

UTILIZAÇÃO EFETIVA DA INFORMAÇÃO *A PRIORI* NA INVERSÃO DA FORMA DE SINAL SÍSMICO

Georgy Mitrofanov¹, Viatcheslav Priimenko² e Roseane Misságia³

Recebido em 22 dezembro, 2010 / Aceito em 22 junho, 2011
Received on December 22, 2010 / Accepted on June 22, 2011

ABSTRACT. There is considered a general approach to using *a priori* information in the problems of decomposition of seismic signals, which are essential in the solution of the inverse seismic problems. We propose an effective algorithm, which substantially allowed to reduce the volume of *a priori* information needed in the real data processing, and during the preparation of data for the solution of inverse dynamic seismic problems. The algorithm is based on the analysis of multivalued components, which determine the volume and structure of *a priori* information needed to solve the decomposition problem. The algorithm is realized in two steps. In the first stage we define the solution using pseudo *a priori* information, ensuring stability and uniqueness of the solution. In the second step we define a minimum quantity of available *a priori* information, which allows to obtain the exact solution of the problem.

Keywords: processing and interpretation of seismic data, signal decomposition, *a priori* information, inverse seismic problem.

RESUMO. Neste artigo considera-se uma abordagem geral sobre a utilização da informação *a priori* na decomposição do sinal sísmico observado, essencial à solução de problemas inversos da sísmica. Através disto é possível propor um algoritmo efetivo, com potencial para reduzir consideravelmente o volume da informação *a priori*, necessária durante a preparação dos dados para a solução do problema de inversão da forma do sinal, e, também, no processamento de dados reais. O algoritmo está baseado na análise de componentes multivalorados e permite determinar a quantidade e estrutura da informação *a priori*, necessária para a solução do problema de decomposição. O algoritmo é realizado em duas etapas. Na primeira, através da construção da solução do problema e utilizando uma informação pseudo *a priori*, é garantida a unicidade e estabilidade da solução. Na segunda etapa, determina-se a quantidade mínima de informação disponível *a priori* permitindo, assim, obter a solução verdadeira do problema.

Palavras-chave: processamento e interpretação de dados sísmicos, decomposição do sinal, informação *a priori*, problema inverso sísmico.

¹Instituto de Geologia e Geofísica, Divisão Siberiana da Academia das Ciências Russa, pr. Koptyuga, 4, Akademgorodok, 630090, Novosibirsk, Rússia. Tel.: (73832) 333909 – E-mail: george@uiggm.nsc.ru

²Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rod. Amaral Peixoto, Km 163, Av. Brennand, s/n, Imboassica, 27925-535 Macaé, RJ, Brasil. Tel.: (22) 2765-6562; Fax: (22) 2765-6577 – E-mails: slava@lenep.uenf.br; slava211054@gmail.com

³Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rod. Amaral Peixoto, Km 163, Av. Brennand, s/n, Imboassica, 27925-535 Macaé, RJ, Brasil. Tel.: (22) 2765-6562; Fax: (22) 2765-6577 – E-mails: rose@lenep.uenf.br; rose.uenf@gmail.com

INTRODUÇÃO

A utilização efetiva de informação *a priori* no processamento e interpretação de dados sísmicos não deve ser considerada como um problema trivial. Usualmente, a solução é construída a partir da experiência de trabalho da equipe com dados reais. Em caso de problemas inversos da sísmica muitas vezes é possível analisar a questão, considerando as limitações do problema. 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 utilizado, e também, na análise das características do sistema de observações, usadas para obter os dados iniciais.

Um dos exemplos clássicos, onde a investigação do uso efetivo da informação *a priori* pode assumir um caráter formal, é o problema de definição precisa das correções estáticas temporais, veja, por exemplo, Wiggins et al. (1976) e Stein et al. (2009). Investigações similares foram realizadas para o caso quando a estática depende da frequência, veja Mitrofanov (1988) e Mitrofanov & Rachkovskaia (1993, 1996). Tais investigações, também devem ser consideradas nas etapas de correção de amplitude e forma do sinal, realizadas durante o processamento de dados sísmicos multicomponentes, veja, por exemplo, Van Vossen et al. (2006) e Van Vossen & Trampert (2007). Estes problemas são parecidos com decomposição estrutural do campo de onda, que ocorre em problemas inversos sísmicos de definição dos parâmetros de objetos delgados, veja Mitrofanov & Priimenko (2010). Por isso, as ideias propostas nestes trabalhos, serão utilizadas para a construção de um algoritmo ótimo para definição das características espectrais de objetos delgados alvos.

As questões de utilização da informação *a priori* são atuais em vários problemas da geofísica, veja, por exemplo, Medeiros & Silva (1996) e Silva et al. (2001). No caso de problemas sísmicos destacamos duas categorias de informação *a priori*, as quais podem ser usadas no problema de decomposição da forma de sinal. A principal diferença entre uma e outra, reside na obtenção de tal informação e sua apresentação. O primeiro tipo de informação *a priori* inclui dados de investigações geofísicas adicionais, ou resultados do processamento preliminar de dados sísmicos. Por exemplo, no problema de definição com precisão das correções estáticas temporais pode ser utilizada uma informação sobre a velocidade média em relação à profundidade, proveniente do perfil acústico ou *check-shot*. Esta

informação, também pode ser útil na estimativa da forma do sinal sísmico. Como outro exemplo, desta informação, serve as condições de coincidência das correções estáticas ou da forma do sinal em pontos de interseção de diferentes perfis sísmicos.

O segundo tipo de informação *a priori* está baseado em suposições ligadas aos dados sísmicos, ou com a teoria dos métodos sísmicos. Por exemplo, considerando o processamento do sinal refletido de um horizonte alvo, podemos supor que a forma deste sinal sofrerá pequenas modificações ao longo do horizonte. Isto está conectado com variações suaves no relevo da estrutura. No entanto, as características e forma do sinal podem assumir uma estrutura bem complexa.

Estes tipos de informações *a priori* podem ser representados de várias maneiras. Um dos exemplos mais simples de informação *a priori* do primeiro tipo é quando se conhece os valores de parâmetros desconhecidos em alguns pontos do perfil sísmico, ou, é possível determinar tais valores através de investigações sísmicas adicionais. Além disso, usando os resultados do processamento preliminar podemos concluir que em algumas áreas ou horizontes, será possível obter estimativas estáveis, para certo conjunto de parâmetros. Tais estimativas, também podem ser usadas como informação *a priori*. As características estáticas ou as condições semelhantes representam a forma mais simples do segundo tipo de informação, as quais podem ser aplicadas para estimar alguns parâmetros desconhecidos do modelo. Por exemplo, utilização da condição sobre o valor zero da grandeza média de variações de um parâmetro. Uma informação essencial do segundo tipo é a suposição, para alguns parâmetros, sobre ausência de componentes de menor grau, i.e., em alguns problemas é possível determinar somente as variações de frequências altas de parâmetros correspondentes. Tal tipo da informação *a priori* é generalizado através de algumas condições sobre funções, normalmente utilizadas na decomposição dos parâmetros do problema. No caso de modelos lineares, tais condições, basicamente, viabilizam a redução da dimensionalidade do núcleo do operador linear de problema, excluindo alguns componentes multivalorados.

Os dois tipos de informação *a priori* apresentam vantagens e desvantagens. O primeiro tipo é mais favorável quando os algoritmos garantem elevada precisão na definição dos parâmetros. Mas, isto nem sempre é possível realizar na prática. Assim, para resolver o problema de correção estática como função da frequência, é necessário conhecer as propriedades espectrais em alguns pontos da superfície do registro que contêm as fontes e receptores. Isto demanda a execução de serviços adicionais caros, que usualmente não são realizados em dados reais. Para o segundo tipo da informação *a priori*, em se

tratando de dados reais, é impossível garantir a realização das suposições usadas na formulação do modelo. Mas, este tipo de informação *a priori* pode ser facilmente incorporado no fluxo de processamento de dados tornando-o mais estável em relação a ruídos. Desta forma, mesmo considerando as limitações do algoritmo proposto, será mostrado abaixo, como os dois tipos de informação *a priori* podem ser usados em conjunto, um complementando o outro.

Freqüentemente a informação *a priori* é 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. A completude da informação sísmica não é uma condição necessária em vários algoritmos utilizados na solução de problemas inversos, ou na estimativa de parâmetros desconhecidos do modelo (por exemplo, em algoritmos iterativos). A não completude da informação deve ser levada em conta nas etapas de interpretação, para garantir a confiabilidade da interpretação dos resultados obtidos.

