



Migração Kirchhoff em Profundidade de Seções de Ondas Planas

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 author's 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

Plane wave migration has been employed to increase the efficiency of wavefield extrapolation procedure. The point source records are synthesized into a plane source prior the shot profile migration and the resulting plane wave data can be migrated using the same scheme as the one for conventional shot-record migration. Plane wave migration is one such method to reduce migration, because the extrapolations needs not be done for all the individual shot records, but for the plane wave shot record only.

In this paper we have developed a version of plane wave migration method based on the Kirchhoff integral. Integral methods are easier than the wave equation methods to adapt to different recording geometries and also allow large and small models to be treated the same way. And also, with the aid of the Asymptotic Ray Theory (ART), integral methods can be extended to handle arbitrary velocity structures without any dip limitation. A synthetic example is used to test the theory and the Kirchhoff plane wave depth migration has produced images comparable to those from plane wave migration.

Introdução

A migração é uma das principais etapas do processamento de dados sísmicos que, através da extrapolação do campo de ondas, corrige os efeitos ocorridos durante a propagação do pulso sísmico, coloca as reflexões em suas verdadeiras posições espaciais e colapsa as difrações possibilitando, assim, uma melhor interpretação dos dados sísmicos.

Este procedimento pode ser formulado em termos de dados de pontos de tiro comum, onde cada tiro registrado é migrado separadamente e a seção imagem final é obtida somando-se os tiros migrados individualmente. Considera-se ainda que a fonte sísmica é do tipo fonte pontual.

A migração sísmica de ponto de tiro comum pré-empilhamento, baseada na equação da onda pode produzir imagens de melhor qualidade do que as migrações do tipo Kirchhoff (MK). Para aquisições sísmicas 3-D, este

processo requer um alta demanda computacional, o que limita o seu uso no processamento de dados sísmicos 3-D.

Os métodos de migração utilizando ondas planas têm sido bastante empregados visando aumentar a eficiência computacional da extrapolação dos campos de ondas (Rietveld, 1994; Duquet et al., 2001; Pestana et al., 2001; Liu et al., 2002). Nesses métodos os registros de fonte pontual são sintetizados em registros de fonte de onda plana antes do processo de migração. O campo de onda plana resultante pode ser migrado usando qualquer um dos esquemas utilizados nas migrações convencionais de tiro comum. Portanto, a migração de ondas planas é um dos métodos que visam reduzir o número de extrapolações durante o processo de migração, uma vez que a extrapolação não é feita para todos os tiros individualmente, mas apenas para a seção de onda plana sintetizada. Além disso, a eficiência computacional do método de migração de ondas planas pode ser melhorada através do uso de operadores de propagação baseados na teoria do raio.

Os métodos de migração Kirchhoff, baseados na teoria do raio, são atualmente os métodos de migração mais usados no processamento de dados sísmicos 3D, em razão da sua flexibilidade de aplicação a diferentes geometrias de aquisição e também porque permite que pequenos ou grande volumes de dados sejam tratados da mesma forma. Além disso, eles podem fornecer imagens sísmicas de boa qualidade. Entretanto, a sua aplicação em meios geologicamente complexos requer o cálculo dos tempos de várias chegadas ("multi-path arrivals") de forma que a MK possa imagear adequadamente os dados provenientes dessas áreas.

Para realizar a migração de ondas planas faz-se necessário a continuação para baixo do campo de onda da fonte, que neste caso é uma onda plana, bem com a depropagação dos campos de ondas planas sintetizadas. Visando melhor ainda a eficiência computacional do método de migração de ondas planas, estamos propondo nesta trabalho a sua implementação através do uso de operadores de propagação baseados na teoria do raio.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma versão 2-D Kirchhoff de migração de dados sísmicos sintetizados em onda planas. Para tanto, os tempos de trânsito, tanto da onda plana como da fonte pontual, são calculados através da solução da equação eiconal (Faria et al., 1994), tornando esse método eficiente computacionalmente e, assim, possibilitando a sua futura aplicação em dados sísmicos 3-D.

O método foi testado nos dados sintéticos SEG-EAGE, com resultados bastante satisfatórios a um baixo custo computacional. Também comparamos o resultado da migração kirchhoff de ondas planas com o resultado apresentado pela migração de ondas planas, baseado na equação da onda, com operador de extrapolação "Split-step".

