

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DOS ARRANJOS DE FONTES E RECEPTORES NOS DADOS SÍSMICOS

SOME CONSIDERATIONS ON THE EFFECTS OF SOURCE AND RECEIVER ARRAYS IN SEISMIC DATA

Adelson Santos de Oliveira¹

RESUMO - A busca por maior resolução é uma constante no processamento sísmico. Como exemplo de fatores que contribuem para degradar a resolução em dados sísmicos encontram-se a assinatura da fonte, a influência instrumental, o intervalo finito de amostragem, a perda de energia nas altas frequências por absorção, dentre outros. O objeto de estudo deste trabalho é o efeito dos arranjos de fontes e receptores no dado sísmico registrado. Discute-se uma nova técnica, que permite estudar o efeito de arranjos de fontes e receptores de modo independente da assinatura de cada elemento individual da fonte. Por meio desta técnica, quando aplicada à sísmica marítima, pode-se estimar uma assinatura média para cada canhão individual pela deconvolução do efeito do arranjo da onda direta. O efeito do arranjo para as ondas diretas é distinto do efeito do arranjo para as ondas refletidas. Ambos os casos são discutidos. São discutidas, também, de modo superficial, as hipóteses que precisam ser satisfeitas para que esta técnica possa ser implementada. É apresentada a comparação entre o modelamento direto de assinaturas e de medições diretas para dois arranjos diferentes, para ondas diretas e refletidas. A interpretação destes resultados é discutida. São sugeridas possíveis aplicações desta técnica no processo de deconvolução da assinatura sísmica, e em processamentos especiais tais como inversão e Amplitude versus offset (AVO). Por fim, a possibilidade de utilização deste tipo de procedimento no projeto de arranjos de fontes e receptores para finalidades específicas é recomendada.

(Originais recebidos em 25.01.93).

ABSTRACT - *The quest for higher resolution is a constant concern in seismic data processing. Several factors contribute to degrade resolution of seismic data, for example source signature, instrument response, finite sampling intervals, losses of energy in high frequencies due to absorption. This paper is concerned with the effects of source and receiver arrays on seismic records and discusses a new technique that makes it possible to study these effects independent of the signature of each individual element of source. When applied to marine surveys, the technique can be used to estimate an average signature of an element of the source array simply deconvolving the effect of the array from the direct wave. The effect of array on direct waves differs from its effect on reflected waves, and both cases are discussed. The underlying assumption that must be satisfied in order to implement this technique is also discussed in general terms. The signatures obtained from forward modeling are compared with measurements for two different arrays for both direct and reflected waves. Applications are suggested in conventional and in special processing such as signature deconvolution, inversion, and AVO. Finally, this approach is recommended when designing special arrays for specific purposes.*

(Expanded abstract available at the end of the paper).

1 - INTRODUÇÃO

Os arranjos de fontes e receptores são, em geral, planejados para melhorar a relação sinal-ruído e reduzir ou eliminar problemas com o alias espacial pela atenuação de comprimentos de onda incorretamente amostrados. Seu efeito benéfico é acompanhado da alteração das relações de amplitude esperadas na hipótese de fontes e receptores pontuais. Esta alteração precisa ser levada em considera-

ção em procedimentos especiais tais como inversão ou AVO. A análise dos efeitos dos arranjos de fontes e receptores é complicada por diversos fatores, que serão discutidos a seguir. Entretanto, algumas hipóteses permitem construir um modelo onde o efeito do arranjo pode ser previsto e reduzido.

No modelo construído aqui, o arranjo é composto de diversos elementos iguais (canhões de ar, etc.), onde cada qual emite, a partir do mesmo instante de tempo $t = 0$, uma

¹ - Setor de Estudos Geofísicos (SESGEF), Divisão de Tratamento de Dados Exploratórios (DITREX), Departamento de Exploração (DEPEX), Av. República do Chile, 65, Centro, Cep 20035-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

mesma forma de onda, amplificada de acordo com sua capacidade cúbica, e os receptores possuem respostas impulsivas iguais. Na prática, a forma de onda ou assinatura emitida varia quando a capacidade cúbica se altera, e os receptores podem ser diferentes, por exemplo, segundo seu estado de conservação ou condições de trabalho distintas. Neste modelo, considera-se ainda que cada elemento dos arranjos de fontes e receptores seja pontual. Para que a primeira hipótese seja aceitável, é necessário que as variações na forma da assinatura de cada elemento da fonte, e as respostas de cada elemento receptor sejam suficientemente pequenas. Para que a segunda hipótese se verifique, é necessário que as dimensões dos arranjos, tanto de fontes quanto de receptores, sejam consideravelmente grandes quando comparadas às dimensões de cada elemento. Contudo, se o número de elementos nos arranjos de fontes e receptores for suficientemente grande, alguma estatística talvez seja possível, de modo a tornar a primeira e a segunda hipóteses válidas, a partir de uma assinatura média proveniente de uma fonte e um receptor de referência. O uso de uma assinatura média em substituição às várias diferentes formas de onda realmente existentes é razoavelmente aceita, com base em um senso comum. Especialmente se as variações em forma forem pequenas e o número de elementos for realmente grande. O mesmo não se pode afirmar quanto à hipótese de que o comportamento de um número N de elementos não-pontuais se reduza ao comportamento do mesmo número N de elementos pontuais, quando N cresce. Não será objeto de discussão qual ou quais das hipóteses foram respeitadas ou violadas em algum tipo de arranjo. Algumas outras hipóteses serão necessárias adiante, para que se possa alcançar os objetivos deste trabalho. Entretanto, é interessante deixar sua discussão para depois das primeiras considerações sobre as ondas refletidas.

Talvez o aspecto mais interessante do tratamento dado aos arranjos seja a independência dos mesmos quanto à assinatura média de cada elemento da fonte. Isto permite estimar o efeito de arranjos para, por exemplo, as ondas diretas e, a partir deste, recuperar-se a assinatura média de cada elemento por deconvolução. Em levantamentos realizados em águas profundas, as ondas diretas podem ser isoladas da reflexão no fundo do mar, o que torna esta possibilidade interessante do ponto de vista prático. Novamente, o efeito do arranjo para as ondas refletidas pode ser estimado de modo independente da assinatura média para, por fim, estimar-se a assinatura realmente presente nas reflexões por convolução direta. Podem surgir problemas quando se aplica esta técnica de modo geral. Algumas das causas são a violação de uma ou ambas das hipóteses acima, ou o número reduzido de elementos no arranjo que invalide a hipótese estatística.

Dois exemplos de arranjos foram estudados (figs. 1 e 2). No primeiro, o intervalo de amostragem utilizado foi de 4 ms, enquanto o segundo era destinado a alta resolução, com intervalo de amostragem de 1 ms. Os resultados alcançados no primeiro caso são superiores ao segundo. Isto é devido, em parte, a problemas com a deconvolução do efeito do arranjo para a onda direta. Na verdade, a maior

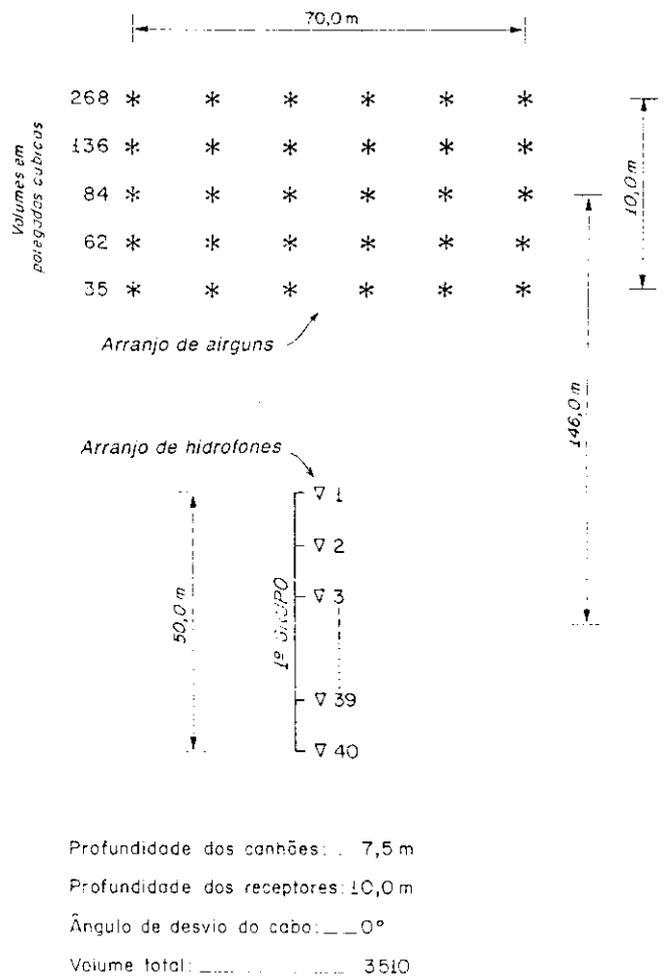


Fig. 1 - Geometria do arranjo 1 de fontes e receptores estudado (intervalo de amostragem de 4 ms).

Fig. 1 - Geometry of the array 1 of sources and receivers studied (sampling rate of 4 ms).

resolução imposta pela maior amostragem exige maior precisão no posicionamento dos elementos dos arranjos de fontes e receptores.

