



Effective utilization of *a priori* information in waveform decomposition

Georgy Mitrofanov and Viatcheslav Priimenko (North Fluminense State University Darcy Ribeiro, Macaé, RJ, Brazil)

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12th 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 12th 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

We propose an effective algorithm of using *a priori* information in the problems of decomposition of seismic signals. The algorithm is realized in two steps. In the first stage there is defined a solution using pseudo *a priori* information, ensuring stability and uniqueness of the decomposition problem solution. In the second step we define a minimum quantity of available *a priori* information, which allows obtaining the exact solution of the corresponding problem. The latter is one of the principle moments for the waveform inversion using the real seismic signals.

Introdução

O tipo de informação *a priori*, usada na solução de problemas inversos da sismica, depende do conjunto de dados disponíveis após o processamento e interpretação dos dados sísmicos. Este é um momento importante na definição da informação *a priori*, pois a depender de tais dados será possível realizar investigações geofísicas adicionais. A utilização efetiva da informação *a priori* no processamento e interpretação de dados sísmicos não pode ser considerado um problema trivial. Usualmente, esta solução é construída a partir da experiência de trabalho da equipe com dados reais. Ao mesmo tempo, muitas vezes é possível analisar a questão, considerando as limitações do problema inverso original. Tal consideração promove um melhor entendimento das particularidades do problema sob análise, e permite construir efetivos procedimentos para utilização da informação *a priori* no processo da solução do problema inverso. Este procedimento aumenta a objetividade dos resultados e pode minimizar gastos com a obtenção da informação procurada. Como uma regra, tais investigações são baseadas na análise da estrutura do modelo, usado na solução do problema, e também, na análise das características do sistema de observações, usadas para obter os dados iniciais.

A correção estática temporal é um exemplo clássico de análise da efetividade de utilização da informação *a priori*, veja, por exemplo, (Taner *et al.*, 1974; Wiggins *et al.*, 1976). Investigações similares foram realizadas para o caso quando a estática depende da frequência, veja (Mitrofanov, 1988; Rachkovskaia & Mitrofanov, 1993). Estes problemas são similares aos problemas de decomposição da forma do sinal, que ocorre durante a estimativa dos parâmetros de objetos delgados, veja (Mitrofanov & Priimenko, 2010). Por isso,

este desenvolvimento está baseado nas idéias propostas para análise de questões relacionadas à utilização da informação *a priori*, buscando otimizar e simplificar a construção de um algoritmo para determinação das características espectrais de objetos em inversão da forma de onda.

Metodologia

Frequentemente a informação *a priori* pode ser representada como um sistema de equações lineares:

$$\mathbf{H} \boldsymbol{\theta}^{(m)} = \mathbf{c} \quad (1)$$

onde $\boldsymbol{\theta}^{(m)}$ é o vetor de parâmetros desconhecidos do modelo, \mathbf{H} é a matriz que define o sistema de equações algébricas lineares, \mathbf{c} é o vetor construído com base na informação *a priori*. Usualmente $\boldsymbol{\theta}^{(m)}$ considera o vetor dos parâmetros do modelo $\boldsymbol{\theta}$, apesar de ser possível utilizar outras representações, que garantam uma correspondência biunívoca entre os vetores $\boldsymbol{\theta}^{(m)}$ e $\boldsymbol{\theta}$. A seguir, na construção dos algoritmos, vamos considerar uma representação comum para os vetores $\boldsymbol{\theta}^{(m)}$.

É desejável ter a informação *a priori* completa, que possibilite a obtenção de valores simples dos parâmetros do modelo. Formalmente, isso significa que a informação *a priori* deve garantir a unicidade da solução do seguinte sistema em comum:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} \boldsymbol{\theta}^{(m)} &= \mathbf{y} \\ \mathbf{H} \boldsymbol{\theta}^{(m)} &= \mathbf{c} \end{aligned} \quad (2)$$

onde a primeira equação corresponde ao problema inicial com operador \mathbf{A} e vetor \mathbf{y} , construído com base nos dados iniciais.

Quando o modelo inicial pode ser representado na forma linear, i.e., o operador \mathbf{A} pode ser representado na forma de uma matriz, a condição de completude é de fácil formulação. Isto é feito com base na definição de vetores da matriz \mathbf{A} de variedade nula usando o sistema (1). Muitas vezes o modelo de decomposição da forma do sinal, utilizado na solução do problema inverso, pode ser representado na forma linear, veja (Mitrofanov & Priimenko, 2010). Por isso, podemos considerar os processos para seleção e utilização da informação *a priori* quando a primeira equação no sistema (2) é um sistema de equações lineares. Abaixo indicamos os três modos mais difundidos para solução de problemas correspondentes.

