



## Aplicação de identificação cega de canais à deconvolução sísmica

Allan Segovia Spadini\*, Liliana Alcazar Diogo (IAG-USP)

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12<sup>th</sup> 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 12<sup>th</sup> 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.

### Abstract

This paper will show preliminary results on a study about the application of a blind identification method to seismic deconvolution. The algorithm consists in an improvement of the idea proposed by Luo & Li (1998), which doesn't require a white reflectivity and allows mixed phase wavelets. The estimation of the wavelet will be improved by an iterative algorithm based in one of the neural networks proposed by Wang & Mendel (1992), retrieving simultaneously the wavelet and the earth impulse response.

### Introdução

A deconvolução visa o aumento da resolução temporal do traço sísmico. Este procedimento é usualmente realizado por métodos que consideram uma resposta impulsiva da terra branca ou uma forma de onda de fase mínima, sendo aceito que a violação de uma dessas premissas acarreta resíduos indesejáveis após a aplicação do método. Em sísmica rasa a resposta impulsiva apresenta um pequeno número de camadas, levando a um espectro com um grande desvio da aleatoriedade, e normalmente são encontradas formas de onda de fase mista.

O problema em realizar a deconvolução de pulsos sísmicos que não sejam de fase mínima foi estudado por diversos autores dentre os quais temos Wiggins (1978), Porsani & Ursin (1998) e Baan & Fomel (2009), entretanto, estas metodologias são mais sensíveis apenas as reflexões mais fortes ou utilizam o conceito de uma resposta impulsiva da terra aleatória. Quanto à premissa de aleatoriedade, o trabalho de Saggaf & Robinson (2000) faz uma revisão sobre o assunto e apresenta uma forma adequada para a correção dos seus efeitos quando a resposta impulsiva se aproxima da aleatoriedade.

Outra forma de deconvolução, que pode funcionar sem considerar as premissas citadas, foi apontada por Luo & Li (1998), onde é mostrada uma técnica alternativa para a obtenção do pulso sísmico através de uma forma de identificação cega de canais e posterior deconvolução do traço sísmico por algum algoritmo, mínimos quadrados por exemplo. Dentre os diversos métodos de identificação de canais encontrados na literatura o proposto em Xu et. al. (1995) é de fácil implementação e tratamento. O método requer dois traços de mesma

resposta impulsiva e formas de onda diferentes. Neste trabalho será estudada a aplicação deste método com uma organização diferente. Ao invés da aquisição de dois traços sísmicos, será utilizado um traço deconvolvido por meio de técnicas convencionais como um dos traços, o que possibilita a utilização da metodologia sem a necessidade de modificações na aquisição de dados.

Assim como no trabalho de Luo & Li (1998), são esperadas pequenas diferenças de amplitude e de fase na estimativa da forma de onda. Por este motivo propomos a utilização de um algoritmo iterativo baseado em rede neural, utilizado para a estimativa da resposta impulsiva, proposto por Wang & Mendel (1992) em conjunto com um algoritmo mais simples para a inversão da forma de onda baseado em mínimos quadrados com a imposição de suavidade para a estimativa. O objetivo é obter uma estimativa mais precisa do pulso sísmico e da resposta impulsiva, com um menor custo computacional.

### Método

A organização do algoritmo iterativo proposto pode ser visualizada através da Figura 1. Uma estimativa inicial para a forma de onda é obtida pelo algoritmo de Xu et. al. (1995). Em seguida, essa forma de onda é utilizada para a deconvolução do traço sísmico por um estimador de resposta impulsiva baseado em redes neurais (Wang & Mendel, 1992). A resposta impulsiva estimada irá servir como base para a estimativa de uma nova forma de onda, por um método diferente do inicial. O processo é repetido até que um critério de parada seja satisfeito.

