

全波形反演提高地震波频率

马学军¹ 王超¹ 刘志勇²

1. 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司 乌鲁木齐 841600

2. 北京中环宏泰能源科技有限公司 北京 100029

摘要: 全波形反演(FWI)通过波动方程二维或者三维在一个速度场正演得到一个炮集,用这个炮集的波形和地震采集的炮集波形进行对比,根据其误差修正速度场,经过多次迭代,不断修正波场,使正演炮集的波形和地震采集到的炮集的误差降到最小,从而得到一个比较精确的速度场。FWI可以同时求取速度的低频分量,使偏移成像精确,还可以求取速度的高频分量,反映地层的层速度,为地震解释提供帮助^{[1][4]}。

本文的高精度全波形反演和上述常规的FWI有所不同,它的主要目的不是求取偏移成像用的速度场,而是求取每个地震道传播路径的速度场,采用单道正演和单道FWI,得到单道速度场,用该单道速度场正演,可以得到和输入地震道高度相似的结果。为下一步模拟放炮提频提供波场参数。由于这个速度场是沿着地震道传播路径的速度场,不能用于偏移,只能用于提高频率。采用的一维正演可大大降低的正演的计算量,使得多频率正演和逐次逼近的FWI算法可以实施。

由于地震波频率成分复杂(比如浅层频率高,深层频率低),频带宽(低频粗轴和高频细轴混在一起),并且有噪音,用单一的正源瑞克子波正演出的结果和实际采集的资料相比有比较大的误差,特别是陆地采集的资料。如何求出一个地震道速度场,使其正演的结果和野外采集的地震道高度吻合,为下一步用模拟放炮提频提供参数,是本文研究的主要内容。

本文采用了两种新方法解决如何减少采集数据(Uobs)和FWI正演数据(Ucal)的误差,取得高精度的速度场。第一种方法是针对地震采集数据频率成分复杂,浅层频率高,深层低,有面波,折射波,噪音等,第二种方法是针对野外采集数据频带宽,在同一时间段,低频粗轴和高频细轴混在一起,而同一时间段的瑞克子波正演,只能取一个主频,兼顾了粗轴,兼顾不了细轴。

解决第一个问题的方法采用了多频率震源子波正演扫描,比如说瑞克子波的频率从10Hz到50Hz,间隔5Hz,用做出的这一系列正演和输入的地震道在一个给定的时窗内相关,选取相关系数最大正演数据组合一个正演数据体(Ucal)用来下一步修正速度场。

解决第二个问题的办法是采用逐次逼近的方法,把第一次FWI产生的正演结果和输入的地震数据(Uobs)相减,得到一个误差数据体。把这个误差数据体做为输入数据(Uobs)再做第二轮FWI,得到第二轮FWI的结果,以此类推,直到误差很小为止,最后把各轮的正演结果加到一起,就得到了一个和输入的地震道高度相似数据和下步的提频要用到的每次逼近的频率分布数据体和速度场数据体。

通过以上方法得到了每次逼近产生的三个数据体,正演数据体,频率数据体和速度体,可利用这三个数据体来提高地震数据的频率。其做法是用FWI求出的速度场,在原来的频率分布的基础上乘一个系数,比如1.6,按照新的频率分布做正演合成新的地震数据,相当于提高震源频率重新放模拟炮,从而得到提高地震采集频率的数据。

用实际数据测试表明,该方法算法稳定,明显提高了野外采集的地震数据的频率。具有实用价值。

关键词: 全波形反演;地震波频率

Full waveform inversion to increase seismic data frequency

Abstracts: The seismic full waveform inversion(FWI) is a method that uses the amplitude difference between acquisition field data and forward modeling data, to modify the velocity, to get a final velocity model that minimize the error. This velocity model can both use to migration and to get lithology information. This paper describes a different usage of FWI, use FWI to

increases seismic data frequency. The new method is to use FWI get to velocity model along the energy trace, that is 1D FWI, and do model again use high source frequency to get a high frequency trace. The big challenge is how to get an accurate velocity model that can get model trace very close to input trace, because the frequency of a trace is changing, shallow high, deep low, and mix of high frequency and low frequency event. This paper use two method to solve this problem, one is use multiple frequency source to do forward modeling, and combine one corrodng to cross correlation, another method is to use successive approximation, the input of first loop is filed acquisition data, the input data of next loop is the acquisition data minus the modeling data of first loop, and so on.

The real seismic data test shows that this method can increase the seismic data frequency a lot, and not decrease the data noise to signal ratio, better than other increate frequency method. And the test result shows that this method is very useful in seismic data processing.