(1). Solução sequencial do sistema (2): resolver inicialmente a segunda equação matricial, achando uma parte do vetor $\boldsymbol{\theta}^{(m)}$. Depois substituindo estes valores na primeira equação matricial, definimos o resto dos parâmetros do modelo.

(2). Com base no processo iterativo, constrói-se uma solução $\theta_*^{(m)}$ usando a primeira equação matricial do sistema (2), veja, por exemplo, (Wiggins *et al.*, 1976), que coincida com a solução verdadeira do problema $\theta^{(m)}$ com a precisão até os vetores de variedade nula da matriz \mathbf{A} . Em seguida, resolvendo o sistema

$$\mathbf{H}(\theta^{(m)} - \theta_*^{(m)}) = \mathbf{c} - \mathbf{H}\theta_*^{(m)} \quad (3)$$

É possível achar os valores do vetor de diferenças $\Delta\theta^{(m)} = \theta^{(m)} - \theta_*^{(m)} \in \ker \mathbf{A}$, onde $\ker \mathbf{A}$ é a variedade nula da matriz \mathbf{A} . A seguir, definimos a solução do problema $\theta^{(m)}$.

(3). Utilização de multiplicadores de Lagrange nas condições (1), para minimizar o funcional objetivo do problema inverso original. Neste caso, veja (Golub & Loan, 1996), temos o seguinte sistema de equações matriciais:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^T \mathbf{A} \theta^{(m)} + \mathbf{H}^T \lambda &= \mathbf{A}^T \mathbf{y} \\ \mathbf{H} \theta^{(m)} &= \mathbf{c} \end{aligned} \quad (4)$$

onde λ é o vetor de multiplicadores de Lagrange, o símbolo T significa a transposição de matriz. Quando a informação *a priori* está completa, a matriz expandida do sistema (4) não é degenerativa. Por isso, pode ser construída a seguinte matriz inversa:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{A} & \mathbf{H}^T \\ \mathbf{H} & \mathbf{0} \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}^{(1)} & \mathbf{A}^{(2)} \\ \mathbf{A}^{(3)} & \mathbf{A}^{(4)} \end{pmatrix} \quad (5)$$

que define a solução do sistema (4) da seguinte forma $\theta_*^{(m)} = \mathbf{A}^{(1)} \mathbf{A}^T \bar{\mathbf{y}} + \mathbf{A}^{(2)} \mathbf{c}$. Nesta situação é simples mostrar que esta solução coincide com a solução do problema inicial até a precisão dos vetores da variedade nula da matriz \mathbf{A} .

(4). Na construção do sistema das equações lineares do modelo inicial para os vetores $\theta^{(m)}$ usamos uma decomposição do vetor por uma base $\{f_r\}$.

Através da escolha das funções f_r é possível diminuir ao máximo a variedade nula da matriz \mathbf{A} . Isto acontece pela exclusão dos componentes, que não pertencem ao conjunto correspondente de funções.

Através da análise dos métodos é possível formular as condições básicas para escolha de algoritmos efetivos de utilização da informação *a priori*.

1. Efetividade tecnológica. Deve ser garantida uma reorganização efetiva da solução do problema original, no caso de modificação ou aditamento da informação *a priori*;
2. Procedimentos efetivos. Algoritmos devem ser velozes e estáveis em relação a todo procedimento de definição dos parâmetros do modelo;
3. Uso efetivo da informação. Algoritmos devem contribuir para minimização da quantidade de dados *a priori*, que garantem a unicidade da

solução do problema com nível de precisão estipulado *a priori*.

A seguir apresentamos um algoritmo, que pode satisfazer as exigências indicadas. Este algoritmo se baseia no conceito da informação pseudo *a priori*, formulado em (Mitrofanov, 1988).

Algoritmo efetivo de utilização da informação *a priori*

O esquema geral está baseado em duas etapas de formação e utilização da informação *a priori*. Na primeira etapa, garante a unicidade e estabilidade das soluções obtidas, e na segunda etapa – correção destas soluções usando um volume mínimo de informação *a priori*, obtida em experimentos reais. Esta última permite, basicamente, minimizar os gastos para execução de investigações adicionais, necessárias à obtenção de dados correspondentes. Além disso, o procedimento proposto permite elevar a confiabilidade dos parâmetros estimados, sem possuir os defeitos de introdução da informação *a priori*, indicados anteriormente. Os métodos existentes para construção da matriz inversa, aliados aos atuais recursos computacionais, conferem elevado desempenho ao algoritmo, minimizando, assim, as grandes dificuldades da primeira etapa do procedimento. Em ambas as etapas, a análise da estrutura de vetores de variedade nula assume um papel primordial.

