



EMPILHAMENTO CRS HIPERBÓLICO E NÃO-HIPERBÓLICO PARA O IMAGEAMENTO DE REFLEXÕES SÍSMICAS

Dionis Fábio Campos do Rosário, Faculdade de Geofísica, Instituto de Geociências, UFPA

Pedro Andrés Chira Oliva, Instituto de Estudos Costeiros (IECOS), UFPA

Copyright 2016, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no VII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Ouro Preto, 25 a 27 de outubro de 2016. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VII SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

In seismic data processing, the seismic stacking simulates zero-offset (ZO) sections from multicoverage data. This reduces the amount of data used and increases the signal/noise ratio. In recent years, some alternative methods of seismic imaging have emerged to improve the restrictions of the conventional stacking method Common-Midpoint (CMP), and among these non-conventional methods, from the Common-Reflection-Surface (CRS) and the non-hyperbolic Common-Reflection-Surface (NH-CRS). In this work, were tested the performance of the non-hyperbolic and hyperbolic CRS traveltimes approximations in synthetic seismic data to simulate zero-offset sections considering primary and symmetrical multiple reflections.

Introdução

Um dos métodos mais utilizados no processamento de dados sísmicos é o empilhamento sísmico convencional Common-Midpoint (CMP). Este método apresenta suas limitações por considerar uma curva para o empilhamento dos dados e um único parâmetro conhecido como a velocidade Normal-Moveout (NMO). Nos últimos anos, com o intuito de superar as restrições do CMP, surgiram diversos métodos alternativos de empilhamento sísmico convencional, e estes são referidos na literatura geofísica como métodos independentes do macro-modelo de velocidades (Hubral, 1999). Entre estes métodos destacam-se o Multifoco (MF) (e.g. Gelchinsky et al., 1999 a,b; Chira, 2000; Gurevich et al., 2002), o Common-Reflection-Surface (CRS) (e.g. Müller, 1999; Mann et al., 1999; Jäger et al., 2001; Trappe et al., 2001), o Common-Reflection-Surface não-hiperbólico (CRS-NH) (Fomel & Kazinnik 2012), entre outros métodos. Estes métodos, porém, utilizam aproximações de tempo de trânsito que levam em consideração uma superfície de empilhamento e mais de um parâmetro atribuído no empilhamento. Diversas aplicações satisfatórias dos métodos MF e CRS têm sido reportadas na literatura (Höcht et al., 1999; Landa et al., 1999; Garabito, 2001; Gurevich et al., 2002; Menyoli et al., 2004; Heilmann et al., 2006; Gierse et al., 2006). Ambos os métodos (MF e CRS) precisam determinar através da análise de coerência três parâmetros que correspondem ao ângulo de emergência do raio normal (raio central) e as curvaturas de duas

ondas hipotéticas Normal-Incidence-Point (NIP) e Normal (N) introduzidas por Hubral (1983).

O método de empilhamento CRS utiliza uma aproximação hiperbólica multiparamétrica para a superfície de tempos de reflexão (Schleicher et al., 1993; Tygel et al., 1997) também conhecida como aproximação CRS de 2ª ordem ou aproximação CRS convencional.

Uma nova proposta de aproximação de tempos de trânsito não-hiperbólica para o método CRS foi apresentada por Fomel & Kazinnik (2012). A forma desta aproximação segue de uma equação analítica para o tempo de trânsito de reflexão segundo um refletor de forma hiperbólica. Eles analisaram a exatidão da aproximação não-hiperbólica proposta sobre exemplos e demonstraram que esta nova aproximação pode significativamente estender o intervalo de exatidão do método CRS.

Neste trabalho, é aplicada a aproximação de tempos de trânsito CRS não-hiperbólica para simular seções afastamento-nulo considerando além das reflexões primárias, as reflexões múltiplas simétricas. Finalmente são comparados estes resultados aos gerados com as aproximações de tempo de trânsito CRS hiperbólica para analisar o desempenho desta aproximação não-hiperbólica na simulação de seções ZO, considerando neste caso também as reflexões múltiplas do tipo simétricas.

