

doi: 10.11720/wtyht.2019.0077

杨飞龙,俞岱,孙渊.基于压缩感知的复杂地表菲涅尔束偏移[J].物探与化探,2019,43(6):1285-1290.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0077
Yang F L, Yu D, Sun Y. Fresnel beam migration method based on compressed sensing under complex topographic conditions[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(6): 1285-1290. http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0077

基于压缩感知的复杂地表菲涅尔束偏移

杨飞龙^{1,2}, 俞岱³, 孙渊³

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065; 3. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 高斯束偏移是一种束类地震数据成像方法,该方法可以处理多波至走时,具有良好的成像精度。但在复杂地表条件下应用存在两个问题:一是原有的局部平面波分解方法计算精度不足,影响低信噪比数据成像质量;二是偏移精度取决于射线束传播算子,高斯束传播算子随着传播距离增大发散过快,难以同时保证浅层和中深层构造成像精度,并且高斯束射线传播算子在模型浅部覆盖范围不足,对复杂地表模型成像精度较低。为了解决上述问题,本文将基于压缩感知理论的平面波分解技术应用到复杂地表菲涅尔束偏移中,不仅有效提高了局部平面波分解精度,同时菲涅尔束传播算子有效解决了高斯束算子随传播距离增加束宽发散过大的问题,典型的模型算例验证了本文方法的有效性和稳定性。

关键词: 高斯束;压缩感知;菲涅尔束偏移;复杂地表;局部平面波分解;束算子

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2019)06-1285-06



0 引言

随着油气勘探的深入,地震勘探的工作重心逐渐向沙漠、戈壁、黄土塬等复杂地区转移^[1]。在这些勘探地区,受近地表高程变化造成的静校正问题难以获得高质量的地震剖面^[2]。高斯束偏移方法克服了 Kirchhoff 偏移不能处理多波至和单程波动方程偏移不能对陡倾构造精确成像的缺点,并且保留了射线类偏移方法对复杂地表的适应性。近年来束偏移在复杂地表条件下的应用得到了广泛关注。Ceveny 将平面波分解方法引入到高斯束当中,对束偏移中平面波的分解奠定了基础^[3]。孙建国等在地震波传播理论的基础上考虑了地震波传播时射线束宽度与菲涅尔带半径的关系^[4]。Gray 通过局部高程静校正的方法将衰减窗内接收点的高程校正到各个窗中心点所在的高度,解决了起伏地形对偏移方法的影响问题,在复杂地表条件下实现了共炮域高斯束偏移^[5]。Hu 和 Stoffa 提出慢度驱动的高斯束叠前深度偏移方法,在这方法中考虑了局部窗

内数据的相似性,并根据这一性质定义了成像公式中的加权函数从而加强有效信号对偏移结果的贡献^[6]。Yue 等在 Gray 方法的基础上,考虑了高程的影响并对局部倾斜叠加公式进行修正,提高了复杂地表下高斯束偏移的精度^[7]。岳玉波等把真振幅高斯束偏移扩展到了复杂地表条件^[8]。孙辉等通过分析子波特征改进射线束偏移精度,提出了基于子波的波束偏移方法^[9]。Wu 等从反演角度对平面波进行分解,将 τ - p 变换方法引入到束偏移中提高偏移成像精度^[10]。杨继东等将菲涅尔束偏移方法扩展到了复杂地表条件下^[11]。高成等将高斯束偏移方法扩展至时间域,提出了二维时间域高斯束偏移,改善了偏移算法对速度模型的依赖^[12]。王华忠等在局部平面波分解过程中引入压缩感知概念,提出了特征波成像方法^[13]。孙辉等将压缩感知思想引入到波束偏移成像中,提高了局部平面波分解精度,改善了复杂地表下成像质量^[14-15]。

文中通过对压缩感知理论及束偏移方法的研究,将基于压缩感知的平面波分解技术应用到复杂地表菲涅尔束偏移中。通过基于压缩感知的平面波

收稿日期: 2019-02-13; 修回日期: 2019-09-12

基金项目: 陕西省教育厅科研计划项目“基于压缩感知的起伏地表 Kirchhoff 型动态聚焦束偏移方法”(19JK0668)

