

文章编号:1673-5005(2009)05-0046-04

时移成像条件下的波动方程叠前深度偏移

徐秀刚, 李振春, 叶月明, 仝兆岐, 秦德文

(中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061)

摘要:为提高炮域叠前深度偏移的计算效率,引入时移成像条件进行叠前深度偏移。基于频率空间域有限差分波场延拓算子进行延拓,采用时移成像条件来求取大延拓步长间的层位成像值,成像条件虽然增加一次逆傅里叶变换,但对计算时间的影响却不大。脉冲响应和 Marmousi 模型的测试结果表明,所提出的方法在得到与小步长效果相当的成像结果的同时,又可以成倍地提高计算效率。

关键词:叠前深度偏移;时移成像条件;计算效率;波动方程

中图分类号:P 631.443 文献标识码:A

Prestack depth migration based on wave equation using time-shift imaging condition

XU Xiu-gang, LI Zhen-chun, YE Yue-ming, TONG Zhao-qi, QIN De-wen

(College of Geo-Resources and Information in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of prestack depth migration of shot field, time-shift imaging condition was used for prestack depth migration. Based on frequency space finite difference operator for continuation, the time-shift imaging condition was used to get the imaging results of the layers among the larger continuation step. Though another inverse Fourier transform is needed, it has little effect on the computational efficiency. The impulse and Marmousi model test results show that the proposed method doubles the computational efficiency with the imaging results equivalent to the results of small step.

Key words: prestack depth migration; time-shift imaging condition; computational efficiency; wave equation

波动方程的叠前深度偏移虽然能够适应速度场的强横向变化^[1],但至今还没有应用到常规处理流程中,主要是因为其计算效率低,耗时多。为提高深度偏移的计算效率,Berkhout 提出了快速有效的面炮偏移技术^[2],张关泉和张叔伦等分别将面炮技术应用到有限差分傅里叶有限差分叠前深度偏移^[3-4],Jing 和孙沛勇等提出了基于相位编码的叠前深度偏移^[5-6]技术。上述算法是通过减少运算的炮数来提高效率,但是这种合成偏移是通过将多个入射方向的合成平面波偏移结果相叠加,随着选取的合成源增多,计算效率会随之降低。在深度偏移中应用时移成像条件是另一种提高偏移计算效率的方法,该成像条件在深度聚焦速度分析和角度域 AVA

分析方面都有应用^[7-10]。一般情况下,当延拓步长较大时,步长间的层位成像结果通过上下已知的成像值插值得到,但这样相当于一种数据算法的驱动,和实际情况存在一定误差。笔者应用时移的成像条件,在成像条件中求取到延拓步长间的成像值,在省却插值的同时,得到延拓步长间的层位成像值。

1 方法原理

1.1 基于波动方程的波场延拓算子

从二维声波方程出发

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2(x, z)} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中, $u(x, z)$ 为空间波场; $v(x, z)$ 为介质的速度。

收稿日期:2008-02-28

基金项目:国家“863”计划项目(2006AA06Z206);国家“973”计划项目(2007CB209605);中国石油大学(华东)研究生创新基金项目(B2009-12)

作者简介:徐秀刚(1982-),男(汉族),山东胶南人,博士研究生,主要从事复杂介质偏移成像及共聚焦点偏移成像方面的研究。

在频率-空间域中,式(1)可以表示为

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} = \pm \frac{i\omega}{v(x,z)} \sqrt{1 + \frac{v^2(x,z)}{w^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} \right)} \tilde{u}. \quad (2)$$

其中,下行波场取正号,上行波场取负号。将式(2)用连分式展开并化简后得

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} = \pm \frac{i\omega}{v(x,z)} \left[1 + \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i A}{1 + \beta_i A} \right] \tilde{u}. \quad (3)$$

其中

$$A = \frac{v^2(x,z)}{w^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}.$$

式中, α_i, β_i 为连分式展开系数^[10]。对系数进行优化可以得到适应于不同倾角的优化系数^[11-13]。式(3)即为本文中常用的频率-空间域有限差分法波场深度延拓算子。

