República Federativa do Brasil
Ministério da Indústria, Comércio Exterior
e Serviços
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) PI 0400468-0 B1

(22) Data do Depósito: 29/01/2004

(45) Data de Concessão: 09/05/2017

(54) Título: MÉTODO PARA PROCESSAMENTO DE DADOS SÍSMICOS DE SENSOR DUPLO PARA ATENUAR RUÍDO

(51) Int.Cl.: G01V 1/36

(30) Prioridade Unionista: 29/01/2003 US 10/353,293

(73) Titular(es): PGS EXPLORATION(UK) LIMITED

(72) Inventor(es): JOHN BRITTAN; JOEL GORDON STARR

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"MÉTODO PARA PROCESSAMENTO DE DADOS SÍSMICOS DE SENSOR DUPLO PARA ATENUAR RUÍDO".**

ANTECEDENTES DA INVENÇÃO

1. Campo da Invenção

A presente invenção refere-se, de forma geral, ao campo da prospecção geofísica. Mais particularmente, a invenção refere-se ao campo do processamento de dados sísmicos. Especificamente, a invenção é um método para atenuar o ruído nos dados sísmicos do sensor duplo.

2. Descrição da Técnica Relacionada

No campo da prospecção geofísica, o conhecimento da estrutura da subsuperfície da terra é útil para encontrar e extrair recursos minerais valiosos, tais como óleo e gás natural. Uma ferramenta bem-conhecida da prospecção geofísica é um levantamento sísmico. Um levantamento sísmico transmite as ondas acústicas emitidas de fontes de energia apropriadas para a terra e coleta os sinais refletidos usando uma formação de receptores. A seguir, técnicas de processamento de dados sísmicos são aplicadas nos dados coletados para estimar a estrutura da subsuperfície.

Em um levantamento sísmico, o sinal sísmico é gerado comunicando um sinal acústico para a terra de cima ou perto da superfície da terra, que então percorre para baixo para a subsuperfície da terra. O sinal acústico pode também percorrer para baixo através de uma massa de água em um levantamento sísmico marinho. Fontes de energia sísmica apropriadas usadas para comunicar o sinal acústico podem incluir explosivos ou vibradores na terra e pistolas de ar comprimido ou vibradores marinhos nos levantamentos sísmicos marinhos. Quando o sinal acústico encontra um refletor sísmico, uma interface entre dois estratos da subsuperfície tendo impedâncias acústicas diferentes, uma porção do sinal acústico é refletida de volta para a superfície, onde a energia refletida é detectada por um receptor sísmico. Tipos diferentes de receptores sísmicos detectam e medem a amplitude dos aspectos físicos diferentes das ondas sísmicas que passam.

Receptores sísmicos apropriados podem incluir detectores de

velocidade de partícula na terra e detectores de pressão de água na água. Algumas vezes, detectores de movimento da partícula ou de aceleração da partícula são usados no lugar dos detectores de velocidade da partícula. Ambos as fontes sísmicas e os receptores sísmicos podem ser preparados individualmente ou, mais comumente, em formações.

Nas zonas intermediárias entre a terra e águas profundas, tal como a terra úmida ou água rasa, ambos hidrofones e geofones são freqüentemente usados juntos, colocados juntos em pares e posicionados no fundo da massa de água. Esse procedimento é comumente chamado um levantamento com cabo no fundo do oceano ou um levantamento com cabo na baía.

Os dados sísmicos do fundo do oceano do sensor duplo freqüentemente contêm substancialmente mais ruído coerente do que os dados sísmicos somente do hidrofone. Esse ruído coerente pode ser atribuído à oscilação da lama/lodo e aos modos de onda espúria absorvida ou guiada (algumas vezes citados como ondas de torção ou ondas S espúrias). O geofone é muito mais sensível a esses tipos de ruído coerente do que o hidrofone. Esse fato tem sido usado em alguns métodos conhecidos na técnica para atenuar o ruído do sinal do geofone. Existem, entretanto, outros tipos de ruído contidos nos dados sísmicos de sensor duplo típico. Esses tipos de ruídos incluem, mas não são limitados a, reflexões múltiplas tal como repercussão da coluna de água, ruído transitório e efeitos devido às diferenças na junção do receptor. Existe um número de métodos conhecidos na técnica para atenuar tal ruído, usando as diferenças entre os sinais do hidrofone e geofone.

Por exemplo, Dragoset, Jr., W. H., na Patente U.S. Nº 5.365.492, "Method for Reverberation Suppression", emitida em 15 de Novembro de 1994, descreve um método para suprimir as repercussões da coluna de água nos dados sísmicos provenientes dos levantamentos com cabo no fundo do oceano do sensor duplo. Os sinais de pressão e velocidade com o ruído associado são detectados simultaneamente a partir dos sensores duplos colocados juntos. O sinal de pressão é, adaptativamente, filtrado e sub-

traído do sinal de velocidade para isolar uma marcação do ruído. A marcação ("assinatura") do ruído é adicionada de volta no sinal de velocidade com polaridade oposta para produzir um sinal de velocidade isento de ruído. O sinal de velocidade isento de ruído é multiplicado por um fator de escala e adicionado no sinal de pressão. A soma é autocorrelacionada e uma função, citada como uma função varimax, é calculada para a soma autocorrelacionada. O fator de escala é incrementado e o processo repetido até que a função varimax aproxime-se da unidade. Isso produz o fator de escala perfeito para suprimir as repercussões da coluna de água.

Dragoset, Jr., W. H. e Chambers, R. E., na Patente U.S. Nº 5.442.591, "Method for Adaptively Suppressing Noise Transients in Summed Co-Sensor Seismic Recordings", emitida em 15 de Agosto de 1995, descreve um método para atenuar o ruído transitório singular tal como causado por fontes biológicas, tal como peixe, nos dados sísmicos provenientes dos levantamentos do sensor duplo. Os sinais de pressão e velocidade com o ruído associado são detectados simultaneamente a partir dos sensores duplos colocados juntos. O método adaptável da patente '492 de Dragoset, discutida acima, é aplicado para representar em escala os sinais de velocidade para a amplitude dos sinais de pressão. Os sinais de pressão e velocidade são separadamente agrupados para formar reuniões de receptor comum. A razão R_1 das amplitudes das reuniões do receptor comum da velocidade e pressão é determinada. Na ponderação das janelas da zona, uma formação de razões R_{2i} das amplitudes dos sinais de pressão e velocidade é determinada. As razões R_1 e R_{2i} são multiplicadas para produzir um operador de equalização mi. Os sinais de pressão e velocidade são combinados com o operador de equalização em cada janela da zona de ponderação para produzir um dado transitório em escala de tempo isento de ruído.

Chambers, R. E., Sitton, G. A., e Paffenholz, J, na Patente U.S. Nº 5.572.483, "Method of Reducing Noise in Seismic Signals by Adaptive Filtering of a Noise Reference", emitida em 5 de Novembro de 1996, descrevem um método para atenuar o ruído nos dados sísmicos representados como traços sísmicos. O ruído suspeito fica localizado em um conjunto dos

traços sísmicos. Porções correspondentes dos traços contendo o ruído são alinhadas no tempo e depois empilhadas para formar um traço de ruído empilhado. O traço de ruído empilhado é duplicado em cada posição de traço correspondente no conjunto selecionado dos traços. Depois o procedimento de alinhamento no tempo é invertido para gerar traços de marcação de ruído nas posições de tempo originais. Filtros são gerados que minimizam a diferença entre os traços da marcação do ruído e os traços sísmicos originais. Os traços da marcação do ruído são filtrados e então subtraídos dos traços sísmicos. As etapas de geração de filtros, filtragem e subtração usam técnicas de filtragem adaptáveis lineares.

