



Migração por mínimos quadrados (LSM) no domínio do tiro

Antônio Edson L. Oliveira – Petrobras; Reynam C. Pestana – CPGG/UFBA e Adriano Wagner G. Santos – CPGG/UFBA

Copyright 2014, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no VI Simpósio Brasileiro de Geofísica, Porto Alegre, 14 a 16 de outubro de 2014. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VI 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.

Abstract

One of the most important limitations of imaging methods is that, usually, the recorded seismic data are incomplete. It causes difficulties for the subsurface imaging techniques. The least-squares migration method (LSM) was proposed in order to reduce migration artifacts caused by incomplete data. However, the complete solution of LSM method requires the computing and storage of the Hessian matrix, and then its computational efficiency is low. In order to overcome such difficulties, we implemented the least-squares reverse time migration (LSRTM) solution in the shot domain. In order to optimize the iterative search of the best model we used the steepest descent method. As a result, we obtained images with a reduction in the error between the modeled and calculated data. The LSRTM sections showed a better resolution than those obtained with the conventional RTM method.

Introdução

O método de migração LSM foi proposto com o objetivo de reduzir os artefatos de migração provenientes de dados com uma amostragem irregular (Nemeth *et al.*, 1999). Há vários casos em que a condição de integralidade não é observada na geofísica, a exemplo da abertura truncada de registros e das irregularidades de diversas origens na distribuição espacial de fontes e receptores, as quais acabam deixando nos dados marcas de aquisição (*footprints*). O problema a ser considerado é que a matriz Hessiana completa do método LSM é geralmente grande e difícil de ser calculada, reduzindo a sua eficiência computacional. Diversos esforços têm sido feitos no sentido de se buscar alternativas ao seu cálculo, de modo que o custo computacional seja minimizado. Sheng-Chang e Han-Chuang (2010) utilizaram um termo de compensação de iluminação na migração RTM no domínio de ondas planas. Esse termo que tem relação com as distribuições de energia dos campos de onda de fonte e de receptor e exerce o papel da matriz Hessiana da solução LSM. Huang *et al.* (2011) trataram o problema de imagem como um problema de inversão por mínimos quadrados, e utilizaram o algoritmo LSM combinado com o método Kirchhoff de migração pré-empilhamento em profundidade em dados sintéticos. O método iterativo do gradiente conjugado foi empregado na busca do mínimo da função erro, de modo a se obter uma imagem de maior resolução a cada iteração. Dong *et al.* (2012) aplicaram uma inversão 3D baseada nos métodos LSM e RTM, na qual o operador RTM foi utilizado para

modelagem e migração. Eles buscaram melhores imagens da refletividade utilizando inversão por mínimos quadrados, na qual a solução é obtida minimizando uma função objetivo definida como a diferença por mínimos quadrados entre os dados modelados e observados. Dai e Schuster (2012) e Dai e Schuster (2013) apresentam a formulação da migração LSRTM na qual a imagem migrada de cada tiro é atualizada separadamente, e famílias de imagens comuns (*comum image gather* - CIG) são produzidas para controle de qualidade da migração. Neste trabalho o método LSM foi empregado na busca dos modelos que melhor se ajustassem aos dados de entrada, os quais foram computados por meio do operador de modelagem de Born a partir do modelo de refletividade e do campo de velocidade suavizado. O algoritmo iterativo do decrescimento mais rápido (*steepest descent*) foi adotado para otimizar o processo de busca.

Metodologia/ Problema Investigado

A teoria LSM supõe a linearização perto do modelo verdadeiro, de modo que o problema direto pode ser escrito como $\mathbf{d} = \mathbf{G}\mathbf{m}$ (Ren *et al.*, 2013). O correspondente problema inverso linear consiste na estimativa do modelo \mathbf{m} que melhor se ajusta aos dados observados \mathbf{d} . Uma forma usual de se resolver esse problema é utilizar o método dos mínimos quadrados, o qual fornece um modelo estimado (\mathbf{m}^{est}) que melhor se aproxima daquele verdadeiro (\mathbf{m}^{verd}), conforme a expressão:

$$\mathbf{m}^{est} = [\mathbf{G}^T \mathbf{G}]^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{d} \quad (1)$$

A solução estimada na Eq. (1) é denominada de migração por mínimos quadrados (LSM), na qual $\mathbf{G}^T \mathbf{G}$ é considerada como sendo a matriz Hessiana (Nemeth *et al.* (1999); Chen e Wang, (2010); Ren *et al.* (2013)).

