

INTERPOLAÇÃO DE TRAÇO SÍSMICO NO DOMÍNIO FX

Niraldo R. Ferreira, Milton J. Porsani & Tadeusz J. Ulrych

Neste trabalho, apresenta-se um algoritmo para interpolação de traços sísmicos que tem base no método proposto por Spitz (1991). O algoritmo trabalha no domínio frequência-espaco ($f-x$) e baseia-se no fato de que eventos lineares no domínio ($t-x$) podem ser exatamente interpolados no domínio ($f-x$), independente do mergulho. A seção sísmica a ser processada é dividida em janelas, onde os eventos são considerados lineares e a técnica de "zero padding" é usada para calcular os coeficientes de predição da seção interpolada. A teoria de predição linear e o método dos mínimos quadrados permitem que os traços interpolados sejam expressos como saída de um sistema linear associado aos operadores de erro de predição. Para obtenção dos valores interpolados, desenvolveu-se um algoritmo eficiente de decomposição LU para sistemas hermitianos, que explora o bandejamento e a presença de zeros na matriz dos coeficientes associados às equações normais. Exemplos com dados sísmicos sintéticos e reais ilustram a aplicabilidade do método.

Palavras-chave: Interpolação; Processamento sísmico; Domínio FX.

SEISMIC TRACE INTERPOLATION IN F-X DOMAIN – *An algorithm to interpolate seismic traces based on the Spitz's method is presented here. The algorithm works in the frequency-space domain, ($f-x$), and it is based upon the fact that linear events on the time domain, ($t-x$) can be exactly interpolated in the $f-x$ domain, regardless of the dip. The seismic section to be processed is divided into windows, the events are considered linear, and the "zero padding" technique is used to calculate the prediction coefficients for the interpolated section. The linear prediction theory, as well as the least-square method, allows interpolated traces to be expressed as an output of a linear system associated with the error prediction operators. In order to obtain the interpolated values, an efficient algorithm has been developed using LU decomposition for hermitian systems. This algorithm explores the banded and the presence of zeros in the coefficient matrix associated with the normal equations. Examples with synthetic and real seismic data illustrate the applicability of the method.*

Key words: *Interpolation; Seismic processing; FX domain.*

Universidade Federal da Bahia
Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica
Instituto de Geociências - Rua Caetano Moura, 123
40210-350 - Federação - Salvador - BA - Brasil

INTRODUÇÃO

A interpolação de traços tem um importante papel no processamento de dados sísmicos. Ela pode ser usada tanto na migração e filtragem multicanal, reduzindo o "aliasing" espacial como na recuperação de traços mortos dos sismogramas de campo.

As técnicas usuais procuram em pequenas janelas espaço-tempo encontrar as direções de coerência lateral para interpolar as amostras desejadas (Bardan, 1987). Esta pesquisa local da direção dos mergulhos pode ser feita compreendendo um ou vários eventos, havendo porém restrições caso os eventos se interceptem (Larner et al., 1981). Além disso, a necessidade de se trabalhar com janelas de poucos traços para permitir o processamento de eventos curvos pode levar à definição de falsos mergulhos na presença de ruído. Em tais casos é necessário o rastreamento manual dos eventos ou o fornecimento de informações a priori, tais como o mergulho máximo permitido, dificultando a automação dos procedimentos (Pieprzac & McClean, 1988).

O método desenvolvido por Spitz (1991), por outro lado, opera no domínio frequência-espaco (f-x) e baseia-se no fato de que eventos lineares presentes numa seção composta de traços igualmente espaçados podem ser exatamente interpolados, sem necessidade de determinação de seus mergulhos verdadeiros. A possibilidade de predição de eventos no domínio da frequência permite que a interpolação de cada traço seja obtida como resposta de um sistema linear associado aos operadores preditivos de erro. O método supera as dificuldades da separação de eventos conflitantes e dispensa a determinação dos mergulhos ou o rastreamento de eventos. Para adequar uma seção sísmica com traços igualmente espaçados às premissas da técnica empregada, usa-se o recurso de dividi-la em subseções com menor número de traços (janelamento dos dados). Deste modo os eventos em cada janela poderão ser considerados aproximadamente lineares ou com curvaturas suavizadas. A técnica de "zero padding" foi empregada para calcular os coeficientes de predição da seção de saída. O texto está organizado como segue: a primeira seção apresenta os fundamentos teóricos do método; a segunda seção mostra o algoritmo desenvolvido para solução de sistemas lineares hermitianos bandeados. Exemplos ilustrativos e conclusões são apresentados nas seções subsequentes. Este artigo baseou-se na dissertação de mestrado em geofísica de Ferreira (1994).