Rigsby, T.B. e Sanders, J.I., na Patente U.S. Nº 5.621.699, "Apparatus and Method of Calibrating Vertical Particle Velocity Detector and Pressure Detector in a Sea-Floor Cable with In-Situ Passive Monitoring", emitida em 15 de Abril de 1997, descrevem um método para suprimir as repercussões da coluna de água nos dados sísmicos provenientes dos levantamentos de sensor duplo. Os sinais do geofone e hidrofone com o ruído associado são detectados simultaneamente a partir dos sensores duplos colocados juntos. Os sinais de ruído do geofone e hidrofone que representam o ruído ambiente para o geofone e hidrofone, respectivamente, são obtidos. Um sinal de ruído relativo normalizado da diferença entre os sinais de ruído do geofone e hidrofone é determinado. As amplitudes relativas dos sinais do geofone e hidrofone são colocadas em escala por uma função dependente do sinal de ruído relativo normalizado. Depois, os sinais colocados em escala são linearmente combinados.

Starr, J. G., um co-inventor da presente invenção, na Patente U.S. Nº 5.754.492, "Method of Reverberation Removal from Seismic Data and Removal of Dual Sensor Coupling Errors", emitida em 19 de Maio de 1998 e na Patente U.S. Nº 5.825.716, "Method of Reverberation Removal from Seismic Data and Removal of Dual Sensor Coupling Errors", emitida em 20 de Outubro de 1998, descreve um método para suprimir as repercussões da coluna de água nos dados sísmicos provenientes dos levantamentos de sensor duplo. A patente '716 é uma divisão da patente '492. Um cam-

po de onda ascendente e descendente é determinado nos dados sísmicos. O campo de onda descendente é multiplicado pelo coeficiente de reflexão da superfície livre e então adicionado ao campo de onda ascendente.

A patente '492 e a patente '716 de Starr também descrevem um método para atenuar os efeitos da junção do receptor nos dados sísmicos provenientes das formações de sensor duplo. Um período de resposta de repercussão é primeiro determinado. Um primeiro filtro de equalização cruzada é construído como uma função do período de resposta da repercussão e um segundo filtro de equalização cruzada é construído como uma função dos dados sísmicos. Um filtro de junção inversa é derivado como uma função dos primeiro e segundo filtros. O filtro de junção inversa é então aplicado nos dados.

Geiser, J, Barr, F., e Paffenholz, J., na sua publicação "Vertical Component Coupling of OBC-Data", EAGE 64ª. Conferência & Exibição, Florença, Itália, 27-30 de Maio de 2002, descrevem um método para atenuar os efeitos da junção vertical nos dados sísmicos provenientes dos levantamentos com cabo no fundo do oceano com sensor duplo de três componentes. Assumindo que o hidrofone é perfeitamente unido no seu meio fluido, seu sinal de pressão é usado como um sinal de referência para o componente vertical do sinal de velocidade de um geofone. Uma relação de quadrados mínimos entre os sinais do componente vertical e de pressão é minimizada para produzir um fator de correção para o componente vertical do sinal de velocidade. A referência de Geiser, et al. não discute como seu método se aplicaria, se de alguma forma, nos dados sísmicos do sensor duplo de um componente.

SUMÁRIO DA INVENÇÃO

Um aspecto da invenção é um método para processamento de dados sísmicos provenientes de sensores de pressão e sensores de movimento de partícula colocados juntos simultaneamente gravados. Os dados sísmicos são processados primeiro determinando um campo de onda ascendente e um campo de onda descendente nos dados sísmicos. Em modalidades alternativas, o campo de onda ascendente pode ser usado como um

modelo de ruído para o campo de onda descendente ou o campo de onda descendente pode ser usado como um modelo de ruído para o campo de onda ascendente. O modelo de ruído é usado para remover o ruído dos outros campos de ondas.

Um outro aspecto da invenção é um método para levantamento sísmico. Um método de acordo com esse aspecto compreende preparar hidrofones e geofones colocados juntos em posições selecionadas no fundo de uma massa de água, acionar uma fonte de energia sísmica próxima dos hidrofones e geofones colocados juntos e gravar sinais detectados pelos hidrofones e geofones. Um campo de onda ascendente e um campo de onda descendente são determinados a partir dos sinais gravados. O ruído é removido de pelo menos um entre o campo de onda ascendente e o campo de onda descendente pelo uso de pelo menos um entre o campo de onda descendente e o campo de onda ascendente como um modelo de ruído.

Outros aspectos e vantagens da invenção se tornarão evidentes a partir da descrição e reivindicações que seguem.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

A invenção e suas vantagens podem ser mais facilmente entendidas por referência à descrição detalhada seguinte e os desenhos anexos, nos quais:

A FIGURA 1 mostra uma vista em elevação de um levantamento sísmico típico usando um cabo no fundo do oceano,

A FIGURA 2 mostra um fluxograma ilustrando os elementos de processamento de uma modalidade do método da invenção para o processamento dos dados sísmicos,

A FIGURA 3 mostra uma vista esquemática dos campos de ondas ascendente e descendente na coluna de água,

A FIGURA 4 mostra o sinal sísmico gravado de um campo de onda ascendente exemplar,

A FIGURA 5 mostra o campo de onda ascendente da FIGURA 4 depois da aplicação do método da invenção e

A FIGURA 6 mostra a diferença entre as FIGURAS 4 e 5.

Embora a invenção seja descrita em conjunto com suas modalidades preferidas, será entendido que a invenção não é limitada a essas. Ao contrário, a invenção é planejada para cobrir todas as alternativas, modificações e equivalentes que possam ser incluídos dentro do escopo da invenção, como definido pelas reivindicações anexas.

DESCRIÇÃO DETALHADA

A invenção refere-se, de forma geral, a métodos para atenuar o ruído nos dados sísmicos coletados de levantamentos com cabo no fundo do oceano de sensor duplo. Mais particularmente, a invenção inclui um método para atenuar o ruído coerente, tal como oscilação da lama e ondas S espúrias, no qual o geofone é mais sensível do que o hidrofone.

