Inversão de impedância acústica usando regularização mista

Sérgio Adriano Moura Oliveira, Universidade Estadual do Norte Fluminense

Resumo

A inversão sísmica de impedância acústica é uma etapa fundamental para caracterização de reservatório, pois além de fornecer informação quantitativa permite que o dado seja interpretado em termos de propriedades intervalares. Para se atingir um bom resultado, esta inversão tem que caracterizar bem as camadas, ou seja, marcar e posicionar bem as interfaces que as separam e recuperar o valor correto de suas impedâncias. No entanto diferentes modelos de impedância podem atender igualmente bem aos dados. Para solucionar este problema, neste trabalho é proposta o uso simultâneo de dois critérios para regularizar a inversão sísmica de impedância acústica: a minimização da norma L2 do vetor de diferença entre o modelo invertido e o modelo de referência e a minimização da variação total do vetor de parâmetros.

Introdução

Os dados originados dos levantamentos geofísicos são incompletos, no sentido de que estes são insuficientes para resolver todas as feições do modelo de sub superfície. Isto acontece devido a várias causas, uma delas é que os levantamentos necessariamente cobrirem uma porção limitada da superfície da terra. Outra causa diz respeito a limitações dos próprios instrumentos de medição. Podemos tomar como exemplo a incapacidade da maioria dos geofones e hidrofones atuais de registrarem sinais sísmicos com conteúdo de freqüência abaixo dos 6.0 Hz. Esta limitação torna impossível extrair informação das componentes de alto comprimento de onda espacial do modelo de impedância, através da inversão de um traço sísmico. Outro problema que sempre atinge os dados geofísicos é a presença de ruído de natureza aleatória. Tal ruído é impossível de ser modelado, assim sempre acaba havendo diversos modelos que ajustem bem a solução quando se mede o vetor de diferenças entre dado observado e modelado usando algum tipo de norma.

Para que um problema inverso geofísico seja solucionado é necessário então usar algum tipo de critério de seleção para se escolher algum dentre os vários modelos que ajustem os dados. A regularização pode-se dizer, é a técnica usada para impor que a solução de um problema inverso possua certas características matemáticas. Na geofísica é muito comum se impor que o modelo possua um desvio mínimo com relação a um modelo conhecido a priori ou que este seja suave, no sentido do somatório dos quadrados de suas primeiras ou segundas derivadas. Outros exemplos de regularizações usadas mais restritamente, são a máxima entropia (Aster ET AL., 2005) e a variação total (e.g. Martins ET AL., 2011). Esta última diz respeito ao somatório dos valores absolutos dos elementos do vetor de diferenças do modelo. Uma das características mais marcantes da regularização por variação total é que esta não penaliza transições descontinuas no modelo ao mesmo tempo em que evita a presença de variações espúrias. No caso da inversão sísmica é interessante perceber que tais descontinuidades representam feições fundamentais a ser recuperadas do modelo geológico, pois correspondem às interfaces entre as camadas de rocha.

Classicamente apenas um tipo de regularização é aplicado para solucionar um determinado problema inverso geofísico. Neste trabalho demonstramos as vantagens de usar regularização mista na solução do problema de inversão de impedância acústica. A estratégia adotada aqui usa a regularização para impor que a solução preserve o modelo de baixa freqüência de impedância conhecido a priori e também é incluído na função objetiva um termo de regularização por variação total. Exemplos numéricos demonstram que isto realmente possibilita uma maior sensibilidade com relação à detecção das interfaces e um posicionamento mais preciso destas.

Metodologia

Neste trabalho o problema de inversão de impedância acústica a partir do traço sísmico de afastamento nulo é solucionado a partir da minimização da seguinte função erro:

$$E(z) = \Delta d^T \Delta d^* + \mu_1 \Delta z^T \Delta z + \mu_2 VT\{z\} \qquad (1)$$

Onde Δz representa o vetor de diferença entre o vetor de parâmetros z e o vetor do modelo de referência: $\Delta z = z - z_0$, Δd é o vetor de diferença entre o dado observado e calculado: $\Delta d = d_{calc} - d_{obs}$. Os dois primeiros termos do lado direito da equação 1 são comumente usados na formulação de problemas inversos de Geofísica Aplicada, o primeiro deles se refere ao somatório dos termos ao quadrado do vetor de resíduo entre dado calculado e observado, o segundo, que é um termo de regularização, representa o somatório dos termos ao quadrado do vetor Δz. A presença deles garante que a solução encontrada para o vetor de impedância z gerará um dado com desvio quadrático mínimo com relação aos dados observados ao mesmo tempo em que terá um desvio quadrático mínimo com relação ao modelo de referência z_0. O termo adicional de regularização usado neste trabalho refere-se à variação total do vetor z:

$$VT\{z\} = \sum_{i=1}^{N} \left| z_{i+1} - z_i \right| . \quad (2)$$

Como foi dito anteriormente, a minimização da variação total de z evita oscilações espúrias na solução sem, no entanto penalizar ou suavizar demais as descontinuidades. Os parâmetros μ_1 e μ_2 controlam o peso que cada critério de regularização terá na solução.

