República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) PI 0902827-7 B1

(22) Data do Depósito: 28/08/2009

(45) Data de Concessão: 09/04/2019

(54) Título: MÉTODO PARA PROSPECÇÃO GEOFÍSICA

(51) Int.Cl.: G01V 1/38.

(30) Prioridade Unionista: 29/08/2008 US 12/231,117.

(73) Titular(es): PGS GEOPHYSICAL AS.

(72) Inventor(es): FREDERICK JAMES BARR, JR.; STIG RUNE LENNART TENGHAMN.

(57) Resumo: MÉTODO PARA SOMAR SINAIS DE CABO REBOCADO DE SENSOR DUPLO USANDO ANÁLISE DE EFEITO FANTASMA DE CRUZAMENTO. A presente invenção refere-se a um sinal de velocidade de partícula fundido é gerado pela combinação de um sinal de velocidade vertical de partícula escalado em uma amplitude de alta frequência com o uso de um ângulo de chegada dependente do tempo como determinado por análise de efeito fantasma de cruzamento, com um sinal de velocidade de partícula simulado, calculado em uma amplitude de baixa frequência de um sinal de pressão que usa um filtro de variação de tempo baseado no ângulo de chegada dependente do tempo. Sinais de pressão e velocidade vertical de partícula combinados são gerados a partir dos sinais de pressão e velocidade de partícula fundido.

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"MÉTODO PARA PROSPECÇÃO GEOFÍSICA".**

ANTECEDENTES DA INVENÇÃO

Campo da Invenção

A presente invenção refere-se em geral ao campo da prospecção geofísica. Mais particularmente, a invenção está relacionada ao campo de atuação de ruído no fluxo de dados de cabo flutuador de sísmica marinho de sensor duplo.

Descrição da Técnica Relacionada

Na indústria de petróleo e gás, a prospecção geofísica é usada comumente para auxiliar na pesquisa para, e em avaliações de formações subterrâneas. As técnicas de prospecção geofísica produzem conhecimento da estrutura subsuperfície da terra, a qual é útil para descobrir e extrair recursos minerais valiosos, particularmente depósitos de hidrocarboneto tais como petróleo e gás natural. Uma técnica bem-conhecida de prospecção geofísica é um levantamento sísmico. Em um levantamento sísmico baseado em terra, um sinal sísmico é gerado na ou perto da superfície da terra e então se desloca para baixo dentro da subsuperfície da terra. Em um levantamento sísmico marinho, o sinal sísmico pode também descer através de um corpo de água que recobre a subsuperfície da terra. As fontes de energia sísmicas são usadas para gerar o sinal sísmico o qual, após propagar-se dentro da terra, é pelo menos parcialmente refletido por refletores sísmicos subsuperfície. Tais refletores sísmicos tipicamente são interfaces entre formações subterrâneas que têm propriedades elásticas diferentes, especificamente velocidade da onda sonora e densidade da rocha, as quais levam a diferenças na impedância acústica nas interfaces. A energia sísmica refletida é detectada e gravada por sensores sísmicos (também chamados receptores sísmicos) na ou perto da superfície da terra, em um corpo de cobertura de água, ou a profundidades conhecidas em furos de sondagem.

Os dados resultantes obtidos na execução de um levantamento sísmico são processados para fornecer informação relacionada à estrutura geológica e propriedades de formações subterrâneas na área levantada. Os

dados sísmicos processados são processados para exibição e análise do conteúdo de hidrocarboneto potencial destas formações subterrâneas. O objetivo do processamento de dados sísmicos é extrair tanta informação quanto possível dos dados sísmicos, relativas a formações subterrâneas para formar uma imagem adequada da subsuperfície geológica. Para identificar locações na subsuperfície da Terra onde há uma probabilidade de achar acúmulos de petróleo, grandes somas de dinheiro são gastas na obtenção, processamento, e interpretação de dados sísmicos. O processo de construir as superfícies refletoras que definem as camadas subterrâneas de interesse da terra, a partir dos dados sísmicos gravados, fornece uma imagem da terra em profundidade ou tempo.

A imagem da estrutura da subsuperfície da Terra é produzida para permitir a um intérprete selecionar locações com a maior probabilidade de ter acúmulos de petróleo. Para verificar a presença de petróleo, um poço tem que ser furado. Perfurar poços para determinar se depósitos de petróleo estão presentes ou não, é um empreendimento extremamente caro e demorado. Por esta razão, existe uma necessidade constante de melhorar o processamento e exibição de dados sísmicos, para assim produzir uma imagem da estrutura da subsuperfície da Terra que irá melhorar a capacidade de um intérprete, seja a interpretação feita por um computador ou por um ser humano, para estimar a probabilidade de que exista um acúmulo de petróleo em uma localização particular na subsuperfície da Terra.

As fontes sísmicas apropriadas para gerar o sinal sísmico em levantamentos sísmicos podem incluir explosivos ou vibradores. Levantamentos sísmicos marinhos tipicamente empregam uma fonte sísmica submersa rebocada por um navio e periodicamente ativada para gerar um campo de onda acústico. A fonte sísmica que gera o campo de onda pode ser de vários tipos, que incluem uma pequena carga de explosivo, uma descarga ou arco elétrico, um vibrador marinho, e, tipicamente, uma arma de ar. Tipicamente, uma fonte sísmica marinha não consiste em um único elemento fonte, mas de um arranjo distribuído espacialmente de elementos fonte. Esta disposição é particularmente verdadeira para armas de ar, atualmente a for-

ma mais comum de fonte sísmica marinha. Em um arranjo de armas de ar, cada arma de ar tipicamente armazena e rapidamente solta um volume diferente de ar fortemente comprimido, formando um impulso de curta duração.

Os tipos apropriados de sensores sísmicos, tipicamente incluem sensores de velocidade, particularmente em levantamentos em terra, e sensores de pressão de água, particularmente em levantamentos marinhos. Algumas vezes sensores de deslocamento de partículas, sensores de aceleração de partículas, ou sensores de gradiente de pressão são usados no lugar de ou adicionalmente a sensores de velocidade de partículas. Sensores de velocidade de partículas e sensores de pressão de água são comumente conhecidos na técnica como geofones e hidrofones, respectivamente. Sensores sísmicos podem ser dispostos sozinhos, mas mais comumente são dispostos em arranjos de sensores. Adicionalmente, os sensores de pressão e os sensores de velocidade de partículas podem ser dispostos juntos em um levantamento marinho, colocados em pares ou pares de arranjos.

Em um típico levantamento sísmico marinho, um navio de levantamento sísmico se desloca na superfície da água, tipicamente a aproximadamente 5 nós, e contém equipamentos de aquisição sísmica, tais como controle de navegação, controle de fonte sísmica, controle de sensor sísmico, e equipamento de gravação. O equipamento de controle de fonte sísmica faz com que uma fonte sísmica rebocada no corpo de água pelo navio sísmico atue a intervalos de tempo selecionados. Cabos flutuadores de sísmica, também chamados de cabos sísmicos, são estruturas alongadas iguais o cabos rebocadas no corpo da água pelo navio de levantamento sísmico que reboca a fonte sísmica ou por outro navio de levantamento sísmico. Tipicamente, uma pluralidade de cabos flutuadores de sísmica é rebocada atrás de um navio sísmico.

Quando o arranjo de armas de ar é disparado, um impulso de onda sonora se desloca em sentido descendente através da água e dentro da terra. A cada interface onde o tipo de rocha muda, uma parte daquela onda sonora é refletida de volta em direção a superfície e de volta dentro da camada de água. Após a onda refletida alcançar o cabo flutuador, a onda

continua a se propagar para a interface água/ar na superfície da água, a partir da qual a onda é refletida para baixo, e é novamente detectada pelos hidrofones no cabo flutuador. A superfície da água é um bom refletor e o coeficiente de reflexão na superfície da água é próximo a unidade em magnitude e é negativo em sinal para ondas de pressão. As ondas de pressão refletidas na superfície irão assim ser deslocadas de fase em 180 graus relativos às ondas se propagando para cima. A onda se propagando para baixo gravada pelo receptor é comumente referenciada como a reflexão de superfície ou sinal "fantasma". Devido à reflexão da superfície, a superfície da água atua como um filtro, o que cria cortes espectrais no sinal gravado, tornando difícil gravar dados fora de uma largura de banda selecionada. Devido à influência da reflexão de superfície, algumas frequências no sinal gravado são amplificadas e algumas frequências atenuadas.

Atenuação máxima ocorre a freqüências para as quais a distância de propagação entre o hidrofone de detecção e a superfície da água é a metade do tamanho da onda. A atenuação máxima de ondas de pressão ocorre a frequências para as quais a distância de propagação entre o hidrofone de detecção e a superfície da água é um quarto do tamanho de onda. O tamanho de onda de ondas acústicas é igual à velocidade dividida pela frequência, e a velocidade de uma onda acústica na água é aproximadamente 1500 metros/segundo. Desta maneira, a localização no espectro de frequência do corte espectral resultante é facilmente determinável. Por exemplo, para um cabo flutuador de sísmica a uma profundidade de 7 metros, e ondas com incidência vertical, a atenuação máxima ocorre a uma frequência de aproximadamente 106 Hz e a amplificação máxima ocorre a uma frequência de aproximadamente 54 Hz.

Um sensor de movimento de partículas, tal como um geofone, tem uma sensitividade direcional, enquanto um sensor de pressão, tal como um hidrofone não tem. Desta maneira, os sinais de campo de onda ascendentes detectados por um geofone e hidrofone localizados juntos estarão em fase, enquanto os sinais de campo de onda descendentes serão gravados 180 graus fora de fase. Várias técnicas têm sido propostas para o uso desta

diferença para reduzir os cortes espectrais causados pela reflexão de superfície e, se as gravações são feitas no fundo do mar, para atenuar múltiplos transmitidos pela água. Deveria ser observado que uma alternativa para ter o geofone e o hidrofone co-locados, é ter densidade espacial suficiente dos sensores para que os respectivos campos de onda gravados pelo hidrofone e geofone possam ser interpolados ou extrapolados para produzir os dois campos de onda na mesma localização.

É bem-conhecido na técnica que os sinais de pressão e movimento de partículas podem ser combinados para derivar ambos os campos de onda ascendentes e descendentes. Para as gravações do fundo do mar, os campos de onda ascendente e descendente podem posteriormente ser combinados para remover o efeito da reflexão de superfície e para atenuar múltiplos transmitidos na água no sinal sísmico. Para aplicações de cabo flutuador rebocado, entretanto, o sinal de movimento de partículas tem sido considerado como tendo utilidade limitada por causa do alto nível de ruído no sinal de movimento de partículas. Entretanto, se os sinais de movimento de partículas pudessem ser fornecidos para aquisição de cabo flutuador rebocado, o efeito de "fantasmas" de reflexão de superfície poderia ser removido dos dados.

Tem sido difícil, entretanto, alcançar o mesmo tamanho de banda nos dados de sensor de movimento como nos dados de sensor de pressão, por causa do ruído induzido por vibrações no cabo flutuador, o qual é sentido pelos sensores de movimento de partículas. O ruído é, entretanto, principalmente confinado as baixas frequências. Um caminho para reduzir o ruído é ter vários sensores, espaçados proximamente um do outro, e ligados em série ou em paralelo. Esta abordagem, entretanto, nem sempre reduz o ruído o suficiente para fornecer uma proporção de sinal-ruído satisfatória para o processamento sísmico adicional.

A aquisição convencional sísmica marinha 3D por cabo flutuador rebocado usualmente resulta em amostragem espacial assimétrica e dobra entre as direções em linha e cruzada. A densidade de amostras é mais densa na direção em linha (paralela aos cabos flutuadores rebocados) do que

na direção cruzada (perpendicular aos cabos flutuadores rebocados). A assimetria é devida a um espaçamento maior entre os receptores em cabos flutuadores separados do que entre receptores na mesmo cabo flutuador. Esta assimetria pode levar a uma sobreposição espacial dos dados de amostra na direção cruzada. A sobreposição interfere com os esforços para combinar os sinais de pressão e movimento de partículas para derivar os campos de onda ascendente e descendente.

Assim, existe uma necessidade de um método para atenuação de ruídos de baixa frequência achados em sinais de sensor de velocidade vertical de partículas, quando combinando sensor de pressão e sensor de velocidade vertical de partículas em dados de cabo flutuador de sísmica de sensor duplo, a qual é responsável por ângulos não-verticais de incidência, também conhecidos como ângulos de chegada.

BREVE SUMÁRIO DA INVENÇÃO

A invenção é um método para combinar sinais de pressão e sinais de velocidade vertical de partículas em cabos flutuadores rebocados de sensor duplo. Um sinal de velocidade de partículas fundido é gerado pela combinação do sinal de velocidade vertical de partículas gravado, escalado em uma amplitude de frequência superior usando um ângulo de chegada dependente do tempo como determinado pela análise de efeito fantasma de cruzamento, com um sinal de velocidade de partículas simulado, calculado em uma amplitude de frequência baixa de um sinal de pressão gravado usando um filtro de variação de tempo baseado no ângulo de chegada dependente do tempo. Os sinais de pressão e velocidade vertical de partículas combinados são gerados pela combinação do sinal de pressão gravado e os sinais de velocidade de partículas fundidos.

