



Migração Pré-empilhamento de Dados de Fontes de Ondas planas

Celso A. Moreira Neto e Reynam Pestana, CPGG/UFBA, Brasil

Copyright 2005, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do 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

In this paper, we developed a migration methods for plane wave source data seeking to obtain good quality of subsurface images a low computational cost. The prestack migration implemented in this work is accomplished about constant ray parameter section, obtained through the decomposition of the order receiver common gather data taking the $t-p$ transform. These sections are extrapolated in depth using operators based in the acoustic wave equation's solution. The images in depth are obtained by summing all frequencies of interest and all the migrated constant ray parameter sections. The source plane waves methods were applied in synthetic seismic data. The results reached with the new migration methods of plane wave source has proceded images comparable with to those from of common-shot gathers migration

Introdução

O desafio em realizar exploração geofísica em áreas com alta complexidade geológica tem aumentado o interesse da indústria pelos métodos de migração em profundidade baseados em soluções da equação da onda. As migrações a partir de soluções da equação da onda disponíveis na indústria são as migrações baseadas na equação de raiz quadrada dupla (DSR), a migração de tiro comum (SPM) e mais recentemente a migração de ondas planas (PWD). A migração de ondas planas tem tido, mais recentemente, um maior interesse na área de imageamento sísmico (Duquet, et. al, 2001; Liu, et. al, 2002; Zhang, et. al, 2003).

Os dados para a migração de ondas planas são gerados aplicando-se um atraso no tempo nos vários tiros que compõem a linha sísmica. Quando os tiros estão em linha reta a aplicação desses atrasos simula uma fonte de onda plana em uma dimensão ou uma onda circular no caso 2-D. Ou seja, este processo de superposição linear de todos os tiros da linha sísmica consegue sintetizar uma onda plana que cobre toda a área a ser imageada. A migração de uma única onda plana permite imagear a região da estrutura iluminada pelo caminho do raio, associado com essa onda plana. Assim, a migração de várias ondas planas se faz necessário para produzir uma imagem comparável àquela fornecida pela migração de

tiro comum. E neste processo de imageamento é usado um número de migrações de ondas planas, muitas vezes, sempre menor do que o número de migrações de tiro comum, com o objetivo de produzir resultados de qualidade comparável ao da migração de tiro comum, e a um baixo custo computacional.

Com a intenção de obter melhores resultados do que os apresentados pelas técnicas de migração de ondas planas ao longo dos receptores, aplicados no domínio da frequência e número de onda (Santos (2000), Pestana et al., (2000), Pestana et al., (2001), Logrado, (2002)), neste trabalho, estamos propondo o desenvolvimento e a implementação de técnicas de migração em dados sintetizados em ondas planas a partir das seções de tiro comum.

Os métodos de migração para dados de fontes de ondas planas usando o operador de extrapolação Split-Step, apresentados aqui, têm como objetivo conseguir imagens de subsuperfície de boa qualidade e, assim, facilitar a interpretação e a localização de reservatórios de hidrocarbonetos a um baixo custo computacional. As migrações pré-empilhamento implementadas neste trabalho são realizadas sobre seções de parâmetro de raio constante, obtidas através da decomposição de dados ordenados em famílias de receptor comum aplicando-se a transformada τ - p . Em seguida, essas seções são extrapoladas em profundidade usando-se operadores baseados na equação acústica da onda. As imagens em profundidade são obtidas somando-se as frequências de interesse e todas as seções de parâmetro de raio constante migradas. Os métodos de ondas planas foram aplicados em dados sísmicos sintéticos. Os resultados alcançados com os novos métodos de migração de fonte de onda plana foram comparados com os resultados de migração de tiro comum (Aldunate, 2002).