INTERPOLAÇÃO DE TRAÇOS SÍSMICOS

Numa janela contendo N traços sísmicos e constituídos de L eventos lineares, cada traço pode ser modelado no domínio da frequência pela expressão (Spitz, 1991):

$$g_k(f) = \sum_{j=1}^L a_j(f) z_j^{k-1}(f) + n_k(f) \quad k = 1, \dots, N, \quad (1)$$

onde $a_j(f)$ é a transformada de Fourier do pulso sísmico associado ao evento j , $n_k(f)$ é a componente de ruído aleatório no traço k e $z_j(f)$ é o deslocamento de fase correspondente à diferença de tempo q_j entre traços adjacentes no evento j , definido por:

$$z_j(f) = \exp(2\pi i f q_j). \quad (2)$$

Considerando que a Eq. 1 é uma soma de exponenciais complexas, Canales (1984) mostra que o traço $g_k(f)$ pode ser modelado com filtros de predição operando sobre os L traços adjacentes. A ação dos operadores de predição unitária sobre o sinal (g_1, \dots, g_N) produz, para cada frequência, dois sistemas lineares (Ulrych & Clayton, 1976), tendo cada um $N - L$ equações e L incógnitas:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{e}_d & \mathbf{e}_r \end{bmatrix} = \mathbf{G} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{J}_L \mathbf{P}_L^* \\ \mathbf{P}_L & \mathbf{1} \end{bmatrix}$$

onde, $\mathbf{e}_d = [e_{d,1} \dots e_{d,N-L}]^T$, $\mathbf{e}_r = [e_{r,1} \dots e_{r,N-L}]^T$ são respectivamente os erros de predição direta e reversa $\mathbf{P}_L = [P_1 \dots P_L]^T$ é o operador de erro de predição direta, (*) indica complexo conjugado e \mathbf{J}_L é a matriz identidade reversa de ordem L , tal que $\mathbf{J}_L \mathbf{J}_L = \mathbf{I}_L$ onde \mathbf{I}_L é a matriz identidade de ordem L . A aplicação dos mínimos quadrados a estes sistemas produz o seguinte conjunto de equações normais:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}^H \mathbf{G} + \mathbf{J}_{L+1} (\mathbf{G}^H \mathbf{G})^T \mathbf{J}_{L+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} \\ \mathbf{P}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde $\boldsymbol{\varepsilon}$ representa a energia mínima dos erros de predição, e \mathbf{G}^H é o transposto e complexo conjugado da matriz \mathbf{G} formada a partir dos valores g_k . Os coeficientes $P_j(f)$, $j = 1, \dots, L$, solução do sistema da Eq. 3 foram obtidos através do algoritmo de Marple (1980), o qual tem base na recursão de Levinson (1947) e resolve o sistema da Eq. 3 com um número de operações de adição e multiplicação da ordem de n^2 operações (Porsani, 1992), onde n é a ordem do sistema.

A etapa seguinte, ponto chave do método, é a determinação dos coeficientes de predição da seção de saída, $P'_j(f)$. Observa-se que a interpolação considerada divide pela metade o intervalo entre traços conhecidos. Conseqüentemente, o intervalo de tempo de cada evento entre traços adjacentes na seção conhecida, q_p , e na seção de saída, q'_p , estão relacionados por: $q'_j = (1/2)q_j$. Usando este resultado na Eq. 2, obtém-se a relação entre os deslocamentos de fase nas duas seções:

$$z'_j(f) = z_j(f/2).$$

Usando esta expressão, Spitz (1991) estabeleceu a seguinte relação entre os coeficientes de predição das seções conhecida e interpolada:

$$P'_j(f) = P_j(f/2) \quad j = 1, \dots, L. \tag{4}$$

Esta equação mostra que os coeficientes de predição da seção de saída podem ser calculados interpolando-se os coeficientes de predição da seção original, nas posições de freqüências intermediárias. No presente trabalho, os $P'_j(f)$ foram calculados usando a técnica de "zero padding" (Bracewell, 1986). A seção de saída é composta de $2N - 1$ traços, sendo os N traços de ordem ímpar conhecidos e os $N - 1$ traços de ordem par interpolados. Estes traços podem ser modelados de modo similar ao usado na Eq. 1:

$$g'_k(f) = \sum_{j=1}^L a_j(f) z_j'^{k-1}(f) + n'_k(f), \quad k = 1, \dots, 2N - 1, \tag{5}$$

onde os termos desta equação têm também definição análoga. Para cada freqüência tem-se um sinal com $2N - 1$ componentes (g'_1, \dots, g'_{2N-1}), sobre o qual atuarão os filtros de predição produzindo dois sistemas de equações, tendo cada um $2N - L - 1$ equações e $N - 1$ incógnitas:

$$A_r g_p + B_r g_i = e_r$$

$$A_d g_p + B_d g_i = e_d$$

onde e_r e e_d são os vetores de erro de predição direta e reversa, respectivamente, A_r , A_d , B_r e B_d são matrizes que dependem apenas dos parâmetros N , L e dos coeficientes de predição da seção de saída. $g_i = [g'_1 \ g'_3 \ \dots \ g'_{2N-1}]^T$ contém amostras dos traços ímpares que são conhecidos e g_p

$= [g'_2 \ g'_4 \ \dots \ g'_{2N-2}]^T$ contém amostras dos traços pares (interpolados), a serem determinados. Estes dois sistemas podem ser agrupados na forma mais compacta:

$$A g_p + B g_i = e,$$

onde $A = [A_r \ A_d]^T$, $B = [B_r \ B_d]^T$, $e = [e_r \ e_d]^T$. A aplicação do método dos mínimos quadrados produz então, para cada freqüência, as equações normais:

$$A^H A g_p = - A^H B g_i. \tag{6}$$

A resolução desta equação fornece os traços interpolados desejados. A matriz $A^H A$ desempenha papel central na resolução da Eq. 6. Sua análise pode ser melhor apreciada através do exemplo ilustrativo considerando uma seção de entrada com sete traços, $N = 7$, e três eventos, $L = 3$. Entre cada dois traços adjacentes um novo é interpolado, resultando num total de seis traços interpolados. A seção de saída terá portanto treze traços sísmicos. Este será também o número de amostras, para cada freqüência, do sinal correspondente $g'_j(f)$, $j = 1, \dots, 13$. O operador preditivo de erro terá três coeficientes $P'_j(f)$, $j = 1, 2, 3$. A matriz $A^H A$ assume então a forma:

$$A^H A = \begin{bmatrix} a & b^* & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b & 2a & b^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 2a & b^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b & 2a & b^* & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b & 2a & b^* \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b & a \end{bmatrix}$$

onde, $a = 1 + P'_1 P_1^* + P'_2 P_2^* + P'_3 P_3^*$ e $b = 2 (P'_2 + P'_3 P_1^*)$. Nota-se que esta matriz é hermitiana tendo, além disso, uma estrutura bandeada em que o número, ND , de diagonais não nulas abaixo ou acima da diagonal principal é dado por:

$$ND = \begin{cases} (L - 1)/2, & \text{para } L \text{ ímpar} \\ (L / 2), & \text{para } L \text{ par.} \end{cases}$$

A matriz tem portanto, $2ND + 1$ diagonais não nulas. Usando estas propriedades de simetria elaborou-se um algoritmo eficiente para resolver a Eq. 6, baseado no método da decomposição LU (Ferreira, 1994) e apresentado a seguir.

ALGORITMO PARA SOLUÇÃO DE SISTEMAS HERMITIANOS BANDEADOS

Nesta seção apresenta-se um algoritmo para solução do sistema de Eq. 6. Este algoritmo utiliza o método de decomposição LU adaptado para sistemas hermitianos bandeados. O sistema linear da Eq. 6 é do tipo:

$$\mathbf{M}\mathbf{h} = \mathbf{y}, \quad (7)$$

onde \mathbf{M} é uma matriz hermitiana, \mathbf{y} é um vetor de dados e \mathbf{h} é o vetor solução desejado.