引言:

地震勘探是通过人工激发, 观测和分析在地层中传播的地震波, 查明地下地层的形态和性质, 地震波频率对地震勘探的分辨率密切相关, 随着石油勘探的不断发展, 勘探重点已经由构造勘探向着岩性储层勘探发展, 为了分辨薄地层和砂体, 对地震采集的频率要求提高, 但由于受到采集条件和成本的限制, 用野外采集提高频率很有限。

随着计算机的高速发展, GPU大规模并行计算的应用^[3], 全波性反演(FWI)方法的成熟, 使的使用FWI提高地震波频率的方法可行。图1是用不同瑞克子波主频做个正演, 说明子波主频和地震剖面分辨率的关系。

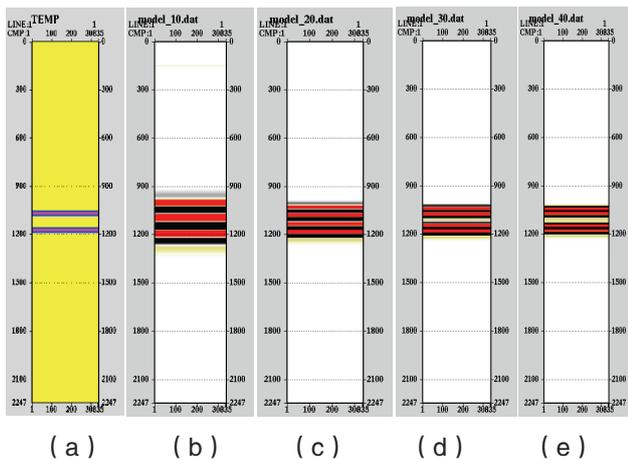


图1

(a) 是相隔20米的厚度5米的两个地层, 用不同频率的雷克子波做正演, 频率分别是 (b) 为10Hz, (c)

作者简介:

马学军: 1967年5月出生, 男, 工程硕士, 高级工程师, 目前主要从事石油勘探关键技术研究。

王超: 1988年出生, 男, 本科学历, 工程师, 主要从事物探技术方法研究和地震资料处理工作。

为20Hz, (d) 为30Hz, (e) 为40Hz, 可以看出, 子波(野外采集)的频率越高, 剖面的分辨率越高, 但受到采集条件限制, 采集频率有限, 可以通过FWI求取地层反射界面, 用高频子波重新正演(重新模拟采集), 来提高剖面频率。

1 正演的计算方法

全波形反演的95%的计算量都在波动方程正演, 如何提高正演的效率的精度尤为重要。

本文采用的是一维高阶交错网格有限差分加上PML边界吸收的算法^[5]。

具体算法如下:

选用两个波场函数 $u(z)$, $v(z)$, z 的范围是深度域的样点数。

$$v(z) = v(z) + dt/dz * (u1*c1 + u2*c2 + u3*c3 + c4*u4)$$

$$\text{其中 } u1 = u(z-0) - u(z+1), u1 = u(z-1) - u(z+2),$$

$$u1 = u(z-2) - u(z+3), u1 = u(z-3) - u(z+4)$$

$$c1 = 1.23166e0, c2 = -1.041182e-1, c3 = 2.063707e-2, c4 = -3.570998e-3 \text{ 是常数}$$

当 $v(z)$ 按照 z 的深度范围算完后, 再计算 u 波场

$$u(z) = u(z) + dt*vel * (v1*c1 + v2*c2 + v3*c3 + v4*c4)$$

$$\text{其中 } v1 = v(z-1) - v(z+0), v2 = v(z-2) - v(z+1),$$

$$v3 = v(z-3) - v(z+2), v4 = v(z-4) - v(z+3)$$

vel 是速度, dt 是波场延拓的时间步长

按照时间步长循环, 同时在地表采集来自地下的反射, 得到正演剖面。

PML的算法是由于 $u(z)$ 和 $v(z)$ 是一维函数, 只要对 $u(z)$ 和 $v(z)$ 变量的两段进行能量率减, 就可以很好的防止波形反弹。

2 FWI 求取速度模型算法

用FWI求取速度场的方法是先初始速度场正演, 用正演的结果和输入的地震波相减, 用这个相减的误差再乘一个比例因子来修正速度, 再做第二轮正演, 再相

减，乘比例因子，再修正速度，反复迭代，使前一次迭代和后一次迭代的误差变化不大为止。

```

do i=1, trace_num
do j=1, sample_num
    vel_model ( I, j ) = vel_model ( I, j ) * ( Uobs ( I,
j ) - Ucal ( I, j ) ) * scale_a
enddo
enddo
    
```

enddo
enddo

Uobs是采集的波场，Ucal是计算的正演波场，scale_a是比例因子。比例因子scale_a的计算方法是采用拟牛顿的L-BSGF方法^[2]，可以提高收敛的速度。

