

相似度加权的超虚干涉法加强初至波信号

吕雪梅¹ 安圣培¹ 胡天跃^{1,†} 崔永福²

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 中国石油塔里木油田公司, 库尔勒 841000;

† 通信作者, E-mail: tianyue@pku.edu.cn

摘要 当低信噪比资料局部道集存在强噪声时, 超虚干涉法虽然能够提高远偏移距折射波初至的信噪比, 但可能降低临近道集的初至信噪比。为解决这一问题, 提出基于相似度加权叠加的超虚干涉法。通过互相关和褶积运算, 实现相邻道包含的初至波信号的同相位叠加, 达到提高信噪比的目的; 同时, 引入相似度权重函数, 提高压制局部异常噪声的能力。合成数据和实际数据实例都说明所提方法能有效地提高地震初至波信噪比。最后, 讨论了方法的抗噪性和适用性。

关键词 初至; 低信噪比; 干涉法

中图分类号 P315

Similarity-Weighted Super-Virtual Interferometry to Enhance First Breaks

LÜ Xuemei¹, AN Shengpei¹, HU Tianyue^{1,†}, CUI Yongfu²

1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000;

† Corresponding author, E-mail: tianyue@pku.edu.cn

Abstract When strong noise exists on local seismic traces with low signal-to-noise ratio (SNR), super-virtual interferometry (SVI) method can be used to increase the SNR of first breaks on far-offset traces, but may decrease the SNR of first breaks around the noisy traces. To solve this problem, the similarity-weighted super-virtual interferometry is developed. Correlation and convolution are applied to stack the first arrivals on neighboring traces in common phase, and consequently increase the SNR of first arrivals. The introduction of similarity-weighted function improves the ability to suppress strong local abnormal noise. Both the synthetic and field data examples demonstrate the effectiveness of the proposed method to enhance seismic first breaks. At last, a discussion about the applicabilities and the anti-noise abilities of the proposed method is included.

Key words first breaks; low signal-to-noise ratio; interferometry

复杂近地表条件下的油气勘探已成为地震勘探技术发展的前沿, 如中国西部的山前带、沙漠和戈壁地区, 这类工区的静校正问题突出, 直接影响地震勘探效果。目前能够有效地解决复杂地表静校正问题的方法是基于层析成像建模的静校正方法, 即利用初至旅行时, 通过层析成像建立近地表模型, 由此计算炮检点的静校正量^[1]。然而, 层析建模的精度依赖初至到时的准确性, 如果到时不准, 会极大地影响静校正的效果。复杂近地表地区的地震数

据信噪比往往很低, 局部道集可能存在工业电及外源噪声等强干扰, 常规初至拾取方法难以准确拾取初至, 需要在初至拾取前, 通过预处理方法加强初至波信噪比。

超虚干涉法(super-virtual interferometry, SVI)最早用于加强远偏移距折射波初至^[2], 是完全数据驱动的方法, 不依赖地震数据的频率或视速度信息。SVI通过互相关和叠加提取检波点间的折射波响应, 再通过褶积和叠加重建炮检点间的折射波信号。在

这一过程中, 折射波由于同相位的叠加而被加强。Alshuhail 等^[3]应用 SVI 处理沙特阿拉伯地区的实际资料, 取得一定效果。为进一步加强初至波, 发展了迭代的 SVI 方法^[4]。针对近偏移距信噪比提高效果不佳以及不规则观测系统导致叠加次数不足的问题, An 等^[5-7]采用反向干涉和多域干涉方法, 在一定程度上解决了这一问题, 并在中国西部地区的数据处理中取得一定的效果。另外, Lu 等^[8]以及 An 等^[9]分别通过驻点近似方法和累积量相干积累方法, 成功地将 SVI 方法应用到三维地震数据的处理中。

复杂近地表地区的数据往往在局部道集中存在强噪声干扰, 而 SVI 要求通过原始地震道褶积检波点间的信号响应来重建其他道的初至波信号, 当使用的原始地震道噪声过大时, 会在重建的地震道中引入噪声, 影响叠加后的初至波信噪比。为解决这一问题, 本文提出基于相似度加权的超虚干涉法 (Similarity-weighted SVI, SWSVI), 用以减小噪声过大的道集在叠加中的权重, 提高 SVI 方法压制强局部道集噪声的能力。