BREVE DESCRIÇÃO DAS figuraS

A invenção e suas vantagens podem ser entendidas mais facilmente pela referência a descrição detalhada a seguir e as figuras em anexo, nas quais:

A figura 1 é um fluxograma ilustrando uma modalidade da invenção para combinar sinais de pressão e de velocidade vertical de partículas

em cabos flutuadores rebocados de sensor duplo;

A figura 2 é um fluxograma ilustrando uma modalidade da invenção para gerar um sinal de velocidade de partículas fundido;

A figura 3 é um fluxograma ilustrando uma modalidade da invenção para combinar um sinal de pressão gravado ao sinal de velocidade de partículas fundido da figura 2;

A figura 4 é um fluxograma ilustrando uma modalidade da invenção para determinar ângulos de chegada da análise de efeito fantasma de cruzamento na figura 3;

A figura 5 é um fluxograma ilustrando uma modalidade da invenção para determinar uma correlação cruzada com atraso zero, normalizada de registros de efeito fantasma de cruzamento na figura 4;

A figura 6 é um gráfico do ângulo de chegada vertical como uma função do tempo de gravação;

A figura 7 é uma seção de registros sintéticos de pressão e velocidade vertical de partículas;

A figura 8 é uma seção dos registros sintéticos mostrados na figura 7 estendidos abaixo para 3,0 segundos;

A figura 9 é uma seção de registros sintéticos de pressão e velocidade vertical de partículas com um primeiro tempo de retardo de efeito fantasma de cruzamento;

A figura 10 é uma seção de registros sintéticos de pressão e velocidade vertical de partículas com um segundo tempo de retardo de efeito fantasma de cruzamento;

Ao mesmo tempo em que a invenção será descrita em conexão com suas modalidades preferenciais, ficará entendido que a invenção não está limitada a estas. Ao contrário, a invenção pretende cobrir todas as alternativas, modificações, e equivalências que possam ser incluídas dentro do escopo da invenção, como definido pelas reivindicações em anexo.

DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

Um cabo flutuador de sísmica de sensor duplo grava o campo de onda sísmico usando ambos os sensores de pressão e de velocidade verti-

cal de partículas, permitindo uma decomposição posterior do campo de onda total em componentes ascendentes e descendentes. O erro na estimativa destes componentes é aumentado pelo ruído em qualquer dos dois sensores, mas o ruído tipicamente é maior no sensor de velocidade vertical de partículas. O ruído indesejado de baixa frequência no sensor de velocidade vertical de partículas pode ser retirado antes da decomposição, pela substituição da parte de baixa frequência nos dados de velocidade vertical de partículas por um sinal de velocidade vertical de partículas calculado a partir do sinal de pressão. Esta predição leva em conta fatores que incluem as propriedades do meio de propagação, o ângulo de incidência da energia entrante e o "fantasma" que chega a partir da reflexão do campo de onde sísmico na superfície do mar. Este processo de substituição reduz a contribuição do sensor de velocidade vertical de partículas ruidoso.

Este processo de substituição de frequência é descrito de forma mais completa na Patente Nº US 7.359.283 B2, de Svein Vaage, e outros, entitulada "System for Combining Signals of Pressure Sensors and Particle Motion Sensors in Marine Seismic Streamers", depositado em 15 de abril de 2008, e atribuído a uma companhia afiliada da requerente da presente invenção. Vaage e outros descrevem um método para a combinação de sinais de um sensor de pressão e um sensor de movimento de partícula gravado em um cabo flutuador de sísmica marinho para reduzir o ruído no sinal de sensor de pressão e no sinal de sensor de movimento de partícula combinados, , o sinal do sensor de pressão gravado tem uma largura de banda que compreende uma primeira amplitude de frequência e uma segunda amplitude de frequência, a primeira amplitude de frequência que são as frequências mais baixas do que a segunda amplitude de frequência, e o sinal do sensor de movimento de partículas gravado que tem uma largura de banda que compreende pelo menos a segunda amplitude de frequência. O método compreende calcular um sinal do sensor de movimento de partículas na primeira amplitude de frequência a partir do sinal do sensor de pressão gravado, e desse modo gerar um sinal de sensor de movimento de partículas simulado na primeira amplitude de frequência, fundindo o sinal do sensor de

movimento de partículas simulado apenas na primeira amplitude de frequência com o sinal do sensor de movimento de partículas gravado na segunda amplitude de frequência para gerar um sinal do sensor de movimento de partículas fundido que tem substancialmente a mesma largura de banda que a largura de banda do sinal do sensor de pressão gravado, e então combinar o sinal do sensor de pressão gravado e o sinal de sensor de movimento de partículas fundido para processamento adicional.

A invenção supera os problemas de sobreposição espacial por fornecer um método que executa todas as operações em cada par correspondente de registros gravados de pressão e velocidade vertical de partículas em cada estação receptora do cabo flutuador. Assim, o método da invenção não requer modificações na geometria de gravação de aquisição para evitar a sobreposição espacial.

A invenção emprega os sinais combinados dos sensores de pressão (tipicamente hidrofones) e sensores de velocidade de partículas vertical (tipicamente geofones) localizados em cabos flutuadores de sísmica. Os sinais combinados podem então ser utilizados para gerar os componentes ascendentes e descendentes do campo de ondas, os quais são úteis para processamento sísmico adicional, tal como atenuação de múltiplos em dados sísmicos marinhos. Visto que um sinal de velocidade vertical de partículas gravado é frequentemente contaminado por ruído de baixa frequência devido às vibrações no cabo flutuador rebocado, a proporção sinal-ruído para os sinais combinados poderia ser insatisfatória. O sinal de velocidade vertical de partículas pode ser calculado a partir do sinal do sensor de pressão dentro de uma dada amplitude de frequência se o espectro do sinal do sensor de pressão tiver uma proporção sinal-ruído satisfatória dentro desta amplitude de frequência (e não tiver cortes dentro desta amplitude de frequência) e se a profundidade dos sensores de pressão e velocidade de partículas vertical for conhecida. Se a profundidade dos sensores for desconhecida, a profundidade pode ser calculada a partir da frequência dos cortes no espectro introduzidos pela reflexão de superfície, um processo que é bem-conhecido na técnica.

A parte de baixa frequência do sinal de velocidade de partículas vertical tipicamente necessitará ser substituído porque ele tem uma proporção sinal-ruído baixa. A parte correspondente do sinal do sensor de pressão a ser usada para calcular o sinal de movimento de partículas terá tipicamente uma boa proporção sinal-ruído nesta amplitude de frequência baixa. Portanto, a profundidade do sensor de pressão é escolhida preferencialmente tal que a frequência do primeiro corte espectral no sinal do sensor de pressão causado pela reflexão de superfície seja maior do que a amplitude de frequência baixa na qual o sinal de velocidade vertical de partículas é calculado e substituído.

O método da invenção é computar os ângulos de chegada não-verticais $\phi(t)$, a cada estação de recepção de sensor duplo, como uma função do tempo de gravação *t*, a partir da reflexão fantasma atrasos de tempo dos eventos de reflexão, os quais dependem das velocidades horizontais aparentes dos eventos de reflexão nos tempos no domínio de tempo-deslocamento da fonte para receptor (*x,t*), como determinado das análises de efeito fantasma de cruzamento. Se o sinal de velocidade vertical de partículas gravado *g(t)* não estiver corrompido pelo ruído, então cada amostra de tempo daquele sinal de velocidade vertical de partículas gravado *g(t)* é simplesmente escalado pelo fator $\frac{1}{\cos[\phi(t)]}$ antes de combiná-lo com seu correspondente sinal de pressão gravado *h(t)*. Se, entretanto, o sinal de velocidade vertical de partículas gravado *g(t)* estiver corrompido pelo ruído, então a invenção fornece um método eficaz para manipular a computação de substituição de frequência baixa do sinal de velocidade vertical de partículas.

As figuras 1-5 mostram fluxogramas ilustrando modalidades da invenção para atenuar ruídos de frequência baixa em dados de cabo flutuador de sísmica de sensor duplo. A figura 1 é um fluxograma que ilustra uma descrição geral da invenção. As figuras 2-3 são fluxogramas que ilustram partes particulares adicionais da invenção como descrito na figura 1. A figura 4 é um fluxograma que ilustra a análise de efeito fantasma de cruzamento para determinação de ângulos de chegada na figura 3. A figura 5 é um fluxograma que ilustra a correlação cruzada de atraso zero e normalizada em-

pregada na análise de efeito fantasma de cruzamento na figura 4.

A figura 1 é um fluxograma ilustrando uma modalidade da invenção para combinar os sinais de pressão e os sinais de velocidade vertical de partículas em cabos flutuadores rebocados de sensor duplo.

No bloco 11, um sinal de velocidade de partículas fundido é gerado pela fusão de um sinal de velocidade vertical de partículas, escalado em uma amplitude de frequência mais alta usando um ângulo de chegada dependente do tempo como determinado pela análise de efeito fantasma de cruzamento, com um sinal de velocidade de partículas simulado, calculado em uma amplitude de frequência baixa a partir de um sinal de pressão gravado usando um filtro com variação temporal baseado no ângulo de chegada dependente do tempo.

No bloco 12, os sinais de pressão e velocidade vertical de partículas combinados são gerados pela combinação do sinal de pressão gravado e dos sinais de velocidade de partículas fundidos do bloco 11.

A figura 2 é um fluxograma ilustrando uma modalidade da invenção para gerar um sinal de velocidade de partícula fundido. A figura 2 ilustra em mais detalhes a parte da invenção discutida no bloco 11 da figura 1 acima.

No bloco 21, os sinais de pressão *h(t)* e sinais de velocidade vertical de partículas *g(t)* são gravados em uma estação receptora em um cabo flutuador rebocado de sensor duplo. Está dentro do escopo da invenção que outros tipos de sensores sejam empregados na invenção. Assim, para generalização, os sinais gravados serão referenciados como sinais de pressão em vez de sinais de sensor de pressão e como sinais de velocidade de partículas em vez de sinais de sensor de velocidade de partículas. Os outros tipos de sensores sísmicos que poderiam ser incluídos, mas não estão limitados a, sensores de velocidade de partículas multidirecional, sensores de deslocamento de partículas, sensores de aceleração de partículas, ou sensores de gradiente de pressão para serem usados no lugar de ou adicionalmente aos sensores de velocidade vertical de partículas. Os sensores de pressão e de velocidade vertical de partículas podem ser dispostos sozi-

nhos, mas mais comumente são dispostos em arranjos de sensores. Adicionalmente, os sensores de pressão e sensores de velocidade de partículas são tipicamente posicionados juntos nos cabos flutuadores, colocados em pares ou em pares de arranjos.

O método da invenção emprega sensores de movimento de partículas que são responsivos aos movimentos de partículas do meio ao qual os sensores de movimento estão acoplados, tipicamente água. Em geral, os sensores de movimento de partículas podem ser responsivos ao deslocamento das partículas, a velocidade das partículas, ou a aceleração das partículas no meio. Os sensores de velocidade de partículas são tipicamente empregados e assim são usados para ilustrar a presente invenção. Se forem usados sensores de movimento que sejam responsivos a posição, o sinal de posição é preferencialmente derivado para convertê-lo em um sinal de velocidade, por meios computacionais bem-conhecidos na técnica. Se sensores de movimento são usados os quais são responsivos a aceleração (tal como acelerômetros), então o sinal de aceleração é integrado para convertê-lo em um sinal de velocidade, por meios computacionais bem-conhecidos na técnica.

No bloco 22, o sinal de pressão gravado $h(t)$ e o sinal de velocidade vertical de partículas $g(t)$ do bloco 21 são transformados temporalmente de um domínio de tempo para fornecer $H(\omega)$ e $G(\omega)$, respectivamente, em um domínio de frequência. Na discussão a seguir, os sinais no domínio tempo são denotados por letras minúsculas, enquanto os mesmos sinais no domínio frequência são denotados pelas correspondentes letras maiúsculas. Aqui, ω é a frequência radial em radianos/segundo, igual a $2\pi f$ para a frequência temporal f em Hertz. Em uma modalidade ilustrada da invenção, os cálculos (e operações seguintes) são feitos no domínio frequência. Assim, as transformações podem ser feitas por transformação temporal, bem-conhecida, tal como, por exemplo, transformação Fourier. Entretanto, esta escolha de transformação é por conveniência apenas e não significa uma limitação da invenção.

Adicionalmente, os sinais de pressão e velocidade vertical de

partículas transformados, $H(\omega)$ e $G(\omega)$, respectivamente, são corrigidos para diferenças relativas nas funções de transferência de instrumentos, que correspondem a respostas de impulso de instrumentos no domínio de tempo. Estas correções poderiam estar ou corrigindo a amplitude e fase dos sinais de pressão para corresponder aos sinais de velocidade de partículas, ou, em uma modalidade alternativa, corrigindo os sinais de velocidade de partículas para corresponderem aos sinais de pressão, ou, em uma modalidade alternativa adicional, corrigido ambos os conjuntos de dados para uma base comum. A correção para diferenças relativas em respostas de impulso de instrumentos é bem-conhecida na técnica. Finalmente, um escalamento de amplitude igual à impedância acústica na água é aplicado, preferencialmente aos sinais de velocidade de partículas para correção das diferenças relativas nas amplitudes de pressão e velocidade de partículas. Isto também é bem-conhecido na técnica.