Migração de Ondas Planas

Muitos trabalhos têm investigado o potencial da migração de ondas planas para aumentar a eficiência dos métodos de migração a partir de soluções da equação da onda. Como dissemos inicialmente, os dados sísmicos de fonte pontual são decompostos em ondas planas e isso envolve aplicar um atraso linear a todos os traços de um mesmo tiro. Especificamente, cada seção de receptor comum é transformada em ondas planas usando-se a seguinte transformada:

$$\bar{R}(\omega, x, z=0; p) = \int r(\omega, x, z=0) e^{i\omega p x} dx, \quad (1)$$

onde a correspondente fonte de onda plana, na superfície, $z=0$, é dada por:

$$\bar{S}(\omega, p_s, x, z = 0) = e^{i\omega p_s x}, \quad (2)$$

Uma vez que equação da onda é linear, a condição de imagem de tiro comum pode também ser estendida para a migração de dados de fontes de ondas planas (Jing et al., 2000). Assim, temos que a condição de imagem para a migração de ondas planas é:

$$I(x, z) = \sum_p \sum_\omega \bar{S}^*(\omega, x, z; p) \bar{R}(\omega, x, z; p), \quad (3)$$

onde $I(x, z)$ é seção sísmica final migrada, com $\bar{R}(\omega, x, z; p)$ e $\bar{S}(\omega, x, z; p)$ representando, respectivamente, os campos de ondas planas sintetizadas nos receptores e das fontes, com o parâmetro de raio (p), indicando a direção de propagação da onda plana a partir da superfície de aquisição.

Por sua vez, equação (3) é exatamente a condição de imagem usada na migração de tiro comum. Portanto, a migração de seções de ondas planas pode ser considerada um procedimento equivalente à migração de seção de tiro comum. E assim, essa técnica de migração possibilita o aumento da eficiência computacional das técnicas de migração de tiro comum, pois vários tiros podem ser migrados de uma única vez. Além disso, esse método de migração de ondas planas nos permite realizar a extrapolação dos campos $S(\omega, x, z; p)$ e $R(\omega, x, z; p)$, para a obtenção da imagem migrada, equação (2), usando-se os mesmos operadores de extrapolação usados nas migrações de tiro comum.

Migração de dados de fontes de ondas planas: Método híbrido

Como definido pela equação (3), o processo de imageamento consiste na correlação dos campos das fontes planas e dos dados sintetizados em ondas planas. Portanto, para fazer extrapolação para baixo da seção de onda plana sintetizada, representada por $\bar{R}(\omega, x, z; p)$, que representa o resultado da combinação linear dos dados ao longo dos receptores, podemos, então, por exemplo, usar o operador de extrapolação *Split-Step* (Stoffa et al., 1990). Por outro lado, se quisermos melhorar ainda a eficiência computacional deste método, podemos obter analiticamente, para os casos de modelos de velocidade simples, o tempo de percurso da onda plana, para cada ponto do modelo e assim imagear os dados sísmicos decompostos em ondas planas.

Inicialmente, consideremos o caso em que a velocidade é constante, ou seja, $v=const$. Além disso, que o um modelo de velocidades seja 2-D, neste caso o campo de fonte de onda plana, aplicado na superfície, $z=0$, é dado pela equação (2), ou seja:

$$\bar{S}(\omega, p_s, x, z = 0) = e^{i\omega p_s x},$$

onde $p_s = \sin(\theta)/v$, que é o parâmetro que define a direção de propagação da onda plana inserida no modelo de velocidade.

Neste caso, temos que o campo de onda plana da fonte, em cada ponto do modelo, é dado por (Moreira, 2004):

$$\bar{S}(\omega, x, z; p_s) = e^{i\omega \left(\sqrt{\frac{1}{v^2} - p_s^2} z + p_s x \right)} \quad (4)$$

Se $v=v(z)$, isto é, a velocidade varia apenas com a profundidade, temos que o campo de onda da fonte passa a ser dado agora por (Moreira, 2004):

$$\bar{S}(\omega, x, z, p_s) = e^{i\omega \left(\int_0^z \sqrt{\frac{1}{v^2} - p_s^2} dz + p_s x \right)}. \quad (5)$$

E assim o termo $\int_0^z \sqrt{\frac{1}{v^2} - p_s^2} dz + p_s x$ é exatamente o tempo de trânsito da onda plana, com direção dada por p_s , que emerge da superfície, até o ponto (x, z) do modelo.

Usando o resultado dado pela equação (5) e considerando apenas o tempo de trânsito da onda plana, tem-se que a condição de imagem para a migração das seções de ondas planas, passa a ser:

$$I(x, z) = \sum_{p_s} \sum_\omega R_j(\omega, x, z; p_s) e^{i\omega T(x, z, p_s)} \quad (6)$$

onde, $T(x, z; p_s) = \int_0^z \sqrt{\frac{1}{v^2} - p_s^2} dz + p_s x$.

