



Imageamento WCDP 2D em profundidade: uma versão para meios lateralmente homogêneos

Roseane M. Misságia, Viatcheslav Priimenko, LENEP/UENF, Macaé, Brasil, Andrey Kremlev, Academia Russa de Ciência, Novosibirsk, Rússia, Djalma M. Soares Filho, PETROBRAS S/A, 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

This paper presents some results of implementation of a pre-stack migration procedure based on the Wave Analogue of the Common Depth Point (WCDP) method. The method is based on the exact solution of an inverse acoustic scattering problem, considered in the Born approximation. We analyze the performance of the WCDP migration considering a depth variant of the algorithm.

Introdução

Os métodos *common depth point* (CDP) (Mayne, 1962; Mesbey, 1985) e os diferentes tipos de migração da equação da onda são as bases para o processamento de dados sísmicos (Bleistein, Cohen et al., 2001). Todavia, além de posicionar corretamente as estruturas geológicas em subsuperfície, é possível propor um método que também infira sobre as propriedades físicas das rochas, através das informações contidas nos sismogramas. Matematicamente, esse tipo de imageamento tem sido tratado com sucesso, como um problema de inversão sísmica do campo de onda espalhado.

Baseado nisso, a meta desse trabalho é analisar a viabilidade do método WCDP 2D em profundidade, através do teste do algoritmo proposto, em dados sintéticos e reais.

O método WCDP (Kremlev, 1985; Kremlev, Priimenko, et al., 2002; Priimenko, Soares Filho, et al., 2002; Misságia, 2003) tem sua formulação original fundamentada na solução matemática exata do problema de espalhamento inverso da onda acústica, linearizado através da aproximação de Born. O WCDP leva em consideração as características da onda espalhada e o processo completo de refração, permitindo o acúmulo do sinal simultaneamente com o desenvolvimento de um operador de imageamento. Isso promove um incremento na razão sinal/ruído (S/N) da seção resultante, permitindo realizar a ideologia do método CDP, e efetuar a análise de velocidades do meio. Na próxima seção apresentamos o embasamento teórico para essa metodologia.

Metodologia

Extensão da fórmula do somatório WCDP 2D em tempo para profundidade. A fórmula do somatório do método WCDP 2D em tempo é (Kremlev, 1985):

$$\beta(x, z) = (2\pi)^{-3} \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega \int_{-\infty}^{+\infty} dk \int_{-\infty}^{+\infty} dk_0 e^{i(k+k_0)x} \varphi_c(k, k_0, \omega) u(k, k_0, \omega) \quad (1)$$

onde a função $u(k, k_0, \omega)$ é o espectro do campo registrado,

$$\varphi_c(k, k_0, \omega) = \theta(\xi^2 - k^2) \theta(\xi^2 - k_0^2) \times |\xi|^{-1} \sqrt{\xi^2 + kk_0 + \sqrt{\xi^2 - k^2} \sqrt{\xi^2 - k_0^2}} \times \exp[-iz(\sqrt{\xi^2 - k^2} + \sqrt{\xi^2 - k_0^2})]$$

é o núcleo do operador de focalização, $\theta(\cdot)$ é a função Heaviside e $\xi = \omega c^{-1}$.

A fórmula do somatório (1) pode ser estendida para modelos, onde a velocidade de referência c varia em ambas as direções, lateral e profundidade. Contudo, a dependência de $C(x, z)$ com relação às X e Z , conduz à integral com respeito a variável dual à X não a integral de Fourier. Por esta razão, o integrando com respeito a variável ω não pode ser reduzido para a integral de Fourier. Em tais circunstâncias, não é possível aplicar o algoritmo de *FFT* para minimizar o custo computacional do cálculo da função de visualização $\beta(x, z)$. Baseado nisso, formulamos uma versão do método WCDP considerando o caso quando a velocidade de referência é uma função da variável Z , $c=c(z)$. Nessa versão do algoritmo WCDP em profundidade, leva-se em consideração somente o aspecto cinemático das ondas, ou seja, não se considera o dinâmico (coeficientes de reflexão). Entretanto, o aspecto cinemático é suficiente para testar essa variação do método em profundidade. Com esse intuito é conveniente reescrever a fórmula anterior mudando a ordem de integração com respeito as variáveis ω e μ (Misságia, 2003; Soares Filho, Priimenko, et al., 2004):

$$\beta(x, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} d\mu e^{i\mu x} \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega \varphi_{c(z)}(k, k_0, \omega) u(k, k_0, \omega) + c.c. \quad (2)$$