No bloco 23, um primeiro conjunto de ângulos de chegada $\{\phi_j\}$ é selecionado. O primeiro conjunto de ângulos de chegada $\{\phi_j\}$ é selecionado para cobrir uma amplitude de ângulos de chegada, medidos a partir da vertical, que se espera sejam encontrados para pequenas ondulações de reflexão nos sinais de pressão gravados $h(t)$ e sinais de velocidade vertical de partículas $g(t)$ obtidos no bloco 21. O primeiro conjunto de ângulos de chegada $\{\phi_j\}$ pode ser designado como o conjunto $\{\phi_j$, *para* $j = 0,1,2,...,J\}$ para alguma quantidade total selecionada dos ângulos de chegada iguais a $J+1$. Em uma modalidade exemplo com $J = 60$, um conjunto de 61 ângulos de chegada ϕ_j são iguais ao conjunto $\{\phi_j\} = \{0°,1°,2°,...,60°\}$, que corresponde a $j = 0,1,2,...,60$, respectivamente.

No bloco 24, um ângulo de chegada ϕ_j é selecionado do primeiro conjunto de ângulos de chegada $\{\phi_j\}$ no bloco 23. Preferencialmente, os ângulos de chegada são selecionados em uma maneira sistemática, tal como avançar sequencialmente através dos ângulos de chegada ϕ_j na ordem $j = 0,1,2,...,J$.

No bloco 25, um sinal de velocidade de partícula simulado $G_{j-}^{calc}(\omega)$ é calculado em uma amplitude de frequência mais baixa de um sinal

de pressão transformado *H(ω)* do bloco 22, para o ângulo de chegada ϕ_j selecionado no bloco 24 do primeiro conjunto de ângulos de chegada $\{\phi_j\}$. A parte de baixa frequência do espectro de frequência de velocidade de partículas $G_j^{calc}(\omega)$ pode ser calculado do correspondente espectro de frequência de pressão *H(ω)* apenas, isto é, sem usar o sinal de velocidade vertical de partículas gravado na amplitude da baixa frequência. Este cálculo pode ser feito, por exemplo, pelo uso da expressão:

$$G_j^{calc}(\omega) = \frac{1+Z_j}{1-Z_j} H(\omega), \qquad (1)$$

na amplitude de baixa frequência. Na Equação (1), Z_j é um operador de atraso de tempo, o qual pode ser expresso por:

$$Z_j = \exp\left[-i\omega\tau_j\right] = \cos\left(\omega\tau_j\right) - i\sin\left(\omega\tau_j\right), \qquad (2)$$

onde τ_j é o atraso de tempo da reflexão fantasma em segundos dada por:

$$\tau_j = \cos(\phi_j)\frac{2D}{c}, \qquad (3)$$

Aqui, $i = \sqrt{-1}$ é a unidade imaginária, ϕ_j é o ângulo de chegada selecionado no bloco 24, *D* é a profundidade de recepção em metros e *c* é a velocidade do som no meio em metros/segundo. Na água, *c* é tipicamente aproximadamente 1500 m/s. A profundidade *D* pode ser determinada por qualquer meio conhecido na técnica, tal como por um sensor de profundidade ou um cálculo.

Para cada valor de ângulo de chegada ϕ_j, a Equação (1) é avaliada para valores de frequência ω que correspondem a frequência *f* de amplitude de aproximadamente 1 Hz até um valor menor do que aquele que faz a diferença *(1 - Z_j)* ser igual a zero, isto é, o primeiro corte de frequência diferente de zero no espectro de frequência *H(ω)* do sinal do sensor de pressão.

No bloco 26, o sinal de velocidade vertical de partículas transformado *G(ω)* do bloco 22 é escalado em uma amplitude de frequência mais alta. O sinal de velocidade vertical de partículas transformado *G(ω)* do bloco 22 é escalado em amplitude para compensar pela sensitividade vertical dos sensores de velocidade de partículas vertical. Em particular, o sinal de velocidade vertical de partículas transformado *G(ω)* é escalado em uma amplitude de frequência mais alta ao ser dividida pelo cosseno do ângulo de chega-

da ϕ_j selecionado no bloco 24 do primeiro conjunto de ângulos de chegada (ϕ_j), gerando um sinal de velocidade de partículas escalado $G_j^{scal}(\omega)$. Assim:

$$G_j^{scal}(\omega) = \frac{G(\omega)}{\cos\left(\phi_j(t)\right)}, \qquad (4)$$

na amplitude de frequência mais alta. Em uma modalidade particular, a amplitude de frequência mais baixa do bloco 25 e a amplitude de frequência mais alta aqui no bloco 26 se combinam para igualar a largura de banda total do sinal de sensor de pressão transformado $H(\omega)$ do bloco 22.

No bloco 27, o sinal de velocidade de partículas simulado $G_j^{calc}(\omega)$, calculado na amplitude de frequência mais baixa no bloco 25, é fundido com o sinal de velocidade de partículas escalado $G_j^{calc}(\omega)$, escalado na amplitude de frequência mais alta no bloco 26, para gerar um sinal de velocidade de partículas fundido $G_j^{merg}(\omega)$ que tem substancialmente a mesma largura de banda que a largura de banda do sinal de pressão gravado $H(\omega)$, para o ângulo de chegada ϕ_j selecionado no bloco 24. Em uma modalidade particular, esta fusão é feita como descrito acima na Patente Nº US 7.359.283 B2 por Vaage e outros, discutida acima.

No bloco 28, o sinal de velocidade de partículas fundido $G_j^{merg}(\omega)$ do bloco 27 é transformado inversamente do domínio de frequência para apresentar $g_j^{merg}(t)$ de volta no domínio de tempo. Como acima, esta transformação temporal inversa pode ser feita por qualquer transformação bem-conhecida, tal como, por exemplo, transformação de Fourier inversa. Entretanto, esta escolha de transformação é apenas por conveniência e não significa uma limitação da invenção.

No bloco 29, é determinado se resta algum ângulo de chegada ϕ_j do primeiro conjunto de ângulos de chegada $\{\phi_j\}$ selecionado no bloco 23. Se não resta nenhum ângulo de chegada ϕ_j, então o processo termina.

A figura 3 é um fluxograma ilustrando uma modalidade da invenção para combinar um sinal de pressão gravado com o sinal de velocidade de partícula fundido da figura 2. A figura 3 ilustra em mais detalhes a parte da invenção discutida no bloco 12 da figura 1, acima.

No bloco 31, um registro de pressão e um registro de velocidade

vertical de partículas são extraídos dos sinais de pressão *h(t)* e dos sinais de velocidade vertical de partículas *g(t)*, respectivamente, gravados no bloco 21 da figura 2. Os registros sísmicos correspondem aos dados sísmicos obtidos em cada localização de sensor nos cabos flutuadores sísmicos de sensor duplo.

No bloco 32, amostras de tempo são extraídas em um tempo gravado *t* nos registros de pressão e de velocidade de partículas vertical extraídas no bloco 31 do sinal de pressão *h(t)* e do sinal de velocidade vertical de partículas *g(t)*, respectivamente.

No bloco 33, um ângulo de chegada ϕ_k é determinado no tempo gravado nas amostras de tempo extraídas no bloco 32 dos registros de pressão e velocidade vertical de partículas extraído no bloco 31. Em uma modalidade da invenção, o cálculo do ângulo de chegada ϕ_k é feito por meio de análise de efeito fantasma de cruzamento. Esta análise de efeito fantasma de cruzamento é descrita em mais detalhes na discussão com respeito ao fluxograma na figura 4.

No bloco 34, é determinado qual ângulo de chegada ϕ_j do primeiro conjunto de ângulos de chegada (ϕ_j) do bloco 23 da figura 2 é mais próximo ao ângulo de chegada ϕ_k do segundo conjunto de ângulos de chegada determinados no bloco 33.

No bloco 35, uma amostra de tempo do sinal de pressão gravado *h(t)* é combinada com uma amostra de tempo do sinal de velocidade de partículas fundido $g_j^{merg}(t)$ correspondente do bloco 28 da figura 2, estas correspondem ao ângulo de chegada ϕ_j do primeiro conjunto de ângulos de chegada determinado no bloco 34. Em uma modalidade particular, a combinação de amostras de tempo se refere à construção dos componentes ascendentes e descendentes do campo de onda a partir da combinação apropriada de amostras de tempo dos sinais de pressão e sinais de velocidade de partículas. Em particular, o componente ascendente do campo de onda pode ser calculado a partir da adição apropriada dos sinais de pressão e sinais de velocidade de partículas, enquanto o componente descendente do campo de onda pode ser calculado a partir da subtração apropriada do sinal

de velocidade de partículas do sinal de pressão, como é bem-conhecido na técnica de processamento de dados sísmicos.

No bloco 36, é determinado se existem mais amostras de tempo do bloco 32 nos registros sísmicos do bloco 31. Se existirem mais amostras, então o processo retorna ao bloco 32 para extrair outro par de amostras de tempo. Se não existirem mais amostras de tempo, então o processo continua no bloco 37.

No bloco 37, os resultados da combinação de amostras de tempo do bloco 25 são saídos como registros combinados.

No bloco 38, é determinado se existem mais registros sísmicos do bloco 31 nos sinais de pressão e nos sinais de velocidade vertical de partículas. Se existem mais registros sísmicos, então o processo retorna ao bloco 31 pra extrair outro par de registros sísmicos. Se não existem mais registros, então o processo termina.

As figuras 6-11 mostram gráficos, seções e vistas que ilustram as modalidades da invenção discutida com referência aos fluxogramas nas figuras 1-5. As figuras 6-8 ilustram elementos do método da invenção com registros sísmicos sintéticos. As figuras 9-10 ilustram elementos de análise de efeito fantasma de cruzamento com registros sísmicos sintéticos.

A figura 6 apresenta graficamente o ângulo de chegada $\phi(t)$ 61 em um plano vertical como uma função do tempo de gravação t para os registros sísmicos sintéticos apresentados na figura 7. O deslocamento tiro-receptor dos registros de pressão e velocidade de partículas vertical da figura 7 é 1500 metros, e a profundidade da água é 500 metros. Pode ser visto que os ângulos verticais de incidência 61 têm amplitude de aproximadamente 57 graus a 1,20 segundos 62 (a reflexão do fundo da água) a aproximadamente 5 graus a 3,0 segundos 63.

A figura 7 é uma seção de registros sintéticos de pressão e velocidade vertical de partículas. O primeiro registro 71 da figura 7 é o registro do sensor de pressão sintético computado usando uma ondulação de arma de ar de fase mínima para cada refletor, coeficientes de reflexão randômicos, atrasos de tempo de efeito fantasma que correspondem aos ângulos de

chegada da figura 6 e uma profundidade do cabo flutuador de 15 metros. O segundo registro 72 é o registro de velocidade vertical de partículas correspondente. Note que as amplitudes deste registro de velocidade vertical de partículas 72 são menores do que aqueles do registro de pressão 71 por causa dos numerosos ângulos de chegada não-verticais das primeiras reflexões. Note também que lá não existem fortes ruídos de baixa frequência que poderiam tipicamente corromper um sinal de velocidade de partículas real de um cabo flutuador de sensor duplo. Este ruído é omitido para melhor avaliação da efetividade deste método.

O terceiro registro 73 representa um registro de velocidade vertical de partículas corrigido idealmente, pronto para ser somado com o registro de pressão para eliminar todas as reflexões fantasmas de superfície. O quarto registro 74 é o resultado da computação da parte de baixa frequência do espectro do registro da velocidade de partículas daquele do primeiro registro 71, assumindo que todas as pequenas ondulações de reflexão chegam verticalmente, e fundido-a com o repouso do espectro do segundo registro 72. A computação foi executada entre 1 e 35 Hz, e os espectros computado e real foram fundidos entre 25 e 35 Hz.

O quinto registro 75 é o erro no resultado acima, isto é, o terceiro registro 73 menos o quarto registro 74. Os erros iniciais são muito grandes e existem duas fontes para estes erros. A primeira fonte do erro é que não foram aplicadas correções nas amplitudes ao registro de velocidade de partículas para chegada não-vertical. A segunda fonte de erro é que atrasos de tempo de reflexão de fantasma incorretos foram usados quando a parte de baixa frequência do espectro de registro de velocidade de partículas foi computada a partir do espectro de sinal de pressão, usando a equação (1), e substituídos.

O sexto registro 76 é o registro de velocidade de partículas composto resultante deste método, como descrito acima, e o sétimo registro 77 é o erro naquele resultado (o terceiro registro 73 menos o sexto registro 76). Pode ser visto que o registro de erro é muito pequeno, e que o método descrito apresenta resultados muito precisos. A figura 8 é uma seção dos regis-

tros sintéticos na figura 7, estendido abaixo para 3,0 segundos.