Teoria

A integral de Kirchhoff (Stolt 1987; Schneider 1978) para a continuação do campo de ondas das fontes e dos receptores em profundidade é dado por:

$$P(\mathbf{x}, \omega) = \int d\mathbf{s} \partial_n G(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \int d\mathbf{g} \partial_n G(\mathbf{x}, \mathbf{g}) P(\mathbf{s}, \mathbf{g}, \omega), \quad (1)$$

onde $P(\mathbf{s}, \mathbf{g}, \omega)$ é o campo de onda registrado na superfície, \mathbf{s} é o vetor posição da fonte, \mathbf{g} é o vetor posição do receptor, G é função de Green, $\partial_n G$ é a derivada normal à superfície da função de Green, \mathbf{x} é o vetor posição do espalhador em subsuperfície, ω é a frequência angular e $P(\mathbf{x}, \omega)$ é o campo de ondas extrapolado em profundidade.

Para extrapolar o campo de onda registrado $P(\mathbf{s}, \mathbf{g}, \omega)$, precisamos construir a função de Green. Para meios heterogêneos a função de Green é, normalmente, construída usando-se a teoria assintótica do raio (ART). O operador de continuação para baixo, representado pela função de Green com aproximação ART é dado por:

$$P(\mathbf{x}, \omega) = A(\mathbf{x}) \exp(i\omega t(\mathbf{x})), \quad (2)$$

onde $A(\mathbf{x})$ é o termo de amplitude e $t(\mathbf{x})$ é o tempo de trânsito, dado pela equação eiconal.

Usando a função de Green com aproximação de alta frequência ART e supondo que a amplitude não varia muito com a distância (Hildebrand and Carroll, 1993), então a equação (1) pode ser reescrita como

$$P(\mathbf{x}, \omega) = -\omega^2 \int d\mathbf{s} \partial_n t(\mathbf{x}, \mathbf{s}) A(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \cdot \int d\mathbf{g} \partial_n t(\mathbf{x}, \mathbf{g}) A(\mathbf{x}, \mathbf{g}) \cdot \exp(i\omega[t(\mathbf{x}, \mathbf{s}) + t(\mathbf{x}, \mathbf{g})]) P(\mathbf{s}, \mathbf{g}, \omega), \quad (3)$$

onde $t(\mathbf{x}, \mathbf{s})$ and $t(\mathbf{x}, \mathbf{g})$ são os tempos de trânsito a partir da fonte e do receptor ao ponto espalhador \mathbf{x} , respectivamente, e o termo $\exp(i\omega[t(\mathbf{x}, \mathbf{s}) + t(\mathbf{x}, \mathbf{g})])$ é definido como o operador de atraso.

Para obter o operador de continuação do campo de ondas planas, realizamos a decomposição dos dados registrados $P(\mathbf{s}, \mathbf{g}, \omega)$, em seus componentes de ondas planas através da transformada "slant-stack". Isto é obtido aplicando-se um atraso no tempo a cada tiro (Schultz and Claerbout, 1978). Em outras palavras, cada família de receptor comum é transformado em ondas planas usando-se:

$$P(\mathbf{g}, \mathbf{p}_s, \omega) = \int d\mathbf{s} P(\mathbf{s}, \mathbf{g}, \omega) \exp(-i\omega[\mathbf{p}_s \cdot \mathbf{s}]), \quad (4)$$

onde $P(\mathbf{g}, \mathbf{p}_s, \omega)$ representa a onda plana com vetor parâmetro de raio \mathbf{p}_s .

No domínio da frequência a transformada "slant-stack" pode ser vista como uma transformada de Fourier, fazendo-se $\mathbf{k} = \omega \mathbf{p}_s$. Então, a transformada "slant-stack" inversa é dada por:

$$P(\mathbf{s}, \mathbf{g}, \omega) = \omega^2 \int d\mathbf{p}_s P(\mathbf{g}, \mathbf{p}_s, \omega) \exp(i\omega[\mathbf{p}_s \cdot \mathbf{s}]). \quad (5)$$

Expandindo o tempo de trânsito da fonte $t(\mathbf{x}, \mathbf{s})$ em termos do vetor vagarosidade e do vetor posição do ponto de espalhamento (Akbar et al., (1996)), como segue:

$$t(\mathbf{x}, \mathbf{s}) = \mathbf{p}'_s \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{s}), \quad (6)$$

onde \mathbf{p}'_s é o vetor vagarosidade, ou seja, ele fornece a direção do raio que emerge da fonte até o ponto espalhador.

