

魏 伟,符力耘,蒋 韬. 复杂构造三维地震观测系统设计的共聚焦分辨率分析. 地球物理学报, 2009, 52(5):1310~1317, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.020

Wei W, Fu L Y, Jiang T. Resolution analysis of seismic acquisition geometries by focal beams in 3D complicated media. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(5):1310~1317, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.020

复杂构造三维地震观测系统设计的共聚焦分辨率分析

魏 伟,符力耘,蒋 韬

中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029

摘 要 三维地震观测系统共聚焦分辨率特性分析突破传统以点论证为基础的观测系统分辨率分析方法,面向地质目标定量预测三维观测系统地震成像的空间分辨率和振幅精度.基于 Fourier 有限差分(FFD)大步长波场延拓和 Born-Kirchhoff 小步长波场插值递推方法,本文介绍了一种复杂介质条件下三维地震观测系统共聚焦分辨率特性快速分析方法.对给定的速度模型,该方法能够分析拟采用的三维地震观测系统设计方案对复杂构造的成像分辨率与 AVP 属性,从而为进一步的偏移成像与储层分析提供保证.最后本文以 SEG/EAGE 三维盐丘模型为例设计满覆盖为 16 次的三维地震观测系统,并实施三维共聚焦分辨率特性分析.

关键词 三维地震观测系统设计,复杂介质共聚焦分辨率分析, Fourier 有限差分大步长波场延拓, Born-Kirchhoff 小步长波场插值递推

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.020

中图分类号 P631

收稿日期 2008-07-06,2009-04-27 收修定稿

Resolution analysis of seismic acquisition geometries by focal beams in 3D complicated media

WEI Wei, FU Li-Yun, JIANG Tao

Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract About dealing with the complex subsurface structures, the conventional survey design methods which do not take into account the subsurface are no longer valid. Based on the FFD large-step wavefield extrapolation and Born-Kirchhoff small-step wavefield interpolation, the paper presents a rapid resolution analysis of 3D seismic survey design by focal beams in complicated media. The method can be used in judging and adjusting the acquisition geometries by imaging resolution and AVP attributes. And then it can provide guarantee on seismic migration imaging and reservoir bed analysis. In the last section of this paper, the SEG/EAGE salt model is used to illustrate the method.

Keywords 3D seismic survey design, Resolution analysis by focal beams in 3D complicated media, Fourier finite-difference large-step wavefield extrapolation, Born-Kirchhoff small-step wavefield interpolation

1 引言

三维地震观测系统设计的最高准则是用尽量小的费用获得尽可能高质量的地震数据.除了信噪比的指标要求外,观测系统的分辨率特性是其主要的评价指标.常规的地震观测系统分辨率特性分析主要是以点论证的方式,对给定的地下点,采用简单的方法分析观测系统的横纵向分辨率特性,得到关于面元、覆盖次数等参数的理论极限估计值.这一方法仅具有理论指导作用,实际意义不大.对于复杂构造地区勘探的实际三维地震观测系统设计方案,目前还没有一个可行的、在面上进行分辨率特性评价的方法.本文研究适用于复杂地质目标下共聚焦点分辨率特性分析,对复杂地质目标下具体三维地震观测系统设计方案的评价具有重要意义.

共聚焦点方法^[1,2](Common Focus Point,简称CFP,也有部分国内学者将其翻译为双聚焦或者多聚焦)是一种叠前深度偏移理论应用于地震观测系统设计方案评价的方法.该方法需要事先给定一个初步的复杂构造地区三维速度模型,然后利用地震波场外推方法,以面上论证的方式,对一个实际的三维地震观测系统设计方案进行纵横向分辨率特性的分析与评价.共聚焦分析的基本思路为针对地下目标位置,结合速度模型,分别计算出三维地震观测系统的检波点聚焦属性与震源点聚焦属性,进而定量分析整个观测系统的预期分辨率以及 AVP 属性(Amplitude versus ray-parameter,或称 Radon 域振幅属性),作为改善三维地震观测系统设计方案的依据.国内狄帮让等^[3,4]采用 Kirchhoff 积分波场逐层外推,实现了均匀介质模型和层状介质模型的三维地震观测系统共聚焦分辨率特性分析.

对于复杂构造地区勘探,三维共聚焦分辨率分析需要对每个炮点与检波点做一次地震波场模拟运

算,计算量较大,因此地震波场外推方法的精度和计算效率是其实现的关键.但如果采用三维有限差分、伪谱法等常规的地震波模拟方法,其海量的计算量会远远超出普通计算机的承受能力.考虑到共聚焦分析主要用于评价三维观测系统的地震成像品质,拟采用 Fourier 有限差分^[5~8](FFD)单程波延拓方法进行复杂构造地震波场外推计算.为了进一步提高正演模拟的速度与灵活性,我们首次将 Born-Kirchhoff 小步长波场插值(简称 BK 插值)与大步长 FFD 延拓结合起来(简称 FFD-BK)进行波场递推计算^[9],并将 FFD-BK 外推方法引入到共聚焦分析中,从而实现了复杂介质条件下三维地震观测系统共聚焦分析.本文最后以 SEG/EAGE 三维盐丘模型为例进行 2 炮 8 线 16 道的三维观测系统模板设计,模板沿纵和横两个方向分别滚动 8 次,每次滚动一条排列线,得到一个满覆盖为 16 次的三维地震观测系统设计方案,然后对其进行三维共聚焦分辨率特性分析.

