

文章编号:1673-5005(2008)06-0047-04

平滑算子在地震叠前深度域成像中的应用

李振春, 杨敬磊

(中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061)

摘要:对波动方程叠前深度偏移的成像条件和平滑算子进行了概述, 推导了用平滑算子对成像条件进行平滑的公式, 给出了同一平滑函数在不同平滑参数控制下以及不同平滑函数在相同平滑参数控制下的成像结果。模型试算结果表明: 在合适的平滑参数控制下, 平滑后的成像结果得到了明显改善; 在相同的平滑参数控制下, Gaussian 窗平滑算子平滑后得到的成像结果要好。

关键词:成像条件; 叠前深度偏移; 平滑算子; 地震资料处理

中图分类号:P 631.443 **文献标识码:**A

Application of smoothing operator in seismic prestack depth imaging

LI Zhen-chun, YANG Jing-lei

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

Abstract: The imaging condition and smoothing operator of wave equation prestack depth migration were introduced. The formula used smoothing operator to smooth imaging condition was derived. The results of the same smoothing function with different smoothing parameters and different smoothing functions with the same smoothing parameter were given. The model test results show that the images are improved when the smoothing parameter is appropriate. With the same smoothing parameter, Gaussian smoothing operator can get relatively good imaging result.

Key words: imaging condition; prestack depth migration; smoothing operator; seismic data processing

波动方程叠前深度偏移的成像效果不仅与波场外推^[1]算子的选取有关, 而且成像条件也对成像质量有很大的影响。Claerbout^[2]提出了反射波成像原则, 并且给出了成像条件的相关形式。朱振宇等^[3]通过在商式成像条件分母上加上一个振幅衰减参数消除了入射波场值很小的点, 保证了求解的稳定性。Antoine^[4]通过对入射波场进行平滑处理, 消除了分母项中振幅为零的奇异点。笔者在 Antoine 工作的基础上, 推导用平滑算子对成像条件进行平滑的公式, 并对不同平滑参数和平滑函数控制下的平滑效果进行分析, 以便为这种方法的实际应用提供理论依据。

1 成像条件

为了实现地震偏移成像, 首先要进行上行波场的反向外推。外推后求出的各点波场值; 有的是来

自该点的反射波, 有的是该点下方许多点上的反射波。因此, 要在外推波场中提取成像值。Claerbout 提出的反射波成像原则是, 反射面位于这些点上, 其入射波的初至与反射波的产生时间相同。因此, 可以用该点的反射系数作为反射波成像的基本公式^[5], 即

$$Map(x, z) = u(x, z, t) / d(x, z, t). \quad (1)$$

式中, x, z 分别为反射点的横、纵坐标; t 为入射波的初至; $u(x, z, t)$ 为该点的反射波振幅; $d(x, z, t)$ 为入射波的振幅。

当下行波是最小相位时, 通过 z 变换式(1) 可以写为

$$Map(x, z) = \int U(z) / D(z) d\omega. \quad (2)$$

式中, $U(z), D(z)$ 分别为反射波场和入射波场的频

收稿日期: 2008-02-05

基金项目: 国家自然科学基金(40474041); 国家“863”专题(2006AA06Z206); CNPC 中青年创新基金(04E7040)

作者简介: 李振春(1963-), 男(汉族), 山东齐河人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事地震波传播与正演模拟、地震成像与偏移速度分析、多尺度地震资料联合反演与 CFP-AVP 分析理论与方法的教学与研究工作。

率域形式; ω 为圆频率。把式(2)的分子和分母都乘以上下行波的复共轭函数 $D^*(x,z,\omega)$,则有

$$Map(x,z) = \int \frac{U(x,z,\omega)D^*(x,z,\omega)}{D(x,z,\omega)D^*(x,z,\omega)}d\omega. \quad (3)$$

考虑到分母中的谱密度 DD^* 不含有相位信息,因此反射图像公式可写为^[6]

$$Map(x,z) = \int U(x,z,\omega)D^*(x,z,\omega)d\omega. \quad (4)$$

这就是相关成像条件^[2]。

对于非均匀介质,源波场被严重扭曲,所以必须考虑源场的振幅变化^[7],可以使用公式(3)来成像。由于是非均匀介质,入射波场振幅值很小的点必然存在,因此在公式(3)的分母上加上一个振幅衰减参数 ε 来保证求解的稳定性^[3],即

$$Map(x,z) = \int \frac{U(x,z,\omega)D^*(x,z,\omega)}{D(x,z,\omega)D^*(x,z,\omega) + \varepsilon}d\omega, \quad (5)$$

