



Deconvolução de dados GPR utilizando um método iterativo

Paulo E. M. de Melo e Milton J. Porsani CPGG/UFBa, Brasil.

Copyright 2003, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was received by The Technical Committee of the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does 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 work presents an iterative method for multichannel deconvolution of GPR data based on the L_p norm which corresponds to an adaptation of the ILRMD method proposed by Porsani et al. (2001). We have adapted the ILRMD method for deconvolution of the wavelet and multiples reflections. 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. In the new iterative method the deconvolution is initialized with the Wiener-Levinson filter.

Numerical examples using GPR data are used to illustrate the application of the new iterative deconvolution algorithm.

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, 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:

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

O modelo convolucional e os critérios de deconvolução, podem ser aplicados num radargrama para o processamento de dados GPR.

Representamos por: x_t o radargrama registrado, p_t a "wavelet" (pulso), e_t a função refletividade ou resposta impulsiva da terra, η_t o ruído diverso e $*$ o sinal de convolução. O método de deconvolução pode ser descrito

em termos de filtros lineares, que são calculados com base na solução de sistemas lineares de equação.

No processo de deconvolução do pulso são levados em consideração os seguintes critérios:

- o pulso é de fase mínima;
- a refletividade é branca;
- e a autocorrelação do traço r_{xx} é proporcional à autocorrelação do pulso r_{pp} , quando a wavelet é desconhecida e a refletividade é branca. A semelhança é verificada ao comparar os espectros de amplitude do pulso e do traço (Yilmaz, Ö., 1987).

Deconvolução iterativa monocanal do pulso

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

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

onde e_t representa o erro de predição unitário $+e_t$ ou $-e_t$ dado por:

$$\begin{pmatrix} +e_t & -e_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_t & x_{t-1} & \dots & x_{t-N} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -a_N \\ -a_1 & \vdots \\ \vdots & -a_1 \\ -a_N & 1 \end{bmatrix}.$$

O vetor erro é dado por:

$$\mathbf{e} = \mathbf{x} - \mathbf{X}\mathbf{a}_k,$$

sendo a matriz \mathbf{X} , Toeplitz, formada pelos elementos x_t do vetor \mathbf{x} e \mathbf{a}_0 o filtro de Wiener-Levinson usado para iniciar o método.

Deixemos:

$$f(\mathbf{a}, p, t) = (e_t^2)^{\frac{p}{4}} \quad (3)$$

e expandindo a equação (3) por série de Taylor em torno do modelo corrente \mathbf{a}_k , e tomando a aproximação de primeira ordem, obtém-se:

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

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

A equação (4) pode ser representada de forma mais compacta,

$$\tilde{\mathbf{f}}_{p_k} = \mathbf{f}_{p_k} - \mathbf{F}_{p_k} \mathbf{X} \Delta \mathbf{a}, \quad (5)$$

onde os elementos F_{ii} da matriz diagonal \mathbf{F}_{p_k} são dados por

$$F_{ii} = \frac{p}{2} (e_i^2)^{\frac{p}{4}-1} e_i, \quad (6)$$

$$f_i = (e_i^2)^{\frac{p}{4}} \quad (7)$$

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

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

$$\tilde{Q}(\mathbf{a}, p) = \tilde{\mathbf{f}}_{p_k}^T \tilde{\mathbf{f}}_{p_k}. \quad (8)$$

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

$$(\mathbf{X}^T \mathbf{F}_{p_k}^2 \mathbf{X}) \Delta \mathbf{a} = \mathbf{X}^T \mathbf{F}_{p_k} \mathbf{f}_{p_k}. \quad (9)$$

Resolvendo a equação (9) para o vetor $\Delta \mathbf{a}$ podemos atualizar os coeficientes do filtro por:

$$\mathbf{a}_{k+1} = \mathbf{a}_k + \Delta \mathbf{a}. \quad (10)$$

Os filtros de Wiener-Levinson (monocanal) causal e anti-causal são utilizados para iniciar o algoritmo de deconvolução iterativa.