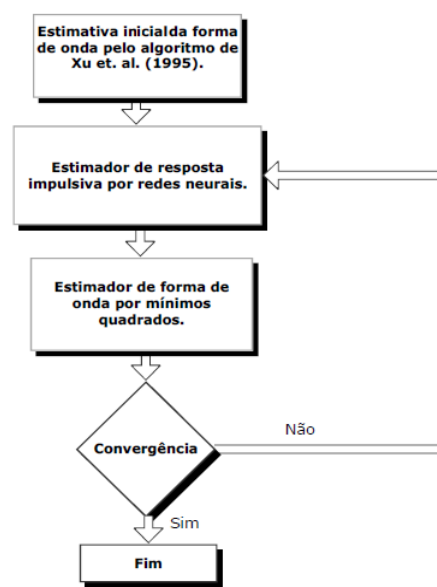


Figura 1: Algoritmo iterativo para a estimativa conjunta da resposta impulsiva e da forma de onda.

**Estimativa Inicial**

Seguindo estritamente Xu et. al. (1995), considerando-se um caso com dois traços sísmicos diferentes, formados pela convolução de dois pulsos diferentes com a mesma resposta impulsiva da terra, desprezando o ruído, têm-se:

$$\begin{aligned} x_1(k) &= w_1(k) * r(k) \\ x_2(k) &= w_2(k) * r(k). \end{aligned} \quad (1)$$

A convolução o pulso  $w_2$  com o traço  $x_1$  é igual à convolução do pulso  $w_1$  com o traço  $x_2$ , como a seguir:

$$\begin{aligned} w_2(k) * x_1(k) &= w_2(k) * [w_1(k) * r(k)] \\ &= w_1(k) * [w_2(k) * r(k)] \\ &= w_1(k) * x_2(k). \end{aligned} \quad (2)$$

Adotando a notação matricial obtém-se:

$$[X_2 \quad -X_1] \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = X \cdot w = 0 \quad (3)$$

onde  $X_i$  representa a matriz de convolução do traço sísmico com a forma de onda.

Para que o vetor  $w$  em (3) possa ser identificado existe a condição de que a transformada Z dos pulsos sísmicos sejam polinômios que não possuam zeros comuns. Para formas de onda semelhantes, não há garantia de que essa condição será satisfeita. Entretanto, Luo & Li (1998) mostraram bons resultados mesmo com formas de onda muito próximas. Outro requisito do método é que a resposta impulsiva em questão deve possuir comprimento de pelo menos  $2L+1$ , onde  $L$  é o comprimento da forma de onda e será tido como conhecido neste trabalho.

A minimização direta de (3) leva a solução trivial, para evitá-la será utilizado  $\|w\|^2=1$ . Neste caso a solução para o vetor  $w$  é dada pelo autovetor associado ao autovalor nulo da matriz  $X^T X$ , desconsiderando o ruído. Como provado em Xu et. al. (1995) se as condições de identificação forem obedecidas esta matriz possui posto deficiente de apenas um. Na presença de ruído será considerado o autovetor associado ao menor autovalor obtido.

Para a obtenção de dois traços sísmicos com a mesma resposta impulsiva e formas de onda diferentes, propomos utilizar uma versão deconvolvida do traço de interesse. A partir do traço registrado será feita uma estimativa inicial de um pulso de fase mínima que será utilizada para a deconvolução do traço original, gerando um segundo traço sísmico.

**Estimativa da resposta impulsiva por redes neurais**

O algoritmo proposto por Wang & Mendel (1992) é baseado na minimização da função objetivo,

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N [x_k - \sum_{i=1}^N w_{k-i} r_i]^2 \quad (4)$$

Os termos em (4) são os mesmos adotados na metodologia anterior. E as redes neurais de Hopfield possuem a seguinte função de energia:

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N T_{ij} q_i q_j - \sum_{i=1}^N I_i q_i \quad (5)$$

Se a resposta impulsiva for decomposta da seguinte forma,

$$r_i = q_i \alpha_i \quad (6)$$

onde  $q_i$  é um vetor composto de zeros e uns e  $\alpha_i$  é uma constante, pode-se escrever os termos  $T_{ij}$  e  $I_i$  de (5) como segue:

$$T_{ij} = -\sum_{k=1}^N w_{k-i} w_{k-j} \quad (7)$$

e

$$I_i = \sum_{k=1}^N w_{k-i} \frac{x_k}{\alpha} - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N w_{k-i}^2 \quad (8)$$

para  $i \neq j$ , onde  $1 \leq i, j \leq N$ ; e,  $T_{ij} = 0$  para  $i = 1, 2, \dots, N$ .