2 - O ARRANJO PARA A ONDA DIRETA E A FUNÇÃO INTERPOLANTE

A descrição do efeito do arranjo é feita a partir da resposta para um único par de fonte e receptor pontuais. Como se sabe, a contribuição para o efeito total de cada par é dada por:

$$\frac{\delta(t - t_n)}{4\pi R} \quad (1)$$

onde:

$\delta(t)$ representa a função delta de Dirac, t_n é o tempo necessário para um sinal emitido na fonte alcançar o receptor, e R é a distância total percorrida no trajeto. Para o caso de várias fontes e receptores, pelo princípio de

superposição, a resposta impulsiva é a soma simples de todos os pares. Neste ponto, é interessante incluir as reflexões originadas na superfície da água (fantasma) como parte do efeito do arranjo. De fato a diferença em tempo de percurso entre as ondas refletidas na superfície e as que alcançam os receptores diretamente é, em geral, menor que a dimensão temporal do próprio arranjo, o que justifica sua inclusão. Representando o efeito total do arranjo por $A(t)$ tem-se:

$$A(t) = \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_c} \frac{F(C_j)}{4\pi} \left[\frac{\delta(t-t_{ij}^d)}{R_{ij}^d} - \frac{\delta(t-t_{ij}^f)}{R_{ij}^f} \right] \quad (2)$$

onde:

d e f são abreviações para direta e fantasma, i e j representam respectivamente índice de receptor e fonte, com N_r o número de elementos no arranjo de receptores, N_c o número de elementos no arranjo de canhões, e $F(C_j)$ é alguma função da capacidade cúbica C_j de cada canhão, a qual deve ligar a capacidade cúbica à amplitude realmente medida. Ziolkowski *et al.* (1982) e Giles e Johnston (1973) relacionam a amplitude à raiz cúbica da capacidade cúbica, entretanto, para a aplicação feita aqui, um relacionamento linear se mostrou mais conveniente. A discrepância com estes trabalhos pode talvez ser explicada pelo grande número de aproximações feitas para se alcançarem os objetivos deste trabalho. Procura-se uma representação discreta de um evento contínuo, e neste processo muita informação é perdida. Pode ser que esta informação torne a relação entre a amplitude e a capacidade cúbica preferencialmente linear em discordância com Ziolkowski *et al.* (1982) e Giles e Johnston (1973). De qualquer modo, o uso de uma ou outra forma para $F(C_j)$ não conduziu a diferenças significativas. Em um modelo convolucional, a onda direta pode ser representada pela convolução entre o arranjo $A(t)$ e uma assinatura média para os canhões que envolve, dentre outros fatores, a influência dos instrumentos de registro. A hipótese de uma assinatura média é necessária, pois cada canhão e receptor podem ter um comportamento diferente. Ainda a forma da assinatura pode mudar com a capacidade cúbica. Isto não foi considerado na definição do procedimento inverso, pois neste caso o número de "variáveis" excederia em muito o número de "equações". Assim, considera-se que exista uma única assinatura tomada como média, que varia apenas por um fator multiplicativo de canhão para canhão à medida que a capacidade cúbica varia.

Na prática, apenas uma banda limitada do espectro de frequência é registrada. Considerando que a banda tem por limite superior a frequência de Nyquist f_{Ny} , a nova representação para o efeito do arranjo pode ser obtida simplesmente substituindo-se as funções delta de Dirac por funções sinc definidas por:

$$\text{sinc}(f_{Ny}, t-t_n) = \frac{\sin(2\pi f_{Ny}(t-t_n))}{\pi(t-t_n)} \quad (3)$$

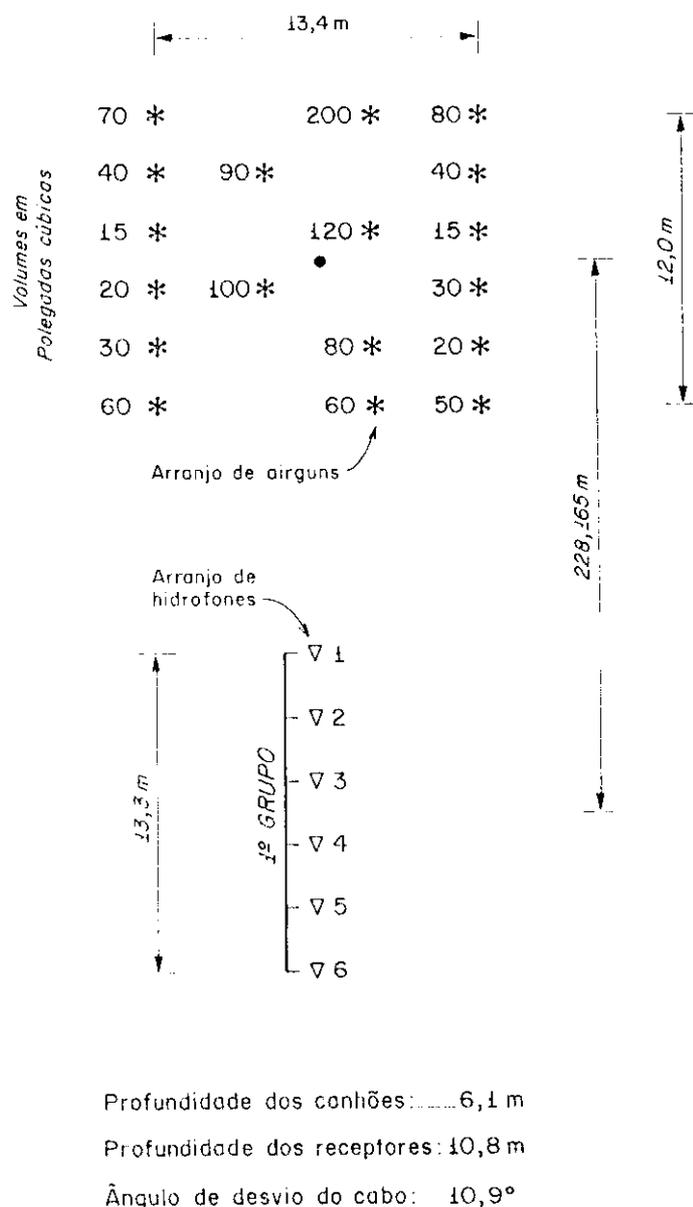


Fig. 2 - Geometria do arranjo 2 de fontes e receptores estudado (intervalo de amostragem de 1 ms).

Fig. 2 - Geometry of the array 2 of sources and receivers studied (sampling rate of 1 ms).

Considerando que os dados serão registrados com um intervalo de amostragem de Δt , onde:

$$\Delta t = \frac{1}{2f_{Ny}}, \quad (4)$$

considerando ainda que $t_n = n\Delta t$, a amostragem da função sinc resultará em:

$$\text{sinc}(f_{Ny}, (m-n)\Delta t) = 2f_{Ny} \delta_{m-n} \quad (5)$$

onde:

δ_{m-n} representa a função delta de Kronecker e m e n são inteiros.

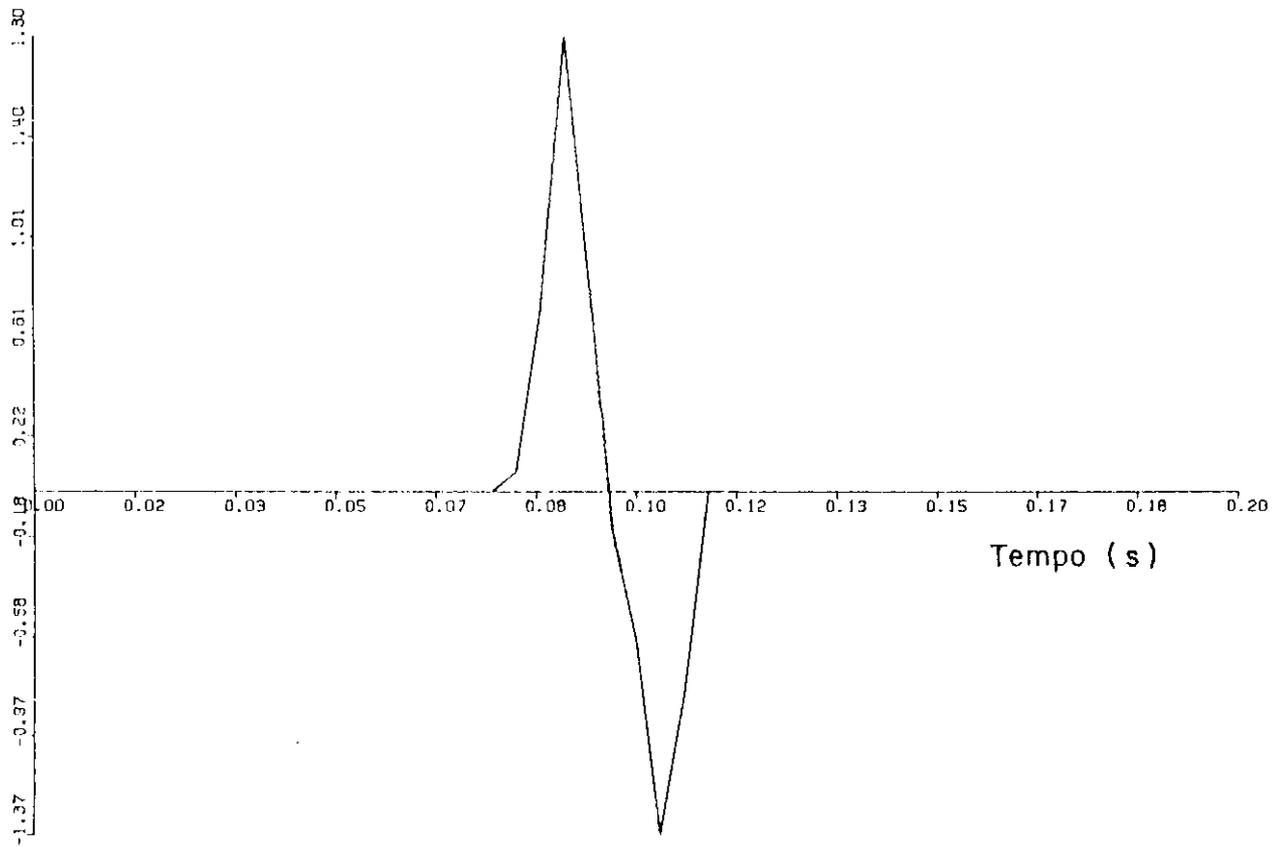


Fig. 3 - Estimativa do efeito do arranjo 1 para a onda direta no primeiro traço.
 Fig. 3 - Estimation of the effect of the array 1 for the direct wave at the first trace.