A figura 1 apresenta o método de deconvolução iterativa aplicado em um dado sintético. Pulso de fase mista (Fig. 1-a), refletividade aleatória (Fig. 1-b), traço sintético (Fig. 1-c) gerado pela convolução do pulso (Fig. 1-a) com a refletividade aleatória (Fig. 1-b), resultado da deconvolução de Wiener-Levinson (Fig. 1-d) e resultado utilizando o método de deconvolução iterativa (Fig. 1-e) com $p=1.5$ (resultados equivalentes são obtidos para $1.2 \leq p \leq 1.6$). Podemos observar, a deconvolução iterativa monocanal conseguiu restituir a função refletividade com alto grau de fidelidade.

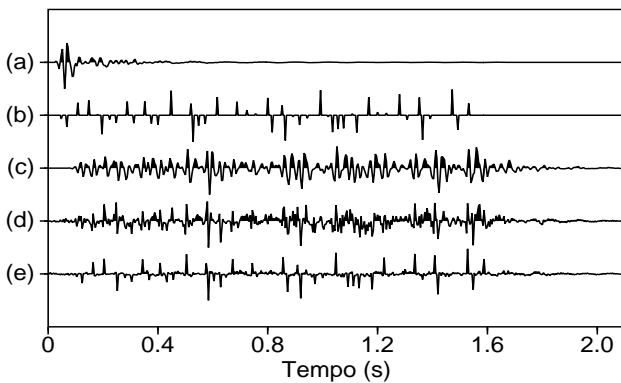


Figura 1: Pulso de fase mista (a), refletividade aleatória (b), traço o sintético (c), deconvolução de WL (d) e deconvolução iterativa monocanal (e).

Deconvolução iterativa multicanal de múltiplas

O novo método de deconvolução iterativa multicanal apresentado a seguir, é uma extensão do método de deconvolução iterativa monocanal (Melo, 2002), que foi aplicado em dados sísmicos de reflexão.

Sejam w_t o dado desejado, x_t, y_t e z_t os três traços (canais) de entrada. O dado calculado \tilde{w}_t pode ser representado pela expressão,

$$\tilde{w}(t) = \tilde{h}(t) * x(t) + \tilde{f}(t) * y(t) + \tilde{g}(t) * z(t),$$

onde $\tilde{h}(t), \tilde{f}(t)$ e $\tilde{g}(t)$ são operadores que atuam respectivamente sobre os traços $x(t), y(t)$ e $z(t)$.

Exemplificando para operadores com três coeficientes cada um, a expressão anterior pode ser reescrita,

$$\tilde{w}_t = \sum_{k=1}^3 x_{t-k+1} \tilde{h}_k + \sum_{k=1}^3 y_{t-k+1} \tilde{f}_k + \sum_{k=1}^3 z_{t-k+1} \tilde{g}_k.$$

Utilizando notação matricial podemos representar

$$\mathbf{W} = [\mathbf{X} \quad \mathbf{Y} \quad \mathbf{Z}],$$

onde \mathbf{W} é uma matriz Toeplitz contruída pelas matrizes, também Toeplitz, \mathbf{X}, \mathbf{Y} e \mathbf{Z} geradas respectivamente pelos traços x_t, y_t e z_t .

De forma análoga definimos

$$\mathbf{a}^T = [\mathbf{h}^T \quad \mathbf{f}^T \quad \mathbf{g}^T],$$

onde os vetores \mathbf{h}, \mathbf{f} e \mathbf{g} são formados respectivamente pelos operadores \tilde{h}_t, \tilde{f}_t e \tilde{g}_t .