Na primeira etapa, utilizando a estrutura da variedade nula da matriz \mathbf{A} para o sistema original, construímos um sistema de equações similar ao (1):

$$\mathbf{H}_* \theta^{(m)} = \mathbf{c} \quad (6)$$

Que corresponde à uma informação pseudo *a priori*. Neste caso, é necessário que a matriz \mathbf{H}_* garanta uma boa condicionalidade da matriz do sistema estendido (2). É importante que a informação *a priori* possa ser formulada de forma absolutamente independente das particularidades do experimento geofísico real. Depois disto, é possível construir a matriz inversa

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{A} & \mathbf{H}_*^T \\ \mathbf{H}_* & \mathbf{0} \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_*^{(1)} & \mathbf{A}_*^{(2)} \\ \mathbf{A}_*^{(3)} & \mathbf{A}_*^{(4)} \end{pmatrix} \quad (7)$$

de forma análoga ao método de Lagrange de multiplicadores indeterminados. Isto permite determinar a solução do problema original com $\mathbf{c} = \mathbf{0}$ na seguinte forma:

Depois disto, é possível construir a matriz inversa (7), de forma análoga ao método de Lagrange de multiplicadores indeterminados. Isto permite determinar a solução do problema original na seguinte forma:

$$\theta_*^{(m)} = \mathbf{A}_*^{(1)} \mathbf{A}^T \mathbf{y} \quad (8)$$

Na ausência da informação *a priori*, a solução construída $\theta_*^{(m)}$ pode ser considerada como definitiva. Esta solução pode ser utilizada para diferentes objetivos, mas é necessário considerar que os componentes multivalorados dos parâmetros foram definidos ou fixados com base em uma informação pseudo *a priori*, estimadas através de algumas considerações heurísticas.

Na segunda etapa do procedimento usamos a informação *a priori* disponível. Começamos pela busca

do vetor de erros $\Delta\boldsymbol{\theta}^{(m)} = \boldsymbol{\theta}^{(m)} - \boldsymbol{\theta}_*^{(m)}$ resolvendo o sistema (3), onde, assim como o vetor $\boldsymbol{\theta}^{(m)}$, consideramos os valores dos parâmetros obtidos, com base na informação pseudo *a priori*. Através de métodos modernos é possível construir uma solução para o sistema de equações lineares com matriz retangular a partir de qualquer volume de dados *a priori*. Então, os valores do vetor $\Delta\boldsymbol{\theta}^{(m)} \in \ker \mathbf{A}$ são definidos na forma única, e nos podemos achar os valores exatos do parâmetro do modelo como $\boldsymbol{\theta}^{(m)} = \Delta\boldsymbol{\theta}^{(m)} + \boldsymbol{\theta}_*^{(m)}$.

Se no processamento de dados reais a estrutura da matriz inicial é preservada, por exemplo, no caso de esquemas ordinários de observação, ou no caso da análise de frequências, é possível preparar antecipadamente as matrizes $\mathbf{A}_*^{(1)}$. Isto eleva drasticamente a velocidade do todo procedimento e confere vantagem ao método proposto. Ao mesmo tempo, ocorre a simplificação da análise de propriedades estatísticas das estimativas obtidas, porque as propriedades do vetor $\boldsymbol{\theta}_*^{(m)}$ foram bem estudadas em vários artigos sobre estatística. No nosso caso será necessário considerar somente a modificação destas propriedades, por conta da informação *a priori*, i.e., do vetor \mathbf{c} .

O esquema cria uma boa base algorítmica para desenvolvimento de um programa que garante a definição e utilização efetiva da informação *a priori*, no problema de decomposição da forma do sinal. Neste caminho atingimos várias metas, e indicamos duas, que por nossa opinião são mais importantes:

1. A estabilidade numérica das soluções é completamente definida pelas propriedades das matrizes dos sistemas de equações lineares expandidas, análogas ao sistema (4);
2. O uso da informação *a priori* disponível não altera o nível de estabilidade da solução obtida. A precisão da solução final corresponderá, completamente, à precisão dos dados *a priori*.