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 do núcleo da matriz \mathbf{A} ; tais vetores terão sua estrutura simplificada em relação às observações admissíveis (Goldin & Mitrofanov, 1975). Neste caso, é simples indicar as condições para que as observações iniciais se tornem admissíveis. Estas condições quase sempre podem ser garantidas em situações reais. Por isso, a seguir vamos considerar a hipótese que estas condições serão cumpridas.

MODOS DE SELEÇÃO E UTILIZAÇÃO DA INFORMAÇÃO *A PRIORI*

Conforme mostrado em Mitrofanov & Priimenko (2010), o modelo de decomposição da forma do sinal, usado na solução do problema inverso para objetos delgados locais, pode ser representado na forma linear. Assim, 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.

Desvantagens do método:

- Necessidade de repetir o processo para solução do sistema cada vez que a matriz \mathbf{H} varia (a matriz \mathbf{A} do problema original é fixa);
 - Díficil análise das propriedades estatísticas das estimativas obtidas na presença de ruídos em observações iniciais;
 - Complexidade na definição de linhas linearmente dependentes da matriz \mathbf{A} , quando a dimensão do problema inicial é grande. Neste caso é difícil verificar se a informação *a priori* disponível está completa.
2. Com base no processo iterativo, constrói-se uma solução $\boldsymbol{\theta}_*^{(m)}$ usando a primeira equação matricial do sistema (2), veja, por exemplo, Wiggins et al. (1976), que coincide com a solução verdadeira do problema $\boldsymbol{\theta}^{(m)}$ com a precisão até os vetores de núcleo $\ker \mathbf{A}$ da matriz \mathbf{A} . Em seguida, resolvendo o sistema

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

é possível achar os valores do vetor de diferenças $\Delta\boldsymbol{\theta}^{(m)} = \boldsymbol{\theta}^{(m)} - \boldsymbol{\theta}_*^{(m)} \in \ker \mathbf{A}$. A seguir, definimos a solução do problema $\boldsymbol{\theta}^{(m)}$.

Desvantagens do método:

- Baixa velocidade de convergência do processo iterativo para diferenças significativas entre os valores máximos e mínimos (diferente de zero) dos autovalores da matriz \mathbf{A} ;

- Complexidade da análise estatística e computacional das propriedades das estimativas obtidas.
3. Utilização de multiplicadores de Lagrange nas condições (1) para minimizar o funcional objetivo do problema original. Neste caso, conforme Golub & Van Loan (1996), temos o seguinte sistema de equações matriciais:

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

onde $\boldsymbol{\lambda}$ 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:

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

que define a solução do sistema (4) da seguinte forma $\boldsymbol{\theta}_*^{(m)} = \mathbf{A}^{(1)} \mathbf{A}^T \mathbf{y} + \mathbf{A}^{(2)} \mathbf{c}$. Nesta situação é simples mostrar que esta solução coincide com a solução do problema inicial até a precisão dos vetores do núcleo da matriz \mathbf{A} . Por isso, podemos usar a segunda equação matricial para definir as correspondentes diferenças, como realizado no segundo método, e construir a solução exata do problema.

Desvantagens do método:

- Necessidade de repetir o processo da solução do sistema cada vez que a matriz \mathbf{H} varia;
 - Degradação da qualidade das estimativas dos parâmetros do modelo, quando a matriz é mal condicionada e expandida. Isso depende essencialmente da forma da matriz \mathbf{H} , que usualmente, é definida em função da estrutura e do volume da informação *a priori* disponível.
4. Na construção do sistema das equações lineares do modelo inicial para os vetores $\boldsymbol{\theta}^{(m)}$ usamos uma decomposição do vetor por uma base $\{f_r\}$. Através da escolha das funções f_r é possível diminuir ao máximo o núcleo da matriz \mathbf{A} . Isto acontece pela exclusão dos componentes, que não pertencem ao conjunto correspondente de funções. Assim, a utilização de decomposições com base nas funções trigonométricas, aplicadas em problemas da

correção estática temporal e da forma do sinal refletido (Sysoev & Evdokimov, 1986), permite excluir do núcleo os componentes polinomiais no espaço $L_2(\mathbb{R})$, i.e., para intervalos infinitos de modificação dos parâmetros.

Entretanto, em situações reais, as variações dos parâmetros são limitadas. Por exemplo, a variação da forma de sinal ao longo do perfil é limitada pelo seu comprimento. Por isso, a não unicidade da definição dos componentes polinomiais do modelo de correções estáticas temporais (Wiggins et al., 1976) é manifestada em alguma parte do espectro espacial dos parâmetros e não é definida de forma simples (Mitrofanov, 1988). Neste caso será necessária a utilização de procedimentos adicionais de regularização. Entretanto, até o presente momento, não existe justificativas suficientes para tais procedimentos. No entanto, estes procedimentos, também não resolvem o problema de definição e utilização da informação *a priori*, porque contribuem somente para eliminação dos componentes multivalorados da solução do problema, mas não os determinam. As circunstâncias indicadas representam defeitos do método.

Desta forma, através da análise dos métodos é possível formular as condições básicas para escolha de algoritmos efetivos de definição e utilização da informação *a priori*.

1. Deve ser garantida uma reorganização efetiva da solução do problema original, no caso de modificação ou aditamento da informação *a priori*;
2. Algoritmos devem ser rápidos e estáveis em relação a todo procedimento de definição dos parâmetros do modelo;
3. 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 acima indicadas. Este algoritmo se baseia no conceito da informação pseudo *a priori* formulado em Mitrofanov (1988).

ALGORITMO PARA DETERMINAÇÃO DE COMPONENTES MULTIVALORADOS

Em todos os casos de utilização da informação *a priori* é importante definir ou fixar vetores do núcleo da matriz \mathbf{A} . Estes vetores caracterizam completamente os componentes multivalorados dos parâmetros do modelo. Portanto, o estudo da estrutura dos componentes é essencial para formação e utilização da informação *a priori* em modelos regressivos (Yuan et al.,

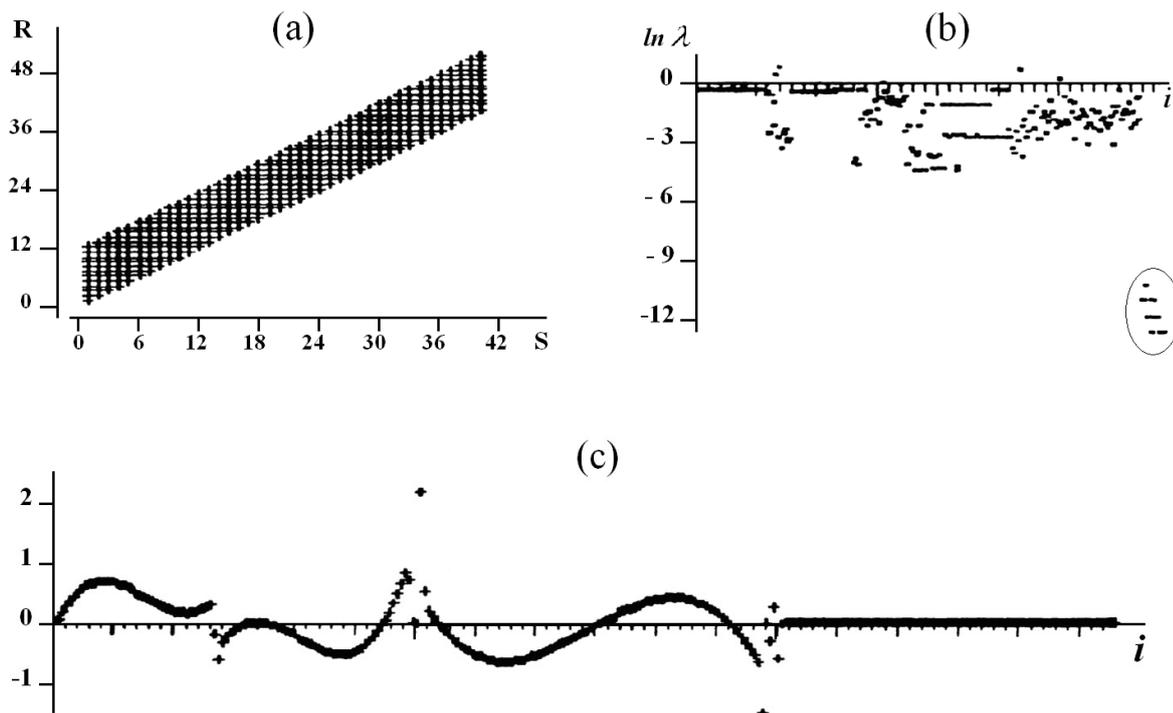


Figura 1 – Análise da estrutura dos vetores de núcleo para um sistema de observações regular: (a) sistema de observações; (b) valores do logaritmo dos números singulares com indicação de uma área separada, correspondente aos vetores de núcleo; e (c) valores normalizados dos vetores de núcleo construídos.

outros números (Fig. 1(b)). Estes valores são na ordem de 10 vezes menores que outros números singulares. Isso está de acordo com os resultados obtidos antes (Wiggins et al., 1976).

