



Migração 2-D Pré-empilhamento em Profundidade de Ondas Planas Utilizando Técnicas de Correção de Fase em Duas Etapas

Reynam C. Pestana (*), João C. G. Logrado (**), & Paul L. Stoffa (***)

(*) CPGG/UFBA, (**)UN-EXP (PETROBRAS), (***) University of Texas at Austin - IG

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper were reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

We present a depth migration method that is based on double downward extrapolation of seismic data transformed to the source wave number and horizontal ray parameter domain. Initially the data are slant-stacked along the offset direction for each shot and then organized into common ray parameter sections (po section). Each constant po section is migrated separately in a manner similar to a post-stack migration procedure, except for an additional term related to the ray parameter.

The plane wave prestack methods presented in this work are based on the PSPI and Split-step methods. These methods perform the downward continuation of all data by using phase rotation in both frequency-wave number ($w-k$) and frequency-space ($w-x$) domains with operators based on the wave equation. The final image is obtained by summing all migrated frequency components and offset ray parameters section.

The method leads naturally to implementations on parallel computers and is computationally efficient making it viable for a velocity analysis tool in many areas.

The accuracy and efficiency of the prestack depth migration methods developed were tested and evaluated on two different 2D synthetic data sets showing different lateral contrast of velocity, such as the SEG-EAEG salt model and the Marmousi data.

Introdução

Vários métodos de migração têm sido desenvolvidos no domínio da frequência e aplicados aos dados sísmicos ordenados em diferentes configurações. Ottolini e Clearbout (1984) introduziram a migração pré-empilhamento baseada na equação DSR para dados organizados no domínio CMP e decompostos em seções de ondas planas. Pestana et al. (2000) apresentaram um eficiente método de migração pré-empilhamento em tempo, baseado na dupla extrapolção de coleções de tiro comum, previamente transformadas para o domínio $\tau - p$ e organizados em seções de parâmetro de raio de afastamento constante. Esses métodos mostraram bons

resultados em situações de altos ângulos de mergulho e grandes afastamentos, porém possuem a desvantagem de não levar em consideração a variação lateral de velocidade existente no campo de velocidades.

Na presença de variações laterais de velocidade a equação de Helmholtz (domínio $\omega - k$) não possui solução exata. Para contornar este problema duas alternativas são normalmente exploradas na sísmica. A primeira, representada pela técnica PSPI ("Phase-shift Plus Interpolation"), apresentada por Gazdag e Sguazzero (1984), realiza extrapolções com várias velocidades de referências em cada intervalo em profundidade e combina os resultados para gerar a imagem migrada. Uma segunda alternativa, chamada de correção "Split-step", apresentada por Stoffa et al. (1990), baseia-se na decomposição da vagarosidade em um termo constante e um termo de perturbação que leva em consideração as variações laterais de velocidades em cada intervalo de profundidade. Essas técnicas de correção de fase em duas etapas exploram as características essenciais do método "Phase-shift" e trabalham nos domínios $\omega - k$ e $\omega - x$. Além disso, quando implementadas no domínio das ondas planas permitem gerar algoritmos eficientes, capazes de migrar seções individuais de parâmetro de raio de afastamento constante.

Neste trabalho, apresentamos extensões pré-empilhamento dos métodos de migração PSPI e "Split-step" capazes de migrar seções de parâmetro de raio de afastamento constante, selecionadas a partir de dados no domínio tau-p de coleções de tiro comum. Nesses métodos, são realizadas as extrapolções descendentes dos campos de ondas das fontes e dos receptores através de rotações de fase nos domínios $\omega - k$ e $\omega - x$ alternadamente, utilizando operadores baseados na solução da equação acústica da onda. A imagem final em profundidade é obtida através da aplicação da condição de imagem, representada pela soma de todas as componentes de frequência de interesse e pela soma das várias seções de parâmetro de raio de afastamento migradas. Por trabalharem no domínio da frequência e número de onda esses métodos são naturalmente paralelizáveis. A precisão e a eficiência das métodos desenvolvidos foram avaliadas comparando-se os resultados obtidos em testes com dados sintéticos 2-D de diferentes graus de complexidade.