Assim, a migração das seções de p_s constante fica mais eficiente computacionalmente, uma vez que, mesmo para meios com $v=v(z)$, ainda podemos obter analiticamente os tempos de trânsito das ondas planas.

Para meios em que $v=v(x, z)$, velocidade variando tanto lateralmente com verticalmente, ainda podemos utilizar a mesma condição de imagem dada pela equação (6), mas com os tempos de trânsito da fonte de onda plana fornecida pela solução numérica da equação Eiconal (Faria et al., 1994).

Resultados Numéricos: Modelo SEG-EAGE

Nesta seção apresentamos os resultados obtidos com os métodos de migração pré-empilhamento em profundidade de ondas planas aplicados em um conjunto de dados 2-D sintéticos.

Nesses dados sintéticos serão testados os métodos de migração pré-empilhamento 2-D no domínio das ondas planas e a migração de tiro comum (Aldunate, 2002), com o objetivo de verificar a eficiência deles em migrar estruturas complexas e, assim, tentar identificar suas limitações em tais situações geológicas

O modelo sintético SEG-EAEG foi desenvolvido em parceria entre a SEG e EAGE. Ele Simula uma estrutura geológica de sal com forte contraste de velocidade no meio no qual estão inseridos vários refletores e falhas, tanto acima, como abaixo do corpo de sal. Tal modelo foi baseado numa estrutura existente no Golfo do México e o modelo geológico com o campo de velocidades é mostrado na Figura 1, com velocidades variando de 1523 m/s a 4481 m/s, e foi construído sobre uma malha de 645 pontos na horizontal por 150 pontos na vertical, com 24,38 m de espaçamento em ambas as direções. As velocidades em torno do corpo de sal são típicas dos sedimentos do Golfo do México. O corpo de sal atua como uma lente que dispersa o sinal sísmico. Neste modelo, tem-se ainda uma pequena lente, localizada abaixo do corpo de sal na posição $x=12000$ m e $z=2600$ m.

Os dados do modelo SEG-EAGE foram modelados por diferenças finitas e gerados 375 tiros com 176 geofones espaçados de 24,38 m. Os dados, então, foram amostrados a 8 ms e o tempo total de registro por seção é de 5 s. A seção de afastamento nulo, Figura 2, é mostrada para se ter uma idéia da complexidade da resposta sísmica, quando da presença de um corpo de sal, como descrito acima.

Para esses dados, inicialmente realizamos a sua decomposição em ondas planas, ou melhor, em seções de parâmetros de raio ao longo dos receptores. Cada família de tiro comum, como exemplificado na parte teórica, foi decomposta e em seguida os dados ordenados em seções de p constante. As seções de p comum foram migradas e empilhadas tentando reconstituir o modelo SEG-EAGE em profundidade (Figura 1). As imagens em profundidade, ou seja, as seções migradas foram obtidas somando-se 61 seções de parâmetros de raio, com variação de $-0,0003$ s/m a $0,0003$ s/m o que representam ondas planas com ângulos de incidência na superfície entre -30° a 30° .

A migração dos dados de fontes de ondas planas com o operador *Split-Step*, Figura 3, conseguiu produzir um excelente resultado mostrando uma boa reconstituição de todos os refletores, as falhas e os detalhes do contorno do domo de sal, principalmente, na sua parte superior à direita. Este método, portanto, conseguiu imagear melhor os refletores abaixo do domo de sal, inclusive o flanco íngreme que é uma região de difícil reconstituição. Também o resultado apresentado pelo método híbrido, Figura 4, com os tempos de percurso das ondas planas calculados a partir da solução da equação Eiconal, apresenta os principais refletores bem imageados. O método híbrido foi mais rápido do que o método *Split-Step* anterior, porém, com um resultado inferior, principalmente na região abaixo do corpo de sal.

Verificamos, ainda, que o resultado da migração com o método *Split-Step* de tiro comum (Aldunate, 2002), Figura 5, conseguiu imagear as principais interfaces, o contorno do domo de sal e os refletores abaixo do domo.

Portanto, o método de ondas planas, com operador *Split-Step*, Figura 3, apresenta um resultado muito similar ao

fornecido pelo método de migração de tiro comum (Figura 5), porém a um custo computacional menor.