Em seguida, substituindo as equações (5) e (6) na equação (3) e resolvendo-se as integrais com relação a \mathbf{s} e \mathbf{p}'_s , obtemos:

$$P(\mathbf{x}, \mathbf{p}'_s, \omega) = -\omega^2 \int \exp(i\omega[t(\mathbf{x}, \mathbf{g}) + \mathbf{p}'_s \cdot \mathbf{x}]) \cdot P(\mathbf{g}, \mathbf{p}'_s, \omega) d\mathbf{g}. \quad (7)$$

Para obter a seção final migrada, então aplica-se a condição de imagem, que neste caso implica somar todas as frequências de interesse e, assim, temos no domínio do tempo a seguinte equação

$$P(\mathbf{x}, \mathbf{p}'_s, \tau) = \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \int P(\mathbf{g}, \mathbf{p}'_s, (\tau + (t(\mathbf{x}, \mathbf{g}) + \mathbf{p}'_s \cdot \mathbf{x}))) d\mathbf{g}, \quad (8)$$

onde τ é tempo de intersecção (Stoffa et al., 1981).

Após a aplicação da condição de imagem, $\tau = 0$, a equação (8) se reduz a

$$P(\mathbf{x}, \mathbf{p}'_s) = \int U(\mathbf{g}, \mathbf{p}'_s, (t(\mathbf{x}, \mathbf{g}) + \mathbf{p}'_s \cdot \mathbf{x})) d\mathbf{g} \quad (9)$$

onde

$$U(\mathbf{g}, \mathbf{p}'_s, \tau) = \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} P(\mathbf{g}, \mathbf{p}'_s, \tau)$$

Note que a quantidade $t(\mathbf{x}, \mathbf{g})$, que é o tempo de trânsito do receptor ao ponto espalhador, pode ser calculado simulando-se uma fonte pontual a partir da posição do receptor e a quantidade $\mathbf{p}'_s \cdot \mathbf{x}$ é obtida através do cálculo do tempo de chegada da fonte plana. Portanto, precisamos conhecer apenas a posição do receptor e do espalhador para calcular $t(\mathbf{x}, \mathbf{g})$ e $\mathbf{p}'_s \cdot \mathbf{x}$, respectivamente. O termo $(t(\mathbf{x}, \mathbf{g}) + \mathbf{p}'_s \cdot \mathbf{x})$ é, assim, o tempo de atraso que será aplicado a cada onda plana, durante o processo de migração.

Portanto, a equação (9) representa a integral de Kirchhoff para a continuação de campos de ondas planas. E neste método integral, um atraso no tempo, baseado na distância da fonte a um ponto de referência, é usado para combinar, no domínio da frequência, diferentes registros de tiros comuns. Então, cada campo de onda plana sintetizado (seção \mathbf{p}'_s) é o resultado da superposição de todos os tiros do experimento sísmico. Como no método "areal shot" (Romero et al., 2000) ou "delayed-shot migration method" (Liu et al., 2002; Yu Zang et al., 2003), precisamos empilhar as seções de ondas planas migradas, para com isso reduzir a influência dos termos-cruzados e assim conseguir uma boa imagem de toda a subsuperfície.

Resultados Numéricos

O modelo SEG-EAGE 2D mostrado na Figura (1) representa uma almofada de sal associada a uma configuração espacial de refletores e falhamentos com razoável complexidade estrutural, com extensão de 13,48 km na direção horizontal e 4,2 km na direção vertical. Os dados sintéticos deste modelo foram modelados por diferenças-finitas num total de 675 tiros, com espaçamento de 0,02 km. Cada

família de tiro com 135 canais com intervalo entre receptores de 0,01 m e cada traço com 1250 amostras no tempo a 4 ms de intervalo, totalizando um tempo de registro de 6,0 s. Já o campo de velocidade intervalar é formado por uma malha de 675 na horizontal e 210 pontos na vertical, com espaçamento de 0,02 km em ambas as direções.

A disposição espacial dos refletores no modelo SEG-EAGE é relativamente simples. Como pode ser observado na Figura (1), a parte superior do modelo é formada por refletores levemente inclinados, divididos por duas falhas normais de alto ângulos, posicionadas em torno de 4 e 7 km na direção horizontal. Nesta região as velocidades variam quase que exclusivamente com a profundidade. As estruturas abaixo da almofada de sal são um pouco mais complicadas e estão separadas em cinco blocos por quatro falhas subverticais. Em cada bloco os refletores apresentam mergulhos variados.