A FIGURA 1 mostra uma vista em elevação de um levantamento sísmico típico usando um cabo no fundo do oceano (ou fundo de água). Uma massa de água 101, que pode ser o oceano ou um lago ou semelhante, sobre uma porção da terra 102 é limitada na sua superfície por uma interface de água-ar 103 e no seu fundo por uma interface de água-terra 104. Um navio ou embarcação de levantamento sísmico 105 na massa de água 101 posiciona os cabos do fundo da água 106 no fundo da água 104 (somente um é mostrado, por simplicidade). O cabo no fundo da água 106 contém pares de sensores duplos colocados juntos (somente um par é mostrado, por simplicidade) espaçados ao longo do seu comprimento. Cada par de sensores tipicamente contém um hidrofone 107 e um geofone 108. A fonte sísmica 109 pode ser rebocada pelo navio de levantamento sísmico 105 ou por um outro navio de levantamento sísmico (não mostrado). A fonte sísmica 109 é rebocada através da massa de água 101 e é acionada para emitir ondas acústicas em intervalos selecionados na proximidade dos cabos no fundo da água 106. Os sinais dos pares de sensores (hidrofone 107 e geofone 108) são gravados pelo equipamento (não mostrado) geralmente disposto em ou formando parte do cabo no fundo da água 106. Depois os cabos no fundo da água 106 são movidos para uma localização diferente, a fonte sísmica 109 é novamente rebocada e acionada e os sinais são gravados. O processo é repetido até que o levantamento sísmico esteja completo sobre uma área

selecionada.

A FIGURA 2 mostra um fluxograma ilustrando as etapas de processamento de uma modalidade exemplar do método da invenção para processar os dados sísmicos. Em 201, os dados sísmicos são selecionados para processamento dos dados sísmicos. Os dados sísmicos são do tipo coletado dos levantamentos com cabo no fundo do oceano de sensor duplo. Pares de sensores colocados juntos são dispostos no fundo da água nos cabos do oceano. Os pares de sensores preferivelmente incluem pelo menos um sensor que detecta a pressão da água, e um sensor que detecta a velocidade da partícula das ondas sísmicas que passam por eles. Os sensores que detectam a pressão da água e detectam a velocidade da partícula são geralmente conhecidos na técnica como hidrofones e geofones, respectivamente. Entretanto a invenção não é limitada a esses dois sensores particulares. Outros sensores incluindo, mas não limitados a, detectores de movimento de partícula ou detectores de aceleração de partícula, podem ser usados com modificação simples apropriada do método da invenção. Para clareza conceptual somente, os dois sensores usados para produzir os dados sísmicos do sensor duplo serão citados como hidrofones e geofones.

Em 202, um sinal do hidrofone é recuperado dos dados sísmicos selecionados na etapa 201. Similarmente, em 203, um sinal do geofone é recuperado dos dados sísmicos selecionados em 201. O sinal do geofone recuperado, em 203, corresponde ao sinal do hidrofone recuperado, em 202. Isso significa que os sinais do hidrofone e geofone recuperados em 202 e 203, respectivamente, foram simultaneamente gravados de hidrofones e geofones colocados juntos no levantamento sísmico do sensor duplo que gerou os dados sísmicos selecionados em 201.

Hidrofones e geofones não respondem mecanicamente aos efeitos físicos correspondentes da pressão e velocidade, respectivamente, de uma onda sísmica que passa com sinais da mesma amplitude. As diferenças na resposta do sinal entre os geofones e hidrofones são devido às constantes de transdução diferentes ou respostas de fones para diferentes detectores determinando a conversão do efeito mecânico detectado em um

sinal elétrico. Os hidrofones e geofones também não se unem fisicamente no meio circundante com a mesma eficiência. Os hidrofones tipicamente se unem bem no meio de água circundante. Entretanto, os geofones em uma colocação de cabo no fundo do oceano, tipicamente não se unem bem no fundo da água. Geralmente não é praticável nem econômico prender manualmente os geofones no fundo da água.

Opcionalmente, em 204 e 205, os sinais do hidrofone e geofone recuperados em 202 e 203, respectivamente, são ajustados ou filtrados para compensar as diferenças intrínsecas na sua resposta ao sinal sísmico, se as respostas não são igualadas. Essas diferenças de resposta e seus filtros corretivos são bem-conhecidos na técnica. Essas diferenças de resposta incluem, mas não são limitadas a, diferenças entre hidrofones e geofones quanto a sua transdução, resposta de fone e eficiência de junção. Quaisquer tais filtros podem ser aplicados em um ou ambos os sinais do hidrofone ou geofone, como é bem-conhecido na técnica.

Visto que os dados do geofone contêm sinal mais ruído e os dados do hidrofone contêm primariamente sinal, um modelo do ruído pode ser obtido comparando os dados do geofone e os dados do hidrofone.

A FIGURA 3 mostra uma vista esquemática dos campos de ondas ascendente e descendente na coluna de água. Uma massa de água 301 sobre a terra 302 é limitada na superfície da água 303 por uma interface de água-ar e no fundo da água 304 por uma interface de água-terra, ambos bons refletores da energia acústica. Visto que a diferença na impedância acústica entre o ar e a água é muito grande, o coeficiente de reflexão na superfície da água 303 é substancialmente igual a -1. O sinal negativo indica uma inversão de polaridade, isto é, um desvio de fase de 180°. A diferença da impedância acústica entre a água e a terra não é muito grande, então o coeficiente de reflexão no fundo da água 304 é adotado como r. O valor de $r(-1 < r < 1)$ depende da impedância acústica do material na terra 302 justo no e abaixo do fundo da água 304 (isto é, a impedância acústica do leito do mar). Um campo de onda ascendente 305, retornando de pelo menos uma reflexão da interface entre o estrato subjacente na terra 302, entra na massa

de água 301 e prossegue para a superfície da água 303. O campo de onda é parcialmente refletido na superfície da água 303 e uma porção torna-se um campo de onda descendente 306. O campo de onda é parcialmente refletido no fundo da água 304 e uma porção novamente torna-se um campo de onda ascendente 307. Similarmente, o campo de onda é parcialmente refletido na superfície da água 303 e uma porção novamente torna-se um campo de onda descendente 308. Esse processo de múltiplas reflexões continua indefinidamente.

O cabo no fundo da água 309, posicionado na massa de água 301 no fundo da água 304, contém pares de sensores duplos colocados juntos espaçados ao longo do seu comprimento. Somente um cabo no fundo da água 309 e somente um par de sensores são mostrados, por simplicidade. Cada par de sensores tipicamente contém um hidrofone 310 e um geofone 311. Um campo de onda ascendente, tal como o campo de onda 305, passando o hidrofone 310 e o geofone 311 de baixo, geraria impulsos elétricos em ambos os sensores. Esse primeiro campo de onda ascendente 305 gerará um sinal elétrico positivo em ambos o hidrofone 310 e o geofone 311, por convenção industrial. Quando o campo de onda ascendente 305 parcialmente reflete na superfície da água 303, o campo de onda descendente resultante 306 tem uma inversão de fase de 180°. Dessa maneira, o hidrofone onidirecional 310 responderá para o campo de onda descendente de polaridade invertida 306 com um sinal elétrico negativo. Entretanto, o geofone unidirecional 311 responderá para o campo de onda descendente de polaridade invertida 306, agora vindo de cima, com um outro sinal elétrico positivo. O geofone 311 novamente inverteu a polaridade já invertida uma vez do sinal. Portanto, o campo de onda descendente 306 gera sinais com polaridade invertida entre os hidrofones 310 e os geofones 311.