Assim a rede neural de Hopfield pode ser escrita pelas equações (9) e (10) a seguir:

$$D_i = \sum_{j=1}^N T_{ij} q_j + I_i \quad (9)$$

$$q_i = \begin{cases} 0, & \text{se } D_i \leq 0 \\ 1, & \text{se } D_i > 0 \end{cases} \quad (10)$$

Esta rede neural pode ser vista como um detector de impulsos pertencentes à resposta impulsiva que possuem uma determinada amplitude  $\alpha$ . Como a amplitude verdadeira destes impulsos não é  $\alpha$  Wang & Mendel (1992) construíram uma segunda rede neural para a determinação correta das amplitudes. Entretanto, neste trabalho foi percebido de forma empírica que se a busca pelos impulsos iniciar por um valor duas vezes maior que o valor do maior impulso a relação (11) mostra bons resultados.

$$\alpha_{\text{verdadeiro}} = (\alpha + d\alpha)/2 \quad (11)$$

onde,  $d\alpha$  é o intervalo entre os valores de  $\alpha$  utilizados na rede neural. Na presença de ruído a relação (11) pode não funcionar da forma desejada, mas faz com que os impulsos da resposta impulsiva mantenham a relação entre si, tornando necessária apenas a multiplicação da resposta impulsiva por um valor constante ao fim da operação. O vetor  $q_i$  é inicializado como sendo um vetor nulo e o algoritmo finaliza quando este vetor não sofre mudança de uma iteração para outra.

Desta forma os passos da busca pela rede neural podem ser descritos como segue: Passo 1: Escolha um  $\alpha$  grande e positivo e rode a rede neural dada pelas equações (9) e (10); Passo 2: Determine a amplitude dos impulsos localizados utilizando (11); Passo 3: Efetue a convolução impulsiva obtida com a forma de onda e subtraia este traço do traço sísmico original. Passo 4: Repita os passos 1 a 3 para  $\alpha$  negativo e atualize a resposta imposta impulsiva. Passo 5: Diminua  $\alpha$  e repita os passos de 1 a 5 sempre atualizando a resposta impulsiva.

**Estimativa da forma de onda por mínimos quadrados com suavidade**

O terceiro bloco do algoritmo iterativo da Figura 1 pode ser descrito através do modelo convolutivo na forma matricial:

$$x = G \cdot w \quad (12)$$

onde  $G$  é a matriz de convolução de  $r$  com  $w$ .

Devido à linearidade da equação (12) é possível adotar uma formulação por mínimos quadrados impondo a suavidade para a saída desejada (13).

$$w = (G^T G + \mu R^T R)^{-1} G^T x \quad (13)$$

onde,  $\mu$  é uma pequena perturbação e R é uma matriz do tipo

$$R = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

## Resultados

### Dados sintéticos

Neste exemplo de aplicação do método foi construído um sismograma através da convolução de uma forma de onda de Ricker com uma resposta impulsiva esparsa, uma situação comum em sismica rasa. Foi adicionado ruído aleatório gaussiano, o traço obtido possui razão sinal/ruído igual a 30.

Na figura 2 são mostrados os zeros obtidos para a forma de onda utilizada na construção do traço sintético em conjunto com os zeros do mesmo pulso deconvolvido pela forma de onda de fase mínima estimada.

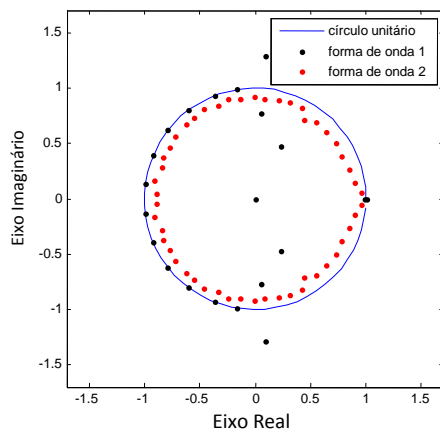


Figure 2: Zeros das formas de onda dos traços sísmicos utilizados para a estimativa inicial da forma de onda.

Os zeros obtidos são próximos. Apesar disso, foi possível realizar a estimativa inicial mostrada na Figura 3. A proximidade dos zeros é um causador de instabilidade no algoritmo, entretanto na metodologia adotada as formas de onda dos dois traços possuem zeros mais afastados do que quando são utilizados tiros reversos.