A irregular forma da almofada de sal, combinada com o forte contraste de velocidade entre o sal e o meio circundante, causa sérios problemas na construção da imagem em profundidade. As porções do modelo que merecem especial atenção na avaliação dos métodos de migração são: os contornos do corpo de sal; as falhas subverticais, a pequena lente localizada entre 6 e 10 km na direção horizontal e 3 km em profundidade, a estrutura anticlinal com ápice nas coordenadas x e z iguais a 4 e 3,6 km, respectivamente, e o refletor horizontal localizado em 3,8 km de profundidade. Praticamente todas essas feições são difíceis de serem migradas por estarem localizadas abaixo do corpo de sal.

As migrações dos dados sintéticos SEG-EAGE foram feitas utilizando o modelo de velocidades exato mostrado na Figura (1). E as seções finais migradas em profundidade foram obtidas a partir da soma de 61 seções de parâmetro de raio constante, com seções de parâmetro de raio de -0,2 a 0,4 sec/km a um intervalo de 0,1 sec/km.

As Figuras (2) e (3) mostram os resultados das aplicações das migrações pré-empilhamento. As diferenças observadas nas imagens em profundidade devem-se sobretudo à habilidade de cada técnica em acomodar as variações de velocidade e de mergulhos no modelo. As técnicas de migração produziram imagens aproximadamente precisas, especialmente, dos flancos, topo e base da almofada de sal e de parte dos refletores abaixo da profundidade de 2,5 km. O resultado obtido com a migração de onda planas com operador "Split-step" (Figura (2)) apresenta uma melhor definição, principalmente, da região abaixo da almofada de sal.

A migração Kirchhoff de ondas planas gerou a seção em profundidade (Figura 3) com uma boa qualidade e, além disso, a um custo computacional relativamente baixo. Nota-se que não se conseguiu recuperar as estruturas abaixo da almofada de sal, o que é extremamente difícil e constitui-se um dos principais desafios para as atuais técnicas de migração.

Por fim, vale ressaltar que o método de migração kirchhoff de ondas planas apresenta algumas limitações, as quais estão fortemente relacionadas ao cálculo dos tempos de percurso. A utilização de um método mais preciso no cálculo dos tempos de trânsito, com certeza levará a uma melhora bastante significativa na qualidade dos resultados, principalmente na região abaixo do corpo de sal.

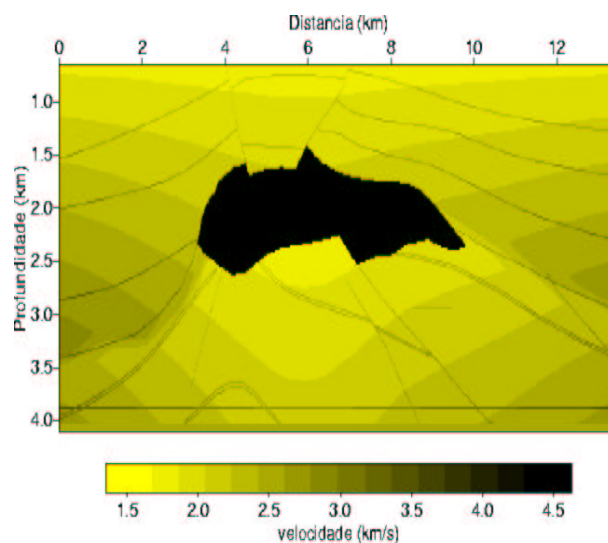


Figura 1: Modelo SEG-EAGE representando uma almofada de sal com vários refletores e falhamentos associados.

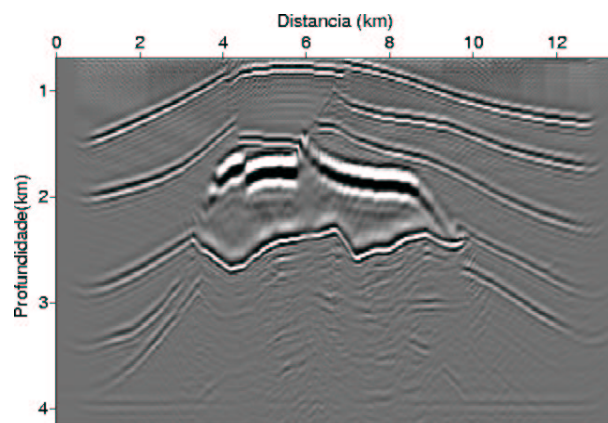


Figura 2: Resultado da migração dos dados SEG-EAGE decompostos em ondas planas utilizando operador de extrapolação "Split-Step"

