

Um método robusto para deconvolução esparsa no domínio da frequência

Sergio Adriano Moura Oliveira e Wagner Moreira Lupinacci, Grupo de Inferência de Reservatório, LENEP/UENF, Brasil

“Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation at the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th 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

In this work, the sparse deconvolution problem is formulated as a non stationary reflectivity inversion problem in the frequency domain, where the error functional measure the data misfit and the model misfit using L1 norm. In order to solve this problem we adapted the Iteratively Reweighted Least Square method to work with complex data. Attenuation and dispersion are taken into account through the constant q model. The method also estimates the source wavelet spectrum. Testes with synthetic and real data show that the proposed algorithm is robust and needs little number of iterations to converge.

Introdução

A deconvolução é a etapa do processamento sísmico que se destina a recuperar o máximo de conteúdo de frequência do dado, para assim aumentar a resolução temporal. A chamada deconvolução Spike, idealmente comprime o pulso sísmico para um impulso perfeito. Na prática isto não é possível devido ao desconhecimento da função fonte (pulso sísmico) e pela presença de ruídos nos dados, ver, por exemplo, Yilmaz (2000). Os algoritmos convencionais de deconvolução tendem a equalizar o conteúdo de frequência dentro da chamada banda útil de frequência dos dados. Mas essencialmente produzem como saída um sinal cuja largura de banda é a mesma do sinal de entrada. Porém existem métodos mais especializados que são capazes de produzir na saída um dado de banda larga e que são muito mais eficientes em comprimir o pulso sísmico. Uma das alternativas para isto é extrapolar a informação do conteúdo de frequência para fora da banda útil do dado usando um modelo auto-regressivo para o espectro de frequência, o que é comumente chamado de método AR. Outra opção é a deconvolução esparsa, que admite como solução refletividades com um mínimo de variação, ou seja, que são impulsiva em alguns tempos e zerada na maior parte dos instantes. Ambos os métodos estão muito bem descritos do trabalho clássico de Oldenburg et AL (1983). A deconvolução esparsa é adequada se admitirmos que a subsuperfície seja formada por camadas tipo blocos, ou seja, camadas de espessura variável, mas cujas impedâncias sejam constantes. O segredo deste método está na norma utilizada para regularizar o problema inverso de determinação da

refletividade a partir do traço sísmico. Norma baseada em máxima entropia ou L1, para citar alguns exemplos, produzem soluções esparsas (ver Ulrich e Sacchi, 2005).

Neste trabalho, a deconvolução esparsa é apresentada como um problema de inversão de refletividade formulado no domínio da frequência. Algumas das vantagens do método proposto são; permite que se leve em conta facilmente a questão do pulso não estacionário devido aos efeitos de atenuação e dispersão, permite que o espectro de amplitude do pulso sísmico seja extraído conjuntamente do dado. Além disto, a norma L1 é usada tanto na regularização do erro do dado, como do modelo de refletividade, o que gera soluções esparsas e mais imunes a ruídos.

Metodologia

O presente método parte do seguinte modelo do traço sísmico no domínio da frequência:

$$S(\omega) = R(\omega) \cdot F(\omega), \quad (1)$$

onde a função S representa o traço sísmico, R e F são a refletividade e o pulso sísmico, respectivamente. Para modelar a refletividade, consideramos a incidência normal de uma onda harmônica com frequência angular ω em um modelo de camadas com o mesmo duplo tempo de viagem vertical $\Delta\tau$ (ver figura1) e desconsideramos a presença de múltiplas e efeitos de transmissão, o que é coerente com um modelo de baixo contraste de impedância. A expressão para S pode ser escrita como:

$$S(\omega) = F(\omega) \sum_{m=1}^K r_m e^{i\omega m \Delta\tau + \theta_m(\omega)} \quad (2)$$

onde r_m significa o coeficiente de reflexão da m° interface, K é o número de camadas e θ é uma função que introduz os efeitos da atenuação e dispersão nos dados na medida que a onda se propaga pelas camadas. Para definir θ , adotamos o modelo do fator de qualidade constante (ver por exemplo Kjartanson, 1979):

