



Aproximações Hiperbólicas de Tempos de Trânsito 3-D para Reflexões e Difrações.

Charles Lima, German Garabito, Pedro Chira, CPGf-UFPA.

limacca@ufpa.br, german@ufpa.br, chira@ufpa.br,

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

The Zero-Offset (ZO) Common-Reflection-Surface (CRS) stacking technique is a macro-model independent seismic reflection imaging method that simulates a ZO volume or section from multi-coverage reflection pre-stack data. This method has been established as an improvement and alternative of the conventional Normal-Moveout/Dip-Moveout (NMO/DMO) processing. Over the past years it has been successfully applied both to 2-D and 3-D synthetic and real seismic data. It provides important wavefield attributes or parameters for several applications, e.g. migration, inversion and interpretation. It uses as operator a second-order hyperbolic traveltimes approximation in the vicinity of a central ray. In 3-D, for a normal or ZO central ray, this operator depends on eight parameters that are determined by means of coherence analysis procedures. In this work, we examine the 3-D ZO CRS operator for reflection and diffraction events with its respective true traveltimes. The results of these comparisons demonstrate that the 3-D ZO CRS operator has a good fit with the true traveltimes surface.

Introdução

Nos últimos anos surgiram diversos métodos de imageamento sísmico que não dependem do conhecimento a priori do macro-modelo de velocidades. O empilhamento sísmico Superfície de Reflexão Comum (SRC) pertence a este grupo de métodos. Este método simula uma seção ou volume sísmico afastamento-nulo (AN) a partir dos dados sísmicos de cobertura múltipla. Esta seção ou volume caracteriza-se por apresentar melhor resolução e maior razão sinal/ruído comparado com os obtidos pelos métodos convencionais, e.g. o empilhamento NMO/DMO. Estes métodos convencionais baseiam-se nas suposições do modelo de velocidade 1-D e fazem uso de uma aproximação de tempos de trânsito que é aplicada apenas em dados CMP (common-midpoint). O único parâmetro desta última aproximação, chamada de velocidade de empilhamento NMO, tem um uso limitado na extração de outros atributos do meio sísmico ou para inversão de um modelo de velocidade em profundidade. O método CRS utiliza todos os dados sísmicos de cobertura múltipla e fornece adicionalmente importantes parâmetros a partir destes dados. Não precisa do macro-modelo de velocidades e requer

somente o conhecimento a priori da velocidade próximo à superfície de medição.

O método SRC tem demonstrado ser mais eficiente que os métodos convencionais quando aplicados em dados sintéticos e reais 2-D e 3-D (e.g. Cristini et al., 2001; Berger et al., 2002). O operador SRC-AN baseia-se em uma aproximação hiperbólica de segunda ordem de tempos de trânsito na vizinhança de um raio central normal que depende de oito parâmetros para o caso 3-D. Tais parâmetros de empilhamento obtidos para construir um volume SRC descrevem a direção do raio normal e as curvaturas das frentes de onda Normal, N, e Ponto de Incidência Normal, PIN (Hubral, 1983). Estes parâmetros também chamados de atributos de frentes de ondas apresentam importantes aplicações, e.g. migração, inversão e interpretação. Eles podem ser determinados por processos de busca automáticos envolvendo análise de coerência dos dados sísmicos pré-empilhados. Os primeiros resultados do empilhamento SRC 3-D aplicados a dados sintéticos foram apresentados por Cristini et al., (2001). Em dados reais os primeiros resultados foram apresentados e.g. Cristini et al. (2002); e Bergler et al. (2002).

O método SRC também é eficiente quando aplicado em dados de meios que apresentam fortes variações laterais de velocidade, complexidade estrutural, baixa relação sinal/ruído e pobre cobertura de dados. Para um conjunto de dados 3-D com um azimute muito reduzido, o número de parâmetros se reduz para quatro (Chira, 2003) ou seis, como no caso marinho (Cardone et al. 2003). Neste caso os autores assumiram a ocorrência de uma frente de onda esférica PIN na superfície. Cristini et al. (2003) mostraram que este método fornece imagens com alta resolução ainda no caso de dados reais com baixa razão sinal/ruído e na presença de estruturas complexas.

Chira et al. (2003) apresentaram o formalismo e exemplos de aplicação do operador de empilhamento SRC-AN 3-D para eventos de reflexão. Eles também apresentaram o operador de empilhamento SRC-AN 3-D para eventos de difração o qual depende de cinco parâmetros. No caso das difrações, consideraram as matrizes de curvatura das ondas PIN e Normal serem coincidentes. Também mostraram fórmulas especiais para aplicações dos atributos SRC-AN 3-D para determinar os fatores de espalhamento geométrico e as zonas de Fresnel projetadas. Este último é importante para definir a abertura para o empilhamento e migração.