Um operador de migração convencional pode ser pensado como o adjunto do operador de modelagem direta (Clearbout, 1992). Ou seja, no problema de imagem na migração de dados sísmicos, pode-se considerar que \mathbf{G} e \mathbf{G}^T correspondem aos operadores de modelagem e de migração, respectivamente. Neste caso, considerando-se que $[\mathbf{G}^T \mathbf{G}]^{-1} \approx \mathbf{I}$ na Eq. (1), obtém-se a expressão para a migração convencional:

$$\mathbf{m}_r = \mathbf{G}^T \mathbf{d} \quad (2)$$

A comparação entre os resultados das Eqs. (1) e (2) sugere que o método LSM fornece uma imagem de maior resolução, mas o cálculo de $\mathbf{G}^T \mathbf{G}$ possui um elevado custo computacional. Desse modo, como alternativa ao seu cálculo, a técnica de migração LSM é apresentada na literatura geofísica com diferentes parametrizações. O fluxo implementado neste estudo é ilustrado na Fig. (1).

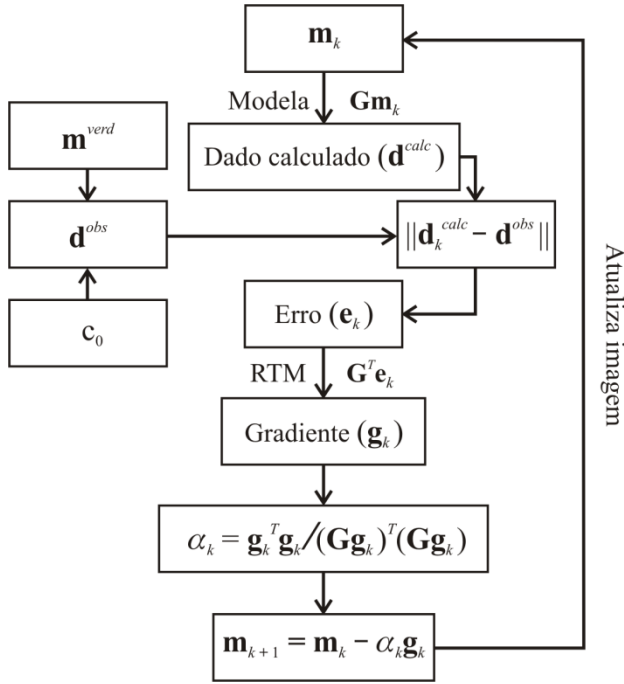


Figura 1 – Fluxo de processamento do método LSRTM.

Inicialmente gera-se o dado sintético utilizando-se o operador de modelagem de Born, que tem com entradas o campo de velocidades suavizado \mathbf{c}_0 e o modelo verdadeiro da refletividade \mathbf{m}^{verd} . O dado assim gerado é considerado como sendo aquele observado \mathbf{d}^{obs} . Na etapa seguinte escolhe-se o modelo inicial \mathbf{m}_0 . A partir dele, modela-se o dado calculado para a primeira iteração (\mathbf{d}_0^{calc}). A diferença entre os dados calculado e observado corresponde ao resíduo \mathbf{e}_k . O operador \mathbf{G}^T é utilizado para se obter a correção da imagem \mathbf{g}_k , de modo que o modelo para a iteração $k + 1$ é dado por:

$$\mathbf{m}_{k+1} = \mathbf{m}_k - \alpha_k \mathbf{g}_k, \quad (3)$$

na qual α é o comprimento do passo da busca iterativa do modelo que minimiza o erro.

O processo de atualização é repetido para um número fixo de iterações, de modo que a imagem obtida na k -ésima iteração é a seção final Fig. (2).

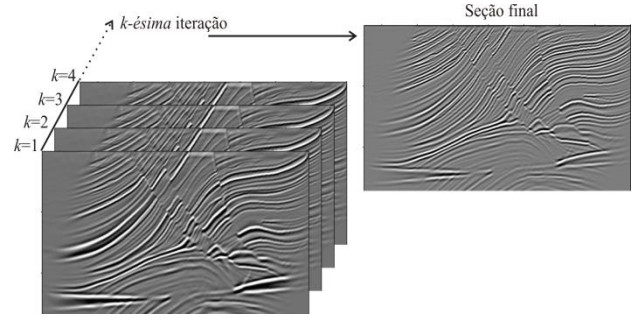


Figura 2 – Ilustração do fluxo de processamento do método LSRTM.

Resultados

O modelo Marmousi foi utilizado nos testes de eficiência do método LSRTM. Inicialmente ele foi migrado com o operador RTM pré-empilhamento convencional no domínio do tiro, e o resultado é mostrado na Fig. (3).