O filtro preditivo multicanal pode ser obtido com o método dos mínimos quadrados resolvendo-se o sistema:

$$\mathbf{W} \mathbf{a} = \mathbf{x},$$

o que corresponde a minimizar a forma quadrática associada ao erro:

$$\mathbf{e} = \mathbf{x} - \mathbf{W} \mathbf{a}.$$

onde o vetor \mathbf{x} é formado pelos elementos do traço x_t .

Os elementos do vetor de erro é dado por:

$$e_{t+L} = x_{t+L} - \tilde{x}_{t+L},$$

sendo L a distância de predição do filtro.

O filtro de Wiener-Levinson multicanal (Lima, 1999) \mathbf{a}_0 , será utilizado para iniciar o método de deconvolução iterativa multicanal.

Passos do algoritmo

- Calcula o filtro de WL multicanal \mathbf{a}_0 ;
DO $k=0, Niter$ (número de iterações)
- Calcula

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{W}\mathbf{a}_k;$$

- Calcula os elementos do vetor de erro

$${}^k e_{i+L} = x_{i+L} - \tilde{x}_{i+L};$$

- Calcula os elementos $F_{ii} = \frac{p}{2} ({}^k e_{i+L}^2)^{\frac{p}{4}-1} {}^k e_{i+L}$ da matriz \mathbf{F}_{pk} ;
- Calcula os elementos ${}^k f_i = |{}^k e_{i+L}|^{\frac{p}{2}}$ do vetor \mathbf{f}_{pk} ;
- Resolve o sistema com o método dos mínimos quadrados

$$(\mathbf{F}_{pk} \mathbf{W}) \Delta \mathbf{a} = \mathbf{f}_{pk};$$

- Atualiza o filtro

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

ENDDO

Aplicação do método iterativo em dados de radargrama

O método iterativo foi aplicado em um perfil de GPR com 512 amostras e 451 traços (Fig. 3-a). Esse dado foi cedido pelo geofísico Leandro Moutinho (Moutinho et al, 2003). A Figura 2-a mostra o início do traço 400 retirado da Figura 3-a, o pulso estimado pelo método convencional de Wiener-Levinson (Fig. 2-b) e o pulso estimado pelo método iterativo de deconvolução (Fig. 2-c).

O pulso estimado pela deconvolução convencional foi obtido através do operador erro de predição invertido, enquanto que o pulso estimado pela deconvolução iterativa precisou resolver o sistema,

$$\tilde{\mathbf{X}}\mathbf{h} = \mathbf{x},$$

onde a matriz Toeplitz $\tilde{\mathbf{X}}$ é formada pelos elementos do traço x_t deconvolvido pelo método iterativo, o vetor \mathbf{x} contém os elementos do traço x_t original e o vetor \mathbf{h} é a solução do sistema que representa o pulso estimado. Foram utilizados todos os traços do radargrama para estimar o pulso em cada método empregado.

A Figura 3 apresenta os resultados da deconvolução de predição unitária monocanal (Fig. 3-b) e da deconvolução de predição L multicanal (Fig. 3-c). A Figura 4 mostra com mais detalhes um trecho do radargrama original (Fig. 4-a) e o resultado do método iterativo monocanal (Fig. 4-b).

Conclusões

O método apresentado de deconvolução iterativa é de fácil implementação computacional, numericamente estável e ao contrário do método de Wiener-Levinson não requer que o pulso sísmico seja de fase mínima. O método iterativo de decovolução aumentou a resolução temporal do radargrama original (Fig. 3-b) e conseguiu atenuar satisfatoriamente as reflexões múltiplas (Fig. 3-c). Os testes realizados com o método iterativo de deconvolução são bastante promissores e mostram sua aplicabilidade na deconvolução de dados GPR.

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 e MJP agradece ao CNPq e PGS. Agradecemos, também, ao geofísico Leandro Moutinho pelos dados fornecidos.

Referências Bibliográficas

Lima, A. P. (1999) Deconvolução de reflexões múltiplas nos domínios $t-x$ e $\tau-p$, dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia.