2 共聚焦分析原理

共聚焦分析^[1,2]的概念源自共聚焦偏移成像^[10],其算法的核心为向下传播-反射-向上传播(简称 WRW 传播).在空间频率域中,任意一对炮点与检波点间的一次反射过程均可表示为下列形式:

$$P(z_0, z_0) = W(z_0, z_m)R(z_m, z_m)W(z_m, z_0), \quad (1)$$

其中, z_m 为深度, z_0 表示地表, $W(z_m, z_0)$ 为下行波传播矩阵, $R(z_m, z_m)$ 为反射系数矩阵, $W(z_0, z_m)$ 为上行波传播矩阵.

对于某一个地下反射源,地震波传播与反射过程(如图 1 所示)可以用离散的向量或矩阵表示:

$$P(z_0, z_0) = D(z_0)W(z_0, z_m)R(z_m, z_m)W(z_m, z_0)S(z_0), \quad (2)$$

其中, $S(z_0)$ 为震源矩阵, $D(z_0)$ 为检波点矩阵.

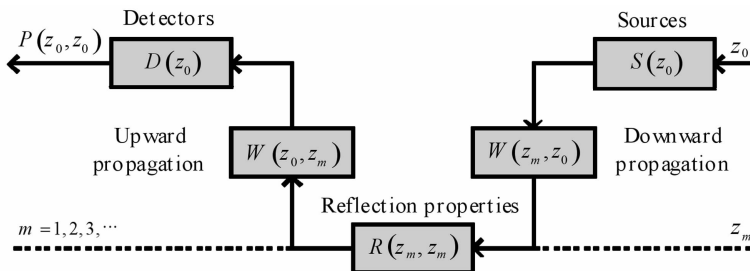


图 1 地震波传播与一次反射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the forward seismic experiment for primary body waves

地震偏移成像过程就是从地震记录 $P(z_0, z_0)$ 中提取反射系数 $R(z_m, z_m)$ 的过程. 由于本文的目标是分析观测系统对成像的影响, 因此后面的推导中, 忽略地下反射系数的影响, 令反射矩阵为单位矩阵, 即:

$$R(z_m, z_m) = I(z_m, z_m), \quad (3)$$

对式中的上行与下行传播过程分别进行聚焦可表示为:

$$P(z_m, z_m) = F(z_m, z_0)P(z_0, z_0)F(z_0, z_m), \quad (4)$$

其中, $F(z_m, z_0)$ 与 $F(z_0, z_m)$ 分别为对检波点与震源点的聚焦算子. 聚焦为波场逆传播过程, 聚焦算子为传播算子的共轭^[10].

在聚焦过程中, 如果考虑 z_m 临近点 z_r 的影响, 则聚焦结果, 即观测系统的分辨率矩阵 $B(z_r, z_r)$ 可表示为:

$$\begin{aligned} B(z_r, z_r) &= F(z_r, z_0)P(z_0, z_0)F(z_0, z_r) \\ &= B_D(z_r, z_0)B_S(z_0, z_r), \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $B_D(z_r, z_0)$ 和 $B_S(z_0, z_r)$ 分别表示检波点聚焦与震源点聚焦的分辨率矩阵, 分别定义为

$$\begin{cases} B_D(z_r, z_0) = F(z_r, z_0)D(z_0)W(z_0, z_m) \\ B_S(z_0, z_r) = W(z_m, z_0)S(z_0)F(z_0, z_r) \end{cases}, \quad (6)$$

其中, z_r 可以为 z_m 附近三维空间中的任意点. 为了分析方便, 通常将其选择为通过 z_m 的水平面上的临近点.

在聚焦过程中, 分别对检波点与震源点采用不同目标点进行聚焦运算, 即可得到观测系统的 AVP 矩阵. 在空间域中, AVP 矩阵可用检波点聚焦矩阵与震源聚焦矩阵的褶积来表示:

$$B(z_r, z_r) = B_D(z_r, z_0) * B_S(z_0, z_r), \quad (7)$$

AVP 矩阵也可用检波点聚焦矩阵与震源聚焦矩阵在 Radon 域的乘积形式来表示:

$$B(z_r, z_r) = \tilde{B}_D(z_r, z_0)\tilde{B}_S(z_0, z_r), \quad (8)$$

其中, z_r 为 z_m 附近的三维空间中的任意点.

由于形式更为简洁, 通常将 (8) 式作为 AVP 矩阵的表达式. 与分辨率矩阵不同, AVP 值是射线参数水平分量 P_x 与垂直分量 P_y 的函数, 随射线角度变化, 反映了来自不同角度的波场信息. 均匀的 AVP 分布能够更好地突出不同角度下地震波场的反射效应 (即 AVO 关系). 在理想情况下, 分辨率属性应为一个点, AVP 属性则为一个均匀的圆盘 (图 2). 但在实际的地震勘探中, 分辨率属性通常会分布在一个范围内, 而且 AVP 属性也不均匀.