作者简介: 杨飞龙(1988-),男,西安石油大学地球科学与工程学院讲师,主要从事地震数据处理及偏移成像方法研究工作

分解方法来提高 τ - p 域下数据体的计算精度;同时使用菲涅尔束传播算子有效控制射线束宽度解决其随传播距离发散过快等问题,保证了复杂构造浅层及中深层构造同时精细成像,并使用典型的模型算例及不同方法对比验证了本文方法的有效性。

1 方法原理

1.1 局部平面波分解

常规束偏移方法使用局部倾斜叠加(即线性拉东变换 LRT)来对某一个窗中心地震数据的局部平面波进行分解。将压缩感知(CS)引入到局部平面波分解中,从反演角度考虑构造如下形式的最小化目标函数:

$$J = \|D(\omega) - L(\omega)P(\omega)\|^2 + \|W_p(\omega)P(\omega)\|^2, \quad (1)$$

其中, $W_p(\omega)$ 为空间加权对角矩阵。上述公式对 $P(\omega)$ 求导,并令其为 0 可以得到下面的解:

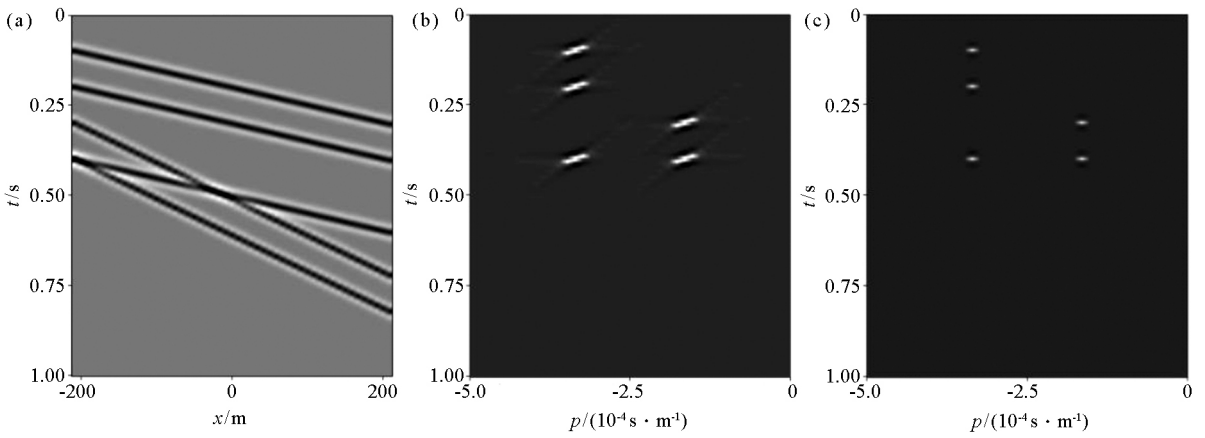
$$P(\omega) = [L^H(\omega)L(\omega) + W_p^{-1}(\omega)]^{-1}L^H(\omega)D(\omega). \quad (2)$$

使用 L_0 范数来表示平面波分解结果的稀疏性,上述平面波分解问题可以表示为:

$$\min \|P(\omega)\|_0, \quad \text{S.T. } \|D(\omega) - L(\omega)P(\omega)\|_2^2 < \varepsilon. \quad (3)$$

其中 L_0 范数表示方程非 0 解的个数极小, ε 表示模型空间的噪声大小。如此便成功地利用有效信号的稀疏性作为约束条件,在压缩感知理论框架下将常规的 LRT 转化为一个压缩感知问题。

图 1a 为多个平面波的合成数据,图 1b 为该数据的常规 LRT 结果,图 1c 为基于压缩感知的 LRT 结果。从图中可以看出基于压缩感知的 LRT 可以获得分辨率更高、质量更好的平面波数据。



a—平面波数据;b—LRT 结果;c—CS-LRT 结果
a—plane wave data;b—LRT results;c—CS-LRT results

图 1 不同平面波分解方法对比

Fig.1 Comparison of different plane wave decomposition methods

1.2 菲涅尔束算子

菲涅尔束传播算子本质上仍然是高斯射线束传播算子,高斯射线束的理论基础是波动方程的高频近似解:

$$u(s, n, \omega) = \sqrt{\frac{V(s)}{Q(s)}} \exp\left\{i\omega\tau(s) + \frac{i\omega}{2} \frac{P(s)}{Q(s)} n^2\right\}, \quad (4)$$