L-BSGF是Brossier等（2009）采用一种拟牛顿优化算法，其核心是利用目标函数及其梯度来构建近似Hessian阵，避免了近似拟Hessian的计算。L-BSGF算法大大节约内存，减少计算量，并且加快收敛速度。

模型测试见图2。

(g)是一个速度模型，有两个地层相隔20米，厚度5米的两个地层，(a)是用这个正演模型用25Hz的瑞克子波的正演结果。(h)将地层速度改成背景速度后，第5轮FWI反演出的速度，(b)第5轮的正演结果。(i)第10轮FWI反演出的速度，(c)第10轮的正演结果。(j)第20轮FWI反演出的速度，(d)第20轮的正演结果。(k)第30轮FWI反演出的速度，(e)第30轮的正演结果。(l)第40轮FWI反演出的速度，(f)第40轮的正演结果。

从模型测试可以看出，用FWI的方法的可以用采集的数据（Uobs），和正演求得Ucal，通过多次迭代修正速度模型，从而求得一个很接近真实速度模型的速度。

用一段偏移后的叠加剖面做一维，零偏移距FWI见图3。

(f)是输入的初始速度模型，由常规深度域建模方法取得，是速度场的低频分量，(a)是在初始速度的基础上，第一轮FWI迭代的正演计算结果。(g)第10次迭代的速度场，(b)用第10次迭代速度的正演剖面。(g)第20次迭代的速度场，(b)用第20次迭代速度的正演剖面。(g)第30次迭代的速度场，(b)用第30次迭代速度的正演剖面。(g)第40次迭代的速度场，(b)用第40次迭代速度的正演剖面。

从图3可以看出，用零偏移距叠后剖面做FWI，可以修改速度的高频分量，使其正演的剖面 and 输入的剖面接近。想要进一步提高正演剖面的输入数据的吻合程度，还需要多频率正演合成和逐次逼近的方法。

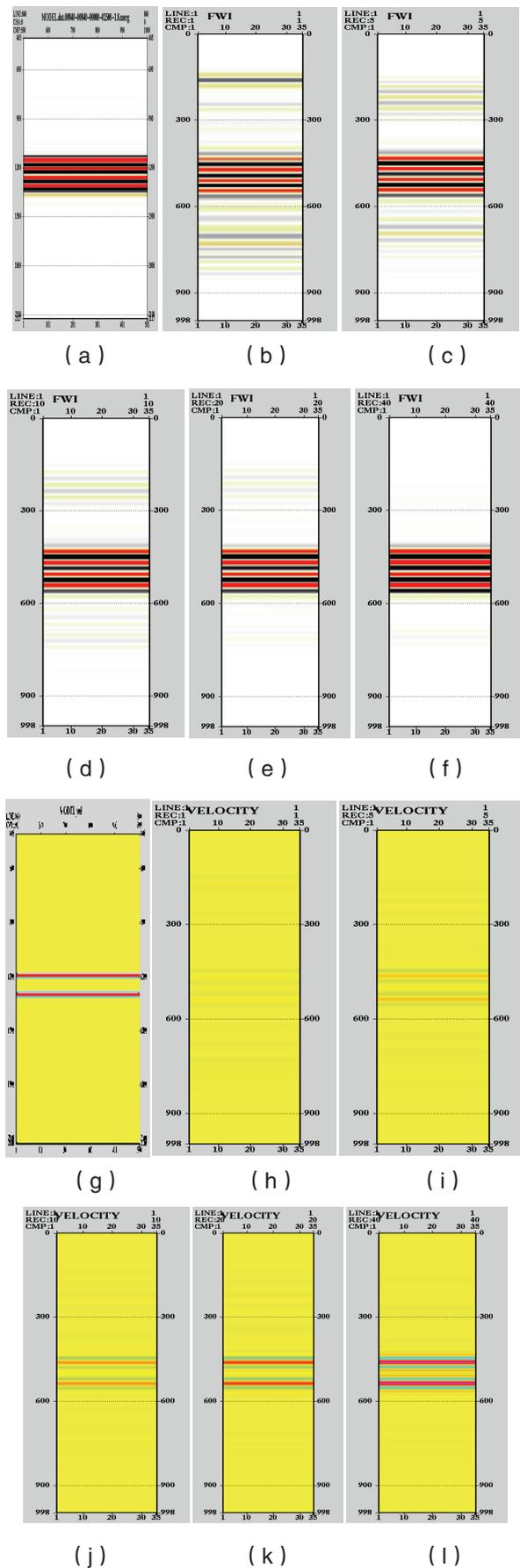
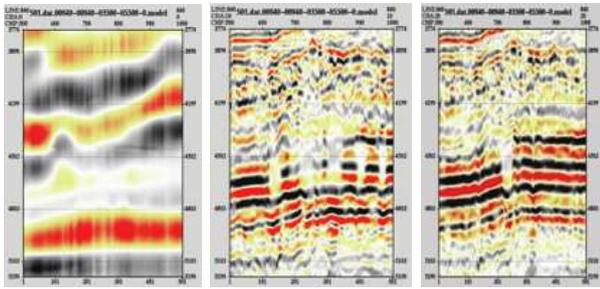
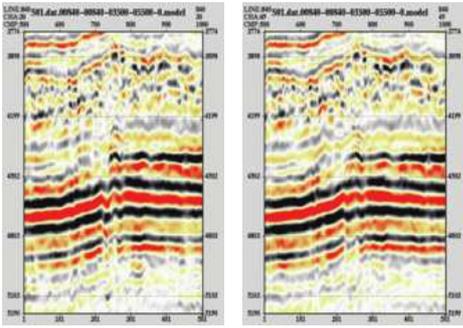