Na Figura 3 são mostradas a forma de onda utilizada na construção do traço sintético, a estimativa inicial utilizada pelo algoritmo iterativo e a estimativa final realizando-se duas iterações do algoritmo iterativo. A estimativa inicial foi melhorada através da utilização do algoritmo iterativo.

Durante o processamento dos dados sintéticos foi percebida uma grande sensibilidade do algoritmo à presença de ruído e principalmente ao caráter não suave do mesmo. Por este motivo foi realizada uma suavização dos sismogramas antes do processamento. Assim como no trabalho de Luo & Li (1998), foram observadas diferenças de amplitude e de fase para a forma de onda obtida. Acredita-se que a suavização necessária para

uma razão sinal ruído igual a 30, alta para a metodologia, seja a responsável pelo desvio observado entre as formas de onda original e estimada.

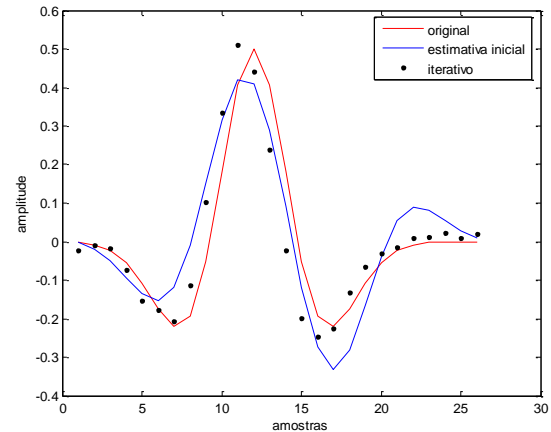


Figure 3: Estimativa da forma de onda: comparação entre a forma de onda utilizada na construção do traço, a estimativa inicial e a estimativa final obtida através do algoritmo iterativo.

A estimativa final pode ser melhorada através do aumento de iterações do algoritmo iterativo. Deve ser notado que a diferença principal entre esta estimativa e a forma de onda original é a de um adiantamento nas amostras. Este problema pode ser corrigido através da correlação entre o resultado da deconvolução e o traço original.

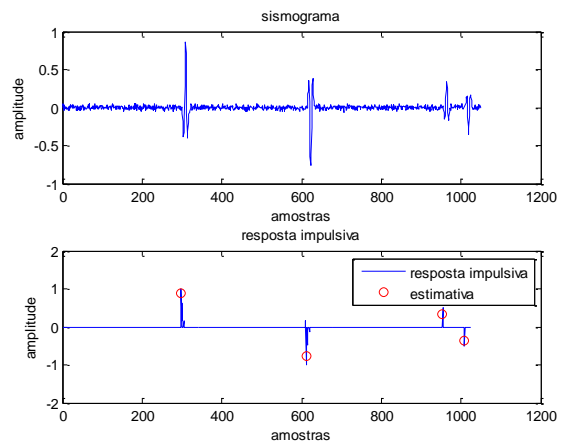


Figure 4: Traço sísmico sintético (cima) e o resultado da deconvolução através do algoritmo iterativo após duas iterações (baixo).

Os resultados da deconvolução pelo algoritmo iterativo mostram uma grande compactação em relação aos pulsos do traço sísmico. Assim como citado anteriormente, a utilização da relação (11) apresenta problemas na presença de ruído, mas faz com que os impulsos mantenham a relação de amplitude entre si, além de tornar o algoritmo mais rápido.

### Dado real

O método proposto foi aplicado em um conjunto de traços utilizados para análise de ruído em sismica rasa. Antes do procedimento de deconvolução foram utilizados procedimentos de filtragem para a remoção de ruído. Foi

aplicado um filtro passa banda, filtragem f-k para a remoção do ground roll e filtragem svd para melhoria da razão sinal/ruído com aumento da coerência dos eventos laterais. No sismograma obtido é possível enxergar apenas um evento logo após 0.08 s (figura 5).