Neste trabalho apresentamos os resultados numéricos preliminares sobre as superfícies de tempos de trânsito SRC-AN 3-D associados a um raio central refletido e a um raio central difratado. Estas superfícies SRC-AN 3-D aproximadas são comparadas com seus respectivos tempos de trânsito exatos calculados por traçamento de raios. Estes resultados são importantes para o

desenvolvimento de estratégias para determinação dos oito parâmetros ou atributos SRC 3-D e a conseqüente implementação do empilhamento SRC 3-D para a simulação de seções ou volumes sísmicos AN.

Aspectos teóricos

Curvaturas da frente de onda

Considera-se um modelo 3-D constituído por camadas com isovelocidades separadas por interfaces curvas (Figura 1). As curvaturas da frente de onda em qualquer ponto da mesma podem ser expressas analiticamente em termo dos parâmetros sísmicos ao longo do raio que conecta o ponto de observação com a origem do raio. São apresentadas três leis requeridas para o cálculo das curvaturas da frente de onda ao longo de um raio arbitrário (Hubral e Krey, 1980). Estas leis de curvatura podem ser usadas para fornecer soluções diretas aproximadas para o comportamento da amplitude das ondas de corpo e das ondas frontais pelo método do raio (Cerveny e Ravindra, 1971).

A frente de onda em qualquer ponto da mesma pode ser aproximada por uma superfície em movimento representada por

$$z = \frac{-1}{2} \mathbf{X} \hat{\mathbf{A}} \mathbf{X}^T, \quad (1)$$

onde

$$\mathbf{X} = (x, y); \hat{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

sendo $\hat{\mathbf{A}}$ a matriz curvatura da frente de onda que é simétrica. O sobrescrito T representa a transposta.

Particularmente, $\hat{\mathbf{A}}_I$, $\hat{\mathbf{A}}_T$ e $\hat{\mathbf{A}}_R$ referem-se as matrizes curvaturas da frente de onda incidentes, refratadas e refletidas em um ponto na interface em relação ao sistema em movimento neste ponto. Previamente define-se o sistema (x_F, y_F, z_F) como um sistema auxiliar em todos os pontos de refração e reflexão na interface. Cada interface pode ser aproximada em um ponto de interseção do raio em relação ao sistema auxiliar pelo seguinte polinômio de segunda-ordem:

$$z_F = \frac{-1}{2} \mathbf{X}_F \hat{\mathbf{B}} \mathbf{X}_F^T, \quad (3)$$

onde

$$\mathbf{X}_F = (x_F, y_F); \hat{\mathbf{B}} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{12} & b_{22} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$\hat{\mathbf{B}}$ é a matriz de curvatura da interface e também é simétrica.

As matrizes inversas $\hat{\mathbf{R}}_A = \hat{\mathbf{A}}^{-1}$ e $\hat{\mathbf{R}}_B = \hat{\mathbf{B}}^{-1}$ são os matrizes raios de curvatura.

Lei de propagação da curvatura

Esta lei é usada para calcular a mudança da curvatura ao longo de um único segmento de raio devido a propagação da frente de onda em uma camada de velocidade constante. Considera-se como ponto inicial $P_0=(x_0, y_0, z_0)$ e um ponto arbitrário $P_1=(x_1, y_1, z_1)$ do segmento do raio. Para calcular a curvatura em P_1 requer-se a matriz curvatura $\hat{\mathbf{A}}_0$ em P_0 e a distancia de

P_0 até P_1 . Esta distância é dada por $v\Delta t$ onde v é a velocidade e Δt o tempo que a frente de onda viaja desde P_0 até P_1 . \mathbf{I} é a matriz unitária 2x2. Portanto,

$$\hat{\mathbf{R}}_{P_1} = \hat{\mathbf{R}}_{P_0} + v\Delta t \mathbf{I},$$

onde a matriz $\hat{\mathbf{R}}_{P_i}$ ($i=0,1$) denota a matriz raio no ponto

P_i e é dado pela inversa da matriz $\hat{\mathbf{A}}_i$, \mathbf{I} é a matriz unitária 2x2.