Migração por deslocamento de fase mais interpolação (PSPI)

Na migração pré-empilhamento em profundidade de seções de parâmetro de raio de afastamento constante, utilizando a técnica PSPI, apenas o campo de ondas da fonte é depropagado no domínio $\omega - k$, a cada intervalo de profundidade, utilizando um operador do tipo "Phase-shift", com várias velocidades de referência. No domínio $(\omega, k_s, z; p_o)$ a garantia de extrapolação sem distorção dos pequenos mergulhos ($k_s = 0$), como sugerido por Gazdag e Sguazzero (1984), é válida somente no nosso caso para uma onda plana propagando na vertical ($p_o = 0$). Nesta situação, as operações de deslocamento de fase do campo de ondas da fonte dadas por:

$$P(\omega, k_s, z + \Delta z) = P(\omega, k_s, z; p_o) e^{-ik_z^s \Delta z} \quad (1)$$

são desdobradas em:

$$P^*(\omega, x_s, z + \Delta z; p_o) = P(\omega, x_s, z; p_o) e^{-i \frac{\omega}{v(x,z)} \Delta z} \quad (2)$$

e

$$P(\omega, k_s, z + \Delta z; p_o) = P^*(\omega, x_s, z + \Delta z; p_o) \times e^{-[i(k_z^s - \frac{\omega}{v_j(z)}) \Delta z]} \quad (3)$$

onde k_z^s representa o termo referente a fonte na relação de dispersão, derivada por Pestana et al. (2000), a partir do uso do princípio da invariância dos dados transformados, isto é, $P(k_s, k_g, \omega) = P(k_s', k_o, \omega)$, e das transformações aplicadas às coordenadas das fontes (x_s) e dos receptores (x_g), ou seja:

$$k_z = k_z^s + k_z^r$$

$$k_z = \sqrt{\frac{\omega^2}{v(z)^2} - (k_s - \omega p_o)^2} + \sqrt{\frac{\omega^2}{v(z)^2} - (\omega p_o)^2} \quad (4)$$

Os campos de ondas extrapolados são transformados para o domínio $\omega - x$ e interpolados linearmente com base na relação entre a velocidade verdadeira e a velocidade de referência usada. Finalmente, a imagem migrada em cada nível de profundidade é obtida através de uma correção de fase do campo de onda interpolado, estimada a partir do termo do receptor (Eq. 4), durante a aplicação das condições de imagem:

$$P(x_s, z) = \sum_{\omega} \sum_{p_o} P(\omega, x_s, z; p_o) e^{-i\omega t(x,z)} \quad (5)$$

onde o tempo de trânsito $t(x,z)$, utilizado no cálculo da correção de fase, em cada ponto da malha para cada onda plana p_o , dado por:

$$t(x, z) = \int_0^z \sqrt{\frac{1}{v(x + \Delta x, z')^2} - p_o^2} dz' \quad (6)$$

é calculado através de uma técnica bastante simples de traçado de raios, onde o deslocamento horizontal do raio é dado por:

$$\Delta x = \frac{p_o \Delta z}{\sqrt{\frac{1}{v^2(x, z)} - p_o^2}} \quad (7)$$

Migração "Split-step"

A implementação da técnica de migração "Split-step" (Stoffa et al., 1990) para migrar dados sísmicos antes do empilhamento no domínio das ondas planas também realiza a continuação descendentes apenas do campo de ondas da fonte, através de um operador do tipo "Phase-shift" (Eq. 1). Nesta técnica, o campo de ondas da fonte é extrapolado em dois passos: inicialmente é feito um deslocamento de fase no domínio $(\omega, k_s, z; p_o)$, com o número de onda vertical k_z^s , calculado usando-se a vagarosidade média e em seguida é aplicada uma segunda correção de fase no domínio $(\omega, x_s, z; p_o)$, utilizando o termo de perturbação (Eq. 4), ou seja:

$$P^*(\omega, k_s, z + \Delta z; p_o) = P(\omega, k_s, z; p_o) e^{-ik_z^s \Delta z} \quad (8)$$

e

$$P(\omega, x_s, z + \Delta z; p_o) = P^*(\omega, x_s, z + \Delta z; p_o) \times e^{-i\omega [u(x, z) - u_m(z)] \Delta z} \quad (9)$$

