



Algoritmo de Empilhamento SRC 2-D com topografia rugosa

German Garabito (*), Pedro Chira-Oliva(*) and Peter Hubral(†)

(*) Federal University of Pará (Brazil), german, chira@ufpa.br

(†) Geophysical Institute of Karlsruhe (Germany), peter.hubral@gpi.uni-karlsruhe.de

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 was reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents 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 Common-Reflection-Surface (CRS) was originally introduced as a data-driven method to simulate zero-offset (ZO) sections from 2-D reflection pre-stack data acquired along a straight line. This approach is based on a second-order traveltimes approximation parameterized with three kinematic wavefield attributes. The topography plays an important role in seismic data processing and imaging. Thus, this feature has been recently considered by the CRS method. In this work we review the CRS traveltimes approximations that consider the smooth and rugged topography. We also review the Multifocusing traveltimes for a rugged topography. We extend these approximations to consider diffraction events. We performed comparisons to find the best CRS operator for a measurement surface with topography. Finally, we also present an algorithm that is an extension of the CRS stack method, to simulate ZO sections with rugged topography.

Introdução

O método de empilhamento Superfície de Reflexão Comum (SRC) 2-D foi originalmente introduzido como um método para simular seções de afastamento-nulo (AN) a partir de dados sísmicos pré-empilhados de cobertura múltipla (Müller (1999); Jäger et al. (2001); Garabito et al. (2001a,b)). Este método não precisa do macro-modelo de velocidades e sim apenas da velocidade perto da superfície.

Os eventos de reflexão nos dados pré-empilhados são localmente descritos pelo método SRC, por uma aproximação de segunda ordem hiperbólica dos tempos de trânsito dos raios paraxiais a um raio central, considerando uma geometria de aquisição arbitrária. Esta aproximação, derivada por Tygel et al. (1997), é também denominada de operador de empilhamento SRC que, para meios 2-D, depende de três atributos ou parâmetros cinemáticos das frentes de ondas hipotéticas, que se referem as curvaturas e direção de propagação de duas frentes de onda que emergem, na superfície de medição, denominadas ondas Normal-Incidence-Point (NIP) e Normal (N) (Hubral, 1983). Os parâmetros SRC tem importantes aplicações, tais como: 1) a determinação do modelo de velocidades

(Majer (2000); Biloti (2001)); 2) as análises AVO e AVA (Biloti et al., 2001), 3) o cálculo das Zonas de Fresnel projetadas, 4) o cálculo do fator de espalhamento geométrico (Vieth, 2001) e 5) migração no tempo baseado nos atributos (Mann et al., 2000), entre outras aplicações.

Originalmente, o método SRC foi proposto considerando uma superfície de medição plana e horizontal. A topografia da linha de aquisição desempenha um papel importante no processamento dos dados sísmicos e no imageamento.

Para considerar o caso de uma topografia suave no método SRC, Chira e Hubral (2003) apresentaram a fórmula de empilhamento SRC que considera a curvatura da superfície de medição. Adicionalmente, Chira et al. (2001) apresentaram a mesma fórmula, porém, consideraram o gradiente de velocidade nos pontos desta superfície de medição. Zhang et al. (2002) apresentaram a fórmula SRC para o caso de uma superfície de medição rugosa sem considerar o gradiente de velocidade.

Recentemente Gurevich et al. (2002) apresentaram uma extensão do tempo de trânsito Multifoco, para ser aplicado em dados adquiridos em áreas com topografia irregular sem a necessidade a priori das correções estáticas.

Os primeiros resultados satisfatórios da aplicação do empilhamento SRC com topografia suave para um modelo sintético 2-D foram obtidos por Chira (2003).

Neste trabalho, apresentamos o operador SRC para topografia suave e rugosa, para o caso de eventos de difração. Também é apresentado o operador Multifoco para topografia rugosa, considerando o caso de eventos de difração. Como resultados preliminares foram realizadas comparações dos operadores SRC (com topografia suave e rugosa) com o operador Multifoco (com topografia rugosa) para eventos de reflexão e difração, para um modelo sintético 2-D.

Sendo o objetivo imediato deste trabalho a implementação do algoritmo de empilhamento SRC para topografia rugosa, apresentamos uma extensão do algoritmo SRC (Garabito et al., 2001a,b) para simular seções AN, a partir de dados de cobertura múltipla adquiridos sobre uma linha sísmica com topografia rugosa.