$$\theta_m(\omega) = \omega \Delta\tau [i \ln(\omega_0 / \omega) - 1] \sum_{n=1}^m \frac{1}{q_n} \quad (3)$$

onde q_l corresponde ao fator de qualidade da camada l e ω_0 é uma frequência de referência. Seja $S = [S_1, S_2, \dots, S_n]^T$ o vetor de dados calculados, onde $S_n = S(\omega_n)$. Baseando-se na equação 2 podemos escrever a seguinte relação:

$$S = Mr, \quad (4)$$

sendo r o vetor de coeficientes de reflexão: $r=[r_1, r_2, \dots, r_i]$ e M o operador de modelagem direta, dado por uma matriz complexa com dimensão $N \times K$, onde N é o número de frequências e K o número de interfaces e cujos elementos são :

$$M_{j,l} = F_j e^{i\omega_j l \Delta \tau + \theta_l(\omega_j)}, \quad (5)$$

onde F é o vetor contendo as componentes espectrais do pulso sísmico: $F_j = F(\omega_j)$.

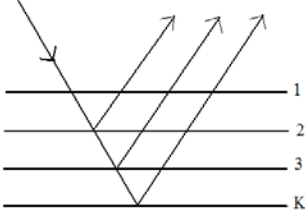


Figura 1 – Representação esquemática dos eventos (reflexões primárias) geradas pela incidência de uma onda em um pacote de camadas.

De posse da equação para o modelo direto (equação 4), vamos agora desenvolver um esquema para inversão dos dados experimentais. Observe que o traço sísmico $d(t)$ é obtido no domínio do tempo e necessita ser transformado para o domínio da frequência. Isto é feito aplicando-se uma rotina *FFT*. Assim definimos o vetor de dados experimentais como $D = FFT(d)$. O esquema de inversão desenvolvido neste trabalho consiste em estimar o vetor de coeficientes de reflexão r e é baseado na minimização do seguinte funcional:

$$E(R) = \|D - Mr\|_1 + \mu \|r\|_1 \quad (6)$$

Observe que neste funcional tanto o erro dos dados como o erro do modelo são medidos usando-se Norma *L1*. No caso particular, estamos lidando com dados complexos e medir o vetor de diferença entre dados medidos e calculados na norma *L1* significa somar os módulos de cada um dos elementos deste vetor. Já é de muito conhecido que, comparada com a norma *L2*, esta norma torna a inversão mais imune à presença de ruídos nos dados (Claerbout e Muir, 1973), já a norma *L1* aplicada ao erro do modelo seleciona soluções esparsas. O fator de regularização μ controla o quanto esparsa a solução será. Valores muito grandes deste parâmetro tende a deixar o vetor r concentrado em poucos impulsos, já valores muito pequenos de μ pode gerar solução não esparsa e tornar o problema instável. O ideal é fixar tal parâmetro de maneira a que se atinja um equilíbrio entre o grau de esparsidade da solução e o erro do dado.

A solução do problema de minimização do funcional E é obtida mediante a aplicação do método IRLS (Iterative Reweighted Least Squares) (ver, por exemplo: Scales e Gersztenkorn, 1988), o que, adaptado para o caso de dado complexo, resulta no seguinte sistema linear a ser resolvido a cada iteração:

$$[\text{Re}\{M^H A M\} + \mu B]r = \text{Re}\{M^H A D\} \quad (7)$$

Neste sistema A e B representam matrizes diagonais de pesos e devem ser atualizada à cada iteração para: $A_{j,j} = 1/|\Delta D_j|$ e $B_{j,j} = 1/|r_j|$. Sendo ΔD o vetor de diferença entre dado experimental e modelado. Normalmente, os elementos da diagonal de A e B são inicializados com valor unitário, o que significa que na primeira iteração é produzida a solução de mínimos quadrados (Norma *L2*).