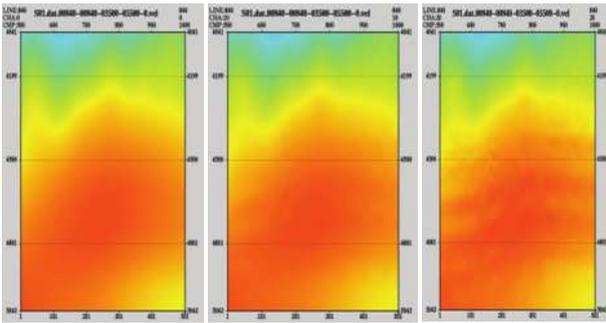
图2



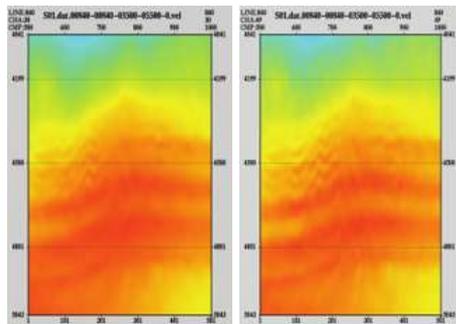
(a) (b) (c)



(d) (e)



(f) (g) (h)



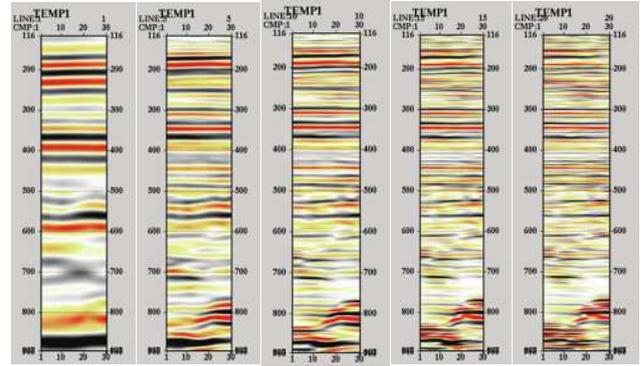
(i) (k)

图3

3 用多瑞克子波频率正演合成复杂频率正演剖面剖面

由于实际采集的地震波频率成分复杂，比如浅层频率高，深层频率低，还有面波，折射波等。想要得到和实际采集高度吻合的正演数据，就需要采用多瑞克子波主频正演，相关合成的方法。比如开始10Hz，最后50Hz，步长5Hz，利用不同频率的正演剖面 and 输入剖面