但 ε 的选择合适与否会直接影响到成像质量。

为了保证有效性和稳定性,可以对式(3)的分母 $D(x,z,\omega)D^*(x,z,\omega)$ 进行平滑,分母平滑后公式(3)可表示为^[4,8]

$$Map(x,z) = \int \frac{U(x,z,\omega)D^*(x,z,\omega)}{\langle\langle D(x,z,\omega)D^*(x,z,\omega) \rangle\rangle}d\omega. \quad (6)$$

式中, $\langle\langle D(x,z,\omega)D^*(x,z,\omega) \rangle\rangle$ 为 $D(x,z,\omega)D^*(x,z,\omega)$ 平滑后的值。

2 平滑算子概述

平滑过程可以被看作是一个褶积过程。对一维函数 $f(x)$ 的平滑可以表示为

$$f_s(x) = s_\alpha * f = \int_{-\infty}^{\infty} s_\alpha(x-\xi)f(\xi)d\xi. \quad (7)$$

式中, x 为函数坐标; ξ 为变量; s_α 为依赖于平滑参数 α 的核函数,平滑参数 α 用来控制平滑的程度。

一个平滑算子的核函数具有如下特性:①正态性, $\int_{-\infty}^{\infty} s_\alpha(x)dx = 1$;②非负性, $s_\alpha(x) \geq 0$;③单调性,对每一个平滑参数 α , s_α 随着 $|x|$ 的增加而减小;④频谱单调收敛,如果 $s_\alpha(k)$ 是 $s_\alpha(x)$ 的傅里叶变换,对所有的 $k \neq 0$,都有 $\lim_{\alpha \rightarrow \infty} s_\alpha(k) = 0$ 。

(1)矩形窗平滑算子。平滑算子的核函数是矩形,定义为

$$s_\alpha(x) = \begin{cases} 1/\alpha, & |x| \leq \alpha/2, \\ 0, & |x| > \alpha/2. \end{cases}$$

式中,平滑参数 α 为矩形窗的长度。

(2)三角窗平滑算子。平滑算子的核函数为三

角形,定义为

$$s_\alpha(x) = \begin{cases} 2(1 - 2|x|/\alpha)/\alpha, & |x| \leq \alpha/2, \\ 0, & |x| > \alpha/2. \end{cases}$$

式中,平滑参数 α 为三角窗的长度。

(3)Gaussian窗平滑算子。平滑算子的核函数为

$$s_\alpha(x) = 1/(\sqrt{2\pi}\alpha)\exp(-x^2/(2\alpha^2)).$$

式中,平滑参数 α 为Gaussian窗的长度。

3 平滑过程

当在深度 z 上成像时,对于一个特定的 ω , $DD^*(x,z,\omega) = D(x,z,\omega)D^*(x,z,\omega)$ 可以看作是

关于 x 的函数,由式(7)得

$$\langle\langle D(x,z,\omega)D^*(x,z,\omega) \rangle\rangle = s_\alpha * DD^* = \int_{-\infty}^{\infty} s_\alpha(x-\xi)DD^*(\xi,z,\omega)d\xi. \quad (8)$$

式中, $s_\alpha(x)$ 为平滑算子,具体应用中可以选择不同的平滑窗函数。将式(8)代入式(6)便可以得到经平滑算子作用后的成像条件。

由式(8)可以看出,对于一个特定的 ω ,经三角窗和矩形窗平滑后的 $DD^*(x,z,\omega)$ 在 x 处的值只是由以 x 为中点、以平滑参数 α 为长度的区间内的值所控制;而Gaussian窗平滑时所有的值都参与平滑,区间内的值起主要作用。所以平滑参数值越大,平滑效果会越好;在相同的平滑参数控制下,Gaussian窗平滑后的效果要好。

4 模型试算

模型采用了胜利油田某实际资料,图1为偏移用速度场。

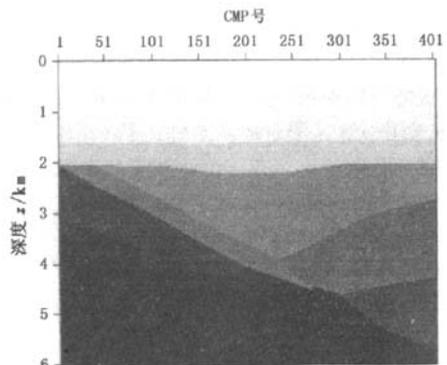


图1 偏移用速度场

Fig.1 Migration velocity field

图1中横向405个采样点,采样间隔为25m;纵

向255个采样点,采样间隔为24 m。共204炮,每炮60道,每炮扩展40道。炮间距和道间距都是50 m。时间采样率是4 ms,1 500个采样点。图2为某单炮记录,可以看到同相轴不连续且含有噪声。