其中 s, n 为中心射线坐标系的坐标, ω 为角频率, u 为波场值, V 为中心射线上的速度值, $\tau(s) = \int_{s_0}^s \frac{ds}{V(s)}$ 为射线束沿中心射线的旅行时, $P(s), Q(s)$ 分别为动力学射线参数,可以表示为:

万方数据

$$\frac{P(s)}{Q(s)} = \frac{\varepsilon p_1(s) + p_2(s)}{\varepsilon q_1(s) + q_2(s)}. \quad (5)$$

在高斯射线束传播算子中 ε 是一个常数,但在菲涅尔束传播算子中, ε 是一个与菲涅尔带半径相关的变量,其表达式为:

$$\varepsilon(s) = -i \frac{\omega_{\text{ref}} r_F^2 / 2 + \sqrt{(\omega_{\text{ref}} r_F^2 / 2)^2 - 4q_1^2(s)q_2^2(s)}}{2q_1^2(s)} \quad (6)$$

其中 ω_{ref} 为参考频率, r_F 对应的表达式如下:

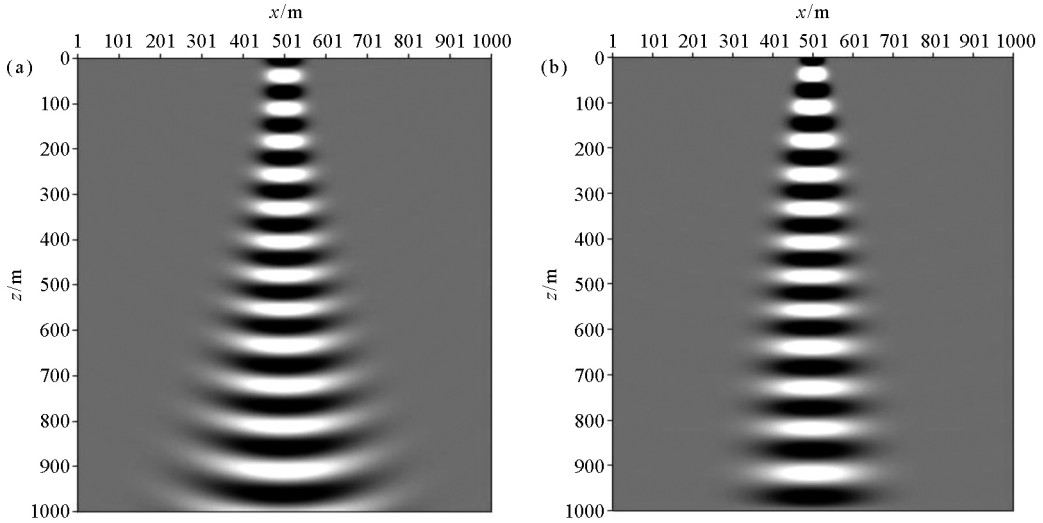
$$r_F(s) = \sqrt{\frac{\pi}{\omega_{\text{ref}}} \frac{q_2(s)}{p_2(s)}}. \quad (7)$$

地震波传播到检波点处的有效半宽度 L_s 可以表示为:

$$Ls = \left\{ \frac{\omega}{2} \text{Im} \left[\frac{p(s)}{q(s)} \right] \right\}^{-\frac{1}{2}}$$

$$= \left\{ \frac{\omega}{2} \text{Im} \left[\frac{\varepsilon p_1(s) + p_2(s)}{\varepsilon q_1(s) + q_2(s)} \right] \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

根据上式可知,地震波传播是射线束的宽度与 ε 有关。图 2 为各向同性介质中不同射线束形态对比



a—高斯射线束;b—菲涅尔束

a—Geometry of Gaussian beam;b—Geometry of Fresnel beam

图 2 各向同性介质中不同射线束振幅实部示意

Fig.2 Comparison diagram of beam geometry in constant velocity model

1.3 走时振幅计算

如图 3 所示,基于 Cerveny 有效邻域波场近似

理论,起伏地表条件下菲涅尔束偏移中地震波传播到检波点 R 处的波场大小可以表示为:

$$U(R, \omega) = A(L) \exp \left\{ i\omega \left[\tau(L) + p_x^L(x - x^L) + p_s^L(z - z^L) + \frac{1}{2} \mathbf{X}^T \text{Re}(W) \mathbf{X} \right] \right\}$$

$$\exp \left[-\frac{1}{2} \left| \frac{\omega}{\omega_{\text{ref}}} \right| \frac{(x - x^L)^2}{l_0^2} + \left| \frac{\omega}{\omega_{\text{ref}}} \right| \frac{(x - x^L)(z - z^L) \sin \theta^L}{l_0^2 \cos \theta^L} - \frac{1}{2} \left| \frac{\omega}{\omega_{\text{ref}}} \right| \frac{(z - z^L)^2 \sin^2 \theta^L}{l_0^2 \cos^2 \theta^L} \right] \quad (9)$$

