

文章编号:1673-5005(2009)06-0036-05

# 多参考速度自适应横向变速深度延拓算子探讨

艾迪飞<sup>1</sup>, 杨 锴<sup>1</sup>, 冯 闯<sup>2</sup>, 王华忠<sup>1</sup>

(1. 同济大学 海洋与地球科学学院, 上海 200092; 2. 川庆地球物理勘探公司, 四川 成都 610012)

**摘要:** 基于傅里叶变换法偏移算子, 利用速度构造对速度场进行分区, 探讨提高裂步傅里叶偏移法成像精度的方法。按速度分区的裂步傅里叶偏移方法一般把速度场分成了高速区和低速区, 这不能适用于强横向变速介质。采取多参考速度的裂步傅里叶偏移方法可适应任意强横向变速介质, 并且采用自适应的速度选取方式能提高成像精度。算法测试结果表明, 多参考速度的参考速度选择方法是合理和稳定的, 能够运用于复杂构造区的叠前或者叠后深度偏移成像。

**关键词:** 多参考速度; 自适应横向变速; 裂步傅里叶延拓算子

**中图分类号:** TE 122. 113 **文献标识码:** A

## Self-adaptive lateral velocity variation depth extrapolator based on multi-reference velocity selection

AI Di-fei<sup>1</sup>, YANG Kai<sup>1</sup>, FENG Chuang<sup>2</sup>, WANG Hua-zhong<sup>1</sup>

(1. School of Marine & Earth, State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Sichuan-Chongqing Geophysical Prospecting Company, Chengdu 610012, China)

**Abstract:** The velocity field was divided into several areas according to the differences of velocity field to improve the imaging precision by split-step Fourier (SSF) operator. The traditional split-step Fourier migration based on two velocity fields of higher-velocity part and lower-velocity part cannot deal with strong lateral velocity variation. The multi-reference velocity in SSF operator can adapt to arbitrary lateral velocity variation in a way of self-adaptive selection. Thus the imaging precision is considerably improved. The test results show that the method of multi-reference velocity is reasonable and steady, and can be used to pre-stack or post-stack depth migration imaging in complex structure area.

**Key words:** multi-reference velocity; self-adaptive lateral velocity variation; split-step Fourier extrapolator

高效、稳定的单程波延拓算子一直是国际勘探地球物理界关注的热点, 其中对于强横向变速介质的适应能力是衡量单程波延拓算子的重要指标之一。传统上, 有限差分法在应对横向变速方面是最好的<sup>[1]</sup>, 但是差分延拓算子的问题是计算效率不高, 在大倾角界面下存在倾角限制, 且在三维偏移成像中存在数值各向异性问题。基于傅里叶变换的波场传播算子主要是在 Stolt<sup>[2]</sup> 和 Gazdag<sup>[3]</sup> 的相移法基础上发展起来的, 为了利用相移法计算效率高的优点, 人们基于摄动理论, 把介质速度的横向变化视为某种背景速度上的小扰动, 提出了一系列频率-波

数( $f-k$ )域的波场传播算子, 以改进它对横向变速的适应能力<sup>[4,8]</sup>。基于傅里叶变换的波场传播算子对横向变速的处理都是以小扰动的摄动理论为基础的, 这对于弱横向变速介质是适用的, 但对于像盐丘模型这样的强横向变速介质, 速度的变化量比背景速度本身的值还要大。在这种情况下, 基于小扰动的展开式可能不收敛或者收敛很慢, 小扰动假设不能成立。因此, 傅里叶变换法偏移算子的精度随着速度横向变化的程度增大而减小, 在强横向变速介质中对陡倾角界面的成像精度受到限制。张叔伦等<sup>[9]</sup>提出了将速度进行构造分区的方法, 在波场延

收稿日期: 2009-06-10

基金项目: 中石油勘探重点实验室开放基金项目(GPKL0701)

作者简介: 艾迪飞(1984-), 男(汉族), 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 研究方向为地震波传播与成像。

拓时将速度场分为高速区和低速区,并分别采用不同的参考速度进行延拓,但当波场变化十分剧烈时,仅仅将速度场分为高速区与低速区并不能很好地提高成像精度。王华忠<sup>[10]</sup>提出了一种可以对速度场进行自适应分块,在每一块区域中最合适的参考速度用裂步傅里叶(SSF)延拓算子进行波场延拓,事实证明,只要适当地选择速度阈值,应用这种策略就不会造成计算成本大幅上升,同时还可以有效地提高成像精度。