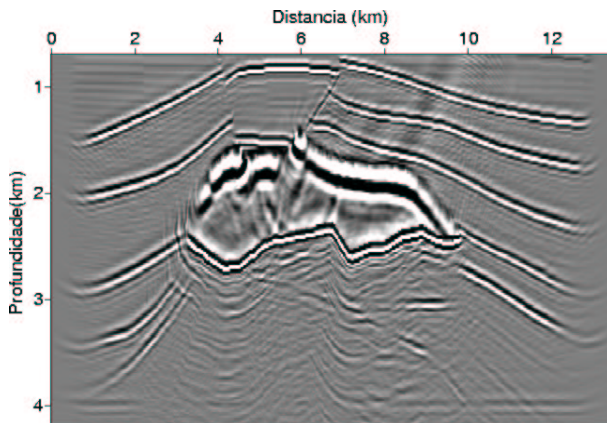


Figura 3: Resultado da migração kirchhoff dos dados SEG-EAEG decompostos em ondas planas. Operador de extrapolação construído com base na teoria assintótica do raio (ART).

Conclusões

A análise dos resultados demonstra que o método de migração pré-empilhamento em profundidade do tipo Kirchhoff, desenvolvido no domínio das ondas planas, se apresentam como uma nova alternativa de migração para meios com variação lateral de velocidade. A precisão e a eficiência dessa técnica foram avaliadas comparando-se os resultados obtidos em dados sintéticos 2D com certo grau de complexidade. Os dados SEG-EAEG foram escolhidos por representar uma situação realística de alta complexidade geológica.

No modelo SEG-EAGE, que representa uma almofada de sal e suas adjacências, a migração com o operador "Split-step" gerou uma imagem bastante aproximada do modelo original. Também o resultado apresentado pela migração Kirchhoff mostrou uma imagem de boa qualidade obtida a um custo computacional relativamente baixo. Os resultados obtidos são bastantes animadores, pois o modelo em profundidade foi quase que completamente reconstituído. Apenas partes dos refletores bem abaixo da almofada de sal não foram recuperadas, devido aos fortes contrastes de velocidade e altos mergulhos.

Comparando-se as imagens em profundidade obtidas com as técnicas de migração testadas, podemos concluir que em situações de forte contraste de velocidades e mergulhos acentuados, as técnicas de migração de ondas planas dos tipos "Split-step" e Kirchhoff conseguiram posicionar corretamente os refletores, gerando boas imagens migradas do modelo. Ou seja, o modelo SEG-EAGE foi quase que completamente reconstituído pela técnicas de migração Kirchhoff proposto neste trabalho.

Agradecimentos

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

Referências Bibliográficas

- Akbar, Faruq E. and Sen, M. K. and Stoffa, P. L.**, 1996, Prestack plane-wave Kirchhoff migration in laterally varying media, *Geophysics*, 61:1068-1079
- 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.
- Hildebrand, S. T. e Carroll, R. J.**, 1993, Radon depth migration, *Geophysical Prospecting*, 41:229-240.
- Liu, F., Stolt, R. R. H., Hanson, D. W. and Day, R. S.**, 2002, Plane wave source composition: an accurate phase encoding scheme for prestack migration. 72nd Ann. Mgt., Soc. Expl. Geophysics.
- Pestana, R. C., Stoffa, P. L. and Santos, J. R. S. B.**, 2001, Plane wave prestack time migration, *JSE*, 9,211-222.
- Rietveld, W. E. A. and Berkout, A. J.**, 1994, Prestack depth migration by means of controlled illumination, *Geophysics*, 59, 801-809.
- Romero, L. A., Ghiglia, D. C., Ober, C. C. and Mortom, S. A.**, 2000, Phase encoding of shot records in prestack migration, *Geophysics*, 65, 426-436.
- Schneider, W. A.**, 1978, Integral formulation for migration in two and three dimensions, *Geophysics*, 43:49-76
- Schultz, P.S., Claerbout, J.F.**, 1978, Velocity estimation and downward continuation by wavefront synthesis: *Geophysics*, Vol. 43, 691-714.
- Stolt, R. H.**, 1978, Migration by Fourier transform, *Geophysics*, 43:23-48.
- 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.