Método

Aproximações de tempo de trânsito CRS hiperbólico

A aproximação de tempo de trânsito CRS hiperbólico é uma das aproximações de tempo trânsito utilizado no método de empilhamento sísmico CRS (Tygel et al., 1997) e é representada matematicamente de duas formas: como a aproximação CRS de 2ª ordem e também com uma expansão de Taylor da anterior aproximação denominada CRS de 4ª ordem (Höcht et al., 1999; Chira et al., 2003; Chira-Oliva et al., 2010).

Aproximação de tempo de trânsito CRS de 2ª ordem

A aproximação de tempo de trânsito CRS de 2ª ordem, pode ser expressa pela equação a seguir (Tygel et al., 1997; Schleicher et al., 1993):

$$\begin{aligned} t_{2,ref}^2(x_m, h) &= \left[t_0 + \frac{2 \operatorname{sen} \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) \right]^2 \\ &+ \frac{2 t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0} [K_N (x_m - x_0)^2 \\ &+ K_{NIP} h^2], \end{aligned} \quad (1)$$

sendo x_m e h as coordenadas ponto-médio e o meio afastamento, respectivamente; v_0 a velocidade próxima a superfície de medição; x_0 a coordenada do ponto de emergência do raio de reflexão normal e, t_0 o tempo de trânsito duplo ao longo da trajetória do raio normal. Os parâmetros CRS (Eq. 1) são: o ângulo de emergência do raio de reflexão normal da linha de medição (β_0), a curvatura da onda hipotética NIP ($K_{NIP} = 1/R_{NIP}$) e a curvatura da onda hipotética N ($K_N = 1/R_N$). A partir da aproximação de tempo de trânsito CRS (Eq. 1) pode-se definir uma superfície ou curvatura de empilhamento CRS.

Aproximação de tempo de trânsito CRS de 4ª ordem

A aproximação de tempo de trânsito de 4ª ordem, proposta por Höcht et al. (1999), é expressa da seguinte maneira (Höcht et al., 1999):

$$t_{4,ref}^2(x_m, h) = t_{2,ref}^2(x_m, h) + \frac{\cos^2 \beta_0}{v_0} \left[A(x_m - x_0)h^2 + B(x_m - x_0)^3 + C(x_m - x_0)^4 + D(x_m - x_0)^2 h^2 + E h^4 \right] \quad (2)$$

sendo,

$$A = 2K_{NIP} \text{sen} \beta_0 [2 - 2v_0 t_0 K_N - v_0 t_0 K_{NIP}],$$

$$B = 2K_N \text{sen} \beta_0 [2 - 2v_0 t_0 K_N],$$

$$C = K_N^2 [5 \cos^2 \beta_0 - 4] [1 - v_0 t_0 K_N / 2],$$

$$D = K_{NIP} \left\{ \begin{array}{l} 2v_0 t_0 [3 - 4 \cos^2 \beta_0] K_N^2 \\ + K_N [4 - 5 \cos^2 \beta_0] [-2 + v_0 t_0 K_{NIP}] \\ - 2K_{NIP} \text{sen}^2 \beta_0 [2 - v_0 t_0 K_{NIP}] \end{array} \right\},$$

$E =$

$$K_{NIP}^2 \left[2v_0 t_0 K_N \text{sen}^2 \beta_0 - \left(\frac{v_0 t_0 K_{NIP} \cos^2 \beta_0}{2} \right) + \cos^2 \beta_0 \right]$$

Esta expansão está baseada na construção do tempo de trânsito exato para um meio não homogêneo onde eles consideraram uma onda emergente cuja frente de onda é circular e definida pelos mesmos parâmetros da aproximação CRS de 2ª ordem.

Aproximação de tempo de trânsito CRS não-hiperbólico

Esta aproximação de tempo de trânsito CRS, foi proposta por Fomel & Kazinnik (2012). A forma desta aproximação segue de uma equação analítica para o tempo de trânsito de reflexão segundo um refletor de forma hiperbólica. Os autores demonstraram que esta nova aproximação pode, significativamente, estender o intervalo de exatidão do método CRS.