在一个时间窗口相关，并且用最大能力相关的正演剖面去合成一个整体剖面，并记下这个相关窗口对应的频率，有待下一步提频时使用，见图4

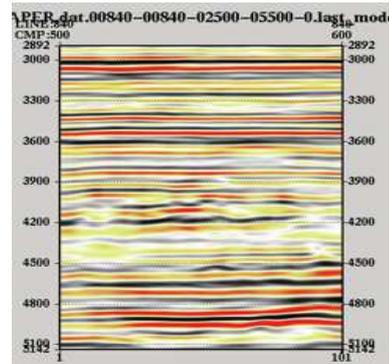


(a) (b) (c) (d) (e)

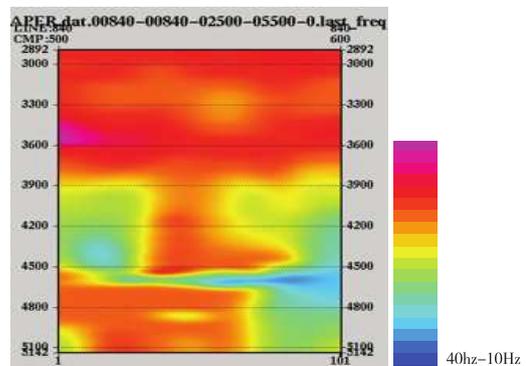
图4

(a) - (e) 都是用同一个速度场正演的结果，其中 (a) 是10Hz正演，(b) 是15Hz正演，(c) 是20Hz正演，(d) 是25Hz正演，(e) 是30Hz正演。

从图4可以看出，同样的速度场，用不同的瑞克子波频率，正演的结果大不相同，需要通过相关分析找到最合适频率段，合成一个和输入最接近的合成正演，用来进行下一步修正速度。并记录下该频率分布，为下一步提频提供参数。见图5。



(a)



(b)
图5

(a) 根据频率的分布, 选取相应的正演段, 合并成一个最佳的正演剖面。(b) 用不同频率正演和输入做相关, 找出最佳匹配的频率分布图。

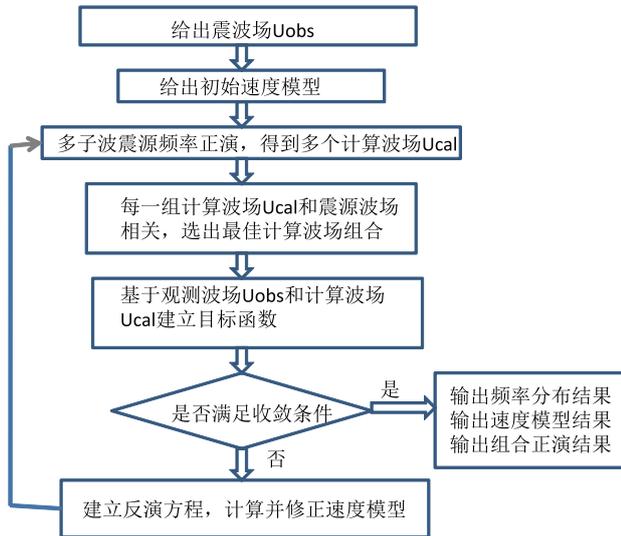


图6 多震源子波全波形反演流程图

4 采用逐次逼近的方法, 进一步减少正演数据和输入数据的误差

采用多瑞克子波频率正演, 相关合成, 解决了频率浅层高, 深层低的变化问题, 但是和实际采集的数据还是有比较大的误差, 这是由于实际采集的地震数据, 频带宽, 成分复杂。频带宽会出现低频粗轴和高频细轴在小时窗混在一起的现象, 用多瑞克子波扫描不能同时兼顾粗轴和细轴, 实际采集的数据还带有面波, 折射波和噪音等。解决这个问题的方发是再采用逐次逼近的方法。

具体做法是把第一次 FWI 的结果和输出的地震数据相减, 得到一个误差数据体。把这个误差数据体做为输入数据在做第二轮 FWI, 得到第二轮 FWI 的结果, 以此类推, 直到误差很小为止, 最后把各轮的正演结果加到一起, 就得到了一个和输入的地震道高度相似数据。流程图见图7。