Além disso, as propriedades da solução final do problema são definidas através do seguinte sistema:

$$\begin{aligned}\tilde{\boldsymbol{\theta}}^{(m)} &= \boldsymbol{\theta}_*^{(m)} + \Delta\boldsymbol{\theta}^{(m)} \\ \boldsymbol{\theta}_*^{(m)} &= \mathbf{A}_*^{(m)} \mathbf{A}^T \mathbf{y} \\ \mathbf{H}\Delta\boldsymbol{\theta}^{(m)} &= \mathbf{c} - \mathbf{H}\boldsymbol{\theta}_*^{(m)}\end{aligned}\quad (9)$$

onde \mathbf{H} e $\bar{\mathbf{c}}$ são a matriz e o vetor que caracterizam a informação *a priori*. A segunda equação do sistema (9) pode ser transformada em:

$$\boldsymbol{\theta}_*^{(m)} = \boldsymbol{\theta}^{(m)} - \mathbf{A}_*^{(2)} \mathbf{H}_* \boldsymbol{\theta}^{(m)} + \mathbf{A}_*^{(1)} \mathbf{A}^T \boldsymbol{\varepsilon} \quad (10)$$

considerando que $\mathbf{A}^T \mathbf{y} = \mathbf{A}^T \mathbf{A} \boldsymbol{\theta}^{(m)} + \mathbf{A}^T \boldsymbol{\varepsilon}$ e $\mathbf{A}_*^{(1)} \mathbf{A}^T \mathbf{A} = \mathbf{I} - \mathbf{A}_*^{(2)} \mathbf{H}_*$. Os vetores $\boldsymbol{\theta}^{(m)}$ e $\boldsymbol{\varepsilon}$ representam a solução verdadeira do problema e um

ruído aditivo do modelo inicial, correspondente; a matriz $\mathbf{A}_*^{(2)}$ é definida pela Eq.(7) e \mathbf{I} é a matriz de unicidade.

As Eqs.(9)-(10) possibilitam a consideração de todas as particularidades da solução. Em particular, a análise destes sistemas permite indicar as seguintes características básicas, que podem influenciar na qualidade das estimativas, obtidas usando o algoritmo proposto em problemas de decomposição da forma de sinal.

1. Propriedades de ruído $\boldsymbol{\varepsilon}$ podem deslocar as estimativas $\tilde{\boldsymbol{\theta}}^{(m)}$, no caso de esperança matemática diferente de zero. Além disso, a dispersão destas estimativas pode depender, essencialmente, da relação sinal/ruído dos traços iniciais. Isto porque a dispersão $\boldsymbol{\varepsilon}$ é definida por esta relação;

2. Completude e precisão de dados *a priori*, também podem influir no deslocamento de estimativas. Isso é consequência da fórmula da esperança matemática das estimativas $\tilde{\boldsymbol{\theta}}^{(m)}$, que de acordo com (10) tem a seguinte forma:

$$\mathbf{M} \left\{ \boldsymbol{\theta}_*^{(m)} \right\} = \boldsymbol{\theta}^{(m)} - \mathbf{A}_*^{(2)} \mathbf{H}_* \boldsymbol{\theta}^{(m)} + \mathbf{A}_*^{(1)} \mathbf{A}^T \mathbf{M} \left\{ \boldsymbol{\varepsilon} \right\}$$

Por isso, mesmo se a esperança matemática do ruído $\mathbf{M} \left\{ \boldsymbol{\varepsilon} \right\}$ for igual ao zero, na esperança matemática

$\mathbf{M} \left\{ \boldsymbol{\theta}_*^{(m)} \right\}$ estará presente o componente $\mathbf{A}_*^{(2)} \mathbf{H}_* \boldsymbol{\theta}^{(m)}$, que será igual ao zero somente quando

a informação pseudo *a priori* corresponda à estrutura dos parâmetros, ou quando os dados *a priori* são completos e o deslocamento em valores do vetor \mathbf{c} estiver ausente.

3. Forma do modelo inicial, que define a estrutura de matrizes $\mathbf{A}^T, \mathbf{A}_*^{(1)}$, volume de informação *a priori* necessária e a relação sinal/ruído, pode ser um fator determinante para todo processo de definição dos parâmetros. Selecionando um modelo complexo multifatorial, é possível melhorar a razão sinal/ruído, mas, neste caso, será necessário um volume maior da informação *a priori*. Por conta dos componentes regulares, que não foram considerados no modelo, a simplificação do modelo pode provocar decréscimo da razão sinal/ruído e piorar a qualidade de estimativas $\tilde{\boldsymbol{\theta}}^{(m)}$.