1.2 时移成像条件

对于共炮点道集数据进行成像时,传统的做法是通过对下行波和上行波进行互相关提取成像值^[14-16],即

$$R(x, z_1, \omega) = u(x, z_1, \omega) d^*(x, z_1, \omega), \quad (4)$$

$$R(x, z_1, \omega) = \frac{u(x, z_1, \omega) d^*(x, z_1, \omega)}{d(x, z_1, \omega) d^*(x, z_1, \omega) + \epsilon}. \quad (5)$$

式中, ϵ 为保持计算稳定的阻尼因子。成像值是通过下行波和上行波的互相关按所有频率求和得到,也就是通过零时刻成像原理求取。通过在每个深度延拓层位上对成像未叠加的频率域成像值进行逆傅里叶变换,得到了各个延迟时间的成像结果:

$$r(x, \tau(z^i)) = \int_{\omega} R(x, z_1, \omega) \exp(j\omega\tau(z^i)) d\omega, \quad (6)$$

$$\tau(z^i) = (z^i - z_1) / v(x, z^i). \quad (7)$$

其中, $R(x, z_1, \omega)$ 是 z_1 层的成像值,通过依赖于实际层速度 $v(x, z^i)$ 的时间延迟 $\tau(z^i)$,来求取它附近层位 (z_1 层下) 的成像值,这样就相当于在较大延拓步长延拓波场的同时得到延拓层间的层位成像值。明显地,零时刻值就是该层位处的成像结果^[15]。

图 1 是时移成像原理示意图,延拓步长是 $3dz$,也就是直接从 z_1 层延拓至 z 层。常规的叠前深度偏移成像是在每一延拓深度层位上求取该层的成像值,因此无法得到 z^1 和 z^2 层的成像值。应用时移成像条件,可以每隔一步或者几步进行波场延拓,而在没有延拓至的层位(图 1 中的 z^1 和 z^2),通过时移成像条件得到成像值,提高了运算效率。当 $z = z_1$ 时,方程(6)就退回到常规的零时间延迟成像:

$$r(x, \tau(z_1) = 0, z_1) = \int_{\omega} R(x, z_1, \omega) d\omega. \quad (8)$$

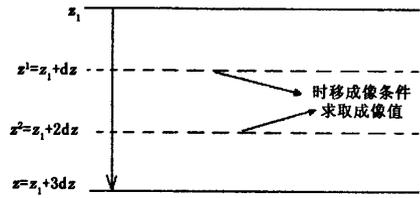


图 1 时移成像示意图

Fig.1 Time-shift imaging condition sketch map

2 模型试算

2.1 脉冲算子试算

模型中选用 2000 m/s 的均匀速度场。横向道间隔是 4 m,共 250 道接收,记录时间是 4 s,4 ms 间隔采样。

应用不同的延拓步长 ($\Delta z = 5, 10, 15$ m) 进行了脉冲响应对比分析,结果见图 2。从图中可以明显看出:延拓步长为 5 m 的脉冲响应,同相轴连续性较好;随着延拓步长的增大,脉冲响应效果明显变差,出现了间断性。图 2(b) 和图 2(c) 对比可以看出,应用了该时移成像条件后,脉冲响应结果得到了明显的改善,与延拓步长为 5 m 的情况下效果相当,但是效率分别提高了 1 倍和 1.5 倍。

2.2 Marmousi 模型试算

为了进一步检验本文方法的有效性,应用 SEG/Marmousi 模型数据对该方法进行了叠前深度偏移试验,单炮记录用 2D 声波有限差分法模拟。横向 497 个采样点,纵向 750 个采样点,速度场水平采样间隔 12.5 m,最大深度是 3 000 m,深度采样间隔为 4 m。数据采样点数是 750,采样率是 4 ms,总采样长度 3 000 ms,总共 240 炮,每炮 96 道接收。Marmousi 模型与不同延拓步长的叠前深度偏移见图 3。

由图 3(b) 看出,由于深度延拓步长较小,满足 Nyquist 采样间隔,所以成像效果较好,不存在假频等现象。图 3(c) 在层间只是应用了一般的插值方法得到的叠前深度偏移剖面,图中的椭圆框内由于延拓步长过大引起了较大的误差。图 3(d) 虽然与图 3(b) 延拓步长均为 $\Delta z = 12$ m,但因应用了本文所示时移成像条件求取了延拓层间的层位成像值,效果得到了明显的改善,误差明显减小,同相轴连续性明显,其整体效果与延拓步长仅为为其 1/3 ($\Delta z = 4$ m) 的成像效果相当,然而效率提高了 3 倍。