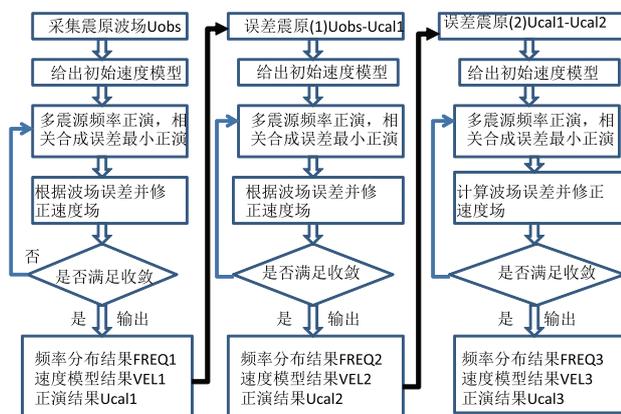


图7

图8是三次逐次逼近结果

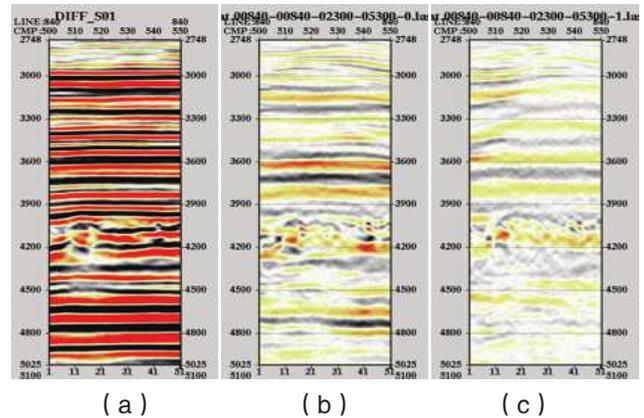


图8

(a) 第一次逐次逼近输入数据, 来自于原始数据, (b) 第二次逐次逼近输入数据, 来自于第一次 FWI 结果和第一次输入数据之差。(c) 第三次逐次逼近的输入数据, 来自第二次 FWI 的结果和第二次输入数据之差。可以看出误差在逐渐减少。

通过逐次逼近的计算, 把每次的迭代结果加在一起, 可以得到一个和输入数据高度相近的剖面 (见图8), 同时得到每次逼近的频率分布和速度模型, 可以下一步用来模拟激发提高地震波频率。

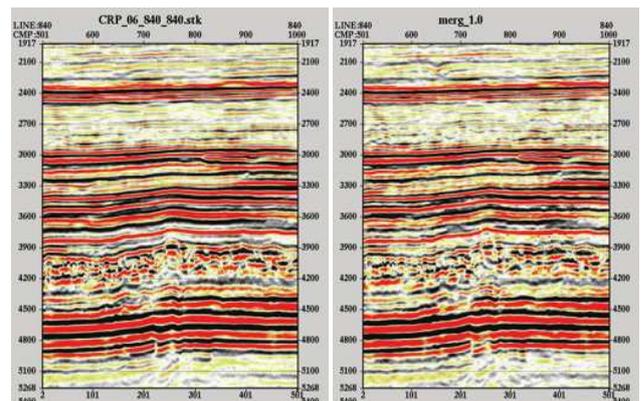


图9

(a) 输入地震数据 (U_obs), (b) 利用 FWI 求出的多频率合成正, 多次逼近正演的剖面 (U_cal), 这两个剖面很相似, 说明多频率子波和多次逼近求得速度场和频率分布的精确性。

5 重新正演 (模拟采集), 提高地震数据的频率

按照上述的方法, 每一轮逐次逼近计算, 都可以得到三个参数, 沿地震道的速度场, 频率分布, 和正演数据体。提频的原理是利用新取得的速度场, 把频率分布乘一个大于1的系数, 提高频率重新正演, 得到一个频率更高的数据体。相当模拟重新放炮, 但新放的炮震源