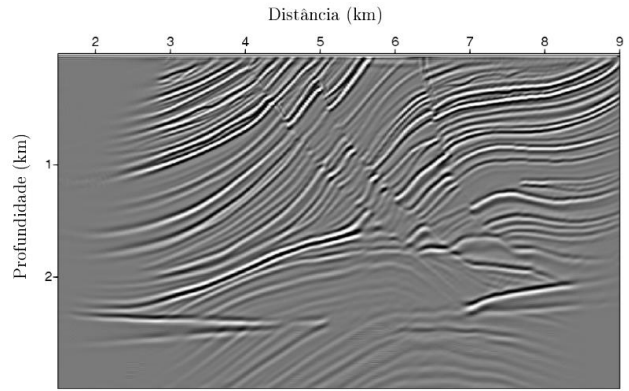


Figura 3 – Seção RTM convencional.

O primeiro experimento com o método LSRTM foi realizado com o dado incompleto. Desta maneira, o dado de entrada no fluxo de processamento, originalmente composto por 240 registros, foi reduzido para 15, equidistantes de 400 m. A Fig. (4) é a seção para 30 iterações.

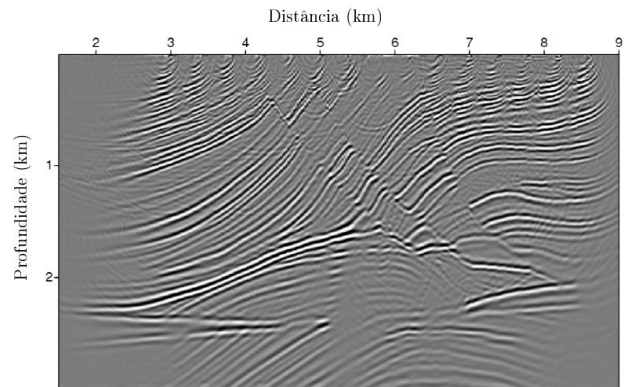


Figura 4 – Seção LSRTM: 15 tiros para 30 iterações.

A despeito do reduzido número de registros, a seção obtida a partir do dado incompleto mostra uma boa

continuidade dos refletores, especialmente aqueles mais profundos.

A segunda sequência de testes foi realizada com dado completo, o qual é composto de 240 tiros espaçados de 25 m. As Figs. (5) e (6) representam as seções obtidas para 1 e 30 as iterações, respectivamente.

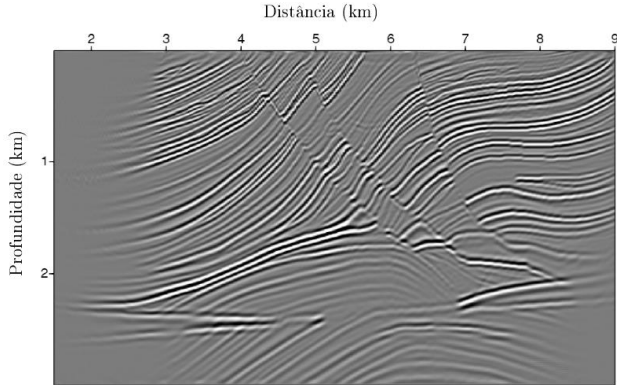


Figura 5 – Seção LSRTM: 240 tiros para 1 iteração.

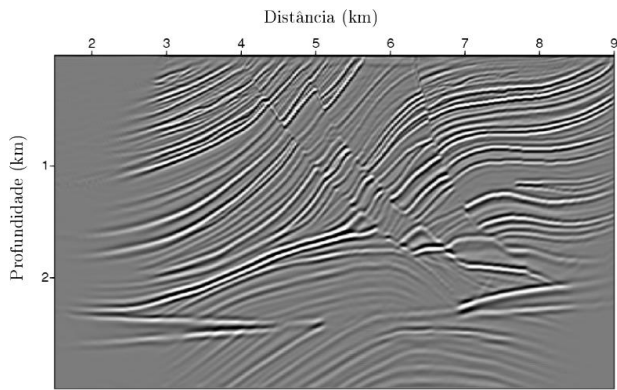


Figura 6 – Seção LSRTM: 240 tiros para 30 iterações.

Com o dado completo, a nitidez da imagem é boa em toda a seção já na 1ª iteração. Os refletores mostram-se contínuos e os planos de falhas bem definidos.