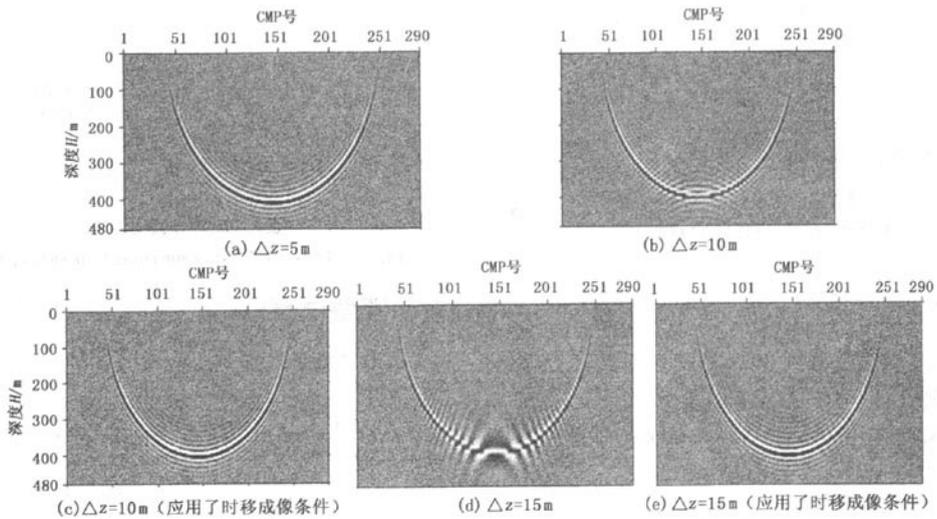


图2 不同延拓步长的脉冲响应测试结果
 Fig.2 Impulse test results with different continuation step

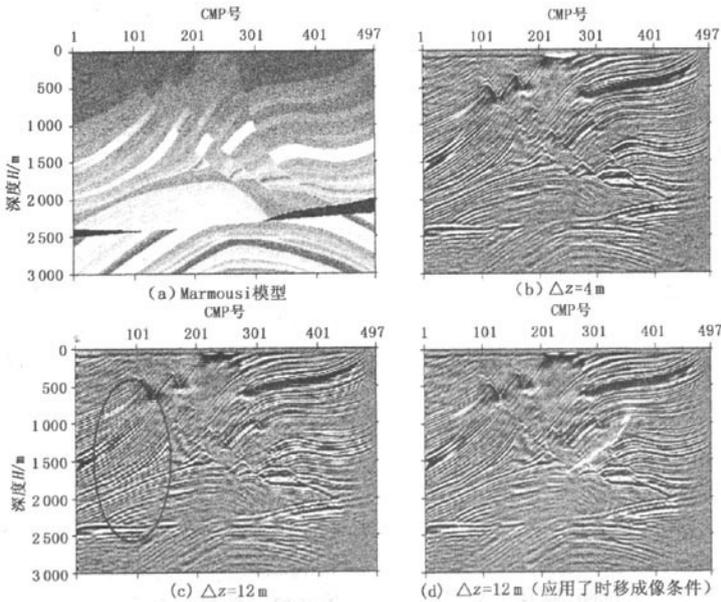


图3 基于不同步长对 Marmousi 模型的叠前深度偏移结果
 Fig.3 Prestack depth migration results of Marmousi model with different continuation step

3 结束语

基于波动方程的叠前深度偏移能够较好地适应速度场的强横向速度变化。本文中通过增大延拓步长来提高叠前深度偏移的运算效率。在延拓步长增大的同时,应用时移成像条件得到了大延拓步长间的层位成像值,由于这种方式考虑了层间的实际速

度,符合波场传播的客观情况,所以它的效果要优于一般的线性插值。该方法可成倍地提高叠前深度偏移的计算效率。

参考文献:

[1] RISTOW D, RUHL T. Fourier finite-difference migration [J]. Geophysics, 1994, 59(12): 1882-1893.