以上讨论是在静态观测系统假设条件下得到的, 即每一个炮点对应的检波点排列相同. 但实际应用中的观测系统都是由基本的观测系统模板滚动得

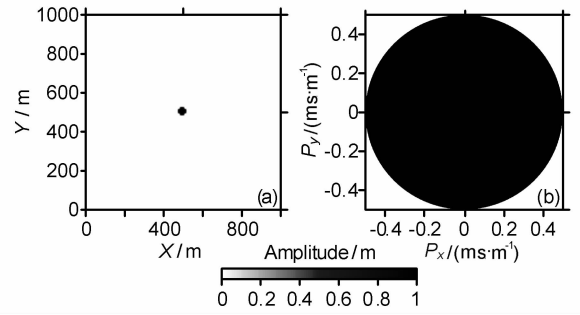


图 2 理想情况下的共聚焦分析结果

(a) 空间域; (b) Radon 域.

Fig. 2 Ideal focal beams

(a) Spatial domain; (b) Radon domain.

到的. 对于一般的动态观测系统, 必须将其拆分为多个静态观测系统进行计算. 其具体的计算方法为, 单独计算观测系统的每一个模板的每一次滚动时的分辨率矩阵与 AVP 矩阵, 最后再将结果进行累加:

$$\begin{cases} B = \sum_{l=1}^L B(z_r, z_r) \\ \tilde{B} = \sum_{l=1}^L \tilde{B}(z_r, z_r) \end{cases}, \quad (9)$$

其中, l 代表观测系统模板的每一次滚动号.

3 地震 FFD-BK 波场外推方法

作为一种经典的双域单程波算法, Fourier 有限差分^[5~8]方法是隐式有限差分与分裂步^[11]方法 (SSF 法、或称相位屏法) 的有机结合. 其方法的本质是在分裂步法的基础上, 添加一个高精度的有限差分校正项, 以此提高对陡倾角波场和强横向速度变化的处理能力. 在众多的单程波算子中, Fourier 有限差分方法是一种精度与效率均较理想且实用性较强的复杂构造波场延拓方法.

横向非均匀介质中的单程波方程的三维 FFD 算子^[5]为:

$$k_z = k_z^0 + \omega \Delta s + \frac{b \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right)}{1 + a \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right)}, \quad (10)$$

其中, ω 为角频率, k_z^0 为背景介质的垂直波数, $\Delta s = 1/v - 1/v_0$ 为慢度扰动项, a 与 b 为与介质速度、频率相关的参数, 可表示为:

$$a = \frac{v^2 + \omega v_0 + v_0^2}{4\omega^2}, \quad (11)$$

$$b = \frac{v - v_0}{2\omega}, \quad (12)$$

式(10)可以被分解为三个串联的方程:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = ik_z^0 P, \quad (13)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = i\omega\Delta s P, \quad (14)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{ib\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)}{1+a\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)} P, \quad (15)$$

实际应用中,先将波场 P 进行 FFT 变换至波数域,利用(13)式完成相移,然后进行逆 FFT 变换,并在空间域利用(14)式进行慢度扰动校正,最后则利用(15)式进行有限差分校正。式(13)与式(14)的结合即为相位屏方法,可以完成大部分的相位移及误差校正。但由于相位屏方法没有考虑速度随着空间变化时的偏导数项,因此在强横向速度变化介质中有很大的横向相位误差。Fourier 有限差分方法由于有了有限差分校正项,故而能够适应很强的速度横向变化以及陡倾角情况。

另外,对于三维 Fourier 有限差分方法,直接采用式(15)进行三维有限差分校正计算量十分巨大。通常采用双向分裂技术方法,即首先将三维差分进行变量分离,然后利用两个串联的二维有限差分近似实现。利用 ADIPI 技术^[6,7]可以进一步消除双向分裂误差。

由于共聚焦分析需要对每一个炮点与检波点分别进行一次地震波模拟运算,如果仅采用 FFD 方法,运算量仍然较大。为了进一步提高波场外推的运算速度,拟采用大步长 FFD 法进行波场延拓,然后结合 Born-Kirchhoff 小步长波场插值算法。

下面笔者从 Lippmann-Schwinger 积分方程^[12]开始推导 Born-Kirchhoff 积分式:

$$u(\mathbf{r}) = u_0(\mathbf{r}) + 2k_0^2 \int_z^{z+\Delta z} O(\mathbf{r}') u(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}', \quad (16)$$

其中, $u_0(\mathbf{r})$ 为背景介质中自由传播波场,满足均匀介质条件下 Kirchhoff 积分公式:

$$u_0(\mathbf{r}) = \int \frac{ik_0}{2\pi\Delta r} \cos\theta e^{-ik_0\Delta r} u_S(\mathbf{r}) dx, \quad (17)$$

其中, $\Delta r = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$, $O(\mathbf{r}')$ 为相对慢度扰动,表示为:

$$O(\mathbf{r}') = \frac{v_0}{v(\mathbf{r}')} - 1, \quad (18)$$

式(16)中,格林函数在三维均匀介质条件下可表示为

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-ik_0\Delta r}}{\Delta r}, \quad (19)$$