Ao mesmo tempo, a utilização do algoritmo proposto para definição dos vetores de núcleo fornece uma importante informação adicional. Assim, da estrutura destes vetores (Fig. 1(c)) é possível concluir que, em problemas de correção estática, existe a possibilidade de ocorrência de dois tipos de não-unicidade. O primeiro tipo tem uma estrutura polinomial bem definida, e está ligado com as interações dos parâmetros do modelo. O segundo tipo é definido pela estrutura do sistema de observações, e está relacionado com as áreas dos extremos do sistema de observações, manifestando-se em vetores de núcleo, como um componente de alta frequência.

A influência da estrutura de observações na unicidade da solução do sistema de equações lineares, baseado nas limitações do método estatístico-espectral foi indicada em Goldin & Mitrofanov (1975), mas somente o desenvolvimento do algoritmo proposto permite considerar, de forma mais completa, este aspecto do problema. Em particular, este desenvolvimento evidencia que, para sistemas de observações regulares e densos, o segundo tipo de não-unicidade pode ser removido se as partes dos

extremos do sistema de observações também forem removidas (Fig. 2). Neste caso, o número de vetores de base de núcleo reduz-se a 5. Os vetores são representados por polinômios de terceira ordem, com respeito aos parâmetros de fontes, receptores, pontos médios comuns; e, também, de ordem zero, com respeito ao parâmetro de variação da velocidade. Um resultado similar foi obtido usando conceitos de aproximação para a análise da estrutura dos componentes multivalorados do modelo da correção estática (Taner et al., 1974).

A Figura 3 ilustra um resultado interessante sobre a influência da estrutura do sistema de observações na estrutura dos componentes multivalorados. Note a ausência de quatro fontes na parte central do sistema de observações irregular. Neste caso, o número de valores singulares, correspondentes aos vetores de núcleo, aumentou até 9 (Fig. 3(b)). Também é possível observar, que em uma parte dos parâmetros do modelo ocorre uma modificação na estrutura dos vetores de núcleo. Através da análise da Figura 3(c) podemos notar a complicação da estrutura dos vetores em função dos parâmetros de fontes e pontos CMP. Isto está ligado com a irregularidade do sistema de observações. Desta forma, quando se deseja eliminar este tipo de não-unicidade, é necessário ter uma informação *a priori* adicional. Através

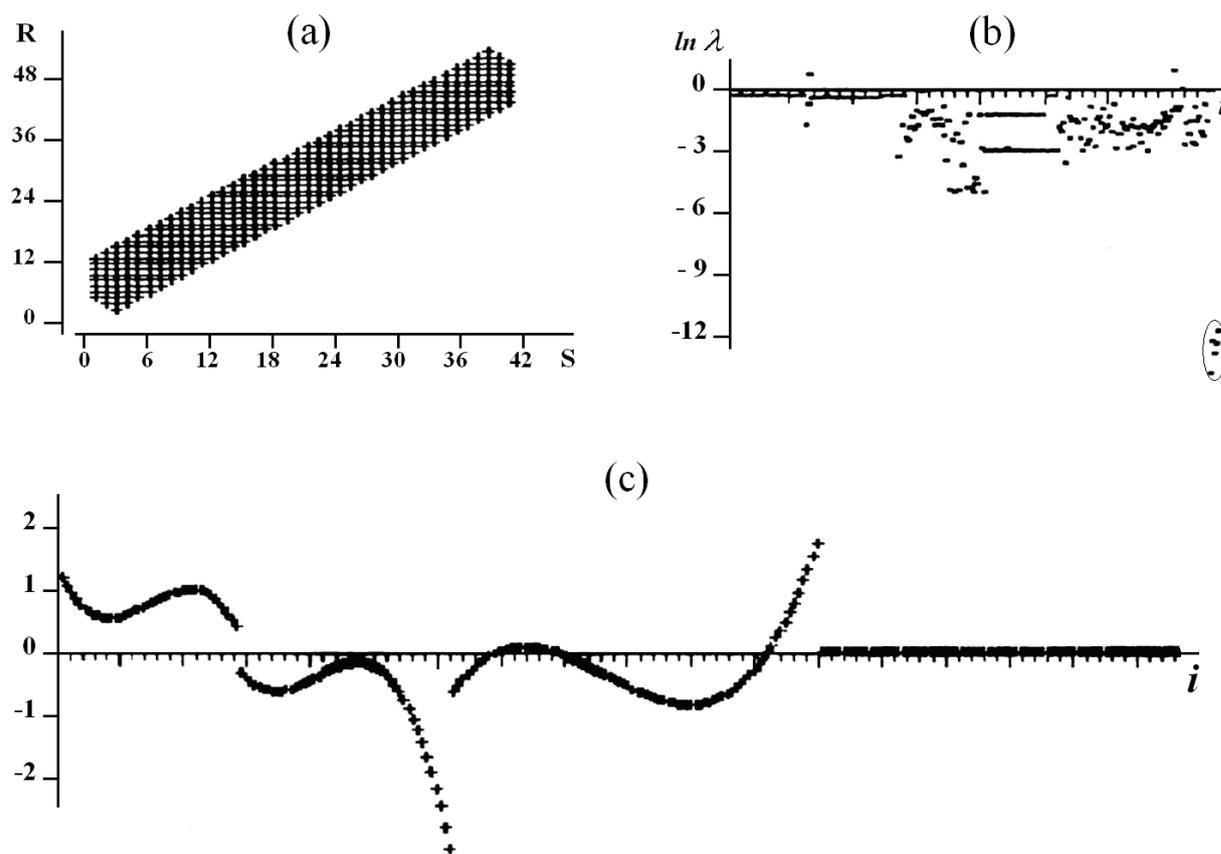


Figura 2 – Análise da estrutura dos vetores de núcleo para um sistema de observações truncado nos extremos: (a) sistema de observações; (b) valores do logaritmo dos números singulares com indicação de uma área separada, correspondente aos vetores de núcleo; e (c) valores normalizados dos vetores de núcleo construídos.

da análise da estrutura dos vetores de núcleo é possível definir a forma e o volume da informação adicional. Ao mesmo tempo, em função dos parâmetros de fontes e de velocidade, a irregularidade do sistema de observações é suficiente para a resolução do problema em questão. Isto é manifestado pela ausência de perturbação da estrutura dos componentes de vetores de núcleo, correspondentes.

Em um experimento real, quando se deseja considerar as questões de formação de dados *a priori*, é necessário levar em consideração tais complicações da estrutura dos vetores de núcleo. Por isso, quando o sistema de observações não é regular, é necessário uma análise especial dos vetores de núcleo para a definição precisa de suas estruturas. Essa observação pode ser importante na etapa de processamento e separação das ondas convertidas. Nestes tipos de ondas, isto é atribuído a falta de simetria do hodógrafo. Algumas situações, similares a esta, podem ser observadas no processo de transformação de observações para solução do problema inverso para objetos locais do meio, veja Mitrofanov & Priimenko (2010).

MÉTODO EFETIVO DE UTILIZAÇÃO DA INFORMAÇÃO

A PRIORI

Conforme ilustrado anteriormente, a linearidade do problema inicial é uma etapa essencial na construção e utilização da informação *a priori*. A análise da informação *a priori* pode ser feita através da estrutura dos vetores de núcleo do sistema de equações lineares correspondentes. Tal investigação pode ser realizada formalmente, e com base nesta investigação é possível construir esquemas efetivos para utilização de dados *a priori*, aplicáveis a vários modelos e sistemas de observações reais. Isto pode ser generalizado para problemas geofísicos em escalas maiores, onde as observações ou suas transformações são apresentadas na forma de um sistema de equações lineares com matriz retangular. Um exemplo disto são os problemas linearizados de tomografia. Por isso, o esquema de utilização da informação *a priori*, proposto a seguir, é universal e pode ser usado para a solução de diversos problemas.