O método da decomposição LU para matrizes simétricas (Kreyszig, 1988) pode ser estendido para o caso de matrizes hermitianas da seguinte forma:

$$\mathbf{M} = \mathbf{L}\mathbf{U}, \quad (8)$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{L}''', \quad (9)$$

onde \mathbf{L} é uma matriz triangular inferior, \mathbf{U} é triangular superior, ambas possuindo valores complexos e ($'''$) significa transposto e complexo conjugado. Substituindo-se a Eq. 8 e a Eq. 9 na Eq. 7 tem-se:

$$\mathbf{M}\mathbf{h} = (\mathbf{L}\mathbf{U})\mathbf{h} = \mathbf{L}(\mathbf{U}\mathbf{h}) = \mathbf{L}(\mathbf{L}'''\mathbf{h}) = \mathbf{y}. \quad (10)$$

A Eq. 10 pode ser indicada na forma:

$$\mathbf{L}\mathbf{f} = \mathbf{y}, \quad (11)$$

onde,

$$\mathbf{L}'''\mathbf{h} = \mathbf{f}. \quad (12)$$

A Eq. 11 representa um sistema triangular inferior. Uma vez definida a matriz \mathbf{L} , este sistema pode ser resolvido (cálculo de \mathbf{f}), seguido da resolução, da Eq. 12, que representa um sistema triangular superior, com a obtenção da solução desejada (\mathbf{h}).

Para fazer a decomposição é preciso determinar os elementos das matrizes \mathbf{L} e \mathbf{U} , a partir das Eqs. 8 e 9. Isto compreende um sistema com mais incógnitas que equações. Há vários modos de superar esta dificuldade. Na decomposição de matrizes reais, são soluções usuais impor como unitários os elementos da diagonal principal de \mathbf{U} ou \mathbf{L} . Na decomposição da matriz hermitiana, \mathbf{M} , adotou-se a restrição de igualdade entre as partes real e imaginária dos ele-

mentos da diagonal principal da matriz \mathbf{L} . Deste modo, a decomposição de \mathbf{M} fica bem estabelecida e o sistema linear da Eq. 7 pode ser resolvido.

Nossa matriz hermitiana \mathbf{M} tem uma estrutura bandeada, como mostrado no item anterior. Em consequência disso, constatou-se que a matriz triangular inferior, \mathbf{L} , também tem estrutura bandeada. Além disso, o número de diagonais não nulas, abaixo da diagonal principal, das matrizes \mathbf{L} e \mathbf{M} tem o mesmo valor, ND . Estas propriedades foram exploradas para otimizar os procedimentos de cálculo, pois é suficiente calcular apenas os elementos não nulos de \mathbf{L} e operar só com estes na solução dos sistemas triangulares inferior e superior. Com este procedimento, remove-se as operações matemáticas associadas aos elementos nulos, otimizando o tempo de processamento.

PROCEDIMENTO PARA INTERPOLAÇÃO

- 1 Transformada de Fourier dos traços em cada janela, obtendo os dados no domínio ($f-x$).
- 2 Cálculo dos coeficientes de predição unitária, para cada frequência, nas janelas da seção de entrada, ($P_1(f), \dots, P_l(f)$), com a Eq. 3.
- 3 Cálculo dos coeficientes de predição unitária da seção de saída associados a cada janela, ($P'_1(f), \dots, P'_l(f)$), com a Eq. 4.
- 4 Cálculo das amostras interpoladas, em cada frequência, com a Eq. 6.
- 5 Transformada inversa de Fourier obtendo os traços interpolados de cada janela no domínio ($t-x$).
- 6 Concatenação da seção de entrada com os traços interpolados para obter a seção de saída.

EXEMPLOS

A Fig. 1 mostra um sismograma sintético com 47 traços, 512 amostras por traço e 6 eventos curvos apresentando variação lateral de amplitude. O pulso sísmico utilizado é o pulso de Ricker com amplitude unitária e frequência dominante de 40 Hertz. A seção interpolada, obtida com operadores de predição de 6 coeficientes, está na Fig. 2. A janela considerada abrange toda seção. Os traços interpolados têm seus eventos bem posicionados e com amplitudes coerentes, mesmo o de curvatura acentuada (primeiro evento) e nas regiões de cruzamento ou superposição de eventos com variações laterais de amplitude. O aumento do número de coeficientes de predição