A figura 9 é uma seção dos registros sintéticos de pressão e de velocidade vertical de partículas com um primeiro atraso de tempo de efeito fantasma de cruzamento. Como descrito em Vaage e outros, discutido acima, o sinal do sensor de velocidade de partículas é tipicamente corrompido pelo ruído de reboque do cabo flutuador que tem frequências de aproximadamente 20 Hz e menores. Neste caso, ambos os sinais de pressão e de velocidade de partículas são primeiro filtrados com corte de baixa de fase mínima, com as frequências abaixo de 25 Hz sendo atenuadas a uma taxa de 72 decibéis por oitava.

Na figura 9, o primeiro registro 91 é um registro de sensor de pressão sintético filtrado em baixa frequência para um cabo flutuador rebocado a uma profundidade de 15 metros. Dois eventos são representados. O primeiro evento 92, a 100 milisegundos, representa uma pequena ondulação de reflexão chegando verticalmente, junto com a sua pequena ondulação de reflexão fantasma a qual é atrasada em 20 milisegundos pelo tempo de viagem nos dois sentidos, para a superfície do mar e de volta, e a qual é oposta em polaridade. O segundo evento 93 no primeiro registro 91, a 200 milisegundos, tem um ângulo de chegada de 45 graus da vertical. O atraso de tempo de fantasma é reduzido por um fator de cos(45°), mas a amplitude é a mesma que aquela do primeiro evento de chegada vertical 92. O sensor de pressão tem a mesma sensitividade para ondas de som chegando de qualquer direção.

O segundo registro 94 da figura 9 contém os eventos correspondentes 92, 93, respectivamente como sentido pelo sensor de velocidade de partículas vertical. Lá existem duas diferenças primárias relativas ao primeiro registro 91. A primeira é que a reflexão fantasma para cada pequena ondulação de reflexão é da mesma polaridade que a pequena ondulação de reflexão. A segunda diferença é que a amplitude das pequenas ondulações de reflexão do segundo evento 93 e a pequena ondulação de reflexão fantasma é reduzida por um fator de cos(45°) devido a diretividade do sensor de velocidade vertical de partículas.

O terceiro registro 94 da figura 9 é a soma dos dois primeiros registros 91, 94, dividida por dois. A reflexão fantasma foi completamente eliminada do primeiro evento 92 a 100 milisegundos. Para o segundo evento 93, o sinal de velocidade de partículas é mais fraco do que o sinal de pressão, assim a pequena ondulação somada resultante é muito fraca e a pequena ondulação de reflexão fantasma não foi completamente eliminada. O quarto registro 96 mostra o tamanho do erro no terceiro registro 95.

A seguir, a operação de efeito fantasma de cruzamento é executada no primeiro registro 91 e segundo registro 94 para fazer suas formas de onda fundamentais idênticas. O efeito fantasma de cruzamento é descrito no próximo fluxograma na figura 4 abaixo.

A figura 4 é um fluxograma ilustrando uma modalidade da invenção para determinar ângulos de chegada da análise de efeito fantasma de cruzamento na figura 3. A figura 4 ilustra em mais detalhes a parte da invenção discutida no bloco 33 da figura 3, acima.

No bloco 41, um segundo conjunto de ângulos de chegada $\{\phi_k\}$ é selecionado. O segundo conjunto de ângulos de chegada $\{\phi_k\}$ é selecionado para cobrir a amplitude de ângulos de chegada que se espera sejam encontrados nos registros sísmicos extraídos dos sinais de pressão gravados $h(t)$ e os sinais de velocidade vertical de partículas $g(t)$ obtidos no bloco 31 da figura 3. O segundo conjunto de ângulos de chegada $\{\phi_k\}$ pode ser designado como o conjunto $\{\phi_k$, para $k = 0,1,2,...,K\}$ para alguma quantidade total selecionada de ângulos de chegada igual a $K+1$. Em uma modalidade exemplo com $K = 60$, um conjunto de 61 ângulos de chegada ϕ_k são iguais ao conjunto $\{\phi_k\} = \{0°,1°,2°,...,60°\}$, que correspondem a $k = 0,1,2,...,60$, respectivamente.

No bloco 42, um ângulo de chegada ϕ_k é selecionado do segundo conjunto de ângulos de chegada $\{\phi_k\}$ no bloco 41. Preferencialmente, os ângulos de chegada são selecionados em uma maneira sistemática, tal como avançar sequencialmente através dos ângulos de chegada ϕ_k na ordem $k = 0,1,2,...,K$.

No bloco 43, é determinado um atraso de tempo de reflexão fan-

tasma τ_k o qual corresponde ao ângulo de chegada τ_k selecionado no bloco 42 do segundo conjunto de ângulos de chegada $\{\phi_k\}$. Analogamente a Equação (3) acima, o atraso de tempo de reflexão fantasma τ_k pode ser expresso por:

$$\tau_k = \cos(\phi_k)\frac{2D}{c}, \qquad (5)$$

onde D é a profundidade do receptor em metros e c é a velocidade do som no meio em metros/segundo. Na água, c é tipicamente 1500 m/s.

No bloco 44, é determinado um operador de atraso de tempo Z_k o qual corresponde ao atraso de tempo de reflexão fantasma τ_k determinado no bloco 43. Analogamente a Equação (2) acima, o operador de atraso de tempo Z_k pode ser expresso por:

$$Z_k = \exp[-i\omega\tau_k] = \cos(\omega\tau_k) - i\sin(\omega\tau_k), \qquad (6)$$

No bloco 45, o registro de pressão e registro de velocidade vertical de partículas do bloco 31 da figura 3 são transformados em efeito fantasma de cruzamento no atraso de tempo de reflexão fantasma τ_k determinado no bloco 43 pelo uso do operador de atraso de tempo Z_k determinado no bloco 44.

No domínio de frequência temporal, O registro de pressão e o registro de velocidade vertical de partículas podem ser expressos como:

$$H_k(\omega) = \beta(1 - Z_k) \qquad (7)$$

e

$$G_k(\omega) = \beta_\phi(1 + Z_k), \qquad (8)$$

respectivamente, onde β é o campo de onda percorrendo ascendentemente e β_ϕ é o campo de onda percorrendo ascendentemente modificado pela sensitividade direcional do sensor de velocidade e partículas.

Os registros de pressão e velocidade de partículas vertical das Equações (7) e (8) podem ser podem ser feitos idênticos em forma um ao outro, exceto pelas diferenças de amplitude entre β e β_ϕ, transformando-os em efeito fantasma de cruzamento. Transformar em efeito fantasma de cruzamento significa, aplicar o operador de transformação em efeito fantasma da velocidade de partículas vertical da Equação (8) ao registro de pressão da Equação (7) e aplicar o operador de transformação em efeito fantasma da

pressão da Equação (7) ao registro de velocidade de partículas vertical da Equação (8): Assim, a transformação em efeito fantasma é executada pela aplicação das seguintes equações:

$$P_k\left(1+Z_k\right)=\beta\left(1-Z_k\right)\left(1+Z_k\right) \qquad (9)$$

e

$$V_k\left(1-Z_k\right)=\beta_\phi\left(1+Z_k\right)\left(1-Z_k\right), \qquad (10)$$

para apresentar o registro de pressão de efeito fantasma de cruzamento e o registro de velocidade vertical de partículas de efeito fantasma de cruzamento, respectivamente.

No bloco 46, uma correlação cruzada de atraso zero e normalizada é calculada para os registros de pressão transformados em efeito fantasma de cruzamento e os registros de velocidade vertical de partículas transformados em efeito fantasma de cruzamento do bloco 45. Esta correlação cruzada de atraso zero e normalizada é descrita em detalhes adicionais na discussão com respeito ao fluxograma na figura 5.

No bloco 47, é determinado se resta algum dos ângulos de chegada ϕ_k do segundo conjunto de ângulos de chegada $\{\phi_k\}$ selecionado no bloco 41. Se restar algum dos ângulos de chegada ϕ_k, então o processo retorna ao bloco 42 para selecionar outro ângulo de chegada ϕ_k. Se não restar nenhum ângulo de chegada ϕ_k, então o processo continua no bloco 48.

No bloco 48, é determinado qual dos valores de correlação cruzada de atraso zero e normalizados calculado no bloco 46 é o maior.

No bloco 49, o ângulo de chegada ϕ_k que corresponde ao maior valor para as correlações cruzadas de atraso zero e normalizadas determinado no bloco 48 é retornado para o bloco 33 da figura 3.

Retornando a figura 9, o quinto registro 97 e o sexto registro 98, correspondem ao primeiro registro 91 e o segundo registro 94, respectivamente, após a transformação em efeito fantasma usando o atraso de fantasma de 20 milisegundos, o qual é o atraso de fantasma correto para a primeira reflexão chegando verticalmente 92. Note-se que, para o primeiro evento 92, os dois registros resultantes 97, 98 são idênticos. Entretanto, para o segundo evento 93, os dois registros 97, 98 têm aparência bem diferente.

Esta diferença surge porque o atraso de transformação em efeito fantasma de cruzamento é incorreto para o segundo evento 93, isto é, 20 milisegundos em vez de 20 milisegundos multiplicado por cos(45°) que é igual a 14,14 milisegundos. O grau ao qual esta transformação em efeito fantasma de cruzamento faz os dois registros idênticos na forma é muito sensível a erros ao atraso de fantasma aplicado.

A figura 10 é uma seção de registros sintéticos de pressão e velocidade vertical de partículas com um segundo atraso de tempo de transformação em efeito fantasma de cruzamento. Na figura 10, o atraso de transformação em efeito fantasma de cruzamento foi mudado para 14,14 milisegundos, e agora as duas formas de onda resultantes são muito diferentes para o primeiro evento 102, mas têm formas idênticas para o segundo evento 103. Note-se, entretanto, que para o segundo evento 103, o registro de velocidade de partículas transformado em efeito fantasma de cruzamento é mais fraco do que o registro de pressão transformado em efeito fantasma de cruzamento. Ele é mais fraco pelo fator cos(45°).

No método da invenção, o primeiro registro 101 e o segundo registro 104 são transformados em efeito fantasma de cruzamento usando atrasos de fantasma que correspondem aos ângulos de chegada não-verticais na amplitude de zero a, por exemplo, 60 graus em passos de um grau pela multiplicação de τ pelo cosseno daquela amplitude de ângulos. Isto resulta em 61 pares de registros transformados em efeito fantasma de cruzamento como o quinto registro 97, 107 e o sexto registro 98, 108 das figuras 9 e 10, respectivamente. Para cada um dos 61 pares de registros que correspondem ao quinto registro 97, 107 e sexto registro 98, 108 e para cada amostra de tempo, o valor de correlação cruzada de atraso zero e normalizado entre aqueles dois registros é computado em, por exemplo, uma janela de tempo de 80 milisegundos. O cálculo da correlação cruzada de atraso zero e normalizada é descrito no fluxograma na figura 5 abaixo.

A figura 5 é um fluxograma que ilustra uma modalidade da invenção para a determinação de uma correlação cruzada de atraso zero e normalizada de registros transformados em efeito fantasma de cruzamento

na figura 4. A figura 5 ilustra em mais detalhes a parte da invenção discutida no bloco 46 da figura 4, acima.

No bloco 51, uma janela de tempo é determinada para a amostra de tempo selecionada no bloco 32 da figura 3 nos registros de pressão e velocidade vertical de partículas selecionados no bloco 31 da figura 3. Em uma modalidade exemplo, a janela de tempo é uma janela de tempo de 80 milisegundos.

No bloco 52, uma quantidade N de amostras de pressão e velocidade vertical de partículas é determinada na janela de tempo determinada no bloco 51 em volta da amostra de tempo do bloco 32 da figura 3.

No bloco 53, N valores de amostra de tempo $\{p_n, n = 1,2,...,N\}$ são extraídos do registro de pressão e N valores de amostra de tempo $\{v_n, n = 1,2,...,N\}$ são extraídos do registro de velocidade vertical de partículas na janela de tempo determinada no bloco 51.

No bloco 54, dois fatores de autocorrelação de atraso zero $A_{pp}(0)$ e $A_{yy}(0)$ são calculados dos valores de amostra de tempo de pressão e velocidade vertical de partículas $\{p_n\}$ e $\{v_n\}$, extraídos dos registros de pressão e velocidade vertical de partículas, respectivamente, do bloco 53. Os dois fatores de auto correlações de atraso zero $A_{pp}(0)$ e $A_{vv}(0)$ são usado com fatores normalizadores no cálculo de atraso zero, a correlação cruzada abaixo no bloco 56. Os fatores de autocorrelação de atraso zero $A_{pp}(0)$ e $A_{vv}(0)$ são calculados pelas fórmulas seguintes:

$$A_{pp}(0) = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}[p_n * p_n]} \qquad (11)$$

e

$$A_{vv}(0) = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}[v_n * v_n]}, \qquad (12)$$

onde * designa multiplicação.