在方程(16)的积分号内,波场 $u(\mathbf{r}')$ 为未知,利用

Born 近似,即弱散射近似方法,将 $u(\mathbf{r}')$ 替换为入射波场 $u_0(\mathbf{r})$ 。将式(17)~(19)代入式(16)中,得到 Born 近似后的波场:

$$u(\mathbf{r}) = \int_z^{z+\Delta z} \frac{ik_0}{2\pi\Delta r} [\cos\theta - ik_0\Delta z O(\mathbf{r})] e^{-ik_0\Delta r} u_S(\mathbf{r}) d\mathbf{r}, \quad (20)$$

在小孔径条件下有如下近似关系:

$$\cos\theta - ik_0\Delta z O(\mathbf{r}) = e^{-ik_0\Delta z O(\mathbf{r})}, \quad (21)$$

$$u(\mathbf{r}) = \int_z^{z+\Delta z} \frac{ik_0}{2\pi\Delta r} e^{-ik_0\Delta z O(\mathbf{r})} e^{-ik_0\Delta r} u_S(\mathbf{r}) d\mathbf{r}, \quad (22)$$

式(22)即为 Born-Kirchhoff 积分式,由于在 Kirchhoff 算子(17)式的基础上加了一个慢度扰动修正项,所以该算子能够适应介质速度的横向变化。需要注意的是,这里的所有公式均为正演公式,与 Born-Kirchhoff 偏移公式^[9]具有符号的差异。

由于波场模拟算子在水平方向上的精度对共聚焦分析而言更加重要,因此着重对比 SSF、FFD 与 Born-Kirchhoff 在水平方向上的精度。图 3a、图 3b 与图 3c 为 $v_0/v=75\%$ 的均匀介质条件下分别用以上三种方法得到的频率域脉冲响应结果,图 3d 为精确解。

从图 3 中可以看到,FFD 方法(图 3b)的结果与精确结果(图 3d)相当,Born-Kirchhoff 方法(图 3c)的精度略低于 FFD 方法,SSF(图 3a)的误差最大。试算表明,Born-Kirchhoff 插值方法的计算时间大约只相当于 FFD 方法的 1/8,即 Born-Kirchhoff 插值方法可以在几乎不损失精度的条件下,大大减小

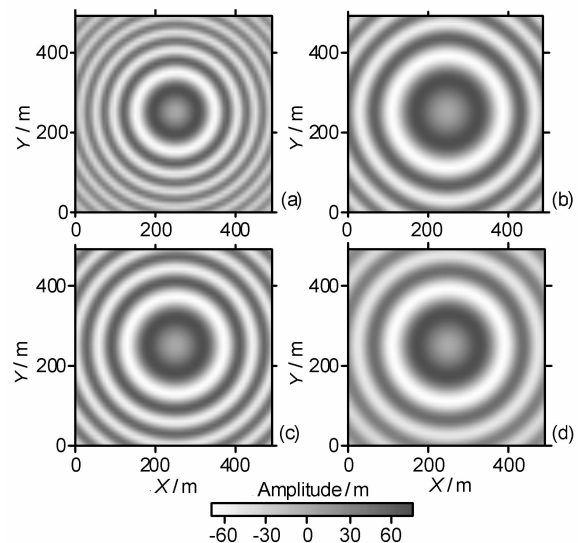


图 3 均匀介质下 SSF、FFD 与 Born-Kirchhoff 延拓结果比较 (a) SSF; (b) FFD; (c) Born-Kirchhoff; (d) 精确值。

Fig. 3 Comparison of SSF, FFD, Born-Kirchhoff propagators and exact result for the homogeneous medium (a) SSF; (b) FFD; (c) Born-Kirchhoff; (d) Exact result.

模拟的运算量。

但 Born-Kirchhoff 方法并不能取代 FFD 方法, 原因在于其推导过程中利用了一个小孔径假设条件, 它仅仅在小孔径条件下精确. 如果直接采用 Born-Kirchhoff 方法作为波场延拓的主方法, 会带来孔径范围外的大倾角信息的误差。

4 复杂介质条件下共聚焦分析

对于简单的均匀介质, 我们直接将 Kirchhoff 式(17)代入式(6), 可分别得到检波点与炮点聚焦矩阵:

$$B_D(z_r, z_0) = \frac{k^2}{4\pi} \int_{A_D} \cos\theta_r \frac{e^{ik\Delta r_r}}{\Delta r_r} \cos\theta \frac{e^{-ik\Delta r}}{\Delta r} D(\mathbf{r}_r) d\mathbf{r}_r, \tag{23}$$

$$B_S(z_0, z_r) = \frac{k^2}{4\pi} \int_{A_S} \cos\theta_r \frac{e^{ik\Delta r_r}}{\Delta r_r} \cos\theta \frac{e^{-ik\Delta r}}{\Delta r} S(\mathbf{r}_r) d\mathbf{r}_r, \tag{24}$$

