



Deconvolução iterativa de dados sísmicos com norma L_p

Daniel Carvalho Rocha Júnior e Milton J. Porsani, CPGG/UFBA e INCT-GP/CNPq

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation at the Twelfth International Congress of the Brazilian Geophysical Society, held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the Twelfth International Congress of The Brazilian Geophysical Society 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.

Resumo

O método de filtragem sísmica denominado deconvolução de Wiener-Levinson (WL) é freqüentemente usado no processamento de dados sísmicos com o objetivo de melhorar a definição e resolução dos horizontes sísmicos. O filtro de WL é obtido com o método dos mínimos quadrados estando, pois relacionado à norma L_2 . O método se fundamenta nas premissas de que o pulso sísmico é de fase mínima e a função refletividade é aleatória. A solução das equações normais (ENs) é obtida através da recursão de Levinson (RL) que constrói o filtro utilizando a combinação linear de filtros causais e anti-causais. No presente trabalho empregamos o método de deconvolução iterativa baseado na norma L_p . Este método também utiliza filtros causais e anti-causais e o traço deconvolvido é obtido variando-se tanto o número de coeficientes quanto a norma. Esta abordagem se mostrou bastante eficaz para a deconvolução do pulso sísmico apresentando bons resultados mesmo quando o pulso não é de fase mínima ou a função refletividade não é aleatória. Exemplos numéricos, utilizando dados sísmicos sintéticos e reais ilustram o desempenho do algoritmo.

Introdução

O modelo matemático utilizado na representação do traço sísmico é denominado de modelo convolucional e dado por,

$$x_t = p_t * e_t + \eta_t.$$

Onde:

- x_t – o traço sísmico,
- p_t – o pulso sísmico,
- e_t – a função refletividade ou resposta impulsiva,
- η_t – o ruído aditivo ao traço, e
- * – representa a operação de convolução.

A deconvolução do pulso é uma etapa do processamento de dados sísmicos destinada a aumentar a resolução temporal das imagens sísmicas. Normalmente este processo é conduzido através da convolução dos

sismogramas com o filtro inverso. Este se propõe a comprimir o pulso sísmico, reduzindo-o a um impulso, recuperando assim a função refletividade. Considerando que o filtro representa o inverso do pulso diz-se que o filtro deconvolve o pulso.

O método de deconvolução de WL é um método clássico de filtragem utilizado rotineiramente no processamento sísmico (Robinson e Treitel, 1980, Yilmaz, 1987). O método possui as seguintes etapas:

- (i) obtém-se os coeficientes da função de autocorrelação do traço sísmico,
- (ii) obtém-se o filtro de WL, e
- iii) aplica-se o filtro no(s) traço(s), mediante convolução.

Nesse método há que se considerar basicamente, as seguintes premissas: (i) O pulso a ser deconvolvido é de fase mínima e (ii) a função refletividade é branca (aleatória). Estas premissas são justificadas pelos fatos de que (i) o filtro de WL é causal e somente pode ser o inverso de pulso de fase mínima uma vez que somente este tipo de pulso possui inversa causal numericamente estável e (ii) a função refletividade precisa ser considerada como aleatória pois somente assim a autocorrelação estimada a partir do traço sísmico poderá representar a autocorrelação do pulso que se deseja deconvolver.

O filtro de WL é normalmente obtido através da recursão de Levinson (Levinson, 1947), que resolve as ENs de forma bastante eficiente. O princípio básico da famosa RL fundamenta-se no fato de que duas soluções independentes de menor ordem são suficientes para se obter a solução de ordem superior (Porsani et al. 2007). As duas soluções independentes, no caso dos filtros de WL, são representadas por filtros causal e anti-causal.

O algoritmo conhecido como RL pode ser visto como a minimização sucessiva de formas quadráticas de dimensão crescente. Todo o processo de minimização utiliza filtros causais e anti-causais e é conduzido através da norma L_2 .

No presente trabalho formulamos a deconvolução do pulso vinculando-o à norma L_p (Porsani et al., 2003). O algoritmo desenvolvido utiliza a idéia básica do método de WL de trabalhar com filtros causais e anti-causais, porém tanto a função objetivo quanto a sua minimização dependem da norma L_p . O método se reduz ao método de WL quando se utiliza a norma L_2 .

A abordagem utilizada neste trabalho difere da abordagem de Melo e Porsani (2005). No algoritmo desenvolvido,

um *loop* externo com valores crescentes de p envolve o *loop* que incrementa o número de coeficientes do filtro. O método foi testado sobre dados sísmicos sintéticos e uma seção sísmica de dados empilhados.