Melo, P. E. M. (2002) Deconvolução iterativa de dados sísmicos utilizando norma L_p , dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia.

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.

Moutinho, L., Porsani, J. L., Porsani, M. J. (2003) Aquisição e processamento de dados GPR no rio Taquari, planície do pantanal matogrossense, submetido ao 8th 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 reweighted least-squares method, Geophysical Prospecting, 49(02):255-264.

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

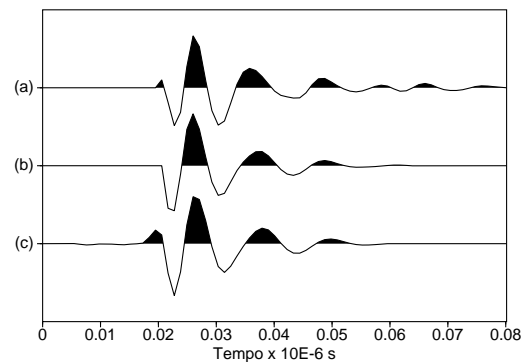


Figura 2: Traço original (a), pulso estimado com o método WL (b) e pulso estimado com o método iterativo (c).

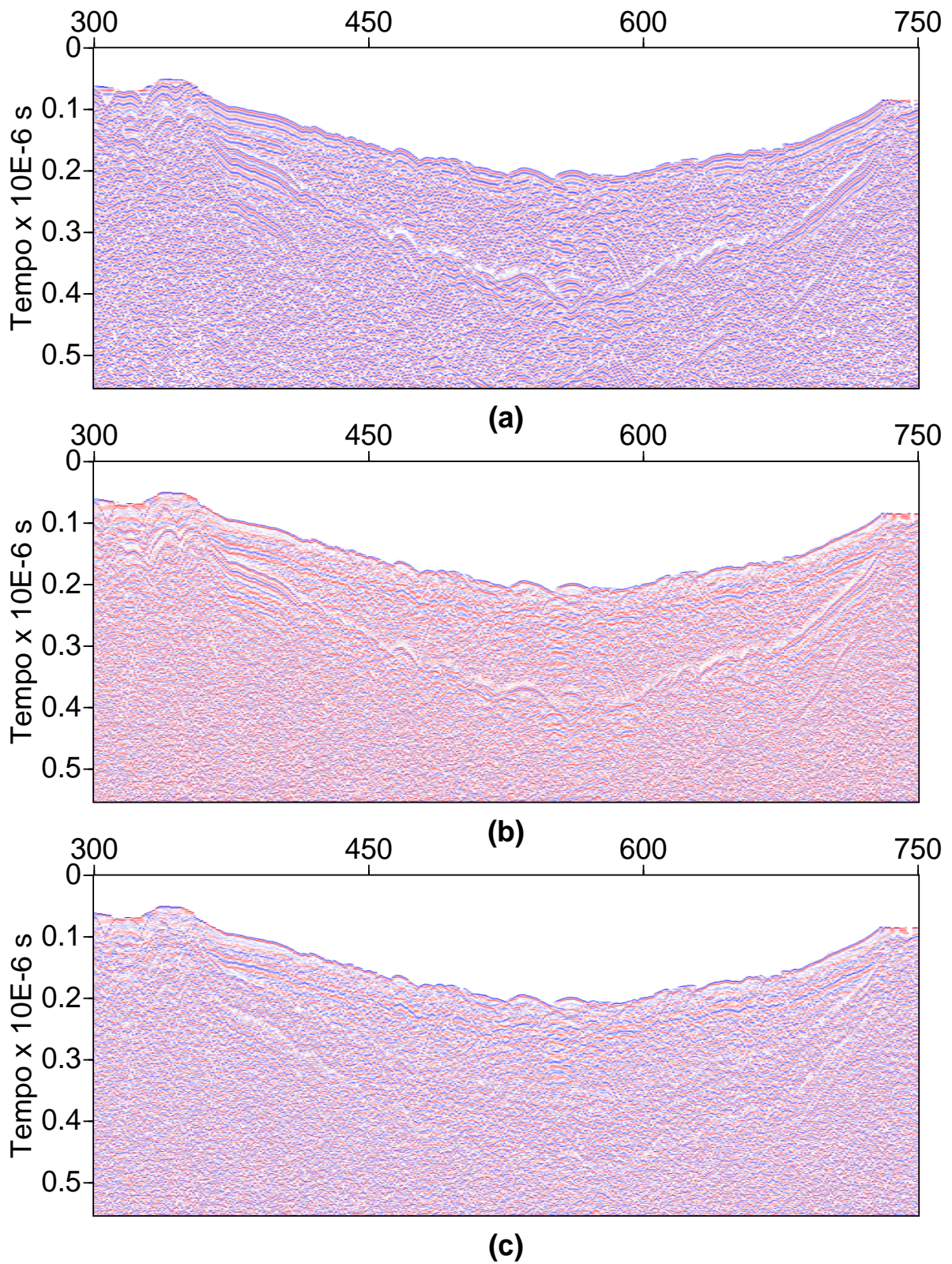


Figura 3: Radargrama original (a), deconvolvido com o método iterativo de predição unitária monocanal (b) e deconvolvido com o método iterativo de predição L multicanal (c).

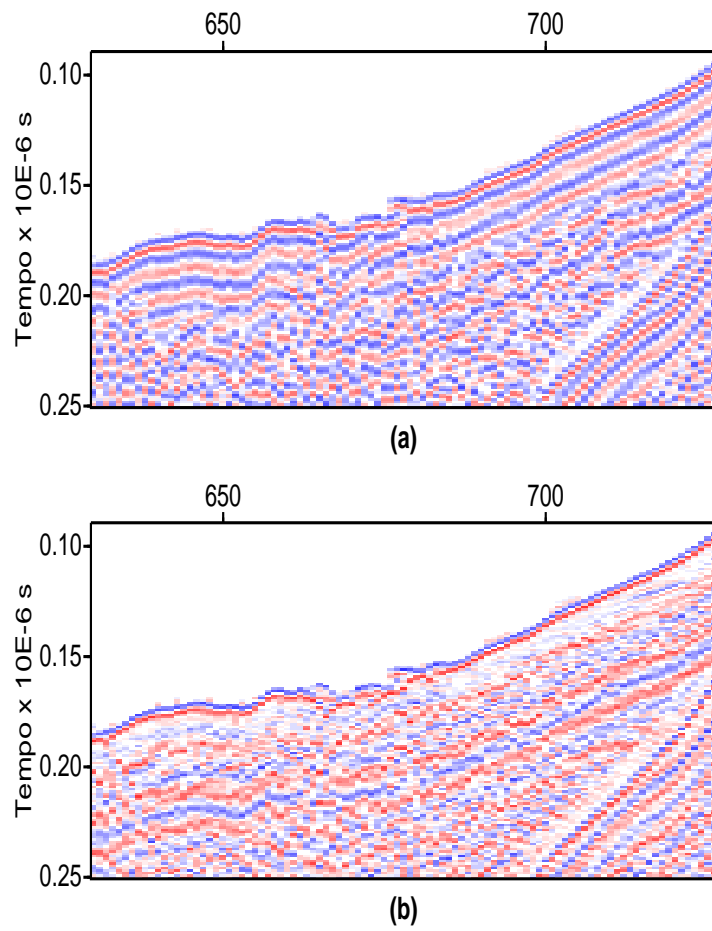


Figura 4: Detalhamento da figura anterior do traço 630 ao traço 726 de 0.09×10^{-6} s a 0.25×10^{-6} s. Radargrama original (a), deconvolvido com o método iterativo de predição unitária monocanal (b).