

DECONVOLUÇÃO ITERATIVA DE DADOS SÍSMICOS

Paulo Espinheira Menezes de Melo e Milton José Porsani

Universidade Federal da Bahia, Rua Barão de Geremoabo, s/n, sala 315-C,
Campos de Ondina, Salvador/BA, CEP 40170-115, fone: (71) 203-8537,
e-mail: pemm@cpgg.ufba.br, porsani@cpgg.ufba.br.

Resumo - Neste trabalho, apresentamos um método iterativo para deconvolução do pulso sísmico com base na norma L_p que corresponde a uma adaptação do método ILRMD proposto por Porsani et al. (2001). Os erros de predição do traço sísmico, devidos ao filtro de predição unitária, são elevados a um expoente relacionado à norma em uso, definindo assim um relacionamento não linear entre os coeficientes do filtro preditivo e o resultado da deconvolução. Através da expansão de Taylor com aproximação de primeira ordem, obtém-se um sistema linear de equações que é ponderado pelo resultado da deconvolução ao estágio k . Este método não requer que o pulso satisfaça a premissa de fase mínima. O presente trabalho apresenta alguns resultados da aplicação desta metodologia na deconvolução de dados sísmicos de reflexão, os quais são comparados e discutidos frente aqueles obtidos com a deconvolução de Wiener Levinson (WL). O novo método iterativo para a deconvolução do pulso sísmico é iniciado com o filtro de WL atuando na compressão da componente de fase mínima do pulso e reiniciado com o filtro reverso de WL atuando na compressão da componente de fase máxima do pulso sísmico. Os resultados obtidos utilizando dados sintéticos e reais mostram a aplicabilidade do método iterativo frente ao procedimento de deconvolução convencional com filtro WL utilizando norma L_2 .

Abstract – This work presents an iterative method for deconvolution of the seismic pulse based on the L_p norm which corresponds to an adaptation of the ILRMD method proposed by Porsani et al. (2001). The prediction errors of the seismic trace, due to the prediction filter, are elevated to an exponent related to the norm in use, thus defining a non-linear relationship between the coefficients of the predictive filter and the deconvolution result. By means of the Taylor expansion with a first order approximation, a linear system of equations is obtained and is pondered by the result of the deconvolution at the k stage. This method does not require that the pulse meets the minimum-phase assumption of the Weiner-Levinson (WL) method. This work presents some results of the application of this methodology in the deconvolution of reflection seismic data, which are compared and discussed in light of the ones obtained with the WL deconvolution. The new iterative method for the deconvolution of the seismic pulse is initiated with the WL filter acting upon the minimum-phase component and it is re-initiated with the WL reverse filter acting upon the compression of the maximum phase component of the seismic pulse. The results obtained from synthetic and real data show the applicability of the iterative deconvolution method when compared to the conventional deconvolution procedure with WL filter using the L_2 norm.

1. Introdução

A deconvolução é uma etapa do processamento de dados por meio da qual é possível aumentar a resolução temporal dos dados sísmicos através da compressão do pulso sísmico. É utilizada também para a atenuação de reflexões de múltiplas que ocorrem nos registros de reflexões sísmicas. O sismograma registrado é o resultado da convolução de um pulso gerado perto da superfície com a resposta impulsiva da terra, somado aos ruídos de diversas origens (movimento devido aos ventos, ruído do ambiente, etc).

Assim, o modelo convolucional de um sismograma pode ser matematicamente descrito, pela equação:

$$x_t = p_t * e_t + \eta_t \quad (1)$$

Representamos por: x_t o sismograma registrado (traço sísmico), p_t o pulso sísmico, e_t a função refletividade ou resposta impulsiva da terra, η_t o ruído diverso e $*$ o símbolo que representa convolução. O método de deconvolução pode ser descrito em termos de filtros lineares, que são calculados com base na solução de sistemas lineares de equações. No processo de deconvolução são levados em consideração as premissas: pulso de fase mínima e refletividade branca (Yilmaz, O., 1987).