频率更高。用每次逼近得到的正演剖面，计算出振幅包络，用来控制每次逼近新正演数据的振幅。再将每次逼近的提频结果相加，得到最后的提频剖面，流程图见图10。

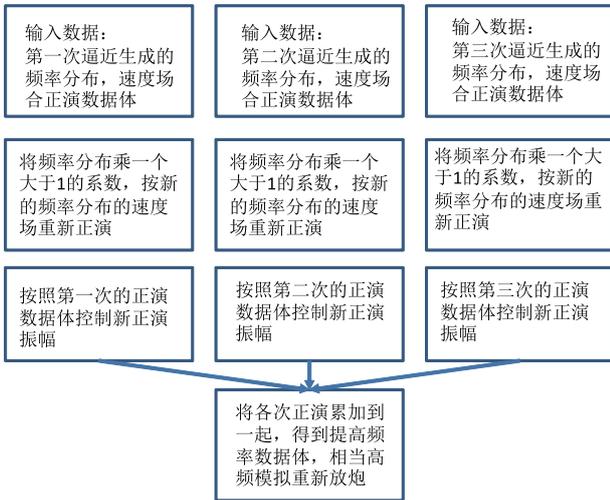


图 10

该方法可用于偏移后的叠加剖面或叠前单炮。

图 11 为偏移后叠加剖面的叠后提频

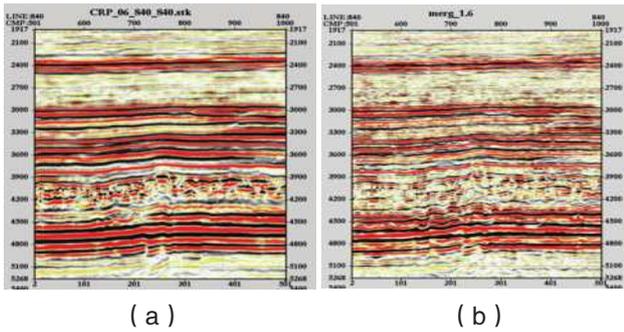


图 11

(a) 为输入剖面，(b) 为提频系数 1.6 的剖面，剖面频率明显提高。

图 11 为偏移后叠加剖面的叠后提频剖面的频谱

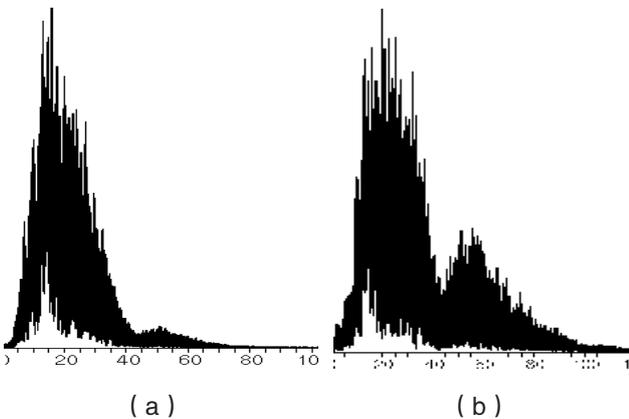


图 12

(a) 为输入剖面频谱，(b) 为提频系数 1.6 的剖面的频谱，剖面频带明显展宽。

实例二，叠前单炮提频和叠加效果

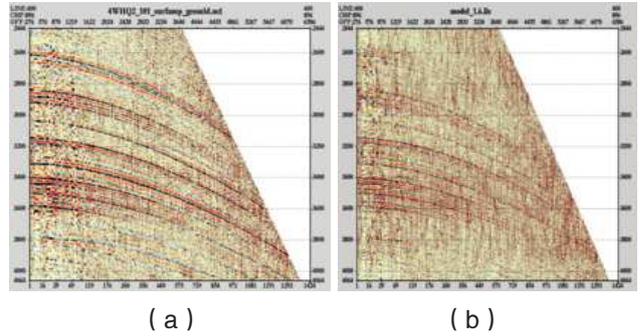


图 13

(a) 野外采集单炮，(b) FWI 提频 1.6 倍的单炮。

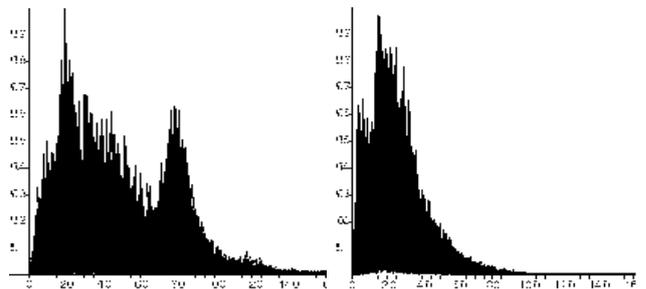


图 14

(a) 野外采集单炮频谱，(b) FWI 提频 1.6 倍的单炮频谱。

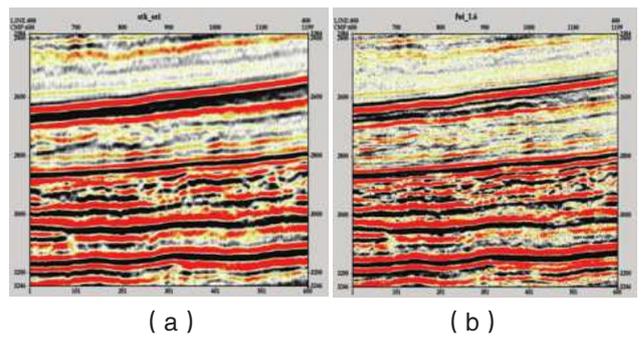


图 15

(a) 野外采集原始数据叠加剖面，(b) FWI 提频 1.6 倍的剖面。

实例三，叠前单炮提频加预测反褶积的提频效果和叠加效果

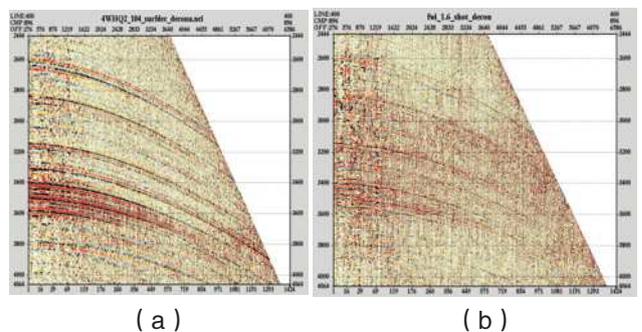


图 16

(a) 野外采集加反褶积单炮, (b) FWI提频 1.6倍加反褶积单炮。

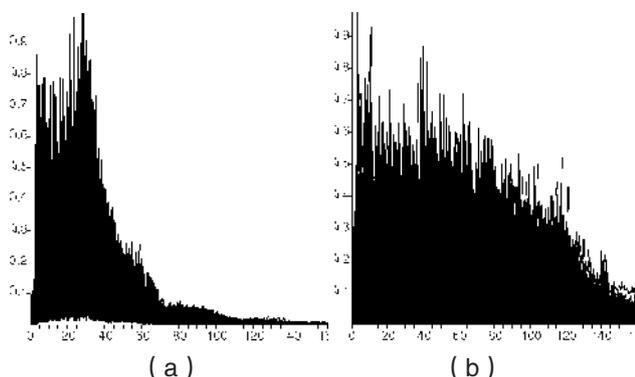


图 17

(a) 野外采集的加反褶积单炮的频谱, (b) FWI提频 1.6倍加反褶积单炮的频谱。

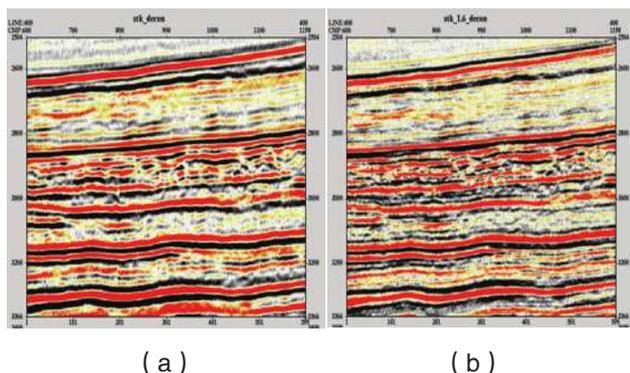


图 18

(a) 野外采集单炮加反褶积叠加剖面, (b) 野外采集单炮加FWI提频 1.6倍再加反褶积叠加剖面, 可以看出, 分辨率明显提高。

6 结论