上式中,第一个指数项为接收点波场相对于束中心波场的相位校正项,第二个指数项为相应的振幅校正项。振幅校正项中的 $-\frac{1}{2} \left| \frac{\omega}{\omega_{\text{ref}}} \right| \frac{(x - x^L)^2}{l_0^2}$ 是由于接收点和束中心水平坐标不一致引起的,在菲涅尔束偏移中表现为局部倾斜叠加的指数衰减项; $-\frac{1}{2} \left| \frac{\omega}{\omega_{\text{ref}}} \right| \frac{(z - z^L)^2 \sin^2 \theta^L}{l_0^2 \cos^2 \theta^L}$ 和 $\left| \frac{\omega}{\omega_{\text{ref}}} \right| \frac{(x - x^L)(z - z^L) \sin \theta^L}{l_0^2 \cos \theta^L}$ 是由于地表高程差异引起的振幅衰减项。相位校正项中 $\tau(L)$ 为束中心的实值走时,在偏移中作为时间的初始值,一般取为零; $p_x^L(x - x^L)$ 是由接收点和束中心水平坐标不一致引起的旅行时差,在菲涅尔束偏移中体现为局部倾斜叠加的线性相位校正项; $p_s^L(z - z^L)$ 是由于地表高程差异引起的线性相位校正项,该项

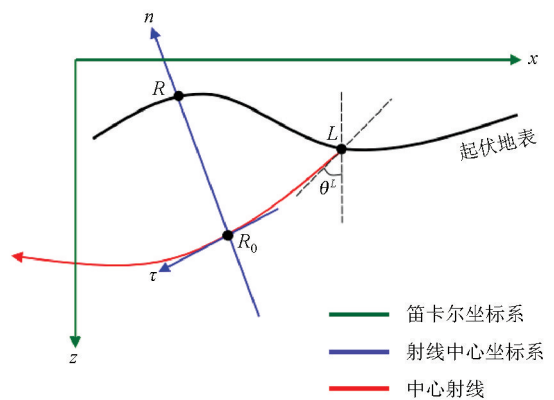


图 3 起伏地表条件下坐标变换关系

Fig.3 The Coordinate transformation relation in topographic surface conditions

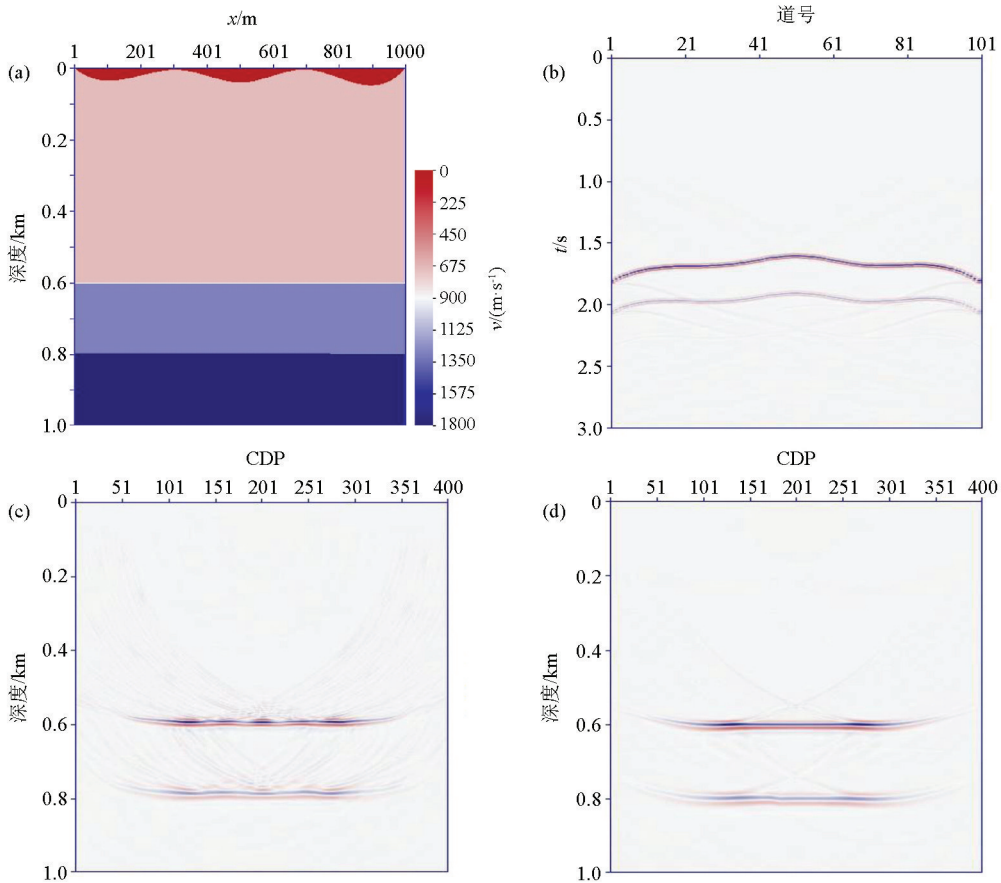
对束偏移保幅成像起到重要作用,在一定程度上改善束偏移成像质量; $\frac{1}{2}X^T \text{Re}(W)X$ 为由起伏地表和近地表速度变化引起的二次时差校正项,当地表高程和近地表速度剧烈变化时此项的影响不可忽略。