Continuando, o campo de onda descendente de polaridade invertida 306 parcialmente reflete para fora do fundo da água 304 sem inversão de fase e o campo de onda ascendente resultante 307 passa um par de hidrofones 309 e de geofones 311 de baixo novamente. Dessa vez, o campo de onda ascendente com polaridade invertida 307 gera um sinal elétrico ne-

gativo no hidrofone 310 e um sinal elétrico negativo no geofone 311. Com uma outra reflexão parcial na superfície da água 303, o campo de onda descendente resultante 308 passou por uma outra inversão de fase de 180°, de volta para a polaridade original. Dessa maneira, o campo de onda descendente 308 gerará um sinal elétrico positivo no hidrofone 310 e um sinal elétrico negativo no geofone 311. Esse processo de alternação de sinais elétricos continua indefinidamente. Portanto, o sinal elétrico gerado pelo hidrofone 310 continua com polaridades negativa e positiva alternadas, enquanto que o sinal elétrico correspondente gerado pelo geofone 311 continua com polaridades positiva e negativa alternadas. Essas polaridades alternando diferentemente têm sido usadas na técnica para gerar campos de ondas ascendente e descendente a partir dos sinais do hidrofone e geofone.

A determinação dos campos de ondas ascendente e descendente pode ser feita por qualquer técnica conhecida na técnica do processamento sísmico. Um exemplo não limitador será mostrado aqui. Seguindo a análise nas colunas 3 e 4 de Starr, Patente U.S. Nº 5.754.492, discutida na seção de Antecedentes aqui, a polaridade relativa e a amplitude da onda P para qualquer dado ponto no tempo são determinadas pelo produto dos coeficientes de reflexão para cada reflexão sucessiva entre a superfície da água e o fundo da água.

Para detectores sísmicos localizados no fundo da água 304, a resposta de pressão P e a resposta da velocidade da partícula V podem ser expressas como funções da variável Z.

$$Z = e^{i\omega\tau},$$

onde *e* é o número Euler representando a função exponencial, i é a unidade imaginária $\sqrt{-1}$, ω é a freqüência e τ é o tempo de percurso em dois sentidos através da massa de água 301. O tempo de percurso em dois sentidos pode ser calculado pela expressão:

$$\tau = \frac{2d}{v\cos\theta},$$

onde *d* é a profundidade vertical da água, *v* é a velocidade da energia sísmica na água, e θ é o ângulo de incidência. Dessa maneira a resposta de pressão, *P(Z)*, em termos de Z, é dada pela equação:

$$P(Z) = Z^0 + (1 + r)Z^1 - r(1 + r)Z^2 + r^2(1 + r)Z^3 - ...+..., \quad (1)$$

onde r é o coeficiente de reflexão do fundo da água. Similarmente com a Equação (1), a resposta da velocidade da partícula, $V(Z)$, em termos de Z, é dada pela equação:

$$\frac{\alpha}{\cos\theta} V(Z) = Z^0 - (1 - r)Z^1 + r(1 - r)Z^2 - r^2(1 - r)Z^3 + ... = ... \quad (2)$$

onde α é a impedância acústica.

O cálculo das formas fechadas das Equações (1) e (2) produz as expressões:

$$P(Z) = 1 + \frac{(1 - r)Z}{1 + rZ} = \frac{1 + Z}{1 + rZ} \quad (3)$$

e

$$\frac{\alpha}{\cos\theta} V(Z) = 1 - \frac{(1 + r)Z}{1 + rZ} = \frac{1 - Z}{1 + rZ} \quad (4)$$

Retornando para a FIGURA 2, em 206, um campo de onda ascendente é determinado nos dados sísmicos. A determinação do campo de onda ascendente preferivelmente compreende combinar o sinal do hidrofone e geofone recuperado em 202 e 203, respectivamente. Em particular, a combinação dos dados do hidrofone e geofone preferivelmente compreende adicionar os sinais do hidrofone e geofone.

O campo de onda do vetor ascendente, $U(Z)$, é preferivelmente determinado pela adição das Equações (3) e (4), que fornece a seguinte expressão:

$$U(Z) = \frac{1}{2}\left[\frac{\alpha}{\cos\theta} V(Z) + P(Z)\right] = \frac{1}{2}\left[\frac{1+Z}{1+rZ} + \frac{1-Z}{1+rZ}\right] = \frac{1}{1+rZ}. \quad (5)$$

Em 207, um campo de onda descendente é similarmente determinado a partir dos dados sísmicos. A determinação do campo de onda descendente preferivelmente compreende combinar os dados do hidrofone e geofone recuperados em 202 e 203, respectivamente, para gerar um campo de onda descendente. Em particular, a combinação dos dados do hidrofone e geofone preferivelmente compreende subtrair os dados do hidrofone dos dados do geofone.

O campo de onda do vetor descendente com polaridade invertida, $D(Z)$, é preferivelmente determinado subtraindo a Equação (3) da Equa-

ção (4), que fornece a seguinte expressão:

$$D(Z)=\frac{1}{2}\left[\frac{\alpha}{\cos\theta}V(Z)+P(Z)\right]=\frac{1}{2}\left[\frac{1+Z}{1+rZ}-\frac{1-Z}{1+rZ}\right]=\frac{Z}{1+rZ}. \quad (6)$$

Depois que os campos de ondas ascendente e descendente são determinados, em 206 e 207, respectivamente, o sinal nos campos de ondas ascendente e descendente será separado por um desvio de fase linear, porém o ruído é similar nos dois campos de ondas. O campo de onda descendente pode ser usado, portanto, como um modelo de ruído para o campo de onda ascendente. Similarmente, o campo de onda ascendente pode ser usado como um modelo de ruído para o campo de onda descendente. A subtração adaptável pode então ser usada, em uma modalidade, para remover o ruído dos dados do geofone.

Em 208, o campo de onda ascendente gerado em 206 é filtrado com um filtro passa-faixa para manter somente a porção inferior do espectro de freqüência. Como uma matéria prática, o ruído sendo removido é geralmente limitado à porção inferior do espectro de freqüência. Dessa maneira, o modelo de ruído (o campo de onda tanto ascendente quanto descendente determinado em 206 e 207, respectivamente) é tipicamente filtrado para manter somente a faixa de passagem de freqüência do ruído. Tipicamente, essa porção inferior do espectro poderia compreender as freqüências menores do que aproximadamente 20Hz, mas a invenção não é limitada a essa faixa de passagem. Similarmente, em 209, o campo de onda descendente gerado em 207 é filtrado em filtro passa-faixa para manter somente a porção inferior do espectro de freqüência. Novamente, a porção inferior tipicamente poderia compreender as freqüências menores do que aproximadamente 20Hz, mas a invenção não é limitada a essa faixa de passagem.

Em 210, um dos campos de onda ascendente ou descendente filtrados em 208 e 209, respectivamente, é selecionado para uso como um modelo de ruído para o outro campo de onda, o outro campo de onda sendo o campo de onda descendente ou ascendente. O outro campo de onda então será citado como o "sinal de entrada". Se o campo de onda ascendente filtrado em filtro passa-faixa é usado como o modelo de ruído e o campo de

onda descendente é usado como o "sinal de entrada", então o processo continua como mostrado em 211. Alternativamente, se o campo de onda descendente filtrado em filtro passa-faixa é usado como o modelo de ruído, e o campo de onda ascendente é usado como o "sinal de entrada", então o processo continua como mostrado em 212.