1 方法原理

图 1 展示 SVI 提高折射波信噪比的基本原理, X 和 Y 是炮点, A 和 B 是检波点, A^{vir} 是虚源, 所示的射线路径为折射波路径。炮点 X 在检波点 A 和 B 的地震记录共用从 X 到虚源 A^{vir} 的射线路径, 对这两道地震记录做互相关, 会抵消掉这段共用射线路径的旅行时, 因此可以得到 A 与 B 间的折射波响应, 称为虚源记录。可以理解, 在虚拟地下震源 A^{vir} 处激发, 在检波点 B 接收到的地震记录, 其中震源激发时间需要提前 A^{vir} 到 A 的旅行时^[5]。由于虚源记录中不包含与炮点 X 有关的射线路径, 因此使用不同炮点 X , 通过互相关得到的 A 与 B 间的虚源记录

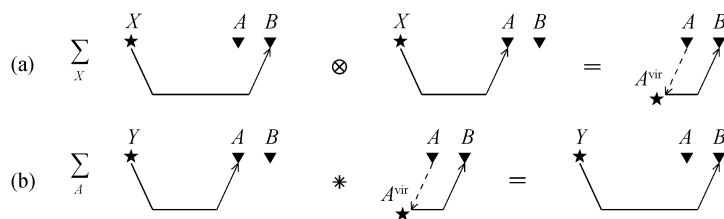
包含相同的折射波路径, 可以实现同相叠加, 加强这部分信号。由于不能同相位叠加, 反射波和非相关的随机噪声被相对压制^[2]。为了得到炮检点间的折射波信号, 用于后续的初至拾取和层析静校正, 将 A 与 B 间的虚源记录褶积 Y 到 A 的原始地震记录, 这两道地震记录同样共用 A^{vir} 到 A 的射线路径, 但具有一正一负的旅行时, 在褶积过程中相互抵消, 因此褶积结果得到 Y 到 B 点的地震记录。同样, 使用不同检波点 A 得到的 Y 到 B 的地震记录包含相同的折射波路径, 同相叠加后进一步加强了折射波信号。SVI 在频率域的表达式如下:

$$2 \cdot \text{Re}\{G(B, A, \omega)\} = D_1 \sum_X G(B, X, \omega) G^*(A, X, \omega), \quad (1)$$

$$G(B, Y, \omega) = D_2 \sum_A G(B, A, \omega) G(A, Y, \omega), \quad (2)$$

其中, $G(\cdot)$ 表示两点间的格林函数; ω 为圆频率; * 是共轭符号; D_1 和 D_2 是振幅因子项, 用于补偿重建的信号和真实信号的振幅差异。由于本文方法只关心相对振幅的变化, 因此不必求解 D_1 和 D_2 的具体数值。

SVI 的褶积步骤: 将原始道集和检波点间的虚源记录做褶积, 并将同一组炮检点的超虚道集叠加。如果原始地震记录局部存在强噪声干扰, 利用它们重建的超虚道集也会存在强噪声干扰。另外, 通过互相关和叠加的步骤估计的检波点间的信号响应也会存在相位误差。这些因素都会导致叠加得到的初至波信号的信噪比较低。针对这一问题, 本文发展了 SWSVI 方法, 使用相似度加权叠加的方法代替 SVI 中的权重叠加过程。相似度加权叠加最早用于提高动校正(NMO)叠加剖面的信噪比^[10], 所解决的问题描述为: 叠加的部分 NMO 道集信噪比很低, 或由于 NMO 速度不准造成反射波同相轴未被拉平, 即部分道集存在旅行时偏差, 造成等权叠



(a) 互相关和叠加得到检波点间的折射波; (b) 褶积和叠加得到炮检点间的折射波。实(虚)线表示该段射线路径具有正(负)的旅行时

图 1 SVI 加强折射波初至的原理
Fig. 1 Theory of SVI to enhance first-arrival refractions

加的地震剖面信噪比和分辨率都很低。本文面临的问题与之类似,因此借鉴相似度叠加的思路,选取参考道,通过求取所有褶积得到的超道集与参考道之间的相似度函数作为叠加时的权重函数:

$$W(B, A) = \begin{cases} \rho_{z_1 z_2}, & \rho_{z_1 z_2} > \varepsilon, \\ 0, & \rho_{z_1 z_2} < \varepsilon, \end{cases} \quad (3)$$

