

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Felipe Prado Loureiro

**Modelagem Acústica no Domínio da
Transformada Wavelet**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Paulo Léo Manassi Osório

Rio de Janeiro, março de 2004



Felipe Prado Loureiro

Modelagem Acústica no Domínio da Transformada Wavelet

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Dr. Paulo Léó Manassi Osório

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Dr. Djalma Manoel Soares Filho

PETROBRAS

Dr. Marcos Azevedo da Silveira

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Dr. Marcos Antônio Gallotti Guimarães

PETROBRAS

Dr. Mauro Speranza Neto

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de março de 2004

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Felipe Prado Loureiro

Graduou-se em Engenharia de Controle e Automação pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2001. Prestou serviços nesta área no setor de pesquisa da empresa de engenharia *offshore* DSND Consub SA sob regime de estágio. Participou do 8º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica em setembro de 2003.

Ficha Catalográfica

Loureiro, Felipe Prado

Modelagem acústica no domínio da transformada wavelet / Felipe Prado Loureiro ; orientador: Paulo Léo Manassi Osório. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2004.

72 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Modelagem sísmica. 3. Migração sísmica. 4. Transformada wavelet. 5. Diferenciação no domínio da transformada walvelet. 6. Processamento paralelo. I. Osório, Paulo Léo Manassi. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Para meus pais, Pompeu e Mirtes,
pelo suporte e encorajamento.

Agradecimentos

Ao meu orientador Paulo Léo Manassi Osório, pela proposição do tema de minha dissertação e pelo estímulo em sua conclusão, que motivou minha vontade mesmo quando esta parecia desaparecer.

Aos professores Moisés Henrique Szwarcman e Mauro Speranza Neto, pela demonstração de confiança em minha capacidade quando do término de minha graduação e indicação ao programa de pós-graduação.

À PETROBRAS e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional e irrestrito oferecido no decorrer de minha jornada acadêmica. À minha família, pelo conforto de sua presença e pelo sossego de sua ausência.

Ao colega e amigo Alexandre de Lima Spinola, pelo exemplo de dedicação simultânea ao trabalho, aos estudos e à vida pessoal.

Aos colegas pós-graduandos Marcílio C. de Matos, Gustavo P. de Castro e Marco Antonio C. Santos, pelas discussões e conselhos sobre os diversos temas técnicos em torno da pesquisa para esta dissertação, em especial ao último, por suas maiores presença e insistência. Aos velhos amigos Cesar Matos, Fernando Esberard, Leonardo Wrigg, Rafael Gimenez, Renato Oliveira e Rodrigo Lessa pelos momentos de descontração e por posarem como modelos da diversidade de temperamentos, existente mesmo em um grupo tão unido.

Àqueles amores e desamores, que ficaram pouco tempo e deixaram grandes marcas, por me terem feito aprender sozinho que existem males que vêm para bem.

Aos professores que participaram da banca examinadora.

Resumo

Loureiro, Felipe Prado; Osório, Paulo Léo Manassi. **Modelagem Acústica no Domínio da Transformada Wavelet**. Rio de Janeiro, 2004. 72p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O processamento de sinais sísmicos é peça chave na exploração petrolífera. O caminho entre aquisição de dados e interpretação sísmica é composto por uma trilha de processos interdependentes, entre eles os processos de modelagem e migração. A dissertação apresenta a composição de um algoritmo de modelagem acústica 2D no domínio da transformada wavelet a partir de ferramentas próprias e outras já existentes na literatura. São estabelecidas as aproximações necessárias à solução em meios heterogêneos e à independência entre os subdomínios de processamento. Esta independência possibilita a exploração de técnicas de processamento paralelo. Através de exemplos, seu desempenho é avaliado com comparações à solução via diferenças finitas. Estas soluções são ainda submetidas ao mesmo processo de migração baseado em um terceiro modo de solução.

Palavras-chave

Modelagem sísmica; migração sísmica; transformada wavelet; diferenciação no domínio da transformada wavelet; processamento paralelo.