Como na técnica PSPI, o deslocamento de fase relativo à extrapolação do campo de ondas dos receptores é substituído por uma correção de fase no campo de ondas extrapolado, durante a aplicação das condições de imagem:

$$P(x_s, z) = \sum_{\omega} \sum_{p_o} P(\omega, x_s, z; p_o) e^{-i\omega t(x,z)} \quad (10)$$

onde $P(\omega, x_s, z; p_o)$ é o campo de onda extrapolado com o operador "split-step" e o termo $e^{-i\omega t(x,z)}$ corresponde à correção de fase associada às ondas

planas dos receptores, calculada utilizando-se a vagariedade verdadeira de maneira similar ao procedimento descrito para o método PSPI. Este método foi chamado de “Split-step 2” para diferenciá-lo do método proposto por Santos (2000), designado aqui por “Split-step 1”, que aplica a correção de fase com a velocidade verdadeira do meio.

Em comparação com o método PSPI, no método “Split-step” a ordem dos passos no algoritmo de extrapolação do campo de ondas da fonte é alterada permitindo que a correção de fase, agora contida em um único termo, seja aplicada apenas uma vez, tornando o método bastante eficiente computacionalmente.

Resultados Numéricos

Os métodos de migração aqui apresentados foram testados nos modelos SEG-EAEG e Marmousi, modelos estes escolhidos por apresentarem situações realísticas de alta complexidade estrutural. O uso desses modelos teve como objetivo avaliar o desempenho das técnicas de migrações propostas na presença de modelos geologicamente complexos e através dos resultados, avaliar os métodos PSPI e Split-step de seções de ondas planas quanto à eficiência e precisão desses métodos na presença de fortes contrastes de velocidade e mergulhos variados.

O modelo SEG-EAEG 2D mostrado na Figura 1(a) representa uma almofada de sal associada a uma configuração espacial de refletores e falhamentos com razoável complexidade estrutural. O campo de velocidades possui uma malha de $x=675$ por $z=210$, espaçada de 0,02 km em ambas as direções. As seções de parâmetro de raios foram obtidas a partir da decomposição de 675 registros de tiros em 61 parâmetros de raios variando de +0,2 a -0,4 s/km com intervalos de -0,01 s/km.

As migrações do dado sintético SEG-EAEG foram feitas utilizando o campo de velocidade mostrado na Figura 1(a). Em todas as migrações, a imagem em profundidade foi obtida somando-se as 61 seções de parâmetro de raio constante migradas.

As Figuras 1b a 1d mostram os resultados obtidos com os métodos de migração estudados. As diferenças observadas nas imagens em profundidade, devem-se sobretudo à habilidade de cada método empregado em acomodar as variações laterais de velocidade e mergulhos presentes nos modelos. Como era de se esperar no dado SEG-EAEG, o método “Phase-shift”, limitado a meios com variação vertical de velocidade, não obteve êxito na reconstituição da geometria dos refletores (Fig. 1b), enquanto os métodos PSPI e “Split-step 2”, Figuras 1c e 1d, respectivamente, geraram imagens bastante aproximadas dos modelos de subsuperfície.

O dado Marmousi tem se tornado uma referência para avaliar o desempenho de métodos de migração em situações de alta complexidade geológica. Este modelo, baseado em uma situação real – Bacia de Cuanza em Angola, possui feições geológicas complicadas, especialmente as falhas rasas de altos ângulos e as

fortes variações de velocidade associadas à ocorrência de corpos de sal. O campo de velocidade (Figura 2a) é formado por uma malha de 369 pontos da horizontal por 750 pontos na vertical, com incrementos de lateral e vertical de 25 m e 4 m, respectivamente.