O esquema geral está baseado em duas etapas de formação

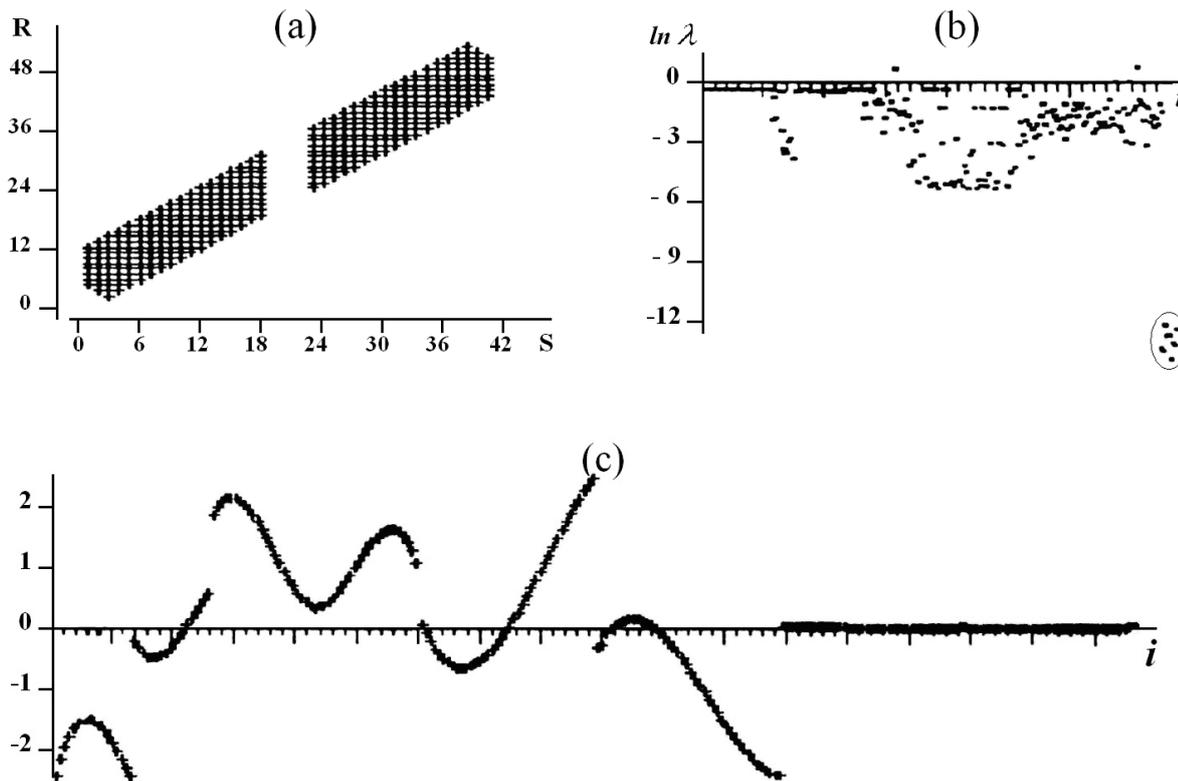


Figura 3 – Análise da estrutura dos vetores de núcleo para um sistema de observações irregular: (a) sistema de observações inicial; (b) valores do logaritmo de números singulares com indicação de uma área separada, correspondente aos vetores de núcleo; e (c) valores normalizados dos vetores de núcleo construídos.

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 indicados no segundo tipo de definição e utilização da informação *a priori*. 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 núcleo assume um papel primordial.

Consideremos a primeira etapa do procedimento proposto. Nesta etapa, utilizando a estrutura de núcleo da matriz **A**, para o sistema original, construímos um sistema de equações similar ao (1):

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

que corresponde a uma informação pseudo *a priori*. Neste caso, é necessário que a matriz **H**_{*} garanta um bom condicionamento da matriz do sistema estendido (2). É importante que a informação *a priori* possa ser formulada com independência absoluta 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. Para **c** = **0** isto permite determinar uma solução do problema original na seguinte forma:

$$\boldsymbol{\theta}_*^{(m)} = \mathbf{A}_*^{(1)} \mathbf{A}_*^T \mathbf{y}$$

Na ausência da informação *a priori*, a solução construída $\boldsymbol{\theta}_*^{(m)}$ 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*, escolhida usando algumas considerações heurísticas e não confirmada por observações reais.

A seguir, consideremos as questões relacionadas com a formação da informação pseudo *a priori*, i.e., da matriz \mathbf{H}_* para problemas de decomposição da forma do sinal. Ao mesmo tempo, levando em conta a ligação deste problema com os problemas de análise estatística, aproveitamos algumas ideias sobre a criação da matriz propostas em Mitrofanov (1988). Se os vetores de núcleo admitem representação polinomial, então, as combinações lineares de parâmetros, análogas a diferenças finitas, e que garantem, no sentido estatístico, a igualdade ao zero dos coeficientes polinomiais, podem ser usadas como uma informação pseudo *a priori*. Um exemplo simples de tais combinações é apresentado a seguir:

$$\begin{aligned} \sum_{p=1}^{Np} \gamma_p = 0; \quad \sum_{p=1}^{Np/2} \gamma_p - \sum_{p=Np/2+1}^{Np} \gamma_p = 0; \\ \sum_{p=1}^{Np/4} \gamma_p - \sum_{p=Np/4+1}^{3Np/4} \gamma_p + \sum_{p=3Np/4+1}^{Np} \gamma_p = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

onde γ_p são valores de algum parâmetro γ do modelo $\theta^{(m)}$, Np – número de valores deste parâmetro. As Equações (8) representam possíveis formas de introdução da informação pseudo *a priori*, que permitem eliminar a não-unicidade na definição do parâmetro γ . A primeira igualdade possibilita definir as componentes constantes, as duas primeiras – componentes lineares, e todas as três – componentes parabólicas de vetores de núcleo. No caso da informação pseudo *a priori* dada, a matriz \mathbf{H}_* será composta somente por 0 e 1.

Na segunda etapa do procedimento usamos a informação *a priori* disponível. Começamos pela busca do vetor de erros $\Delta\theta^{(m)} = \theta^{(m)} - \theta_*^{(m)}$ resolvendo a Equação (3), onde, assim como o vetor $\theta^{(m)}$, 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 $\Delta\theta^{(m)} \in \ker \mathbf{A}$ são definidos de forma única, e possibilita encontrar os valores exatos dos parâmetros do modelo como $\theta^{(m)} = \Delta\theta^{(m)} + \theta_*^{(m)}$.

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 o procedimento e confere vantagem ao método proposto. Ao mesmo tempo, ocorre a simplificação da análise de propriedades estatísticas das esti-

mativas obtidas, porque as propriedades do vetor $\theta_*^{(m)}$ 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} .

ALGORITMO EFETIVO PARA DEFINIÇÃO E UTILIZAÇÃO DA INFORMAÇÃO *A PRIORI*

O esquema proposto acima 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, e em métodos convencionais para minimização do funcional objetivo (Boyd & Vandenberghe, 2009). 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*.

Consideremos algumas propriedades da solução, construída com base no algoritmo correspondente. Se na construção da solução $\theta_*^{(m)}$ usa-se algum tipo informação *a priori* disponível, então as propriedades da solução final são definidas através do seguinte sistema:

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

onde \mathbf{H} é a matriz que caracteriza a informação *a priori*. A segunda equação do sistema (9) pode ser transformada em:

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

se considerarmos que

$$\mathbf{A}^T \mathbf{y} = \mathbf{A}^T \mathbf{A} \theta^{(m)} + \mathbf{A}^T \mathbf{e} \quad \text{e} \quad \mathbf{A}_*^{(1)} \mathbf{A}^T \mathbf{A} = \mathbf{I} - \mathbf{A}_*^{(2)} \mathbf{H}_*.$$

Os vetores $\theta^{(m)}$ e \mathbf{e} representam a solução verdadeira do problema e um ruído aditivo do modelo inicial, correspondente; a matriz $\mathbf{A}_*^{(2)}$ é definida pela Equação (7), e \mathbf{I} é a matriz de unicidade.