Abstract

Loureiro, Felipe Prado; Osório, Paulo Léo Manassi (Advisor). **Acoustic Modeling in the Wavelet Transform Domain**. Rio de Janeiro, 2004. 72p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Seismic signal processing is a key step to oil exploration. The path between data acquisition and seismic interpretation is composed by a sequence of interdependent processes, among which are modeling and migration processes. A 2D acoustic modeling algorithm in wavelet Transform domain, based on custom tools and tools already made known in literature is presented. Approximations necessary for the solution in inhomogeneous media and for complete independence between processing subspaces are established. Such independence allows exploration of parallel processing techniques. Throughout examples, performance is evaluated in comparison to finite-difference solution. These solutions are further processed by a migration technique based in yet another solution method.

Keywords

Seismic modeling; seismic migration; wavelet transform; differentiation in the wavelet transform domain; parallel processing.

Sumário

1	Introdução	14
2	Modelagem e migração sísmicas	17
2.1.	Introdução	17
2.2.	Propagação de ondas acústicas	17
2.3.	Métodos clássicos de solução da equação de onda	18
2.3.1.	Diferenças finitas	18
2.3.2.	Pseudo-espectral	20
2.4.	Outros métodos de solução da equação da onda	21
2.4.1.	Rotação de Fase Mais Interpolação	21
2.4.2.	<i>Split-step</i>	21
2.4.3.	Transformada wavelet	22
3	Modelagem acústica por Transformada wavelet	23
3.1.	Transformada wavelet	23
3.1.1.	Transformada wavelet discreta	25
3.1.2.	Transformada wavelet discreta por banco de filtros	28
3.1.3.	Transformada wavelet discreta em duas dimensões	30
3.2.	Diferenciação no domínio Wavelet	34
3.3.	Solução para meios homogêneos	36
3.4.	Solução para meios heterogêneos	37
3.4.1.	Construção dos campos de velocidades	37
3.5.	Tratamento de borda/limite	39
3.6.	Processos, otimizações e fluxograma	40
3.6.1.	Inclusão do termo forçado	41
3.6.2.	Reconstrução parcial	42
3.6.3.	Descrição do algoritmo	44
4	Resultados	48
4.1.	Desempenho do algoritmo proposto	48

4.1.1. Precisão dos sismogramas	66
4.1.2. Eficiência computacional	67
5 Conclusões	69
6 Referências bibliográficas	70

Lista de figuras

Figura 1: A função periódica senoidal e a função transiente wavelet Daubechies com 10 momentos nulos	24
Figura 2: Decomposição wavelet 1D por banco de filtros	29
Figura 3: Bandas de frequência na árvore de decomposição	30
Figura 4: Arvore de reconstrução (síntese) por banco de duas bandas	30
Figura 5: Partição de coeficientes wavelet 1D. Note o aumento do número (proporcional ao tamanho desenhado) de coeficientes resultantes devido aos resíduos da convolução.	31
Figura 6: Subespaços wavelet na forma de decomposição padrão.	32
Figura 7: Análise wavelet 2D em um nível. O modo alternado é derivado das sucessivas análises dos subespaços A_j .	32
Figura 8: Partição dos coeficientes 2D, modo alternado e esparso.	33
Figura 9: Construção dos modelos de velocidades para cada subespaço. Semelhante ao processo de transformada wavelet, porém somente o resultado da aproximação é considerado.	38
Figura 10: Construção dos modelos de velocidades para cada subespaço. Resultado da partição em dois níveis de decomposição.	39
Figura 11: Bordas de absorção. (a) matriz para diferenças finitas; (b) subespaços da matriz para transformada wavelet.	40
Figura 12: Fluxograma do algoritmo de modelagem via transformada wavelet	44
Figura 13: Sub-rotinas utilizadas no algoritmo de modelagem por transformada wavelet, mostradas na Figura 12	45
Figura 14: Exemplo 1. (a) o sinal $S(x,z) = \text{sen}(4x) + \text{sen}(7z)$; (b) o resultado da operação usando transformada wavelet; (c) o resultado da operação usando diferenças finitas; (d) erro presente em (b); (e) erro presente em (c); (f) faixas selecionadas em (a), (b) e (c); (g) faixas selecionadas em (d) e (e).	49
Figura 15: Exemplo 2. Construção do modelo de velocidades para os subespaços wavelet. Erros no posicionamento da segunda camada	