其中, z_1 和 z_2 分别表示褶积得到的地震道和参考道,为时间域的序列; $\rho_{z_1 z_2}$ 表示地震道 z_1 与 z_2 间的相关系数; ε 为相关系数阈值,用于规定 $\rho_{z_1 z_2}$ 小于 ε 时(相似度很低)将权重函数置为 0, ε 的选取应根据具体数据的信噪比情况而定,一般情况下, ε 可置为 0,即保留所有道集的贡献。选取的参考道应具有相对正确的初至波到时和较高信噪比,这样才能保证参考道与信噪比高的超虚道集之间相似度高于信噪比低的超虚道集,保证 SWSVI 方法可以提高叠加结果的信噪比。本文选取的参考道是利用等权叠加得到的道集,即通过式(2)得到的道集。进一步做带通滤波压制高低频残余噪声,只保留初至波信号,使相似度大小可以相对准确地反映初至波信号之间而非噪声之间的相似程度。利用式(3)的权重函数实现加权叠加的过程可以表示为

$$\hat{G}(B, X, \omega) = \frac{1}{\sum_A W(B, A)} \cdot \sum_A W(B, A) G(A, X, \omega) G(B, A, \omega)。 \quad (4)$$

式(4)降低了信噪比低的道集在叠加时的权重,因此可以减小局部道集的强噪声干扰对 SVI 结果的影响。本研究将通过合成数据和实际数据实例,验证 SWSVI 方法的有效性。

2 合成数据实例

合成数据的实例用于验证 SWSVI 方法的正确性。选取三层层状模型(图 2),通过声波有限差分正演得到合成数据。截取原始数据中远偏移距处包含初至波信号的部分,此处的初至波是折射波(图 3(a)),为了模拟局部道集存在强噪声干扰的情况,随机选取 60% 的道集加入强谐波噪声,谐波主频随机选取为 40, 50, 60, 70 和 80 Hz。这种情况为模拟陆地资料常出现的强工业电噪声干扰,含噪道集的平均信噪比为 -14 dB (图 3(b))。可以看到,受强噪声干扰的道集初至信噪比很低,使用经典的自动初