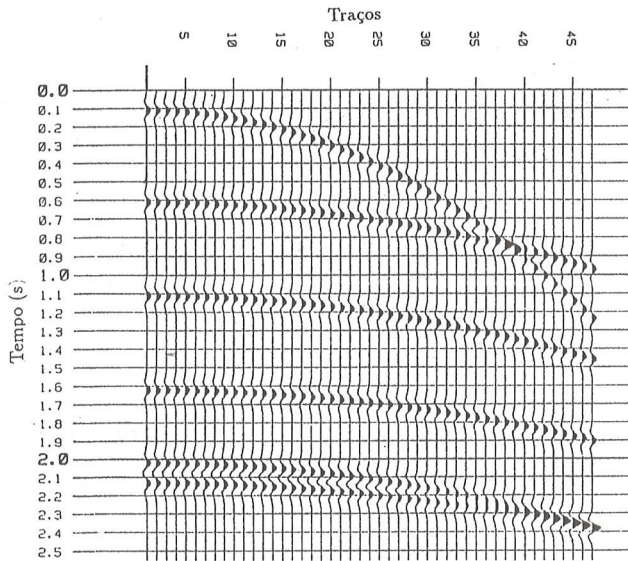


Figura 1 - Dado de entrada contendo 47 traços, 512 amostras por traço e 6 eventos apresentando variação lateral de amplitude.

Figure 1 - Input section with 47 traces, 512 samples/trace and 6 events with lateral amplitude variation.

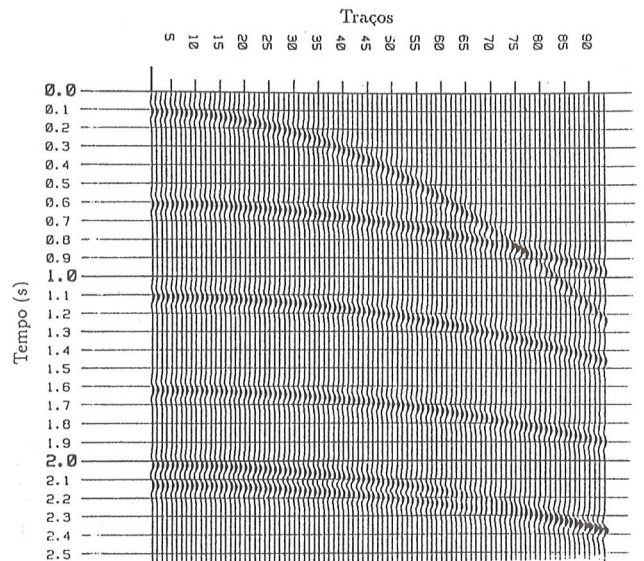


Figura 2 - Interpolação da Fig. 1. A janela considerada cobre toda a seção. Adotou-se filtro com $L = 6$ elementos.

Figure 2 - Interpolation of Fig. 1, using only one window. The filter has 6 elements.

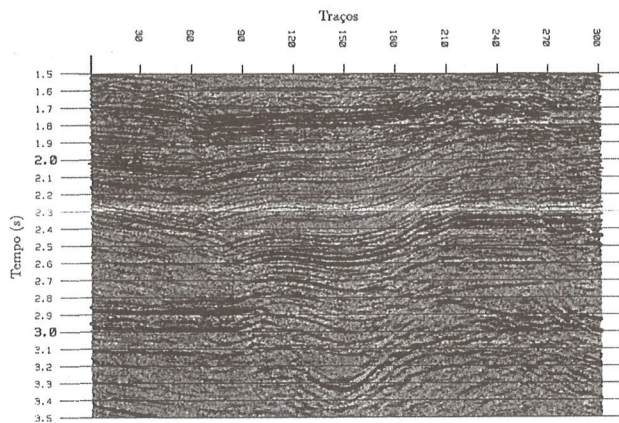


Figura 3 - Dado real de referência (margem continental brasileira). Contém 301 traços, 502 amostras por traço e intervalo entre traços de 25 metros.

Figure 3 - Marine real data with 301 traces, 502 samples/traces and spatial sampling interval of 25 m.

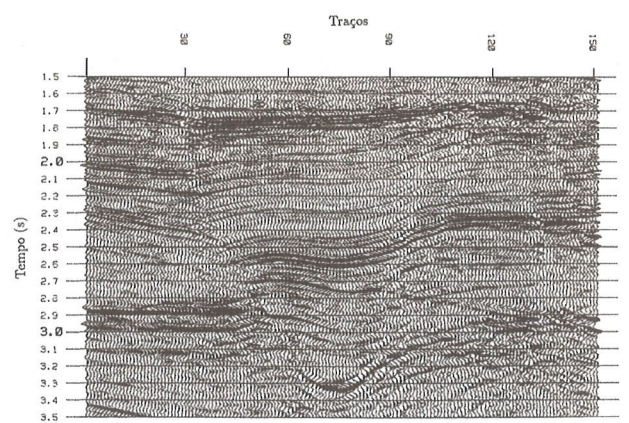


Figura 4 - Dado de entrada para a interpolação contendo os traços ímpares da Fig. 3.