2 模型试算

2.1 起伏地表层状模型试算

图 4a 为各向同性介质起伏地表层状模型,模型网格大小为 401×401 , 网格间距为 $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$, 模型

中从上到下层速度分别为 $700、1\ 300、1\ 800 \text{ m/s}$ 。图 4b 为对该模型进行波动方程正演得到的地震波场记录,炮点位于横向位置为 500 m 处的起伏地表上,第一个检波点的横向位置为 0 m , 共有 101 个接收道,道间距为 10 m ,道与道之间横向位置均匀排列,每一个接收道时间采样间隔为 1 ms ,记录长度为 3 s 。图 4c 为复杂地表条件下高斯束偏移结果,图 4d 为基于压缩感知的起伏地表菲涅尔束偏移结果。从偏移结果中可以看出,基于压缩感知的菲涅尔束偏移面对复杂地表条件平面波分解精度更高,成像效果更好。



a—速度模型;b—地震记录;c—高斯束偏移结果;d—基于压缩感知的菲涅尔束偏移结果
a—velocity model;b—seismic record;c—migration of GBM;d—migration result of CS-FBM

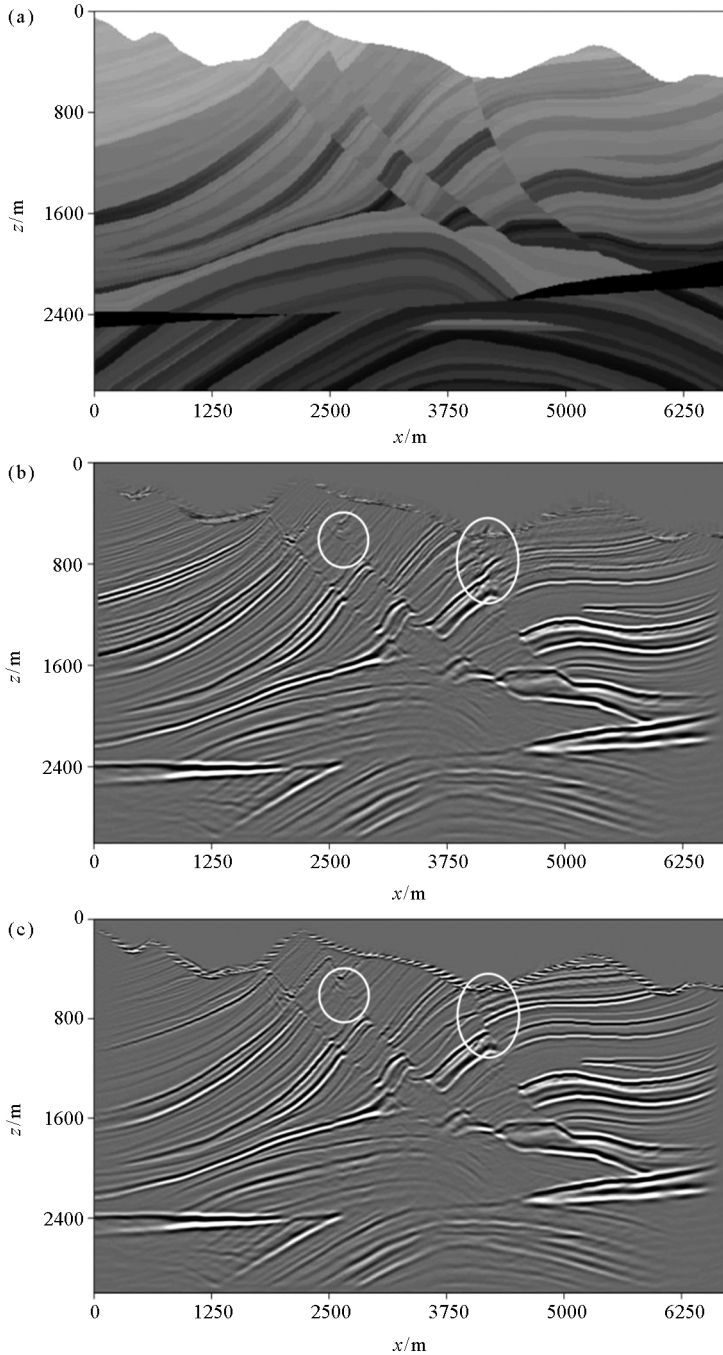
图 4 起伏地表层状模型偏移结果

Fig.4 Migration result of layer model under complex topographic conditions

2.2 起伏地表 Marmousi 模型试算

图 5a 为起伏地表 Marmousi 速度模型,其横向有 737 个网格节点,横向网格间距为 12.5 m ,纵向上有 750 个网格节点,纵向网格间距为 4 m 。地震记录由 240 炮组成,炮间距为 90 m ,每炮有 101 个接收道,道间距为 25 m ,放炮方式为单边放炮,偏移距范围从 $0 \sim 2\ 500 \text{ m}$ 不等,每道有 800 个采样点,采样间隔为 4 ms 。图 5c 中偏移结果分别对应高斯