Em 213, o ruído e a energia do sinal no "sinal de entrada" selecionado são separados pela subtração adaptável do modelo de ruído, como determinado em 211 ou 212 a partir do "sinal de entrada" particular selecionado em 210. Na subtração adaptável, um conjunto de filtros *f(t)* é designado, com base em um tamanho de janela e comprimento de filtro selecionados, que quando envolvidos com o "modelo de ruído" minimiza a energia total em um "sinal de saída". O "sinal de saída" como usado aqui significa o modelo de ruído (quer o campo de onda ascendente ou descendente depois da filtragem em filtro passa-faixa) envolvido com os filtros f(t), a convolução sendo subtraída do "sinal de entrada", (o outro do campo de onda ascendente ou descendente), ou como mostrado na expressão seguinte:

sinal de saída = sinal de entrada - (f(t) * modelo de ruído)| (7)

Nas modalidades de um método de acordo com a invenção, o "sinal de entrada" e os conjuntos de dados do modelo de ruído são, cada um, divididos em janelas separadas. As janelas podem ter, cada uma, comprimentos de janela de tempo e espaço especificados pelo usuário. De preferência as janelas se sobrepõem em ambas as direções de tempo e espaço por aproximadamente 50 porcento do comprimento da janela na direção do tempo e/ou espaço. Dessa maneira, cada amostra de tempo (separada nas bordas superior, inferior, esquerda e direita de uma reunião de traço) será copiada em quatro janelas. Depois, em algumas modalidades, em cada janela uma inclinação de co-seno ao quadrado é aplicada nas amostras do centro da reunião (a) para cima e para baixo (na direção do tempo) e (b) para a esquerda e para a direita (isto é, na direção x positiva).

A energia total *E* do sinal de saída será minimizada, em um sentido de quadrados mínimos, quando os filtros *f(t)* são apropriadamente determinados. A energia total *E* em cada janela é definida como:

$$E = \sum_{i}^{m} \sum_{j}^{n} \text{sinal de saída}[(i-1)\Delta t, (j-1)\Delta x]^2 \qquad (8)$$

onde cada janela contém amostras *m* no tempo e amostras *n* no espaço. Os filtros *f(t)* ótimos são filtros de convolução temporais que podem variar de janela para janela. Se qualquer janela de dados no modelo de ruído ou no sinal de entrada é inteiramente composta de zeros, então a subtração adaptável não operará nessa janela e o sinal de saída será equivalente ao sinal de entrada nessa janela.

A determinação do filtro dos quadrados mínimos é feita em uma base de janela por janela com os resultados independentes de janela para janela. Assim, as seções de sobreposição são copiadas múltiplas vezes, filtradas na multiplicação e então somadas no fim. Nessa modalidade, os filtros para cada janela são filtros Wiener de quadrados mínimos, que são calculados em uma maneira convencional usando o algoritmo de Wiener-Levinson.

Quando os filtros f(t) são determinados e a energia em cada janela é minimizada, o sinal de saída representa um campo de onda ascendente ou descendente tendo ruído coerente mínimo.

A FIGURA 4 mostra o sinal sísmico gravado de um campo de onda ascendente exemplar. O sinal sísmico inclui exemplos de ruído coerente causado por ondas S espúrias 401 e oscilação de lama 402. A FIGURA 5 mostra o campo de onda ascendente da FIGURA 4 depois da aplicação do método da invenção. Os efeitos do ruído coerente na FIGURA 4 foram substancialmente eliminados em 501 e 502. A FIGURA 6 mostra a diferença entre as FIGURAS 4 e 5.

Modalidades de um método de acordo com a invenção podem melhorar a interpretação dos levantamentos sísmicos com cabo no fundo da água de sensor duplo reduzindo a quantidade do ruído coerente presente nos dados proveniente de fontes tais como oscilação de lama e ondas S espúrias.

Deve ser entendido que o precedente é meramente uma descrição de modalidades específicas dessa invenção e que numerosas mudanças, modificações e alternativas às modalidades descritas podem ser feitas

de acordo com a descrição precedente sem se afastar do escopo da invenção. A descrição precedente, portanto, não é planejada para limitar o escopo da invenção. Ao contrário, o escopo da invenção é para ser determinado somente pelas reivindicações anexas e seus equivalentes.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para o processamento de dados sísmicos a partir de sensores de pressão e sensores de movimento de partícula colocados juntos simultaneamente gravados, que compreende:

determinar um campo de onda ascendente a partir dos dados sísmicos,

determinar um campo de onda descendente a partir dos dados sísmicos e **caracterizado por**

remover o ruído de pelo menos um entre o campo de onda ascendente e o campo de onda descendente pelo uso do outro entre o campo de onda descendente e o campo de onda ascendente como um modelo de ruído.

2. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** a determinação do campo de onda ascendente compreende:

recuperar sinais de movimento de partícula e pressão a partir dos dados sísmicos e

combinar os sinais de movimento de partícula e pressão.

3. Método de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado pelo fato de que** a combinação dos sinais do sensor de movimento de partícula e sensor de pressão compreende adicionar os sinais do sensor de movimento de partícula e sensor de pressão.

4. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** a determinação do campo de onda descendente compreende: recuperar sinais do sensor de pressão e sensor de movimento de partícula a partir dos dados sísmicos e combinar os sinais do sensor de pressão e sensor de movimento de partícula.

5. Método de acordo com a reivindicação 4, **caracterizado pelo fato de que** a combinação dos sinais do sensor de pressão e sensor de movimento de partícula compreende subtrair o sinal do sensor de pressão do sinal do sensor de movimento da partícula.

6. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado**

pelo fato de que adicionalmente compreende filtrar os dados sísmicos para compensar a diferença da transdução entre os sensores de pressão e os sensores de movimento de partícula.

7. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** adicionalmente compreende filtrar os dados sísmicos para compensar a diferença de resposta do fone entre os sensores de pressão e os sensores de movimento de partícula.

8. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** adicionalmente compreende filtrar os dados sísmicos para compensar a diferença da eficiência de junção entre os sensores de pressão e os sensores de movimento de partícula.

9. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** adicionalmente compreende filtrar o modelo de ruído para conter somente a faixa de passagem de freqüência do ruído.

10. Método de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado pelo fato de que** a faixa de passagem de freqüência do ruído tem um limite superior de no máximo cerca de 20 Hz.

11. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** a remoção do ruído compreende subtrair adaptativamente o modelo de ruído de pelo menos um dos campos de ondas ascendente e descendente.

12. Método de acordo com a reivindicação 11, **caracterizado pelo fato de que** a subtração adaptável compreende:

dividir o modelo de ruído e o pelo menos um dos campos de ondas ascendente e descendente em janelas separadas, as janelas tendo comprimentos de janela de tempo e espaço pré-selecionados, as janelas tendo uma sobreposição de 50 porcento em ambas as direções de tempo e espaço,

aplicar uma inclinação de co-seno ao quadrado nas amostras do centro de uma reunião de traço para cima, para a esquerda e para a direita.

13. Método de acordo com a reivindicação 11, **caracteriza-**

do pelo fato de que a subtração adaptável substancialmente remove o ruído do campo de onda ascendente.

