



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

(11) PI 1104046-7 B1



(22) Data do Depósito: 01/08/2011

(45) Data de Concessão: 09/03/2021

(54) Título: MÉTODO PARA CRIAÇÃO DE IMAGEM DA SUBSUPERFÍCIE DA TERRA

(51) Int.Cl.: G01V 1/28; G01V 1/38.

(30) Prioridade Unionista: 30/07/2010 US 12/804,837.

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

(72) Inventor(es): STIAN HEGNA.

(57) Resumo: MÉTODO PARA DECOMPOSIÇÃO DE ONDA COM O USO DE SENSORES DE MOVIMENTO MULTICOMPONENTE. A presente invenção refere-se a dados de velocidade em três eixos geométricos, obtidos juntamente com dados de pressão em um estudo sísmico marinho, que são girados para uma direção de radiação. É aplicada decomposição de onda plana na direção de radiação aos dados de velocidade girados. Os dados de pressão e dados de velocidade são combinados para gerar pelo menos um dos campos de onda ascendente e descendente. Pelo menos um dos campos de onda ascendente e descendente é usado em um domínio tempo-espaço para criar a imagem da subsuperfície da terra.

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"MÉTODO PARA CRIAÇÃO DE IMAGEM DA SUBSUPERFÍCIE DA TERRA"**.

ANTECEDENTES DA INVENÇÃO

Campo da Invenção

[001] A presente invenção refere-se geralmente ao campo de prospecção geofísica. Mais particularmente, a invenção refere-se ao campo de sensor dual de criação de imagem de dados de serpentina sísmica marinha.

Descrição da Técnica Relacionada

[002] Na indústria de gás e petróleo, prospecção geofísica é comumente usada para auxiliar na busca e avaliação da subsuperfície de formações da terra. Técnicas de prospecção geofísica produzem conhecimento da estrutura da subsuperfície da terra, que é útil para descobrir e extrair recursos minerais valiosos, particularmente depósitos de hidrocarbonetos, tais como petróleo e gás natural. Uma técnica bem conhecida de prospecção geofísica é um estudo sísmico. Em um estudo sísmico baseado em terra, um sinal sísmico é gerado na ou próximo à superfície da terra, e então se desloca para baixo para dentro da subsuperfície da terra. Em um estudo sísmico marinho, o sinal sísmico também pode se deslocar para baixo através de um corpo de água sobrejacente a subsuperfície da terra. As fontes de energia sísmica são usadas para gerar o sinal sísmico que, após a propagação para dentro da terra, é pelo menos parcialmente refletido através de refletores sísmicos de subsuperfície. Estes refletores sísmicos tipicamente são interfaces entre formações subterrâneas que tem propriedades elásticas diferentes, especificamente velocidade de onda sonora e densidade de rocha, que levam a diferenças na impedância acústica das interfaces. A energia sísmica refletida é detectada através de sensores sísmicos (também chamados receptores sísmicos) na ou

próximos à superfície da terra, em um corpo sobrejacente de água, ou a profundidades conhecidas em furos de poço. Os sensores sísmicos geram sinais, tipicamente elétricos ou óticos, a partir da energia sísmica detectada, que são gravados para processamento adicional.

[003] As fontes sísmicas apropriadas para geração de sinal sísmico em estudos sísmicos em terra podem incluir explosivos ou vibradores. Estudos sísmicos marinhos tipicamente empregam uma fonte sísmica submersa rebocada por um navio e ativada periodicamente para gerar um campo de ondas acústicas. A fonte sísmica que gera o campo de ondas pode ser de diversos tipos, que incluem uma pequena carga de explosivo, uma faísca ou arco elétrico, um vibrador marinho, um canhão de água, um canhão de vapor, e, mais tipicamente, um canhão de ar. Tipicamente, uma fonte sísmica marinha consiste não em um elemento único, mas em uma matriz distribuída espacialmente de elementos fonte. Este arranjo é particularmente verdadeiro para canhões de ar, atualmente a forma mais comum de fonte sísmica marinha.