Por fim, devemos lembrar que o pulso sísmico é desconhecido. Mas o espectro de amplitude deste pode ser estimado simplesmente suavizando-se o espectro de amplitude do traço sísmico. Passo que pode ser facilmente incluído no método proposto. A fase do pulso sísmico é uma informação mais difícil de extrair do dado, a depender do caso pode-se assumir que esta é zero, constante ou mínima.

Resultados e discussões

A seguir serão mostrados resultados da aplicação do método em uma série de dados sintéticos. O primeiro exemplo se refere a um dado gerado com um pulso de fase zero, sem ruído ∞ e com $q=$ (sem atenuação/dispersão). Neste caso ideal observa-se (figura 2b) o resultado da inversão com norma *L2*, que na realidade corresponde ao resultado da primeira iteração do método IRLS. Para obter a solução *L1*, deixamos o algoritmo correr 8 iterações (figura 2c). Neste caso observa-se que tanto a inversão *L2* como *L1* realizaram um bom trabalho. No entanto, a solução *L1* fez um trabalho muito melhor, já que a refletividade original é realmente esparsa.

Na figura 3a é exibido o mesmo traço do exemplo anterior acrescido com ruído randômico de amplitude moderada. Pode-se observar que a refletividade obtida pelo presente método é muito mais insensível a presença deste ruído (figura 3c) do que a inversão convencional usando mínimos quadrados (figura 3b).

No próximo exemplo, o dado sintético foi gerado usando-se a mesma refletividade e pulso do exemplo anterior, mas os efeitos da atenuação e dispersão foram introduzidos considerando-se um fator $q=90$ em todas as camadas (figura 4). O resultado da inversão com norma *L2* é exibido na figura 4b e o resultado obtido com o presente método pode ser visto na figura 4c. Novamente ambos os métodos fizeram um bom trabalho e foram capazes de corrigir os efeitos do pulso não estacionário. Mas pode ser observado que o resultado obtido com norma *L1* obteve uma refletividade bem mais próxima da original.

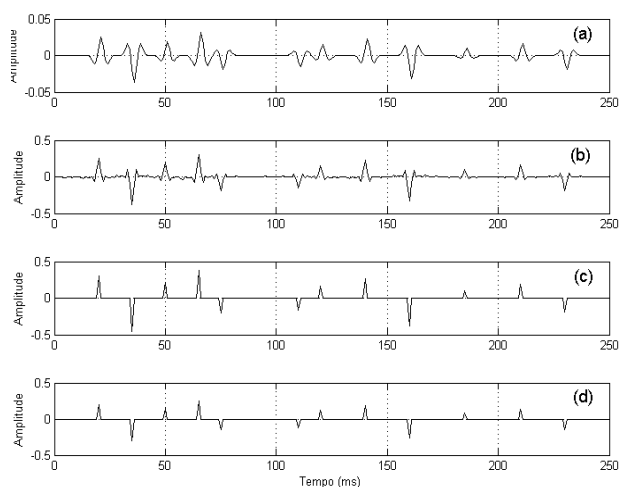


Figura 2 – (a) Traço sísmico sintético gerado com um pulso de fase zero (b) Refletividade obtida usando-se norma L2 (c) Refletividade obtida usando-se o método proposto (d) Refletividade real.

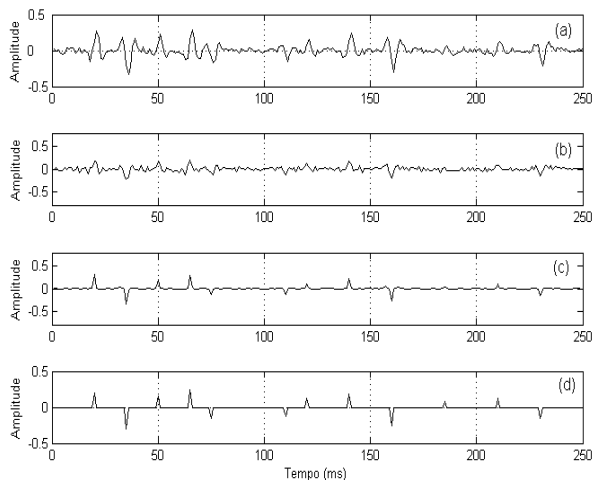


Figura 3 – (a) Traço sísmico sintético gerado com um pulso de fase zero, com ruído adicionado (b) Refletividade obtida usando-se norma L2 (c) Refletividade obtida usando-se o método proposto (d) Refletividade real.

