

基于 SVI 方法的折射波信噪比 改善效果研究

邵宇蓝¹, 李唐律¹, 廖 仪¹, 童思友^{1*}, 吴志强²

(1 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100;

2 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘要: 折射波在地震勘探中有非常重要的作用, 但由于近地表噪声等因素影响, 折射波在地震记录上往往能量较弱, 信噪比较低。因此, Bharadwaj、Mallinson 等提出了超虚拟折射干涉法(Supervirtual refraction interferometry-SVI), 用于提高折射波的信噪比。在此基础上, 结合正演模拟数据和实际资料, 对该方法的抗噪性以及相关叠加道数、褶积叠加道数等因素对处理效果的影响进行了研究, 结果表明, 对于信噪比 >0.2 的资料, 在满足一定相关叠加道数和褶积叠加道数时, 使用本方法后能使信噪比得到显著增强。

关键词: 超虚拟折射干涉法; 初至折射波; 信噪比; 互易方程

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A

目前, 对于折射波的利用方法很多, 但由于受激发条件以及传播介质等因素影响, 通常不能得到高信噪比的初至折射波记录, 使得折射波的利用受到巨大限制^[1]。1981年, Palmer 提出了广义互换法(GRM)^[2]; 2005年, Palmer 和 Jones 利用改进的 GRM 方法估算了风化层深度变化较大时的折射静校正量^[3,4], 一般利用多炮数据, 把 2 个接收点的波场记录互相关后求和, 可产生 2 个接收点间的格林函数估计值, 通常把这种方法称为地震干涉法^[5]; 2006年, Dong 等发展了一种有效提高初至折射波信噪比的折射波干涉法^[6]; 随后, Bharadwaj 和 Schuser 以及 Mallinson 都提出了一种改进的折射波干涉法, 称为超虚拟折射干

涉法(Supervirtual refraction interferometry-SVI)^[7], 它是一种在形成虚拟折射道的基础上, 继续将虚拟折射道与原始记录进行褶积和叠加, 从而进一步提高折射波记录信噪比的过程。

前人就该方法拾取初至折射波旅行时的准确性进行了研究^[8], 在前人的基础上, 研究了该方法的抗噪性, 对相关叠加道数、褶积叠加道数对信噪比的影响进行了模拟试验。

1 基本理论与方法

SVI 的理论基础是基于格林函数的相关型互易方程和褶积型互易方程, 该方法可以看成是这 2 个方程的联合应用。

1.1 相关型互易方程

如图 1, 假设 x 是激发点, A、B 是接收点。根据空间定义的 Helmholtz 方程:

$$\begin{aligned}(\nabla^2 + k^2)G(A|x) &= -\delta(A-x) \\ (\nabla^2 + k^2)G^*(B|x) &= -\delta(B-x) \quad (1)\end{aligned}$$

结合高斯定理, 由(1)式可推出相关型互易

收稿日期: 2014-02-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41230318, 41210005); 国土资源部地质调查专项(GZH200800503, GZH201200509)

作者简介: 邵宇蓝(1987—), 男, 在读硕士, 主要从事地震资料处理方法研究工作。E-mail: sean_880618@hotmail.com

* 通讯作者: 童思友(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋地球物理方法研究工作。E-mail: tsy@ouc.edu.cn

方程^[9]:

$$2i\text{Im}[G(B|A)] = \int_S [G^*(B|x) \frac{\partial G(A|x)}{\partial n} - G(A|x) \frac{\partial G^*(B|x)}{\partial n}] d^2x \quad (2)$$

式中: $2i\text{Im}[G(B|A)] = G(B|A) - G^*(A|B)$, $G(*|x)$ 表示在 x 点激发、 $*$ 点接收的地震记录的格林函数形式; S 为整个积分曲面。

为避免记录孔径限制和离散采样所产生的假象对处理结果的影响,对初至折射波进行加窗处理,使参与互相关运算的只有折射波。此种情况下,可用初至折射波 $g(B|A)$ 取代 (2) 式的 $G(B|A)$,用下式表示远场估计值:

$$\text{Im}[g(B|A)] \approx k \int_S g^*(A|x)g(B|x) d^2x \quad (3)$$

式中: k 为平均波数;