14. Método de acordo com a reivindicação 11, **caracterizado pelo fato de que** a subtração adaptável substancialmente remove o ruído do campo de onda descendente.

15. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** os sensores de pressão compreendem hidrofones.

16. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** os sensores de movimento de partícula compreendem geofones.

17. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** os sensores de movimento de partícula compreendem sensores de aceleração.

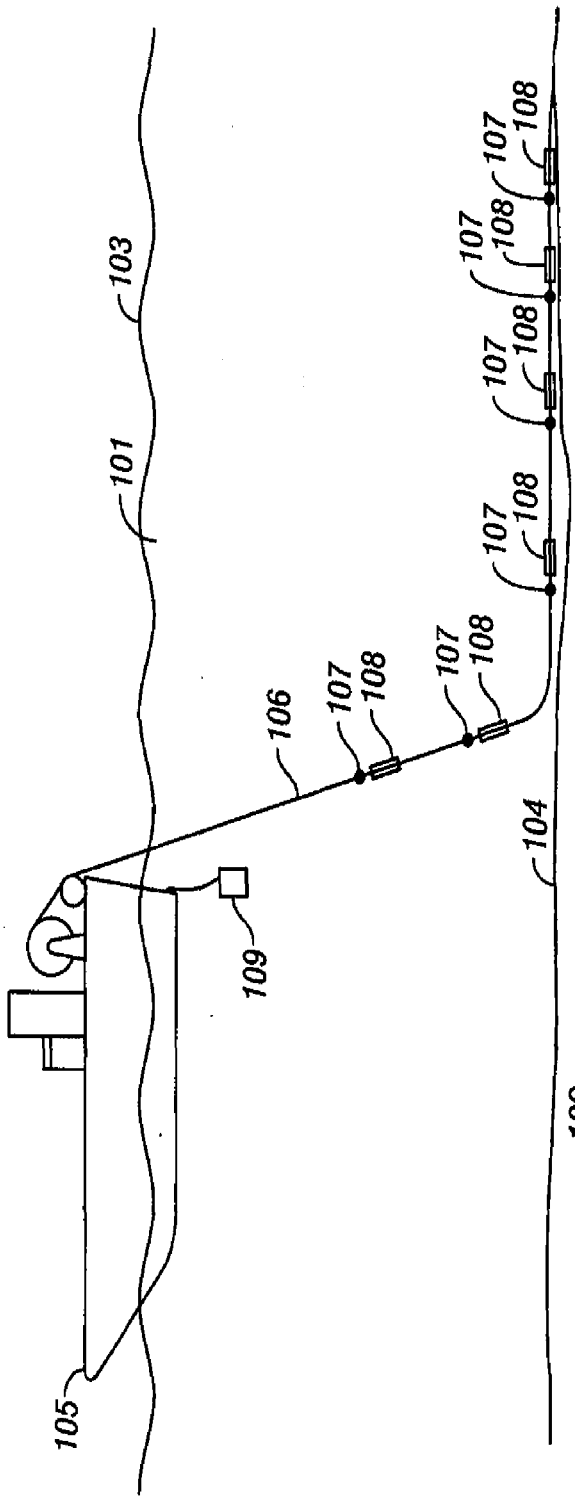

FIG. 1

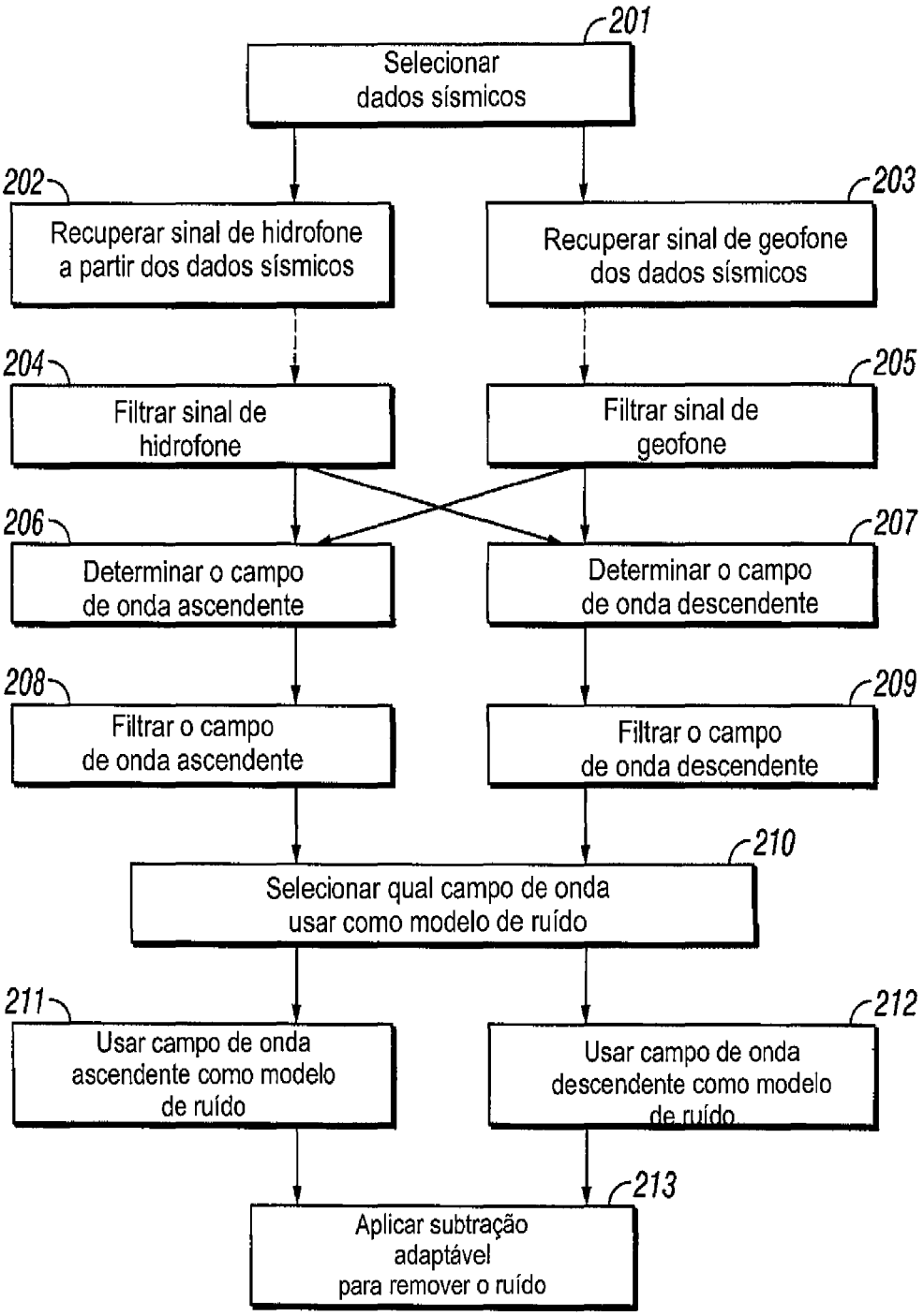
201
Selecionar dados sísmicos
202
Recuperar sinal de hidrofone a partir dos dados sísmicos
203
Recuperar sinal de geofone dos dados sísmicos
204
Filtrar sinal de hidrofone
205
Filtrar sinal de geofone
206
Determinar o campo de onda ascendente
207
Determinar o campo de onda descendente
208
Filtrar o campo de onda ascendente
209
Filtrar o campo de onda descendente
210
Selecionar qual campo de onda usar como modelo de ruído
211
Usar campo de onda ascendente como modelo de ruído
212
Usar campo de onda descendente como modelo de ruído
213
Aplicar subtração adaptável para remover o ruído