O sistema (9) e a Equação (10) possibilitam considerar 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:

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

Mesmo se a esperança matemática do ruído $\mathbf{M}\{\boldsymbol{\varepsilon}\}$ for igual ao zero, o componente $\mathbf{A}_*^{(2)} \mathbf{H}_* \boldsymbol{\theta}^{(m)}$ estará presente na esperança matemática $\mathbf{M}\{\boldsymbol{\theta}_*^{(m)}\}$, que será igual ao zero, somente quando a informação *a priori* corresponde à estrutura dos parâmetros, ou quando, os dados *a priori* estão completos, e o deslocamento em valores do vetor \mathbf{c} estiver ausente.

3. Forma do modelo inicial, que define a estrutura das matrizes $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ e $\mathbf{A}_*^{(1)}$, e volume de informação *a priori* necessária (que tem influência na razão sinal/ruído) podem 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, descontados no modelo, a simplificação do modelo pode provocar decréscimo da razão sinal/ruído e piorar a qualidade de estimativas $\tilde{\boldsymbol{\theta}}^{(m)}$.

Em base do algoritmo proposto foram preparados módulos de programa para a execução das seguintes tarefas:

- Formar matrizes do sistema de equações lineares iniciais \mathbf{A} para vários modelos de decomposição da forma do sinal e da estrutura das observações iniciais;
- Definir e analisar os vetores de núcleo destas matrizes, que permite formular as condições necessárias para um volume mínimo de dados *a priori*;

- Definir informação pseudo *a priori*, garantindo a solução única e estável do problema;
- Definir componentes multivalorados do modelo com base nos dados *a priori* disponível.

No desenvolvimento destes módulos foram levados em conta dois momentos importantes, que elevam a universalidade e efetividade dos programas preparados.

O primeiro momento está relacionado com os métodos de construção dos vetores $\tilde{\boldsymbol{\theta}}^{(m)}$. Nos programas propostos, os valores do vetor $\tilde{\boldsymbol{\theta}}^{(m)}$ podem ser as estimativas dos parâmetros, obtidas por qualquer método efetivo. Entretanto, para todas as estimativas usadas, deve ser válida a seguinte condição: *todas os componentes multivalorados devem ser preservados nestas estimativas*.

O segundo momento está relacionado ao volume de dados *a priori* necessários para a simples definição de $\Delta \boldsymbol{\theta}^{(m)}$, quando existem vários modelos multiplicativos fatoriais e, em particular, modelo de decomposição da forma do sinal. Na sua base, está o entendimento da razão do surgimento das dependências lineares em tais modelos. As dependências lineares são provocadas por ligações entre diferentes grupos de parâmetros, ou por fatores do modelo original. Se a análise de vetores de núcleo possibilita entender o tipo destas ligações, por exemplo, dependência polinomial até certo grau, então podemos aproveitar a seguinte consideração: não é necessário ter um volume de informação *a priori*, que permita definir cada componente multivalorado em grupo separado de parâmetros, mas é suficiente definir somente uma parte destes parâmetros para eliminar a dependência linear existente entre diferentes grupos de parâmetros. O resto dos parâmetros, que possuem mais que um valor, pode ser determinado usando o fato que os vetores gerais dos parâmetros pertencem ao núcleo.

UM EXEMPLO

Como exemplo de utilização efetiva da informação *a priori*, no problema de decomposição da forma do sinal, considere o seguinte experimento baseado no modelo de intervalo de traço, contendo o sinal refletido do horizonte alvo:

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

Este modelo foi considerado em Mitrofanov & Priimenko (2010), onde se levou em conta as mudanças da forma do sinal em função da distância entre fonte e receptor.

A Figura 4(a) mostra o esquema do experimento. Este modelo pode ser considerado a versão mais simples de um reser-

vatório 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. (2009a, b). 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 fonte e receptor foi de 25m. 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 Figura 4(b) que o sinal observado, refletido do horizonte alvo, apresenta variações na forma, relacionadas somente com as particularidades da estrutura do horizonte alvo.

No entanto, se existem variações nas características das fontes e dos receptores, as mudanças na forma do sinal podem se tornar 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 Figura 4(a) exemplifica dois impulsos ($i = 6, 12$). Além disso, nesta simulação considerou-se que em alguns receptores $r_i(t)$ pode ocorrer variações nas características temporais e espectrais. Na Figura 4(a) são apresentados exemplos de receptores com tais características ($i = 9, 13, 19$). Neste caso, na Figura 5 as mudanças na forma do sinal refletido podem ser vistas com clareza. A análise comparativa entre os traços correspondentes, veja Figuras 4(b) e 5, 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.

Os exemplos das características impulsivas de fontes e receptores, veja Figura 4(a), foram consideradas neste experimento como uma informação *a priori* para correção posterior da forma do sinal. Como parte do experimento, um poço foi posicionado em 225 m, permitindo, assim, definir um impulso de incidência normal sobre a zona de reflexão do horizonte alvo, i.e., a função $G_{i+j}(t)$.

A simplicidade do modelo original do meio possibilitou apresentar as características de reflexão do horizonte alvo na forma $G_{i+j}(t) * L_{i-j}(t)$, onde $G_{i+j}(t)$ é a característica impulsiva de reflexão, obtida sob incidência normal de ondas refletidas do horizonte alvo. Através destas reflexões é possível determinar as mudanças na forma da onda associadas ao ponto central comum correspondente; a função $L_{i-j}(t)$ determina mudanças na forma do sinal associadas com a distância fonte-

receptor. Assim, a Equação (11) pode ser usada 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, é necessário usar uma representação mais complexa, veja Mitrofanov & Priimenko (2010). Isto pode afetar a quantidade e o tipo de informações *a priori* a ser usada.

De acordo com algoritmo proposto, precisamos de uma representação linear do modelo original, que descreva as variações da forma do sinal. Isso pode ser feito calculando o logaritmo das características espectrais. Por exemplo, o logaritmo das características espectrais da Equação (11) tem a seguinte representação linear:

$$\ln\{y_{ij}(\omega)\} = \ln\{s_i(\omega)\} + \ln\{r_j(\omega)\} + \ln\{G_{i+j}(\omega)\} + \ln\{L_{i-j}(\omega)\} + \varepsilon_{ij}(\omega) \quad (12)$$

A partir de outras notificações, este modelo fatorial linear pode ser representado como:

$$z_{ij}(\omega) = \alpha_i(\omega) + \beta_j(\omega) + \gamma_{i+j}(\omega) + \lambda_{i-j}(\omega) + \varepsilon_{ij}(\omega) \quad (13)$$

ou, simplesmente, para uma frequência fixa:

$$z_{ij} = \alpha_i + \beta_j + \gamma_{i+j} + \lambda_{i-j} + \varepsilon_{ij}. \quad (14)$$

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.

Com base na análise acima da influência da estrutura de observações sobre estimativas e componentes multivalorados, e com base na semelhança da abordagem na estimativa de parâmetros desconhecidos, neste experimento foi utilizado o sistema de observações mostrado na Figura 6. A estrutura das observações selecionadas não tinha vértices, de modo a não ter componentes adicionais em vetores de variedade nula da correspondente matriz \mathbf{A} .