Em termos do trio paramétrico CRS, a aproximação de tempo de trânsito CRS não-hiperbólico (Fomel & Kazinnik, 2012) é expressa pela equação a seguir:

$$t_{CRS,NH}^2(x_m, h) = \frac{1}{2} \left[t_0 + \frac{2 \text{sen} \beta_0}{v_0} x_m \right]^2 + \frac{t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_N} x_m^2 + \left[\frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_{NIP}} + \frac{2 \text{sen}^2 \beta_0}{v_0^2} - \frac{t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_N} \right] h^2 + \frac{\sqrt{F * G}}{2} \quad (3)$$

sendo:

$$F = \left[\left(t_0 + \frac{2 \text{sen} \beta_0}{v_0} (x_m - h) \right)^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_N} (x_m - h)^2 \right],$$

$$G = \left[\left(t_0 + \frac{2 \text{sen} \beta_0}{v_0} (x_m + h) \right)^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0 R_N} (x_m + h)^2 \right].$$

Resultados

Neste tópico, será apresentado os resultados gerados a partir da realização da etapa de empilhamento sísmico considerando as aproximações de tempo de trânsito CRS hiperbólico e não-hiperbólico, destacadas neste trabalho. Os testes realizados visaram demonstrar a eficiência destes métodos de empilhamento para simular seções ZO com presença de reflexões múltiplas do tipo simétricas.

O modelo 2-D considerado neste estudo está constituído por três camadas homogêneas sob um semi-espaco e separadas por interfaces curvas e suaves (Fig. 1). As velocidades para cada camada, desde o topo até a base, são: 3,5 km/s, 2,5km/s, 4,5km/s e 5,5 km/s. As dimensões do modelo são: 3,0 km de comprimento por 3,0 km de profundidade. A simulação de aquisição foi realizada considerando uma linha horizontal. As reflexões múltipla-simétricas geradas correspondem a terceira camada.

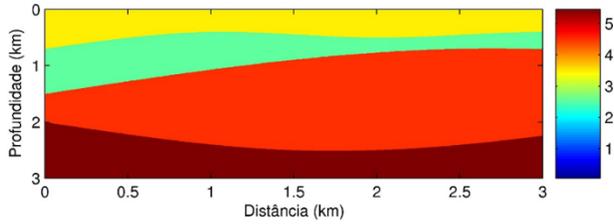


Figura 1. Modelo 2-D constituído por três camadas separadas com interfaces curvas e suaves sob um semi-espaço.

Baseado neste modelo foi gerado o conjunto de dados sintéticos de reflexão de cobertura múltipla utilizando o algoritmo de traçamento de raio, SEIS88 (Cerveny & Psenik, 1988). Os dados não contêm ruído e foram gerados utilizando a configuração common-shot (CS) ou de tiro comum. O mínimo e máximo afastamento foram 0,6 km e 2,9 km, respectivamente.

Foi considerada uma fonte tipo Ricker com uma frequência dominante de 50 Hz e um intervalo de amostragem de tempo de 0,002 s. A primeira fonte foi posicionada em $x_s = 0,5$ km e o primeiro geofone em $x_G = 1,1$ km, sendo distribuídos 48 geofones com espaçamentos de 0,025 km entre eles. A posição do último geofone é $x_G = 2,3$ km. Consideramos 70 tiros com intervalos de 0,05 km cada. A seção sísmica ZO a ser simulada é mostrada na Fig. 2 e consta de 81 traços com intervalos de 0,025 km.

A Fig. 2 representa uma seção ZO obtida através do traçamento de raios com o software SEIS88 apresentando as reflexões primárias e as múltiplas simétricas que se encontra destacado pelo retângulo vermelho. Com a finalidade de destacar melhor as múltiplas imageadas na Fig. 2, são destacadas estas reflexões através de um respectivo ganho Fig. 3.

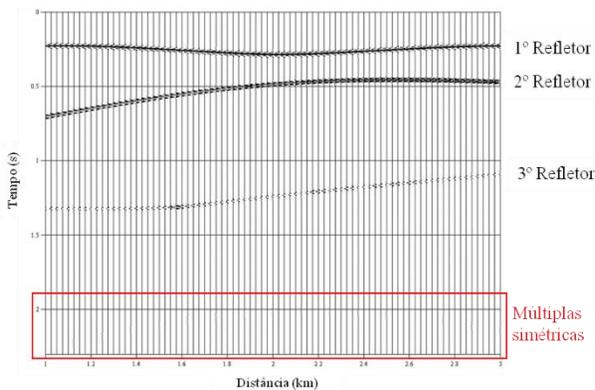


Figura 2. Seção ZO obtida através do traçamento de raios com o software SEIS88 apresentando as reflexões primárias e/ou múltiplas (destacados no retângulo em vermelho).