Lei de refração

Em um ponto refratado em uma interface, as matrizes

$\hat{\mathbf{A}}_I$, $\hat{\mathbf{A}}_T$ e $\hat{\mathbf{B}}$ são definidas em relação aos sistemas (x_I, y_I, z_I) , (x_T, y_T, z_T) e (x_F, y_F, z_F) . Pode ser mostrado que estas matrizes estão relacionadas através das seguintes expressões:

$$\hat{\mathbf{A}}_T = \mathbf{D}^{-1} \left(\frac{v_T}{v_I} \hat{\mathbf{S}} \hat{\mathbf{A}}_I \hat{\mathbf{S}} + \rho \hat{\mathbf{S}}_T^{-1} \hat{\mathbf{B}} \hat{\mathbf{S}}_T^{-1} \right) \mathbf{D}, \quad (5)$$

onde

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} \cos \varepsilon_I / \cos \varepsilon_T & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\hat{\mathbf{S}}_T = \begin{pmatrix} \cos \varepsilon_T & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\rho = \frac{v_T}{v_I} \cos \varepsilon_I - \cos \varepsilon_T.$$

ε_I e ε_T são os ângulos de incidência e de transmissão ou reflexão.

Lei de reflexão

Em um ponto refletido em uma interface, as matrizes

$\hat{\mathbf{A}}_I$, $\hat{\mathbf{A}}_R$ e $\hat{\mathbf{B}}$ são definidas em relação aos sistemas (x_I, y_I, z_I) , (x_R, y_R, z_R) e (x_F, y_F, z_F) . Estas três matrizes de curvatura estão relacionadas segundo:

$$\hat{\mathbf{A}}_R = \mathbf{D}^{-1} \mathbf{I}_R \left(\frac{v_R}{v_I} \hat{\mathbf{S}}' \hat{\mathbf{A}}_I \hat{\mathbf{S}}' + \rho' \hat{\mathbf{S}}_R^{-1} \hat{\mathbf{B}} \hat{\mathbf{S}}_R^{-1} \right) \mathbf{I}_R \mathbf{D}, \quad (6)$$

onde

$$\mathbf{I}_R = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S}' = \begin{pmatrix} -\cos \varepsilon_I / \cos \varepsilon_R & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\hat{\mathbf{S}}_R = \begin{pmatrix} -\cos \varepsilon_R & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\rho' = \frac{v_R}{v_I} \cos \varepsilon_I + \cos \varepsilon_R.$$

Aproximações hiperbólicas de tempos de trânsito 3-D

Eventos de reflexão

O operador SRC-AN 3-D para eventos de reflexão é dado por (e.g. Jäger, 1999; Höcht, 2002)

$$t_{ref}^2 = \left(t_0 + \frac{2}{v_0} \mathbf{w}_z \cdot \mathbf{m} \right)^2 + \frac{2t_0}{v_0} \left(\mathbf{m}^T \hat{\mathbf{T}} \hat{\mathbf{N}} \hat{\mathbf{T}} \mathbf{m} + \mathbf{h}^T \hat{\mathbf{T}} \hat{\mathbf{M}} \mathbf{h} \right), \quad (7)$$

onde

$$\mathbf{w}_z = \begin{pmatrix} \cos \varphi_0 \sin \varphi_1 \\ \sin \varphi_0 \sin \varphi_1 \end{pmatrix}, \hat{\mathbf{M}} = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} \\ m_{01} & m_{11} \end{pmatrix}, \hat{\mathbf{N}} = \begin{pmatrix} n_{00} & n_{01} \\ n_{01} & n_{11} \end{pmatrix},$$

'e a matriz transformação 2-D, \mathbf{T} , pode ser construída por (Jäger, 1999)

$$\mathbf{T} = \mathbf{D}_{zy} = \mathbf{D}_z(\varphi_0) \mathbf{D}_y(\varphi_1) = \begin{pmatrix} \cos \varphi_0 & -\sin \varphi_0 \\ \sin \varphi_0 & \cos \varphi_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

ou também pode ser expressa por (Höcht, 2002)

$$\mathbf{T} = \mathbf{D}_{zyz} = \mathbf{D}_z(\varphi_0) \mathbf{D}_y(\varphi_1) \mathbf{D}_z(\varphi_F) = \begin{pmatrix} \cos \varphi_0 & -\sin \varphi_0 \\ \sin \varphi_0 & \cos \varphi_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi_F & -\sin \varphi_F \\ \sin \varphi_F & \cos \varphi_F \end{pmatrix}, \quad (9)$$