2. Filtro Wiener de predição unitária

Este é um caso particular, onde a matriz é simétrica e Toeplitz. O operador preditivo de erro pode ser definido como:

$$(\mathbf{1} \quad \mathbf{a}_n^T) = (\mathbf{1}, a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (2)$$

e o vetor erro:

$$\mathbf{e}_t = x_t - a_1 x_{t-1} - a_2 x_{t-2} - \dots - a_n x_{t-n}, \quad (3)$$

ou ainda:

$$\mathbf{e}_t = \begin{bmatrix} x_t & x_{t-1} & \dots & x_{t-n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}, \quad (4)$$

onde, $a_j = -\tilde{a}_j$ e x_{t-N} são os valores do traço sísmico ou do pulso sísmico. Os parâmetros (a_1, \dots, a_n) , podem ser calculados através do processo de recursivo de Levinson. Os coeficientes do filtro são obtidos a partir da autocorrelação do traço sísmico (modelo prático, pois os valores do traço são conhecidos) ou da autocorrelação do pulso sísmico (modelo teórico, pois os valores do pulso sísmico não podem ser medidos). Em seguida este filtro é convolvido com o traço sísmico no intuito de que o sinal filtrado (\mathbf{e}_t) seja uma boa estimativa da função refletividade.

Dada a série x_0, x_1, \dots, x_n :

$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ \vdots \\ e_m \\ e_{m+1} \\ e_{m+n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ x_1 & x_0 & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & x_m & \ddots & \ddots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & x_m & x_{m-1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & x_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

Forma ampliada das equações normais:

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & \dots & r_n \\ r_1 & r_0 & \dots & r_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_n & r_{n-1} & \dots & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} \\ \mathbf{a}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{a}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_N \\ \mathbf{0} \\ \vdots \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (6)$$

O sistema pode ser resolvido através da recursão de Levinson.

Para um filtro de N coeficientes podemos obter a deconvolução com o filtro causal e anti-causal conforme representado a seguir:

$$({}^+e_t \quad {}^-e_t) = (x_t \quad x_{t-1} \dots x_{t-N}) \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{a}_N \\ \mathbf{a}_1 & \vdots \\ \vdots & \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_N & \mathbf{1} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Os filtros de WL causal e anti-causal serão utilizados para iniciar o método de deconvolução a seguir.

3. Método de Deconvolução Iterativa

Seguindo o procedimento proposto por Porsani et al. (2001) podemos definir a função objetivo em termos da norma L_p como segue:

$$\mathbf{Q}(\mathbf{a}, \mathbf{p}) = \sum_{t=0}^{M+N} \left\{ \left[({}^+e_t)^2 \right]^{\frac{1}{p}} \right\}^p, \quad (8)$$

onde, ${}^+e_t$ representa o erro de previsão do sinal x_t , a partir da combinação linear de seus valores a tempos passados. Deixemos:

$$\mathbf{f}(\mathbf{a}, \mathbf{p}, t) = ({}^+e_t^2)^{\frac{p}{4}}, \quad (9)$$

Expandindo a equação (7) por série de Taylor em torno do modelo corrente \mathbf{a}_k , e tomando a aproximação de primeira ordem, obtém-se:

$$\mathbf{f}(\mathbf{a}, \mathbf{p}, t) \cong \tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{a}, \mathbf{p}, t) = \mathbf{f}(\mathbf{a}_k, \mathbf{p}, t) + \frac{p}{2} ({}^+e_t^2)^{\frac{p-1}{4}} ({}^+e_t) \frac{\partial {}^+e_t}{\partial \mathbf{a}} \Big|_{\mathbf{a}_k} (\mathbf{a} - \mathbf{a}_k). \quad (10)$$

A aproximação por série por série de Taylor faz com que a função $\mathbf{f}(\mathbf{a}, \mathbf{p}, t)$ que antes era de natureza não linear, se torne agora uma função linear, onde:

$$F_{ii} = \frac{p}{2} ({}^+e_i^2)^{\frac{p-1}{4}} ({}^+e_i), \quad (11)$$

$$f_i = ({}^+e_i^2)^{\frac{p}{4}} \quad (12)$$

e ${}^+e_i^2$ representa a amostra na posição $t=i\Delta$ do traço deconvolvido com o filtro $(\mathbf{1} \quad \mathbf{a}_k)$.