[004] Os tipos apropriados de sensores sísmicos tipicamente incluem sensores de velocidade de partícula, particularmente em estudos em terra, e sensores de pressão de água particularmente em estudos 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 conhecidos comumente na técnica como geofones e hidrofones, respectivamente. Sensores sísmicos podem ser implantados sozinhos, mas mais comumente são implantados em arranjos de sensores. Adicionalmente, os sensores de pressão e sensores de movimento de partículas podem ser implantados juntos em um estudo marinho, colocados em pares ou pares de arranjos.

[005] Em um estudo sísmico marinho típico, um navio de estudo sísmico se desloca na superfície da água, tipicamente a aproximadamente 5 nós, e contém equipamento de aquisição sísmica, tal como controle de navegação, controle de fonte sísmica, controle de sensor sísmico e equipamento de gravação. O equipamento de controle de fonte sísmica provoca uma fonte sísmica rebocada no corpo de água pelo navio sísmico a atuar em tempos selecionados. Serpentinhas sísmicas, também chamadas cabos sísmicos, são estruturas alongadas semelhantes a cabos rebocados no corpo de água pelo navio de estudo sísmico que reboca a fonte ou por outra embarcação de estudo sísmico. Tipicamente, uma pluralidade de serpentinhas sísmicas é rebocada atrás de um navio sísmico. As serpentinhas sísmicas contêm sensores para detectar os campos de ondas refletidos iniciados pela fonte sísmica e refletidos pelas interfaces refletoras. Convencionalmente, as serpentinhas sísmicas contêm sensores de pressão tais como hidrofones, mas têm sido propostas serpentinhas sísmicas que contêm sensores de velocidade de partícula tais como geofones ou sensores de aceleração de partículas tais como acelerômetros, em adição aos hidrofones. Os sensores de pressão e sensores de movimento de partícula podem ser implantados em grande proximidade, colocados em pares ou pares de arranjos ao longo de um cabo sísmico. Uma alternativa a ter o geofone e hidrofone colocalizados, é ter densidade espacial suficiente de sensores de modo que os respectivos campos de ondas gravados pelo hidrofone e geofone possam ser interpolados ou extrapolados para produzir os dois sinais de campos de ondas na mesma localização.

[006] Após a onda refletida alcançar o cabo sísmico, a onda continua a se propagar para a interface água/ar na superfície da água, a partir de onde a onda é refletida para baixo, e é novamente detectada pelos hidrofones no cabo sísmico. A superfície da água é um bom re-

fletor e o coeficiente de reflexão na superfície da água é próximo à unidade em magnitude e é negativo em sinal para sinais de pressão. As ondas refletidas na superfície deste modo serão deslocadas de fase 180 graus relativos às ondas que se propagam para cima. A onda que se propaga para baixo gravada pelos receptores é comumente referenciada como reflexão de superfície ou sinal “fantasma”. Devido à reflexão de superfície, a superfície da água atua como um filtro, que cria fendas espectrais no sinal gravado que limitam a largura de banda dos dados gravados. Devido à influência da reflexão de superfície, algumas frequências no sinal gravado são amplificadas e algumas frequências são atenuadas.

[007] Um sensor de movimento de partículas, tal como um geofone, tem uma resposta direcional, enquanto que um sensor de pressão, tal como um hidrofone, não tem. Conseqüentemente, os sinais de campo de ondas ascendente detectados por um geofone e hidrofone localizados próximos estarão em fase, enquanto que sinais de campo de onda descendente serão gravados 180 graus fora de fase. Várias técnicas têm sido propostas para usar esta diferença de fase para reduzir as fendas espectrais causadas pela reflexão de superfície. Técnicas convencionais para a supressão de fantasma incluem frequentemente combinação de campos de ondas de velocidade de partícula vertical e pressão para separar um dos campos de ondas de velocidade vertical de partícula ou pressão em pelo menos um dos componentes de campo de onda ascendente e descendente.