将其代入式(5)与式(8)便可分别求取分辨率矩阵与 AVP 矩阵。

对于复杂介质, 首先可利用 FFD 进行大步长延拓, 再利用 Born-Kirchhoff 插值得到大步长之间的各小层波场. 原则上大步长应为小层厚度的整数倍. 图 4 为每五层作一次 FFD 延拓的 FFD-BK 延拓算法示意图。

在前文已经提到过 Born-Kirchhoff 算法相对于 FFD 算法而言计算量较小. 由于 FFD-BK 模拟中 FFD 延拓次数大大减少, 因此其速度得到显著的提高. 为了保证 FFD-BK 模拟的精度, 延拓步长的选择十分重要. 由于 FFD 算法相对精度较高, 因此 FFD-BK 延拓的精度与步长都取决于 Born-Kirchhoff 方法。

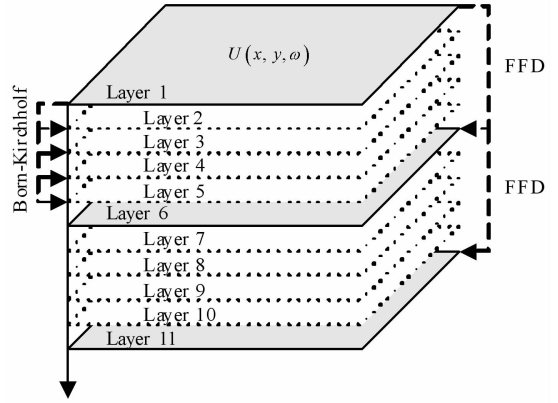


图 4 FFD-BK 波场延拓示意图
Fig. 4 Schematic diagram of FFD-BK wavefield extrapolation

Fu^[9]曾详细讨论过不同步长条件下 Born-Kirchhoff 插值算法的步长与精度的关系, 其结论为时间步长最好选在 1~1.5 个地震波主频周期之间. 因此, 为了保证 FFD-BK 算法的精度, FFD 延拓步长最好小于 1~1.5 个地震波主频周期, Born-Kirchhoff 延拓步长则由所需的地震波采样率决定。

完成波场延拓步骤以后, 得到(6)式中的 \mathbf{W} 项, 对于检波点而言为 $\mathbf{W}(z_0, z_m)$, 而对于炮点而言为 $\mathbf{W}(z_m, z_0)$. 通过对传播算子取共轭, 即可得到聚焦算子 $\mathbf{F}(z_0, z_m)$ 与 $\mathbf{F}(z_m, z_0)$. 与均匀介质情况下类似, 将这些 \mathbf{W} 与 \mathbf{F} 项代入式(5)与式(8)即可分别计算分辨率矩阵与 AVP 矩阵。

5 计算实例

下面以标准的三维 SEG/EAGE 盐丘模型(图 5)为例, 讨论本文方法的实际应用。

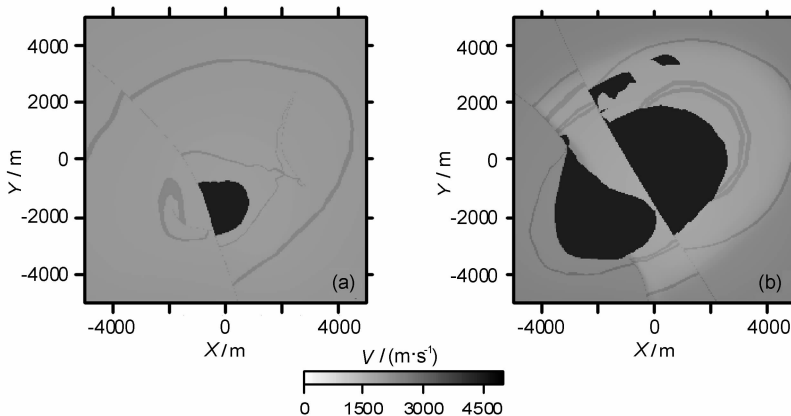


图 5 三维 SEG/EAGE 盐丘模型水平切片
(a) 1000 m 深度; (b) 2000 m 深度。

Fig. 5 Horizon-slice map of 3D SEG/EAGE salt model
(a) 1000m depth; (b) 2000m depth.

采用如图 6 所示的 8 线 16 道 2 炮的正交型采集模板,将模板分别沿着纵向与横向两个方向滚动 8 次,每次滚动一条排列线,得到如图 7 所示的采集观测系统,其满次覆盖次数为 16 次。

为了避免重复进行波场模拟,笔者采用先进行模拟再抽取数据进行 CFP 分析的计算方式.由于算法的主要计算量集中在模拟部分,这样的处理方式

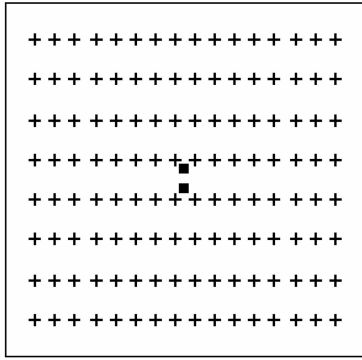


图 6 采集观测系统模板
小方块■表示炮点,十字+表示检波点.