## 1 多参考速度选择方法与实现流程

基于裂步傅里叶偏移方法进行的波场外推涉及到参考速度的选择问题,在横向速度变化的情况下选择一组合适的参考速度是不容易的。理论上,若一个外推层上每个空间点都有一个局部的参考速度,且该参考速度等于介质速度可以进行很准确的波场外推。但是,这样做的计算量太大,而且也不必要。若仅仅用一个参考速度进行波场外推,会导致速度摄动量过大,使波场外推的精度降低。一个折衷的方法就是根据速度的横向变化选一组比较合适的参考速度,这样既兼顾到计算精度,又考虑了计算效率。这里提出用如下的方法在任意横向变速情况下进行参考速度的选择:

(1)根据数据试验或者经验,确定一个两相邻参考速度之比的阈值。它反映了横向速度变化的剧烈程度。一般地,定义该阈值大于1.0(若令其小于1.0,步骤2的离散速度值的排序应该按从大到小的降序)。

(2)按增序把离散速度值排成一个一维数列。

(3)把区域速度均值设为零,从左到右一点一点地累积离散速度值。每累加一个速度值就求一次平均值。所用公式为

$$v_{avg}^l = \frac{\sum_{k=1}^{K^l} v_k^{\tilde{m}}(x_i, y_i)}{K^l},$$

其中,在二维情况下 $\tilde{m}=1, 2, \dots, NX$ ,在三维情况下 $\tilde{m}=1, 2, \dots, NX \times NY$ 。式中, $v_k^{\tilde{m}}(x_i, y_i)$ 为排序后的离散速度值; $i$ 为排序前离散速度值的序号; $\tilde{m}$ 为排序后的离散速度值的序号; $K^l$ 为区域 $l^m$ 中离散速度点的个数; $l$ 为参考速度的个数。假如当前点的下一点的速度值和当前点前若干点求出的平均速度的比值大于预置的阈值,可以判断在当前点与下一点之间存在一个速度的跃变。当前点可以作为2个速度区域的分界点。

(4)从分界点出发,重复步骤(3)找下一个分界点,直到遇到排序后的速度数列的最后一个值为止,此时所有的速度分界点均已被找到。

(5)重复步骤(3)和步骤(4)。这一次,当前点对应的累积速度均值与当前点相邻的下一点对应的平均速度值(已经由前面的运算计算出来)的比值大于阈值时,当前点作为速度分界点。直到找到所有的速度分界点。

(6)若速度分界点和速度均值不再变化,停止迭代,否则继续步骤(5)。

可以看到,速度区间的个数就是参考速度的个数,每个区间内的速度均值就是参考速度。这样就可以基于裂步傅里叶偏移方法利用选出的参考速度场进行波场外推。但是,考虑到计算效率的问题,参考速度的个数不应过多,一般不要超过6个。另外,步骤(5)和(6)是可选的。为了把外推后的波场融合在一起,输入的离散速度值和排序后的离散速度值对应的序号要保存下来,否则外推后的波场不能很好地融合在一起。这种方法可以用在二维情形也可以用在三维情形,可以用在叠前深度偏移成像也可以用在叠后深度偏移成像(包括单向波数值模拟)中。如果必要的话,速度的方差也可以参与确定速度变化的边界,但是对偏移成像而言,仅用均值划分速度变化的边界就足够了。