devido à decimação do campo de velocidades: (a) perfil de velocidades; (b) sismograma obtido por diferenças finitas (padrão); (c) sismograma obtido por wavelets e decimação direta; (d) sismograma obtido por wavelets e decimação após a filtragem proposta; (e) Comparação entre as amplitudes ao longo das linhas assinaladas em (b), (c) e (d).	51
Figura 16: Exemplo 3. (a) perfil abrupto de velocidades. (b) sismograma obtido por diferenças finitas. (c) sismograma obtido por wavelets.	52
Figura 17: Exemplo 3. (a) suavização do perfil de velocidades da figura 16. (b) sismograma obtido por diferenças finitas. (c) sismograma obtido por wavelets.	52
Figura 18: Comparação entre as amplitudes ao longo das linhas assinaladas nos sismogramas das figuras 16 e 17: (a) detalhe entre os instantes 1,0s e 1,3s; (b) detalhe entre os instantes 2,2s e 2,5s.	53
Figura 19: Exemplo 4. (a) modelo utilizado; (b) sismograma obtido por diferenças finitas; (c) sismograma obtido por transformada wavelet.	54
Figura 20: Exemplo 4. (a), (b) e (c) instantâneos (estados) do campo acústico em 0,16s, 0,18s e 0,22s, respectivamente, obtidos pelo método wavelet.	54
Figura 21: Exemplo 4. (a), (b) e (c) ampliação dos traços escolhidos na figura 19 (b) e (c).	55
Figura 22: Exemplo 4. (a) perfil migrado do sismograma da figura 19 (b); (b) perfil migrado do sismograma da figura 19 (c).	56
Figura 23: Exemplo 4. Traço escolhido pela linha vertical cheia nas figuras 22 (a) e (b).	56
Figura 24: Exemplo 4. Detalhe marcado pela região cinza na figura 23.	57
Figura 25: Exemplo 5. (a) modelo utilizado; (b) sismograma obtido por diferenças finitas; (c) sismograma obtido por transformada wavelet; (d), (e) e (f) ampliação dos traços escolhidos em (b) e (c).	58
Figura 26: Exemplo 6. Modelo utilizado, com duas interfaces inclinadas.	61
Figura 27: Exemplo 6. Sismogramas obtidos. (a) por diferenças finitas; (b), (c) e (d) por transformada wavelet com as funções db2, db4 e db10 respectivamente;	61
Figura 28: Exemplo 6. (a) traço escolhido nas figuras 27 (a), (b), (c) e (d);	

(b) ampliação da região escolhida em (a).	62
Figura 29: Exemplo 6. (a) a (d) modelos migrados a partir dos sismogramas das figuras 27 (a) a (d).	63
Figura 30: Exemplo 6. Traço escolhido pela linha vertical nas figuras 29 (a) a (d).	63
Figura 31: Exemplo 6. Ampliação do detalhe marcado em cinza na figura 30.	63
Figura 32: Exemplo 7. (a) modelo utilizado; (b) sismograma obtido por diferenças finitas; (c) sismograma obtido por transformada wavelet com a função db4; (d) traço escolhido em (b) e (c).	65
Figura 33: Exemplo 7. (a) e (b) Modelos migrados a partir dos sismogramas das figuras 32 (b) e (c).	66
Figura 34: Exemplo 7. Traço escolhido nas figuras 33 (a) e (b).	66

Dois importantes fatos, nesta vida, saltam aos olhos. Primeiro, que cada um de nós sofre inevitavelmente derrotas temporárias, de formas diferentes, nas ocasiões mais diversas. Segundo, que cada adversidade traz consigo a semente de um benefício equivalente. Ainda não encontrei homem algum bem-sucedido na vida que não houvesse antes sofrido derrotas temporárias. Toda vez que um homem supera os reveses, torna-se mental e espiritualmente mais forte. É assim que aprendemos o que devemos à grande lição da adversidade.

Andrew Carnegie