onde

$$\varphi_{c(z)}(k, k_0, \omega) = \theta(\xi^2(z) - k^2) \theta(\xi^2(z) - k_0^2) \times |\xi(z)|^{-1} \sqrt{\xi^2(z) + kk_0 + \sqrt{\xi^2(z) - k^2} \sqrt{\xi^2(z) - k_0^2}} \times \exp[-i\psi(z, k, k_0, \omega)]$$

com a função ψ definida pela fórmula

$$\psi(z, k, k_0, \omega) = \int_0^z d\zeta (\sqrt{\xi^2(\zeta) - k^2} + \sqrt{\xi^2(\zeta) - k_0^2})$$

$$e \ k = v + \frac{\mu}{2}, \quad k_0 = -v + \frac{\mu}{2}.$$

Promovemos através da fórmula (2) a alteração no módulo do algoritmo responsável pelo cálculo da $\beta(x, z)$:

```
for( $\omega = 0; \omega < \omega_{\max}; \omega += \Delta\omega$ )
{
  for( $\mu = -\frac{\mu_{\max}}{2}; \mu < \frac{\mu_{\max}}{2}; \mu += \Delta\mu$ )
  {
    for( $v = -\frac{v_{\max}}{2}; v < \frac{v_{\max}}{2}; v += \Delta v$ )
    {
      for( $z = 0; z < z_{\max}; z += \Delta z$ )
      {
        if( $z = 0$ ) $\psi = 0$ ;
        if( $z = 0$ ) $\psi += (\sqrt{\xi^2 - k^2} + \sqrt{\xi^2 - k_0^2})\Delta z$ ;
         $\beta(\mu, z) += \varphi_{c(z)}(k, k_0, \omega)e^{-i\psi}u(\mu, v, \omega)$ ;
      }
    }
  }
}
```

Nessa parte do procedimento, obtemos a função $\beta(\mu, z)$ após a aplicação da fórmula (2) com respeito as variáveis ω e c . Para obtermos a função $\beta(x, z)$ em termos de coordenadas (x, z) devemos fazer uma transformada de Fourier inversa com respeito a variável μ .

Na seqüência, define-se $\Delta z_j, c_j, \theta_j$, como sendo a menor espessura, a velocidade da onda longitudinal na camada j e o ângulo de incidência do raio na borda j , respectivamente. A partir de informações da borda j e deslocamento x do receptor, calcula-se o parâmetro de Snell $P_j(x) \in [0, 1]$, onde o raio refletido nessa borda, alcança o receptor. Através da fórmula

$$t_N(P) = 2 \sum_{j=0}^{N-1} \frac{\Delta z_j}{c_j \sqrt{1 - P^2 c_j^2}} \quad (3)$$

calculamos o tempo de percurso $t_j = t_j(x)$ da fonte até a borda de reflexão e receptor. A partir disso, podemos escrever a seguinte aproximação para o sinal registrado no receptor, considerando as reflexões primárias de todas as bordas.

$$S(x, t) = \sum_{j=0}^{N_{\max}} \frac{S_0(t - t_j)}{I_j} \quad (4)$$

onde $S_0(t)$ é a forma da onda. Na fórmula (4) o coeficiente

$$I_j = \sum_{k=0}^{j-1} \frac{2\Delta z_k}{\sqrt{1 - P^2 c_k^2}}$$

é o caminho total da onda refletida na borda.

Resultados

Exemplo de dados sintéticos. A seguir analisamos os resultados sintéticos, obtidos através da implementação numérica do algoritmo WCDP 2D em profundidade para os seguintes modelos:

- Modelo composto de camadas planas e paralelas.
- Modelo anterior, acrescido de pontos difratores distribuídos no interior das camadas.
- Modelo com um refletor plano e um inclinado.

Modelo de camadas planas. Esse modelo representa uma seqüência sedimentar composta por quatro camadas limitadas por interfaces planas e paralelas, onde a relação entre a profundidade e o valor da velocidade é de: 0m – 1000 m/s, 500m – 2000m/s, 1000m – 2500m/s e 1250m – 3000m/s. A geometria de aquisição de fontes e receptores é composta por 64 famílias de tiro comum com 64 canais cada, igualmente espaçadas de 25m através do modelo, e cada tiro é assumido para ser registrado por todos receptores. Para esse modelo, simulamos duas situações: a primeira com uma velocidade de referência C_0 igual à velocidade do

modelo C_{mod} e a segunda com a velocidade de referência 20% mais alta que a do modelo, conforme mostram as Figuras 1 e 2, respectivamente. Em ambos os casos, as imagens aparecem manchadas na direção horizontal, devido à limitação da abertura de superfície fonte-receptor. Na Figura 1, onde as velocidades de referência e do modelo são iguais, as interfaces foram imageadas e posicionadas corretamente em profundidade. Isso porque o método WCDP não encontra dificuldades em calcular o campo de onda espalhado em meios onde não há variação lateral de velocidades. No entanto, na Figura 2, o resultado indica que os refletores foram reconstruídos de forma estável, mas com certo deslocamento em relação a sua posição original. Isso pode ser atribuído à diferença entre as velocidades de referência e imageamento, que provavelmente violou as premissas do método.