多参考速度裂步傅里叶波场延拓流程见图1。

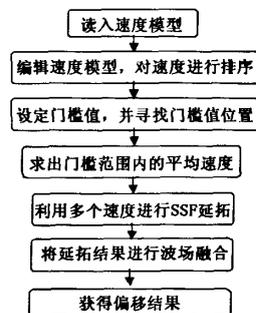


图1 多参考速度裂步傅里叶波场延拓流程

Fig. 1 A work-flow of multi-reference velocity SSF extrapolation

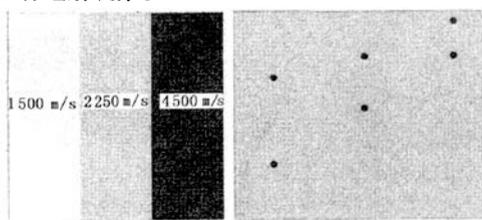
## 2 算法测试与分析

### 2.1 多参考速度 SSF 算法测试与分析

首先通过脉冲响应测试多参考速度 SSF 算法与普通 SSF 算法在强横向变速介质中波场外推时的计算精度。第1组模型见图2。

图2(a)由横向分布的3个块体组成,从左至右

依次为1-439道,440-839道,840-1320道,其最大速度是最小速度的3倍。水平和垂直方向的离散网格数为 $N_x = 1320$ ,  $N_z = 600$ ,纵横向离散间隔分别为6.25 m和12.5 m。图2(b)中,Rick子波的中心频率为15 Hz,子波分别位于每个均匀块的中间位置,即第220道的0.8 s和1.6 s,第660道的0.4 s和0.8 s,第1100道的0.125 s和0.25 s。该模型的理论脉冲响应在每个均匀块体内应该是半圆形,在界面处有透射现象。



(a) 强横向变速速度模型 (b) Rick子波位置(黑点处)

图2 第1组模型

Fig.2 The first group model

基于第1组模型,分别用SSF算子和多参考速度SSF算法进行脉冲响应的试验,得到图3。

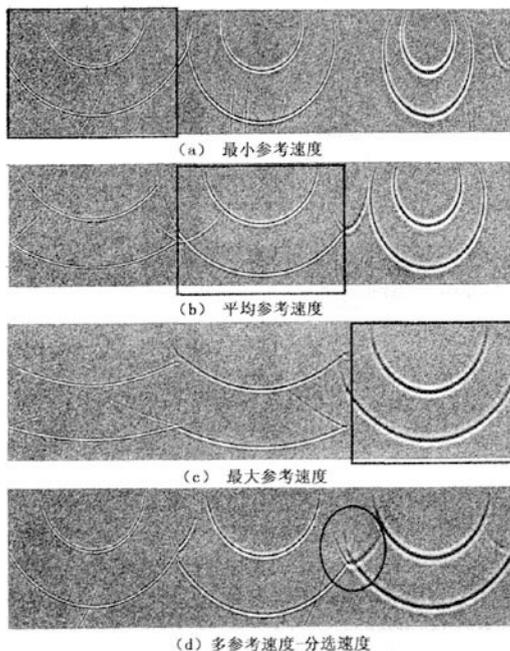


图3 基于不同参考速度的SSF算子响应与多参考速度SSF脉冲响应

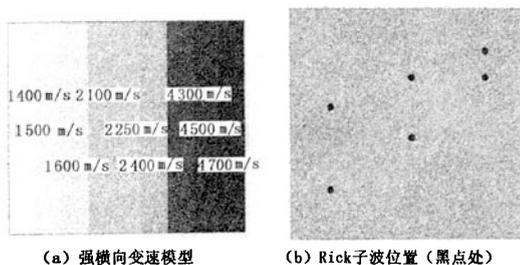
Fig.3 Impulse responses based on SSF extrapolator using different velocity and multi-reference velocity

图3中(a),(b),(c)分别为SSF算子采用1500,

2250,4500 m/s参考速度的脉冲响应。可见当参考速度与实际速度一致时SSF算子是精确的(矩形框内),当参考速度与实际速度差别较大时SSF算子对大角度传播的波有严重的误差。图3(d)为基于SSF算子的多参考速度算法获得的脉冲响应,可以看出在每块介质中,沿任意角度的波都是较精确的,而且透射波也较清晰、准确(圆圈内)。

2.2 多参考速度SSF算法速度分选方式实例

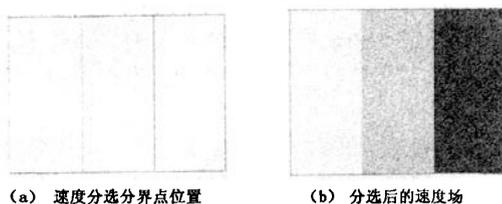
第2组模型见图4。图4(a)中,把第1组模型中的速度模型的每个分块内再分为3个小块,共9个分块,水平和垂直方向的离散网格数为 $N_x = 1320$ ,  $N_z = 600$ ,纵横向的离散间隔分别为6.25 m和12.5 m。脉冲子波参数与第1组模型中相同。基于第2组模型,可以看出多参考速度中的速度界面的确定方式,结果见图5~7。