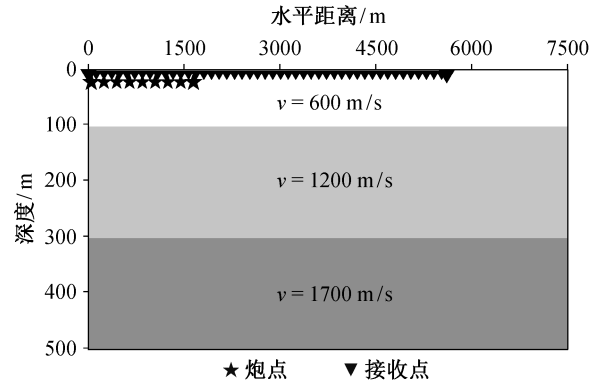
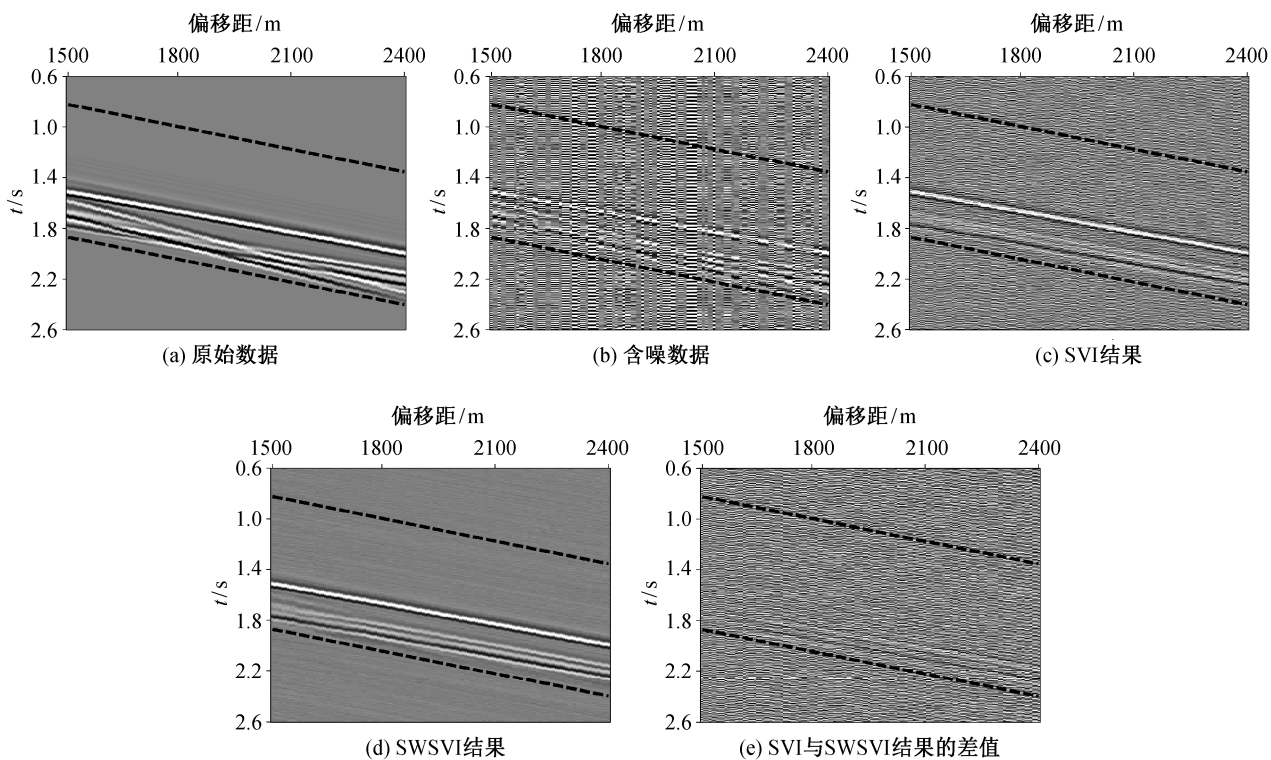


图 2 合成数据模型
Fig. 2 Synthetic model

至拾取算法 STA/LTA (short-term average/long-term average)算法^[11-12]拾取的初至位置几乎都在时窗的上边缘(图 4)。应用 SVI 方法压制了部分噪声,信噪比提高到 9 dB,在原始信噪比很低的道集中初至波已经可以分辨,但仍有较强残余噪声,且原本不包含噪声的道集也受到污染(图 3(c))。使用 SWSVI 方法的结果更好地压制了残余噪声(图 3(d)),初至波信噪比更高,在该结果上仍使用 STA/LTA 算法自动拾取到正确的初至位置(图 4)。图 5 给出通过相似度确定的权重函数与原始道集信噪比的对应关系,可以看到低信噪比含噪道集对应小的权重函数,即在叠加中的贡献相对小,与理论分析一致。最后,图 3(e)给出 SVI 方法与 SWSVI 方法结果之间的差值,可以看到 SWSVI 方法压制掉的成分基本上都为噪声,仅包含很少的有效波信号,而这部分有效波信号也可能是由褶积得到的超虚道集包含有效波信号存在相位误差导致的。

SWSVI 方法要求参考道具有相对高的信噪比,避免因噪声之间相似度过高造成低信噪比的褶积结果具有更高的权重,导致方法失效。仍使用图 3 的含噪数据中加入的局部噪声,选取不同噪声幅值得到 22 组不同初始信噪比的含噪数据,应用 SVI 和 SWSVI 方法处理,结果见图 6。在初始信噪比高于 -17 dB 时, SWSVI 结果的信噪比高于 SVI 结果,说明此时的参考道可以保证与褶积结果之间的初至波信号具有更高的相似度。当初始信噪比低于 -17 dB 时, SWSVI 结果的信噪比反而低于 SVI,此时参考道包含的强噪声与低信噪比的褶积结果中的噪声相似度高,导致低信噪比褶积结果反而具有更大的权重,造成结果变差。以初始信噪比为 -11 dB 的数据为例(图 7),参考道虽包含一定噪声,但有效波仍占