Modelo de camadas planas e paralelas com pontos difratores. Introduzimos no modelo anterior, pontos difratores dispostos em diferentes profundidades e posições com respeito à base do somatório. A Figura 3 mostra o dado modelado e o resultado da reconstrução desses pontos difratores, onde as velocidades de referência e do meio C_{meio} são iguais. Nesse caso, podemos ver a boa qualidade da reconstrução e localização desses pontos, cuja precisão está diretamente relacionada ao limite teórico do comprimento de onda do sinal.

Modelo de camadas plana e inclinada. Esse modelo tem como objetivo de demonstrar a precisão do método na reconstrução de planos inclinados para ângulos de até 20°. A Figura 4 ilustra o caso quando as velocidades de referência e do modelo são iguais. Através desses resultados podemos perceber que, tanto o refletor plano quanto o inclinado foram reconstruídos na sua posição original. Isso evidencia a precisão do método para imagear e posicionar interfaces inclinadas.

Exemplo de dados reais. Com o intuito de demonstrar a efetividade e eficiência do algoritmo WCDP em Profundidade, processamos o dado sísmico marítimo 2D adquirido no Lago Baikal, Sibéria, Rússia, e realizamos uma análise comparativa do resultado obtido com a implementação do método WCDP 2D em tempo (Misságia, 2003). O dado avaliado representa uma região de intenso dobramento, composto por inúmeras falhas de pequeno rejeito, onde o gradiente de velocidade varia suavemente com a profundidade. Adotou-se a seguinte relação profundidade/velocidade para as camadas do modelo de velocidade de referência usada no imageamento: 0m – 1500m/s, 500m – 1800m/s.

As Figuras 5 e 6 ilustram os resultados e detalhes da reconstrução da linha Baikal pelos métodos WCDP 2D em profundidade e em tempo. A seção WCDP 2D em tempo mostra o posicionamento correto do somatório de ambas as ondas difratadas e refletidas. E, devido a isso, sua capacidade de reconstruir com boa definição a zona de falha, evidenciando os pequenos detalhes da estrutura, tais como as falhas de pequeno rejeito. Ainda de acordo com os detalhes da Figura 5 é possível diminuir as incertezas e obter novas informações sobre as estruturas geológicas dos sedimentos offshore, exibindo a natureza da anomalia do campo de onda. Através do resultado da reconstrução pelo método WCDP 2D em profundidade, dessa mesma linha, Figura 6 podemos observar um decréscimo na qualidade da imagem como um todo. Embora seja possível notar uma discreta melhoria na relação S/N, expresso em termos da melhor continuidade de algumas reflexões localizadas na região da zona de falhas. Isso sugere a continuação das pesquisas no sentido de calibrar e/ou aprimorar o método WCDP em profundidade.

Conclusões

Essa primeira aproximação do método WCDP 2D em profundidade considera somente o aspecto cinemático das ondas para testar a eficiência do algoritmo.

Tendo em mente o objetivo inicial, consideramos que os resultados alcançados com os dados sintético e real foram satisfatórios quando se avalia sob o ponto de vista da limitação dinâmica imposta ao método. O algoritmo se mostrou eficaz e capaz de fornecer imagens reconstruídas com estabilidade. Ressaltamos que essa migração foi implementada utilizando o algoritmo paralelizado de tal forma que o tempo de processamento pode ser reduzido substancialmente.

Agradecimentos

Os autores desse trabalho agradecem a PETROBRAS S/A pelo suporte financeiro que permitiu a pesquisa na qual esse trabalho esteve inserido.