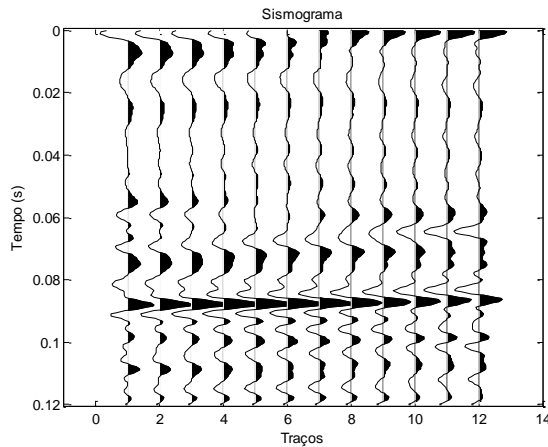


Figura 5: Sismograma pré-processado para a aplicação do procedimento de deconvolução (o afastamento cresce do traço 12 para o traço 1).

Como o comprimento da forma de onda não é conhecido, foi realizada uma inspeção visual a partir da reflexão observada no sismograma. A estimativa apresentou sensibilidade ao comprimento escolhido, entretanto é possível utilizar a deconvolução dos traços por mínimos quadrados como critério de qualidade.

O comprimento da forma de onda não é necessariamente o mesmo para todos os traços, por este motivo a estimativa inicial da forma de onda foi realizada sobre o traço relativo ao maior autovalor obtido pela filtragem svd. Antes dos próximos passos para a deconvolução e estimativa final da forma de onda, o sismograma da Figura 5 foi silenciado (zerado) até o tempo de 0.08 segundos.

Para efeito de comparação a estimativa inicial utilizada no algoritmo iterativo foi aplicada para a deconvolução através do algoritmo de deconvolução por impulsos esparsos empregando o critério de Cauchy (Sacchi, 1997). Como pode ser observado na Figura 6 o resultado da deconvolução foi bom, entretanto os erros de estimativa favorecem a presença de reflexões secundárias junto aos impulsos principais e como a forma de onda não é idêntica em todos os traços em alguns o erro na deconvolução é maior.

O resultado obtido na Figura 6 pôde ser melhorado através da aplicação do algoritmo iterativo (Figura 7). Deve ser levada em conta a necessidade de uma reposta mais precisa em relação ao aumento do custo computacional. Na construção do sismograma da Figura 7 a estimativa inicial, obtida através do algoritmo de Xu et. al. (1995), foi utilizada apenas na deconvolução do primeiro traço, para a deconvolução dos demais traços foi utilizada a estimativa final obtida do respectivo traço anterior.

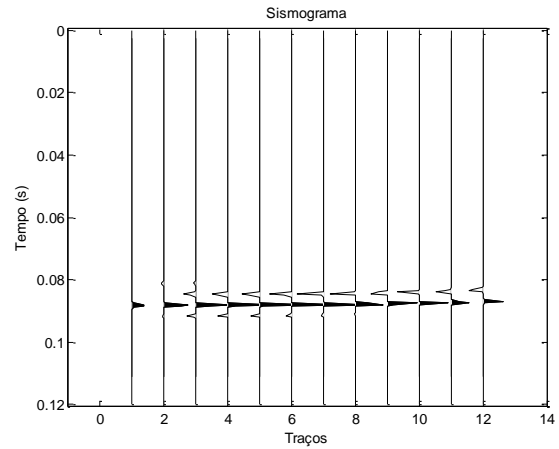


Figura 6: Sismograma deconvolvido utilizando a forma de onda estimada pelo algoritmo de Xu et. al. (1995) através de deconvolução por impulsos esparsos (Sacchi, 1997).

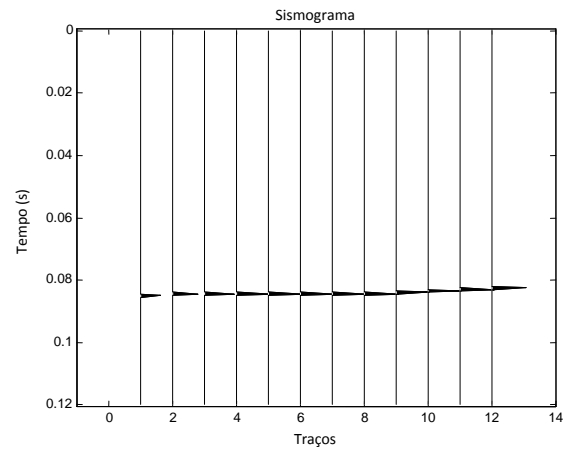


Figura 7: Sismograma deconvolvido utilizando o algoritmo proposto.