$g(B|A) = G(B|A)^{\text{head}}$ 为一个具体界面初至折射波的格林函数。

为满足函数因果性,要求格林函数的实部与其虚部的希尔伯特变换有关。上面这种估计近似相当于重建了一个新基准面,可以理解为 $g^*(A|x)$ 只包括直达波,而 $g(B|x)$ 只包括折射波。

如图 1,在超临界偏移距且同一折射界面的情况下,相对于激发点 x 的相关道 $F^{-1}[g^*(A|x)g(B|x)]$ 与另一激发点 x' 的相关道 $F^{-1}[g^*(A|x')g(B|x')]$ 有着相同的几何路径关系。(式中: F^{-1} 为傅里叶逆变换;上标 head 为初至折射波;virt 为虚拟折射道;super 为超虚拟折射道。)同理,将所有对应着不同激发点、相同接收点位置的两道记录互相关后,就得到了一个共接收对道集 (Common Receiver Pair Gather-CPG)。这样,类似于面波干涉法^[10],把这些共接收对道叠加起来,即形成一个改善了信噪比的虚拟折射道。在超临界偏移距范围选择不同距离的接收对,即可形成虚拟折射道集。理论上信噪比可以提高 \sqrt{N} 倍, N 是参与虚拟折射道计算的激发点个数。

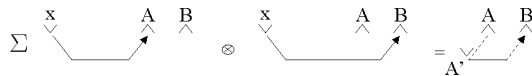


图 1 互相关产生虚拟折射道

Fig. 1 The virtual refraction trace obtained by stacking the correlated traces

1.2 褶积型互易方程

如图 2,类似于推导相关型互易方程,可以得到褶积型互易方程:

$$G(B|A) = \int_S [G_0(B|x) \frac{\partial G(A|x)}{\partial n} - G(A|x) \frac{\partial G_0(B|x)}{\partial n}] d^2x \quad (4)$$

同理,用 $g(B|A)^{\text{super}}$ 代替 $G(B|A)$,用远场估计值表示上式,得

$$g(B|A)^{\text{super}} \approx 2ik \int_S g(B|x)^{\text{virt}} g(A|x) d^2x \quad (5)$$

那么, $F^{-1}[g(B|A)^{\text{super}}]$ 即是超虚拟折射道,它是通过原始数据 $F^{-1}[g(A|x)]$ 与虚拟折射道集中每一道 $F^{-1}[g(B|x)^{\text{virt}}]$ 褶积后叠加得到的。超虚拟折射道与只经过相关叠加处理的数据相比,理论上信噪比又可以提高 \sqrt{N} 倍,这里 N 是参与超虚拟折射道计算的接收点个数。因此,通过先后使用相关叠加与褶积叠加运算,数据信噪比理论上可以提高 N 倍。



图 2 褶积产生超虚拟折射道

Fig. 2 The supervirtual refraction trace obtained by stacking the convolved traces

2 模拟试验

下面用水平单层介质速度模型验证 SVI 方法对于折射波信噪比的改善作用。观测系统采用单边放炮,偏移距 15 m,道间距 15 m,共 330 道,水平层厚 300 m,设界面上层速度 1 500 m/s,下层速度为 2 200 m/s。为满足虚拟折射道的相关最大叠加道数,共放 339 炮,炮间距 15 m。用主频 30 Hz 的最小相位雷克子波做声波方程有限差分模拟,得到含表面多次波的地震记录(图 3)。

对于没有噪声的记录,SVI 方法可以取得理想效果。为了研究该方法的抗噪性,我们在数据中加入不同程度的白噪声,观察处理前后数据信噪

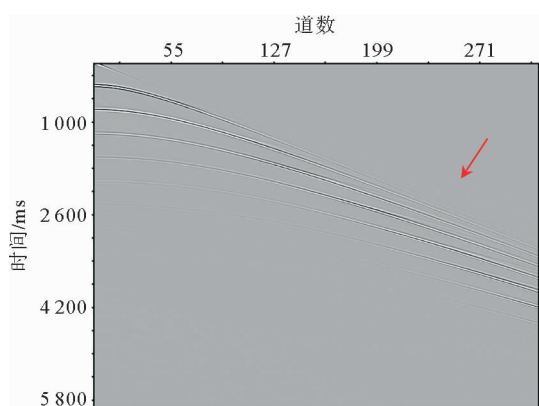


图 3 模拟地震记录

Fig. 3 Synthetic shot gather

比的变化情况。图 4 列出了图 3 箭头所示位置的局部放大图(初至折射波), 给出了不同噪声程度下的信噪比。可看出, 当信噪比低于 0.21 后, 初至折射波在记录上已完全不可分辨。