No bloco 55, um fator de correlação cruzada de atraso zero $C_{pv}(0)$ é calculada pela fórmula seguinte:

$$C_{pv}(0) = \sqrt{\left|\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}[p_n * v_n]\right|}. \qquad (13)$$

No bloco 56, uma correlação cruzada de atraso zero normaliza-

da $XCN_{pv}(0)$ é calculada dos fatores de autocorrelação de atraso zero $A_{pp}(0)$ e $A_{vv}(0)$ do bloco 54 e do fator de correlação cruzada $C_{pv}(0)$ do bloco 55. A correlação cruzada de atraso zero normalizada XCNpv(0) é calculada pela fórmula seguinte:

$$XCN_{pv}(0) = \frac{C_{pv}(0)}{\sqrt{A_{pp}(0) \cdot A_{vv}(0)}}. \qquad (14)$$

No bloco 57, o valor da correlação cruzada de atraso zero normalizada XCNpv(0) calculada no bloco 56 é retornada para o bloco 46 da figura 4.

A amplitude de valores de correlação cruzada de atraso zero e normalizada de um valor zero (indicando que a forma dos dois registros na janela de tempo são completamente diferentes) ao valor um (indicando que a forma dos dois registros na janela de tempo são idênticos, exceto, possivelmente por um fator de escala).

O resultado é um conjunto de K+1 valores de correlação cruzada para cada valor de amostra de tempo, que corresponde, por exemplo, aos ângulos de chegada na amplitude de zero a 60 graus em incrementos de um grau. O maior valor de correlação cruzada para cada amostra de tempo corresponde a aquele par de registros transformados em efeito fantasma de cruzamento que é mais similar em forma porque eles foram transformados em efeito fantasma com o atraso de fantasma mais correto. E o ângulo que corresponde àquele valor de correlação cruzada maior é o valor desejado de $\varnothing(t)$ para aquele valor de amostra temporal.

Um problema de estabilidade com relação à determinação do ângulo de chegada $\varnothing(t)$ pode ser endereçado. Ocasionalmente, existe alguma instabilidade durante uma zona de tempo de eventos inicial, a qual afeta qual dos pares de registros transformados em fantasma tiver o maior valor de correlação cruzada de atraso zero normalizada. A defasagem aparentemente é causada por uma taxa de mudança rápida nos ângulos de chegada verticais nesta zona de tempo. A filtragem de corte alto dos valores de amostra de $\varnothing(t)$ para cada registro é útil, antes de usá-los para aplicar o método da invenção. Um exemplo de um filtro de corte alto de fase zero apropriado

poderia ser um filtro que aplica 42 decibéis por oitava de atenuação a frequências acima de 20 Hz.

Nos dados de campo reais, a proporção sinal-ruído dos registros de pressão e velocidade de partículas diminui com o incremento de tempo após a fonte marinha ser disparada. Como um resultado, as estimativas de $\varnothing(t)$ a partir da análise de efeito fantasma de cruzamento se torna menos estável com o incremento de tempo de gravação em cada registro. Como ilustrado na figura 6, os ângulos de chegada dos eventos de reflexão também tendem a diminuir com o incremento de tempo de gravação em um registro. Assim, é benéfico restringir-se os valores estimados de $\varnothing(t)$ usando uma curva tal como aquela mostrada na figura 6, derivada para cada estação de recebimento de uma função de velocidade regional para reflexões na área de estudo. As expressões a seguir funcionam bem para valores $\varnothing(t)$ superior e inferior admissíveis:

$$\varnothing_{\text{superior}}(t) = \left\{1 + \alpha\left[\frac{\phi(t)}{100.0}\right]\right\}\phi(t) \qquad (15)$$

e

$$\varnothing_{\text{inferior}}(t) = \left\{1 - \alpha\left[\frac{\phi(t)}{100.0}\right]\right\}\phi(t), \qquad (16)$$

respectivamente, onde α é tipicamente definido igual a 1,0. Em uma modalidade particular, o ângulo de chegada $\varnothing(t)$ usado nas Equações (15) e (16) pode ser calculado do conhecimento da função de velocidade regional e deslocamento receptor para fonte. Este procedimento é descrito, por exemplo, no pedido de patente copendente de Número U.S. 12/221.255, "Method of Summing Dual-Sensor Streamer Signals Using Seismic Reflection Velocities", depositado em 1 de agosto de 2008 por um dos coinventores da presente invenção e relacionado a uma companhia afiliada da requerente da presente invenção.

Para um tempo de gravação tal que a função de velocidade regional prediz um ângulo de chegada $\varnothing(t)$ = 60°, $\varnothing_{superior}(t)$ = 96°, e $\varnothing_{inferior}(t)$ = 24°. Uma vez que um ângulo de chegada de 60° poderia ocorrer para os eventos de reflexão iniciais em um registro, a proporção sinal-ruído poderia

se esperar que seja alta, assim muito pouca restrição é aplicada ao ângulo de chegada estimado usando a análise de efeito fantasma de cruzamento. Entretanto, em um tempo de amostra posterior, quando a proporção sinal-ruído for menor, a função de velocidade regional poderia indicar que $\varnothing(t)$ = 20°, $\varnothing_{superior}(t)$ = 24°, e $\varnothing_{inferior}(t)$ = 16°. Assim o ângulo de chegada estimado usando a análise de efeito fantasma de cruzamento poderia então ser muito mais restrito.

Se for desejado diminuir as restrições aplicadas aos ângulos de chegada que resultam de análise de efeito fantasma de cruzamento, αpode ser feito maior do que 1,0. Ao fazer α menor do que 1,0 irão aumentar as restrições.

Deveria ser entendido que o que precede é meramente uma descrição detalhada de modalidades específicas desta invenção e que numerosas mudanças, modificações, e alternativas às modalidades reveladas podem ser feitas de acordo com a revelação aqui sem se afastar do escopo da invenção. A descrição precedente, portanto, não tem o significado de limitação do escopo da invenção. Em vez disso, o escopo da invenção é para ser determinado apenas pelas reivindicações em anexo e suas equivalentes.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para prospecção geofísica **caracterizado por** compreender:

dispor um cabo flutuador de símica de sensor duplo em um corpo de água;

responsivamente aos sinais gravados a sensores no cabo flutuador de sísmica de sensor duplo, calcular traços de pressão e de velocidade vertical de partículas que representam campos de onda da pressão física e da velocidade vertical de partículas, respectivamente, se deslocando no corpo de água incidente sobre os sensores;

corrigir para ruído de baixa frequência em sensores de velocidade vertical de partículas através da transformação dos traços sísmicos para produzir traços de pressão e de velocidade vertical de partículas que representam campos de onda da pressão e da velocidade vertical de partículas, respectivamente, como eles apareceriam se incidentes sobre os sensores com ruídos de baixa freqüência atenuado, em que a transformação compreende:

gerar traços de velocidade de partículas misturados através da mistura com traços de velocidade certical das partículas gravados, dimensionados em uma faixa de freqüência superior usando um ângulo de chegada dependente de tempo, conforme determinado pela análise de reflexões múltiplas, com traços de velocidade de partículas simulados, calculados em uma faixa de frequências inferior a partir de traços de pressão gravados usando um filtro variável no tempo com base no ângulo de chegada dependente do tempo;

gerar traços combinados de pressão e de velocidade vertical de partículas através da combinação de traços de pressão e de velocidade da partícula misturados; e

registrar os traços combinados de pressão e de velocidade vertical das partículas.

2. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que os sinais de velocidade vertical de partículas são obtidos usando

acelerómetros para registrar sinais de aceleração e determinar traços de velocidade vertical de partículas a partir dos sinais de aceleração gravados.

3. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que os sinais de velocidade vertical de partículas são obtidos por meio de sensores de velocidade para gravar sinais de velocidade e determinar traços de velocidade vertical de partículas a partir dos sinais de velocidade gravados.

4. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a geração de traços de velocidade de partículas misturados compreende:

gravar sinais de pressão h(t) e de velocidade vertical de partículas g(t) em uma estação de receptor no cabo flutuador rebocado;

transformar temporalmente os sinais de pressão h(t) e os sinais de de velocidade vertical de partícula g(t) gravados a partir de um domínio do tempo para H(ω) e G(ω), respectivamente, em um domínio da frequência;

selecionar um primeiro conjunto de ângulos de chegada $\{\Phi_j\}$;

realizar o seguinte para cada um do primeiro conjunto de ângulos de chegada $\{\Phi_j\}$;

selecionar um ângulo de chegada Φ_j a partir do primeiro conjunto selecionado de ângulos de entrada $\{\Phi_j\}$;

calcular traços de velocidade da partícula em uma faixa de frequência inferior a partir do sinal de pressão transformada H(ω) para o ângulo de chegada selecionado Φ_j a partir do primeiro conjunto de ângulos de entrada $\{\Phi_j\}$, gerando traços simulados de velocidade de partícula $G_j^{calc}(\omega)$ na faixa de freqüência inferior;

dimensionar os traços de partícula velocidade traços de velocidade vertical de partícula transformados G(ω) em uma faixa de freqüência superior para o ângulo de chegada selecionado Φ_j a partir do primeiro conjunto de ângulos de entrada $\{\Phi_j\}$, gerando assim os traços de velocidade de partícula dimensionados $G_j^{scal}(\omega)$ na faixa de frequência superior;

misturar os traços de velocidade de partícula simulados $G_j^{calc}(\omega)$ a partir da faixa de baixa frequência com os traços de velocidade de partícu-

las dimensionados $G_j^{scal}(\omega)$ a partir da faixa superior de frequência para gerar traços de velocidade de partícual misturados $G_j^{merg}(\omega)$, para o ângulo de chegada selecionado Φ_j a partir do primeiro conjunto de ângulos de chegada $\{\Phi_j\}$;

e transformar inversamente os traços de velocidade de partícula misturados $G_j^{merg}(\omega)$ a partir do domínio da frequência para $g_j^{merg}(t)$ no domínio do tempo.

5. Método de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que a transformada temporal é um transformada de Fourier temporal.

6. Método de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que o primeiro conjunto de ângulos de chegada $\{\Phi_j\}$ compreende o conjunto de ângulos Φ_j = 0°, 1°, 2°, . . . , 60° para j = 0, 1, 2,. . . , 60, respectivamente.

7. Método de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que o dimensionamento dos traços transformados de velocidade vertical de partículas compreende a divisão dos traços de sensor de velocicidade vertical de partícula transformados G(ω) na faixa de frequência superior por co-seno do ângulo de chegada selecionado Φ_j a partir do primeiro conjunto de ângulos de entrada $\{\Phi_j\}$, gerando os traços de velocidade de partículas dimensionados $G_j^{scal}(\omega)$.

8. Método de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que uma combinação da faixa de frequências inferior e da faixa de frequência superior possui substancialmente a mesma largura de banda da largura de banda do sinal sensor de pressão gravado h(t).

9. Método de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que o cálculo dos traços de velocidade de partícula $G_j^{calc}(\omega)$ em uma faixa de frequência baixa a partir de um sinal de pressão gravado H(ω) para o ângulo de chegada selecionado Φ_j a partir do primeiro conjunto de ângulos de entrada $\{\Phi_j\}$ compreende a aplicação da seguinte equação:

$$G_j^{calc}(\omega) = \frac{1+Z_j}{1-Z_j} H(\omega),$$

onde ω é uma frequência radial em radianos/segundo, igual a $2\pi f$ para fre-

quência temporal *f*, e Z_j é um operador de atraso de tempo.

10. Método, de acordo com a reivindicação 9, caracterizado pelo fato de que o operador de atraso de tempo Z_j é dado pela equação:

$$Z_j = \exp\left[-i\omega\tau_j\right] = \cos(\omega\tau_j) - i\sin(\omega\tau_j),$$

onde τ_j é o atraso de tempo da reflexão fantasma.

11. Método, de acordo com a reivindicação 10, caracterizado pelo fato de que o atraso de tempo da reflexão fantasma τ é dado por:

$$\tau_j = \cos(\phi_j)\frac{2D}{c},$$

onde D é a profundidade do receptor e *c* é a velocidade do som na água.

12. Método, de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que adicionalmente compreende:

extrair um traço de pressão e um traço de velocidade de partícula do sinal de pressão h(t) e sinal de velocidade vertical de partícula g(t), respectivamente;

extrair amostras temporais em um tempo de gravação t dos registros de pressão e velocidade de partícula;

determinar um ângulo de chegada Φ_k de um segundo conjunto de ângulos de chegada $\{\Phi_k\}$ no tempo de gravação t nas amostras temporais dos traços de pressão e velocidade de partícula, por análise de múltiplas reflexões;

determinar qual ângulo de chegada Φ_j do primeiro conjunto de ângulos de chegada $\{\Phi_j\}$ é mais próximo ao ângulo de chegada determinado Φ_k do segundo conjunto de ângulos de chegada $\{\Phi_k\}$; e

combinar uma amostra temporal do sinal de pressão gravado h(t) com uma amostra de tempo dos traços de velocidade de partícula misturado $g_j^{merg}(t)$ correspondente que corresponde ao ângulo de chegada mais próximo de Φ_j do primeiro conjunto de ângulos de chegada $\{\Phi_j\}$.