**Conclusões**

Neste trabalho foi estudada a aplicação de um algoritmo iterativo à deconvolução, para situações onde as premissas de aleatoriedade da resposta impulsiva e fase mínima para a forma de onda não sejam satisfeitas.

Os resultados sintéticos são promissores, a forma de onda obtida se aproxima bastante da original, apenas com um pequeno adiantamento em todas as amostras e a reposta impulsiva foi fortemente compactada. É esperado que a metodologia proposta seja apropriada para a sísmica rasa onde é encontrada uma quantidade finita de impulsos na resposta impulsiva. Entretanto, o nível de ruído presente em dados de reflexão sísmica rasa pode ser um empecilho para o uso dos métodos investigados, uma vez que a qualidade dos resultados se mostrou muito sensível a presença de ruído.

A aplicação direta da estimativa inicial leva a resultados razoáveis que podem ser melhorados com um aumento do custo computacional. Para evitar um aumento do custo computacional ainda maior, ao invés da melhoria no algoritmo de redes neurais proposta por Calderón-Macías et. al. (1997), utilizou-se a metodologia de Wang & Mendel (1992) para a deconvolução, que apresenta um custo menor com qualidade satisfatória.

Para uma aplicação mais direta em dados reais ainda há a necessidade da implementação de um algoritmo para a estimativa do comprimento da forma de onda, que deve ser diferente para cada traço sísmico em um sismograma. Também deve ser levada em consideração a estimativa da ordem de grandeza da forma de onda, isto irá afetar o desempenho das redes neurais.

A metodologia assume que existam apenas reflexões no traço sísmico, qualquer outro efeito, como primeiras chegadas e ground roll, é considerado ruído e deve ser previamente removido. Pesquisas futuras devem considerar outras formas de minimização para o algoritmo utilizado na estimativa inicial da forma de onda, na tentativa de lidar melhor com o tipo de ruído presente nos dados sísmicos.

### Agradecimentos

Spadini agradece a Capes pela bolsa de mestrado e ao professor Dr. Carlos Alberto Mendonça pelos comentários e sugestões na disciplina de inversão.

### Referências

Baan, M.; Fomel, S. Nonstationary phase estimation using regularized local kurtosis maximization. **Geophysics**, v. 74, n. 6, p. A75-A80, November-December of 2009.

Calderón-Macías, C.; Sen, M. K.; Stoffa, P. L. Hopfield neural networks, and mean field annealing for seismic deconvolution and multiple attenuation. **Geophysics**, v. 62, n. 3, p. 992-1002, May-June of 1997.

Luo, H.; Li, Y. The Application of Blind Channel Identification Techniques to Prestack Seismic Deconvolution, IEEE, **Proceedings of the IEEE**, v. 86, n 10, p: 2082-2089, October of 1998.

Mazzucchelli, P.; Spagnolini, U. Least-Square Multichannel Deconvolution, **EAGE 63<sup>rd</sup> Conference & Technical Exhibition**, Amsterdam, The Netherlands, 11-15 June of 2001.

Porsani, M.; Ursin, B. Mixed-phase Deconvolution, **Geophysics**, v. 63, n. 2, p. 637-647, March-April of 1998.

Sacchi, M. Reweighting strategies in seismic deconvolution, **Geophys. J. Int.** v. 129, p. 651-656, (1997).

Saggaf, M. M.; Robinson, E. A. A unified framework for the deconvolution of traces of nonwhite reflectivity. **Geophysics**, v. 65, 1660–1676, September-October of 2000.

Xu, G. Liu, H. Tong, L. Kailath, T., A Least-Squares Approach to Blind Channel Identification, IEEE, **IEEE Transactions on Signal Processing**, v.43, n 12, p. 2982-2993, December of 1995.

Wang, L.; Mendel, J.M. Adaptive minimum prediction-error deconvolution and source wavelet estimation using Hopfield neural networks, **Geophysics**. v. 57, n. 4. p. 670-679, May of 1992.

Wiggins, R. Minimum entropy deconvolution. **Geoplotation**, v.16, p. 21–35, 1978.