onde

$$\begin{pmatrix} \cos \varphi_F \\ \sin \varphi_F \end{pmatrix} = \frac{\mathbf{D}_y^T(\varphi_1) \mathbf{D}_z^T(\varphi_0) \mathbf{s}_F}{\sqrt{1 - (\mathbf{w}_z \cdot \mathbf{s}_F)^2}},$$

$$\mathbf{s}_F = \begin{pmatrix} \cos \beta_F \\ \sin \beta_F \end{pmatrix}, (-\pi < \beta_F < \pi)$$

sendo t_{ref} o tempo de trânsito ao longo da superfície de empilhamento no volume de dados 5-D fornecido pelo mesmo t_{ref} , as duas componentes do vetor ponto-médio \mathbf{m} e as duas componentes do vetor meio-afastamento \mathbf{h} . v_0 é a velocidade na vizinhança do ponto de emergência do raio normal na superfície. \mathbf{w}_z é um vetor de duas componentes que define a direção do raio normal na superfície de medição. φ_0 e φ_1 indicam o azimute e o ângulo polar da direção do raio normal. As matrizes simétricas 2x2, \mathbf{M} e \mathbf{N} , são as matrizes curvaturas das frentes das ondas PIN (Figura 1) e Normal na superfície. \mathbf{T} é a matriz transformação que depende das componentes de \mathbf{w}_z . \mathbf{s}_F é o vetor unitário de um plano de referencia sobre a superfície de medição plana. β_F é o azimute do vetor unitário \mathbf{s}_F . Höcht (2002) define o plano de referencia como o plano formado por um vetor unitário de referencia \mathbf{s}_F e o vetor direção do raio de reflexão normal. Os oito parâmetros do operador SRC-AN 3-D correspondem a três da matriz \mathbf{M} , três da matriz \mathbf{N} e as duas componentes do vetor \mathbf{W}_z .

Chira et al. (2003) apresentaram este operador (7) de uma maneira mais simples, considerando $\mathbf{A} = \mathbf{T} \hat{\mathbf{N}} \mathbf{T}$ e $\mathbf{B} = \mathbf{T} \hat{\mathbf{M}} \mathbf{T}$, para a busca apropriada dos oito parâmetros.

Eventos de difração

Neste tipo de eventos sísmicos, consideramos $\hat{\mathbf{M}} = \hat{\mathbf{N}}$ (Chira et al., 2003),

$$t_{Dif}^2 = \left(t_0 + \frac{2}{v_0} \mathbf{w}_z \cdot \mathbf{m} \right)^2 + \frac{2t_0}{v_0} \left(\mathbf{m}^T \hat{\mathbf{T}} \mathbf{M} \mathbf{T} \mathbf{m} + \mathbf{h}^T \hat{\mathbf{T}} \mathbf{M} \mathbf{T} \mathbf{h} \right), \quad (10)$$

onde o operador Superfície de Difração Comum (SDC) 3-D (equação 10) depende de cinco parâmetros: dois elementos do vetor \mathbf{w}_z e três elementos da matriz $\hat{\mathbf{M}}$.

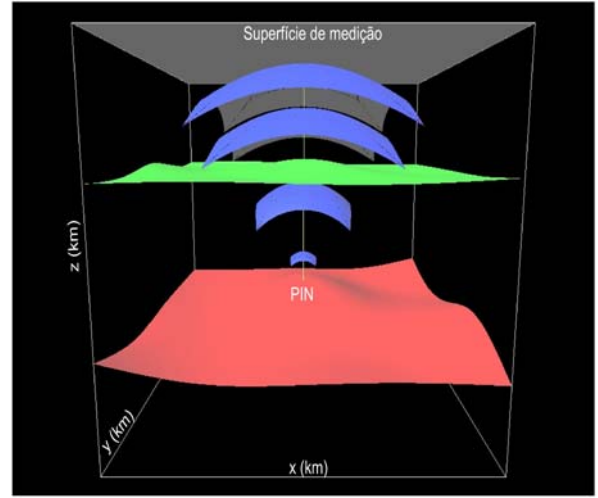


Figura 1. Propagação da onda PIN em subsuperfície. As frentes desta onda são representadas pelas superfícies de cor azul em diferentes instantes de tempo. O raio (central) normal é ilustrado em verde.

Resultados numéricos

O modelo sintético utilizado para os testes numéricos neste trabalho é mostrado na Figura 2. É um modelo acústico 3-D simples composto por duas camadas sobre um semi-espaço. Cada camada está separada por superfícies curvas e contínuas. As velocidades de propagação das ondas são constantes para cada camada. Essas velocidades desde o topo até a base são 1.7 km/s, 2.3 km/s e 3.6 km/s para o semi-espaço.