Como no procedimento anterior, o dado Marmousi foi transformado para o domínio tau-p. Foram geradas 91 seções de parâmetros de raio (-0,6 a 0,3 s/km, com incremento de 0,01 s/km) e em seguida migradas pelos métodos aqui propostos.

Para efeito de comparação, utilizamos também o método de migração de ondas planas do tipo Kirchhoff desenvolvida por Akbar et al., (1996). Os resultados obtidos com a migração dos dados Marmousi (Figura 2) demonstram que o método “Split-step 2” (Fig. 2b) conseguiu posicionar melhor os refletores, quando comparadas as migrações “Split-step 1”, (Fig. 2c) e Kirchhoff de ondas planas (Akbar et al., 1996) (Fig. 2d) especialmente na região das falhas de alto ângulos e das várias estruturas, que ocorrem nas porções intermediárias dessas falhas.

Conclusão

A análise dos resultados demonstra que os métodos de migração pré-empilhamento em profundidade, desenvolvidos no domínio das ondas planas, apresentam-se como uma nova alternativa de migração para meios com variação lateral de velocidade. A implementação das migrações por deslocamento de fase nesse domínio requer um menor número de operações numéricas, quando comparadas às migrações no domínio do afastamento comum.

A precisão e a eficiência dos métodos desenvolvidos foram avaliadas comparando-se os resultados obtidos em dados sintéticos 2D com diferentes graus de complexidade, como os dados SEG/EAGE e Marmousi que representam situações realísticas de alta complexidade geológica.

A comparação das imagens em profundidade obtidas com os métodos de migração testados, permite concluir que em situações de moderado a fraco contraste de velocidades e mergulhos acentuados, as técnicas de migração do tipo PSPI e “Split-step”, reconstituíram e posicionaram corretamente os refletores gerando as melhores imagens dos modelos, ou seja, os modelos SEG-EAGE e Marmousi foram quase que completamente reconstituídos. Portanto, o método “Split-step 2” apresentou melhores condições para migrar dados nas situações testadas, pois apresentou a melhor relação custo benefício, ou seja, o melhor balanço entre o custo computacional e a qualidade da imagem migrada.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à ANP (Agencia Nacional de Petróleo), PETROBRAS e ao CPGG/UFBA pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho. Reynam Pestana agradece ao CNPq pelo suporte, através de bolsa de pesquisa, processo 300.312/88-1 (RM).

Referências Bibliográficas

Akbar, F. E.; Sen, M. K.; Stoffa, P. L. Prestack plane-wave Kirchhoff migration in laterally varying media. *Geophysics*, v.61, p. 1068 -1079, 1996.

Gazdag, J.; Sguazzero, P. Migration of seismic data by phase shift plus interpolation. *Geophysics*, v.49, p. 124-131, 1984.

Ottolini, R. ; Claerbout, J. F. The migration of common midpoint slant stacks. *Geophysics*, v.49, p. 237-249, 1984.

Pestana, R. C.; Stoffa, P. L.; Santos, J. R. S. B. Plane wave prestack time migration. 53st Ann. Internat. Mtg., SEG, Expanded Abstracts, Calgary, pp. 264-265, 2000.

Santos, J. R. S. B. Atenuação de múltiplas do fundo do mar e Migração pré-empilhamento no domínio das ondas planas. Dissert. de Mestrado. Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil. 2000

Stoffa, P. L.; Fokkema, J.T.; Freire, R. M. L.; Kessinger, W. P. Split-step Fourier migration. *Geophysics*, v.55, p. 410-421, 1990.