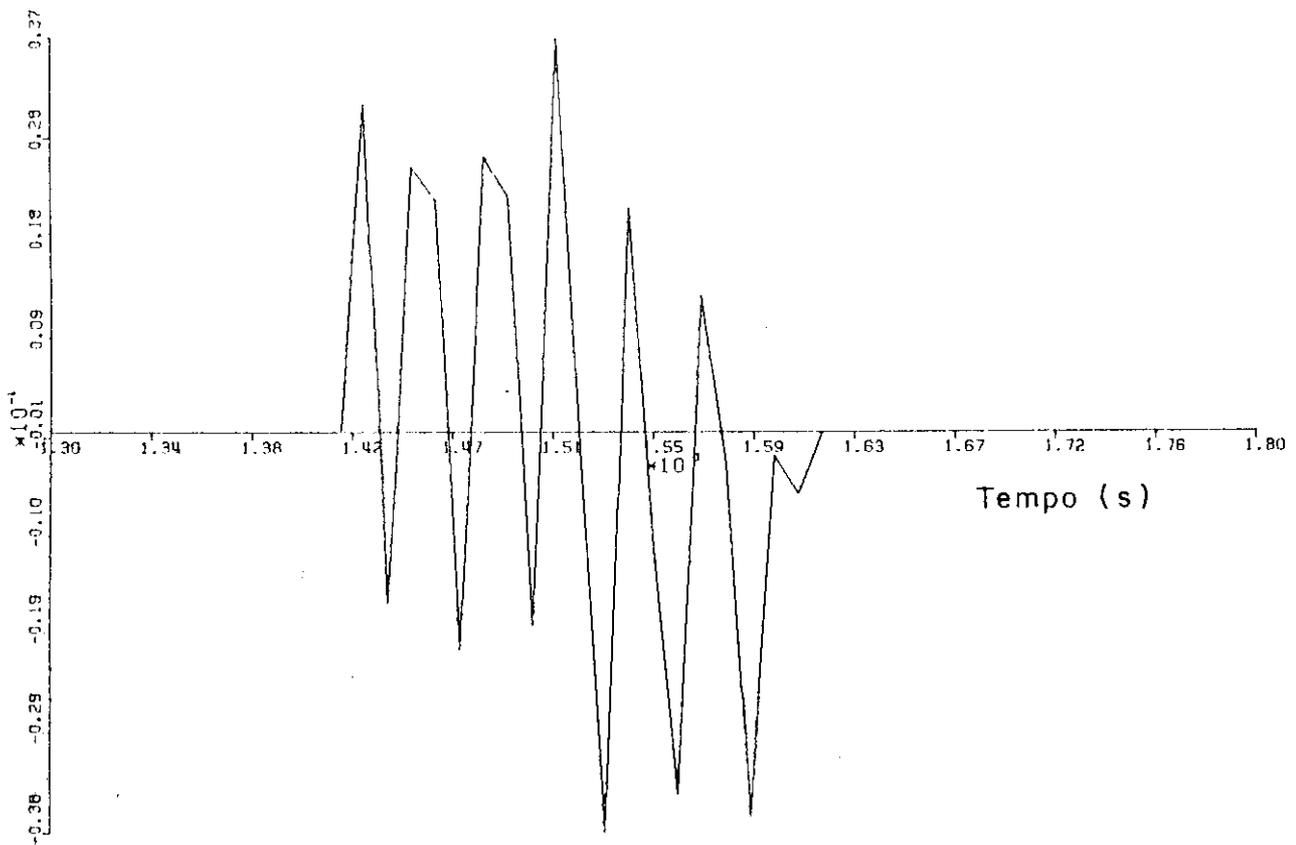


Fig. 4 - Estimativa do efeito do arranjo 2 para a onda direta no primeiro traço.
 Fig. 4 - Estimation of the effect of the array 2 for the direct wave at the first trace.

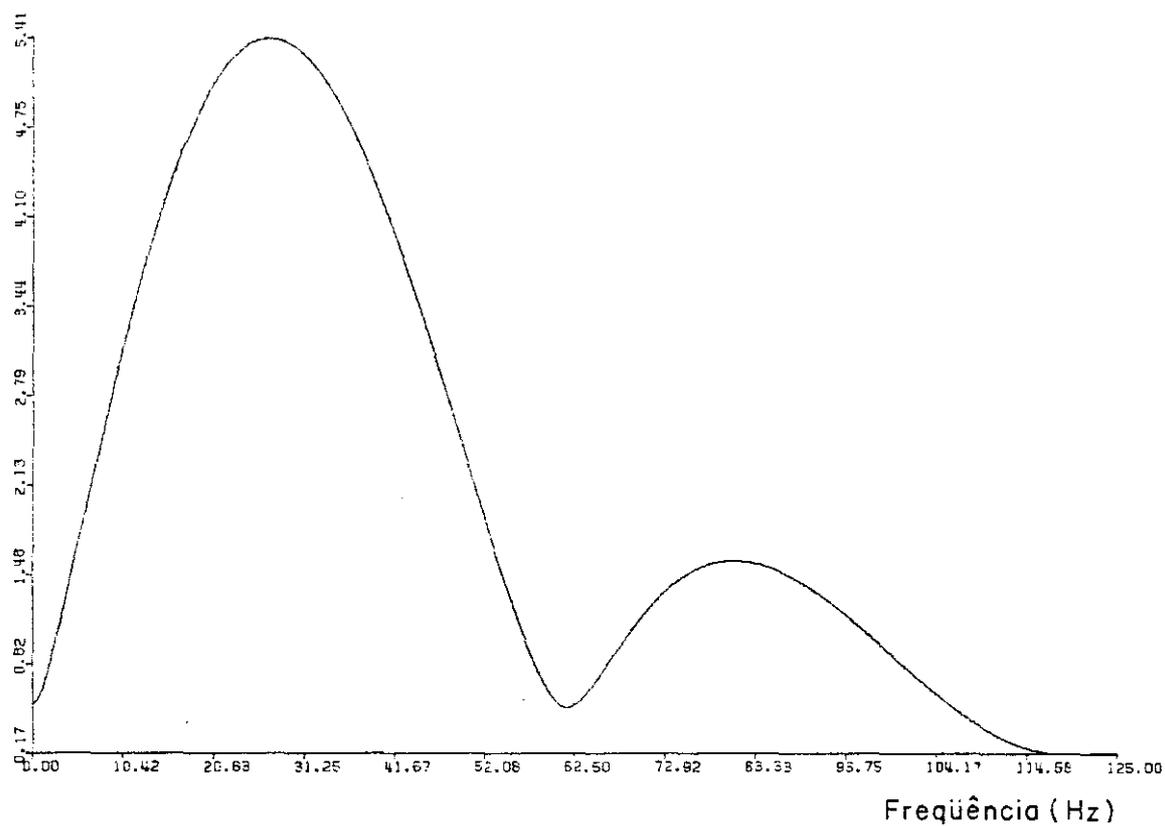


Fig. 5 - Espectro de amplitude do efeito do arranjo 1 para a onda direta.
 Fig. 5 - Amplitude spectrum of the effect of the array 1 for the direct wave.

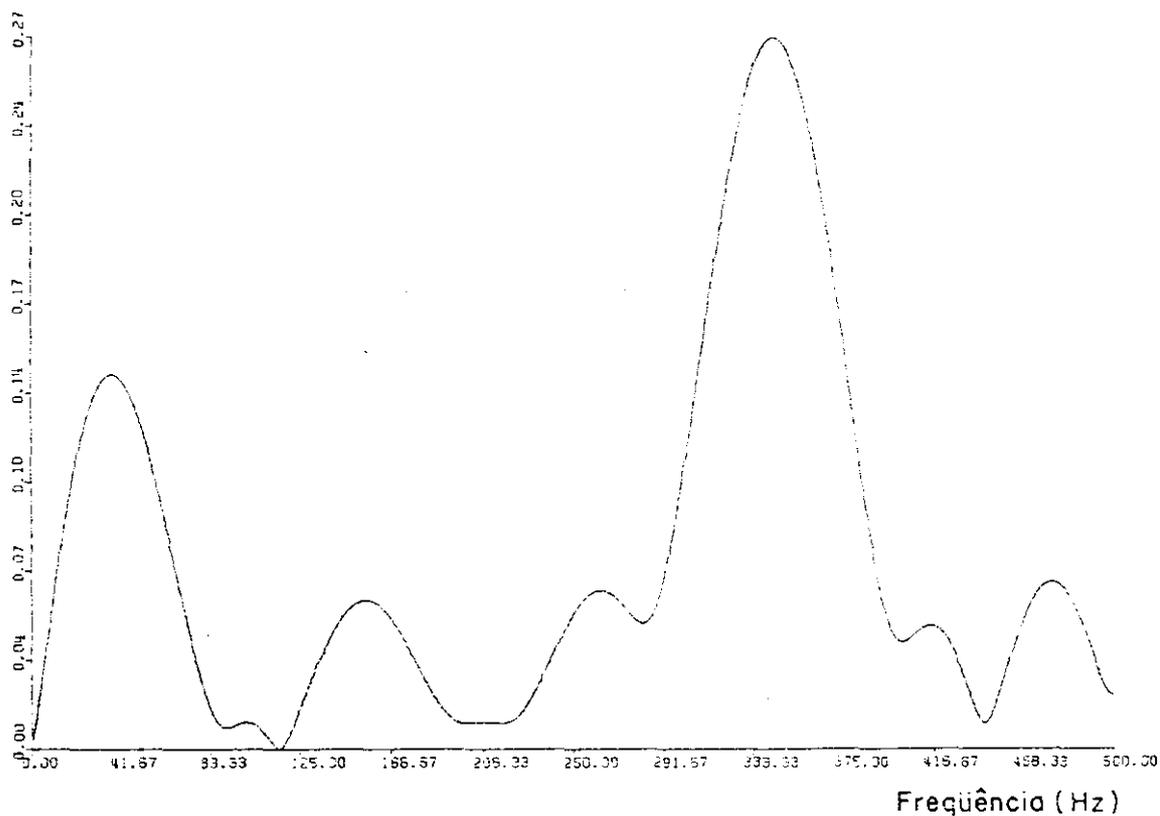


Fig. 6 - Espectro de amplitude do efeito do arranjo 2 para a onda direta.
 Fig. 6 - Amplitude spectrum of the effect of the array 2 for the direct wave.