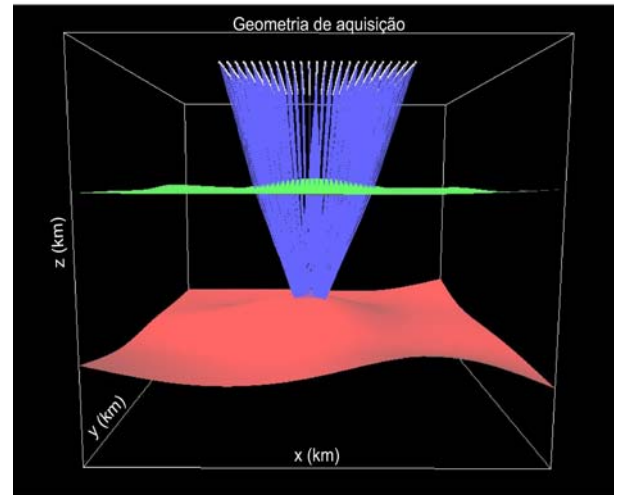


Figura 2. Representação do modelo sintético 3-D. Este modelo está constituído por duas camadas sobre um semi-espaço. Observa-se a geometria de aquisição na superfície de medição. Os raios são representados em cor azul.

Usando o software CRT (Complete Ray Tracing) foi realizado um experimento sísmico, que consiste de vários receptores espalhados em uma malha regular e uma fonte localizada no centro da malha, nas coordenadas (2.5 km, 2.5 km). As linhas de cor azul na Figura 2 são os raios das reflexões primárias associadas à segunda interface. Nas Figuras 3 e 4 são mostradas com superfícies de cor azul que são os tempos de trânsito das reflexões primárias correspondentes ao segundo refletor.

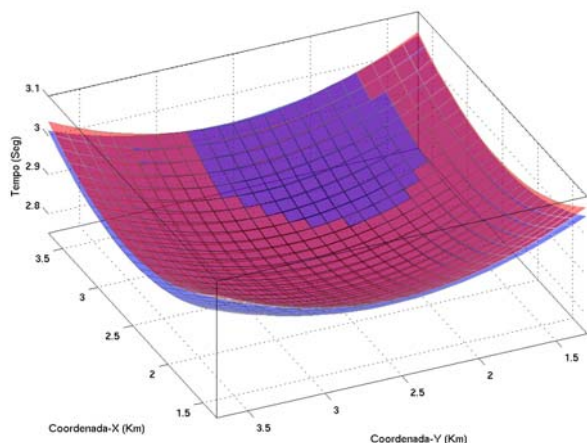


Figura 3. Superfícies de tempos de trânsito exatos (cor azul) e aproximados (cor vermelha) de reflexões primárias associados ao segundo refletor. A superfície de cor vermelha foi obtida considerando um raio central refletido.

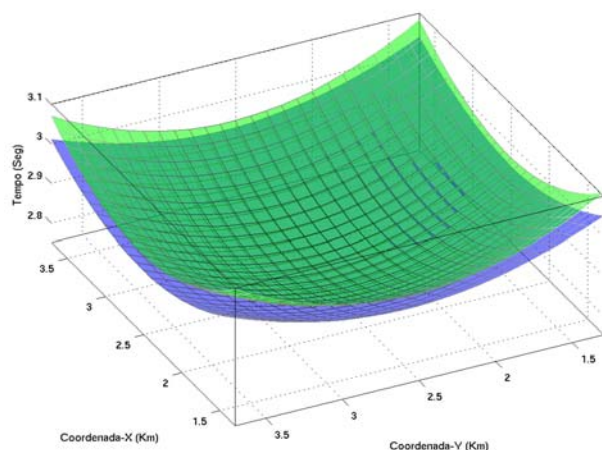


Figura 4. Superfícies de tempos de trânsito exatos (cor azul) e aproximado (cor vermelha) de reflexões primárias associados ao segundo refletor. A superfície de cor vermelha foi obtida considerando um raio central difratado.