(a) 强横向变速速度模型 (b) Rick子波位置(黑点处)

图4 第2组模型

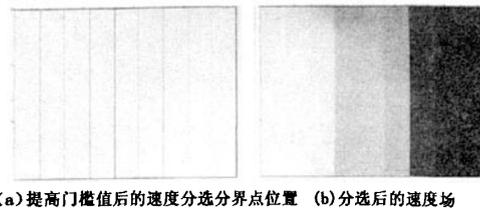
Fig.4 The second group model



(a) 速度分选分界点位置 (b) 分选后的速度场

图5 门阈值为1.3时的速度分选

Fig.5 Velocity sorting with boundary value of 1.3



(a) 提高门阈后的速度分选分界点位置 (b) 分选后的速度场

图6 门阈值为1.01时的速度分选

Fig.6 Velocity sorting with boundary value of 1.01

可以看出,多参考速度SSF算法能够较好的适应横向速度变化。

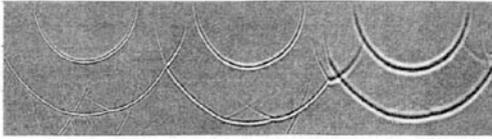


图7 基于第2组模型的脉冲响应

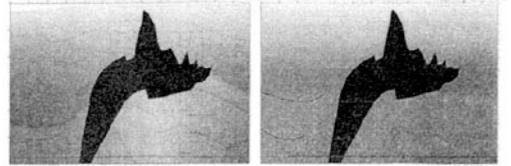
Fig.7 Impulse response based on the second group model

### 3 多参考速度-SSF 算法对 SEG 盐丘模型的应用

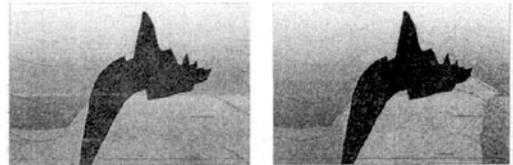
按照以上介绍的多参考速度 SSF 算法实现步骤,首先需要 SEG 盐丘模型进行速度分选(图 8 ~ 12)。图中深色部分为高速度的盐丘体,选择这个模型的原因是盐丘体形状复杂,与周围地层的速度有强烈的反差,用常规 SSF 偏移方法难以得到令人满意的成像结果。

通过 SEG 盐丘模型,证明了多参考速度下的

SSF 算法能够较好地处理强横向变速,提高了成像精度,达到了通过多参考速度的选择优化 SSF 算法的目的。



(a) SEG盐丘原始速度模型 (b) 门阈值为1.3时分选后的速度模型



(c)门阈值为1.2时分选后的速度模型(d)门阈值为1.1时分选后的速度模型

图8 SEG 盐丘速度模型

Fig.8 Velocity model of SEG salt dome



(a) 门阈值为1.3时分界点的位置

(b) 门阈值为1.2时分界点的位置

(c) 门阈值为1.1时分界点的位置

图9 不同门阈值的速度分界点位置

Fig.9 Velocity boundary positions for different boundary value

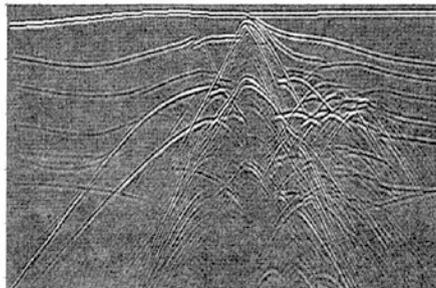


图10 合成爆炸反射面记录

Fig.10 Synthetic zero-offset section with exploding reflector model

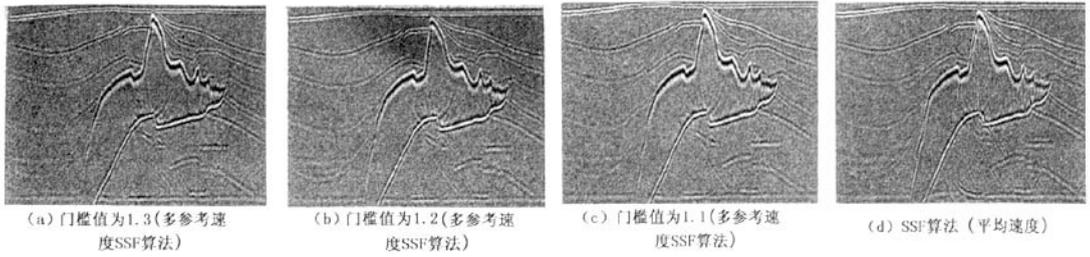


图 11 多参考速度 SSF 算法与 SSF 算法对 SEG 盐丘模型成像效果对比

Fig. 11 Results comparison of SEG dome model between multi-reference velocity SSF method and SSF method

