



Pedro Mário Cruz e Silva

**Visualização Volumétrica de Horizontes em Dados
Sísmicos 3D**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Informática da PUC-Rio.

Orientadores: Marcelo Gattass
Paulo Cezar Carvalho

Rio de Janeiro, julho de 2004

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

Pedro Mário Cruz e Silva

Pedro Mário Cruz e Silva graduou-se bacharel em matemática na UFPE (Universidade Federal de Pernambuco) em 1995. Concluiu o mestrado em matemática também na UFPE em 1998. Participa de projetos de pesquisa no Tecgraf/PUC-Rio (Laboratório de computação gráfica) desde 2000. Atualmente participa do desenvolvimento de um sistema de visualização de dados sísmicos realizado em parceria com a gerência de Tecnologia em Geofísica da Petrobras.

Ficha Catalográfica

Silva, Pedro Mário Cruz e

Visualização volumétrica de horizontes em dados sísmicos 3D / Pedro Mário Cruz e Silva ; orientadores: Marcelo Gattass, Paulo Cezar Carvalho. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Informática, 2004.

108 f. : il. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Informática.

Inclui referências bibliográficas.

1. Informática – Teses. 2. Visualização volumétrica. 3. Dados sísmicos 3D. 4. Rastreamento de horizontes. 5. Orientação local. 6. Atributos sísmicos instantâneos. I. Gattass, Marcelo. II. Carvalho, Paulo Cezar. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. IV. Título.

À minha família.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus pelo caminho que me foi reservado.

Aos meus pais Mário Tenório e Maria da Saúde pela educação recebida, pelo carinho, pelos cuidados e pelo amparo de sempre. Ao meu irmão Mário Sérgio, tios, primos e toda minha família pelo ótimo ambiente no qual cresci e vivo até hoje.

À minha esposa Patrícia, agradecimentos mais que especiais pelo incentivo, carinho, compreensão, apoio e companheirismo. A seus pais Maurício e Ângela pelo apoio irrestrito.

Ao meu orientador Professor Marcelo Gattass, por toda a confiança depositada em mim, toda a paciência, todo o suporte acadêmico e principalmente pela oportunidade de participar deste trabalho de pesquisa. Ao meu co-orientador Professor Paulo Cezar, pelas sugestões e comentários sempre precisos e relevantes.

A todos os professores e colegas do Departamento de Informática da PUC-Rio e do IMPA pelo ótimo ambiente acadêmico.

A todos os amigos do laboratório Tecgraf, principalmente à Carolina Alfaro e Sérgio Maffra pelas revisões feitas no texto da tese.

A Petrobras por todo suporte dado a esta pesquisa. Em especial a Francisco Aquino e Jurandyr Schmidt. A todos os amigos da Tecnologia de Geofísica, em especial ao Marcos Machado pela parceria no desenvolvimento desta pesquisa.

A todos os amigos e amigas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao CNPq e à PUC-Rio pelos auxílios concedidos sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Silva, Pedro. **Visualização Volumétrica de Horizontes em Dados Sísmicos 3D**. Rio de Janeiro, 2004. 108p. Tese de Doutorado - Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho apresentamos os aspectos da visualização volumétrica de horizontes em dados sísmicos 3D. Consideramos as abordagens de visualização volumétrica direta e indireta. Na abordagem direta investigamos o problema da seleção de horizontes usando funções de transferência. Apresentamos a técnica de opacidade 2D, que busca aumentar a capacidade de seleção dos horizontes para visualização. Comparamos a utilização dos atributos de fase instantânea, fase ajustada e fase desenrolada como segunda dimensão, enquanto a primeira é a amplitude sísmica. Ainda na abordagem direta, mostramos que o gradiente da amplitude sísmica não aproxima bem os vetores normais nos horizontes sísmicos. Sugerimos o gradiente da fase instantânea como solução para este problema. Na abordagem de visualização volumétrica indireta introduzimos uma modelagem de otimização para o problema de rastreamento de horizontes. Sugerimos um método heurístico baseado em uma estratégia gulosa para encontrar soluções que são boas aproximações para os horizontes mesmo na presença de estruturas geológicas complexas.