本文采用全波形反演来提高地震波的频率。用正演频率扫描和逐次逼近算法, 得到的正演数据和采集的地震数据高度吻合, 再用提高频率的震源子波模拟放炮, 得到提高频率的地震数据体。应用效果表明, 该方法可以提高频率而不明显降低信噪比, 好于一般的提频方法。使用叠前全波形反演提频率再加上常规反褶积提频, 使得地震波的提频效果达到了一个新的高度, 有利于高分辨率地震勘探和解释。

参考文献:

- [1] Tarantola A. 1984a. Linearized inversion of seismic relection data[J], *Geophysical Prospecting*, 32(6):998-1015
- [2] Zhang S Q, Liu C C, Han L G, et al. 2013. Frequency multi-scale full waveform inversion based on L-BFGS algorithm and simultaneous source s approach[J]. *Journal of Jilin University(Earth SScience Edition)*(in Chineses), 43(3):1004-1012.
- [3] Zhang M, Wang H Z, Ren H R, et al. 2014. Full waveform inversion on the CPU/GPU heterogeneous platform and its application analysys[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition) (in Chinese)*, 43(3):1004-1012.
- [4] 王庆, 张建中, 黄忠来, 2015, 时间域地震全波形反演方法进展[J]. *地球物理学进展*, 30(6): 2797-2806, doi: 10.6038/pg20150645
- [5] 刘璐, 刘洪, 张衡, 等. 2013. 基于修正拟牛顿公式的全波形反演[J]. *地球物理学报*, 56(7): 2447-2451, doi: 10.6038/cjg20130730.