A equação (8) pode ser representada de forma mais compacta,

$$\tilde{\mathbf{f}}_p = \mathbf{f}_{pk} - \mathbf{F}_{pk} \mathbf{X} \Delta \mathbf{a}. \quad (13)$$

O vetor $\Delta \mathbf{a}$ pode ser calculado de forma a minimizar a forma quadrática,

$$\tilde{\mathbf{Q}}(\mathbf{a}, \mathbf{p}) = \tilde{\mathbf{f}}_p^T \tilde{\mathbf{f}}_p. \quad (14)$$

Derivando com relação aos parâmetros $a_j, j=1, \dots, N$, obtém-se as equações normais:

$$(\mathbf{X}^T \mathbf{F}_{pk}^2 \mathbf{X}) \Delta \mathbf{a} = \mathbf{X}^T \mathbf{F}_{pk} \mathbf{f}_{pk}. \quad (15)$$

Resolvendo a equação (13) para o vetor $\Delta \mathbf{a}$ podemos atualizar os coeficientes do filtro por:

$$\mathbf{a}_{k+1} = \mathbf{a}_k + \Delta \mathbf{a} \quad (16)$$

Um conjunto de equações similares pode ser obtido para o filtro anti-causal (\mathbf{b}_k^T 1).

Conforme ilustra o exemplo sintético (Figura 1), o método iterativo consegue deconvolver bem, mesmo quando o método convencional falha, ou seja, quando o pulso não é de fase mínima.

4. Aplicações do método iterativo em dados sintéticos e reais

O método iterativo foi aplicado em um traço sintético, em um CDP da linha sísmica da Noruega e em um trecho empilhado da seção sísmica do Golfo do México. Esses dados estão disponíveis no CPGG/UFBA.

A Figura 1 ilustra o método iterativo deconvolvendo um traço sintético gerado pela convolução de um pulso de fase mista com uma refletividade aleatória, utilizando luz branca 1% e comprimento de filtro igual a 40 amostras. O método iterativo (e) conseguiu restituir com ótima qualidade a função refletividade aleatória, não ocorrendo o mesmo com o método convencional (d).

A Figura 2 mostra o método iterativo atuando em um CDP da linha sísmica da Noruega, utilizando luz branca 1% e comprimento de filtro igual a 30 amostras. O novo método (b) produziu resultados de melhor qualidade com eventos mais comprimidos, principalmente na faixa 2.05 s, 2.35 s e 3.45 s.

A Figura 3 apresenta o método iterativo aplicado em um trecho empilhado da seção sísmica do Golfo do México, utilizando luz branca 1% e comprimento de filtro igual a 30 amostras. Podemos observar que a deconvolução pelo método iterativo (b) produziu resultados marcantes com melhor definição e continuidade lateral, principalmente nos eventos 1.9 s, 2.1 s e 3.3 s. Também foi feita uma análise dos espectros de amplitude (Figura 4) verificando-se que o método iterativo conseguiu amplificar as altas frequências em todo intervalo 55 Hz a 105 Hz.

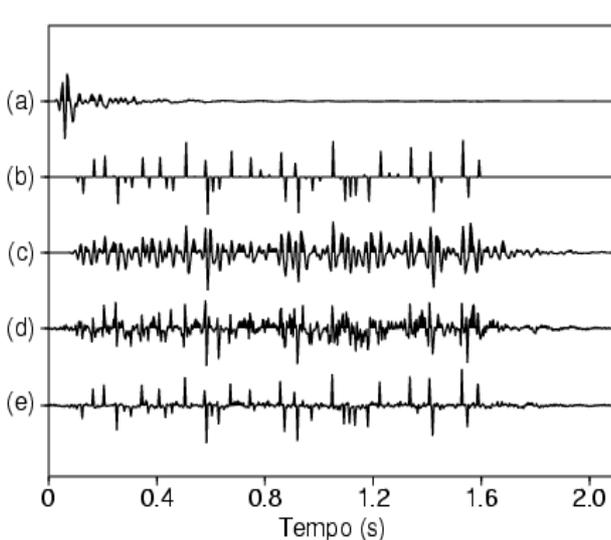


Figura 1: Deconvolução de um traço sintético. Pulso de fase mista em (a), refletividade aleatória que se deseja recuperar em (b), traço sintético em (c), resultado com o método WL em (d) e resultado com o método iterativo em (e).