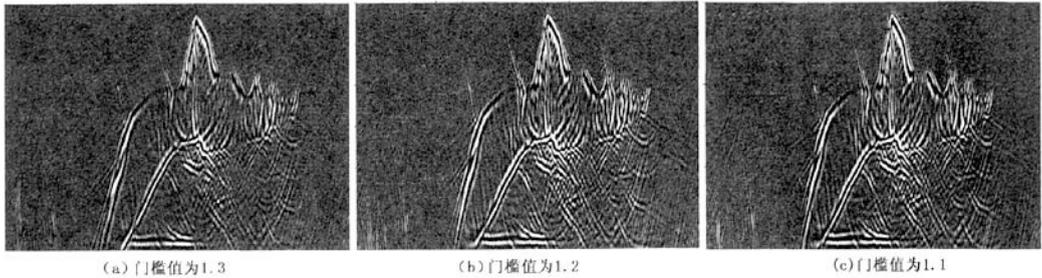


图 12 3 种门槛值下的多参考速度 SSF 算法与常规 SSF 算法成像结果相减的结果

Fig. 12 Results of difference between multi-reference velocity SSF method with three different boundary values and traditional SSF method

### 4 结束语

在研究速度分界面的基础上,基于几套理论模型对多参考速度 SSF 算法进行了脉冲响应测试,并且基于 SEG 盐丘模型对该算法与普通 SSF 算法的结果进行了比较。结果表明,多参考速度的参考速度选择方法是合理和稳定的,可以有效地提高 SSF 算子的精度,该策略能够适用于复杂构造区的叠前或者叠后深度偏移成像。当然在实际应用中,为了在计算精度和计算效率方面得到一个较好的折衷,需要对门槛值的大小进行调整和测试。在需要的情况下,多参考速度的思路同样也可以推广到 FFD、GSP 算子的计算,以进一步提高成像精度。

#### 参考文献:

[1] 马在田. 有限差分偏移成像技术[M]. 北京:石油工业出版社,1989.  
 [2] STOLT R H. Migration by Fourier transform[J]. Geophysics, 1978,43:23-48.  
 [3] CAZDAG J. Wave equation migration with the phase-shift method[J]. Geophysics, 1978,43:1342-1351.  
 [4] STOFFA P L, FOKKEMA J T, DE LYBA FREURE R M, et al. Split-step Fourier migration[J]. Geophysics, 1990,55:410-421.

[5] WU R S, HUANG L J. Scattered field calculation in heterogeneous media using phase-screen propagation[C]//62nd Ann Internat Mtg, Soc of Expl Geophys, Expanded Abstracts,1992:1289-1292.  
 [6] DE HOOP M V, LE ROUSSEAU J H, WU R S. Generalization of the phase-screen approximation for scattering of acoustic wave[J]. Wave Motion, 2000,31:43-70.  
 [7] LE ROUSSEAU J H, DE HOOP M V. Scalar generalized-screen algorithms in transversely isotropic media with a vertical symmetry axis[J]. Geophysics, 2001,66:1538-1550.  
 [8] RISTOW D, RUHL T. Fourier finite-difference migration[J]. Geophysics, 1994,59:1882-1893.  
 [9] 张叔伦,王昌龙,赵景霞,等. 按速度分区的裂步傅里叶叠前深度偏移方法[J]. 石油地球物理勘探,2004,39(6),641-644.  
 ZHANG Shu-lun, WANG Chang-long, ZHAO Jing-xia, et al. Split-step Fourier prestack depth migration by velocity partition[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004,39(6),641-644.  
 [10] 王华忠,李伟波,徐兆林. 自适应横向变速参考速度选择方法[C]//SEG 联络部 2006 年度第一次学术交流会议论文集,2006:60-64.

(编辑 刘为清)