Palavras-chave

Visualização volumétrica; dados sísmicos 3D; rastreamento de horizontes; orientação local; iluminação de horizontes; atributos sísmicos instantâneos.

Abstract

Silva, Pedro. **Volume Visualization of Horizons in 3-D Seismic Data**. Rio de Janeiro, 2004. 108p. PhD Thesis - Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents aspects of volume visualization of seismic horizons in 3-D seismic data. We consider both the direct and indirect approaches of volume visualization. In the direct approach we investigate the problem of selecting horizons using transfer functions. We present the 2-D opacity technique, which seeks to increase the ability to select horizons for visualization. We compare the use of instantaneous phase, adjusted phase and unwrapped phase as the second dimension, while seismic amplitude is the first dimension. Also in the direct approach, we show that the seismic amplitude gradient is not a good approximation for the normal vectors in seismic horizons. We suggest the gradient of instantaneous phase as a solution to this problem. In the indirect volume visualization approach we introduce a new optimization model to overcome the seismic horizon tracking problem. We present a heuristic method based on a greedy strategy to find solutions that are good approximations of the horizon of interest, even for complex geological structures.

Keywords

Volume rendering; 3-D seismic data; seismic horizon tracking; local orientation; seismic horizon illumination; instantaneous seismic attributes.

Sumário

1 Introdução	14
1.1. Objetivos	15
1.2. Estrutura do documento da tese	16
2 Conceitos básicos	18
2.1. Dados sísmicos 3D	18
2.1.1. Aquisição	19
2.1.2. Processamento	20
2.1.3. Interpretação	22
2.2. Visualização volumétrica direta com texturas 3D	22
2.2.1. Amostragem da textura	24
2.2.2. Composição	24
2.2.3. Frequência de amostragem	25
2.2.4. Gerenciando a memória de textura	26
2.2.5. Iluminação	26
2.2.6. Função de transferência	29
2.2.7. Apresentação do algoritmo	30
2.2.8. Funções de transferência multidimensionais	34
3 Opacidade 2D	40
3.1. Motivação	40
3.2. Trabalhos relacionados	43
3.3. Soluções propostas	44
3.3.1. Amplitude Sísmica X Fase Instantânea	45
3.3.2. Amplitude Sísmica X Fase Ajustada	50
3.3.3. Amplitude Sísmica X Fase Desenrolada	56
3.4. Conclusões parciais	63
4 Iluminação de dados sísmicos	65
4.1. Motivação	65
4.2. Trabalho Relacionado	72
4.3. Solução Proposta	72

4.4. Resultados	74
4.5. Conclusões Parciais	81
5 Rastreamento de horizontes sísmicos	82
5.1. Trabalhos Relacionados	83
5.2. Modelagem de Otimização	83
5.2.1. Volume sísmico discreto	83
5.2.2. Conjunto de traços do dado	84
5.2.3. Horizonte Sísmico Discreto	85
5.2.4. Conjunto de Sementes	85
5.2.5. Função de Similaridade	86
5.2.6. Função de Semente Associada	87
5.2.7. Problema de Otimização	87
5.3. Método Proposto	88
5.3.1. Inicialização	89
5.3.2. Aprimoramento da Solução Corrente	89
5.3.3. Convergência	91
5.3.4. Análise de Complexidade	91
5.4. Resultados	93
5.5. Conclusões Parciais	98
6 Conclusões e trabalhos futuros	99
6.1. Conclusões	99
6.2. Trabalhos Futuros	100
7 Bibliografia	101
Apêndice A: Transformada de Hilbert	106

Lista de Símbolos

Capítulo 3

$X(t)$	Traço sísmico. Função de amplitude sísmica medida na direção vertical (tempo).
$Y(t)$	Transformada de Hilbert de um traço sísmico.
$h(t)$	Núcleo da transformada de Hilbert.
$*$	Sinal de convolução.
i	Identidade complexa. $i = \sqrt{-1}$.
$Z(t)$	Traço analítico. $Z(t) = X(t) + iY(t) \in \mathbb{C}$.
$A(t)$	Amplitude instantânea (envelope).
$\theta(t)$	Fase instantânea.
$\theta'(t)$	Fase ajustada.