图3~9是用不同的成像条件得到的偏移结果,波场外推均使用的是Fourier有限差分^[9-10]算子。

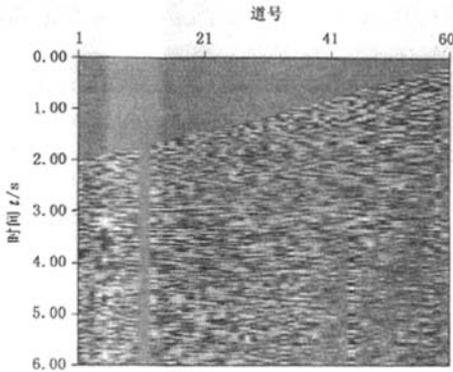


图2 某单炮记录
Fig.2 A shot record

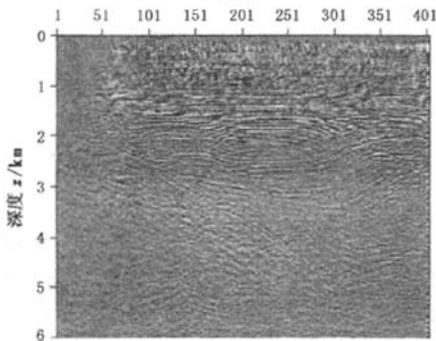


图3 相关成像条件
Fig.3 Correlation imaging condition

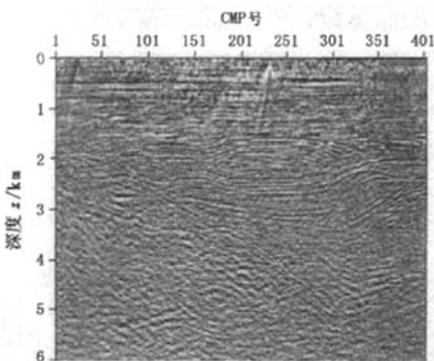


图4 矩形窗平滑($\alpha = 100$)
Fig.4 Rectangle smoothing result($\alpha = 100$)

由于炮记录含有噪声,所有的偏移结果浅

层效果不好。平滑参数取值(单炮接收道数和扩展道数的总和)较小时,浅层效果更差(图4和图6),而平滑参数取值增大后,图5和图7成像结果要明显好于图3。图8和图9虽然平滑参数不同,但结果相当,且均好于图3。

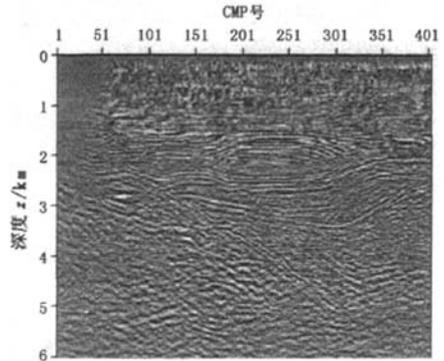


图5 矩形窗平滑($\alpha = 150$)
Fig.5 Rectangle smoothing result($\alpha = 150$)

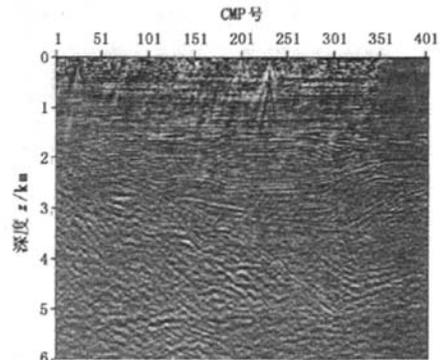


图6 三角窗平滑($\alpha = 100$)
Fig.6 Triangle smoothing result($\alpha = 100$)

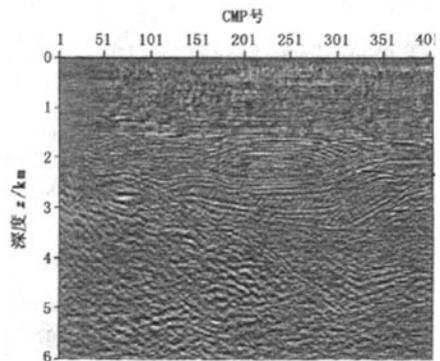


图7 三角窗平滑($\alpha = 150$)
Fig.7 Triangle smoothing result($\alpha = 150$)