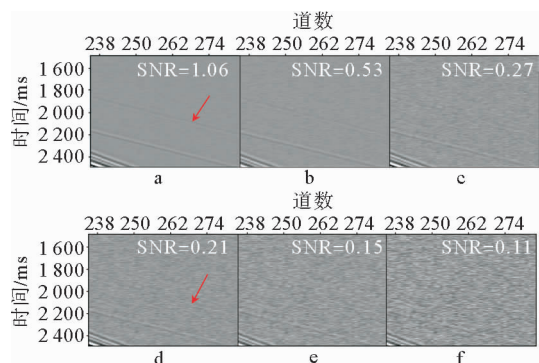
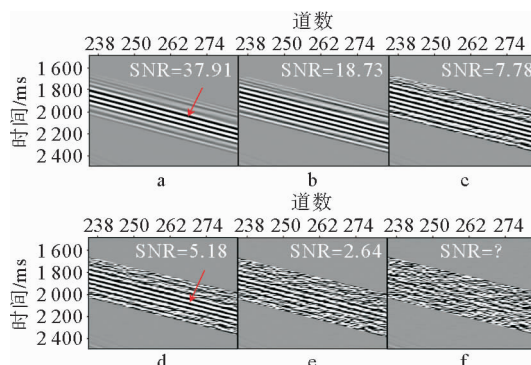


图 3 的记录添加不同程度高斯白噪声后的局部放大, 右上角是当前信噪比

图 4 不同信噪比的模拟记录

Fig. 4 Synthetic shot gather with different white noise level. SNR is showed on the upper right corner

图 4 各记录经过 SVI 处理后的结果见图 5。当原始记录信噪比 < 0.21 后, 处理效果变得不理想, 甚至到后来无法观察到有效信号及计算信噪比。这是因为当噪声能量太大时, 即使通过 SVI 处理有效波能量得到提升, 但有效波(初至折射波)的能量仍远小于提升后的噪声能量, 在时窗内噪声能量完全占据了主动, 因此无法观察到有效波。



各记录处理后的结果, 右上角是当前信噪比

图 5 经 SVI 处理后的记录

Fig. 5 Synthetic shot gather with an improved SNR which is showed on the upper right corner

比较图 5a、f 的情况, 下面分别列出了其原始记录接收点间距 150 m 的共接收对道集(Common receiver pair gather——CPG), 见图 6。从共接收对道集中也可以看出, 当噪声能量过大, 即使互相关后, 初至折射波同相轴也无法从记录上分辨, 那么叠加过后折射波也得不到加强。根据该方法对于随机噪声的适应性得到如图 7 的关系曲线。由曲线可知, 当原始资料信噪比 > 3 时, 提高的倍数开始减小; 当原始数据信噪比 < 0.5 时, 处理后的信噪比提高倍数急剧下降。当原始记录信