Método de deconvolução iterativa

O erro de predição do filtro causal é o resultado da deconvolução do traço sísmico,

$$e_t = a_t * x_t \tag{1}$$

No método de WL este filtro é obtido minimizando-se a forma quadrática $Q(a) = \sum e_t^2$, ($Lp=2$). O método basicamente obtém a solução mínimos quadrados do sistema linear $\mathbf{Xa} = \mathbf{x}_{t+1}$, relacionado ao filtro preditivo com distância de predição unitária.

No método proposto por (Porsani et al., 2003 e Melo e Porsani, 2005) o filtro é obtido minimizando a norma Lp ,

$$Q(a, p) = \sum \{(e_t)^2\}^{1/2} \}^p \tag{2}$$

O mínimo da equação (2) é obtido de forma iterativa, resolvendo-se o sistema linear para $\Delta \mathbf{a}$, agora dependente do valor de p ($1 \leq p \leq 2$),

$$[\mathbf{W}_{p,k} \mathbf{X}] \Delta \mathbf{a} = |\mathbf{e}_k|^p, \tag{3}$$

onde k representa iteração, $|\mathbf{e}_k|^p$ é o vetor formado com o valor absoluto dos erros de predição da iteração k , $\mathbf{W}_{p,k}$ é uma matriz diagonal também formada com base nos erros de predição da iteração k .

A equação (3) é normalmente resolvida com o método dos mínimos quadrados e os coeficientes do filtro são atualizados através da equação,

$$\mathbf{a}_{k+1} = \mathbf{a}_k + \Delta \mathbf{a} \tag{4}$$

Além do parâmetro N , referente ao número de coeficientes do filtro, dois novos parâmetros são necessários: o número de iterações, Ni , e a norma a ser utilizada Lp .

O procedimento iterativo mantém a idéia básica da recursão de Levinson de utilizar o filtro causal e anti-causal, porém agora tanto a norma varia, quando o número de coeficientes variam. Basicamente um *loop* externo, relacionado à norma $Lp, p = 1, \dots, 2$, tem início enquanto o *loop* interno incrementa o número de coeficientes do filtro. Também o filtro de WL causal e anti-causal de WL são utilizados para iniciar cada iteração (Melo e Porsani, 2005). A Figura 1 ilustra os passos do algoritmo.

Para monitoramento e interrupção do processo de filtragem utilizamos a norma Varimax (Wiggins, 1978). Esta norma é útil para medir a simplicidade do traço deconvolvido.

$$V_{mx} = \frac{\sum e_i^4}{(\sum e_i^2)^2} \tag{5}$$

Resultados numéricos e discussão

A Figura 2 ilustra os resultados da deconvolução de um traço sísmico sintético. O pulso (Fig. 2a) foi convolvido com uma função refletividade pseudo-aleatória (Fig. 2b) e o resultado é o traço sísmico sintético apresentado na Fig. 2c. As Figs. 2d e 2e mostram, respectivamente, o resultado da deconvolução de WL e aquele obtido com o método iterativo Lp . Observa-se que a deconvolução Lp restitui bem a função refletividade. Foram utilizados os seguintes parâmetros na deconvolução Lp : $1.0 \leq p \leq 1.4$, número de iterações $Ni = 10$ e número de coeficientes do filtro, $1 \leq N \leq 5$.

A Figura 3 ilustra a evolução dos valores da norma Varimax à medida que o filtro é construído. Os valores maiores da curva correspondem à deconvolução Lp e traduzem a maior simplicidade do traço deconvolvido, ao longo do processo.

A Figura 4 mostra o resultado da deconvolução de um trecho de uma seção sísmica empilhada. Todos os traços da seção foram concatenados para formarem um único grande traço e deconvolvidos de uma so vez. Desta forma o método deconvolve todos os sismogramas de uma única vez. Esta forma de deconvolver toda a seção é particularmente importante porque evita qualquer deslocamento de fase entre os traços. Foram utilizados os seguintes parâmetros na deconvolução Lp : $1.0 \leq p \leq 1.2$, número de iterações $Ni = 8$ e número de coeficientes do filtro, $1 \leq N \leq 5$.

A Figura 5 mostra os espectros de amplitudes médios associados aos dados originais e deconvolvidos como o método de WL e deconvolução iterativa Lp . Observa-se que na banda de frequência do sinal (10-60 Hz) a deconvolução Lp recupera melhor as frequências do sinal, comparada à deconvolução $L2$.