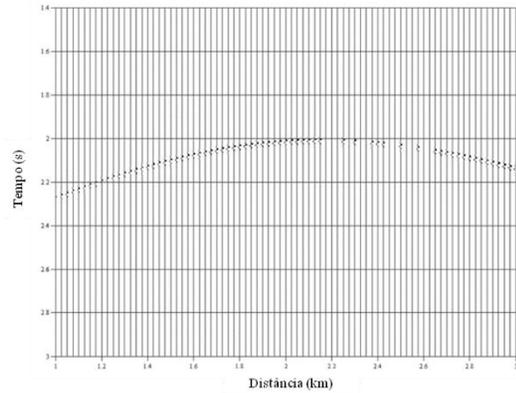


Figura 3. Reflexões múltiplas-simétricas ZO simuladas com o traçamento de raios utilizando o software SEIS88.

Ao aplicar as aproximações CRS hiperbólicas (2ª e 4ª ordem), foram obtidas as seções ZO simuladas (Fig. 4). Podemos observar a presença das reflexões primárias e das reflexões múltiplas geradas na terceira camada. As reflexões múltiplas (ver retângulo vermelho) apresentam-se com uma amplitude baixa devido a perda do sinal com a profundidade. Ambas as aproximações CRS hiperbólicas apresentam um desempenho aceitável na simulação de eventos de reflexões primárias e múltipla-simétricas.

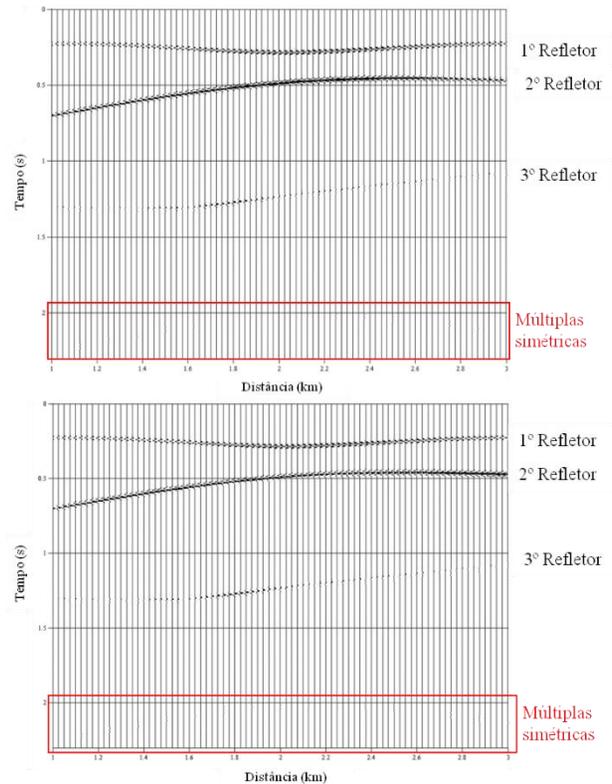


Figura 4. Topo: Seção ZO simulada utilizando a aproximação CRS hiperbólica de 2ª ordem. Base: Seção ZO simulada utilizando a aproximação CRS hiperbólica de 4ª ordem.

Comparando a seção ZO original (Fig. 2), com as obtidas pelas aproximações CRS de 2ª e 4ª ordem Fig. 4, observa-se uma boa definição dos refletores e uma boa aproximação da seção original.

Posteriormente com a finalidade de realçar as reflexões múltiplas simétricas simuladas com o método CRS Fig. 4 foi aplicado um ganho que é visualizado através de um zoom ampliado Fig. 5.