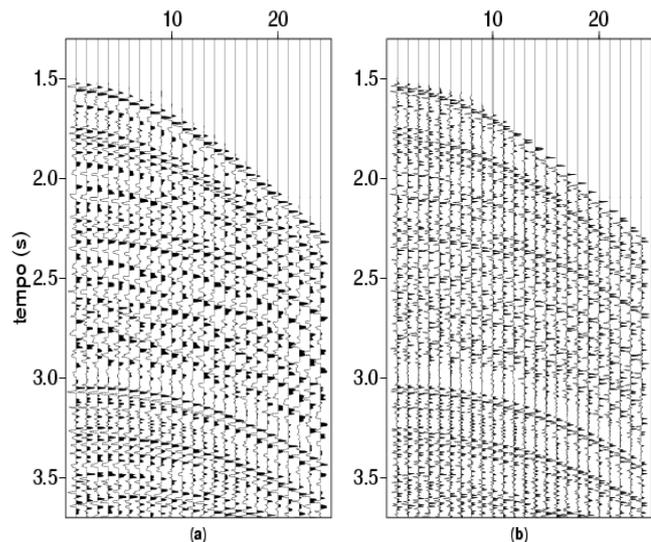


Figura 2: Aplicação do método iterativo em um CDP da seção sísmica da Noruega. CDP original sem deconvolução em (a) e utilizando o método iterativo em (b).

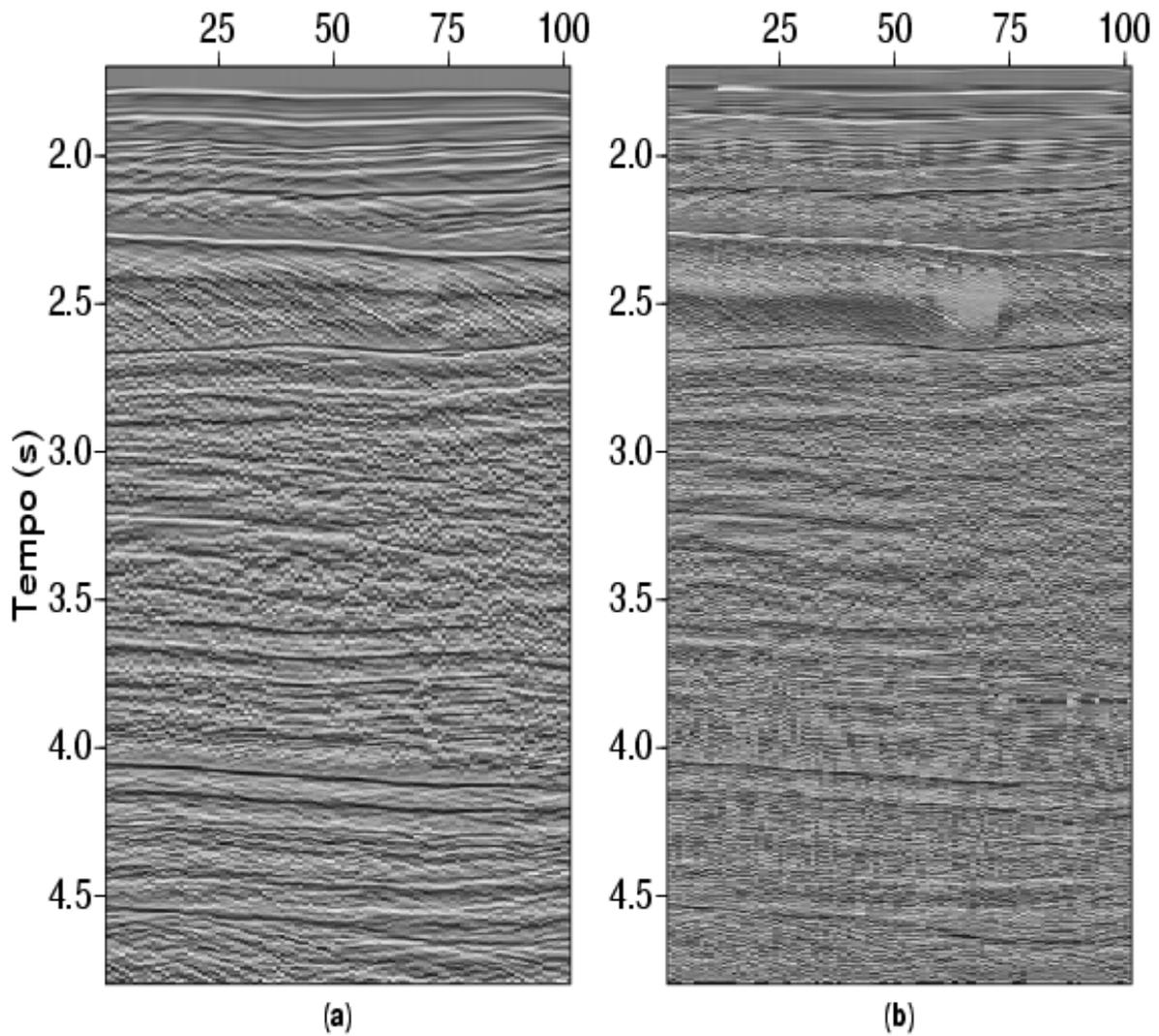


Figura 3: Aplicação do método iterativo em um trecho empilhado do Golfo do México. Dado original sem deconvolução em (a) e deconvolvido com o método iterativo em (b).