13. Método, de acordo com a reivindicação 12, caracterizado pelo fato de que a determinalçao de um ângulo de chegada pela análise de reflexões múltiplas compreende:

selecionar um segundo conjunto de ângulos de chegada $\{\Phi_k\}$;

executar o que segue para cada ângulo de chegada do segundo

conjunto $\{\Phi_k\}$;

selecionar um ângulo de chegada Φ_k do segundo conjunto selecionado de ângulos de chegada $\{\Phi_k\}$;

criar reflexões múltiplas dos traços de pressão e de velocidade vertical de partícula para o ângulo de chegada Φ_k selecionado do segundo conjunto selecionado de ângulos de chegada $\{\Phi_k\}$; e

calcular uma correlação cruzada normalizada de atraso zero dos traços de reflexões múltiplas de pressão e velocidade vertical de partículas, para o ângulo de chegada Φ_k do segundo conjunto selecionado de ângulos de chegada $\{\Phi_k\}$;

determinar qual valor de correlação cruzada normalizada de atraso zero é maior; e

determinar o ângulo de chegada Φ_k do segundo conjunto selecionado de ângulos de chegada $\{\Phi_k\}$ que corresponde ao maior valor determinado para as correlações cruzadas normalizadas de atraso zero .

14. Método, de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo fato de que criar reflexões múltiplas compreende:

determinar um atraso de tempo de reflexão múltipla τ_k que corresponde ao ângulo de chegada Φ_k do segundo conjunto selecionado de ângulos de chegada $\{\Phi_k\}$;

determinar um operador de atraso de tempo Z_k que corresponde ao tempo de atraso de reflexão múltipla τ_k determinado; e

criar reflexão múltipla dos traços de pressão e de velocidade vertical de partícula usando o operador de atraso de tempo Z_k.

15. Método, de acordo com a reivindicação 14, caracterizado pelo fato de que a determinação de um tempo de atraso de reflexão múltipla τ_k que corresponde ao ângulo de chegada selecionado Φ_k do segundo conjunto de ângulos de chegada $\{\Phi_k\}$ compreende aplicar a seguinte equação:

$$\tau_j = \cos(\phi_j)\frac{2D}{c},$$

onde D é a profundidade do receptor e c é a velocidade do som na água.

16. Método, de acordo com a reivindicação 15, caracterizado pelo fato de que a determinação de um operador de atraso de tempo Z_j que

corresponde ao tempo de atraso de reflexão múltipla τ_k determinado compreende aplicar a seguinte equação:

$$Z_j = \exp\left[-i\omega\tau_j\right] = \cos(\omega\tau_j) - i\sin(\omega\tau_j),$$

onde ω é uma frequência radial.

17. Método, de acordo com a reivindicação 16, caracterizado pelo fato de que criar reflexões múltiplas dos traços de pressão e de velocidade vertical de partícula compreende aplicar as seguintes equações:

$$P_k\left(1+Z_k\right) = \beta\left(1-Z_k\right)\left(1+Z_k\right)$$

e

$$V_k\left(1-Z_k\right) = \beta_\phi\left(1+Z_k\right)\left(1-Z_k\right),$$

onde β é o campo de onda de percurso ascendente e β_Φ é o campo de onda de percurso ascendente modificado pela sensitividade direcional do sensor de velocidade de partícula.

18. Método, de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo fato de que o cálculo de uma correlação cruzada normalizada de atraso zero $XCN_{pv}(0)$ dos traços de reflexão múltipla de pressão e velocidade vertical de partículas compreende:

determinar as janelas de tempo para as amostras temporais nos traços de pressão e velocidade vertical de partícula;

extrair valores de amostras temporais nos traços de pressão e velocidade vertical de partículas $\{p_n\}$ e $\{v_n\}$, respectivamente, nas janelas de tempo nos traços de pressão e velocidade vertical de partícula;

calcular dois fatores de autocorrelação de atraso zero $A_{pp}(0)$ e $A_{vv}(0)$ dos valores de amostra temporal de pressão e velocidade vertical de partícula $\{p_n\}$ e $\{v_n\}$, respectivamente;

calcular um fator de correlação cruzada de atraso zero $C_{pv}(0)$ dos valores de amostra temporal de pressão e velocidade vertical de partícula $\{p_n\}$ e $\{v_n\}$, respectivamente; e

calcular uma correlação cruzada normalizada de atraso zero $XCN_{pv}(0)$ dos dois fatores de autocorrelação de atraso zero $A_{pp}(0)$ e $A_{vv}(0)$ e do fator de correlação cruzada de atraso zero $C_{pv}(0)$.

19. Método, de acordo com a reivindicação 18, caracterizado

pelo fato de que o cálculo dos dois fatores de autocorrelação de atraso zero $A_{pp}(0)$ e $A_{vv}(0)$ compreende aplicar as seguintes equações:

$$A_{pp}(0) = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}[p_n * p_n]}$$

e

$$A_{vv}(0) = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}[v_n * v_n]},$$

onde N é a quantidade de valores de amostras temporais.

20. Método, de acordo com a reivindicação 19, caracterizado pelo fato de que o cálculo de um fator de correlação cruzada de atraso zero $C_{pv}(0)$ compreende aplicar a seguinte equação:

$$C_{pv}(0) = \sqrt{\left|\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}[p_n * v_n]\right|}.$$

21. Método, de acordo com a reivindicação 20, caracterizado pelo fato de que o cálculo de uma correlação cruzada normalizada de atraso zero $XCN_{pv}(0)$ compreende aplicar a seguinte equação:

$$XCN_{pv}(0) = \frac{C_{pv}(0)}{\sqrt{A_{pp}(0)\cdot A_{vv}(0)}}.$$

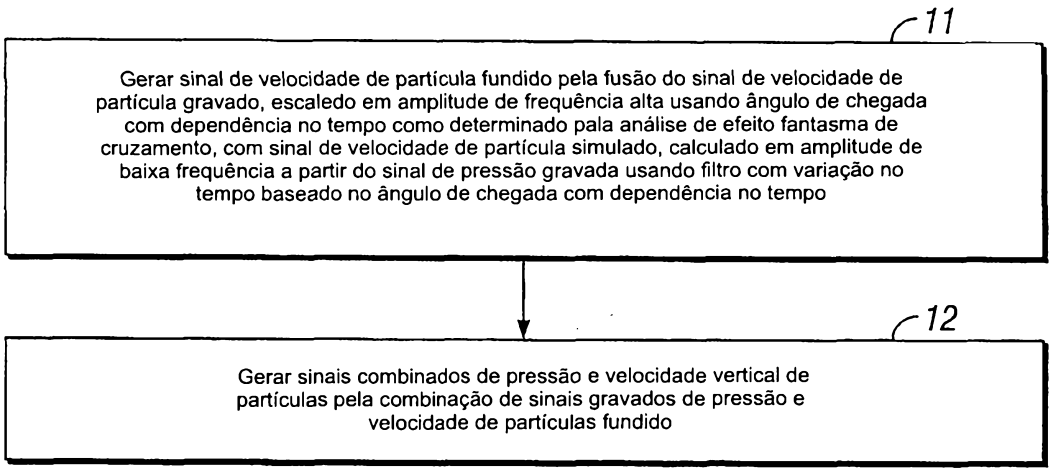
11
Gerar sinal de velocidade de partícula fundido pela fusão do sinal de velocidade de partícula gravado, escaledo em amplitude de frequência alta usando ângulo de chegada com dependência no tempo como determinado pala análise de efeito fantasma de cruzamento, com sinal de velocidade de partícula simulado, calculado em amplitude de baixa frequência a partir do sinal de pressão gravada usando filtro com variação no tempo baseado no ângulo de chegada com dependência no tempo
12
Gerar sinais combinados de pressão e velocidade vertical de partículas pela combinação de sinais gravados de pressão e velocidade de partículas fundido

FIG. 1

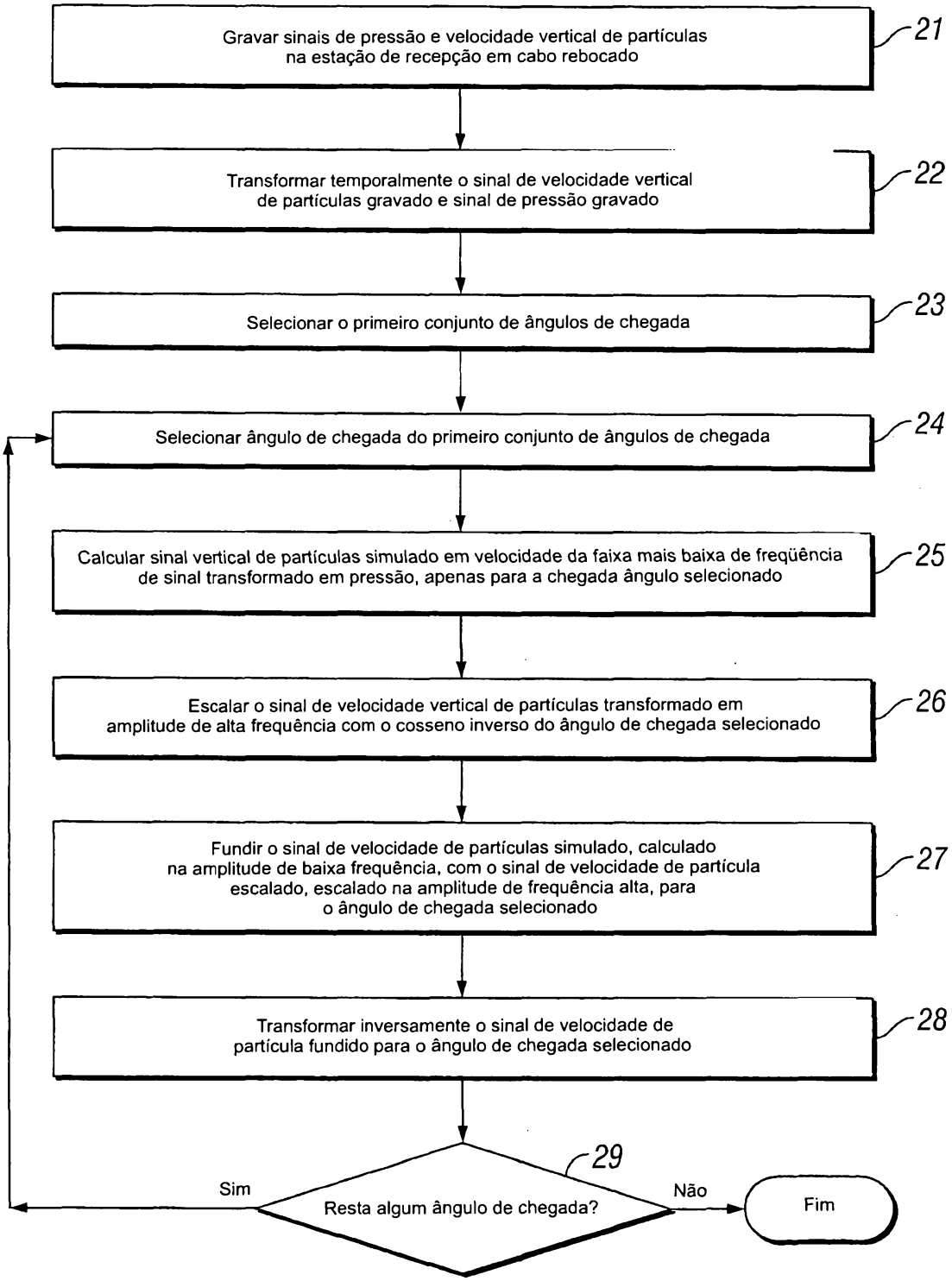
Gravar sinais de pressão e velocidade vertical de partículas na estação de recepção em cabo rebocado
21
Transformar temporalmente o sinal de velocidade vertical de partículas gravado e sinal de pressão gravado
22
Selecionar o primeiro conjunto de ângulos de chegada
23
Selecionar ângulo de chegada do primeiro conjunto de ângulos de chegada
24
Calcular sinal vertical de partículas simulado em velocidade da faixa mais baixa de freqüência de sinal transformado em pressão, apenas para a chegada ângulo selecionado
25
Escalar o sinal de velocidade vertical de partículas transformado em amplitude de alta frequência com o cosseno inverso do ângulo de chegada selecionado
26
Fundir o sinal de velocidade de partículas simulado, calculado na amplitude de baixa frequência, com o sinal de velocidade de partícula escalado, escalado na amplitude de frequência alta, para o ângulo de chegada selecionado
27
Transformar inversamente o sinal de velocidade de partícula fundido para o ângulo de chegada selecionado
28
29
Resta algum ângulo de chegada?
Sim
Não
Fim