Referências

- Bleistein N.C.J., Cohen K.J., Stockwell-Jr. J.W.,** 2001, Mathematics of multidimensional seismic imaging, migration and inversion, Springer-Verlag, NY.
- Kremlev A.N.,** 1985, A wave analogue of the CDP method: Geology and Geophysics, 10, p77-86. (In Russian).
- Kremlev A.N., Priimenko V.I., Oliveira S.A.M, Misságia R.M.,** 2002, Practical realization and testing of the wave analog of common depth point method on synthetic and real data, Bull. of the Novosibirsk Computing Center, Russian Academy of Sciences, Ser.: Math. Modeling in Geophysics, 7, p59-67.
- Mayne W.H.,** 1962, Common-reflection-point data-stacking technique: Geophysics, 27, p927-938.
- Mesbay V.I.,** 1985, Methods of multiple overlapping in seismic exploration, Nedra, Moscow, 5. (In Russian).
- Misságia R.M.,** 2003, Aprimoramento, implementação prática e teste do método de imageamento WCDP aplicado a dados sintéticos e reais. Tese de Doutorado, LENEP/UENF, Brasil, 104pp.
- Priimenko V., Soares Filho D.M., Misságia R.M., et al.,** 2004, Filtragem de Prony e o método na exploração sísmica: LENEP/UENF – CENPES/PETROBRAS. Relatório Final, 165pp.
- Soares Filho D.M., Priimenko V., Misságia R.M., et al.,** 2002, Processamento de dados sísmicos usando os métodos de Prony e WCDP: LENEP/CCT/UENF – CENPES/PETROBRAS. Contrato: 6502178017. Relatório Final, 159pp.

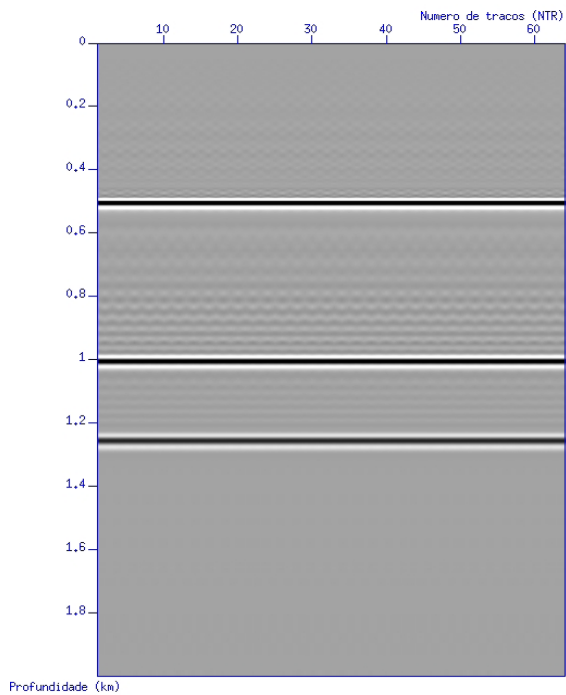


Figura 1 – Reconstrução do modelo de camadas planas paralelas, onde $C_0 = C_{mod}$.

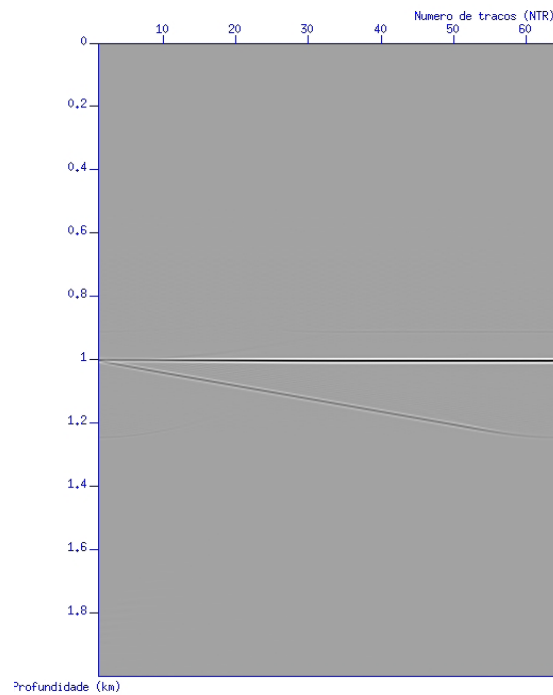


Figura 3 – Resultado da reconstrução de dois planos, 0° e 20° , quando $C_0 = C_{meio}$.