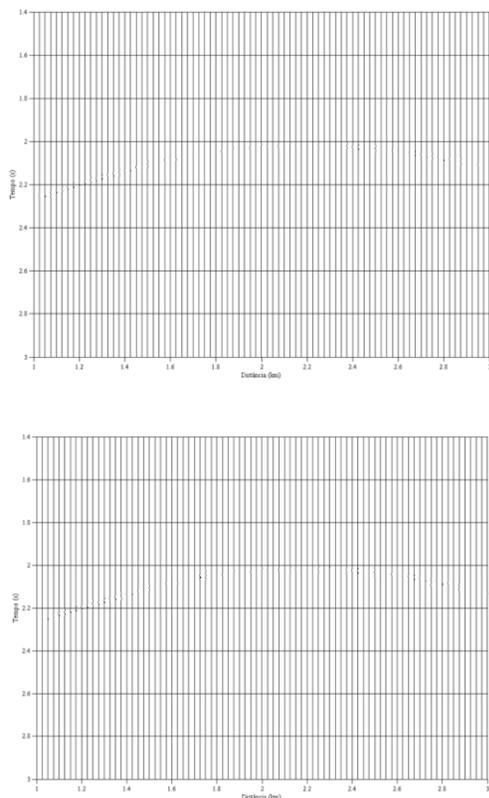


Figura 5. Reflexões múltiplas-simétricas ZO simuladas com as aproximações CRS hiperbólicas de 2ª ordem (topo) e 4ª ordem (base), respectivamente

Finalmente foi aplicado a aproximação de tempos CRS não-hiperbólico ao modelo da Fig. 1. A seção ZO simulada com esta aproximação de tempos de trânsito é apresentada na Fig. 6. Podemos observar a presença das reflexões primárias e das reflexões múltiplas geradas na terceira camada. Assim como nos resultados anteriores, também foi aplicado um ganho nas reflexões múltiplas-simétricas para dar realce a estes eventos de reflexão Fig. 7.

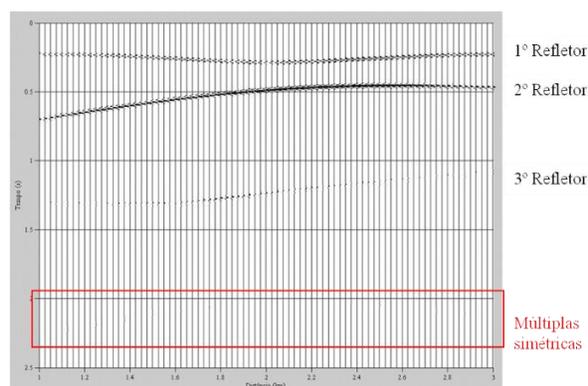


Figura 6. Seção ZO simulada utilizando a aproximação CRS não-hiperbólica.

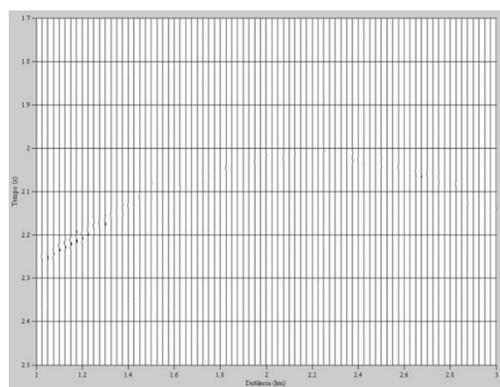


Figura 7. Reflexões múltiplas-simétricas ZO simuladas com as aproximações CRS não-hiperbólica.

Discussão e Conclusão

A aproximações de tempos de trânsito CRS hiperbólicas (2ª e 4ª ordem) e não-hiperbólica simulam satisfatoriamente as seções zero-offset (ZO). Segundo os resultados obtidos, podemos observar um bom posicionamento dos tempos de trânsito e uma boa visualização dos referidos eventos, principalmente nos refletores mais próximos a superfície por possuírem maior energia.

Podemos notar ainda, que não há grande diferença de imageamento entre as aproximações CRS hiperbólicas e não-hiperbólica quando o máximo afastamento fonte-receptor é de 3 km para o referido modelo 2-D em questão.

Contudo, na simulação de reflexões múltiplas-simétricas ZO a aproximação de tempos de trânsito CRS não-hiperbólica é ligeiramente um pouco melhor no flanco esquerdo do modelo testado quando comparado com as aproximações de tempos de trânsito CRS hiperbólicas.

Na análise dos traços simulados para as posições selecionadas para o modelo deste trabalho, os métodos de empilhamento CRS hiperbólico e CRS não-hiperbólico, mostrou em geral uma boa recuperação da forma e um aumento na amplitude do traço ZO original. Observou-se também uma diminuição na amplitude do 3º

refletor nos traços analisados, devido à perda de energia com a profundidade.

Os métodos de empilhamento CRS hiperbólico e não-hiperbólico, para o modelo testado, no geral recuperaram bem a forma e com um aumento da amplitude do traço original ZO.