Teoria

Empilhamento SRC com topografia suave

Schleicher et al. (1993) derivaram a aproximação hiperbólica 3-D dos tempos de trânsito para um raio paraxial na vizinhança de um raio normal. Chira e Hubral (2003) e Chira et al. (2001) particularizaram este formalismo para

o caso 2-D. Considerando um sistema de coordenadas Cartesianas local, com a origem no ponto X_0 (Figura 1), apresentam o tempo de trânsito para um raio paraxial na vizinhança de um raio normal (Figura 1) sobre uma superfície de medição suavemente curva dado por (Chira e Hubral, 2003)

$$t^2(x_m, h) = \left(t_0 + 2 \frac{\text{sen}\beta_0^*}{v_1} (x_m - x_0) \right)^2 + \frac{2 t_0}{v_1} \left(\frac{\cos^2 \beta_0^*}{R_N} - \cos \beta_0^* K_0 \right) (x_m - x_0)^2 + \frac{2 t_0}{v_1} \left(\frac{\cos^2 \beta_0^*}{R_{NIP}} - \cos \beta_0^* K_0 \right) h^2, \quad (1)$$

onde t_0 e x_0 são o tempo de reflexão AN e a coordenada do ponto central, X_0 , respectivamente. A velocidade da onda P-P, perto da superfície, é v_1 , e x_m e h são as coordenadas do ponto-médio e meio-afastamento no eixo x_1 , que é tangente a superfície curva com origem no ponto X_0 (Figura 1). β_0^* é o ângulo de emergência do raio normal na superfície curva no ponto central. K_0 é a curvatura local da linha de aquisição. R_{NIP} e R_N são os raios de curvatura das frente de onda hipotéticas emergentes em X_0 , NIP e N (Hubral (1983); Jäger et al. (2001)).

A equação acima se reduz ao caso de uma linha sísmica plana e horizontal, considerando-se $K_0 = 0$.

Para o caso do sistema de coordenadas Cartesianas global, projetam-se as coordenadas locais neste sistema (Figura 1), obtendo-se as seguintes relações

$$h = \frac{h'}{\cos \alpha_0^*}, \quad x_m = \frac{x_m'}{\cos \alpha_0^*}, \quad (2)$$

sendo x_m' e h' as coordenadas projetadas no sistema de coordenadas Cartesianas global das coordenadas locais x_m e h . α_0^* é o ângulo de mergulho da tangente à superfície de medição curva no ponto X_0 (Figura 1). Inserindo as relações (2) na equação (1) obtém-se (Chira, 2003)

$$t^2(x_m', h') = \left(t_0 + 2 \frac{\text{sen}\beta_0^*}{v_1 \cos \alpha_0^*} (x_m' - x_0) \right)^2 + \frac{2 t_0}{v_1 \cos^2 \alpha_0^*} \left(\frac{\cos^2 \beta_0^*}{R_N} - \cos \beta_0^* K_0 \right) (x_m' - x_0)^2 + \frac{2 t_0}{v_1 \cos^2 \alpha_0^*} \left(\frac{\cos^2 \beta_0^*}{R_{NIP}} - \cos \beta_0^* K_0 \right) (h')^2. \quad (3)$$

Esta fórmula (3) foi testada com sucesso por Chira (2003) em dados sintéticos para um modelo 2-D com topografia suave. Esta fórmula (3) não é aplicável para topografia rugosa (Chira e Hubral, 2003).

Para testar a fórmula 3, nós consideramos o modelo da Figura 2 composta por três camadas homogêneas separadas por interfaces curvas. A linha de aquisição apresenta uma topografia rugosa (não suave). Usando este

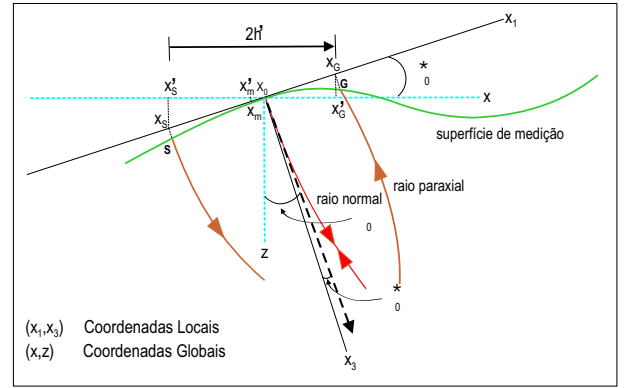


Figura 1: Transformação das coordenadas Cartesianas locais, x_m e h , para suas respectivas coordenadas Cartesianas globais x_m' e h' . α_0^* é o ângulo de mergulho local da tangente no ponto central X_0 (eixo x_1). β_0 é o ângulo entre o raio normal (linha vermelha) e a linha vertical através do X_0 (eixo z) e β_0^* é o ângulo entre o raio normal e a normal a tangente em X_0 (eixo x_3).