[008] As medições feitas por sensores de movimento em cabos sísmicos rebocados para medir o movimento de partícula associado com as ondas de pressão são medições vetoriais. Portanto, diferente das medições de pressão, as amplitudes gravadas são dependentes do ângulo de incidência relativo para a direção de medição de vetor. Se o campo de velocidade vertical está sendo medido, então as ampli-

tudes gravadas são proporcionais ao cosseno do ângulo de incidência relativo à vertical. Com sensores de movimento de componente único, esta dependência de ângulo tem que ser corrigida para antes de o campo de velocidade ser combinado com o campo de pressão total para separar campos de ondas ascendentes e descendentes. Uma forma de fazer esta correção de amplitude dependente de ângulo é decompor os dados medidos em ondas planas, e então dividir as amplitudes pelo cosseno do ângulo de cada onda plana. A um ângulo de emissão de zero grau, a direção de medição é na mesma direção que o movimento de partícula, e não é necessária nenhuma correção às amplitudes após a decomposição em ondas planas.

[009] Existem diversas limitações com este método convencional. O método requer dados que sejam espacialmente amostrados densamente, tanto na direção alinhada como cruzada, a fim de evitar efeito serrilhado na decomposição de onda plana. Adicionalmente, a relação sinal para ruído tende a diminuir com o crescimento dos ângulos de incidência. Os sinais de interesse diminuem em amplitude com o aumento do ângulo como descrito acima, enquanto que o ruído relacionado a vibrações mecânicas nas serpentinas sísmicas não segue o mesmo ângulo de dependência que o sinal porque o ruído se propaga com uma velocidade mais lenta ao longo da serpentina sísmica comparada a energia acústica, e o efeito serrilhado tende a ocorrer a frequências relativamente baixas. Este ruído tende a ser espalhado sobre toda a amplitude de ângulos de interesse. Consequentemente, o nível de sinal relativo ao nível de ruído tende a diminuir com o aumento do ângulo.

[0010] Assim, existe uma necessidade por um método para separar os campos de pressão ou velocidade vertical em pelo menos um dos componentes de campo de ondas ascendente e descendente sem exigir amostragem espacial densa, especialmente na direção cruzada,

e sem exigir conhecimento dos ângulos de incidência.

BREVE SUMÁRIO DA INVENÇÃO

[0011] A invenção é um método para criação de imagem da sub-superfície da terra. Dados de velocidade de três eixos, obtido ao longo com dados de pressão em um estudo sísmico marinho, são girados para uma direção de radiação. Decomposição de onda plana é aplicada na direção de radiação aos dados de velocidade girada. Os dados de pressão e os dados de velocidade são combinados para gerar pelo menos um de campos de onda ascendente e descendente. Pelo menos, um dos campos de onda ascendentes e descendentes é usado em um domínio tempo-espaço para criar a imagem da subsuperfície da terra.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

[0012] A invenção e suas vantagens podem ser mais facilmente entendidas por referência a descrição detalhada a seguir e aos desenhos em anexo, nos quais:

[0013] a figura 1 é um fluxograma que ilustra uma modalidade do método da invenção para criação de imagem da subsuperfície da terra;

[0014] a figura 2 é um fluxograma que ilustra uma parte inicial de outra modalidade do método da invenção para criação de imagem da subsuperfície da terra;

[0015] a figura 3 é um fluxograma que ilustra uma parte final de uma modalidade do método da invenção começado na figura 2; e

[0016] a figura 4 é um fluxograma que ilustra uma parte final de uma modalidade alternativa do método da invenção começado na figura 2.

[0017] Embora a invenção seja descrita em conexão com suas modalidades preferenciais, será entendido que a invenção não é limitada a estas. Ao contrário, a invenção se destina a cobrir todas as al-

ternativas, modificações e equivalentes que possam ser incluídos dentro do escopo da invenção, como definido pelas reivindicações em anexo.

DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

[0018] A invenção é um método para criar a imagem da subsuperfície da terra usando pelo menos um dos campos de ondas de pressão e de velocidade ascendentes e descendentes. Em particular, a invenção é um método para usar medições de sensor de movimento de três eixos e medições de sensor de pressão obtidos durante um estudo sísmico marinho para gerar o pelo menos um de campos de ondas de pressão e velocidade ascendentes e descendentes. Na invenção, não é necessário usar o ângulo incidente para considerar as medições de velocidade direcionais. Em vez disso, as medições de velocidade são giradas para corresponder às direções de radiação das ondas planas separadas através de uma decomposição de onda plana.