虚线表示截取数据的时窗边界

图 3 SVI 和 SWSVI 的结果对比
Fig. 3 Result comparison of SVI and SWSVI

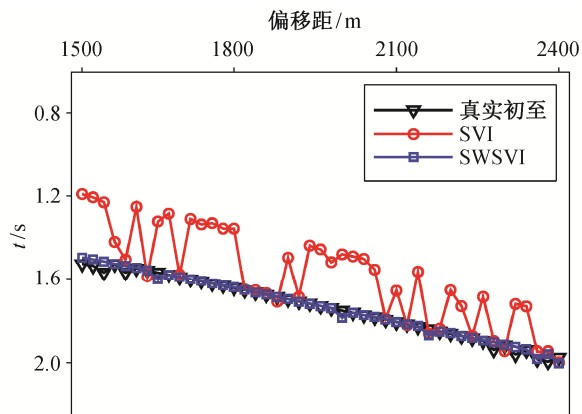


Fig. 4 Auto-picked first arrivals by STA/LTA method

主要能量，由相似度计算得到的权重函数与初始信噪比呈负相关的关系。再以初始信噪比为 -23 dB 的数据为例(图 8)，参考道中的有效信号几乎被噪声掩盖，权重函数与初始信噪比不再具有明确的关系，或可以近似看成具有负相关的关系，因此导致加权叠加的结果变差。必须指出，应用 SWSVI 方法时，需要对参考道进行质量控制，只有在参考道

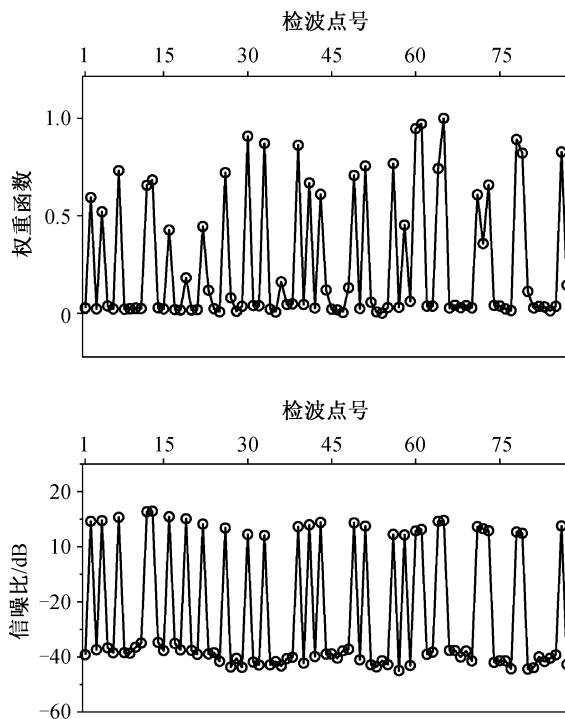


Fig. 5 Relationship between the weighted functions obtained by SWSVI and the SNR for the example in Fig. 3

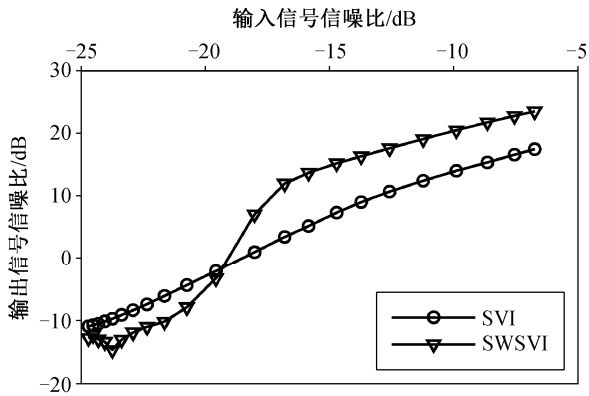


图 6 不同 SNR 含噪数据应用 SVI 和 SWSVI 处理的结果
Fig. 6 Results of SVI and SWSVI against noisy traces with different SNR