FIG. 2

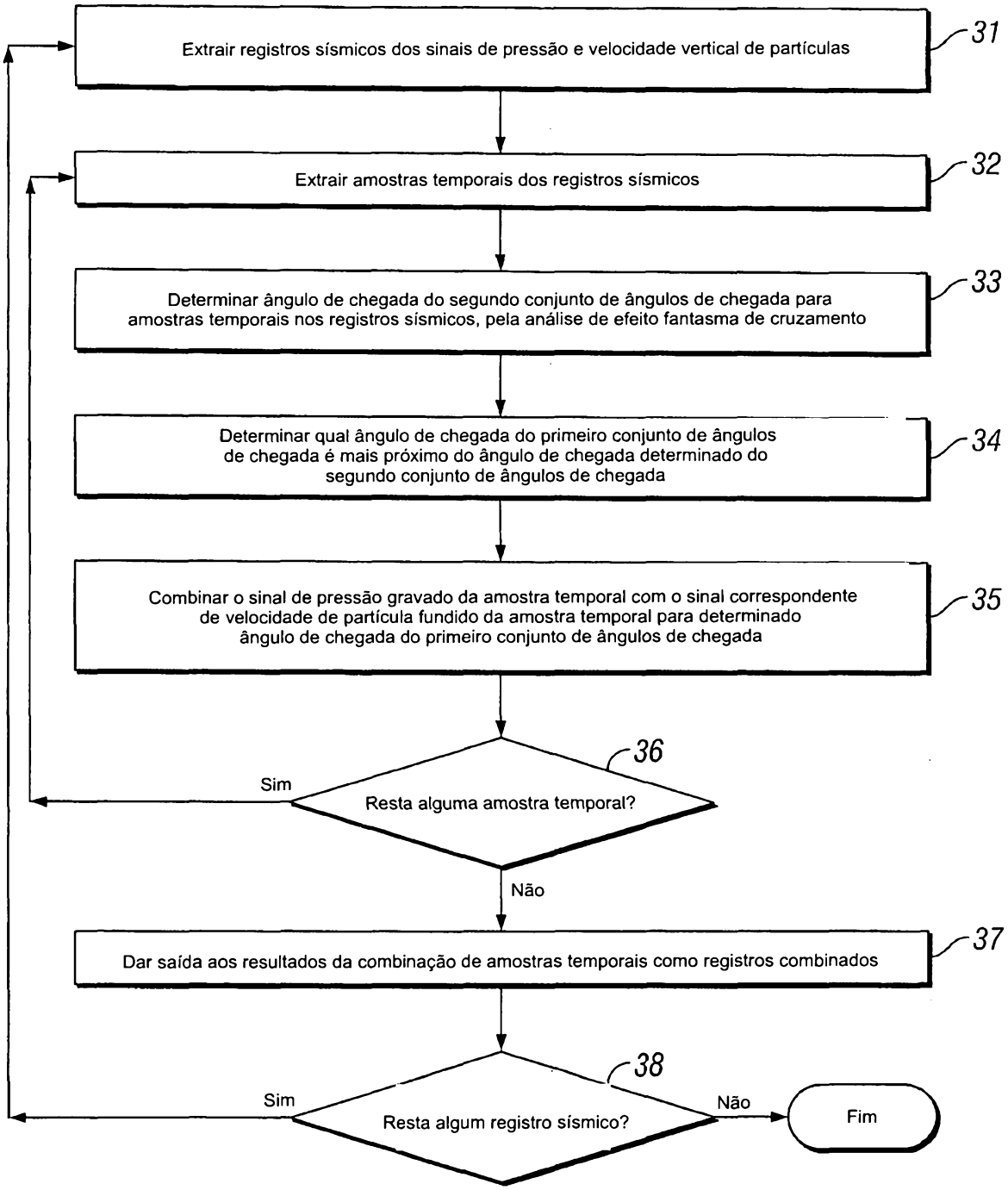
Extrair registros sísmicos dos sinais de pressão e velocidade vertical de partículas
31
Extrair amostras temporais dos registros sísmicos
32
Determinar ângulo de chegada do segundo conjunto de ângulos de chegada para amostras temporais nos registros sísmicos, pela análise de efeito fantasma de cruzamento
33
Determinar qual ângulo de chegada do primeiro conjunto de ângulos de chegada é mais próximo do ângulo de chegada determinado do segundo conjunto de ângulos de chegada
34
Combinar o sinal de pressão gravado da amostra temporal com o sinal correspondente de velocidade de partícula fundido da amostra temporal para determinado ângulo de chegada do primeiro conjunto de ângulos de chegada
35
36
Resta alguma amostra temporal?
Sim
Não
Dar saída aos resultados da combinação de amostras temporais como registros combinados
37
38
Resta algum registro sísmico?
Sim
Não
Fim

FIG. 3

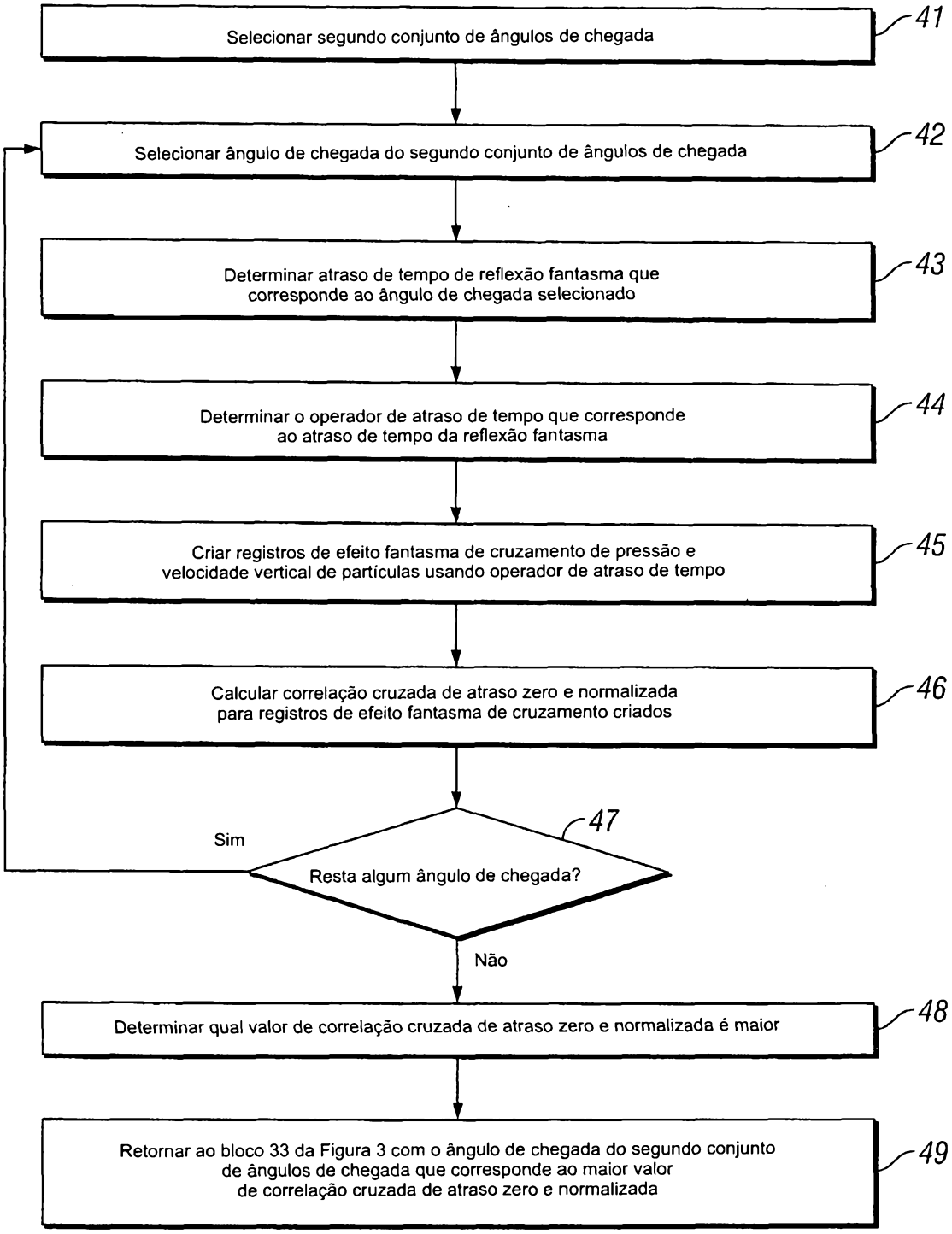
Selecionar segundo conjunto de ângulos de chegada
41
Selecionar ângulo de chegada do segundo conjunto de ângulos de chegada
42
Determinar atraso de tempo de reflexão fantasma que corresponde ao ângulo de chegada selecionado
43
Determinar o operador de atraso de tempo que corresponde ao atraso de tempo da reflexão fantasma
44
Criar registros de efeito fantasma de cruzamento de pressão e velocidade vertical de partículas usando operador de atraso de tempo
45
Calcular correlação cruzada de atraso zero e normalizada para registros de efeito fantasma de cruzamento criados
46
47
Sim
Resta algum ângulo de chegada?
Não
Determinar qual valor de correlação cruzada de atraso zero e normalizada é maior
48
Retornar ao bloco 33 da Figura 3 com o ângulo de chegada do segundo conjunto de ângulos de chegada que corresponde ao maior valor de correlação cruzada de atraso zero e normalizada
49

FIG. 4

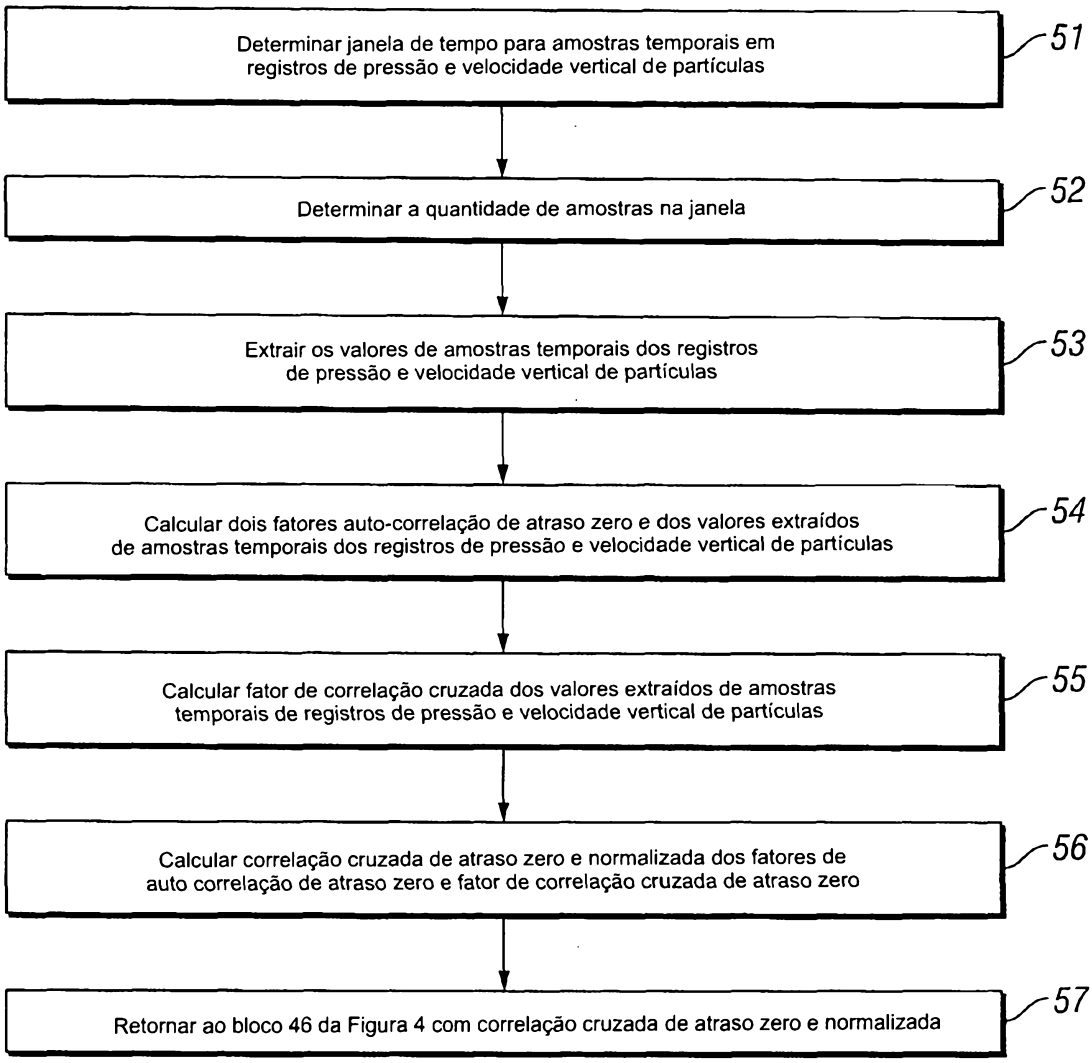
Determinar janela de tempo para amostras temporais em registros de pressão e velocidade vertical de partículas
51
Determinar a quantidade de amostras na janela
52
Extrair os valores de amostras temporais dos registros de pressão e velocidade vertical de partículas
53
Calcular dois fatores auto-correlação de atraso zero e dos valores extraídos de amostras temporais dos registros de pressão e velocidade vertical de partículas
54
Calcular fator de correlação cruzada dos valores extraídos de amostras temporais de registros de pressão e velocidade vertical de partículas
55
Calcular correlação cruzada de atraso zero e normalizada dos fatores de auto correlação de atraso zero e fator de correlação cruzada de atraso zero
56
Retornar ao bloco 46 da Figura 4 com correlação cruzada de atraso zero e normalizada
57