No modelo da Figura 2, usando um programa de traçamento de raios foram calculados os oito parâmetros SRC-AN 3-D. Posteriormente, utilizando as aproximações (7) e (10) foram calculados, respectivamente, os tempos de trânsito de raios paraxiais associados a um raio

central refletido e difratado. As coordenadas do ponto de emergência do raio central e $X_0 = (2.5 \text{ km}, 2.5 \text{ km})$. Na Figura 3 mostra-se a superfície de cor vermelha correspondente aos tempos de trânsito calculados com (7), conhecida como operador SRC-AN 3-D por estar associada a um raio central refletido. De maneira similar, na Figura 4 mostra-se a superfície de cor verde correspondente aos tempos de trânsito calculados com (10). Esta superfície é denominada de superfície de difração comum ou operador SDC-AN 3-D, devido ao fato dos tempos de trânsito estarem associados a um raio central difratado. Nos resultados apresentados nas Figuras 3 e 4, observa-se que o operador SRC-AN 3-D (associado a um raio central refletido) tem melhor ajuste com a superfície de tempos de trânsito verdadeiros, comparado com o operador SDC-AN 3-D (associado a um raio central difratado).

Conclusões

Neste trabalho, para um modelo simples 3-D, são apresentados às superfícies formadas por tempos de trânsito de raios paraxiais associados a um raio central refletido (SRC-AN 3-D) e associados a um raio central difratado (SDC-AN 3-D).

A comparação dos operadores SRC-AN 3-D e SDC-AN 3-D com a superfície dos tempos de trânsito exatos revela que o operador SRC-AN 3-D tem melhor ajuste com os tempos de trânsito exatos, comparado com o operador SDC-AN 3-D. No entanto, o operador SDC-AN 3-D, dependente de cinco parâmetros, também pode ser utilizado para o empilhamento sísmico em 3-D com um custo computacional baixo. Por outro lado, o operador SDC-AN 3-D pode também ser usado para a determinação dos atributos de frentes de ondas nas primeiras etapas de um algoritmo de empilhamento sísmico em 3-D baseado no operador SRC-AN 3-D.

Agradecimentos

Agradecemos ao Dr. Ivan Psensik por disponibilizar o software CRT (complete Ray tracing) e ao Dr. German Hocht por disponibilizar o software de traçamento de raios em 3-D. Também agradecemos a FINEP, PETROBRAS e CNPq pelo apoio financeiro ao projeto REDE EM RISCO EXPLORATÓRIO. O primeiro autor também agradece ao CNPq pelo auxílio financeiro em forma de bolsa de mestrado.

Referências

Bergler, S., Hubral, P., Marchetti, P. Cristini, A. and Cardone, G., 2002. 3D common-reflection-surface stack and kinematic wavefield attributes. *The Leading Edge*, 21, p. 1010-1015.

Cardone, G., Cristini, C., Bonomi, A., Marchetti, P., Zambonini, R., Hubral, P. and Mann, J., 2003. 3D zero-offset CRS for narrow-azimuth data: formulation and examples. In *EAGE/SEG Summer Research Workshop on processing and imaging of seismic data - using explicit or implicit velocity model information?* EAGE. Expanded Abstract, Sesion T006.

Cerveny, V. and Ravindra, R., 1971. *Theory of seismic headwaves*: Toronto, University of Toronto Press.

- Chira-Oliva, P., Cruz, J. C. R., Hubral, P. and Tygel, M.,** 2003. Theoretical aspects of the 3-D ZO CRS stack. 8th International Congress of the SBGf, BRAZIL.
- Chira, P.,** 2003. Empilhamento pelo método Superfície de Reflexão Comum 2-D com Topografia e Introdução ao caso 3-D in portuguese. Ph.D. Thesis, Federal University of Para, Brazil.
- Cristini, A., Cardone, G., Chira, P. Hubral, P. and Marchetti, P.,** 2001. 3D Zero-Offset Common Reflection Surface Stack for Land Data. 46th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, Session W5-13.
- Cristini, A., Cardone, G., Marchetti, P.,** 2002. 3D Zero-Offset Common Reflection Surface Stack for land data - real data example. Expanded Abstract of the 64th EAGE Conference and Technical Exhibition, Sesion B15.
- Cristini, A. Cardone, G., Marchetti, P. and Zambonini, R.,** 2003. 3D ZO CRS Stack: issues related to complex structures and real data. 73rd Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts.
- Höcht, G.,** 2002. Travelttime approximations for 2D and 3D media and kinematic wavefield attributes. PhD thesis. University of Karlsruhe, Germany.
- Hubral, P.,** 1983. Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth. *Geophysics*, 48, p. 1051-1062.
- Jäger, R.,** 1999. The Common-Reflection surface stack - Theory and application. Master's thesis. University of Karlsruhe, Germany.