Observe que foram usados dois tipos de apresentação de observações iniciais. O primeiro tipo (Fig. 6(a)) é o mais tradicional. Ao mesmo tempo, uma segunda exibição (Fig. 6(b)) corresponde melhor ao problema de determinação dos componentes do sinal, que caracterizam suas variações em função da posição do ponto central comum e da distância fonte-receptor, veja Yilmaz (2001) para maiores detalhes. Além disso, a utilização do sistema de observações permitiu resolver o sistema de equações lineares com precisão até o componente parabólico dos valores dos fatores individuais, ou seja, o núcleo da correspondente

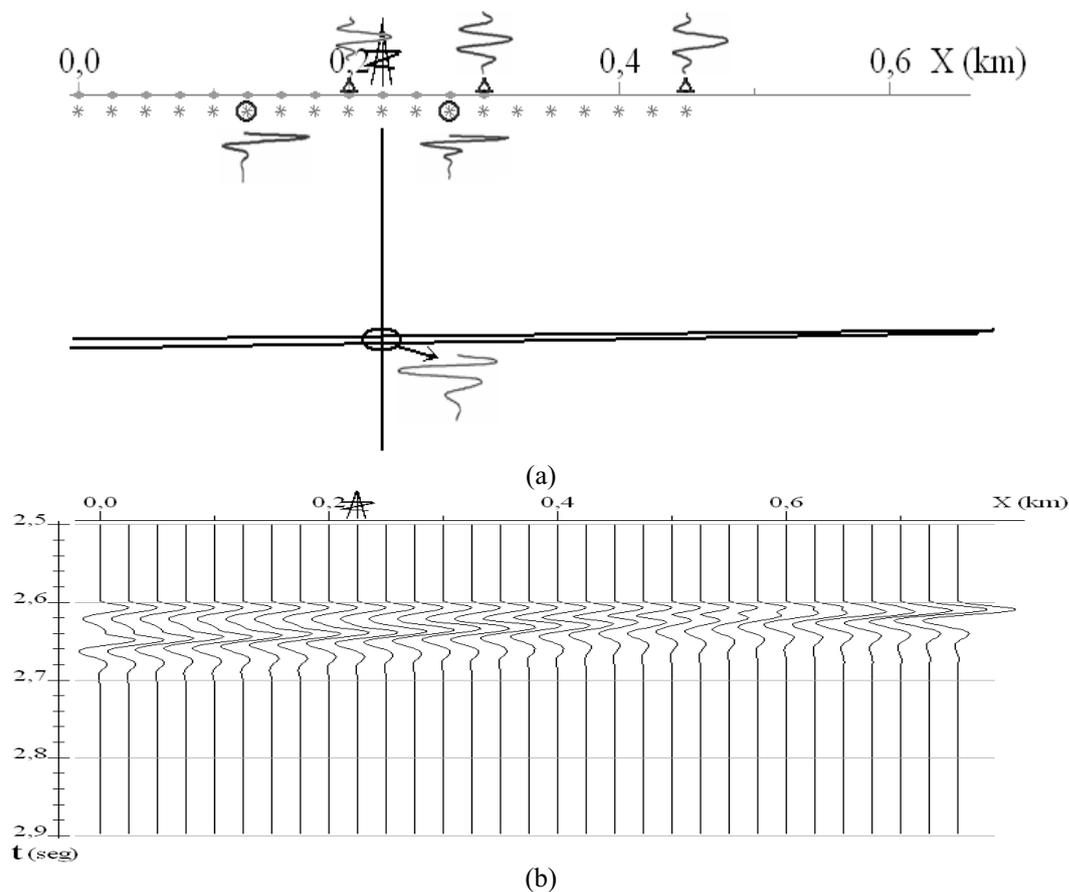


Figura 4 – Exemplo da utilização da informação *a priori* no problema de decomposição da forma do sinal: (a) esquema do experimento; e (b) parte da seção sísmica com sinal refletido do horizonte alvo.

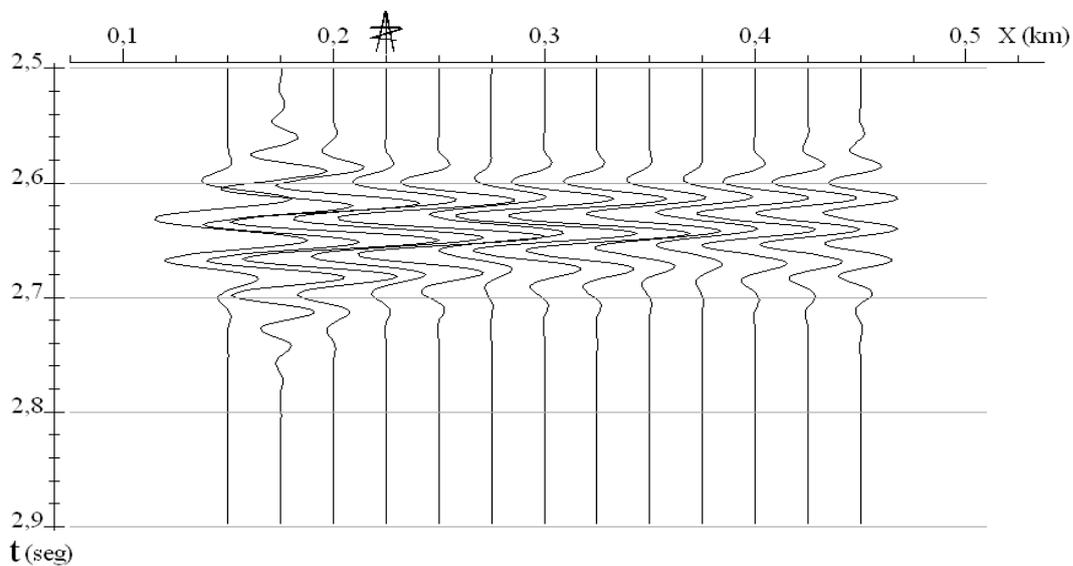


Figura 5 – Traços sintéticos com as reflexões do horizonte alvo, correspondentes à distância fonte-receptor zero para parte da seção onde foi feita a correção da forma de sinal.

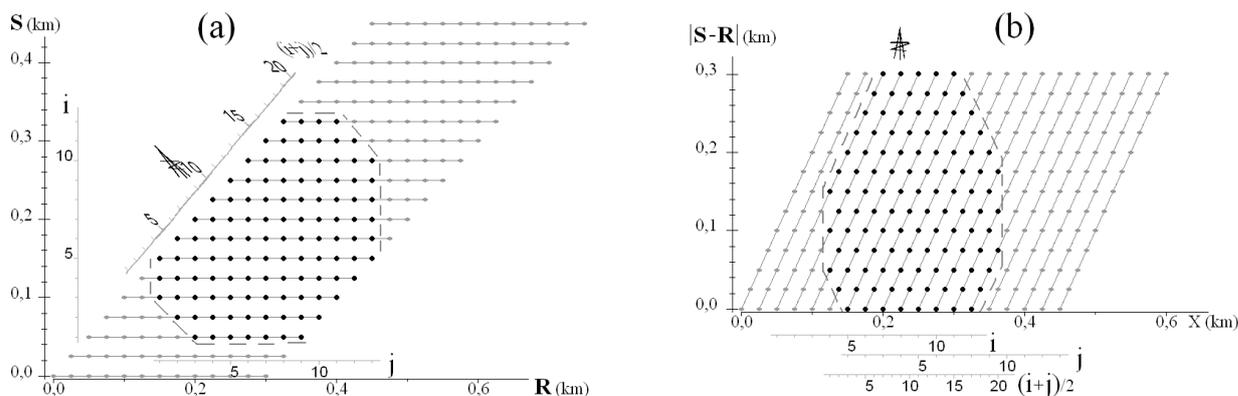


Figura 6 – Seleção de traços, usados na decomposição da forma do sinal: (a) em sistema de coordenadas fonte-receptor; e (b) no sistema de coordenadas de afastamento fonte-receptor e linha de perfil.