Um dos parâmetros utilizados para se avaliar se o método caminha em direção ao modelo que minimiza a diferença entre os dados de entrada e os calculados a cada iteração é o erro residual. A Fig. (7) mostra a sua evolução em função do incremento do número de iterações. O gráfico mostra o comportamento do erro para as imagens obtidas com os dados incompleto e completo a partir da 1ª até a 45ª iteração. Em ambos os casos, nota-se um decrescimento rápido já nas iterações iniciais, e a partir de 30 iterações já não há uma redução no valor do erro que justifique a manutenção do processo iterativo.

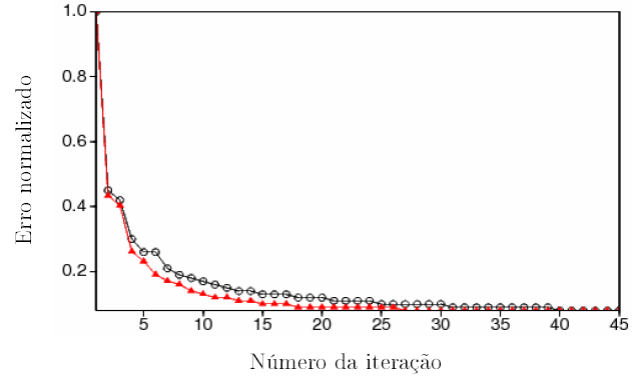


Figura 7 – Evolução do erro versus iteração. Resultados para 15 (círculos) e 240 (triângulos) tiros.

Uma das razões pela qual o método LSM tem sido alvo do interesse da geofísica de exploração é a sua eficiência quando aplicados em dados incompletos. Desta maneira, excluiu-se 30 tiros do dado Marmousi. As Figs. (8) e (9) correspondem as seções RTM convencional e LSRTM.

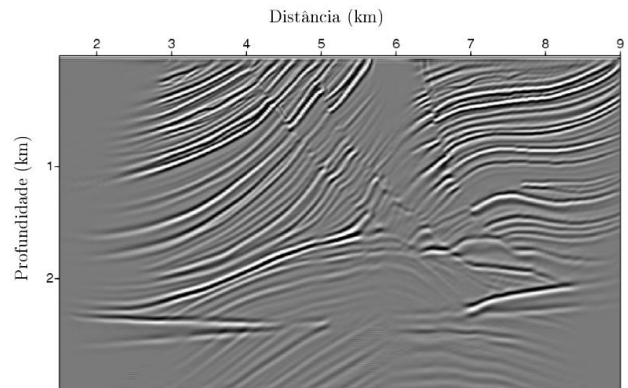


Figura 8 – Seção RTM convencional pré-empilhamento. Dado com lacuna de 30 tiros.

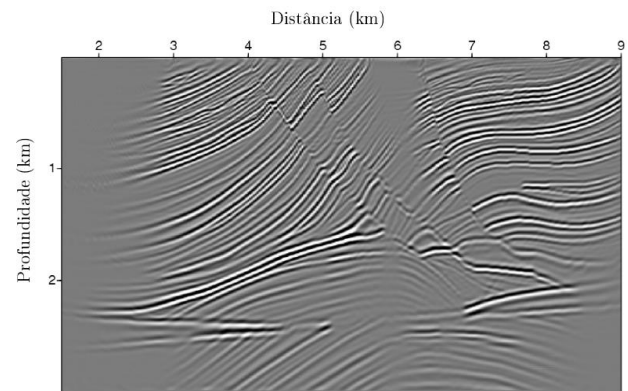
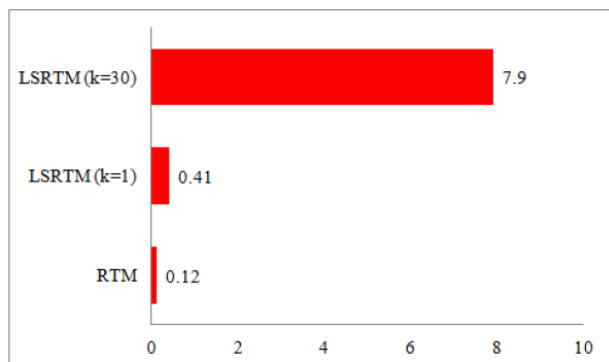


Figura 9 – Seção LSRTM: dado com lacuna de 30 tiros para 30 iterações.

Nota-se uma zona de sombra que afeta especialmente a parte mais rasa das seções, na área situada entre as distâncias de 5,5 a 6,5 km e até uma profundidade de aproximadamente 1,0 km. Embora ela se propague por toda a seção, o seu efeito é atenuado com a

profundidade. Este resultado corrobora a eficiência do método para o caso de dados incompletos. Comparando-se com o resultado obtido com o método RTM convencional, mostrado na Fig. (8), percebe-se que o resultado LSRTM é superior no tange a resolução.