[0019] Os dados sísmicos obtidos na execução de um estudo sísmico, representativo da subsuperfície da terra, são processados para produzir informação relacionada à estrutura e propriedades geológicas da subsuperfície de formações da terra na área que está sendo estudada. Os dados sísmicos processados são processados para exibição e análise do conteúdo de hidrocarboneto potencial destas formações subterrâneas. O objetivo de processamento de dados sísmicos é extrair dos dados sísmicos tanta informação quanto possível a respeito das formações subterrâneas a fim de criar a imagem adequadamente a subsuperfície geológica. A fim de identificar localizações na subsuperfície da Terra, onde existe uma probabilidade de achar acúmulos de petróleo, são gastas grandes somas de dinheiro na obtenção, processamento e interpretação de dados sísmicos. O processo de construir superfícies refletoras que definem as camadas da terra subterrâneas de interesse para os dados sísmicos gravados fornece uma ima-

gem da terra em profundidade ou tempo.

[0020] A imagem da estrutura da subsuperfície da terra é produzida a fim de permitir que um interpretador selecione localizações com a maior probabilidade de ter acúmulos de petróleo. Para verificar a presença de petróleo, um poço tem que ser perfurado. A perfuração de poços para determinar se depósitos de petróleo estão presentes ou não, é um empreendimento extremamente oneroso e demorado. Por esta razão, existe uma necessidade contínua para melhorar o processamento e a exibição de dados sísmicos, para produzir uma imagem da estrutura da subsuperfície da terra que melhorará a habilidade de um interpretador, seja a interpretação feita através de um computador ou um ser humano, para avaliar a probabilidade de que um acúmulo de petróleo exista em uma localização particular na subsuperfície da terra. O processamento e a exibição dos dados sísmicos obtidos facilitam decisões mais precisas de se e onde perfurar, e deste modo reduz o risco de perfuração de furos secos.

[0021] Sensores de movimento de partículas são tipicamente sensores de velocidade, mas outros sensores de movimento de partícula, que incluem sensores de aceleração de partícula, podem ser usados em vez de sensores de velocidade de partícula em serpentinas sísmicas de sensor dual. Sensores de velocidade de partícula são comumente conhecidos na técnica como geofones e sensores de aceleração de partícula são comumente conhecidos na técnica como acelerômetros. A presente invenção será descrita com modalidades que empregam geofones, mas esta escolha de sensor é por simplicidade de ilustração apenas e não tem a intenção de ser uma restrição da invenção.

[0022] Embora um hidrofone grave o campo de ondas total omnidirecionalmente, um geofone vertical, como utilizado tipicamente em processamento sísmico, grava apenas o componente vertical do cam-

po de ondas uni-direcionalmente. O componente vertical do campo de ondas será igual ao campo de ondas total apenas para sinais que são propagados de forma verticalmente descendente. Se θ é o ângulo de incidência entre a frente de onda de sinal e a orientação do sensor, então a propagação ascendente vertical é convencionalmente definida pelo ângulo de incidência $\theta = 0$.

[0023] Se os componentes de velocidade de partícula vertical e dois ortogonais horizontais são conhecidos a partir da medição, adicionalmente ao campo de ondas de pressão, então os componentes de velocidade de partícula podem ser calculados pela rotação de um sistema de coordenadas diferente inicialmente. Então, através do método da invenção, pelo menos um dos componentes ascendente e descendente dos campos de pressão e velocidade vertical pode ser determinado sem conhecimento dos ângulos de incidência.

[0024] A figura 1 é um fluxograma que ilustra uma modalidade do método da invenção para criação de imagem da subsuperfície da terra.

[0025] No bloco 10, dados de três eixos geométricos de velocidade, obtidos juntamente com dados de pressão em um estudo sísmico marinho, são girados para uma direção de radiação.