Figure 4 - Input section with odd traces of Fig. 3.

torna instável o sistema da Eq. 6, introduzindo ruído espúrio na seção.

Na aplicação do algoritmo a dados reais utilizou-se a seção empilhada de referência apresentada na Fig. 3. Ela é parte de um levantamento sísmico realizado na margem continental brasileira contendo 301 traços, 626 amostras por

traço e intervalo de 25 metros entre traços. Com a seleção dos traços de ordem ímpar formou-se a seção de 151 traços indicada na Fig. 4, usada como entrada para o algoritmo reconstituir a seção de referência. No processamento foram usadas janelas com 25 traços e operadores de predição com 6 coeficientes. A Fig. 5 apresenta a seção interpolada e na

Fig. 6 tem-se a diferença entre as seções de referência e interpolada. A inspeção visual mostra que em geral houve uma boa recuperação da seção de referência. Observou-se também que o algoritmo trabalha melhor com dados estaqueados, com maior relação sinal/ruído.

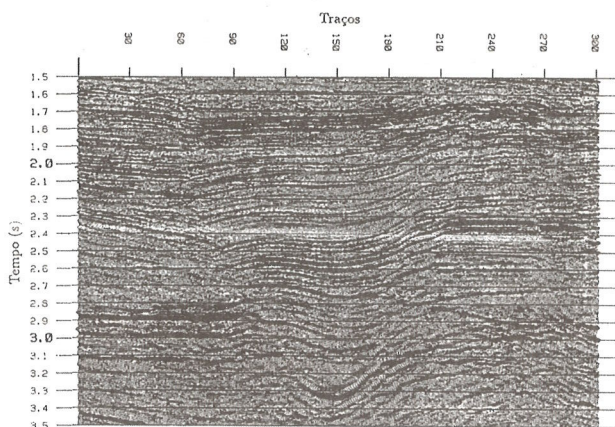


Figura 5 - Interpolação da Fig. 4. Processamento efetuado usando janelas com 25 traços e filtro de predição com $L = 6$ coeficientes.

Figure 5 - Interpolation of Fig. 4 using windows with 25 traces and filter with 6 elements.

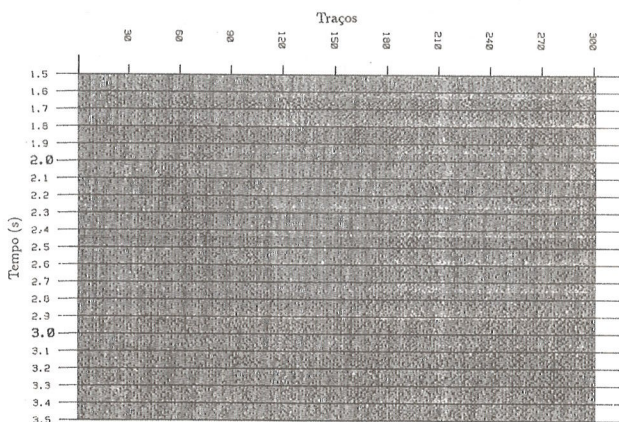


Figura 6 - Diferença entre a seção de referência (Fig. 3) e a seção interpolada (Fig. 5).

Figure 6 - Difference between reference section (Fig. 3) and interpolated section (Fig. 5).

CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se um procedimento para interpolação de traços sísmicos que tem base no método proposto por Spitz (1991), o qual trabalha no domínio

(f-x). Para obtenção dos valores interpolados, desenvolveu-se um algoritmo eficiente de decomposição LU para a solução de sistemas hermitianos que explora o bandejamento e a presença de zeros na matriz dos coeficientes. O método foi aplicado a dados sísmicos sintéticos e reais e os resultados são bons mesmo nas regiões de cruzamento de eventos ou quando estes são providos de curvaturas e com variação lateral de amplitude. Nos casos estudados, observou-se que uma estimativa preliminar para o comprimento dos operadores preditivos foi $1/4$ do número de traços na janela e uma dimensão adequada para a janela ficou entre 25 e 40 traços, dependendo da complexidade da seção sísmica. Observou-se que as simplificações consideradas tornaram o algoritmo mais sensível à presença de ruído nos dados, podendo introduzir sinais espúrios na seção interpolada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à PETROBRÁS, ao CNPq e ao PPPG/UFBA que proporcionaram a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- BARDAN, V. - 1987** - Trace interpolation in seismic data processing. *Geophysical Prospecting*, **35**:343-348.
- BRACEWELL, R. N. - 1986** - The Fourier transform and its applications. McGraw-Hill.
- CANALES, L. L. - 1984** - Randon noise reduction. *Ann. Internat. Mtg., Soc. Explor. Geophys., Expanded Abstracts*, 525-527.
- FERREIRA, N. R. - 1994** - Interpolação de traço sísmico no domínio (F-X). Dissertação de Mestrado, PPPG/UFBA.
- KREYSZIG, E. - 1988** - Advanced engineering mathematics. John Wiley & Sons.
- LARNER, K., GIBSON, B., & ROTHMAN, D. - 1981** - Trace interpolation and the design of seismic surveys. *Geophysics*, **46**:407.
- LEVINSON, N. - 1947** - The Wiener RMS (root mean square) error criterion in filter design and prediction. *J. Math. Phys.*, **25**:261-278.
- MARPLE, S. L. J. - 1980** - A new autoregressive spectrum analysis algorithm. *IEEE Trans Acoust. Speech, and Signal Proc.*, **ASSP-28**, 441-454.
- PIEPRZAC, A. W. & McCLEAN, J. W. - 1988** - Trace interpolation of severely aliased events. *58th Ann.*

- Internat. Soc. Explor. Geophys., Expanded Abstracts, 658-660.
- PORSANI, M. J. - 1992** - Subrotinas para o processamento sísmico (coletânea). PPPG/UFBa, 69-71.
- SPITZ, S. - 1991** - Seismic trace interpolation in the F-X domain. Geophysics, 56:785-794.

- ULRYCH, T. J. & CLAYTON, R. W. - 1976** - Time series modelling and maximum entropy Phys. Earth Planet. Int., 12:188-200.

Submetido em: 13/09/94

Revisado pelo(s) autor(es) em: 02/02/95

Aceito em: 12/02/95

NOTÍCIAS/NEWS

PRIMEIROS PASSOS DA COMISSÃO TRANSITÓRIA PARA CRIAÇÃO DA ADIMB

AGÊNCIA PARA O DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DA INDÚSTRIA MINERAL BRASILEIRA

A indústria mineral brasileira é carente de tecnologia. Essa questão, dentre outras, deve ser equacionada para desenvolver o setor de modo compatível com as necessidades e o potencial de recursos minerais do país.

A promoção do desenvolvimento tecnológico da mineração brasileira é meta primordial do Plano Plurianual para o Desenvolvimento do Setor Mineral, elaborado pelo DNPM em 1994, após ampla consulta a representantes da comunidade técnica, empresarial e acadêmica. Esse é o caminho para se incrementar o conhecimento mineral do país, otimizar o aproveitamento de recursos conhecidos e reduzir os efeitos ambientais adversos.

A criação de organização constituída por representantes de empresas e órgãos de governo preocupados com fomento tecnológico e formação continuada de recursos humanos visa a detectar as necessidades do Setor Mineral, realizar estudos e estabelecer planos e ações focais conjun-

tas. Exemplo bem sucedido desse modo integrado de atuação, embora envolvendo exclusivamente o setor privado, é a AMIRA, agência para desenvolvimento tecnológico do setor, na Austrália.

No Brasil, está sendo criada a ADIMB - Agência para o Desenvolvimento Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira, entidade civil, sem fins lucrativos, voltada ao incremento da produtividade e competitividade setoriais. Apoiada, na fase de instalação, pelo Ministério de Minas e Energia (MME), pelo Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) e pelo Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), a Agência passará a ser mantida, em médio prazo, pela contribuição das empresas a ela associadas e por recursos provenientes de programas governamentais de fomento à pesquisa.

Não se trata, pois, de mais um órgão governamental, nem entidade representativa convencional, mas um instrumento de transformação da atual realidade, onde os esfor-