- [2] BERKHOUT A J. Areal shot-record technology[J]. Journal of seismic Exploration, 1992(3):251-264.
- [3] 张叔伦,孙沛勇. 快速面炮叠前深度偏移[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 37(4): 333-338.
ZHANG Shu-lun, SUN Pei-yong. A fast pre-stack depth migration on area 1 shot records[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2002, 37(4): 333-338.
- [4] 赵景霞,张叔伦,孙沛勇,等. 三维并行合成震源记录叠前深度偏移[J]. 地球物理学报, 2006, 49(1):225-233.
ZHAO Jing-xia, ZHANG Shu-lun, SUN Pei-yong, et al. 3-D parallel prestack depth migration of synthetic source records[J]. Chinese J Geophys, 2006, 49(1):225-233.
- [5] JING X, FINN C J, DICKENS T A, et al. Encoding multiple shot gathers in prestack migration[J/OL]. SEG Expanded Abstracts, 2000, 19:1485-1488 [2008-05-25]. <http://www.seg.org/dx.doi.org/10.1190/1.1816188>.
- [6] 孙沛勇,张叔伦,冯恩民. 一种新的相位编码面炮记录叠前深度偏移方法[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(6):711-714.
SUN Pei-yong, ZHANG Shu-lun, FENG En-min. A new method for prestack depth migration of areal shot records with phase encoding[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2003, 43(6):711-714.
- [7] 叶月明,李振春,全兆岐,等. 起伏地表条件下的合成片面波偏移及其并行化实现[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(6):622-628.
YE Yue-ming, LI Zhen-chun, TONG Zhao-qi, et al. Synthetic plane wave migration in relief surface condition and implementation in parallel way[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(6):622-628.
- [8] SAVA P, FOMEL S. Time-shift imaging condition in seismic migration[J]. Geophysics, 2006, 71(6):209-217.
- [9] LIU Shouwei, WANG Huazhong. Time-shift angle domain common image gathers for migration velocity analysis[J/OL]. SEG Expanded Abstracts, 2007, 26: 2797-2801 [2008-05-25]. <http://www.seg.org/dx.doi.org/10.1190/1.2793048>
- [10] SAVA Paul, FOMEL Sergey. Time-shift imaging condition Paul Sava, Sergey fomel. Time-shift imaging condition[J/OL]. SEG Expanded Abstracts, 2005, 24: 1850-1853 [2008-05-25]. <http://www.seg.org/dx.doi.org/10.1190/1.2148063>
- [11] 梁鸿,何潮观,全兆岐. 在频率波数域实现三维叠前深度偏移[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2008, 32(6):62-65.
LIANG Hong, HE Chao-guan, TONG Zhao-qi. Realization of 3D prestack depth migration in frequency wavenumber domain[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(6):62-65.
- [12] 王华忠,马在田,曹景忠. 优化系数傍轴近似方程三维一步法偏移[J]. 石油地球物理勘探, 1998, 33(2):170-184.
WANG Hua-zhong, MA Zai-tian, CAO Jing-zhong. Three dimensional one-pass migration using paraxial approximate equation with optimized coefficients[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1998, 33(2):170-184.
- [13] 程玖兵,王华忠,马在田. 频率-空间域有限差分法叠前深度偏移[J]. 地球物理学报, 2001, 44(3):389-395.
CHENG Jiu-bing, WANG Hua-zhong, MA Zai-tian. Pre-stack depth migration with finited-difference method in frequency-space domain[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2001, 44(3):389-395.
- [14] 李振春,杨敬磊. 平滑算子在地震叠前深度域成像中的应用[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2008, 32(6):47-50.
LI Zhen-chun, YANG Jing-lei. Application of smoothing operator in seismic prestack depth imaging[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(6):47-50.
- [15] MARK Ng. Using time-shift imaging condition for seismic migration interpolation Mark Ng. Using time-shift imaging condition for seismic migration interpolation[J/OL]. SEG Expanded Abstracts, 2007, 26: 2378-2382 [2008-05-25]. <http://www.seg.org/dx.doi.org/10.1190/1.2792961>
- [16] 王立明,刘保华,王揆洋. 等间距地震道插值的傅里叶重建法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2008, 32(6):51-56.
WANG Li-ming, LIU Bao-hua, WANG Kui-yang. Interpolating equal group interval seismic traces by Fourier reconstruction[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(6):51-56.

(编辑 修荣荣)