Uma vez que $E(z)$ seja suave é possível obter a solução usando-se os clássicos métodos de primeira derivada tais como o conjugado gradiente ou gradiente ou os baseados em segunda derivada tais como o de Newton ou Gauss Newton que convergem mais rápido (Fletcher, 2000). Para isto é necessário obter um meio de calcular o dado e suas derivadas com relação aos parâmetros do modelo. Expressões analíticas exatas para isto podem ser encontradas em (Oliveira ET AL.,2009), onde um algoritmo iterativo para solução do problema de inversão acústica, sem o termo de variação total, é encontrado. Tal algoritmo usa o método de Gauss Newton. É necessário atentar para o fato de que a introdução do termo de variação total leva à presença de descontinuidade na derivada de $E(z)$ toda vez que o diferencial de z trocar de sinal. A princípio isto excluiria o uso do método de Gauss Newton para obtenção da solução, mas tais descontinuidades podem ser removidas através de um simples artifício numérico. Este artifício consiste em aproximar o valor absoluto por uma função suave:

$$\left| z_{i+1} - z_i \right| \approx \sqrt{(z_{i+1} - z_i)^2 + \varepsilon} \quad (3)$$

Onde ε representa um número positivo de pequeno valor. Desta forma é possível se obter expressões para primeiras e segundas derivadas da função erro.

Exemplos

O desempenho da regularização mista na inversão de impedância acústica será avaliado por intermédio de dois testes numéricos. O primeiro mede a eficiência desta metodologia em recuperar um modelo idealizado formado por camadas tipo blocos (figura 1a). No segundo teste esta metodologia é usada para inverter um dado realista, modelado a partir de um perfil real de impedância, obtido a partir de medidas realizadas em um poço (figura 2).

Resultados

No primeiro teste, o resultado da inversão com regularização mista (figura 1e) é confrontado com o da regularização convencional que minimiza a distância entre o vetor solução e o modelo a priori (figura 1c) e o resultado obtido com a regularização VT apenas (figura 1g). Os dados modelados a partir do vetor de parâmetros obtidos a partir destas inversões são exibidos respectivamente nas figuras 1 f, d e h. Observa-se que em todos os casos os dados modelados (linha vermelha) possuem um ajuste excelente com o dado medido (linha azul). Já as impedâncias invertidas diferem bastante entre si. A regularização baseada na minimização do vetor de diferenças entre os parâmetros invertidos e o modelo de referência preservou bem o *trend* original de impedância (z=3), porém não recuperou a característica tipo bloco das camadas. O resultado da inversão usando apenas o critério de minimização da variação total recuperou bem esta característica, contudo fugiu completamente do *trend* original. O resultado que realmente mais se aproximou do modelo real foi aquele obtido através do uso da regularização mista, pois este manteve bem a característica das camadas e também respeitou o *trend* do modelo a priori.

Comparando os resultados da regularização mista (figura 2c) e da regularização convencional (figura 2b), obtidos a partir do dado realista (figura 2a). Nota-se claramente que a introdução do termo de variação total também trás vantagens neste caso. Observa-se que a regularização mista deu origem a um modelo menos suave com uma melhora significativa na recuperação e posicionamento das interfaces resultando em um aumento na resolução do resultado.

Conclusões

Os testes numéricos apresentados neste trabalho deixam claro que a regularização que combina o termo de variação total e o termo que mede a distância entre o modelo de parâmetros e o modelo a priori trás ganhos significativos em termos de resolução da inversão. Este ganho de resolução pode ser creditado à introdução do termo de variação total, que torna a inversão mais sensível à detecção de descontinuidades que representam as interfaces que separam as camadas sedimentares. A regularização VT não deve ser usada isoladamente, a presença do termo que pondera a distância entre a solução e o modelo de referência é fundamental, já que este faz com que o *trend* de impedância a priori seja respeitado. Para que esta inversão tenha sucesso é necessário fixar valores ótimos para os pesos de regularização. É aconselhável fixar primeiro um valor ótimo para μ_1, mantendo zerado o valor do fator que pondera a influência da regularização VT na solução. Após isto, deve-se começar a calibrar μ_2 começando-se por um valor pequeno. Um valor muito alto para este peso irá deixar a solução com aspecto artificial, concentrada em poucas camadas.

Referências

Aster, R. C., B. Borchers, and C. H. Thurber, 2005, Parameter estimation and inverse problems: Elsevier Academic Press.