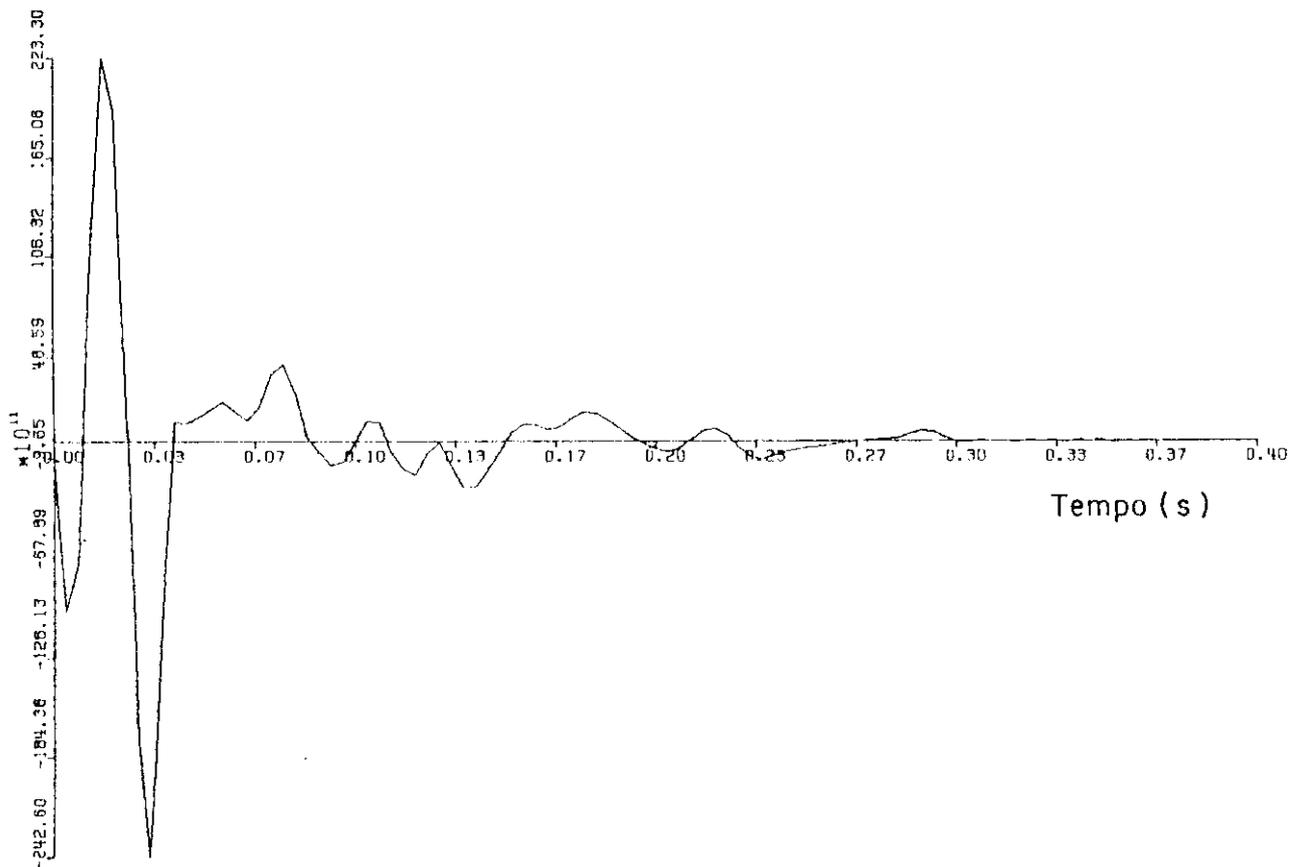


Fig. 7 - Estimativa da assinatura média para os elementos do arranjo 1.
 Fig. 7 - Estimation of the average signature for the elements of array 1.

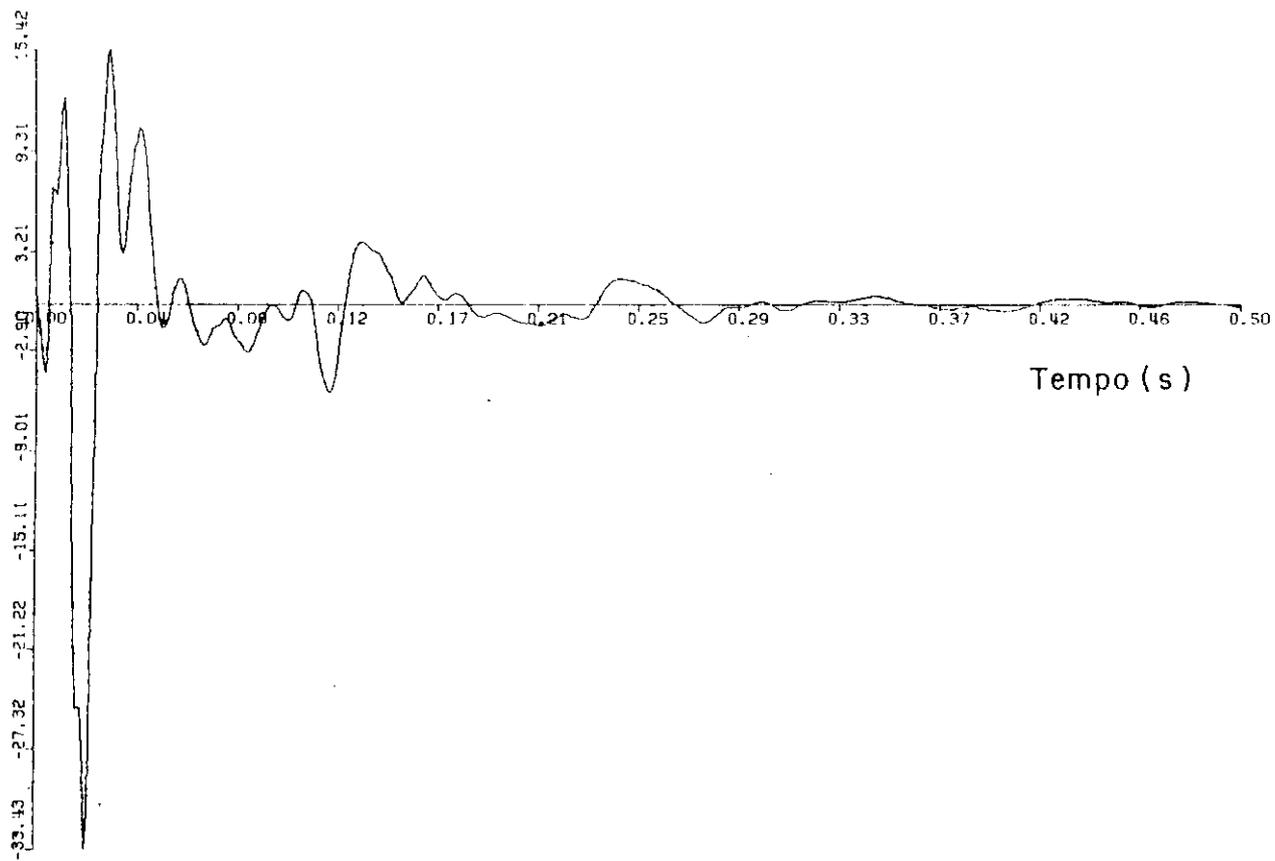


Fig. 8 - Estimativa da assinatura média para os elementos do arranjo 2.
 Fig. 8 - Estimation of the average signature for the elements of array 2.