Conclusões

Como verificamos na seção anterior, os resultados apresentados pelas migrações pré-empilhamento em profundidade de dados de fontes de ondas planas, métodos baseados na solução da equação da onda, de uma forma geral, produziram seções migradas de boa qualidade atestando a capacidade desses métodos em imagear estruturas complexas com fortes variações laterais de velocidades.

Os resultados obtidos com essa nova metodologia de migração, usando fontes de ondas planas, apresentaram com bastante qualidade o modelo SEG-EAGE e com imagens comparáveis a fornecida pelo método de migração de tiro comum.

Os tempos de processamento foram computados em uma máquina Pentium IV, com 2,4 GHz e 2 Gb de memória RAM. O tempo total da migração do modelo SEG-EAGE, método de fontes de ondas planas, com o operador *Split-Step* foi de 2,5 horas. Já o tempo de processamento do método SS-S de tiro comum foi de 11,2 horas. Comparando-se os tempos de processamentos totais, do modelo SEG-EAGE, dos métodos de dados de fontes e ondas planas com operador *Split-Step* com o método *Split-Step* de tiro comum, constatamos que o método de fontes de ondas planas com operador *Split-Step* foi 4,5 vezes mais rápido do que o método de tiro comum. Ou seja, os métodos de migração de fontes de ondas planas forneceram resultados semelhantes ao método de tiro comum, porém a um custo computacional menor.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CTPETRO/CNPq-FINEP pelo apoio à rede Cooperativa de Pesquisa em Risco Exploratório, ANP (Agencia Nacional de Petróleo), PETROBRAS e ao CPGG/UFBA pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- Aldunate, P. G. C., 2002, Migração Pré-empilhamento Usando Operadores de Extrapolação tipo "split-step", Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia.
- Duquet, B., Lailly, P. and Ehinger, A., 2001, 3D Plane wave migration of streamer data, 71st Ann. Mgt., Soc. Expl. Geophysics.
- Faria, E. L. and Stoffa, P. L., 1994, Traveltime computation in Transversely isotropic media, Geophysics, 59:272-281.
- Jing, X.; Finn, C. J.; Dicken, T. A. e Willen, D. E., 2000. Encoding multiple shot gathers in prestack migration, In: 70th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstract.

Liu, F.; Stolt, R. H.; Hanson, D. W. e Day, E. S., 2002 Plane wave source, In: 72th Annual International Meeting, Utah, USA, SEG.

Logrado, J. C. G., 2002, Migração 2-D pré-empilhamento em profundidade utilizando técnicas de correção de fase em duas etapas, Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia.

Moreira Neto, C. A., 2004, Migração pré-empilhamento em profundidade utilizando ondas planas, Tese de Doutorado, UFBA, Salvador, Bahia.

Pestana, R. C.; Stoffa, P. L. e Santos, J. R. S. B., 2000, Plane wave prestack time migration, In: SEG 70th Annual Meeting, pp. 810-813.

Pestana, R. C. e Stoffa, P. L., 2001, Plane wave prestack time migration, Journal of Seismic Exploration, 9:211-222.

Santos, J. R. S. B., 2000, Atenuação de múltiplas do fundo do mar e migração pré-empilhamento no domínio das ondas planas, Dissertação de Mestrado, UFBA.

Stoffa, P. L.; Fokkema, J. T.; Freire, R. M. L. e KESSINGER, W. P., 1990, Split-Step fourier migration, Geophysics, 55(4):410-421.

Zhang, Y., Sun, J. Nottfors, C., Gray, S., Chernis, L. And Young, J., 2003, Delayed shot 3D Prestack depth migration, 65th EAEG Conference & Exhibition, Extended Abstracts.