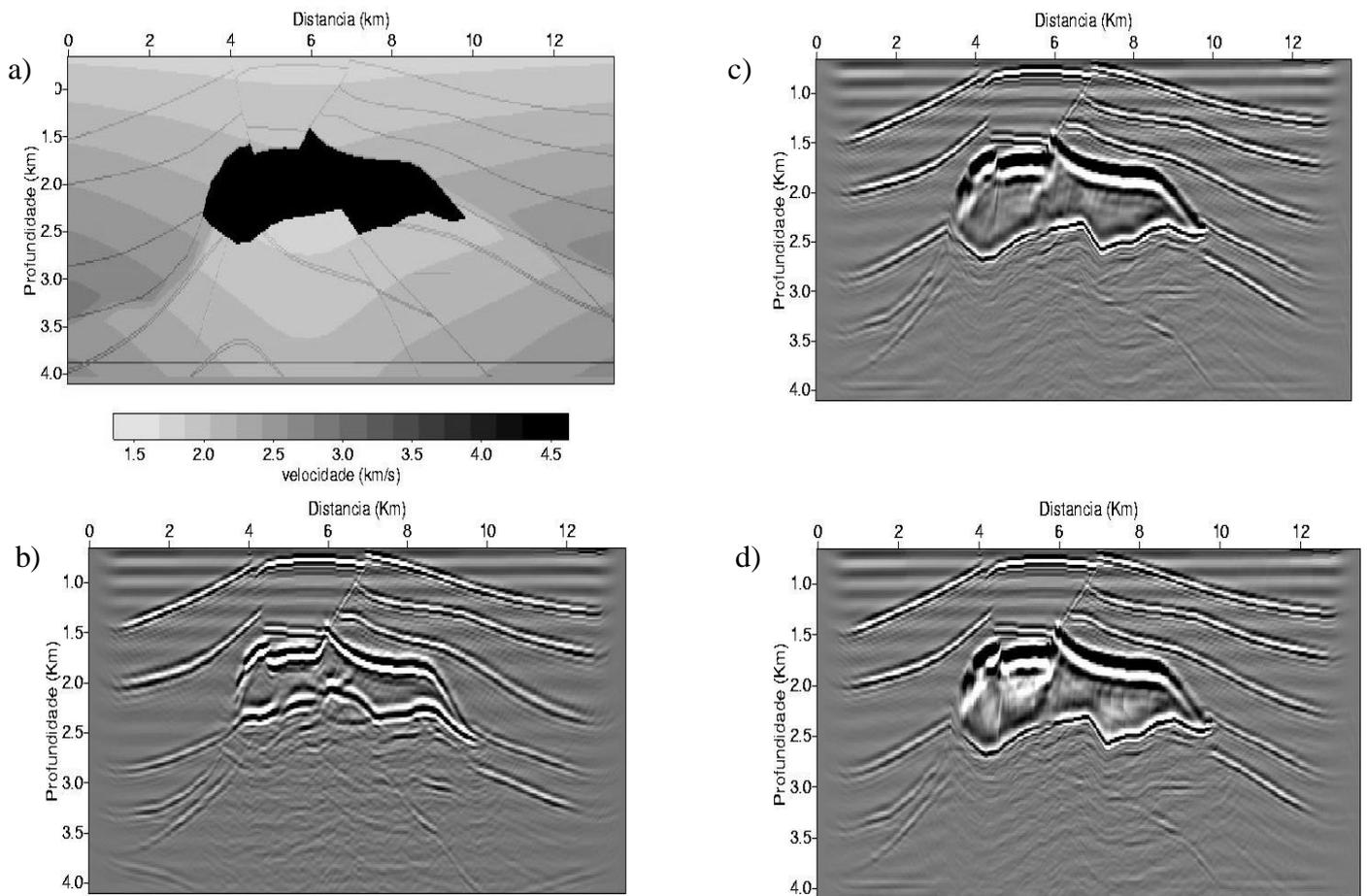


Figura 1: (a) O modelo EAGE-SEG e as imagens migradas com as técnicas (b) "Phase-shift" (c) "Split-step 2" e (d) PSPI utilizando 5 velocidades de referência.