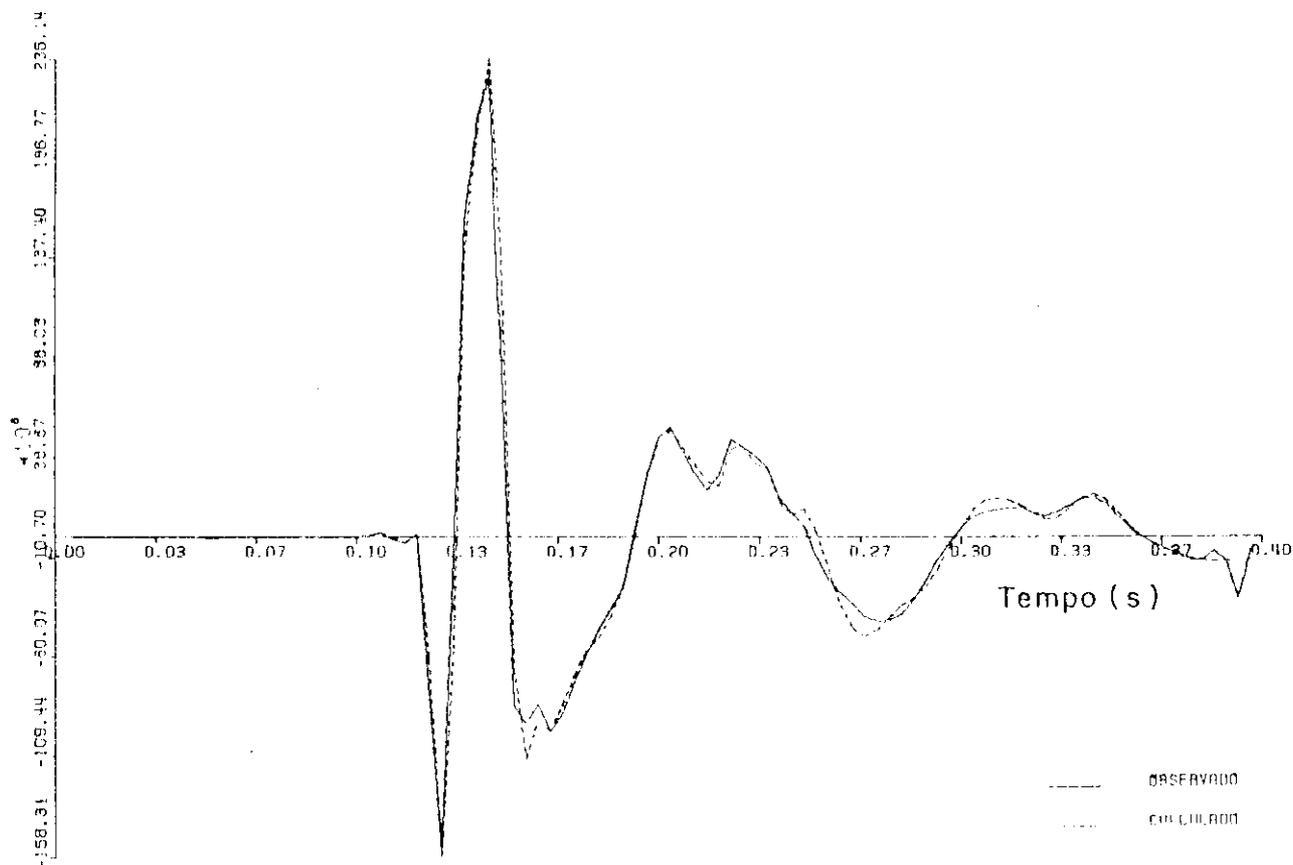


Fig. 9 - Comparação entre a previsão para a onda direta no segundo traço e a onda direta realmente observada (arranjo 1).
 Fig. 9 - Comparison between predicted and observed direct waves at the second trace (array 1).

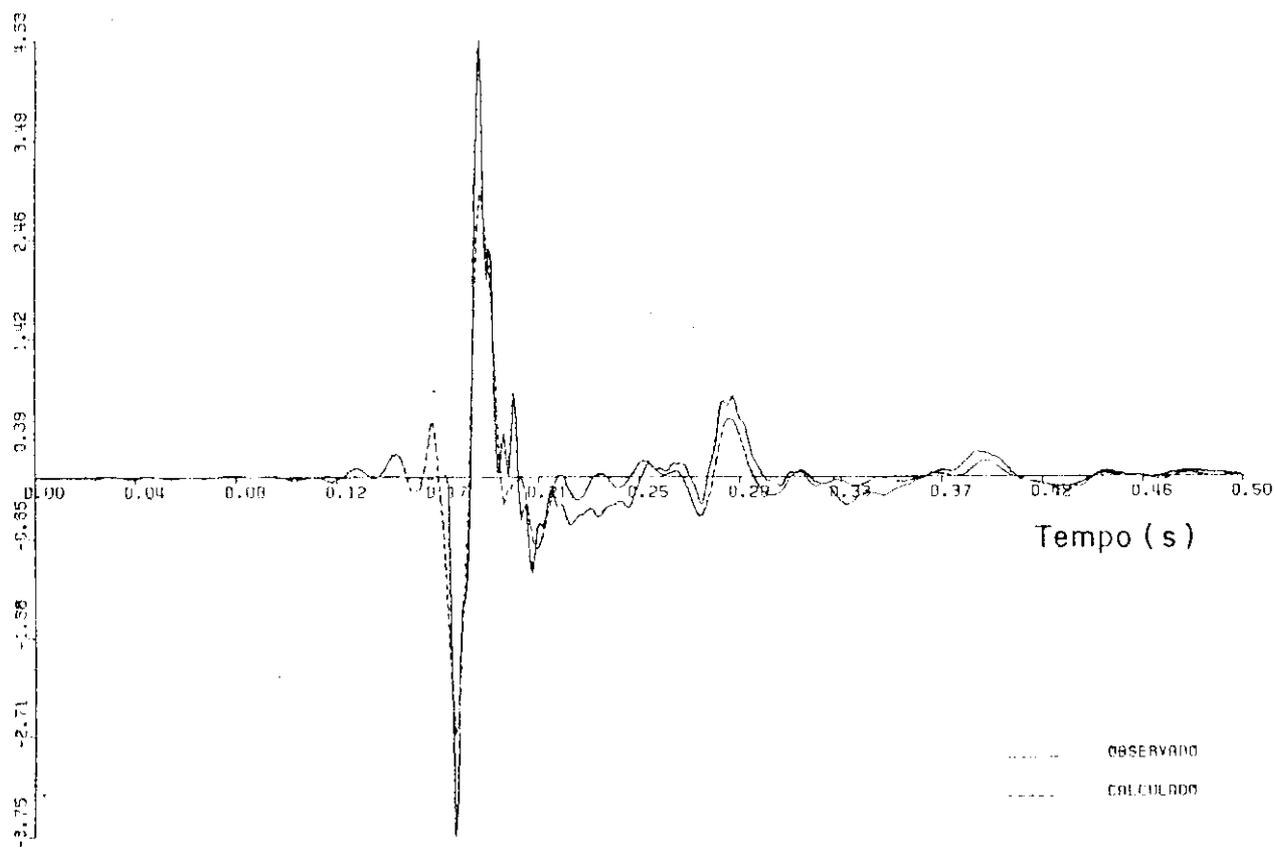


Fig. 10 - Comparação entre a previsão para a onda direta no segundo traço e a onda direta realmente observada (arranjo 2).
 Fig. 10 - Comparison between predicted and observed direct waves at the second trace (array 2).

Pode-se perceber que se o tempo t , inicialmente atribuído à delta de Dirac, não for múltiplo inteiro de Δt , então a representação final para o evento correspondente estará dispersa no tempo. Isto é, haverá informação sobre o evento antes que ocorra (anticausalidade), assim como após sua duração. Isto decorre diretamente da amostragem da função sinc em intervalos de tempo que não correspondem aos seus "zeros". Para contornar os problemas com a extensão dos eventos, por um período de tempo superior à sua existência, algum outro tipo de função interpolante será introduzida. Através desta função, a representação do efeito do arranjo pode ser escrita como:

$$A(n\Delta t) = \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_s} \frac{F(C_{ij})}{4\pi} \left[\frac{\text{Int}(n\Delta t - t_{ij}^d)}{R_{ij}^d} - \frac{\text{Int}(n\Delta t - t_{ij}^r)}{R_{ij}^r} \right] \quad (6)$$

onde:

Int é algum tipo de função convenientemente escolhida. Uma escolha simples e útil para int é:

$$\text{Int}(t) = \begin{cases} 1 - \frac{|t|}{\Delta t}; & \text{para } |t| \leq \Delta t \\ 0; & \text{para } |t| > \Delta t \end{cases} \quad (7)$$

A escolha acima corresponde à interpolação linear. Outros tipos de interpolação (quadrática, etc.) podem também ser introduzidos. Contudo, estas formas de ordem superior conduzem a representações de maior extensão temporal para os eventos que a forma linear. Os resultados foram satisfatórios com a interpolação de primeira ordem, e as diferenças para ordens superiores não foram significativas.

A interpolação linear é bastante útil se a assinatura não possui altas frequências (frequências superiores a 1/3 da frequência de Nyquist). A ação da função interpolante linear pode ser resumida como segue. Supõe-se conhecida a assinatura $w(t)$ em tempos $t = n\Delta t$:

$$w(n\Delta t) = \{w_0, w_1, w_2, \dots, w_N\}. \quad (8)$$

Uma estimativa da assinatura adiantada de um intervalo de tempo $\alpha\Delta t$ pode ser obtida pela interpolação de $w(t)$ como segue:

$$w((n-\alpha)\Delta t) = (1-\alpha)w_{n-1} + \alpha w_n, \quad (9)$$

para $0 \leq \alpha \leq 1$.

O resultado final pode ser expresso como a convolução discreta da função interpolante deslocada no tempo da fração α de Δt com a função $w(t)$:

$$\{1-\alpha, \alpha\} * \{w_0, w_1, w_2, \dots, w_N\}, \quad (10)$$

onde:

* significa convolução. Para tempos de chegada genéricos de $(n+\alpha)\Delta t$, o impulso deve ser representado por:

$$\delta_n * \{1-\alpha, \alpha\} \quad (11)$$

onde:

δ_n é o responsável pelo deslocamento por um número inteiro de amostras $n\Delta t$, e o termo restante realiza a interpolação desejada para representar a parte semi-inteira $\alpha\Delta t$. Assim, o efeito total de um arranjo de fontes e receptores pode ser representado pela função interpolante.