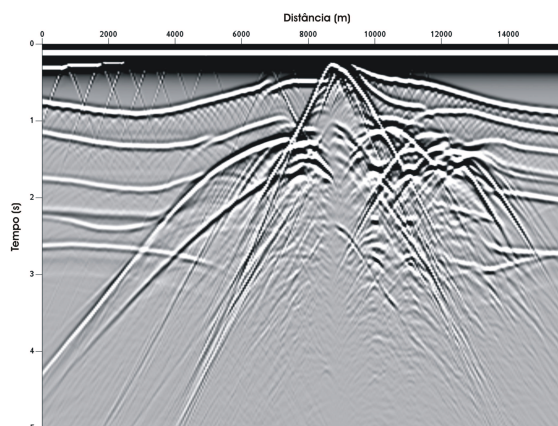


Figura 2: Seção de afastamento modelo SEG-EAGE

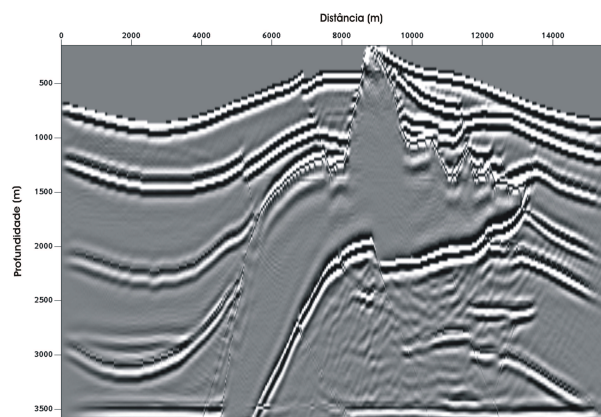


Figura 3: Modelo SEG-EAGE após a migração de dados de fontes de ondas planas com operador *Split-Step*, com 61 seções de p constante.

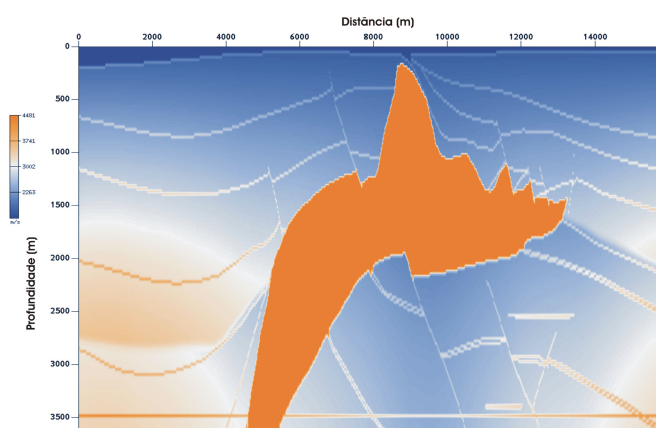


Figura 1: Campo de velocidade do modelo SEG-EAGE simulando uma almofada de sal com vários refletores e falhamentos

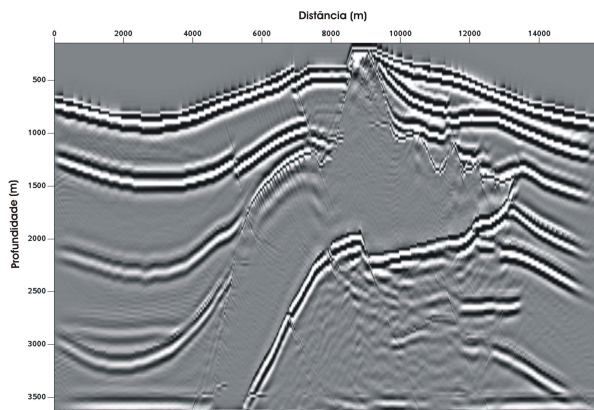


Figura 4: Modelo SEG-EAGE após a migração de dados de fonte de onda plana: método híbrido, com 61 seções de p constante.

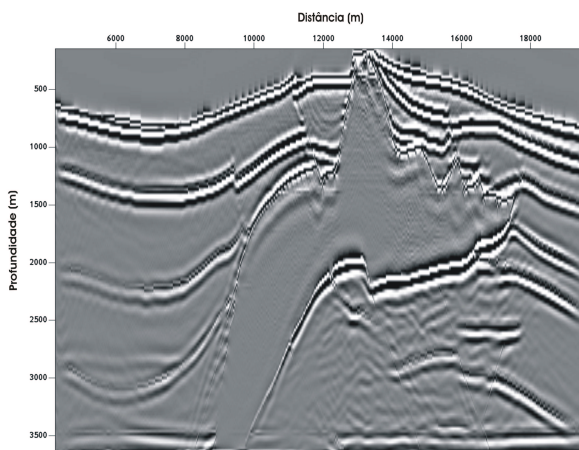


Figura 5: Modelo SEG-EAGE após a migração SS-S de família de tiro comum (Aldunate, 2002).