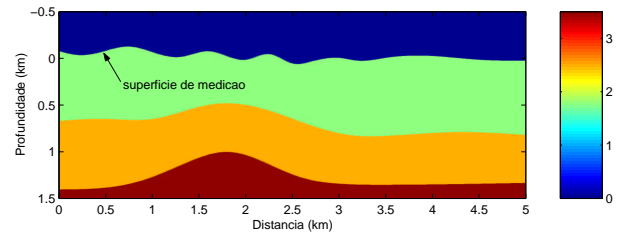


Figura 2: Modelo 2-D constituído por duas camadas sobre um semi-espaço. A superfície de medição é rugosa. As velocidades intervalares P-P desde a camada superior até a inferior são 1.750 km/s, 2.500 km/s e 3.500 km/s para o semi-espaço.

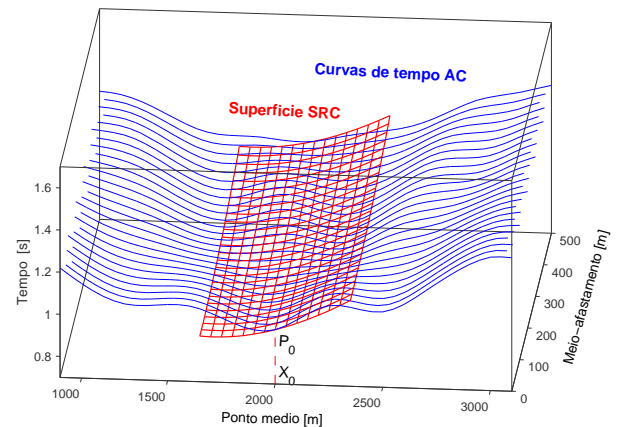


Figura 3: Comparação dos tempos de trânsito verdadeiros (curvas de cor azul) com o operador SRC para topografia suave (curvas de cor vermelha, eq. 3).

modelo, foram gerados tempos de trânsito de cobertura múltipla, usando o programa de Traçamento de Raios, SEIS88 (Červený and Psěnsik, 1988).

Na Figura (3) as curvas de cor azul representam os tempos de trânsito de reflexões primárias com um certo afastamento-comum (AC) associadas à segunda interface. Associado ao raio normal que emerge na posição $X_0 = 2000 \text{ m}$ foram calculados as curvaturas das frentes de ondas NIP e N. Então, uma vez conhecidos os parâmetros SRC, foi calculado a superfície SRC, usando a expressão dos tempos de trânsito para topografia suave (3). No entanto, devido ao fato da linha de medição não ser suave, este operador não tem bom ajuste com os tempos de trânsito verdadeiros.

Configuração afastamento-nulo (AN)

No caso da configuração AN, tem-se que os pares fonte-receptor são coincidentes na superfície de medição e aproximando-se as reflexões AN na vizinhança de X_0 . Considerando $h' = 0$, a equação (3) se reduz a (Chira, 2003)

$$t_{AN}^2(x_m') = \left(t_0 + 2 \frac{\text{sen} \beta_0^*}{v_1} (x_m' - x_0) \right)^2 + \frac{2 t_0}{v_1 \cos^2 \alpha_0^*} \left(\frac{\cos^2 \beta_0^*}{R_N} - \cos \beta_0^* K_0 \right) (x_m' - x_0)^2. \quad (4)$$

Eventos de difração

No caso particular em que $R_N = R_{NIP}$, implica que os dois raios de curvatura passam a definir a posição de um ponto difrator em subsuperfície, ou seja o elemento refletor colapsa num ponto difrator e neste caso R_N não proporciona mais a informação sobre a forma local do refletor. Aplicando esta condição na equação (3) obtém-se o operador Superfície de Difração Comum (SDC) dado por (Chira, 2003)

$$t_{dif}^2(x_m', h') = \left(t_0 + 2 \frac{\text{sen} \beta_0^*}{v_1 \cos \alpha_0^*} (x_m' - x_0) \right)^2 + \frac{2 t_0}{v_1 \cos^2 \alpha_0^*} \left(\frac{\cos^2 \beta_0^*}{R_{NIP}} \cos^2 \beta_0^* - \cos \beta_0^* K_0 \right) ((x_m' - x_0)^2 + (h')^2). \quad (5)$$