Outro parâmetro medido foi o tempo de processamento, o qual representa um dos fatores mais críticos quando se trata de métodos de imageamento. Para a sua medida, submeteu-se as "tarefas" (*jobs*) para 120 unidades do *cluster* que possuem a mesma capacidade de processamento. A Fig. (10) mostra os tempos, em hora decimal, que foram requeridos pelos métodos RTM convencional e LSRTM para 1 e 30 iterações. Verifica-se que o custo computacional do processamento LSRTM é elevado, quando comparado com o RTM convencional. O tempo de máquina necessário para a RTM foi de aproximadamente 7 minutos, valor que corresponde a cerca de 30% daquele gasto em uma única iteração do método LSRTM.



Hora decimal

Figura 10 – Tempo de processamento dos método RTM convencional e LSRTM para 1 e 30 iterações.

Discussão e Conclusões

Os testes realizados nos dados sintéticos 2D do modelo Marmousi com o método LSRTM mostraram seções nítidas já nas primeiras iterações. Nelas, nota-se que as interfaces e os planos de falhas apresentam uma boa resolução. As seções obtidas a partir dos dados incompletos mostram uma boa continuidade dos refletores, especialmente aqueles mais profundos, resultado que corrobora a eficiência do método quando aplicado a dados com lacunas de aquisição.

O erro residual decresce já nas primeiras iterações, sendo que a partir da 30ª já não há uma redução no seu valor que justifique a manutenção do processo iterativo. Com base em uma avaliação qualitativa, o processo poderia ser interrompido nas iterações iniciais, 5 por exemplo, sem prejuízos significativos para a qualidade das imagens.

O custo computacional do processamento LSM é elevado, quando comparado com o RTM. O tempo de máquina requerido para a RTM foi cerca de 30% daquele despendido em uma única iteração. Portanto, o emprego

do método LSM em larga escala encontra como principal desafio o custo computacional.

Apesar dos problemas pontuados, o método LSM mostra-se bastante promissor como ferramenta para o imageamento sísmico. Ele tem despertado um crescente interesse da comunidade geofísica, o que justifica o grande número de publicações com diferentes implementações nos últimos anos. Estes trabalhos apresentam resultados ou fazem referência a algumas alternativas para aumentar o desempenho do método, tais com implementações de uma versão GPU¹, a utilização de dados no domínio do parâmetro de raio ou o emprego de métodos de otimização que acelerem o processo iterativo de busca.

Pode-se ainda pensar no método LSM como uma ferramenta auxiliar, o qual pode ser aplicado no imageamento áreas específicas, naquelas onde permaneçam dúvidas após o imageamento com as ferramentas convencionais. Outra potencial aplicação é em áreas que necessitem ser revisitadas à luz de novas tecnologias, onde existam dados antigos, e que novas aquisições enfrentem restrições de natureza diversa, tais como processo de licenciamento ambiental, ocupação urbana, obras de infraestrutura, facilidades de produção de hidrocarbonetos, dentre outras.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Petrobras pela oportunidade de pesquisa oferecida na forma de mestrado e ao LAGEP-CPGG-UFBA pelos recursos disponibilizados durante a realização do mesmo.

Referências

- CHEN SC & WANG HC. 2010. Migration compensation with plane wave illumination: Chinese Journal of Geophysics, 53(4): 583-589.
- CLEARBOUT JF. 1992. Earth soundings analysis: Processing versus inversion, Blackwell Scientific Publications, Inc., Stanford-USA, 316 pp.
- DAI W, FOWLER P & SCHUSTER GT. 2012. Multi-source least-squares reverse time migration: Geophysical Prospecting, 60: 681-695.
- DAI W & and SCHUSTER GT. 2013. Plane-wave Least-squares Reverse Time Migration: Geophysics, 78: S165-S177.
- DONG, S, CAI J, GUO M, SUH S, ZHANG Z, WANG B & LI Z. 2012. Least-squares reverse time migration: Towards true amplitude imaging and improving the resolution, SEG Las Vegas 2012 Annual Meeting.
- HUANG J, LI Z & LIU Y. 2011. The least square pre-stack depth migration method on complex media: SPG/SEG Shenzhen 2011 International Geophysical Conference Technical Program Expanded Abstracts, 2263-2271.

¹ Do inglês *Graphics Processing Unit*

NEMETH T, CHENGJUN W & SCHUSTER G T. 1999. Least-squares migration of incomplete reflection data: *Geophysics*, 64(1): 208-221.

REN, HR, WANG, HZ & CHEN, SC. 2013. Frequency domain adjoint-state least-squares. 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013.