Agradecimentos

O primeiro autor gostaria de agradecer ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC/UFPA) pelo suporte financeiro enquanto bolsista.

Referências

ČERVENÝ V & PSENCIK I. 1988. SEIS88, ray tracing program package.

CHIRA P, 2000. Imageamento Multifocos de Refletores Sísmicos. Universidade Federal do Pará (Dissertação de Mestrado em Geofísica).

CHIRA-OLIVA P, TYGEL M, HUBRAL P & SCHLEICHER J. 2003. A fourth-order CRS moveout for reflection or diffraction events: numerical examples. *Journal of Seismic Exploration*, 12:197–219.

CHIRA-OLIVA P, GARABITO G & CRUZ, J. 2010. Fourth-Order Stacking Method - Examples. In: 72nd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2010, Barcelona. 72nd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2010.

FOMEL S & KAZINNIK R. 2012. Non-hyperbolic common reflection surface. *Geophysical Prospecting*, 61(1): 21-27.
GARABITO G. 2001. Empilhamento Sísmico por Superfície de Reflexão Comum: Um novo Algoritmo Usando Otimização Global e Local. Universidade Federal do Pará (Tese de Doutorado em Geofísica).

GELCHISNKY B, BERKOVITCH A & KEYDAR S. 1999a. Multifocusing homeomorphic imaging: Part 1. Basic concepts and formulae. *Journal of Applied Geophysics*, 42: 229-242.

GELCHISNKY B, BERKOVITCH A. & KEYDAR S. 1999b. Multifocusing homeomorphic imaging: Part 2. Multifold data set and multifocusing. *Journal of Applied Geophysics*, 42: 243-260.

GIERSE G & PRUESSMANN J. 2006. CRS Stacking Velocity Estimation - A Key to High-Resolution Seismic 68th EAGE Exhibition & Conference, Vienna.

GUREVICH B, KEYDAR S & LANDA E. 2002. Multifocusing imaging over an irregular topography. *Geophysics*, 67: 639-643.

HÖCHT G, DE BAZELAIRE E, MAJER P & HUBRAL P. 1999. Seismic and optics: hyperbolae and curvatures. *Journal Applied Geophysics*, 42 (3,4): 261-282.

HEILMANN Z, MANN J & KOGLIN I. 2006, CRS-stack-based seismic imaging considering top-surface topography: *Geophysical Prospecting*, 54: 681-695.

HUBRAL P. 1999. Macro-model independent seismic reflection imaging. *Journal of Applied Geophysics*, Special Issue, 42: 137–346.

HUBRAL P. 1983. Computing true reflexions in a laterally inhomogeneous earth. *Geophysics*, 48 (.8): 1051-1062.

JÄGER R, MANN J, HÖCHT G & HUBRAL P. 2001 Common reflection surface: image and attributes. *Geophysics*, 66 (1): 97-109.

LANDA E, GUREVICH B, KEYDAR S & TRACHTMAN P. 1999, Application of multifocusing method for subsurface imaging: *Journal of Applied Geophysics*, 42: 283–300.

MANN J, JÄGER R, MÜLLER T, HÖCHT G & HUBRAL P. 1999. Common-reflection-surface stack - a real data example. *J. Appl. Geoph.*, 42 (3,4): 301–318.

MENYOLI E, GAJEWSKI D & HÜBSCHER C. 2004, Imaging of complex basin structures with the common reflection surface (CRS) stack method: *Geophysical Journal International*, 157: 1206–1216. doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02268.x

MÜLLER T. 1999. The common reflection surface stack method: Seismic imaging without explicit knowledge of velocity model. 1999. Karlsruhe University, Germany (Ph. D thesis).

SCHLEICHER J, TYGEL M & HUBRAL P. 1993. Parabolic and hyperbolic paraxial two points traveltimes in 3D media. *Geophysical Prospecting*, 41 (4): 495-513.

TRAPE H, GIERSE G & PRUESSMANN J. 2001. Case studies show potential of common-reflection-surface stack –structural resolution in the time domain beyond the conventional NMO/DMO Stack. *First Break*, 19 (11): 625-633.

TYGEL M, MÜLLER T, HUBRAL P & SCHLEICHER J. 1997. Eigenwave based multiparameter travelttime expansions. In: ANNUAL MEETING OF SEG, 67., [S.I.] Expanded abstracts, [S.I.], p. 1770-1773.