Similarmente, como na Figura 3, apresenta-se na Figura 4 uma comparação dos tempos de trânsito verdadeiros, referidos ao modelo da Figura 2, com o operador de difração SDC (5). Conforme Garabito (2001), os tempos de trânsito que definem este operador estão associados a um difrator em profundidade, é denominado de operador de difração comum (SDC). Este operador é uma aproximação local do operador de migração Kirchhoff.

Empilhamento SRC com topografia rugosa

Seguindo as linhas de Červený (2001), Zhang et al. (2002) apresentaram uma aproximação do tempos de trânsito do

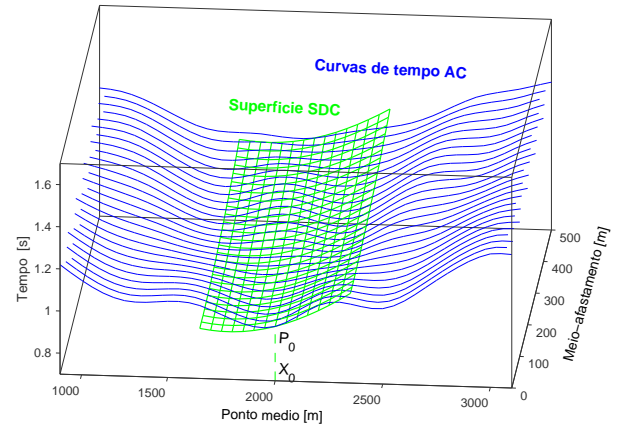


Figura 4: Comparação dos tempos de trânsito verdadeiros (curvas de cor azul) com o operador de difração SDC para topografia suave (curvas de cor verde, eq. 5).

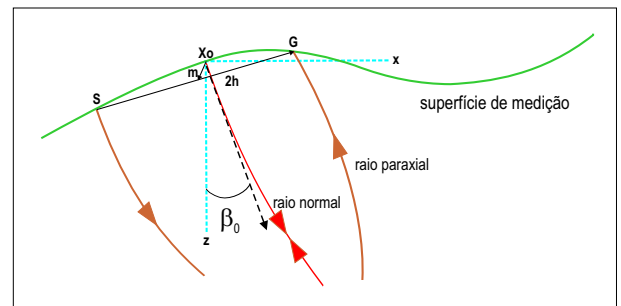


Figura 5: Sistema de coordenadas Cartesianas locais (x, z) considerado para uma superfície de medição com topografia rugosa, sendo a origem o ponto de emergência do raio de reflexão normal (central) na superfície topográfica.

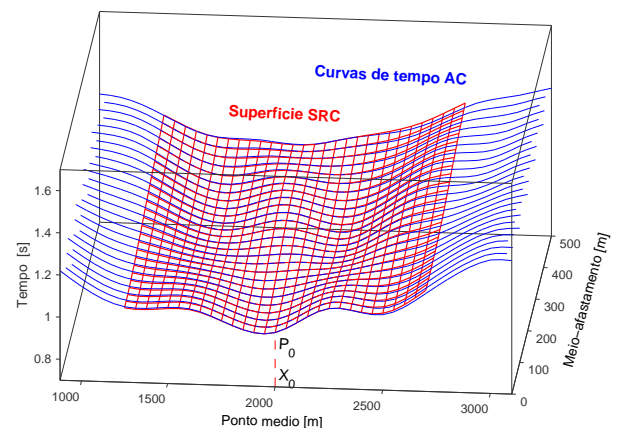


Figura 6: Comparação dos tempos de trânsito verdadeiros (curvas de cor azul) com o operador SRC para topografia rugosa (curvas de cor vermelha, eq. 6).

raio paraxial a um raio central (normal) (Figura 5) é dada por

$$t_{rug}^2 = \left(t_0 - \frac{2}{v_1} (m_x \text{sen}\beta_0 + m_z \text{cos}\beta_0) \right)^2 + \frac{2 t_0}{v_1 R_N} \left(m_x \text{cos}\beta_0 - m_z \text{sen}\beta_0 \right)^2 + \frac{2 t_0}{v_1 R_{NIP}} \left(h_x \text{cos}\beta_0 - h_z \text{sen}\beta_0 \right)^2, \quad (6)$$

onde m_x e m_z as componentes nas direções x e z do vetor ponto-médio \mathbf{m} , e h_x e h_z são as componentes correspondentes do vetor meio-afastamento \mathbf{h} (Figura 8).