Fig. 6 The single template of acquisition geometries

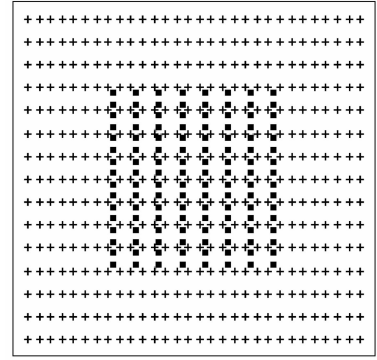


图 7 整个观测系统
小方块■表示炮点,十字+表示检波点.

Fig. 7 The whole survey of acquisition geometries

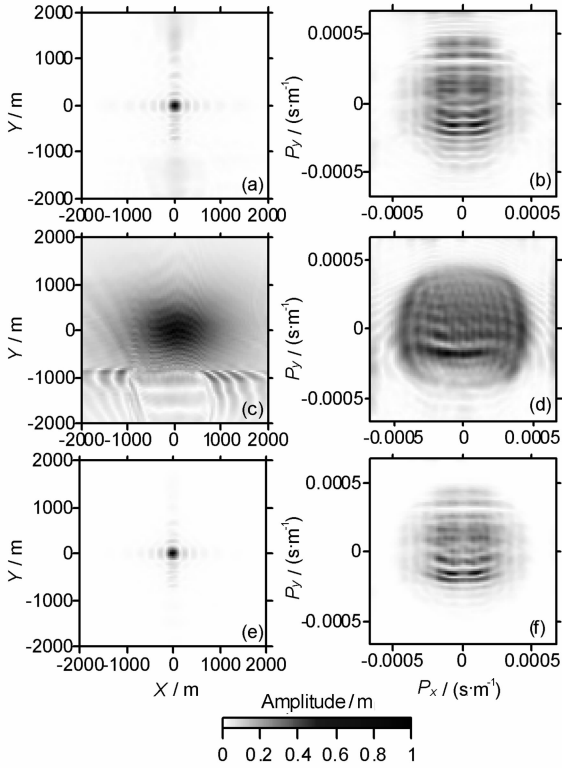


图 8 单模板观测系统地下 1 km 深度处的共聚焦结果
(a) 检波点聚焦; (b) Radon 域检波点聚焦; (c) 震源点聚焦;
(d) Radon 域震源点聚焦; (e) 分辨率矩阵; (f) AVP 矩阵.

Fig. 8 Focal beams at the depth of 1 km for a single template
(a) Focal detector beam; (b) Focal detector beam in Radon domain;
(c) Focal source beam; (d) Focal source beam in Radon domain;
(e) Resolution matrix; (f) AVP matrix.

可以较大地减小整个算法的计算量。

首先对单模板观测系统进行共聚焦分析,分别计算出 10 Hz 频率下检波点聚焦属性及其在 Radon 域的值、震源点聚焦属性及其在 Radon 域的值、分辨率属性与 AVP 属性.图 8 与图 9 分别为地下深度为 1 km 与 2 km 处的共聚焦分析结果.可以看到,1 km 深度处分辨率矩阵的主瓣宽度大约为 300 m,

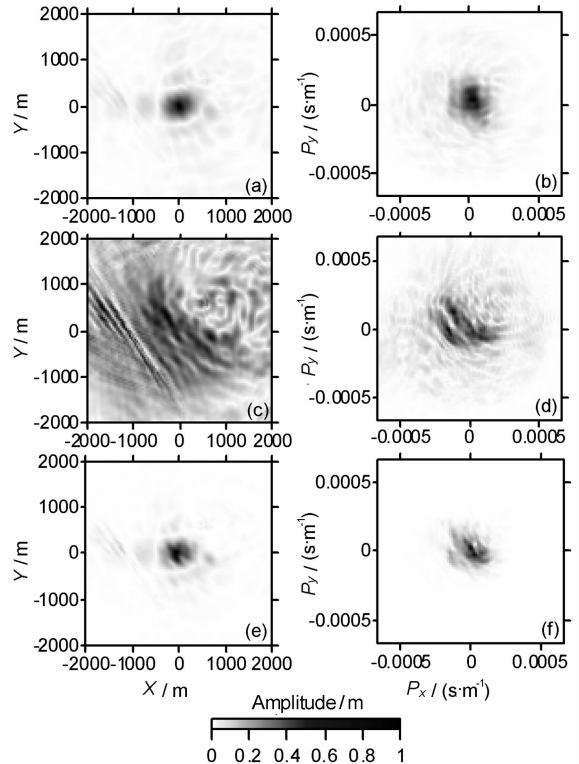


图 9 单模板观测系统地下 2 km 深度处的共聚焦结果
(a) 检波点聚焦; (b) Radon 域检波点聚焦; (c) 震源点聚焦;
(d) Radon 域震源点聚焦; (e) 分辨率矩阵; (f) AVP 矩阵.

Fig. 9 Focal beams at the depth of 2 km for a single template
(a) Focal detector beam; (b) Focal detector beam in Radon domain;
(c) Focal source beam; (d) Focal source beam in Radon domain;
(e) Resolution matrix; (f) AVP matrix.