Fletcher, R., 2000, Practical methods of optimization: John Wiley.

Martins, C. M., W. A. Lima, V. C. F. Barbosa e J. B. C. Silva, 2011, Total variation for depth-to-basement estimate: Part 1 – Mathematical details and applications. Geophysics, 76, 13-20.

Oliveira, S., L. Loures, F. Moraes e C. Theodoro, 2009, Nonlinear impedance inversion for attenuating media. Geophysics, 74, R111-R117

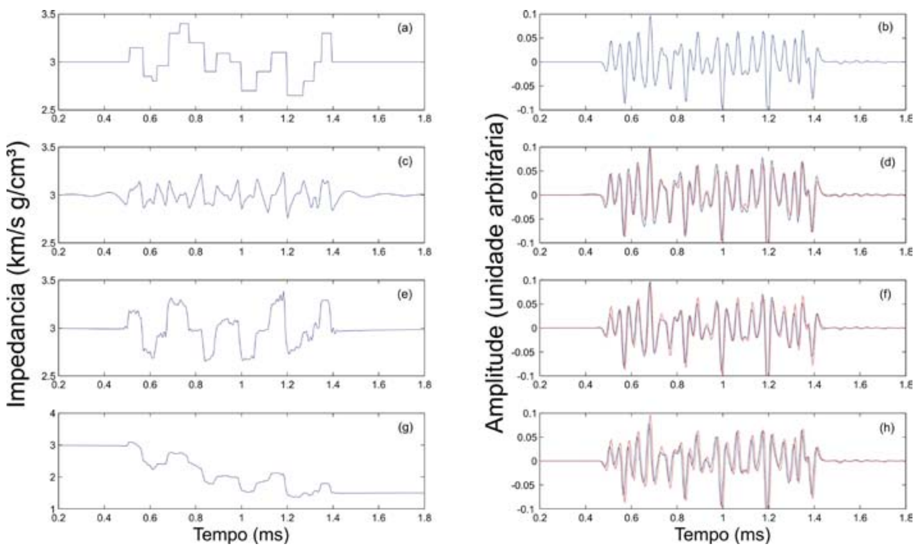

FIGURA 1- Modelo de impedância tipo blocos (a) dado obtido a partir do modelo tipo blocos (b) resultado da inversão usando regularização convencional (linha vermelha) (c) dado obtido a partir da inversão com regularização convencional (d) resultado da inversão usando regularização mista (e) dado obtido a partir da inversão com regularização mista (f) resultado da inversão com regularização VT (g) dado obtido a partir da inversão com regularização mista (linha vermelha).

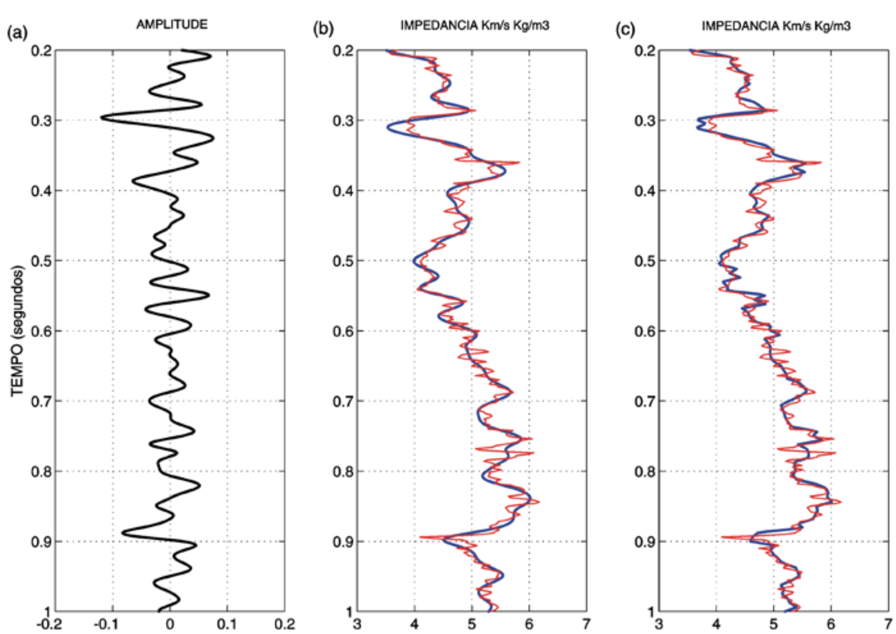

FIGURA 2 – Traço modelado a partir de um perfil de impedância extraído de um poço (a) comparação do modelo alvo (linha vermelha) com o resultado da inversão usando regularização convecional (linha azul) (b) comparação do modelo alvo (linha vermelha) com o resultado da inversão usando regularização mista (linha azul).