Na Figura 6 são comparados os tempos de trânsito verdadeiros referidos ao mesmo modelo anterior (Figura 2) com o operador SRC com topografia rugosa (Eq. 6).

Configuração afastamento-nulo (AN)

Para o caso da configuração AN, considera-se neste caso $h_x = 0$ e $h_z = 0$, e a equação (6) reduz-se para

$$t_{rug,AN}^2 = \left(t_0 - \frac{2}{v_1} (m_x \text{sen}\beta_0 + m_z \text{cos}\beta_0) \right)^2 + \frac{2 t_0}{v_1 R_N} \left(m_x \text{cos}\beta_0 - m_z \text{sen}\beta_0 \right)^2. \quad (7)$$

Eventos de difração

Para o caso de um ponto difrator, considera-se a mesma condição explicada anteriormente, ou seja, $R_N = R_{NIP}$ na equação (6) para obter

$$t_{rug,dif}^2 = \left(t_0 + \frac{2}{v_1} (m_x \text{sen}\beta_0 + m_z \text{cos}\beta_0) \right)^2 + \frac{2 t_0}{v_1 R_{NIP}} \left[\left(m_x \text{cos}\beta_0 - m_z \text{sen}\beta_0 \right)^2 + \left(h_x \text{cos}\beta_0 - h_z \text{sen}\beta_0 \right)^2 \right]. \quad (8)$$

Similarmente, na Figura 7 apresenta-se as mesmas comparações anteriores, porém considerando o operador de difração SDC com topografia rugosa (Eq. 8). Foi mostrado que os operadores ou superfícies de empilhamento SRC e SDC para topografia rugosa (independente da curvatura da linha de medição), aproximam melhor os tempos de trânsito de reflexões.

Empilhamento Multifoco para topografia rugosa

Gurevich et al. (2002) propuseram uma nova extensão da função tempo de trânsito Multifoco (e.g. Gelchinsky et al. (1999a,b)), para ser aplicado em dados adquiridos em áreas com topografia irregular. Este tempo de trânsito Multifoco para um raio paraxial a um raio normal (Figura 8) sobre uma superfície de medição com topografia rugosa é dado por

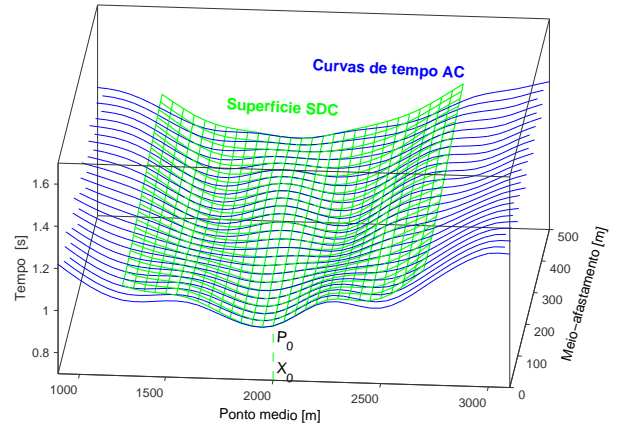


Figura 7: Comparação dos tempos de trânsito verdadeiro (curvas de cor azul) com o operador de difração SDC com topografia rugosa (curvas de cor verde, eq. 8).

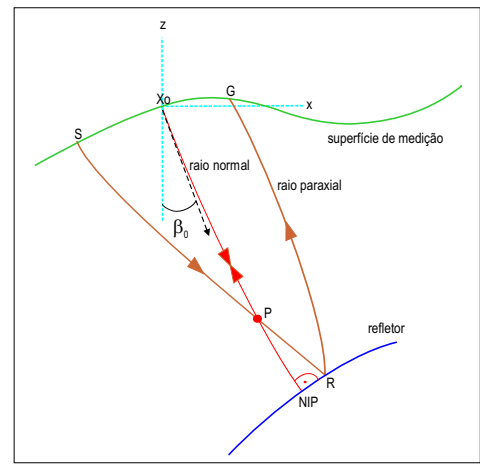


Figura 8: Diagrama do raio para o tempo Multifoco com topografia. O raio paraxial SRG intersecta o raio normal no ponto foco-comum P .