[0026] No bloco 11, uma decomposição de onda plana é aplicada na direção de radiação aos dados de velocidade girados do bloco 10.

[0027] No bloco 12, os dados de pressão e os dados de velocidade do bloco 11 são combinados para gerar pelo menos um dos campos de onda ascendente e descendente.

[0028] No bloco 13, o pelo menos um dos campos de onda ascendente e descendente do bloco 12 são usados no domínio tempo-espaco para criar a imagem da subsuperfície da terra.

[0029] As figuras 2 a 4 ilustram em mais detalhes a invenção mostrada em geral na figura 1.

[0030] A figura 2 é um fluxograma que ilustra uma parte inicial de outra modalidade do método da invenção para criação de imagem da subsuperfície da terra.

[0031] No bloco 20, dados sísmicos marinhos são obtidos com o uso de sensores de movimento de três eixos geométricos e um sensor de pressão. Se os sensores de movimento são acelerômetros em vez de geofones, então as medições do acelerômetro precisam ser integradas a fim de fornecer os dados na forma de dados de velocidade. Esta integração pode ser obtida por métodos computacionais bem conhecidos na técnica. Então, os sensores de movimento de três eixos geométricos geram dados de velocidade de partícula direcionais e o sensor de pressão gera dados de pressão omni-direcionais. Obter os dados sísmicos inclui recuperar previamente dados obtidos do armazenamento, tal como memória de computador ou outros tipos de dispositivos ou mídia de armazenamento de memória.

[0032] No bloco 21, são determinadas as orientações dos sensores de movimento de três eixos geométricos do bloco 20. Estas orientações determinam um sistema de coordenadas Cartesiano para os dados de velocidade do bloco 20, orientado nas direções dos três sensores de movimento. Tipicamente, os três sensores de movimento compreendem um sensor vertical e dois sensores horizontais ortogonais. Tipicamente, os dois sensores horizontais são orientados nas direções alinhada e cruzada. Estas orientações convencionais são convenientes e podem auxiliar na eficiência computacional, mas não devem ser consideradas uma limitação da invenção. Em uma modalidade, estes sensores de movimento compreendem geofones ou acelerômetros em gimbal. O mecanismo gimbal traz automaticamente os sensores para uma determinada orientação, tal como as direções horizontal e vertical ortogonais descritas acima.

[0033] Em outra modalidade, os sensores de movimento são ace-

lerômetros que não estão em gímbal, de modo que a orientação dos sensores não é anteriormente conhecida. Neste caso, a orientação dos sensores precisa ser determinada, ou a partir dos componentes CC das acelerações medidas ou a partir dos sensores inclinômetros ou quaisquer outros sensores apropriados. Adicionalmente, medições de giroscópio podem ser usadas para determinar variação na orientação.

[0034] No bloco 22, é determinada a direção de radiação do plano da decomposição de onda plana a ser executada.

[0035] No bloco 23, o sistema de coordenadas dos sensores de movimento de três eixos geométricos do bloco 21 é girado para ajustar-se à direção de radiação da decomposição de onda plana determinada no bloco 22. Em uma modalidade, a rotação é feita como rotação de vetor através do uso de matrizes de rotação.

[0036] Com sensores de movimento de três eixos geométricos, tais como sensores de velocidade (geofones) ou acelerômetros, nos quais a orientação dos sensores e cada um de seus componentes horizontal e vertical são conhecidos, o sistema de coordenadas pode ser girado para qualquer orientação. Portanto com sensores de movimento de três eixos geométricos, o campo de velocidade em qualquer direção pode ser derivado através da rotação do vetor.

[0037] No bloco 24, a decomposição de onda plana é aplicada aos dados de velocidade no sistema de coordenadas girado do bloco 23 na direção de radiação do bloco 22. O sistema de coordenadas das medições de velocidade de três eixos geométricos é girado juntamente com a decomposição de onda plana de modo que um dos eixos geométricos aponta na mesma direção da direção da radiação da onda plana que está sendo decomposta em todas as posições de sensor. Este eixo geométrico ou vetor de velocidade é então usado para fazer a decomposição de onda plana.