Conclusão

O método de deconvolução Lp é numericamente estável, não requer que o pulso seja de fase mínima ou que a refletividade seja aleatória. Atua de forma bastante efetiva na compressão do pulso, recuperando de forma satisfatória a função refletividade. Outra característica importante é que o método de deconvolução Lp fornece bons resultados com filtros pequenos, de poucos coeficientes e com poucas iterações, sendo computacionalmente bastante eficiente.

Referências

Levinson, N., 1947, The Wiener RMS (root mean square) error criterion in filter design and prediction, *J. Math. Phys.*, vol. 25, pp. 261-278, 1947.

Melo, P. E. M. e Porsani, M. J., 2005, Deconvolução de volume sísmico 3D utilizando norma Lp . Congresso Internacional da SBGf.

Porsani, M. J., Melo, P. E. M., Ulrych, T. J., 2003, Highly resolved deconvolution via a sparsity norm. *Journal of Seismic Exploration*, 12, 127-140.

Porsani M.J. and Ursin B, 2007, Direct multichannel predictive deconvolution. *Geophysics*, v. 72, p. H11-H27.

Robinson E.A. and Treitel S. 1980. *Geophysical Signal Analysis*. Prentice-Hall, Inc.

Wiggins, R. A., 1978, Minimum entropy deconvolution: *Geophys. Res. Lett.*, 5, 21-31.

Yilmaz O. 1987. *Seismic Data Processing*. SEG, Tulsa.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FINEP, FAPESB, CNPq/MCT, CAPES, ANP/PRH8 e PETROBRAS pelo financiamento e apoio à pesquisa. Agradecem também às empresas Landmark e Paradigm pelas licenças acadêmicas dos softwares de processamento e interpretação sísmica disponibilizados ao LAGEP-CPGG-UFBA.

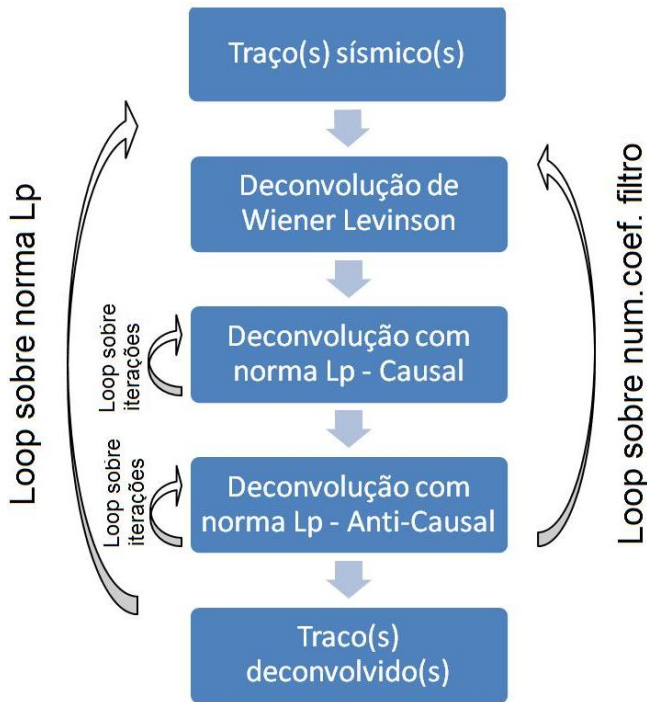


Figura 1: Fluxograma do algoritmo de deconvolução iterativa com base na norma L_p .

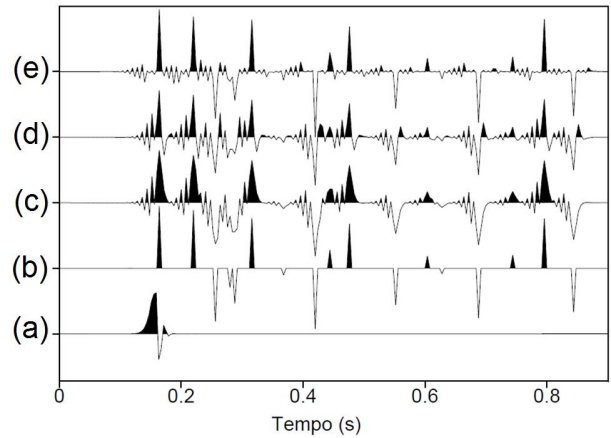


Figura 2: Resultados da deconvolução de um traço sísmico sintético. Pulso sísmico de fase mista em (a), função refletividade pseudo-aleatória em (b), traço sintético obtido convolvendo pulso com refletividade, em (c), deconvolução de WL em (d) e deconvolução iterativa em (e).