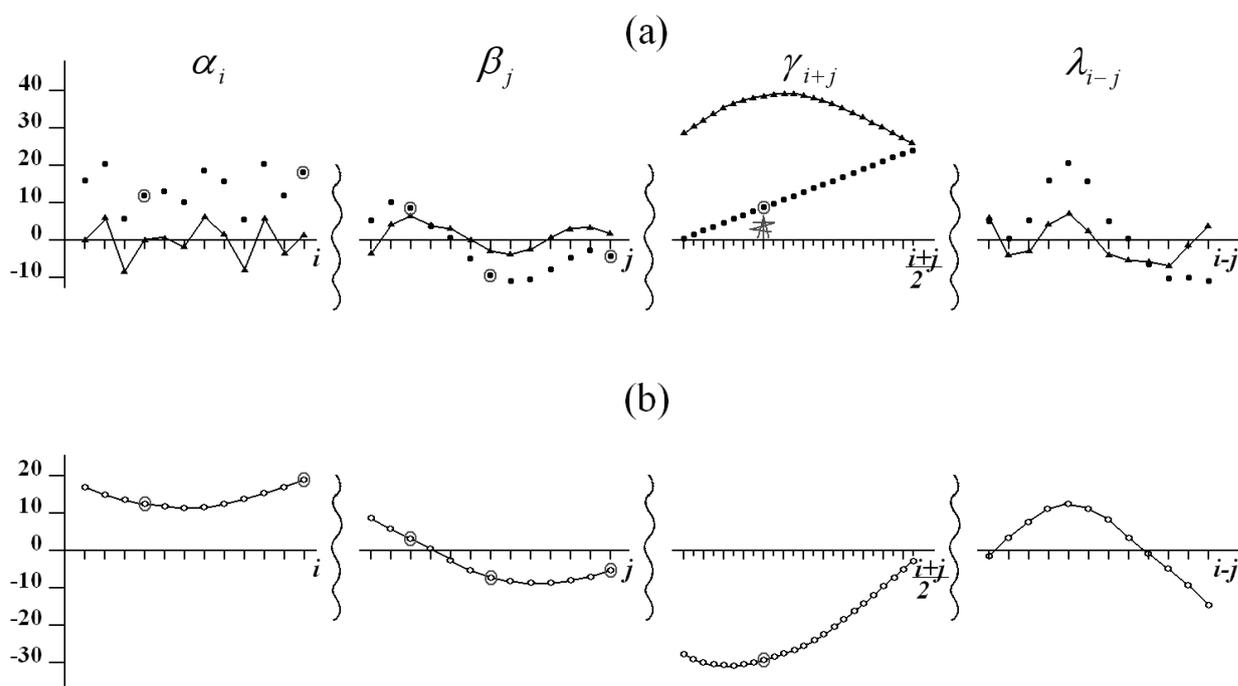


Figura 7 – Determinação dos parâmetros do modelo fatorial de decomposição da forma do sinal: (a) valores obtidos com base na informação pseudo *a priori* (valores exatos são apresentados por pontos, e os estimados são ligados por linhas); e (b) diferenças entre valores exatos e estimados.

matriz é composto por vetores descritos por polinômios até segundo grau. Isto é bem ilustrado na Figura 7.

Durante a decomposição da forma do sinal, para avaliar as características $G_{i+j}(t)$ e $L_{i-j}(t)$, 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 (8), que permitem definir os elementos parabólicos e obter uma solução na seguinte forma $\theta_*^{(m)} = \mathbf{A}_*^{(1)} \mathbf{A}^T \mathbf{y}$. Os espectros de intervalos dos traços, cor-

respondentes ao sistema de observações (Fig. 6) e que contém o sinal refletido do horizonte alvo, foram usados na construção do vetor \mathbf{y} . A Figura 7(a) mostra o vetor da solução $\theta_*^{(m)}$ obtido para a frequência de 20Hz. Para entender melhor a estrutura da solução e suas diferenças em relação aos valores verdadeiros, no vetor são marcadas (com um círculo) as partes correspondentes a fatores diversos do modelo (14). Ao mesmo tempo, na Figura 7(b) são mostradas as diferenças que surgem entre as estimativas obtidas, construídas utilizando a informação pseudo *a priori*, e os verdadeiros valores dos parâmetros. Como esperado, esta

diferença é descrita pelos componentes parabólicos.

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 α_i , β_j , γ_{i+j} , λ_{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 ao núcleo 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 receptores, duas características impulsivas de fontes, e, também, uma característica impulsiva de reflexão, em relação à coordenada do poço.

A Figura 7(a) mostra o resultado de um dos experimentos executados para estimativa dos parâmetros do modelo (13) na frequência 20Hz. Neste caso, foi assumido que no experimento real as características espectrais para duas 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 espectrais para três 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 20Hz:

$$\alpha_4 = 12, \quad \alpha_{12} = 18, \quad \beta_3 = 8, \\ \beta_7 = -10, \quad \beta_{13} = -4, \quad \gamma_9 = 8.$$

Tais valores estão marcados com um círculo na Figura 7(a). A seguir, usando os valores dos fatores, fica fácil determinar os valores do vetor de diferenças $\Delta\theta^{(m)}$, em pontos correspondentes do perfil (Fig. 7(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 ao núcleo 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 (14).

É interessante usar a solução construída para a interpretação posterior ou para a solução do problema de inversão da forma do sinal. Para isso, podem ser utilizadas as estimativas dos fatores γ_{i+j} , λ_{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 Figura 8 mostra os traços sintéticos, correspondentes a uma parte da seção temporal mostrada na Figura 4. 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 Figura 5. Mas, através de uma comparação com os traços, correspondentes à verdadeira característica de reflexão do horizonte alvo, mostrada na Figura 4(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 (Fig. 8). Além disso, de acordo com a Figura 8, a região de acunhamento foi recuperada com maior precisão, e está mais próxima ao ponto de locação do poço. Obviamente, esses fatores desempenham um papel significativo, tanto no problema inversão da forma do sinal, como na interpretação dos resultados do processamento.

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 (Fig. 9).

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 pode ser obtida com base nos levantamentos de velocidades em poço, ou correlacionando as profundidades com os dados de poço, visto que, em problemas

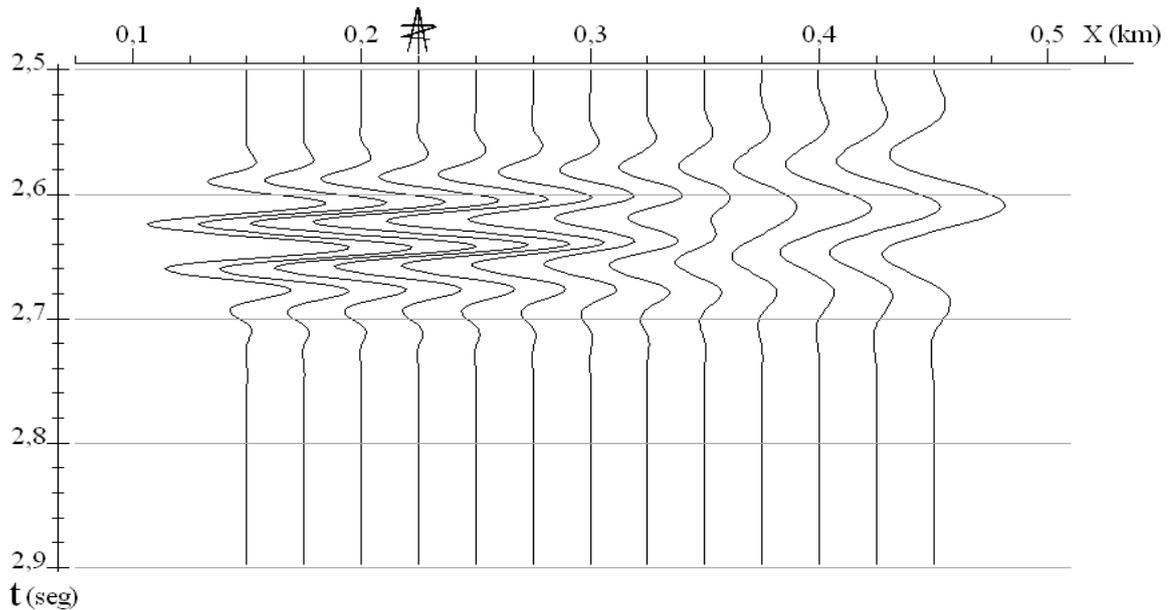


Figura 8 – Traços sintéticos com as reflexões do horizonte alvo, obtidos depois da decomposição da forma do sinal, mas sem a informação *a priori*.