A utilização da expressão 2, tendo a função triângulo como função interpolante conduz, para os arranjos 1 e 2, às funções representadas nas figuras 3 e 4, respectivamente. Estes são os efeitos esperados para os arranjos para o primeiro traço. Nas figuras 5 e 6 representam-se, respectivamente, os espectros de amplitude dos efeitos dos arranjos 1 e 2 para as ondas diretas. Nas figuras 7 e 8 encontram-se as assinaturas médias encontradas via deconvolução dos efeitos dos arranjos das ondas diretas. Nas figuras 9 e 10, encontram-se as comparações entre as ondas diretas no segundo traço. Da observação destas figuras, parece claro que a presença de *notchs* mais pronunciados no arranjo 2 que no arranjo 1, torna os resultados com o arranjo 2 menos satisfatórios. Tanto a assinatura média recuperada no caso do arranjo 2 quanto a previsão feita para a onda direta no segundo traço apresentam aspecto mais ruidoso que para o arranjo 1. Foi necessário para o efeito do arranjo 2 preencherem-se as regiões de maior queda no espectro de amplitude até algum nível para estabilizar a deconvolução. Ao contrário do arranjo 1, onde nenhum cuidado com a deconvolução foi necessário, as regiões de menor amplitude no espectro ressaltaram os ruídos observados nas figuras 8 e 10.

A previsão deste tipo de problema é simples se se utiliza a técnica descrita aqui. O dimensionamento dos arranjos de fontes e receptores poderia ser adequado para garantir a sua eliminação no processamento com menos problemas com a deconvolução.

Para as ondas refletidas, o efeito do arranjo dado na equação 2 precisa ser levemente modificado. Uma adaptação à descrição do efeito do arranjo para ondas refletidas, contida em de Oliveira (1990), pode ser usada aqui. A principal diferença com relação ao caso da onda direta é que para ondas refletidas haverá três tipos distintos de fantasma: fantasma da fonte, fantasma do receptor e fantasma da fonte e receptor.

3 – O ARRANJO PARA ONDAS REFLETIDAS

O efeito do arranjo para as ondas que caminham diretamente da fonte aos receptores, para a sísmica de reflexão, é importante pela possibilidade que oferece para a determinação da assinatura média dos canhões. A partir da estimativa desta assinatura média, para cada canhão individualmente, pode-se estimar a assinatura observada

nas reflexões. Para isto, é necessária uma descrição do efeito do arranjo para as ondas refletidas. Uma descrição geral do efeito do arranjo para as ondas refletidas exige o conhecimento prévio da geologia que, por hipótese, deseja-se determinar. Este é um problema em princípio muito complicado, e um modelo simples de camadas plano-paralelas será assumido. Neste modelo, supõe-se ainda que em um CMP as reflexões em camadas profundas possam ser descritas perfeitamente por hipérbolas, com velocidade igual à velocidade de empilhamento. Isto corresponde a substituir o conjunto de camadas superior ao refletor por uma camada homogênea de velocidade média igual à velocidade de empilhamento. Esta é uma aproximação válida, em geral para pequenos afastamentos entre fonte e receptor.

As ondas refletidas se distinguem das ondas diretas, no que diz respeito ao efeito do arranjo, na disposição dos fantasmas. Para as ondas refletidas, admite-se até três tipos distintos de fantasmas. Têm-se ondas que simplesmente partem da fonte, refletem-se e alcançam o receptor. Também, pode-se ter ondas que partem da fonte, refletem-se na superfície do mar, alcançam o refletor e finalmente chegam ao receptor. Se a profundidade da fonte e do receptor são diferentes, as ondas que perfazem o trajeto fonte → refletor → superfície do mar → receptor, possuem tempos de chegada distintos do último caso. Finalmente, admite-se ainda duas reflexões na superfície do mar durante o trajeto entre fonte e receptor, passando pelo refletor.

No caso simplificado de uma única fonte pontual e um único receptor também pontual, mesmo no caso acústico, as ondas refletidas, em geral, não preservam a amplitude e a fase da onda incidente. Este é um problema complicado e uma expressão analítica para as ondas refletidas, nos domínios do tempo e espaço, até hoje não está disponível. Em outras palavras, o tratamento do efeito do arranjo, incluindo as reflexões, não é hoje possível nos domínios do tempo e do espaço. Entretanto, sob algumas restrições, é possível obter expressões satisfatórias nos domínios do tempo e do espaço para as ondas refletidas. Recentemente, de Oliveira (1990) utilizou uma expressão aproximada para as ondas refletidas no tempo e no espaço para estimar o efeito total de arranjos de canhões de ar e hidrofones. A expressão utilizada continha dois tipos distintos de contribuição envolvendo variações de densidade e velocidade. Estas expressões são diferentes quanto à forma e à energia total da onda recebida. Por outro lado, como estas diferenças são pequenas, sugere-se para a análise de arranjos feita aqui que estas diferenças sejam desprezadas. O efeito do arranjo pode ser representado pelo seu efeito para variações apenas em densidade. Esta escolha se deve também à sua maior simplicidade de representação e entendimento.

Por meio do termo de variação em densidades, pode-se entender o efeito do arranjo como uma soma de todas as contribuições de todos os pares fonte e receptores exatamente como para as ondas diretas. É interessante explicitar o espalhamento geométrico médio, de modo a evidenciar uma contribuição do arranjo propriamente dito. Desta forma, o efeito do arranjo para ondas refletidas pode ser representado por:

$$\frac{1}{4\pi R_m} A(n\Delta t)$$

onde:

R_m significa o caminho médio percorrido entre fonte → refletor → receptor e $A(n\Delta t)$ é dado por:

$$A(n\Delta t) = \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_c} F(C_j) R_m \left[\frac{\text{Int}(n\Delta t - t_{ij})}{R_{ij}} - \frac{\text{Int}(n\Delta t - t_{ij}^r)}{R_{ij}^r} - \frac{\text{Int}(n\Delta t - t_{ij}^c)}{R_{ij}^c} + \frac{\text{Int}(n\Delta t - t_{ij}^{cr})}{R_{ij}^{cr}} \right] \quad (12)$$

onde:

t_{ij} , t_{ij}^r , t_{ij}^c e t_{ij}^{cr} representam respectivamente os tempos de chegada das ondas refletidas, refletidas após reflexão na superfície junto ao receptor, refletidas após reflexão na superfície junto ao canhão e refletidas após reflexões na superfície junto ao receptor e ao canhão. As variáveis R_{ij} , R_{ij}^r , R_{ij}^c e R_{ij}^{cr} representam respectivamente as distâncias percorridas correspondentes.

Nas figuras 11 e 12, encontra-se a comparação entre as previsões para as assinaturas observadas nas reflexões, utilizando-se os arranjos 1 e 2 respectivamente, e as reflexões registradas no primeiro traço. No caso das ondas refletidas, a previsão para as assinaturas não considera o espalhamento geométrico e os coeficientes de reflexão propriamente ditos. Para efeito de comparação, foi necessário multiplicarem-se as previsões por um fator de escala, a fim de se obter uma idéia mais clara dos resultados. Pode-se observar o melhor desempenho desta técnica na previsão da assinatura para a reflexão para o arranjo 1, quando comparada à mesma previsão para o arranjo 2. A utilização da assinatura estimada desta forma, para a deconvolução em dados reais, pode ser encontrada em de Oliveira e Campos (1991), onde algumas vantagens deste procedimento são descritas.

A estimativa do efeito do arranjo para as ondas refletidas, obtida desta maneira, varia com o afastamento entre fonte e receptor, com a velocidade média no refletor e com o tempo de trânsito total. A variação total se dá em forma e em energia. O estudo destas variações, no domínio de frequência, demonstra que as mudanças em forma correspondem a variações na faixa de frequências altas. Assim, se esta banda do espectro for filtrada, estas variações tenderão a diminuir. Para o arranjo 1, a frequência mínima na qual estas variações começam a ser consideráveis é da ordem de 62 Hz. A aplicação de filtros passa banda em geral eliminam estas variações do ponto de vista prático. As variações em amplitude se distribuem ao longo de todo o espectro e não podem ser desprezadas. Desde que as variações em forma sejam negligenciáveis, pode-se definir uma assinatura, média ou de referência e, a partir desta, aproximar a expressão (12) como segue:

$$A(n\Delta t) = \alpha(r, n\Delta t, v) A_R(n\Delta t), \quad (13)$$

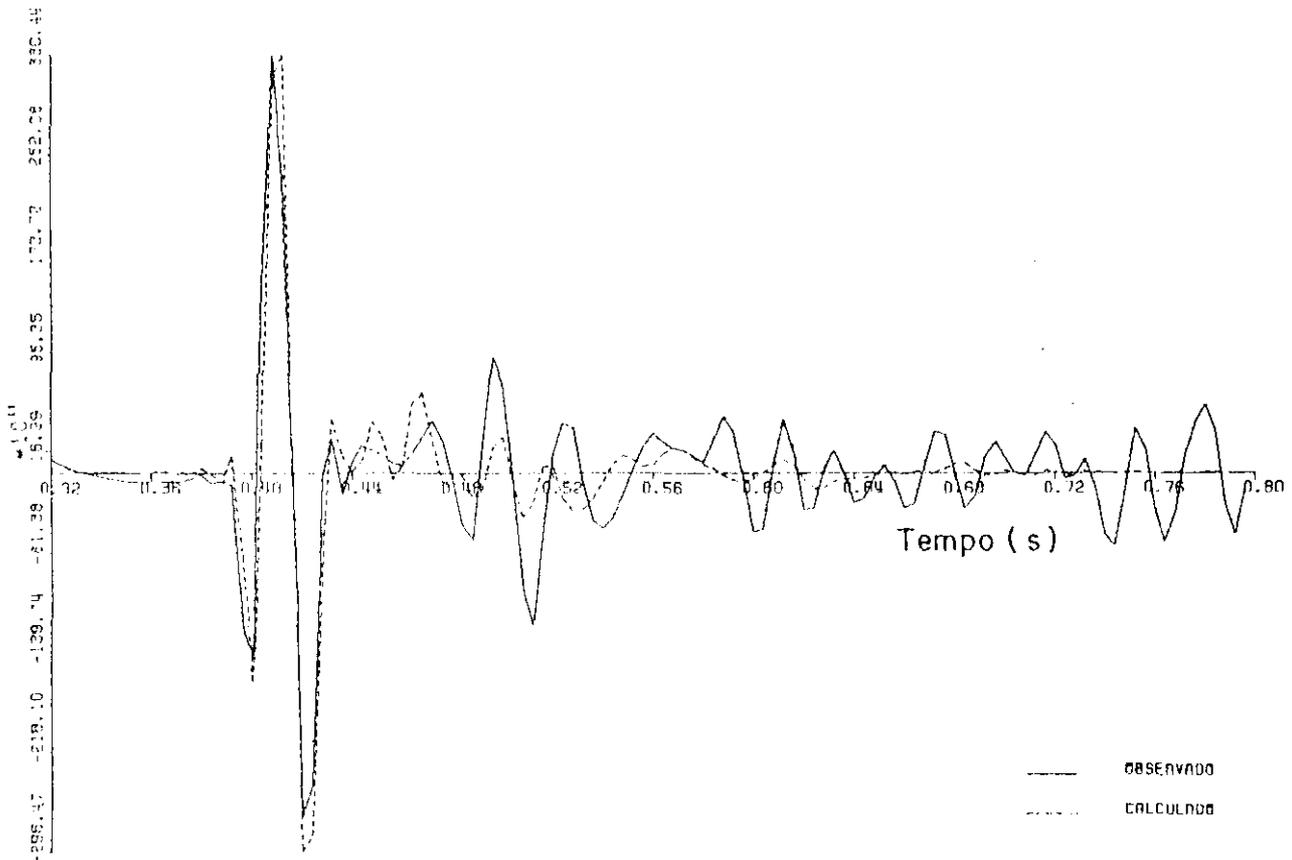


Fig. 11 - Comparação entre a previsão para a onda refletida no primeiro traço e a onda refletida realmente observada (arranjo 1).
 Fig. 11 - Comparison between predicted and observed reflected waves at the first trace (array 1).

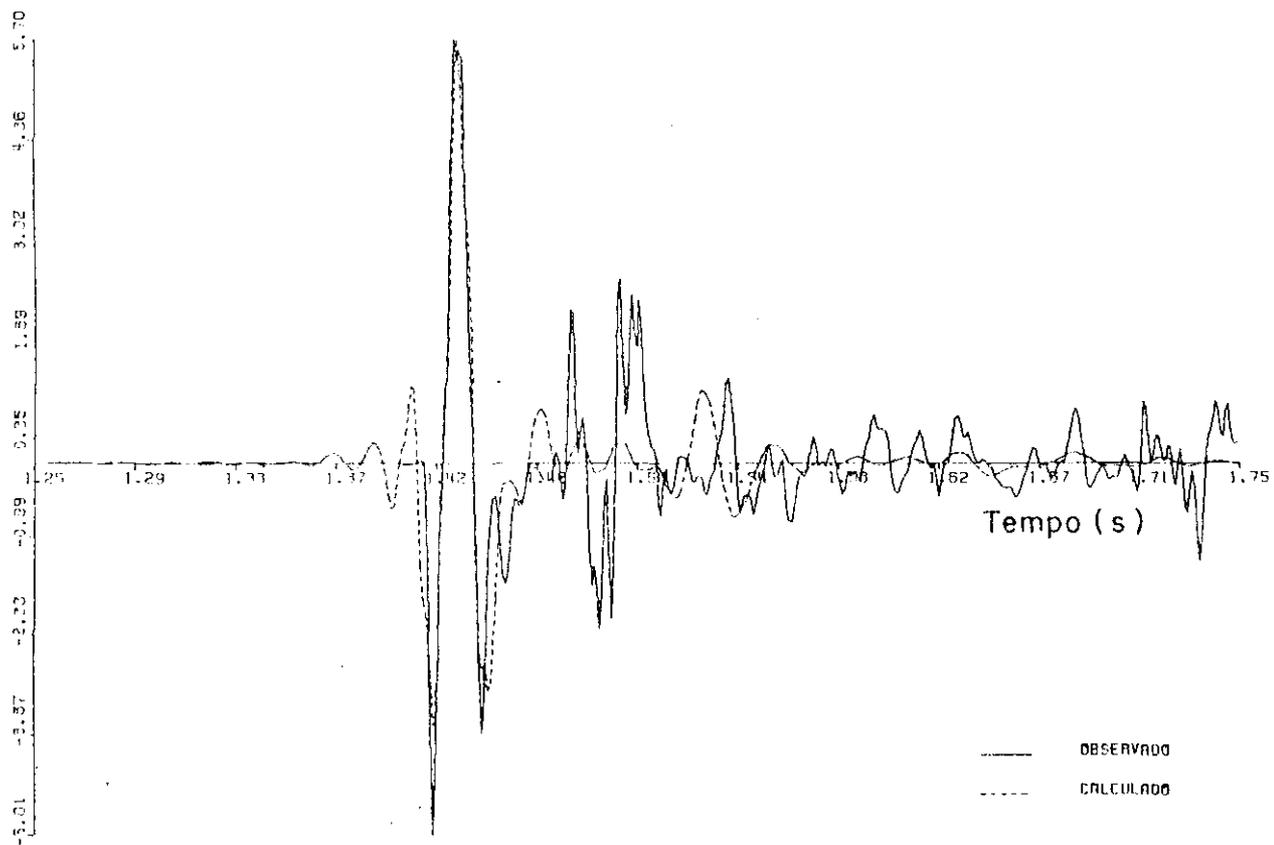


Fig. 12 - Comparação entre a previsão para a onda refletida no primeiro traço e a onda refletida realmente observada (arranjo 2).
 Fig. 12 - Comparison between predicted and observed reflected waves at the first trace (array 2).

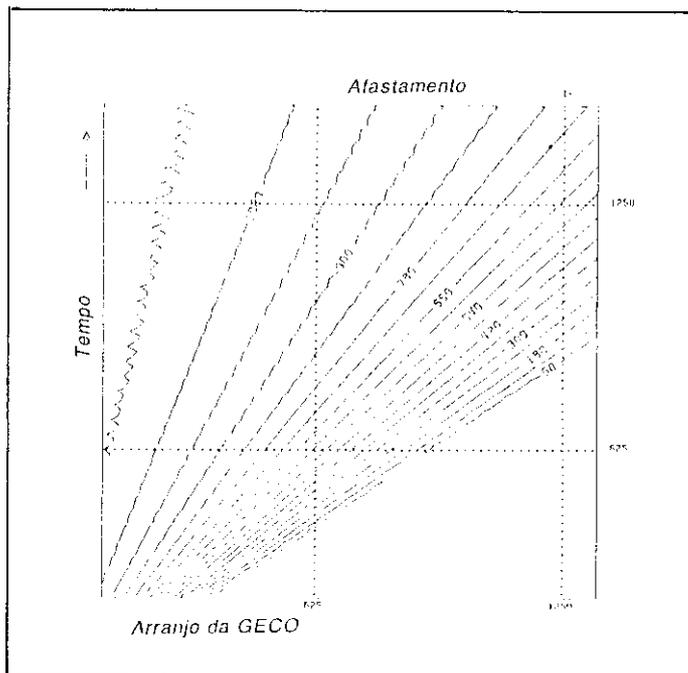


Fig. 13 - Mapa de contorno representando as curvas de nível para a energia em função do afastamento do tempo do arranjo 1. Assumiu-se a velocidade de empilhamento constante e igual a 1500m/s. Os valores nas curvas representam a variável α vezes 10^3 .

Fig. 13 - Contour map representing the energy as a function of the offset and the reflection time for the array 1. Velocity was held constant and equal to 1500m/s. The values assigned to the curves represents the variable α times 10^3 .

onde:

$A_F(n\Delta t)$ simboliza o efeito do arranjo para um determinado afastamento entre fonte e receptores, um tempo de trânsito e uma velocidade média ou de empilhamento tomados como referência, e $\alpha(r, n\Delta t, v)$ representa a razão entre as energias do arranjo no ponto de interesse e no ponto de referência.

Na figura 13, apresenta-se um mapa de contorno onde as curvas de nível indicam as regiões onde α é constante. Por simplicidade, foi assumida uma única velocidade para o cálculo da função representada nesta figura. A assinatura para as ondas refletidas tomada como referência é a mesma encontrada na figura 11. Ainda, para efeito de representação gráfica, os valores de α foram multiplicados por 1000.

A variação deste parâmetro pode ser utilizada para se definir uma função de ganho que remova a influência do arranjo. Para o processamento diário, este tipo de filtro não é necessário, pois outros tipos mais simples de compensação podem realizar esta tarefa, dentro das necessidades comuns. Porém, para procedimentos especiais, tais como inversão e AVO, esta função pode ser uma boa alternativa aos métodos de estimativa e compensação estatística já utilizados. Estes métodos estatísticos lidam indistintamente com variações em amplitude devidas aos efeitos do arranjo, complexidades na geologia local, etc. Com o conhecimento de uma função de ganho para se recuperarem as perdas (ou

ganhos) devidas ao efeito do arranjo, este efeito pode ser tratado de modo determinístico, assim como o espalhamento geométrico e a perda seletiva de energia por absorção.

4 - CONCLUSÃO

Sob certas circunstâncias, os arranjos de fonte e receptores podem ser modelados no domínio do tempo por funções discretas, para posterior estudo e planejamento do ganho seletivo que estes introduzem nos dados reais. A utilização de funções interpolantes define uma região no espectro de frequência na qual o método é mais confiável. Em particular, para o caso de interpolação linear, o limite é da ordem de 1/3 da frequência de Nyquist. Se os dados possuírem banda passante dentro do limite imposto pela função interpolante, então, a análise do espectro de frequência do arranjo também será representativa.