中的有效信号能量较强时,才能保证 SWSVI 方法的有效性。

3 实际数据实例

本文选取中国西部某工区实际陆地地震资料。该工区采集的地震数据中存在强背景噪声及局部道集的外源噪声干扰,初至拾取前需要采用预处理方法提高初至波信噪比。选取单炮的远偏移距道集,偏移距在 2680 m 附近的道集存在强外源噪声干扰(图 9(a)),分别应用 SVI 和 SWSVI 方法处理,都在一定程度上压制了噪声。相比之下,SWSVI 方法更好地压制了 SVI 结果中的残余噪声,参考道的

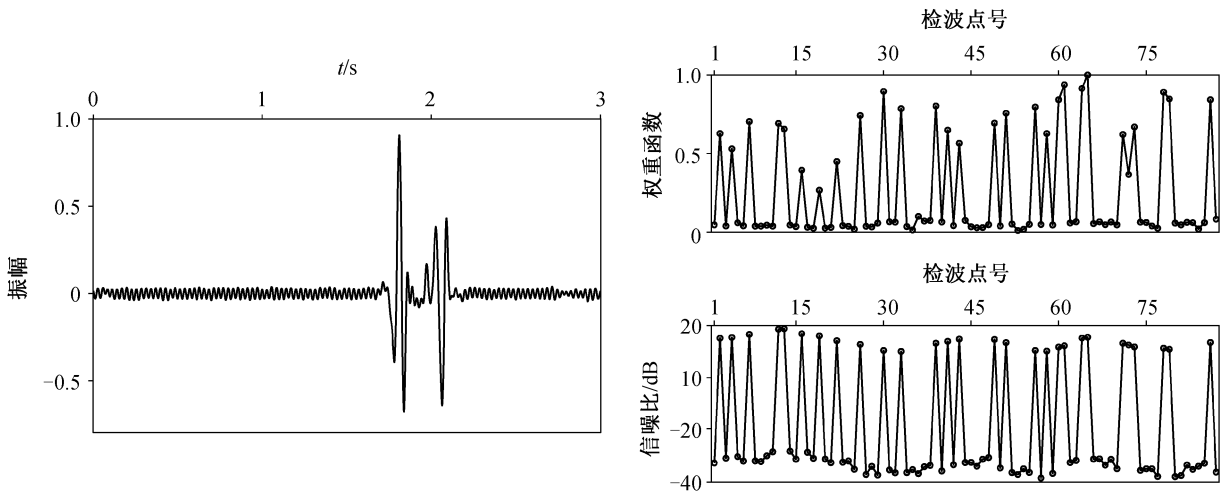


图 7 应用 SWSVI 方法处理 SNR 为 -11 dB 的原始含噪数据
Fig. 7 Application of SWSVI on noisy data with the SNR of -11 dB