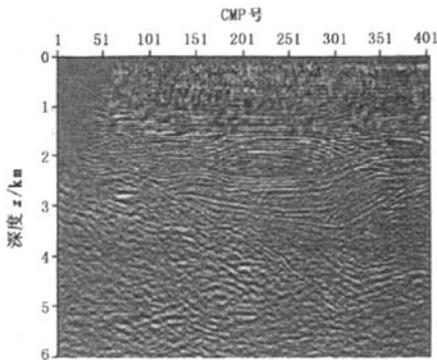


图8 Gaussian窗平滑($\alpha = 50$)

Fig.8 Gaussian smoothing result($\alpha = 50$)

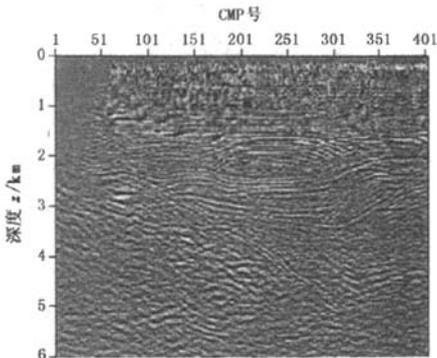


图9 Gaussian窗平滑($\alpha = 100$)

Fig.9 Gaussian smoothing result($\alpha = 100$)

5 结 论

(1) 通过对成像条件进行平滑后可以改善叠前深度偏移的效果。

(2) 对矩形窗和三角窗平滑算子而言,为了保证成像条件的稳定性,平滑参数不宜小于单炮接收道数与扩展道数的总和。当所有道都参与到每一点的成像过程时达到了最佳效果,这时平滑参数等于单炮接收道数与扩展道数总和的两倍。

(3) 影响偏移效果的最根本因素是参与平滑的道数。对Gaussian窗平滑来说,因所有的道都参与平滑,所以不同平滑参数作用下得到的结果相差不大。

参考文献:

[1] 田文辉,李振春,张辉,等.起伏地表条件下的波场上

延法叠前深度偏移[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2006,30(5):19-22.

TIAN Wen-hui, LI Zhen-chu, ZHANG Hui, et al. Wave-field upward continuation pre-stack depth migration based on irregular topography[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006,30(5): 19-22.

[2] CLAERBOUT J F. Toward a unified theory of reflector mapping[J]. Geophysics, 1971,36:467-481.

[3] 朱振宇,刘洪,裴江云,等.成像条件在波动方程叠前深度偏移中的应用[J]. 中国海上油气, 2004,16(3): 177-187.

ZHU Zhen-yu, LIU Hong, PEI Jiang-yun, et al. An application of imaging condition to pre-stack depth migration of wave equation[J]. China Offshore Oil and Gas, 2004, 16(3):177-187.

[4] ANTOINE G, ALEJANDRO V, DIMITRI B. Robust imaging condition for shot-profile migration [J/OL]. SEG Expanded Abstracts, 2006,25:2519-2523. [2007-04-20] <http://link.aip.org/link/? SEGEAB/25/2519/1>.

[5] 李振春.地震成像理论与方法[M].东营:石油大学出版社, 2004:14-15.

[6] VALENCIANO A, BIONDI B. 2D deconvolution imaging condition for shot-profile migration[J/OL] SEG Expanded Abstracts, 2003, 22: 1059-1062 [2007-04-20] <http://link.aip.org/link/? SEGEAB/22/1059/1>.

[7] ZHANG Y G, ZHANG G, BLEISTEIN N. Theory of true-amplitude one way wave equations and true-amplitude common-shot migration[J]. Geophysics, 2005b,70 (4):1-10.

[8] ANTOINE G, ALEJANDRO V, DIMITRI B. Smoothing imaging condition for shot-profile migration[J]. Geophysics, 2007,72(3):149-154.

[9] 马在田.地震成像技术[M].北京:石油工业出版社, 1989:206-207.

[10] 匡斌,王华忠,陈世军,等.傅里叶有限差分深度偏移成像方法研究和应用[J].石油地球物理勘探,2001, 36(6):698-703.

KUANG Bin, WANG Hua-zhong, CHEN Shi-jun, et al. Study and application of Fourier finite-difference depth migration method[J]. OGP, 2001,36(6):698-703.

(编辑 修荣荣)