O último exemplo com dado sintético se refere à inversão de um traço com ruído e atenuação (figura 5a). Novamente os efeitos da atenuação e dispersão foram introduzidos considerando-se um fator $q=90$ em todas as camadas e o ruído adicionado foi de amplitude moderada. O resultado obtido pelo método proposto (figura 5c) realizou um bom trabalho embora não tenha conseguido identificar a presença de dois impulsos de pequena amplitude por volta de $t=190$ e $t=240$ ms. O resultado da inversão com norma L2 é mostrado na figura 5d.

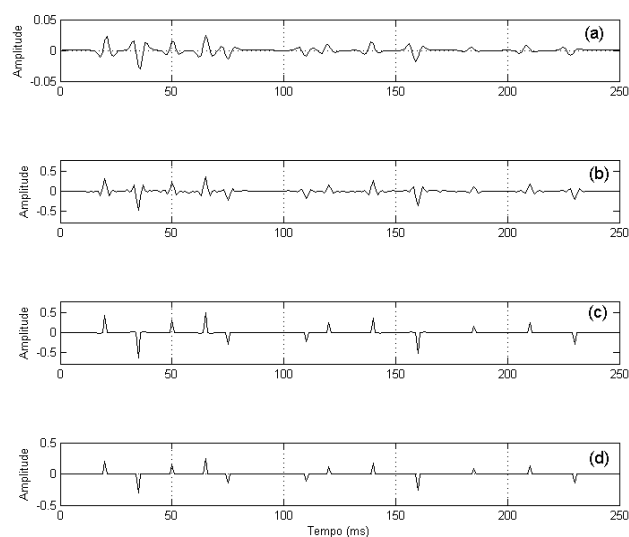


Figura 4 – (a) Traço sísmico sintético gerado com um pulso de fase zero, e atenuação ($q=90$) (b) Refletividade obtida usando-se norma L2 (c) Refletividade obtida usando-se o método proposto (d) Refletividade real.

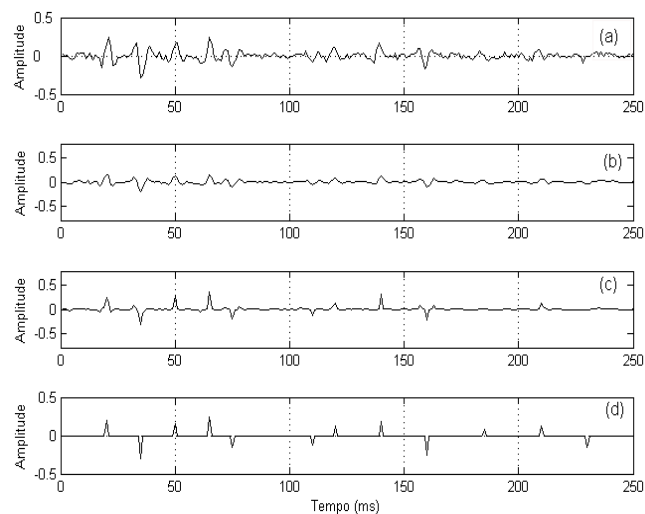


Figura 5 – (a) Traço sísmico sintético gerado com um pulso de fase zero, com ruído adicionado e atenuação ($q=90$) (b) Refletividade obtida usando-se norma L2 (c) Refletividade obtida usando-se o método proposto (d) Refletividade real.