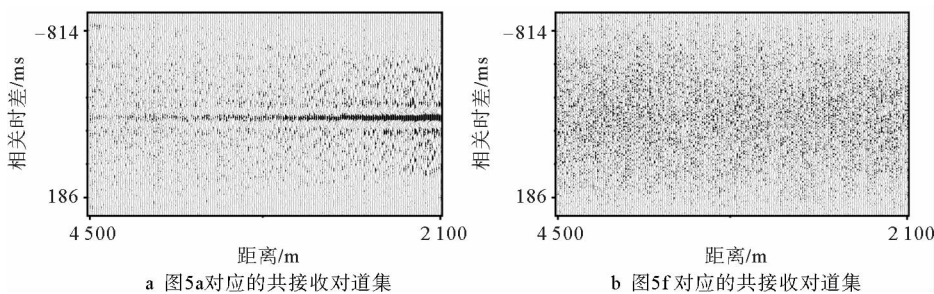


图 6 共接收对道集, 接收对间距 150 m

Fig. 6 CPG where the receivers are separated by 150 m

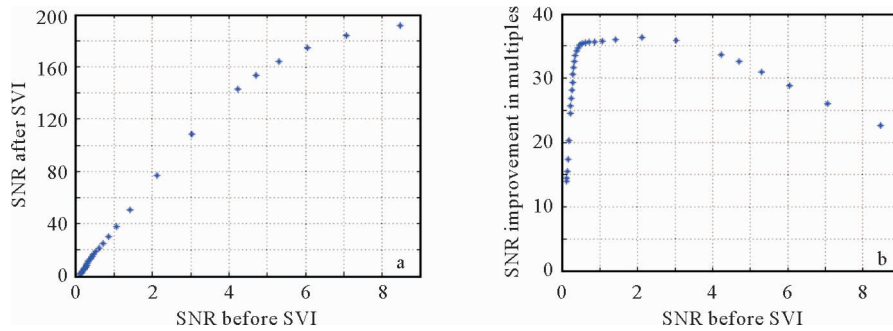


图 7 a 处理前后的信噪比关系;
b 处理后信噪比提高的倍数与处理前的信噪比关系

Fig. 7 a. SNR before and after SVI processing; b. SNR before SVI processing and multiple of SNR improvement

噪比 < 0.2 时,处理后的记录上同相轴不连续,甚至根本不能识别出同相轴。

上述结果是在相关最大叠加道数和褶积最大叠加道数均等于参与处理的总道数的条件下得到的,但实际资料中往往炮点较少,或者接收点较少。从理论上分析,减少激发炮数后,形成的所有共接受对道集的道数都将减少,即用来形成虚拟折射道的叠加道减少了。因本文并不讨论观测系统的设计问题,故直接人为地控制了相关最大叠加道数,来研究相关叠加道数对处理后信噪比的影响(图 8)。虽然随着相关叠加道数的减少,SVI 方法处理后有效波(折射波)的振幅均方根值也会按比例减小,但因为有效波能量与噪音的能量都在成比例的减小,所以信噪比并没有马上减小,而是维持在大约 56 左右。当相关叠加道数从 80 减小到 50 时,信噪比甚至还略有上升,这是由于较远偏移距的信噪比更低、总能量更小的道没有

参与到计算的结果。对于相关叠加道数从 30 继续减小,信噪比也随之急剧减小的现象,这里反映出了相关道叠加对于随机噪声压制存在着一个阈值,本文针对模型试验后,将其定为 30 道(图 8b 红线),当相关叠加道低于 30 道,将不能取得最大的信噪比改善效果。

同样,通过减少参与计算的虚拟折射道个数,来近似模拟减少每炮参与计算的道数对处理后信噪比的影响(图 9),可以得到关于本文的模型,取得最大信噪比改善效果的褶积叠加道数门阈值是 40 道(图 9b 红线)。

结合图 8 和图 9 可以看到,即使是相关叠加道或褶积叠加道只有 1 道,处理后的信噪比也达到了 11 左右,故无论能否使信噪比的改善效果最大化,SVI 处理都值得尝试。下面是该方法在 OBS 数据上的应用。

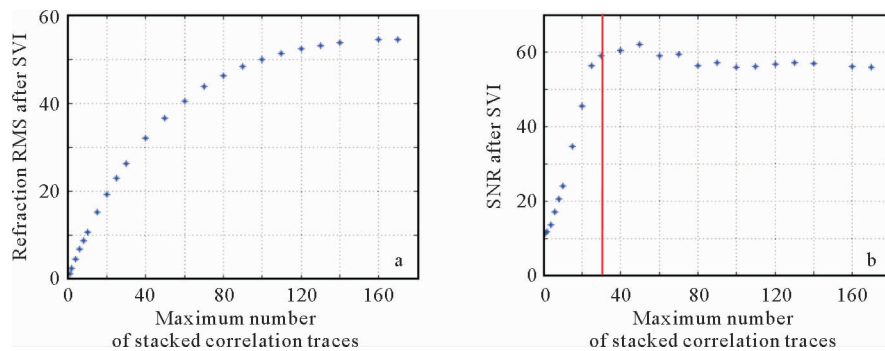


图 8 a 处理后有效波均方根振幅与最大相关叠加道数的关系曲线;
b 处理后的信噪比与最大相关叠加道数的关系曲线

Fig. 8 Maximum number of stacked correlation traces in processing(a, refraction RMS amplitude after SVI; b. SNR after SVI)