Exemplo

Como exemplo de utilização efetiva da informação *a priori*, no problema de decomposição da forma do sinal, considere o seguinte experimento. Este exemplo é baseado no modelo de intervalo de traço, $y_{ij}(t)$, contendo o sinal refletido do horizonte alvo (Mitrofanov & Priimenko, 2010)

$$y_{ij}(t) = s_i(t) * r_j(t) * G_{i+j}(t) * L_{i-j}(t) + \zeta_{ij}(t) \quad (11)$$

onde s_i, r_j são as características impulsivas de fonte e receptor, $G_{i+j}(t)$ é o impulso de incidência normal sobre a zona de reflexão do horizonte-alvo, a função $L_{i-j}(t)$ caracteriza mudanças na forma do sinal associadas com a distância fonte-receptor, $\zeta_{ij}(t)$ é o ruído. Aqui i, j são as coordenadas de fonte e receptor correspondentes. A Fig.1(a) mostra o esquema do experimento. Este modelo pode ser considerado a versão mais simples de um reservatório brasileiro, situado numa área de acunhamento do horizonte alvo, quando o meio superior é homogêneo. Os sismogramas sintéticos foram calculados considerando as limitações do modelo proposto e baseado no método de otimização, veja (Mitrofanov *et al.*, 2009). A geometria de aquisição do sistema de observações multicanal contou com 19 fontes e 13 receptores para cada fonte. A figura ilustra a geometria de aquisição e distribuição de receptores, correspondentes à primeira fonte. O intervalo entre receptor-fonte foi de 25 m. No caso mais simples, quando as condições de excitação e recepção são ideais, i.e., as condições de recepção são constantes em todas as fontes, foi utilizada a forma do sinal $s(t)$. Note na Fig.1(b) que o sinal observado, refletido do horizonte alvo, apresenta variações na forma, ligadas somente com as particularidades da estrutura do horizonte alvo.

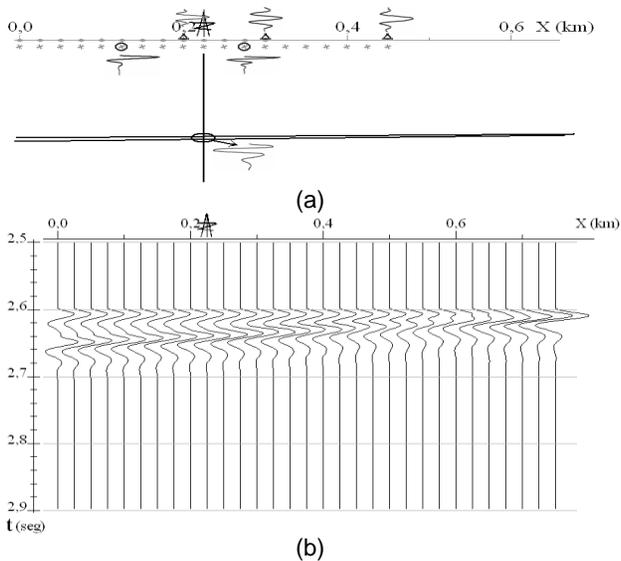


Fig.1. Exemplo da utilização da informação *a priori* no problema de decomposição da forma do sinal: (a) - esquema do experimento, (b) - parte da seção sísmica com sinal refletido do horizonte alvo.

No entanto, se existem variações nas características das fontes e receptores, as mudanças na forma do sinal podem torna-se excessivamente complexas. Para simular esta situação no cálculo dos sismogramas, foi definido um impulso $s_i(t)$ para cada fonte, onde i é o número da fonte utilizada. A Fig.1(a) exemplifica dois impulsos ($i = 6, 12$). Além disso, nesta

simulação considerou-se que, em alguns receptores podem ocorrer variações nas características temporais e espectrais, representada por $r_j(t)$, para as áreas do modelo (11). Na Fig.1(a) são apresentados exemplos de três zonas, considerando tais características: 9, 13 e 19. Neste caso, na Fig.2 as mudanças na forma do sinal refletido obtidas são visíveis com clareza. Por comparação dos traços correspondentes, veja Figs.1(b) e 2, mostra como essas alterações podem ser significativas. Obviamente, tais traços irão desempenhar um papel significativo na solução de problemas inversos e na interpretação dos resultados de processamento.

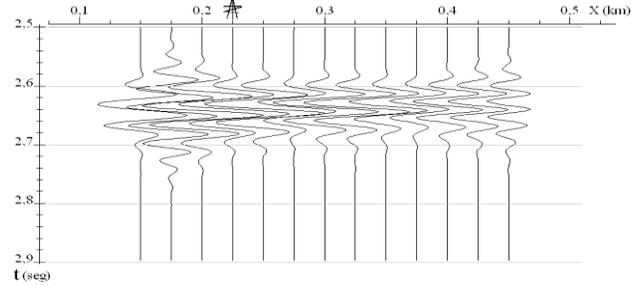


Fig.2. Traços sintéticos com as reflexões do horizonte alvo, correspondentes à distância fonte-receptor zero para parte da seção onde foi feita a correção da forma de sinal.