[0038] O vetor de velocidade usado para decomposição de onda plana está agora na mesma direção que a direção do movimento de partícula associado com a representação de onda plana das ondas de pressão. Uma vez que a medição do vetor está sempre apontando na mesma direção que o movimento da partícula, não existe necessidade de correções adicionais de amplitude dependentes de ângulo, como seria necessário no processamento convencional. Também, uma vez que os vetores de velocidade são orientados na mesma direção que o movimento da partícula, as amplitudes dos sinais em cada direção de onda plana são maximizadas através da rotação do vetor juntamente com a decomposição de onda plana, deste modo maximizando a relação sinal para ruído.

[0039] A decomposição de onda plana pode ser feita através de uma transformada de Radon linear onde sinais são somados ao longo de planos de ângulos conhecidos. As medições de velocidade de partícula foram giradas anteriormente de modo que os vetores de velocidade estão na mesma direção que a direção de radiação da onda plana. A rotação e a soma ao longo de planos de ângulos bem conhecidos são repetidas sobre as amplitudes de ângulos de interesse. Isto pode ser feito ou no domínio do tempo ou no domínio de frequência.

[0040] Neste ponto, o processo prossegue ou para o bloco 30 da figura 3 ou para o bloco 40 da figura 4, com os dados de velocidade. Os fluxogramas nas figuras 3 e 4 ilustram duas modalidades alternativas para terminar o processo começado na figura 2.

[0041] A figura 3 é um fluxograma que ilustra uma parte final de uma modalidade do método da invenção começado na figura 2.

[0042] No bloco 30, os dados de velocidade do bloco 24 da figura 2 são transformados inversamente do domínio da onda plana de volta para o domínio tempo- espaço. Após os dados serem transformados

de volta para o domínio tempo-espaço, o resultado é um campo de velocidade omni-direcional. Em particular, nenhuma correção para ângulo de incidência é executada porque, no método da invenção, nenhuma correção adicional é necessária. Em uma modalidade, a transformada inversa é uma transformada de Radon linear inversa.

[0043] Uma vez que a amostragem espacial das medições do sensor são suficientemente densas, e a decomposição de onda plana para frente e inversa podem ser feitas sem artefatos, a transformada inversa pode ser feita para localizações diferentes das localizações originais dos sensores. Portanto, não é uma exigência da invenção ter sensores de pressão e movimento colocalizados.

[0044] Neste ponto, o processo pode prosseguir como diversas modalidades, duas das quais são ilustradas aqui. Na primeira modalidade, o processo prossegue para o bloco 31 para gerar pelo menos um dos campos de pressão ascendente e descendente. Na segunda modalidade, o processo prossegue para o bloco 33 para gerar pelo menos um dos campos de velocidade ascendente e descendente. Em ambas as modalidades, o pelo menos um dos campos de onda ascendente e descendente resultante são utilizados para criar a imagem da subsuperfície da terra.

[0045] No bloco 31, o campo de velocidade omni-direcional transformada do bloco 30 é multiplicado pela impedância acústica da água e então combinado com o campo de pressão total no domínio tempo e espaço. Esta combinação gera pelo menos um dos campos de onda de pressão ascendente e descendente no domínio tempo-espaço. A impedância acústica da água é um produto da velocidade da água e densidade na localização do sensor.

[0046] Assim em uma modalidade, os campos de onda de pressão ascendente e descendente P^u e P^d são dados em termos da pressão medida P e da velocidade omni-direcional V por:

$$P^u = \frac{1}{2} [P - \rho c V] \quad (1)$$

e

$$P^d = \frac{1}{2} [P + \rho c V] \quad (2)$$

[0047]

Aqui, o fator ρc é a impedância acústica da água, onde ρ é a densidade da água e c é a velocidade acústica da água. Deve ser observado que no método da invenção, como expresso, por exemplo, nas equações (1) e (2) não existe dependência explícita do ângulo de incidência.