束束偏移方法和文中的新方法,两种方法的射线角度范围均为 $-50^\circ \sim 50^\circ$,射线数量为 25 根。可以发现两者在模型中深部都可以得到较好的偏移成像效果,但在模型浅部,两种方法的偏移结果有明显差异。首先在起伏地表处,原方法对应的结果在起伏地表处偏移能量断断续续,无规律性可言,而本文方法的偏移结果在起伏地表处的偏移能量规律性更强,其次本文方法的偏移结果信噪比更高,反映的地



a—速度模型;b—高斯束偏移结果;c—基于压缩感知的菲涅尔束偏移结果

a—velocity model;b—migration of GBM;c—migration result of CS-FBM

图5 起伏地表 Marmousi 模型偏移结果对比

Fig.5 Migration result of Marmousi model under complex topographic conditions

质构造更加清晰。对比图中画白圈的断层构造可以发现,高斯束偏移成像剖面中较难识别出断层,而从本文方法对应的偏移结果中,可以较为清晰地识别出断层构造。造成这一现象的主要原因在于高斯射线束宽度在模型浅部较窄,在上述射线参数前提下,难以保证模型浅层的射线覆盖率,而文中新方法拥有初始波束宽度数据从而避免了这一问题。

3 结论

笔者在高斯束偏移算法研究的基础上,针对该方法在局部平面波分解步骤及射线束传播算子中存在的问题,分别使用基于压缩感知的局部倾斜叠加方法和菲涅尔束传播算子改进高斯束偏移算法,理

论模型试算结果验证了对于复杂地表条件下的陡倾构造偏移成像效果,优于常规高斯束偏移算法。

参考文献 (References):