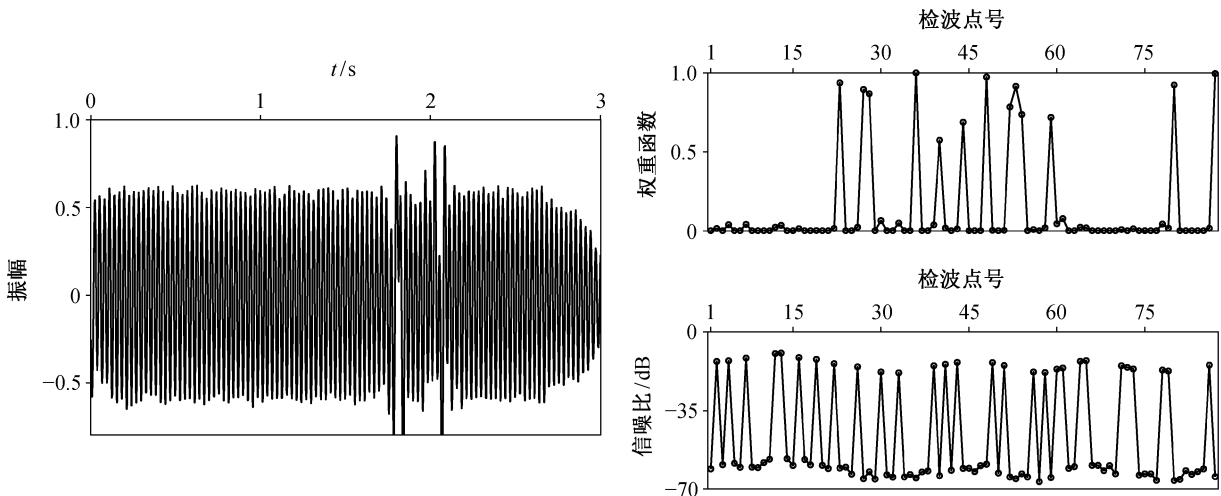
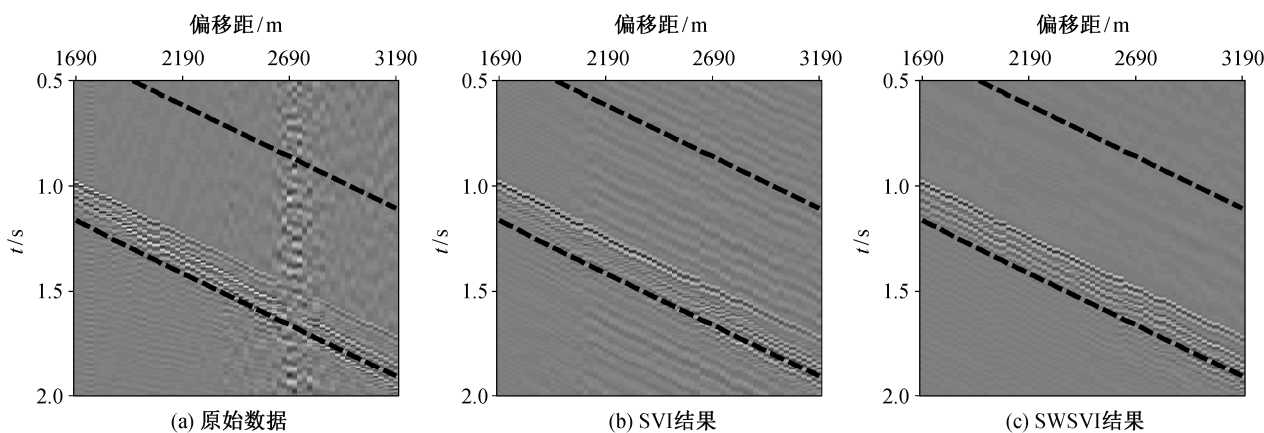


图 8 应用 SWSVI 方法处理 SNR 为 -23 dB 的原始含噪数据
Fig. 8 Application of SWSVI on noisy data with the SNR of -23 dB



虚线表示截取数据的时窗边界

图 9 实际数据处理结果

Fig. 9 Field data processing results

信噪比足够高, 因此保证 SWSVI 中的权重函数正确(图 10)。同样, 在原始数据的 SVI 结果和 SWSVI 结果上应用 STA/LTA 法拾取初至(图 11), SWSVI 结果可以自动拾取到正确的初至位置, 原始数据在存在外源噪声的道集上拾取的初至时间明显提前, 而 SVI 结果由于存在较多残余噪声, 使得拾取的初至出现不同程度的跳跃, 初至的不准确会影响后续层析静校正的效果。

4 结论和讨论

本文针对低信噪比陆地地震资料初至难以自动拾取的问题, 应用 SVI 方法提高初至波信噪比, 并

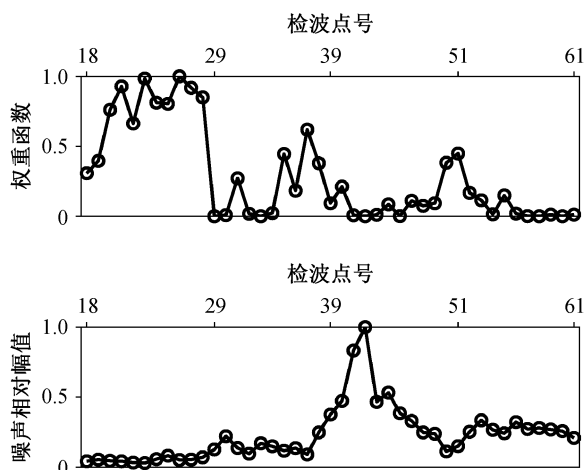


图 10 实际数据处理时 SWSVI 用到的权重函数与噪声水平的对应关系

Fig. 10 Relationship between the weighted functions obtained by SWSVI and the noise level

