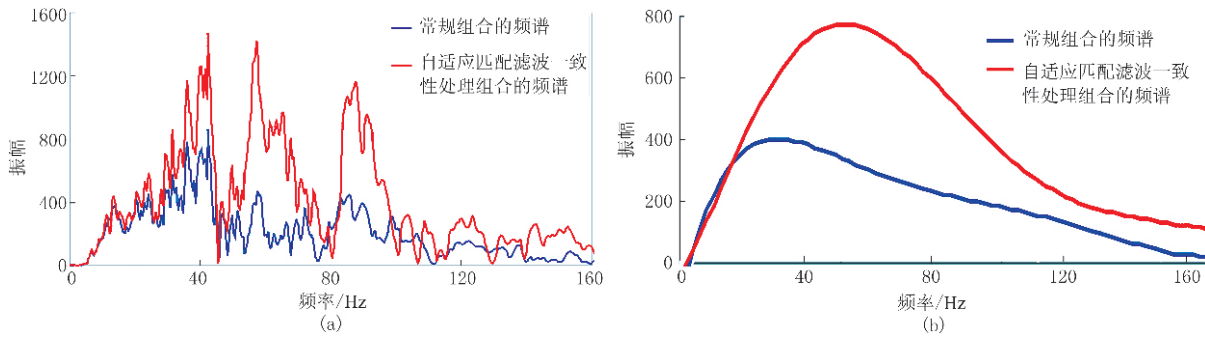


图9 常规组合处理及自适应匹配滤波一致性组合结果的频谱对比

(a) 单道记录频谱的对比; (b) 多道频谱平滑后的对比

强,这对在提高地震资料信噪比的同时保持较高的分辨率具有重要的意义。

6 结论

根据以上分析以及对模型和实际资料的处理结果,可以得出以下结论:

(1)对单点高密度地震数据进行基于自适应匹配滤波方法的一致性处理,并进行室内组合叠加,能有效压制地表附近的面波干扰和随机噪声的影响,提高地震资料信噪比;

(2)一致性处理技术能够补偿因道间时差及相位差引起的能量衰减,尤其是高频成分的衰减,提高组合地震道与组合中心道的相似性,拓宽了信号的频谱;

(3)基于自适应匹配滤波技术的室内一致性组合叠加方法,其校正误差随着道间差异的增加而增大,因此组合道数不宜过大。

另外,从对高密度采集数据处理结果的分析可知,利用高密度采集技术提高低信噪比地区地震资料的质量还应着重于提高原始资料的信噪比。在野外采集适当加大垂直测线方向检波器组合长度,减小道距,与适宜的室内处理相结合,可有效提高地震资料的质量。

参考文献

- [1] Morse P F and Hildebrandt G F. Ground-roll suppression by the stackarray. *Geophysics*, 1989, 54(3): 290~301
- [2] Moldoveanu N, Uribe J and Stathopoulos D. Point-source/point-receiver land acquisition: Torrecillas-Mexico experiment. *Expanded Abstracts of 74th*

SEG Annual Meeting, 2004

- [3] Orza R L and Panea I. Single sensors versus hard-wired arrays in amplitude analysis. *Expanded Abstracts of 78th SEG Annual Meeting*, 2008; 528~532
- [4] Levy S and Oldenburg D W. Automatic phase correction of common-midpoint stacked data. *Geophysics*, 1987, 52(1): 51~59
- [5] Eisner A E and Hampson G. Decomposition into minimum and maximum phase components. *Geophysics*, 1990, 55(7): 897~901
- [6] Xiao P, Xin P and Wanxiang Y. Application of high density acquisition in Jungar Basin, Western China. *Expanded Abstracts of 76th SEG Annual Meeting*, 2006: 90~94
- [7] Panea I and Drijkoningen G. The spatial data-adaptive minimum-variance distortionless-response beamformer on seismic single-sensor data. *Geophysics*, 2008, 73(5): Q29~Q42
- [8] Panea I. Array forming in the presence of phase variations. *The Leading Edge*, 2009, 28(2): 216~221
- [9] 郭向宇,周兴元.混合相位子波相位估算及校正.石油地球物理勘探,1998,33(1):214~221
- [10] 刘金俊,王修田,徐世浙.实现地震道零相位化的子波相位谱消去法.海洋地质与第四纪地质,1999,19(4)
- [11] 陈必远,陈明伟,易维启.时空变分频相相位校正.石油地球物理勘探,1997,32(1):103~108
- [12] 李合群,周兴元.时差常相位校正及加权叠加.石油地球物理勘探,2000,35(4):415~418
- [13] 孙成禹.空变地震子波提取方法研究.石油大学学报(自然科学版),2000,24(1):77~84
- [14] 张广智,刘洪,印兴耀.井旁道地震子波精细提取方法.石油地球物理勘探,2005,40(2):158~163
- [15] 曹务祥.单道接收地震资料的室内组合方法.石油地球物理勘探,2006,41(6):615~618
- [16] 金龙,陈小宏.时移地震非一致性影响研究与互均衡效果验证.勘探地球物理进展,2003,26(1):631~634
- [17] 邓怀群,刘雯林等.时间推移地震勘探中的互均化技术.天然气工业,2000,20(1):20~23

(本文编辑:朱汉东)