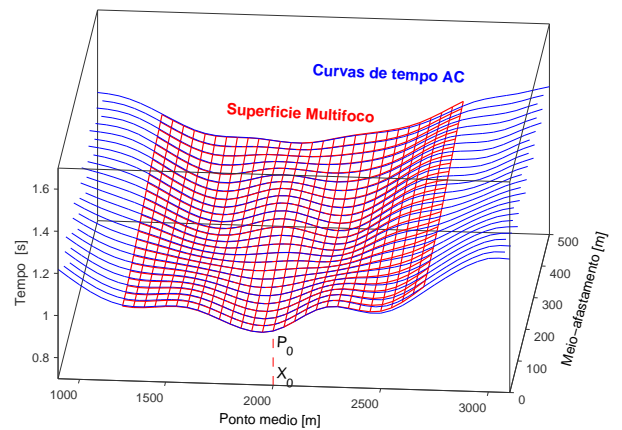


Figura 9: Comparação dos tempos de trânsito verdadeiro (curvas de cor azul) com o operador Multifoco com topografia rugosa (curvas de cor vermelha, eq. 9).

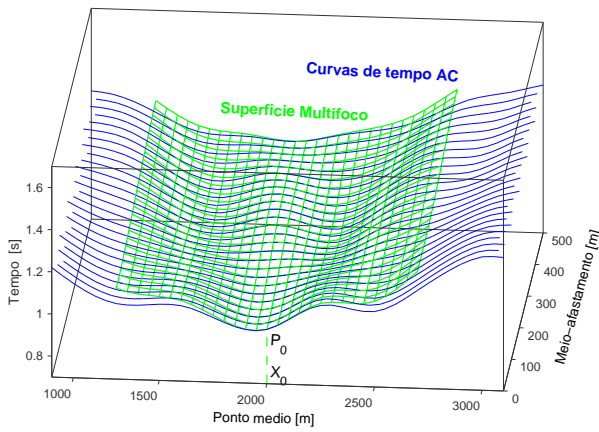


Figura 10: Comparação dos tempos de trânsito verdadeiro (curvas de cor azul) com o operador de Difração Multifoco com topografia rugosa (curvas de cor verde, eq. 12).

$$t_{mult} = t_0 + \frac{R^-}{v_0} \left[\sqrt{1 + \frac{\Delta X_G^2 + \Delta Y_G^2}{(R^-)^2} + \frac{2(\Delta X_G \text{sen} \beta_0 + \Delta Y_G \cos \beta_0)}{R^-}} - 1 \right] + \frac{R^+}{v_0} \left[\sqrt{1 + \frac{\Delta X_S^2 + \Delta Y_S^2}{(R^+)^2} + \frac{2(\Delta X_S \text{sen} \beta_0 + \Delta Y_S \cos \beta_0)}{R^+}} - 1 \right], \quad (9)$$

sendo

$$R^+ = \frac{1 + \sigma}{\frac{1}{R_N} + \frac{\sigma}{R_{NIP}}}, \quad R^- = \frac{1 - \sigma}{\frac{1}{R_N} - \frac{\sigma}{R_{NIP}}},$$

$$\Delta X_i = x_i - x_0, \quad \Delta Y_i = y_i - y_0, \quad i = S, G$$

$$\sigma = \frac{\Delta X_S - \Delta X_G - (\Delta Y_S - \Delta Y_G) \tan \beta_0}{\Delta X_S + \Delta X_G - (\Delta Y_S + \Delta Y_G) \tan \beta_0 + Q \text{sen} \beta_0},$$

$$Q = \frac{2(\Delta X_S \Delta X_G - Y \Delta Y_S \Delta Y_G)}{R_{NIP}} + \frac{(\Delta X_S \Delta Y_G + \Delta Y_S \Delta Y_G)(\cos^2 \beta_0 - \text{sen}^2 \beta_0)}{R_{NIP}}, \quad (10)$$

onde (x_0, y_0) são as coordenadas horizontal e vertical do ponto de emergência do raio central X_0 (Figura 8). As coordenadas (x_S, y_S) e (x_G, y_G) representam as posições da fonte S e do geofone G do raio paraxial, com os eixos x , sendo positivo à direita, e z sendo positivo para acima. σ representa o parâmetro Multifoco.