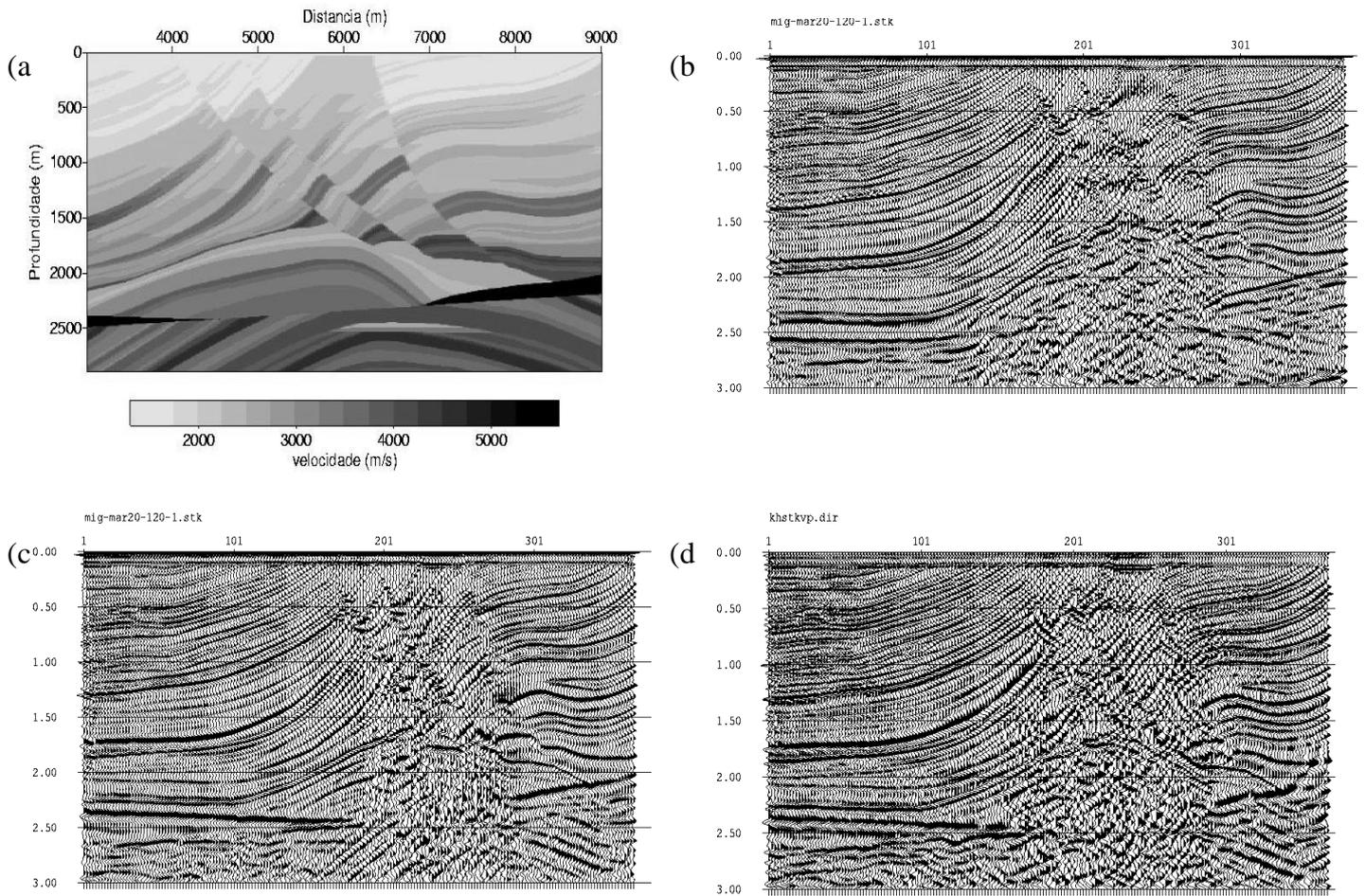


Figura 2: (a) O modelo Marmousi e as imagens migradas com as técnicas (b) “Split-step 1” (c) “Split-step 2” e (d) Kirchhoff de ondas planas.