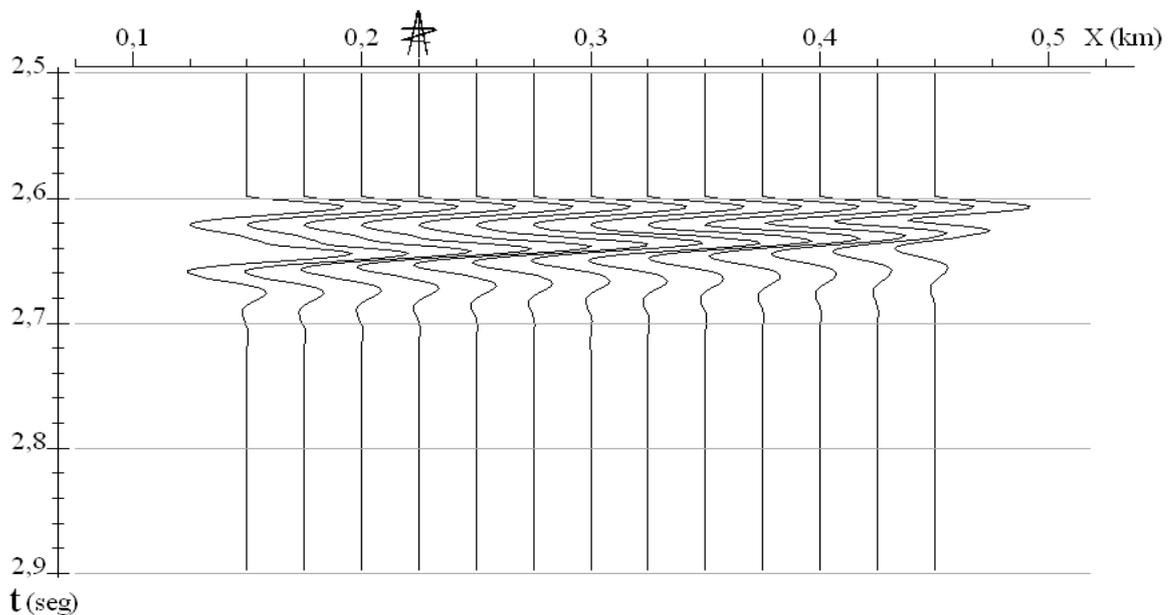


Figura 9 – Traços sintéticos com as reflexões do horizonte alvo, obtidos depois da decomposição da forma do sinal levando em conta a informação *a priori*.

inversos dinâmicos da sismica 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 um fator 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 impor-

tante que a solução do problema de correção estática.

O algoritmo, proposto para seleção e utilização da informação *a priori*, permite definir os componentes multivalorados das características espectrais procuradas. O fluxo do algoritmo é dividido em duas etapas. Na primeira, com base na análise da estrutura de núcleo e usando uma informação pseudo *a priori*, é possível definir os componentes multivalorados. Na segunda

etapa é usada a informação *a priori*, e por isto permite definir os valores verdadeiros dos componentes multivariados.

Como vantagem deste fluxo pode ser destacada que não é necessário fornecer um grande volume de informação *a priori*, para alcançar a solução estável do problema. Além disso, a primeira etapa pode ser feita formalmente, sem considerar as questões de obtenção da informação *a priori* e execução de um levantamento sísmico adicional. E mais, a solução pode ser construída com base na possibilidade de execução do levantamento adicional. Por exemplo, se a informação do poço está disponível, podemos obter os principais dados *a priori*, sem elevar o número de investigações, relacionadas com as condições de excitação e registro das oscilações sísmicas. Outra vantagem desta solução está relacionada à possível estrutura de vetores de núcleo. Se tais vetores podem ser representados na forma polinomial, é possível reduzir em quase duas vezes o volume de informação *a priori*, usando a dependência entre os coeficientes polinomiais nos vetores de núcleo.

Uma análise detalhada da influência de técnicas de otimização na solução da Equação (10), considerando o impacto do ruído, a completude e os métodos de otimização na convergência e solução do problema inverso, será o foco principal de nossas futuras investigações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Prof. Fernando S. de Moraes, LENEP/UENF, aos revisores pelas valiosas sugestões e comentários, e à Petrobras/Rede Temática de Estudos de Geofísica Aplicada pelo apoio dado para execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BOYD S & VANDENBERGHE L. 2009. Convex Optimization (seventh printing with corrections). Cambridge, UK, Cambridge University Press, 716 pp.
- GOLDIN SV & MITROFANOV GM. 1975. Spectral-statistical method of allowing for surface inhomogeneity's in system of multiple tracing of reflected waves. *Geology and Geophysics (Soviet)*, 16(6): 102–112.
- GOLUB GH & VAN LOAN CF. 1996. Matrix Computations. 3 ed., The Johns Hopkins University Press, London, 310 pp.
- LAUER F & BLOCH G. 2008. Incorporating prior knowledge in support vector regression. *Machine Learning*, 70: 89–118.
- LAWSON CL & HANSON RJ. 1995. Solving Least Squares Problems. Classics in Applied Mathematics, 15. SIAM, Philadelphia, PA, USA, 337 pp.
- MEDEIROS WE & SILVA JBC. 1996. Geophysical inversion using approximate equality constraints. *Geophysics*, 61(6): 1678–1688.
- MITROFANOV GM. 1988. Pseudo *a priori* information in the frequency-dependent static problem. In: *Mathematical problems of seismic data interpretation*. Nauka, Novosibirsk, 21–33.
- MITROFANOV G & PRIIMENKO VI. 2010. Structural decomposition of the wave field in the solution of inverse seismic problems. *Revista Brasileira de Geofísica*, 28(4): 657–671.
- MITROFANOV GM & RACHKOVSKAIA NA. 1993. Studying of 'null space' structure in problems of seismic decomposition. In: *Extended Abstracts of Papers, EAGE 55th Conference*, Stavanger, 4 pp.
- MITROFANOV GM & RACHKOVSKAIA NA. 1996. *A priori* information forming for analyzing and correction of seismic data in reflection waves method. *Geology and Geophysics (Soviet)*, 37(3): 93–102.
- MITROFANOV G, PRIIMENKO V, MISSÁGIA R & AMARAL L. 2009a. Utilização das transformadas de Laplace e Fourier-Bessel na modelagem de meios elásticos delgados. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27(2): 205–224.
- MITROFANOV G, PRIIMENKO VI, MISSÁGIA RM & AMARAL L. 2009b. Transformada de Laplace na solução de problemas inversos dinâmicos da sísmica. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27(4): 527–544.
- SILVA JBC, MEDEIROS WE & BARBOSA VCF. 2001. Potential-field inversion: Choosing the appropriate technique to solve a geologic problem. *Geophysics*, 66(2): 511–520.
- STEIN JA, LANGSTON T & LARSON SE. 2009. A successful statics methodology for land data. *The Leading Edge*, 28(2): 222–226.
- SYSOEV AP & EVDOKIMOV AA. 1986. Correction of seismic signal form in MRW on the basis of the Spectral-statistical method (SSM). *Geology and Geophysics (Soviet)*, 27(5): 94–103.
- TANER MT, KOEHLER F & ALHILALI KA. 1974. Estimation and correction of near-surface time anomalies. *Geophysics*, 39: 441–463.
- VAN VOSSEN R & TRAMPERT J. 2007. Full-waveform static corrections using blind channel identification. *Geophysics*, 72(4): U55–U66.
- VAN VOSSEN R, CURTIS A & TRAMPERT J. 2006. Surface-consistent amplitude corrections for single or multicomponent sources and receivers using reciprocity and waveform inversion. *Geophys. J. Int.*, 165: 311–322.
- WIGGINS RA, LARNER KL & WISECUP RD. 1976. Residual statics analysis as a general linear inverse problem. *Geophysics*, 41: 922–938.
- YILMAZ O. 2001. *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data (Vols. 1 & 2)*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, 2027 pp.
- YUAN M, EKICI A, LU Z & MONTEIRO R. 2007. Dimension reduction and coefficient estimation in multivariate linear regression. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 69: 329–346.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Georgy Mitrofanov é graduado em Geologia e Geofísica pela Universidade Federal de Novosibirsk (UFN), Akademgorodok, Novosibirsk, Rússia, em 1972. Obteve seu doutorado em Física-Matemática em 1984 na UFN. Obteve seu título de Livre Docente em 1989 na UFN. Atualmente, é professor-visitante do Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo (LENEP) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF). Áreas de interesse: processamento de dados sísmicos, problemas inversos e diretos de geofísica, caracterização de reservatórios.

Viatcheslav Ivanovich Priimenko é graduado em Matemática Aplicada e Mecânica pela Universidade Federal de Novosibirsk (UFN), Rússia, em 1978. Obteve seu doutorado em Física-Matemática em 1990 na UFN. Obteve seu título de Livre Docente em 1997 na UFN. Atualmente, é professor titular do LENEP. Áreas de interesse: problemas diretos e inversos de geofísica e engenharia de petróleo, caracterização de reservatórios.

Roseane Marchezi Misságia é engenheira civil pela Universidade Católica de Minas Gerais – PUC, Belo Horizonte, Brasil, em 1985. Em 1998 e 2003, obteve os títulos de mestre e doutora em Engenharia de Reservatório e de Exploração, na área de geofísica aplicada, pela UENF. Atualmente, é professora associada do LENEP. Áreas de interesse: processamento de dados sísmicos, caracterização de propriedades físicas e mecânicas de rochas.