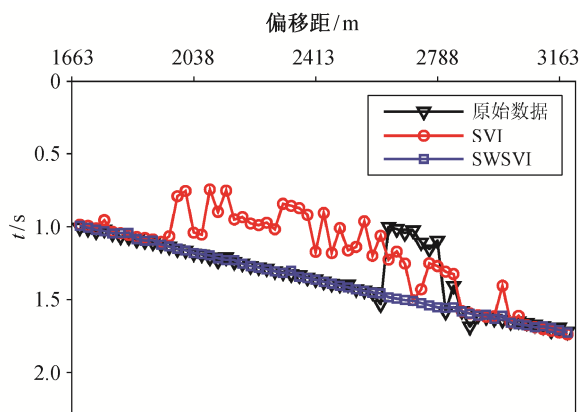


图 11 使用 STA/LTA 方法在原始数据, SVI 结果和 SWSVI 结果上拾取的初至

Fig. 11 First arrivals picked by the STA/LTA method on the raw data, the SVI result and the SWSVI result

提出 SWSVI 方法, 用相似度加权叠加代替等权重叠加, 提高了对局部道集存在的强噪声干扰的压制效果, 保证了初至拾取精度以及层析静校正的效果。合成数据实例验证了 SWSVI 方法的有效性, 但也显示参考道需要具有足够高的信噪比才能保证方法的有效性。实际数据处理的结果有效地压制了 SVI 方法的残余噪声。

需要指出, 应用 SWSVI 方法时需要仔细监控参考道质量, 保证参考道中有效信号的能量高于噪声能量, 否则计算得到的错误权重函数反而使重构道集的信噪比降低, 有时甚至可以只选取信噪比高的道集做叠加, 用于获得高信噪比参考道, 保证得到正确的权重函数。同时, SWSVI 方法也需要满足

SVI 方法的应用前提, 即初至波是由折射波和单点绕射波构成, 对纵向速度快速变化的连续薄层产生的浅水波初至, SVI 方法和本文方法都不能加强这类初至波信号。

参考文献

- [1] 樊满仓. 层析静校正黄土塬地区的应用. 石油地球物理勘探, 2008, 43(增刊 1): 36–38
- [2] Mallinson I, Bharadwaj P, Schuster G, et al. Enhanced refractor imaging by supervirtual interferometry. *The Leading Edge*, 2011, 30(5): 546–550
- [3] Alshuhail A, Aldawood A, Hanafy S. Application of super-virtual seismic refraction interferometry to enhance first arrivals: a case study from Saudi Arabia. *The Leading Edge*, 2012, 31(1): 34–39
- [4] Al-Hagan O, Hanafy S M, Schuster G T. Iterative supervirtual refraction interferometry. *Geophysics*, 2014, 79(3): Q21–Q30
- [5] An Shengpei, Hu Tianyue, Cui Yongfu, et al. Auto-pick first breaks with complex raypaths for undulate surface conditions. *Applied Geophysics*, 2015, 12(1): 92–99
- [6] 安圣培, 梁向豪, 彭更新, 等. 低信噪比地震数据折射初至的判定与识别. *石油地球物理勘探*, 2015, 50(3): 451–459
- [7] An Shengpei, Hu Tianyue, Liu Yimou, et al. Automatic first-arrival picking based on extended supervirtual interferometry with quality control procedure. *Exploration Geophysics*, 2015, doi: 10.1071/EG14120
- [8] Lu K, Altheyab A, Schuster G T. 3D Super-virtual refraction interferometry // 84th SEG Annual Meeting, Expanded Abstract. Denver, 2014: 4203–4207
- [9] An Shengpei, Hu Tianyue, Peng Gengxin. Three-dimensional cumulant-based coherent integration method to enhance first-break seismic signals. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(4): doi: 10.1109/TGRS.2016.2636336
- [10] Liu G, Fomel S, Jin L, et al. Stacking seismic data using local correlation. *Geophysics*, 2009, 74(3): V43–V48
- [11] 高淑芳, 李山有, 武东坡, 等. 一种改进的 STA/LTA 震相自动识别方法. *世界地震工程*, 2008, 24(2): 37–41
- [12] 刘晗, 张建中. 微震信号自动检测的 STA/LTA 算法及其改进分析. *地球物理学进展*, 2014, 29(4): 1708–1714