Os exemplos das características temporais, correspondentes às áreas de fontes e receptores, veja Fig.1(a), foram consideradas neste experimento como uma informação *a priori*. Como parte do experimento, um poço foi posicionado em 225 m, permitindo, assim, definir a função $G_{i+j}(t)$.

A simplicidade do modelo original do meio possibilitou apresentar as características de reflexão do horizonte alvo na forma $G_{i+j}(t) * L_{i-j}(t)$. Assim, o modelo (11) pode ser usado na decomposição da forma do sinal e para abordar questões sobre a utilização efetiva de uma informação *a priori*. Observe que para modelos mais complexos, também é necessário usar uma representação mais complexa, veja (Mitrofanov & Priimenko, 2010). Isto pode afetar a quantidade e tipo de informações *a priori* a ser usada.

Apos ter tomado o logaritmo das características espectrais do modelo (11) temos a seguinte representação linear:

$$z_{ij} = \alpha_i + \beta_j + \gamma_{i+j} + \lambda_{i-j} + \varepsilon_{ij} \quad (12)$$

onde z_{ij} são os logaritmos dos espectros de sinais refletidas, $\alpha_i, \beta_j, \gamma_{i+j}, \lambda_{i-j}, \varepsilon_{ij}$ são os logaritmos das características espectrais $s_i(\omega), r_j(\omega), G_{i+j}(\omega), L_{i-j}(\omega)$ e do ruído $\zeta_{ij}(\omega)$ para uma frequência fixa. A última representação em conjunto com a estrutura do sistema de observações define a matriz inicial \mathbf{A} e suas propriedades. Não é complicado mostrar que a matriz \mathbf{A}

é preenchida somente por 0 e 1, indicando a presença ou ausência de um fator dado em observação fixa.

A representação linear (12) do modelo (11) permite aproveitar o algoritmo proposto da utilização efetiva de informação *a priori*.

Durante a decomposição da forma de onda, para avaliar as características G_{i+j} e L_{i-j} , em cada frequência foi utilizado o resultado da inversão da matriz expandida (7), que determina as mudanças na forma do sinal associadas com o horizonte-alvo. Ao mesmo tempo, como informação pseudo *a priori* utilizam-se as condições, que permitem fixar os elementos parabólicos e obter uma solução na seguinte forma (8).

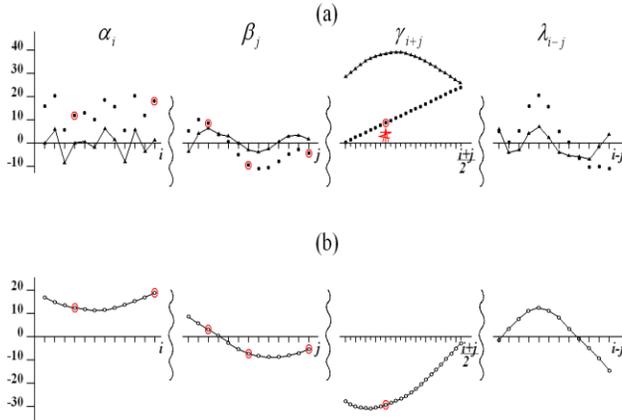


Fig. 3. Determinação dos parâmetros do modelo fatorial de decomposição da forma do sinal: (a) – valores obtidos com base na informação pseudo *a priori* (valores exatos são apresentados por pontos, e os estimados são ligados por linhas); (b) – diferenças entre valores exatos e estimados.

A Fig.3(a) mostra o vetor da solução $\Theta^{(m)}$ obtido para a frequência de 20 Hz. Para entender melhor a estrutura da solução e suas diferenças, em relação aos valores verdadeiros, no vetor são marcadas (na cor vermelha) as partes correspondentes a fatores diversos do modelo (12). Também, na Fig.3(b) são mostradas as diferenças que surgem entre as estimativas obtidas, construídos utilizando a informação pseudo *a priori*, e os verdadeiros valores dos parâmetros. Como esperado, esta diferença é descrita pelos componentes parabólicas.

Portanto, para uma simples definição do vetor $\Delta\Theta^{(m)}$, em função de cada um dos parâmetros do modelo, é necessário o conhecimento dos valores deste parâmetro em pelo menos três pontos do sistema de observações. Então, com base nestas considerações formais, é necessário ter adicionalmente 12 características espectrais, correspondentes aos fatores $\alpha_i, \beta_j, \gamma_{i+j}, \lambda_{i-j}$. Entretanto, o número de equações necessárias para a definição destes parâmetros pode ser reduzido até seis. Isso está baseado no fato que os vetores correspondentes pertencem à variedade nula da matriz \mathbf{A} . Neste caso, as características espectrais podem corresponder somente a um dos três fatores indicados, da seguinte forma: três correspondem a um dos fatores, duas – ao outro e uma - ao terceiro. Por isso

podemos utilizar, como foi dito anteriormente, três características impulsivas de áreas de recepção, duas características impulsivas das áreas de fonte, e, também, uma característica impulsiva da zona de reflexão, em relação à coordenada do poço.