Capítulo 4

$X(t, x, y)$	Campo escalar de amplitudes sísmicas.
$Y(t, x, y)$	Campo escalar das transformadas de Hilbert dos traços sísmicos.
$\theta(t, x, y)$	Campo escalar de fase instantânea.
$f(t)$	Frequência instantânea.
\vec{n}	Vetor normal.
(R, G, B)	Representação de cor RGB.

Capítulo 5

\mathbb{Z}	Conjunto dos números inteiros.
\mathbb{Z}^3	Espaço discreto $\{(i, j, k) \mid i, j, k \in \mathbb{Z}\}$.
U	Subconjunto de \mathbb{Z}^3 onde o dado sísmico está amostrado. $U = [0, NT - 1] \times [0, NX - 1] \times [0, NY - 1] \subset \mathbb{Z}^3$
\tilde{U}	Espaço discreto que representa o conjunto de traços do dado. $\tilde{U} = [0, NX - 1] \times [0, NY - 1]$.
$X(i, j, k)$	Valor da amplitude sísmica amostrada em um ponto de U .
$X : U \rightarrow \mathbf{R}$	

NT	Número de amostras em cada traço do dado.
NX	Número de <i>crosslines</i> do dado.
NY	Número de <i>inlines</i> do dado.
S	Conjunto de <i>voxels</i> de U escolhidos como sementes.
\tilde{v}	Traço $\tilde{v} = (x, y) \in \tilde{U}$ que contém o <i>voxel</i> $v = (t, x, y) \in U$.
σ	Função de similaridade entre <i>voxels</i> . $\sigma : U \times U \rightarrow \mathbf{R}$.
H	Conjunto de <i>voxels</i> contidos num horizonte sísmico. Pode ser interpretado como um par $H = (W, \tau)$.
H^+	Conjunto de <i>voxels</i> candidatos a entrar na solução H .
s	Função que associa uma semente a cada <i>voxel</i> de um horizonte. $s : H \rightarrow S$.

Lista de figuras

Figura 1 – Etapas da exploração baseada na sísmica de reflexão.	18
Figura 2 – Aquisição sísmica. Adaptada de Gerhardt (1998).	19
Figura 3 - Traço sísmico (esquerda), linha sísmica (centro) e volume sísmico (direita).	21
Figura 4 – Modelo de convolução. Adaptado de Gerhardt (1998).	21
Figura 5 – Modelo geológico. Adaptada de Robinson e Treitel (1980).	22
Figura 6 – Geometrias de amostragem. Adaptadas de Blythe e McReynolds (2000).	24
Figura 7 – Volume de dados dividido em tijolos.	26
Figura 8 – Iluminação de uma superfície de nível de um volume. Adaptado de Hadwiger et al (2002)	27
Figura 9 – Gradiente de uma superfície de nível. Adaptado de Westermann e Ertl (1998).	28
Figura 10 – <i>Voxel/s</i> com densidade baixa (esquerda), <i>voxel/s</i> com densidade alta (centro), <i>voxel/s</i> com densidade baixa e alta (direita).	29
Figura 11 – Mapeamento de dados da memória principal para a placa de vídeo.	32
Figura 12 – Cálculo de iluminação feito por <i>pixel</i> durante a visualização.	34
Figura 13 – Função de Transferência Bidimensional. Adaptada de Pfister et al (2001)	35
Figura 14 – Realce de fronteiras. Adaptado de Pfister et al (2001)	36
Figura 15 – Mapeamento de dados. Função de transferência 2D.	37
Figura 16 – Função de transferência 2D.	39
Figura 17 - Superposição dos intervalos de amplitudes dos eventos sísmicos.	41
Figura 18 - Dado sintético simulando uma estrutura de domo (anticlinal).	42
Figura 19 - Efeito da superposição de intervalos de amplitude na visualização volumétrica de dados sísmicos.	43
Figura 20 - Amplitude sísmica e fase instantânea de um traço sísmico real.	46
Figura 21 - Função de transferência 2D (esquerda) e visualização volumétrica do dado do Domo (direita).	47
Figura 22 - Evento de interesse isolado graças à opacidade 2D. Função de transferência (esquerda) e visualização volumétrica do evento (direita).	48
Figura 23 - Volume de dados real (esquerda). Eventos sísmicos reais	