Para alguns tipos de arranjo, é possível definir uma assinatura de referência que variará com o tempo e afastamento entre fonte e receptor apenas na energia total. Este estudo pode ser aplicado ao desenho de uma função de ganho para remover esta distorção no caráter das reflexões. Isto permite reduzir o número de variáveis a serem estudadas por métodos estatísticos hoje utilizados, dando maior confiabilidade em processos sofisticados, tais como inversão e AVO. Este tipo de processo foi utilizado de modo implícito em Oliveira (1990), em inversão acústica de dados sísmicos. Em processos envolvendo AVO ainda não foi suficientemente testado.

O estudo do efeito do arranjo, ainda para a maior parte dos tipos de arranjo, permite obter uma boa representação de uma assinatura média associada a cada canhão e à resposta instrumental. Esta assinatura média pode ser usada para prever a assinatura associada às reflexões, possibilitando a definição de filtros inversos para sua deconvolução dentro da banda passante presente nos dados.

Em qualquer hipótese, o próprio dimensionamento do arranjo pode ser adaptado a objetivos específicos de modo a tornar possível ou o cálculo de uma função de ganho apropriada ou o modelamento da assinatura realmente observada nas reflexões.

AGRADECIMENTOS

Aos colegas Fernando Malheiros Roxo da Motta e Joaquim Cleto de Souza pelo auxílio no tocante aos recursos computacionais disponíveis no DEPEX, aos colegas André Baptista Gélío e Marcos Antônio Gallotti Guimarães por discussões relevantes, e à Maria Aparecida Dutra pela solicitude no esclarecimento dos recursos do *script* também disponíveis no DEPEX. Gostaria de agradecer ainda aos colegas e amigos do Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica (PPPG) da Universidade Federal da Bahia pelo apoio e incentivo.

Este trabalho foi, em quase sua totalidade, realizado no PPPG, e financiado pela PETROBRÁS, pelo CNPq e pelo Finep.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- OLIVEIRA, A.S. *Inversão de dados sísmicos utilizando uma forma modificada da aproximação de Born*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1990. Tese de Doutorado.
- OLIVEIRA, A.S., FOKKEMA, J.T. Application of the modified RMS inversion technique on real CMP marine data including directivity effects. In: ANNUAL INTERNATIONAL MEETING OF THE SEG, 60 San Francisco, Cal, 1990. *Expanded Abstracts...* [S.l.: S.n.], 1991. p. 1165-1169.
- OLIVEIRA, A.S., FOKKEMA, J. T. Inversão de dados sísmicos utilizando uma forma modificada da aproximação de Born. In: SEMINÁRIO DE GEOFÍSICA DA PETROBRÁS, 4, Nova Friburgo, RJ, 1990. *Anais...* Rio de Janeiro: PETROBRÁS/DEPEX, 1990. 3 v. v. 1, p.7- 15. Publicação interna da DIGEF.
- OLIVEIRA, A.S., CAMPOS, R.J. Uma nova opção para a eliminação de fatores que degradam a resolução sísmica. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 2, Salvador, 1991. *Resumos Expandidos...* Salvador: Sociedade Brasileiro de Geofísica, 1991. v. 2, p. 874-883.
- DRAGOSSET, B. A Comprehensive method for evaluating the design of airguns arrays. *The Leading Edge*, Tulsa, v. 3, n. 10, p. 52-61, 1984.
- FRICKE, J.R., DAVIS, J.M., REED, D.H. A standard quantitative calibration procedure marine seismic sources. *Geophysics...*, Tulsa, v. 50, n. 10, p. 1525-1532, 1985.
- GILES, B.F., JOHNSTON, R.C. System approach to airgun array design. *Geophysical Prospecting*, Oxford, v. 21, n. 1, p. 77-101, 1973.
- GUIMARÃES, M. A. G. Avaliação dos arranjos de airguns como fonte sísmica marítima. *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*, Rio de Janeiro, v. 3, n. 3, p. 147-158, 1989.
- JOHNSTON, R. C. Performance of 2000 and 6000 PSI airguns: theory and experimenty. *Geophysical Prospecting*, Oxford, v. 28, p. 700-715, 1980.
- JOHNSTON, R. C. Development of more efficient airgun arrays: theory and experiment. *Geophysical Prospecting*, Oxford, v.30, n. 6, p. 752-773, 1982.
- JOHNSTON, R. C., REED, D.H. , DESLER, J. F. Special report of the SEG Technical Standards Commite. SEG Standards for Specifying Marine Seismic Energy Sources. *Geophysics*, Tulsa, v 53, p. 566-575, 1988.
- LYNN, W., LARNER, K. Effectiveness of wide marine seismic source arrays. In: ANNUAL MEETING OF THE EUROPEAN ASSOCIATION OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS, 45, Oslo, 1983. S.n.t.
- LOFTHOUSE, J.H., BENNET, G.T. Extended arrays for marine seismic acquisition. *Geophysics*, Tulsa, v. 43, n.1, p. 3-22, 1978.
- PARKES, G. E., HATTON, L., HAUGLAND, T. Directivity and other characteristics of a wide airgun array system. In: ANNUAL INTERNATIONAL MEETING OF THE SEG, 51, Los Angeles, 1981. *Expanded Abstracts...* [S.l.: S.n.], 1982. p. 105-111.

EXPANDED ABSTRACT

Source and receiver arrays are conceived so as to enhance the signal to noise ratio as well as to reduce or eliminate problems with spatial aliasing. The price is always distortion of the observed amplitude relations vis-à-vis those expected for point source and point receiver. This change in the reflections patterns must be accounted for in such special procedures as inversion and AVO. Under certain conditions or assumptions it is possible to devise a relatively simple method for eliminating the effect of the array on the data. In deepwater surveys, direct wave can be easily identified. By removing the effect of the array on this event, it is possible to obtain an average signature of a single element of the source array. This effect corresponds to the superposition of the individual elements of the source registered at each receiver of the receiver array. Here I have assumed that the contribution of sources and receivers can be mathematically described as Dirac delta functions of space compensated for the geometrical spreading times functions of time that account for the signatures themselves. Interpolating functions are used to adapt this continuous description to the discrete case. Although these functions may be general, the choice is

restricted by certain parameters, such as limited extension in time and causality. Data are always registered in a band limited away. Although sinc functions seem to better represent band-limited data, they lack the compactness necessary to satisfy causality and efficiency requirements. Linear interpolation seems to be more appropriate as it yields interpolating functions such as the triangle function defined in (7). Linear interpolation holds for frequencies up to 1/3 of the Nyquist frequency approximately. After choosing the interpolating function, it is easy to estimate the effects of the array for the direct (6) and the reflected (12) waves in a plane-stratified earth model. This estimation accounts for ghosts, and treats reflections as single scattering events. Stacking velocities are used to compute arrival times. In the direct wave case, each receiver records a signal that comes directly from the source and a signal that follows the path: source → surface → receiver. In the case of reflected waves, there are four different paths: source → reflector → receiver; source → surface → reflector → receiver; source → reflector → surface → receiver; and source → surface → reflector → surface → receiver. In practice, the problem becomes more complex because

each airgun-hydrophone pair contributes to the recorded data with a distinct signature, which is the result of a distinct wave form emitted by the airgun, convolved with the intrinsic impulse response of the receiver. To simplify the problem, the technique assumes a unique average signature, common to all airgun-hydrophone pairs. This assumption is expected to hold when variations in the characteristics of the individual elements are small and/or the number of elements is increased. Only signature variations due to scale factors, introduced to take into account the individual cubic capacity of each airgun, are considered. Following Ziolkowski et al. (1982) and Giles and Johnston (1973), measured amplitude is proportional to the cubic root of the cubic capacity of the airgun. However, a linear relationship was used with no significant change in the technique performance. In some cases, the array response for the direct wave is nearly free of zeros. It is then possible to obtain a very good estimate of the wave form or signature for an average airgun and, using the array response for reflections, for the reflections itself. The response of the array for reflections depends upon time, offset and average or stacking velocity. This raises an additional difficulty, since the signature for reflections is not unique. A study of this problem (de Oliveira 1990), however, shows that in some situations it is possible to define a reference signature for all data. To understand this, variations in the signature are divided into two classes: variations in form and in energy. Variations in form are caused essentially by high-frequency components of the amplitude spectrum of the array. These frequencies are quite often absent from the data or are filtered during processing. Variations in energy can be accounted for by a multiplicative factor introduced in the description of the effect of the array. Hence, the description of the effect of the array consists of the following steps: (1) a time and an offset are chosen to compute a function that represents effect of the reference array; (2) for any

other time and offset, the corresponding function is substituted by the reference function, multiplied by the square root of the ratio of the energy of the current function to the reference function (see 13 and fig. 11, 12 e 13). This kind of description emphasizes an important characteristic of arrays, namely, the distribution of all energy as a function of time and offset. This can be termed directivity of the source, although as actually used the term often does not take into account ghosts and is applied to direct waves only. For a plane stratified earth, with constant stacking velocity, this provides us with a map of the amplitude variations in a time-offset chart (see fig 13). From the study of array-induced amplitude variations across offsets and times, in the case of reflected waves, it is possible to design a gain function to compensate them. For conventional processing needs, this is not necessary since routine trace balance processes can acceptably accomplish the same end. But for special processings such as inversion and AVO, routine balance process distortions in the real character of the amplitudes are unacceptable. The effect of the array as well as other effects that are harder to handle are usually compensated by statistical methods. This estimate of the effect of the array provides a deterministic alternative for reducing the number of unknowns to be treated statistically. In order to obtain the reflected wave form for deconvolution purposes, some situations must be avoided. These are closely related to the number of zeros in the spectrum of the of the array. Zeros in the spectrum require the addition of some amount of white noise to stabilize the deconvolution of the direct array effect, somewhat inhibiting the deconvolution process itself. Although the mere analysis of amplitude variations across time and offset is always feasible, the deconvolution of the array effects requires a painstaking array design, so that the number of zeros in the direct wave array spectrum is minimum or null.