A Fig.3(a) mostra o resultado de um dos experimentos executados para estimativa dos parâmetros do modelo (12), na frequência 20 Hz. Neste caso, foi assumido que no experimento real as características do impulso para duas áreas de fontes, i.e., as funções $s_i(\omega)$, foram definidas de forma exata em dois pontos do perfil; e, também, são conhecidas as três características de impulso para três áreas de receptores, i.e., as funções $r_j(\omega)$ são conhecidas em três pontos do perfil. Além disso, com base nos dados de poço foi possível conhecer a característica espectral do horizonte de reflexão no ponto do perfil, i.e., a função $G_{i+j}(\omega)$ foi definida neste ponto. As características indicadas permitiram determinar os valores correspondentes de fatores para a frequência de 20 Hz: $\alpha_4 = 12$; $\alpha_{12} = 18$; $\beta_3 = 8$; $\beta_7 = -10$; $\beta_{13} = -4$; $\gamma_9 = 8$ marcados com a cor vermelha na Fig.3(a). A seguir, usando os valores dos fatores, fica fácil determinar os valores do vetor de diferenças $\Delta\Theta^{(m)}$, em pontos correspondentes ao perfil, veja Fig.3(b). Isto permite definir o componente parabólico (multivalorado) do fator do receptor, i.e., o coeficiente β_j . Os coeficientes polinomiais, definidos na etapa anterior, e a filiação dos vetores correspondentes à variedade nula da matriz \mathbf{A} , garantem a definição do componente do fator da fonte, i.e., o coeficiente α_i . A utilização de dois valores da diferença, para este fator, junto com o coeficiente α_i permite definir completamente o componente desconhecido do fator da fonte. Continuando este processo, calculamos todos os componentes do vetor $\Delta\Theta^{(m)}$, que determina os valores exatos do vetor completo dos parâmetros do modelo (12).

É interessante usar a solução construída para a interpretação posterior ou para a solução do problema de inversão da forma de sinal. Para isso, podem ser utilizadas as estimativas dos fatores $\gamma_{i+j}, \lambda_{i-j}$. Com base na potenciação e transição para o domínio temporal, podem ser obtidas tanto a característica impulsiva $G_{i+j}(t)$, que determina a resposta do objeto alvo para a geometria de zero offset, como uma característica de reflexão completa $G_{i+j}(t) * L_{i-j}(t)$.

A Fig.4 mostra os traços sintéticos, correspondentes a uma parte da seção temporal mostrada na Fig.1. Estes traços foram obtidos com base nas estimativas dos parâmetros α_i, γ_{i+j} , usando a informação pseudo *a priori*. As estimativas indicadas permitem calcular os componentes do sinal

$s(t) * G_{i+j}(t)$, que representam o sinal refletido do horizonte alvo no caso da onda de incidência normal. Pode ser visto que a decomposição da forma do sinal e a eliminação das variações relacionadas às mudanças nas condições de excitação e recepção melhoraram essencialmente a forma do sinal em comparação com os traços originais da Fig.2. Mas, através de uma comparação com os traços, correspondentes à verdadeira característica de reflexão do horizonte alvo, mostrada na Fig.1(b), fica evidente uma diferença significativa. Observa-se a diminuição da frequência no sinal refletido e uma diferença na forma do sinal, em comparação com a forma original, veja Fig.4. Além disso, de acordo com esta figura, a região de acunhamento foi recuperada com maior precisão, mais próximo ao ponto de posição de poço. Obviamente, esses fatores desempenham um papel significativo tanto no problema inverso da forma do sinal como na interpretação dos resultados do processamento.

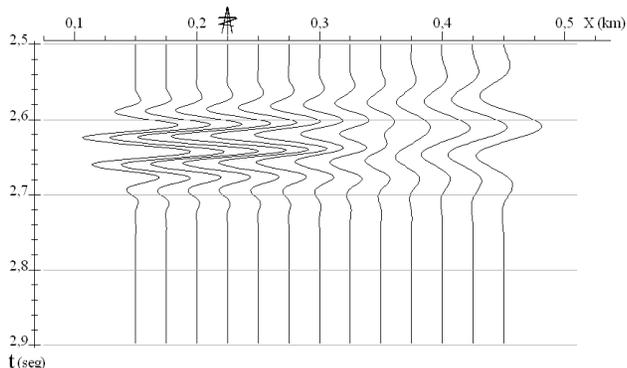


Fig.4. Traços sintéticos com as reflexões do horizonte alvo, obtidos depois da decomposição da forma do sinal, mas sem informação *a priori*.