Na Figura 9 são comparados os tempos de trânsito verdadeiros com o tempos gerados pelo operador Multifoco com topografia rugosa (9).

Configuração afastamento-nulo (AN)

Para o caso da configuração AN, considera-se neste caso $\Delta x_S = \Delta x_G$ e $\Delta y_S = \Delta y_G$, e a equação (9) reduz-se para

$$t_{mult,AN} = t_0$$

$$+ \frac{2 R_N}{v_0} \left[\sqrt{1 + \frac{\Delta X_S^2 + \Delta Y_S^2}{R_N^2} + \frac{2(\Delta X_S \text{sen} \beta_0 + \Delta Y_S \cos \beta_0)}{R_N}} - 1 \right] \quad (11)$$

Eventos de difração

Para o caso de um ponto difrator, considera-se a mesma condição explicada anteriormente, ou seja, $R_N = R_{NIP}$ na equação (9) para obter

$$t_{mult,dif} = t_0 + \frac{R_{NIP}}{v_0} \left[\sqrt{1 + \frac{\Delta X_G^2 + \Delta Y_G^2}{R_{NIP}^2} + \frac{2(\Delta X_G \text{sen} \beta_0 + \Delta Y_G \cos \beta_0)}{R_{NIP}}} - 1 \right] + \frac{R_{NIP}}{v_0} \left[\sqrt{1 + \frac{\Delta X_S^2 + \Delta Y_S^2}{R_{NIP}^2} + \frac{2(\Delta X_S \text{sen} \beta_0 + \Delta Y_S \cos \beta_0)}{R_{NIP}}} - 1 \right]. \quad (12)$$

Na Figura 10, apresenta-se as mesmas comparações anteriores, porém considerando o operador de difração Multifoco com topografia rugosa (12).

Algoritmo SRC para topografia rugosa

A estratégia SRC 2-D que será aplicada em futuros trabalhos para superfícies de medição com topografia rugosa será a mesma aplicada por Garabito et al. (2001a,b). Esta estratégia pode ser usada com as fórmulas dos empilhamentos SRC e Multifoco para topografia rugosa, e consiste de três etapas:

Etapa I: Nesta primeira etapa, para cada ponto imagem P_0 da seção sísmica AN a ser simulada são determinados o par de parâmetros (R_{NIP}, β_0) , segundo a condição $R_N \equiv R_{NIP}$, mediante uma busca bidimensional nos dados de cobertura múltipla aplicando o algoritmo de otimização global Simulating Annealing (SA) (Corana et al., 1987). A função objeto utilizada neste problema inverso é o semblance que usa a equação (8) para calcular as superfícies de empilhamento testadas.

Etapa II: Na segunda etapa, para cada ponto AN, P_0 , também é determinado o terceiro parâmetro R_N mediante uma busca unidimensional na seção AN resultante da primeira etapa. Os valores dos parâmetros estimados na primeira etapa são usados para fixar β_0 na equação (7) utilizada nesta etapa. O problema inverso é formulado para estimar o melhor R_N com o valor máximo do semblance medido ao longo das curvas de tempos de trânsito na seção AN. Esta etapa também usa o algoritmo de otimização local SA.

Etapa III: Os resultados das etapas I e II são considerados como uma boa aproximação para os parâmetros de empilhamento. Estes resultados serão usados como aproximações iniciais nesta etapa. Isto significa que para cada ponto P_0 , e considerando os dados de cobertura múltipla incluídos na superfície de empilhamento (6) e faz-se uma nova busca para os três parâmetros simultaneamente. O problema inverso é formulado para estimar o melhor trio de parâmetros (β_0, R_{NIP}, R_N) com o valor máximo de semblance. Nesta etapa usa-se o algoritmo de otimização local denominado Variable Metric (VM) (Bard (1974); Gill et al. (1981)).

Conclusões

Nós temos estendido os operadores de empilhamento SRC e Multifoco com topografia rugosa, para considerar os eventos de difração. Para um modelo sintético 2-D com topografia rugosa, foram comparados os operadores de empilhamento SRC (reflexões e difrações) para topografia suave e rugosa, e também do operador Multifoco para topografia rugosa. Foi demonstrado que os operadores SRC e Multifoco com topografia rugosa são mais apropriados para superfície de medição rugosa e irregular. Com base nestes resultados, também apresentamos o algoritmo SRC 2-D para implementação futura para simulação de seções AN a partir de dados sísmicos adquiridos numa linha sísmica com topografia rugosa.