destacados (direita).	49
Figura 24 - Função de opacidade 1D aplicada a um dado sísmico real (acima).	
Função de opacidade 2D aplicada a um dado sísmico real (abaixo).	50
Figura 25 - Artefatos na visualização volumétrica da fase igual a 0.	52
Figura 26 - Função de ajuste de fase. Expressão (esquerda) e gráfico (direita).	52
Figura 27 - Histogramas 2D de Amplitude X Fase Instantânea (esquerda) e Amplitude X Fase Ajustada (direita).	53
Figura 28 – Comparação entre Fase Instantânea e Fase Ajustada.	54
Figura 29 – Visualização volumétrica dos eventos positivos e negativos separadamente usando a fase ajustada.	55
Figura 30 – Fase desenrolada em 1D.	57
Figura 31 – Fase desenrolada em 2D. Dado sintético.	59
Figura 32 – Fase desenrolada em 2D. Dado real.	60
Figura 33 – Comparação da opacidade 2D com fase instantânea e fase desenrolada. Dado sintético.	61
Figura 34 – Comparação da opacidade 2D com fase instantânea e fase desenrolada. Dado real.	63
Figura 35 - Traço gerador do modelo plano com os eventos destacados.	66
Figura 36 – Visualização volumétrica do modelo plano.	67
Figura 37 – Visualização volumétrica direta com iluminação aplicada ao modelo plano.	68
Figura 38 – Modelo domo modificado. Modelo sintético com variação de amplitudes ao longo dos refletores.	70
Figura 39 – Iluminação aplicada a um horizonte com variação lateral de amplitudes.	71
Figura 40 – Superfícies de nível do modelo sintético do domo modificado.	71
Figura 41 – Imagem do modelo plano obtida pelo método proposto (esquerda). Imagem obtida pelo método tradicional (direita).	75
Figura 42 – Gráfico da amplitude sísmica, fase instantânea e frequência instantânea do traço gerador do modelo plano.	75
Figura 43 – Visualização do campo vetorial normal. Campo normal à superfície de uma esfera (esquerda). Campo normal a um horizonte sísmico obtido pela solução proposta (centro). Campo obtido pelo método tradicional (direita).	77
Figura 44 – Visualização volumétrica do dado sintético com variação de amplitudes ao longo dos horizontes: sem iluminação (esquerda), iluminado	

usando a solução proposta (centro) e iluminado da maneira tradicional (direita).	78
Figura 45 – Visualização volumétrica de um dado sísmico 3D real: sem iluminação (esquerda), iluminação usando o método proposto (centro) e iluminação usando a abordagem tradicional (direita).	79
Figura 46 – Visualização volumétrica. Adaptado de Silva et al (2003).	80
Figura 47 – Horizonte sísmico em um dado real.	93
Figura 48 – Evolução do algoritmo.	94
Figura 49 – Sementes e função de semente associada.	95
Figura 50 – Estrutura temporal do horizonte.	95
Figura 51 – Horizontes diferentes alinhados por uma falha geológica.	96
Figura 52 – Horizonte “A” rastreado usando uma ferramenta comercial.	97
Figura 53 – Horizonte “A” rastreado usando nosso método de rastreamento.	98