FIG. 2

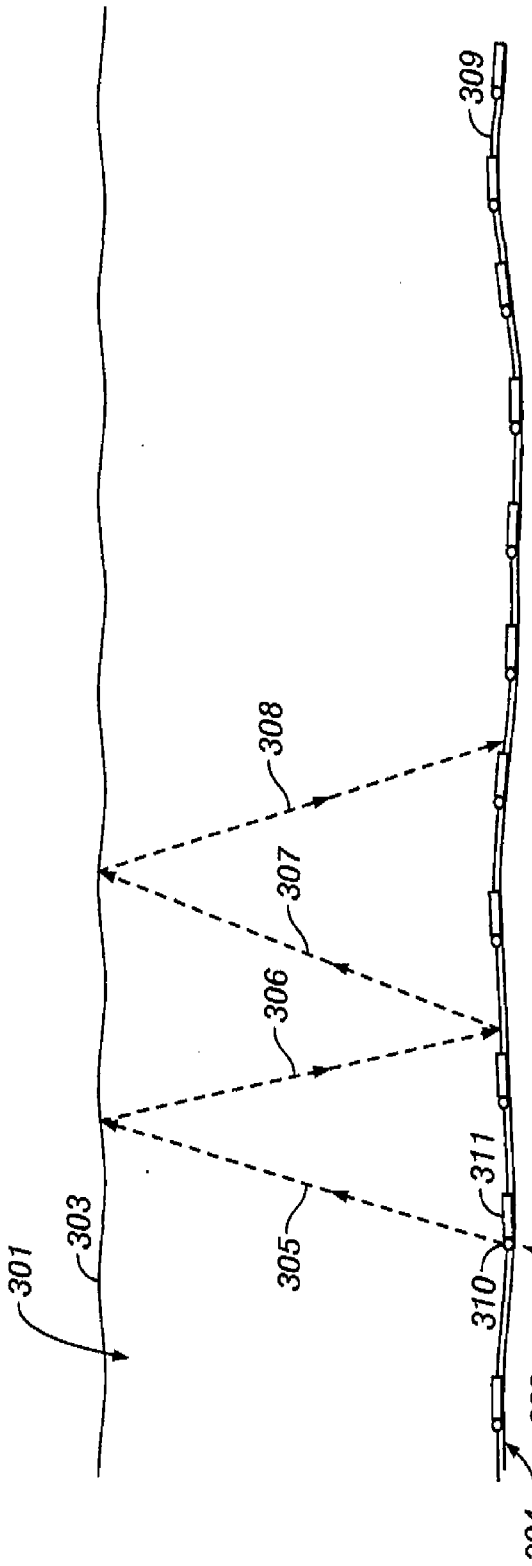

FIG. 3

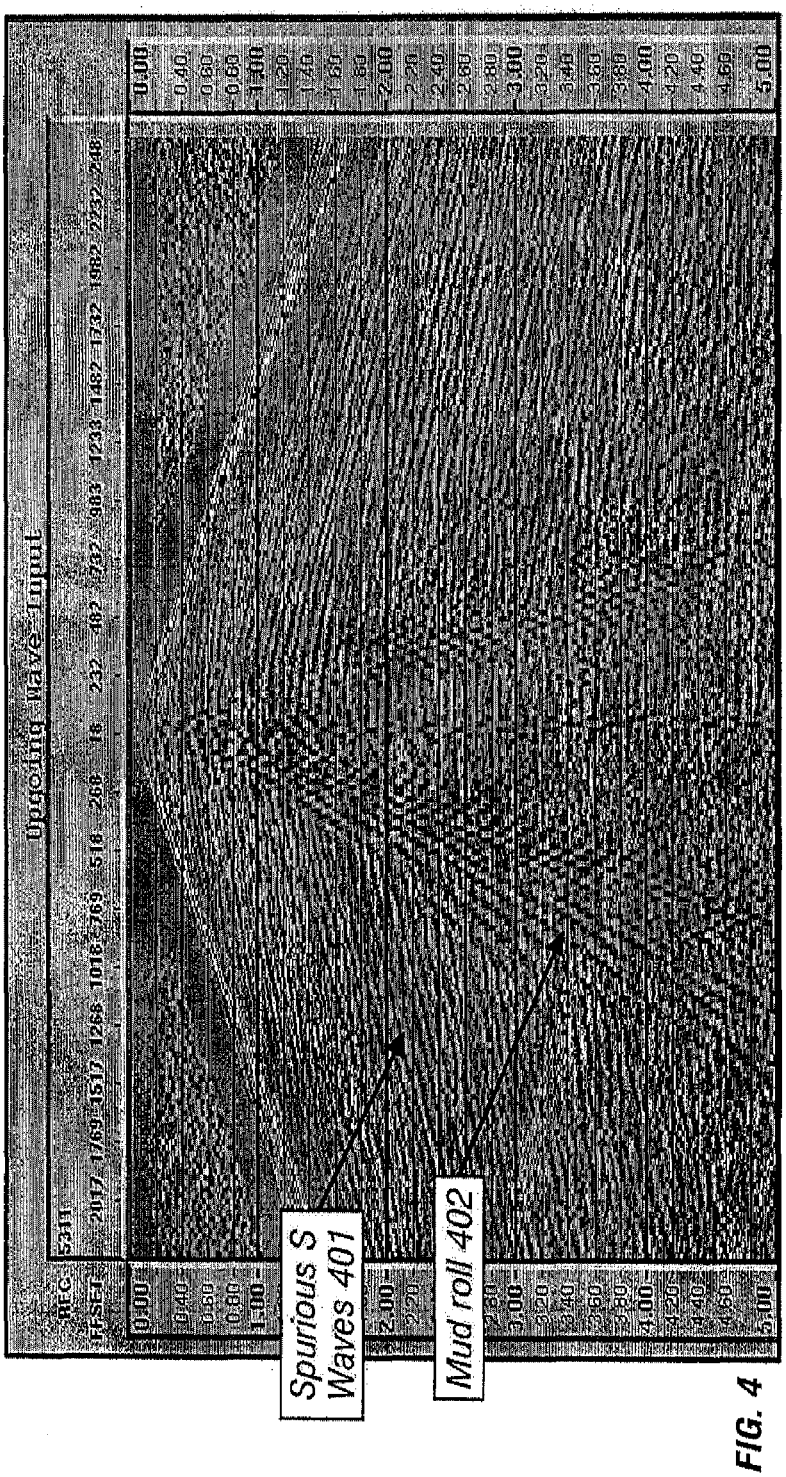
Upgoing wave-input
REC.
5311
OFFSET
2017 1769 1521 1273 1025 777 529 281 33 285 537 789 1041 1293 1545 1797 2049
0.00
0.40
0.80
1.00
2.00
2.20
2.80
3.00
3.20
3.40
3.60
3.80
4.00
4.20
4.40
4.60
5.00
Spurious S Waves 401
Mud roll 402