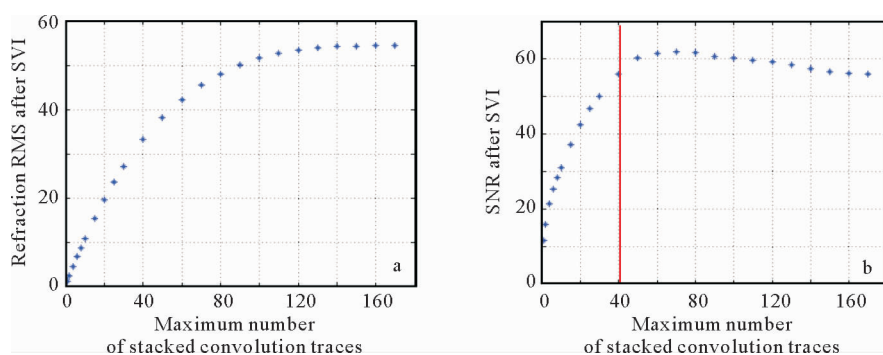


图9 a 处理后有效波均方根振幅与最大褶积叠加道数的关系曲线;
b 处理后的信噪比与最大褶积叠加道数的关系曲线

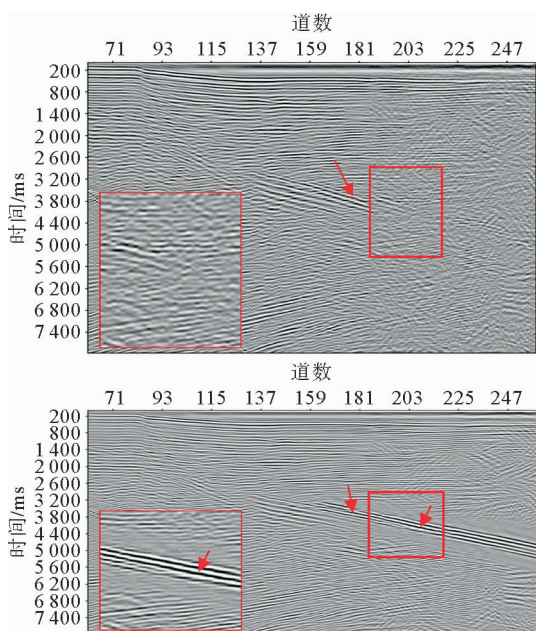
Fig. 9 Maximum number of stacked convolution traces in processing(a. refraction RMS amplitude after SVI; b. SNR after SVI)

3 实际资料验证

本文所用的实际资料是一个信噪比相对较低的 OBS 数据,红色矩形框内折射波完全不可见。因此,在处理时选择了一个大时窗,粗略的估计一下范围,将需要处理的折射波包括在内,然后进行 SVI 处理,结果见图 10b。这里需要注意的是,因为经过 SVI 处理后,折射波旁瓣的能量也得到很

大的提升,加上选取了较大的时窗,所以处理后时窗内呈现出多个强能量同相轴,而真正的折射波主峰是红色矩形框内箭头所示的同相轴。

对于图 10a 这样的低信噪比数据,本文采用理论模型试算时的方法,分别限制了其相关最大叠加道数为 5 道和褶积最大叠加道数为 5 道来验证较少叠加道数时对处理效果的影响。处理结果见图 11 和图 12,从 2 张图的红圈部分可以看到,同相轴连续性明显变差,而且低褶积叠加道数对处理效果的影响更大。因此,在处理时保证一定的相关叠加道数和褶积叠加道数是有必要的,具体需要多少道叠加,则需根据实际资料的试验情况而定。



红色箭头指示所要处理和追踪的折射波,左下角是局部放大

图 10 OBS 数据(a 原始数据;b SVI 处理后数据)

Fig. 10 An OBS gather(a. before SVI processing;
b. after SVI processing)

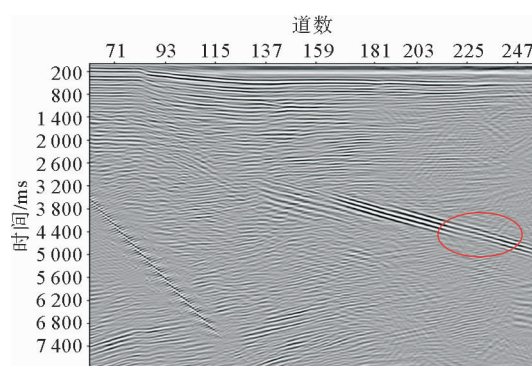


图 11 OBS 数据,相关最大叠加道数为 5 道的处理结果

Fig. 11 An OBS gather after SVI, the maximum number of stacked correlation traces is 5