- [1] 赵文智,胡素云,董大忠,等.“十五”期间中国油气勘探进展及未来重点勘探领域[J].石油勘探与开发,2007,34(5):513-520.
Zhao W Z, Hu S Y, Dong D Z, et al. Petroleum exploration progresses during the 10th Five-Year Plan and key exploration domains for the future in China [J]. Chinese J. Petroleum Exploration and Development (in Chinese), 2007, 34(5): 513-520.
- [2] 李振春.地震偏移成像技术研究现状与发展趋势[J].石油地球物理勘探,2014,49(1):1-21.
Li Z C. Research status and development trends for seismic imaging technology [J]. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 2014, 49(1): 1-21.
- [3] Ceveny V. Expansion of a plane wave into Gaussian beams [J]. Studia Geoph. et geod., 1982, 26(2): 120-131.
- [4] Sun J G. The relationship between the first Fresnel zone and the normalized geometrical spreading factor [J]. Geophysical Prospecting, 1996, 44(3): 351-374.
- [5] Gray S H. Gaussian beam migration of common-shot records [J]. Geophysics, 2005, 70(4): 71-77.
- [6] Hu C, Stoffa P L. Slowness-driven Gaussian-beam prestack depth migration for low-fold seismic data [J]. Geophysics, 2009, 74(6): 35-45.
- [7] 岳玉波,李振春,张平,等.复杂地表条件下高斯波束叠前深度偏移[J].应用地球物理,2010,7(2):143-148.
Yue Y B, Li Z C, Zhang P, et al. Prestack Gaussian beam depth migration under complex surface conditions [J]. Applied Geophysics

(in Chinese), 2010, 7(2): 143-148.

- [8] 岳玉波,李振春,钱忠平,等.复杂地表条件下保幅高斯束偏移[J].地球物理学报,2012,55(4):1376-1383.
Yue Y B, Li Z C, Qian Z P, et al. Amplitude-preserved Gaussian beam migration under complex topographic conditions [J]. Chinese. J. Geophys., 2012, 55(4): 1376-1383.
- [9] 孙辉,孙建国.基于子波的波束偏移[C]//中国地球物理2013—第二十二分会论文集,2013.
Sun H, Sun J G. Beam migration based on wavelet [C]// Chinese Geophysics 2013 Proceedings of the 22nd Session, 2013.
- [10] Wu B, Zhu Z, Yang H, et al. High resolution beam forming for 3D common offset Kirchhoff beam migration [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2014: 3837-3841.
- [11] 杨继东,黄建平,王欣,等.复杂地表条件下叠前菲涅尔束偏移方法[J].地球物理学报,2015,58(10):3758-3770.
Yang J D, Huang J P, Wang X, et al. Prestack Fresnel beam migration method under complex topographic conditions [J]. Chinese. J. Geophys., 2015, 58(10): 3758-3770.
- [12] 高成,孙建国,齐鹏,等.2D共炮时间域高斯波束偏移[J].地球物理学报,2015,58(4):1333-1340.
Gao C, Sun J G, Qi P, et al. 2-D Gaussian-beam migration of common-shot records in time domain [J]. Chinese. J. Geophys., 2015, 58(4): 1333-1340.
- [13] Wang H Z, Bo F, Liu S Y, et al. Characteristic wavefield decomposition, imaging and inversion with prestack seismic data [J]. Chinese. J. Geophys., 2015, 58(6): 2024-2034.
- [14] Sun H, Zhang Z, Hu G, et al. Kirchhoff beam migration based on compressive sensing [J]. IEEE Access, 2018, 6: 26520-26529.
- [15] Sun H, Yang F L, Meng F C, et al. A topographic kirchhoff dynamic focused beam migration method based on compressed sensing [J]. IEEE Access, 2018, 6: 56666-56674.

Fresnel beam migration method based on compressed sensing under complex topographic conditions

YANG Fei-Long^{1,2}, YU Dai³, SUN Yuan³

(1. College of the Geoscience and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an 710065, China; 3. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Gaussian beam migration (GBM) is a ray-based seismic imaging method, which can handle multi-arrivals and has good imaging accuracy. However, two problems should be taken into consideration when this method is used in complex topographic conditions: First, the original local plane wave decomposition method has insufficient calculation accuracy, which affects the imaging quality of low signal-noise ratio data. Second, the ray beam propagator is the most important factor for migration accuracy. With the enhancement of the propagation distance, the Gaussian beam width increases rapidly and cannot ensure the imaging accuracy of the near surface and depth structures at the same time. In addition, the insufficient coverage of the Gaussian beam in the shallow part of the model might affect the imaging quality of this region. In order to solve the above problem, the authors apply wave decomposition technique based on compressed sensing theory to the complex surface in Fresnel beam migration. It not only effectively improves the precision of local plane wave decomposition, but also solves the problem that the width of Gaussian beam operator is increased quickly with the increase of propagation distance according to the Fresnel beam operator. Typical numerical examples prove the validity and stability of this method.

Key words: Gaussian beam migration (GBM); compressed sensing (CS); Fresnel beam migration (FBM); complex topography; local plane wave decomposition; beam propagator