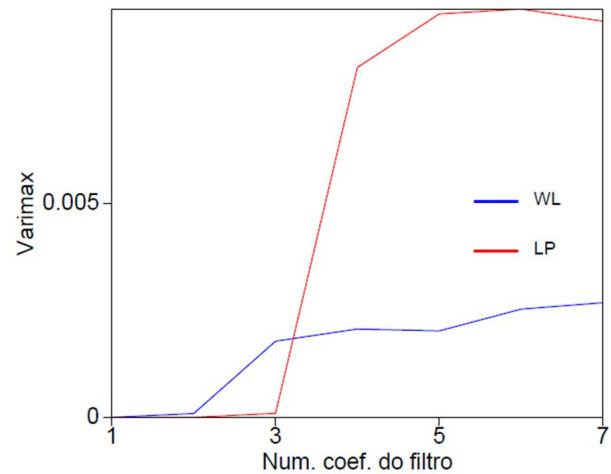


Figura 3: Evolução da norma Varimax na deconvolução de WL e deconvolução L_p em função do número de coeficientes do filtro.

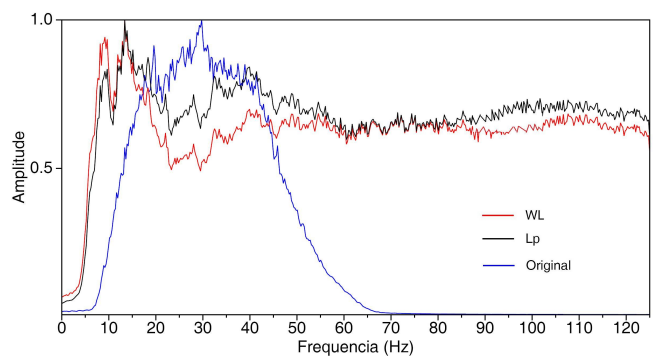
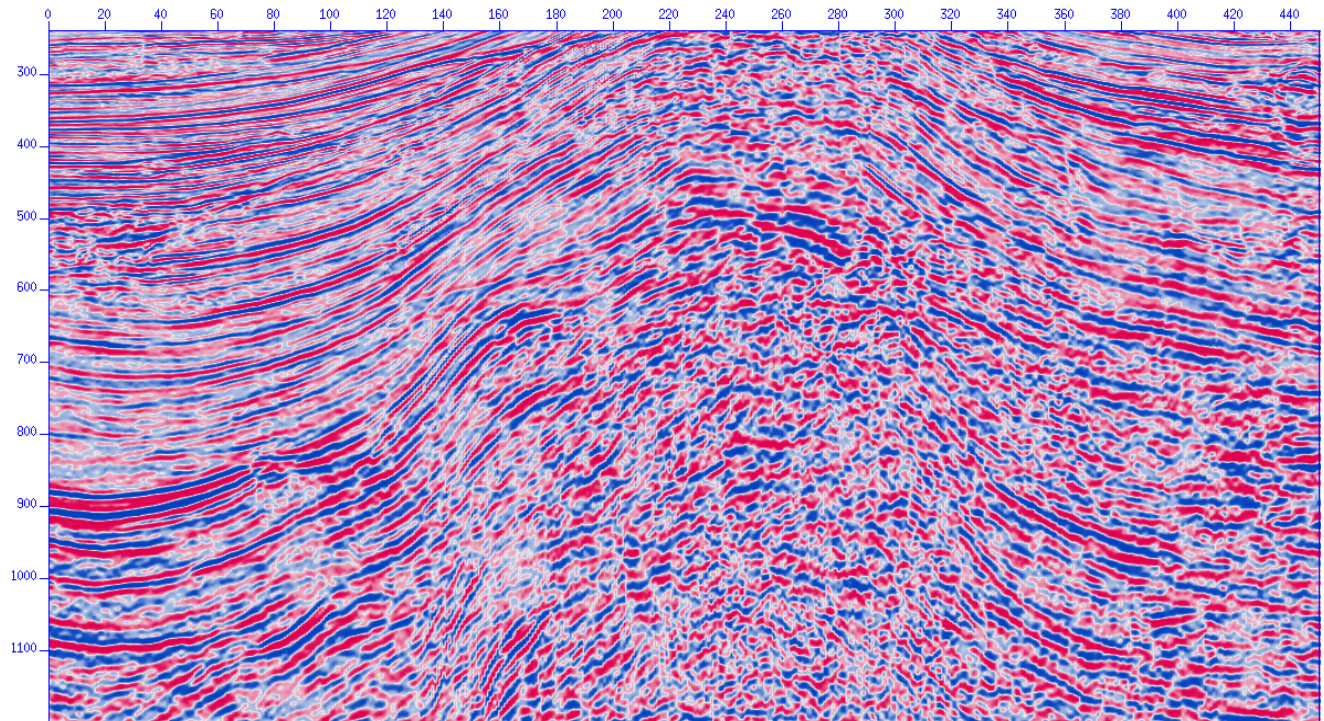
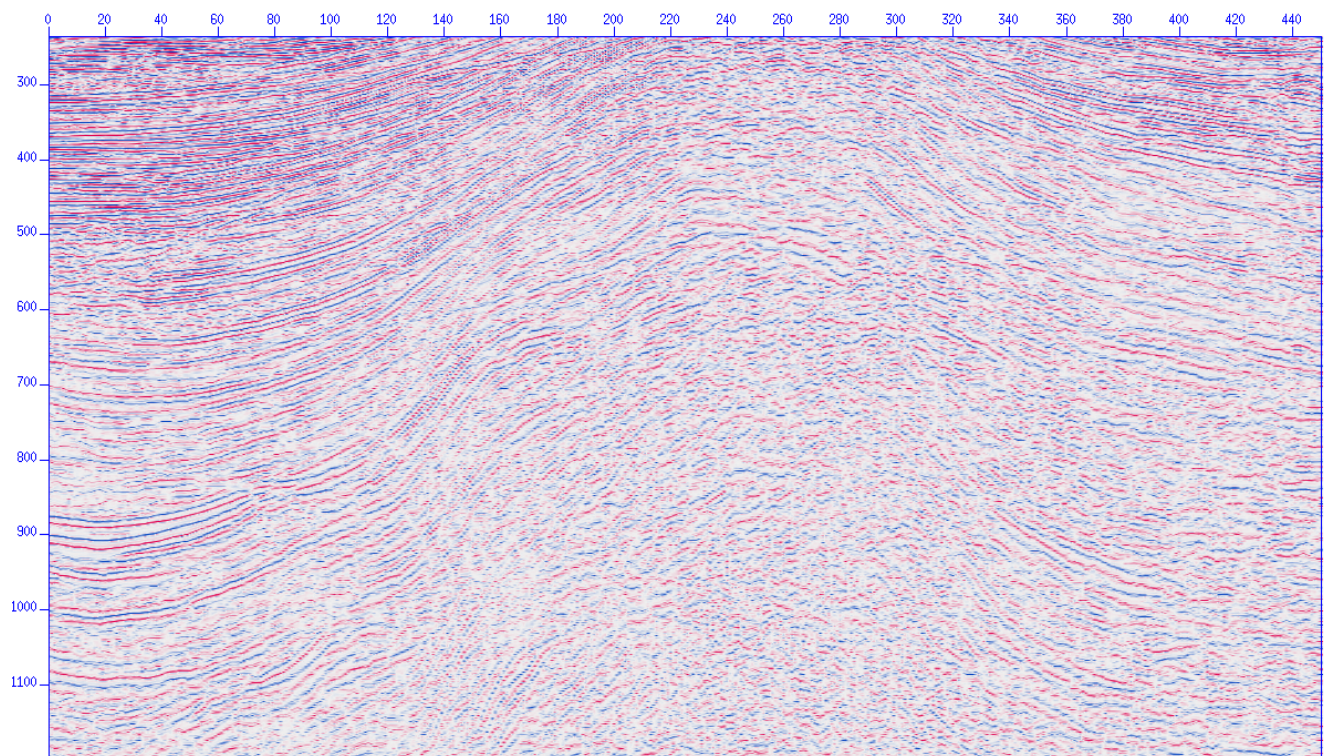


Figura 5: Espectro de amplitude médio. Espectro dos dados originais (em azul), espectro da seção filtrada com o filtro de WL (em vermelho), e espectro da deconvolução com norma L_p (em preto).



(a)



(b)

Figura 4: Trecho de seção sísmica empilhada original em (a) e deconvolvida com norma L_p em (b).