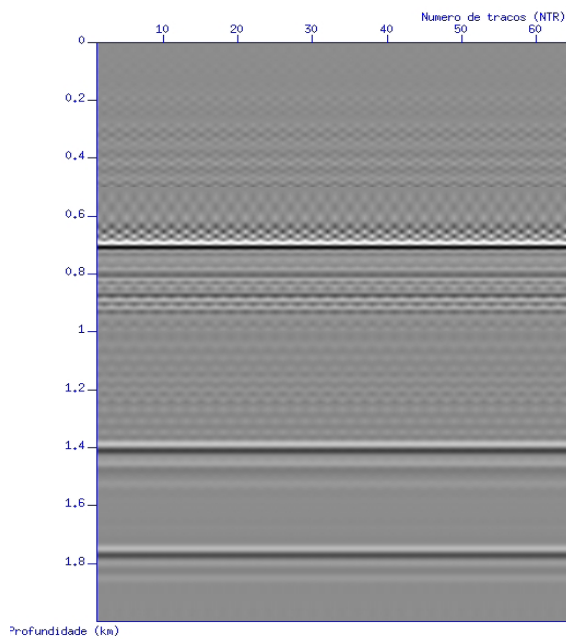


Figura 2 – Reconstrução do modelo de camadas planas e paralelas, onde C_0 é 20% maior que C_{mod} .

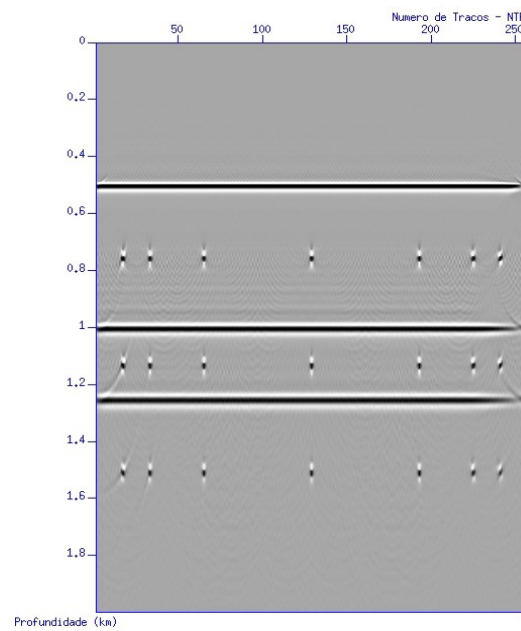


Figura 4 - Resultado da reconstrução de pontos difratores dispostos em diferentes profundidades e partes da base do somatório, quando a velocidade de referência e a $C_0 = C_{meio}$.

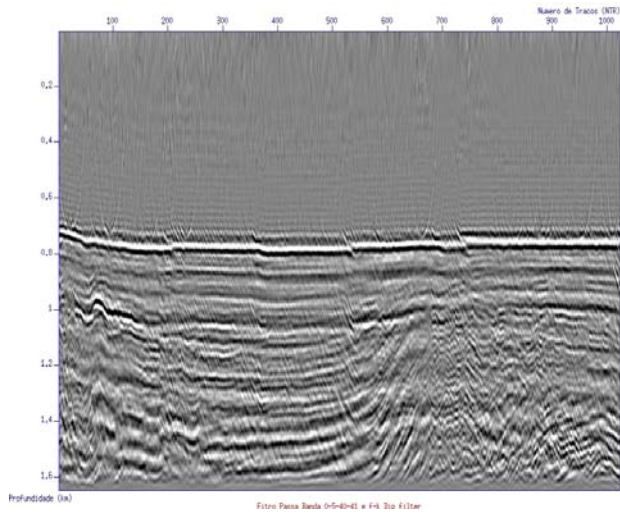


Figura 5 – Seção resultante do imageamento WCDP 2D em tempo do dado real do lago Baikal. Note que a imagem WCDP reconstrói com boa definição a zona de falhas.

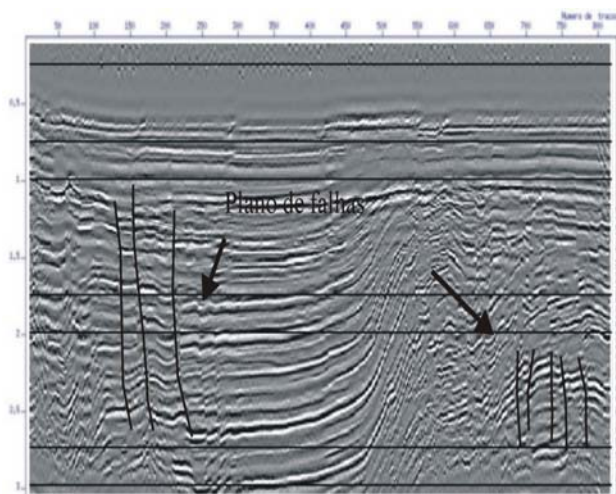


Figura 6 – Seção resultante do imageamento WCDP 2D em profundidade do lago Baikal. Note que a imagem WCDP define as estruturas da zona de falhas com maior continuidade das reflexões.