AVP 分布相对较为均匀; 2 km 深度分辨率矩阵的主瓣宽度大约为 900 m, AVP 分布较差, 几乎全部集中在一小块区域中, 不利于后续的地震偏移成像与储层分析. 以上结果揭示了随着目标深度的增大, 分辨率呈降低趋势, AVP 矩阵分布也变得更不均匀.

接下来对模板滚动后达到满次覆盖的整个观测系统进行共聚焦分析, 结果如图 10、11 所示. 可以看到, 滚动后观测系统在 1 km 与 2 km 深度处分辨率矩阵的主瓣宽度分别为 150 m 与 450 m, 相比图 8 与图 9 的结果有了明显的改善, 但 AVP 属性却没有太大变化. 也就是说, 多次覆盖技术可以显著地提高观测系统的分辨率, 却无法直接改善观测系统 AVP 属性分布. 前文曾提到, AVP 属性的均匀性直接影响储层分析的效果, 是观测系统评价的一个重要指标, 因此最好将 AVP 分布的均匀性列入到采集模板设计要求中.

整个计算过程采用的计算平台如下: Intel Xeon X5355 2.66Ghz CPU, 16GB RAM, Windows 2003

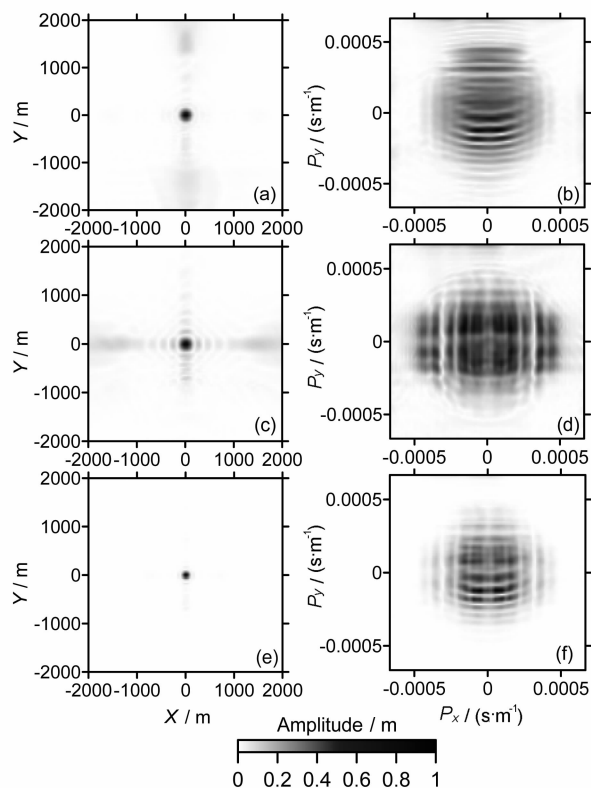


图 10 滚动后整个观测系统地下 1 km 深度处的共聚焦结果

(a) 检波点聚焦; (b) Radon 域检波点聚焦; (c) 震源点聚焦; (d) Radon 域震源点聚焦; (e) 分辨率矩阵; (f) AVP 矩阵.

Fig. 10 Focal beams at the depth of 1 km for the whole survey

(a) Focal detector beam; (b) Focal detector beam in Radon domain; (c) Focal source beam; (d) Focal source beam in Radon domain; (e) Resolution matrix; (f) AVP matrix.

Server 操作系统. 本实例模型为 $250 \times 250 \times 201$ 的三维网格区块, 模拟过程大约费时 4 个小时, 随后即可任意选择不同的采集观测系统与地下目标点进行共聚焦分析.

6 结 论

本文将 FFD 大步长延拓与 Born-Kirchhoff 插值方法引入到共聚焦分析中, 发展了一种适用于复杂地质目标的三维观测系统共聚焦分辨率特性评价方法, 为进一步的偏移成像与储层分析提供了保证. 同时该方法也有利于采集设计人员设计出满足勘探要求而且尽可能低费用的地震观测系统设计方案.

地震波场外推方法是共聚焦分析的关键, 波场外推算法的稳定性、精度与速度直接影响共聚焦分析的效果. 下面分别就这三个方面总结如下:

(1) 对横向均匀介质而言, FFD 算法对于各种空间网格大小均稳定. 对于横向变速介质, FFD 算

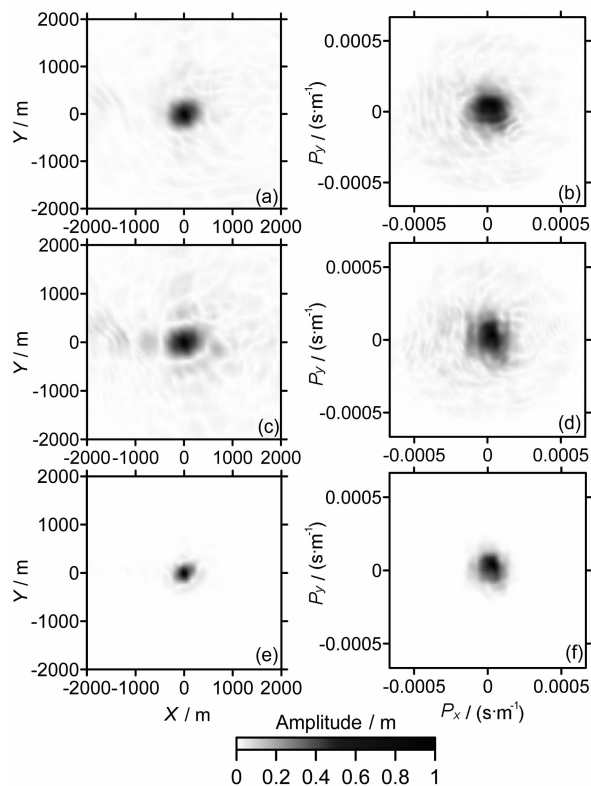


图 11 滚动后整个观测系统地下 2 km 深度处的共聚焦结果

(a) 检波点聚焦; (b) Radon 域检波点聚焦; (c) 震源点聚焦; (d) Radon 域震源点聚焦; (e) 分辨率矩阵; (f) AVP 矩阵.

Fig. 11 Focal beams at the depth of 2 km for the whole survey

(a) Focal detector beam; (b) Focal detector beam in Radon domain; (c) Focal source beam; (d) Focal source beam in Radon domain; (e) Resolution matrix; (f) AVP matrix.

法通常也十分稳定. Born-Kirchhoff 算法做为一种空间域积分方法,是无条件稳定的. 综上,FFD-BK 算法整体上稳定.

(2)为了保证模拟的精度,步长的选择十分重要. 由于 FFD 算法对步长要求较低,因此 FFD-BK 延拓的精度与步长主要取决于 Born-Kirchhoff 方法. FFD-BK 延拓步长的基本选取原则为,FFD 大延拓步长小于 1~1.5 个地震波主频周期, Born-Kirchhoff 小延拓步长则由所需的地震波采样率决定. 本文算例采用固定深度步长进行延拓,FFD 延拓步长为 100 m, Born-Kirchhoff 延拓步长为 20 m, 满足 FFD-BK 算法的步长要求.

(3)Born-Kirchhoff 插值方法的计算时间大约只相当于 FFD 方法的 1/8. 因此采用 FFD 大步长延拓结合 Born-Kirchhoff 插值方法可以极大地提高模拟的速度. 由于 FFD-BK 最佳延拓步长以时间步长的方式给出,因此在深度域最佳的 FFD-BK 延拓方式应为变步长延拓方式. 本文算例采用固定深度步长 FFD-BK 延拓,尽管并非采用最优延拓方式,仍要比全部采用 FFD 节省约 70% 的计算量.

参考文献 (References)

- [1] Berkhout A J, OngKiehong L, Volker A W F, Blacquièrè G. Comprehensive assessment of seismic acquisition geometries by focal beams—Part I: Theoretical considerations. *Geophysics*, 2001, **66**:911~917
- [2] Volker A W F, Blacquièrè G, Berkhout A J, OngKiehong L. Comprehensive assessment of seismic acquisition geometries by focal beams—Part II: Practical aspects and examples. *Geophysics*, 2001, **66**:918~931
- [3] 狄帮让, 王长春, 顾培成等. 三维观测系统优化设计的双聚焦方法. 石油地球物理勘探, 2003, **38**(5):463~469
Di B R, Wang C C, Gu P C, et al. Double focusing method for 3-D geometry-optimized design. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 2003, **38**(5):463~469
- [4] 狄帮让, 曹卫平, 顾培成. 不同介质模型的双聚焦方法. 石油地球物理勘探, 2006, **41**(2):123~128
Di B R, Cao W P, Gu P C. Double-focus algorithm of models in different medium. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 2006, **41**(2):123~128
- [5] Ristow D, Ruhl T. Fourier finite-difference migration. *Geophysics*, 1994, **59**(12):1882~1893
- [6] Zhang J H, Wang W M, Fu L Y, Yao Z X. 3D Fourier finite-difference migration by ADI plus interpolation. *Geophysical Prospecting*, 2007, **56**:95~103
- [7] 张金海, 王卫民, 赵连锋等. 傅里叶有限差分法三维波动方程正演模拟. 地球物理学报, 2007, **50**(6):1854~1862
Zhang J H, Wang W M, Zhao L F, et al. Modeling 3-D scalar waves using the Fourier finite-difference method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(6):1854~1862
- [8] Daniela Amazonas D, Costa J C, Schleicher J, et al. Wide-angle FD and FFD migration using complex Padé approximations. *Geophysics*, 2007, **72**(6):215~220
- [9] Fu L Y. Wavefield interpolation in the Fourier wavefield extrapolation. *Geophysics*, 2004, **69**(1):257~264
- [10] Berkhout A J. Applied Seismic Wave Theory, Advances in Exploration Geophysics. Elsevier Sciences Publishers, 1987
- [11] Stoffa P L, Fokkema J T, Freire R M D, et al. Split-step Fourier migration. *Geophysics*, 1990, **55**(4):410~421
- [12] Fu L Y, Mu Y G, Yang H J. Forward problem of nonlinear Fredholm integral equation in reference medium via velocity-weighted wavefield function. *Geophysics*, 1997, **62**(2):650~656

(本文编辑 胡素芳)