Agradecimentos

O segundo autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro. Também agradecemos ao Consorcio Wave Inversion Technology (WIT), Germany.

References

- Bard, B., 1974, Nonlinear parameter estimation: Academic Press.
- Biloti, R., Portugal, R., Santos, T. L., and Tygel, M., 2001, Obtaining AVO and AVA curves from CRS attributes: *Journal of Seismic Exploration*, **10**, 19–29.
- Biloti, R., 2001, Tempo de Trânsito Multiparamétricos: Estimção e Inversão (in portuguese): Ph.D. thesis, State University of Campinas (Brazil).
- Chira, P., Tygel, M., Zhang, Y., and Hubral, P., 2001, Analytic CRS Stack formula for a 2D curved measurement surface and finite-offset reflections: *Journal of Seismic Exploration*, **5**, no. 10, 245–262.
- 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).
- Corana, A., Marchesi, M., Martini, C., and ridel, S., 1987, Minimizing multimodal functions of continuous variables with 'simulated annealing' algorithm: *ACM Transactions on Mathematical Software*.
- Garabito, G., Cruz, J. C. R., Hubral, P., and Costa, J., 2001a, Common reflection surface stack by global optimization: 71th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts.
- 2001b, Empilhamento sísmico de superfícies de reflexão comum com mergulhos conflitantes: 7o. Congresso Internacional, SBGf, Resumos expandidos, TS2.
- Garabito, G., 2001, Empilhamento Sísmico por Superfície de Reflexão Comum: um novo algoritmo usando Otimização Global e Local (in portuguese): Ph.D. thesis, Federal University of Para (Brazil).
- Gelchinsky, B., Berkovitch, A., and Keydar, S., 1999a, Multifocusing homeomorphic imaging. Part I. Basic concepts and formulas. Special Issue: Macro-Model Independent Seismic Reflection Imaging: *J. Appl. Geoph.*, **42**, no. 3,4, 229–242.
- 1999b, Multifocusing homeomorphic imaging. Part II. Multifold data set and Multifocusing. Special Issue: Macro-Model Independent Seismic Reflection Imaging: *J. Appl. Geoph.*, **42**, no. 3,4, 243–260.
- Gill, P. E., Murray, W., and Wright, M. H., 1981, *Practical optimization*: Academic Press.
- Gurevich, B., Keydar, S., and Landa, E., 2002, Multifocusing imaging over an irregular topography: *Geophysics*, **67**, 639–643.
- Hubral, P., 1983, Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth: *Geophysics*, **48**, no. 8, 1051–1062.
- Jäger, R., Mann, J., Höcht, G., and Hubral, P., 2001, Common-reflection-surface stack: Image and attributes: *Geophysics*, **66**, no. 1, 97–109.
- Majer, P., 2000, Inversion of seismic parameters: Determination of the 2-D iso-velocity layer model: Master's thesis, University of Karlsruhe (Germany).
- Mann, J., Jäger, R., and Höcht, G., 2000, Macro-model independent approximative pre-stack time migration: 62nd Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, B–52.
- Müller, T., 1999, The common reflection surface stack - seismic imaging without explicit knowledge of the velocity model: *Der Andere Verlag, Bad Iburg*.
- Schleicher, J., Tygel, M., and Hubral, P., 1993, Parabolic and hyperbolic paraxial two-point traveltimes in 3D media: *Geophysical Prospecting*, **41**, no. 4, 495–514.
- Tygel, M., Müller, T., Hubral, P., and Schleicher, J., 1997, Eigenwave based multiparameter traveltime expansions: 67th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1770–1773.
- Červený, V., and Psěnsik, I., 1988, Ray tracing program package: .
- Červený, V., 2001, *Seismic ray theory*: Cambridge University Press.
- Vieth, K.-U., 2001, Kinematic wavefield attributes in seismic imaging: Ph.D. thesis, University of Karlsruhe (Germany).
- Zhang, Y., Höcht, G., and Hubral, P., 2002, 2D and 3D ZO CRS stack for a complex top-surface topography: 64th Annual Internat. Mtg., Eur. Assoc. Expl. Geophys., Extended Abstracts.