4 结论

本文通过用模拟数据和实际数据对影响 SVI

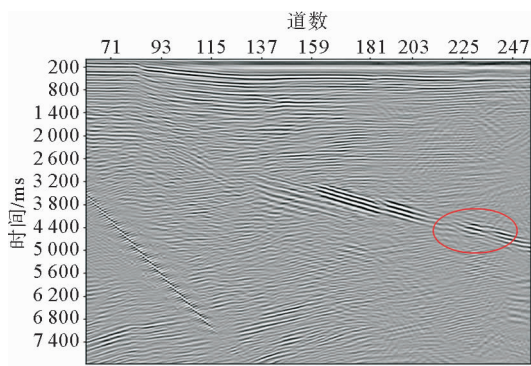


图 12 OBS 数据,褶积最大叠加道数为 5 道的处理结果

Fig. 12 An OBS gather after SVI, the maximum number of stacked convolution traces is 5

方法应用的几个重要参数进行试验,得到如下主要结论:

(1) 该方法要求原始记录的信噪比至少 > 0.2 , 否则, SVI 处理后折射波同相轴仍然无法识别。

(2) 要得到最佳信噪比改善效果,需结合实际资料试验出最大相关叠加道数和最大褶积叠加道数。其中褶积叠加道数的不足对于信噪比的影响更大,使同相轴的不连续性更加明显。

(3) 当其他类型地震波同相轴与折射波交叉干涉较严重时,可以先选择较大时窗,在折射波能够被粗略识别的情况下,再选择小时窗,重新处理。

虽然, SVI 方法理论上通过先后使用相关叠加与褶积叠加运算,记录的信噪比可以提高 N 倍,但是由于记录孔径、激发点和接收点的离散采样、几何扩散以及远场的近似表达等因素的影响,使得实际处理后的数据信噪比达不到理论值,而且,经 SVI 处理后,会增加子波旁瓣数量,旁瓣能量也会得到很大提升,使得处理时窗内呈现出多

条平行的强能量同相轴。这些都是 SVI 方法需要进一步研究和改进的地方。

致谢:青岛海洋地质研究所为本文的研究提供了数据和专业指导,在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] Mallinson I, Bharadwaj P, Schuster G, et al. Enhanced refractor imaging by supervirtual interferometry [J]. The Leading Edge, 2011, 30(5): 546-550.
- [2] Palmer D. An introduction to the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation [J]. Geophysics, 1981, 46(11): 1 508-1 518.
- [3] Bharadwaj P, Schuster G, Mallinson I, et al. Theory of supervirtual refraction interferometry [J]. Geophysical Journal International, 2012, 188(1): 263-273.
- [4] Palmer D, Jones L. A simple approach to refraction statics with the generalized reciprocal method and the refraction convolution section [J]. Exploration Geophysics, 2005, 36 (1): 18-25.
- [5] Nichols J, Mikesell D, Van Wijk K. Application of the virtual refraction to near-surface characterization at the Boise Hydrogeophysical Research Site [J]. Geophysical Prospecting, 2010, 58(6): 1 011-1 022.
- [6] Dong S, Sheng J, Schuster J T. Theory and practice of refraction interferometry [C] // Proceedings of the 76th Annual International Meeting Expanded Abstracts, 2006: 3 021-3 025.
- [7] Bharadwaj P, Schuster G T, Mallinson I. Super-virtual refraction interferometry: Theory [C] // SEG Expanded Abstracts, 2011, 30: 3 809-3 813.
- [8] Hanafy S, AlHagan O, Al-Tawash F. Super-virtual refraction interferometry: Field data example over a colluvial wedge [C] // SEG Expanded Abstracts, 2011: 3 814-3 818.
- [9] 朱 恒. 地震干涉技术被动源成像方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [10] Xue Y. Least-squares datuming and surface waves prediction with interferometry [D]. Salt Lake City: University of Utah, 2009.

(下转第 69 页)