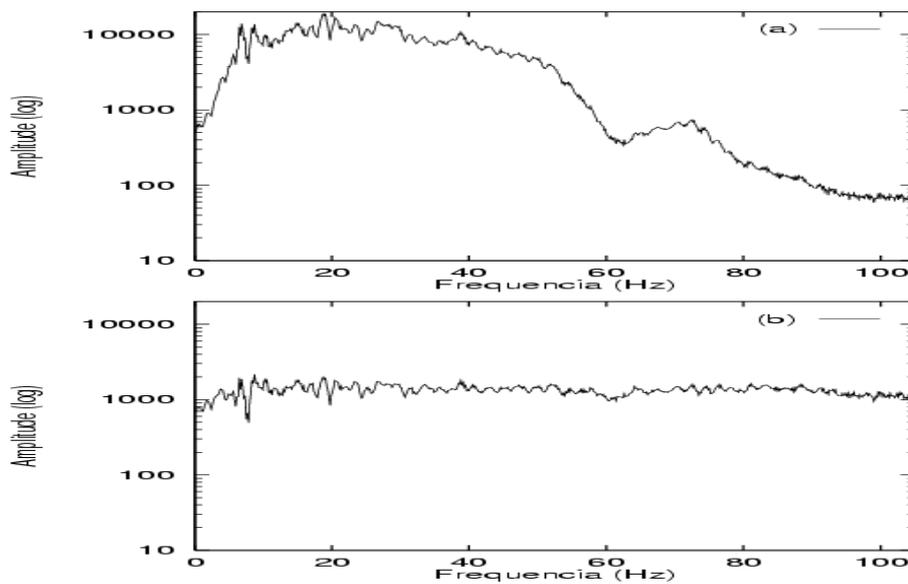


Figura 4: Espectro de amplitude: trecho empilhado do Golfo do México sem deconvolução em (a) e deconvolvido com o método iterativo em (b).

5. Conclusões

O método apresentado de deconvolução iterativa é de fácil implementação computacional, numericamente estável e ao contrário do método de Wiener-Levinson (WL) não requer que o pulso sísmico seja de fase mínima. Os testes realizados em dados sintéticos (Figura 1) mostram a eficácia do método iterativo frente a um traço sísmico gerado com um pulso de fase mista restituindo a função refletividade, não ocorrendo o mesmo com o método de WL.

Os resultados obtidos em dados reais com o método iterativo (Figura 2 e Figura 3), mostraram eventos com melhor resolução e continuidade lateral, caracterizando uma melhoria de qualidade comparado com a seção sísmica sem deconvolução, além de amplificar as altas frequências em todo intervalo 55 Hz a 105 Hz (Figura 4).

Os testes realizados são bastante promissores e sugerem o uso do método iterativo para a deconvolução da assinatura da fonte em dados de reflexão.

6. Agradecimentos

Paulo E. M. Melo agradece a ANP pelo suporte financeiro na forma de Bolsa de Estudo e ao Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia (CPGG-UFBA) pelo apoio a este trabalho.

7. Referências

Melo, P. E. M. e Porsani, M. J. (2001) Deconvolução iterativa de dados sísmicos utilizando norma L_p , 7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society.

Popini, M. V. F. (2001) Processamento de Dados de GPR Utilizando Métodos da Sísmica de Reflexão, dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia.

Porsani, M. J. e Ursin, B. (2000) Mixed-phase deconvolution and wavelet estimation, *The Leading Edge*, 19(01):76-79.

Porsani, M. J.; Niwas, S. e Ferreira, N. R. (2001) A robust inversion of vertical electrical sounding data using a multiple reweighte least-squares method, *Geophysical Prospecting*, 49(02):255--264.

ProMAX (1992) Interactive Seismic Data Processing System, Advance Geophysical Corporation, Denver.

Yilmaz, . (1987) Seismic data processing, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.