Na figura 6 (esquerda) é exibido o trecho de uma seção sísmica real. Tal seção foi processada em verdadeira amplitude e já passou por uma deconvolução convencional, de modo que o pulso sísmico remanescente é assumido de fase zero. No centro é mostrada a inversão de refletividade obtida pelo método proposto neste trabalho. Na direita é exibida uma seção de um atributo ligado a impedância, que foi obtida simplesmente integrando a seção de refletividade. Por fim vale apenas ressaltar que tanto no exemplo com dado real como com dado sintético, a função densidade

espectral do pulso sísmico $F(\omega)$ foi estimado aplicando um operador de média móvel no espectro de amplitude do traço sísmico. O fator de regularização μ foi fixado por tentativa, começando com um valor bem baixo e aumentando gradativamente até obter uma solução satisfatória. Outro aspecto relevante diz respeito a como fixar uma função $q(\tau)$ que seja representativa do fator de qualidade em cada camada, já que na prática raramente existe acesso a esta informação. A solução que achamos foi trabalhar com um valor constante para q em cada camada e fixar este valor por tentativa. Assim, para o exemplo com dado real, o valor ideal para o fator de qualidade foi determinado em 150.

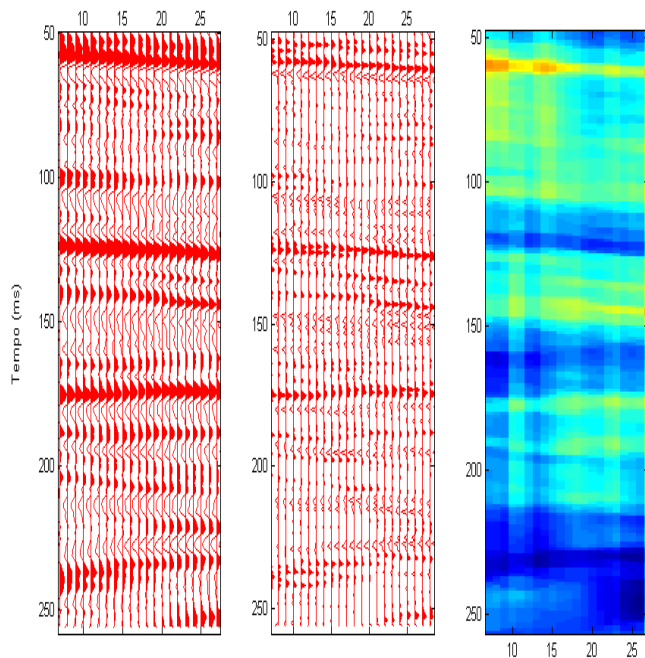


Figura 6 – Seção sísmica real (esquerda). Resultado da inversão de refletividade obtido pelo método proposto (centro). Atributo ligado a impedância extraído da refletividade (esquerda).

Conclusões

O método proposto neste trabalho gera refletividades esparsas e torna a inversão mais imune a presença de ruídos. Além disto, os efeitos da atenuação e dispersão podem ser corrigidos se o fator de qualidade do meio for especificado. O algoritmo de inversão é desenvolvido no domínio da frequência, para isto o método IRLS (Iterative Reweighted Least Squares) foi modificado para operar com dado complexo. O método é de fácil implementação o mostrou resultados coerentes quando aplicado em dado sintético e real, o que o faz promissor para aplicações práticas.

Agradecimentos

O Segundo autor deste trabalho agradece à Fundação Carlos Chagas de Apoio a Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro FAPERJ pela concessão da bolsa de Mestrado.

References

Claerbout, J. F., Muir, F., Robust modeling with erratic data. *Geophysics* **38** n° 5 p 826 – 844, 1973.

Kjartansson, E. Constant Q – Wave propagation and attenuation. *J. Geophys. Res.* **84** p 4737-4748. 1979

Oldenburg, D. W., Scheuer, T. and Levy, S., Recovery of the acoustic impedance from reflection seismograms: *Geophysics*, **48**, p 1318-1337, 1983

Scales, J. A. e Gersztenkorn, A., Robust methods in inverse theory: *Inverse Problems*, **4**, 1071-1091, 1988.

Ulrich, T., J. e Sacchi, M., D., Information-Based inversion and processing with applications. Elsevier, 2005

Yilmaz, O. Seismic Data Analysis: Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data. Society of Exploration Geophysicists (SEG) 2001.