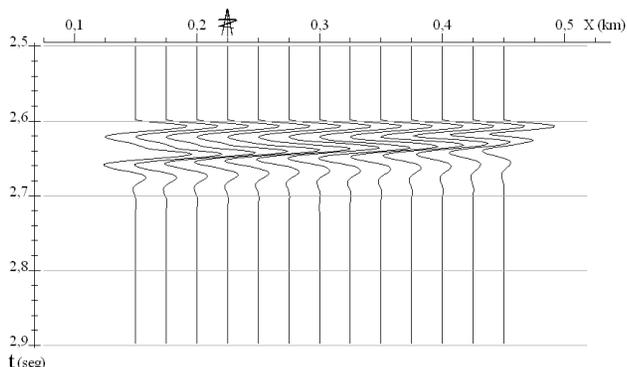


Fig.5. Traços sintéticos com as reflexões do horizonte alvo, obtidos depois da decomposição da forma do sinal levando em conta informação *a priori*.

Ao mesmo tempo, a construção destes mesmos sinais, através das estimativas dos parâmetros α_i , β_j , γ_{i+j} , λ_{i-j} , obtidos com base no algoritmo proposto (que garante a utilização efetiva da informação *a priori* disponível), permite determinar a característica de reflexão do horizonte-alvo, que praticamente coincide com a verdadeira (veja Fig.5).

Conclusões

A utilização da informação *a priori* na inversão sísmica dinâmica é um problema complexo. O grau de complexidade deste problema é maior que o similar ocorrido na inversão cinemática. No problema dinâmico, surgiram questões difíceis relacionadas à definição e a utilização efetiva da informação correspondente. No procedimento orientado para o tempo de chegada das ondas, em particular, a correção estática, esta informação pode ser obtida com base nos levantamentos de velocidades em poço, ou correlacionando as profundidades com os dados de poço. Pois, em problemas inversos dinâmicos da sísmica a questão de execução de tarefas adicionais, que acompanham o levantamento sísmico, ainda está em aberto. Neste trabalho, estas questões foram discutidas sob o ponto de vista da decomposição da forma do sinal, que é uma chave para a utilização prática de vários algoritmos da inversão. Se compararmos este problema com o problema inverso cinemático podemos afirmar que a solução não é menos importante que a solução do problema de correção estática.

O algoritmo, proposto para seleção e utilização da informação *a priori*, permite fixar os componentes multivalorados das características espectrais do dado. O fluxo do algoritmo é dividido em duas etapas. Na primeira, com base na análise da estrutura de variedade nula e usando uma informação pseudo *a priori*, é possível fixar os componentes multivalorados. Na segunda etapa é usada a informação *a priori*, e por isto permite definir os valores verdadeiros dos componentes multivalorados.

Agradecimentos

Os autores agradecem à PETROBRAS S.A. pelo apoio dado para a execução deste trabalho.

Referências

1. Golub, G. & C. Van Loan, 1996. Matrix Computations, (third edition), The Johns Hopkins University Press, London, 310pp.
2. Mitrofanov, G.M., 1988. Pseudo-apriori information in the frequency-dependent static problem. In: Mathematical problems of seismic data interpretation. Nauka, Novosibirsk, pp. 21-33.
3. Mitrofanov, G.M. & N.A. Rachkovskaia, 1993. Studying of 'null space' structure in problems of seismic decomposition. In: EAEG 55th Meeting, 1993, Stavanger. Extended Abstracts of Papers, 4pp.
4. Mitrofanov, G.M., V.I. Priimenko, R.M. Misságia & L.H. Amaral, 2009. Utilização das transformadas de Laplace e Fourier-Bessel na modelagem de meios elásticos delgados. Revista Brasileira de Geofísica, 27(2): pp. 205-224.
5. Mitrofanov, G.M. & V.I. Priimenko, 2010. Structural decomposition of the wave field in the solution of inverse seismic problems. Revista Brasileira de Geofísica, 28(4): pp.657-671.
6. Taner, M.T., F. Koehler & K.A. Alhilali, 1974. Estimation and correction of near-surface time anomalies. Geophysics, 39: pp. 441-463.
7. Wiggins, R.A., K.L. Larner & R.D. Wisecup, 1976. Residual statics analysis as a general linear inverse problem. Geophysics, 41: pp. 922-938.