FIG. 4

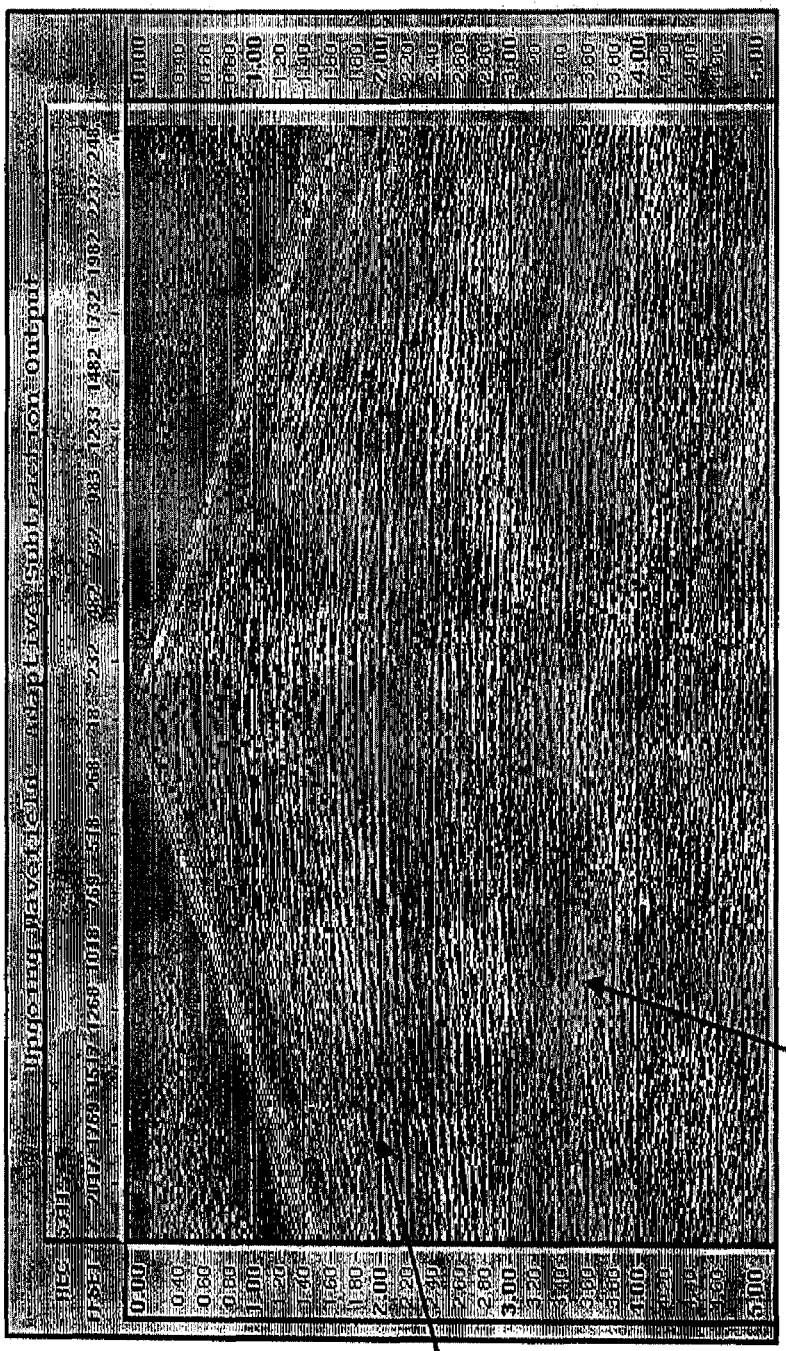

FIG. 5

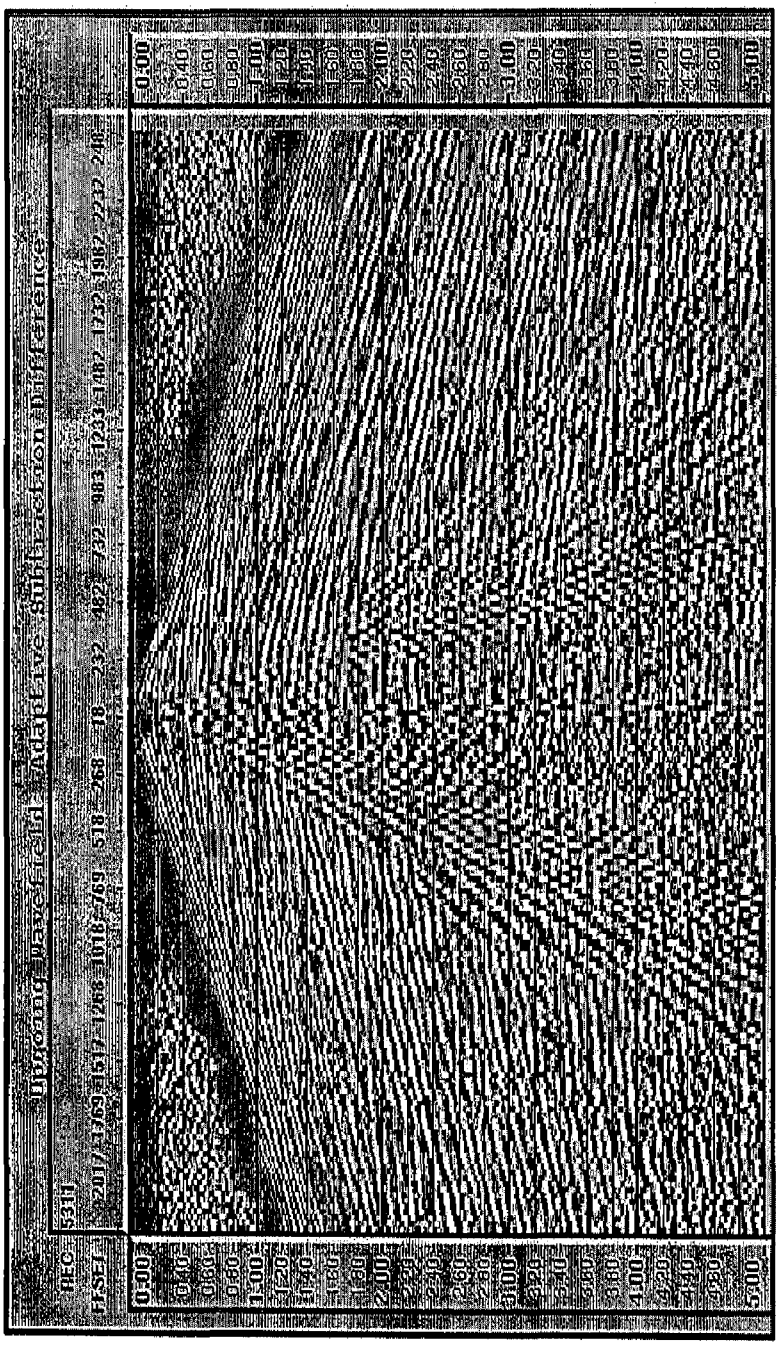

FIG. 6