FIG. 5

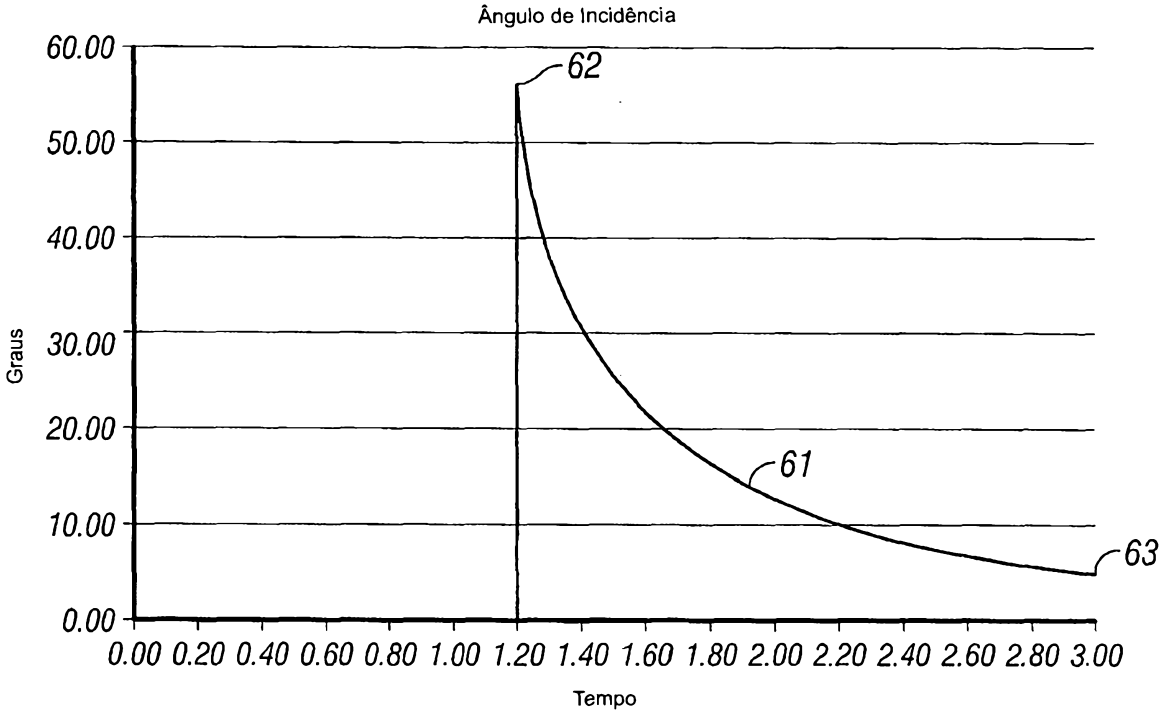
Ângulo de Incidência
60.00
50.00
40.00
30.00
20.00
10.00
0.00
Graus
62
61
63
0.00 0.20 0.40 0.60 0.80 1.00 1.20 1.40 1.60 1.80 2.00 2.20 2.40 2.60 2.80 3.00
Tempo

FIG. 6

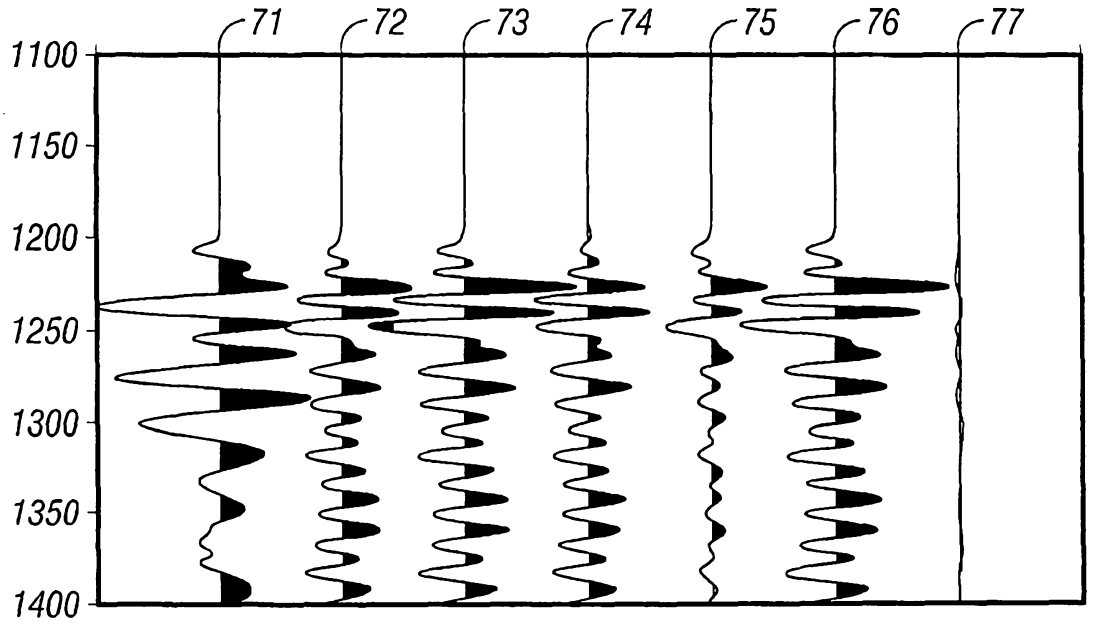
71
72
73
74
75
76
77
1100
1150
1200
1250
1300
1350
1400

FIG. 7

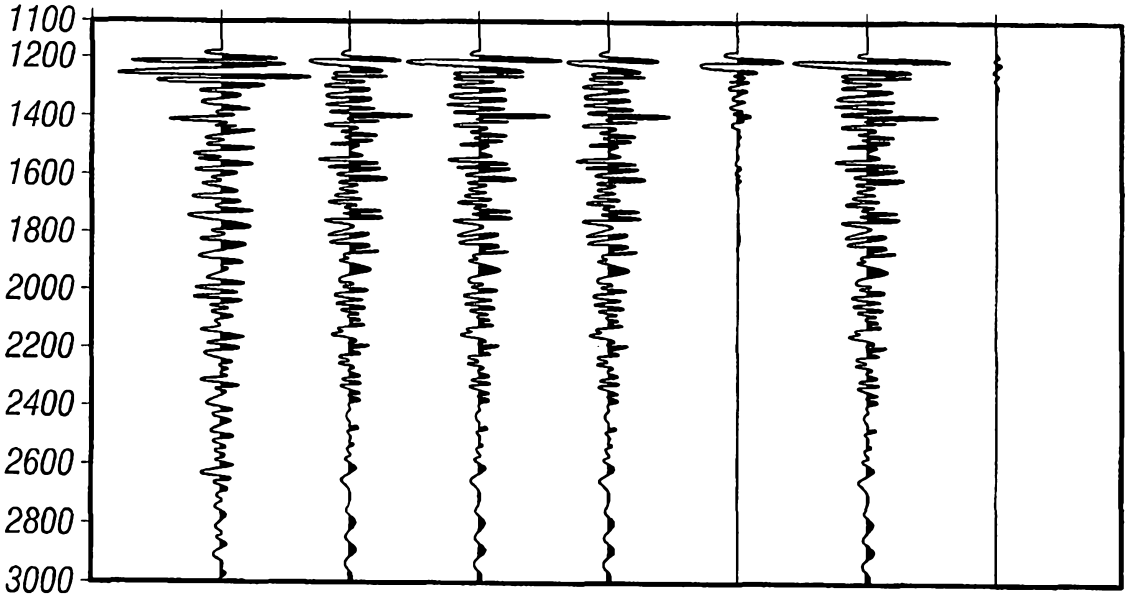
1100
1200
1400
1600
1800
2000
2200
2400
2600
2800
3000

FIG. 8

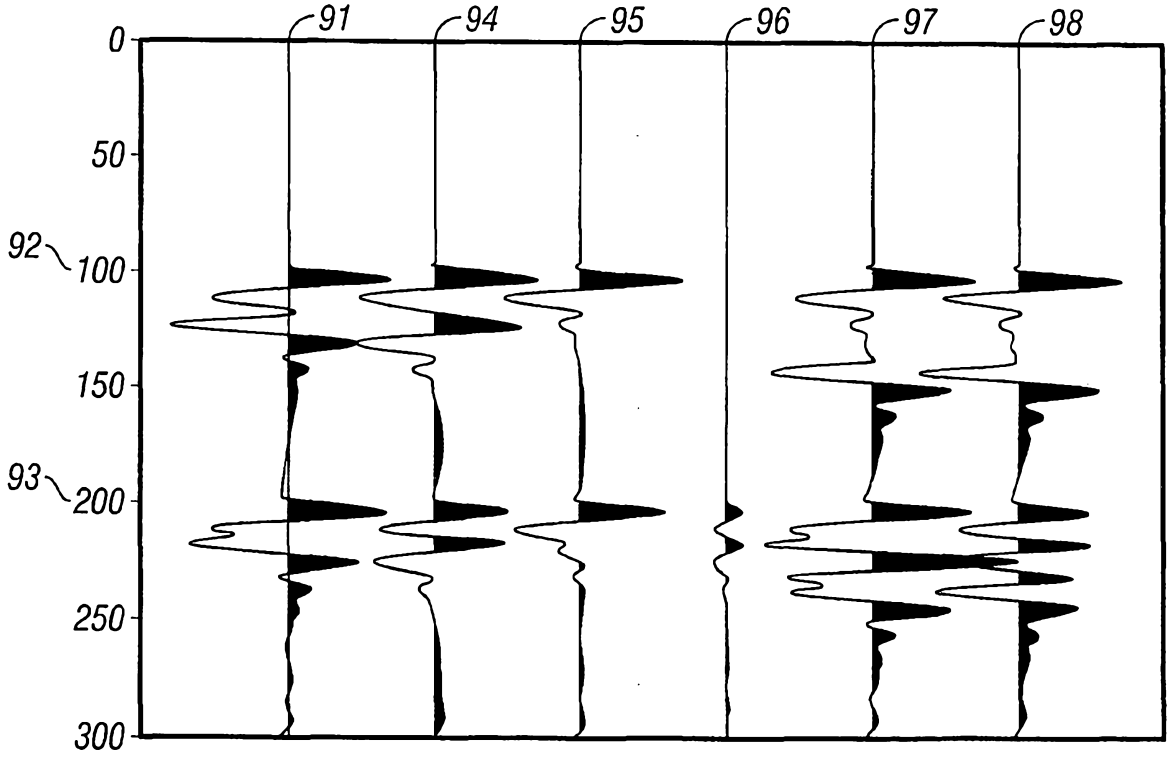
91
94
95
96
97
98
0
50
92
100
150
93
200
250
300

FIG. 9

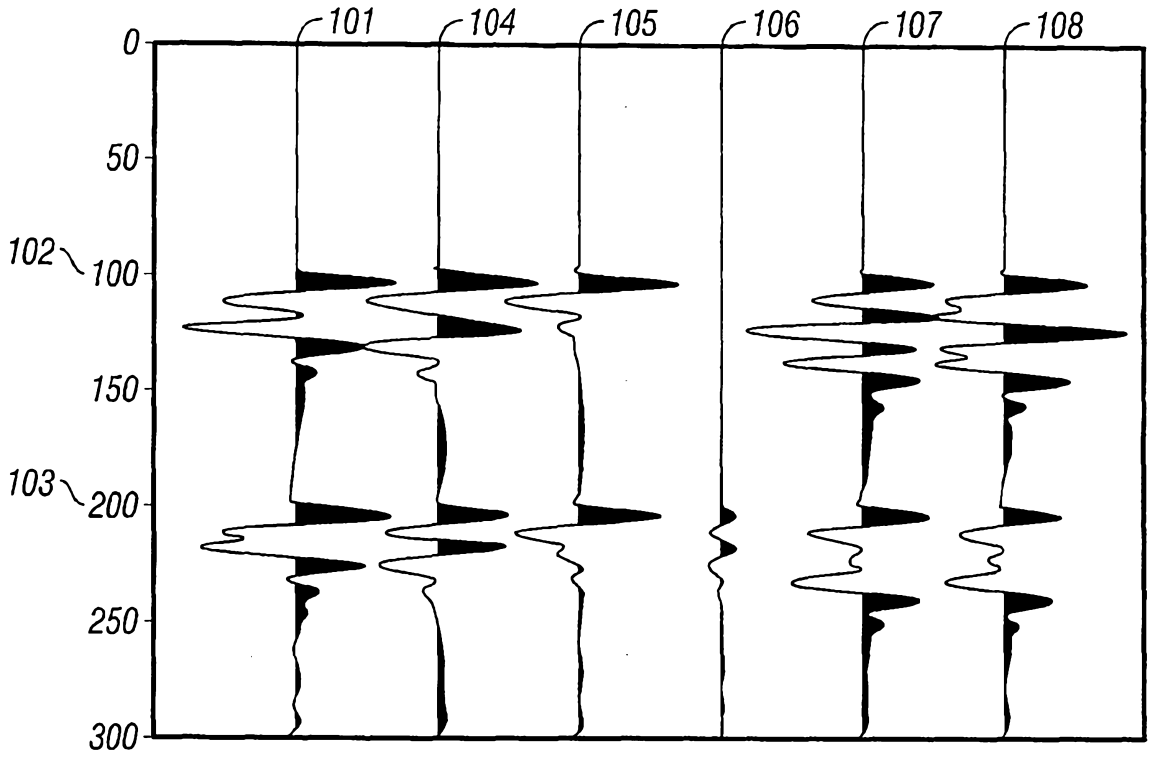

FIG. 10