[0048]

No bloco 32, pelo menos um dos campos de pressão ascendente e descendente gerados no bloco 31 é usado para criação de imagem da subsuperfície da terra. O processo termina para esta modalidade.

[0049]

No bloco 33, em uma modalidade alternativa, o campo de pressão total é dividido pela impedância acústica da água e então combinado com o campo de velocidade omni-direcional no domínio tempo-espaço a fim de derivar o pelo menos um dos campos de velocidade ascendente e descendente no domínio tempo-espaço.

[0050]

Em uma modalidade, os campos de onda de velocidade ascendente e descendente V^u e V^d são dados em termos de pressão P medida e velocidade omni-direcional V por:

$$V^u = \frac{1}{2} \left[V - \frac{1}{\rho c} P \right] \quad (3)$$

e

$$V^d = \frac{1}{2} \left[V + \frac{1}{\rho c} P \right]. \quad (4)$$

[0051] Novamente, no método da invenção, como expresso, nas equações (3) e (4), não existe dependência explícita do ângulo de incidência.

[0052] No bloco 34, pelo menos um dos campos de velocidade ascendente e descendente do bloco 33 é usado para criar a imagem da subsuperfície da terra. O processo termina para esta modalidade

[0053] A figura 4 é um fluxograma que ilustra uma parte final de uma modalidade alternativa do método da invenção começado na figura 2.

[0054] No bloco 40, em outra modalidade da invenção, a decomposição de onda plana é aplicada ao campo de pressão total sobre as mesmas amplitudes de ângulos que os campos de velocidade no bloco 24 da figura 2.

[0055] Neste ponto, o processo pode prosseguir como diversas modalidades, duas das quais são ilustradas aqui. Na primeira modalidade, o processo prossegue para o bloco 41 para gerar pelo menos um dos campos de pressão ascendente ou descendente. Na segunda modalidade, o processo segue para o bloco 44 para gerar pelo menos um dos campos de velocidade ascendente e descendente.

[0056] No bloco 41, os dados de velocidade girados decompostos do bloco 24 da figura 2 são multiplicados pela impedância acústica da água e combinados no domínio de onda plana com os dados de pressão decompostos do bloco 40. Esta combinação gera pelo menos um dos campos de onda de pressão ascendente e descendente no domínio de onda plana. Em uma modalidade, as equações (1) e (2) são empregadas.

[0057] No bloco 42, pelo menos um dos campos de pressão ascendente e descendente do bloco 41 é transformado inversamente do domínio de onda plana de volta para o domínio tempo-espaco.

[0058] No bloco 43, o pelo menos um dos campos de pressão as-

cendente e descendente do bloco 42 é usado para criar a imagem da subsuperfície da terra. O processo termina para esta modalidade.

[0059] No bloco 44, em uma modalidade alternativa, o campo de pressão decomposto do bloco 40 é dividido pela impedância acústica da água e então combinado no domínio de onda plana com o campo de velocidade girado decomposto a fim de derivar o pelo menos um dos campos de velocidade ascendente e descendente no domínio de onda plana. Em uma modalidade, as equações (3) e (4) são empregadas.

[0060] No bloco 45, pelo menos um dos campos de velocidade ascendente e descendente separado é inversamente transformado do domínio de onda plana de volta para o domínio tempo-espço para gerar pelo menos um dos campos de velocidade ascendente e descendente omni-direcional.

[0061] No bloco 46, pelo menos um dos campos de velocidade ascendente e descendente omni-direcional do bloco 43 é usado para criar a imagem da subsuperfície da terra. O processo termina para esta modalidade.

[0062] A metodologia descrita não requer qualquer interação de usuário, e pode como tal ser aplicada em centros de processamento de dados ou a bordo de navios como uma das primeiras etapas do processo, ou durante o processo de obtenção de dados.

[0063] A invenção foi discutida acima como um método, para fins ilustrativos apenas, mas também pode ser implementada como um sistema. O sistema da invenção é preferencialmente implementado por meio de computadores, em particular computadores digitais, juntamente com outros equipamentos de processamento de dados convencionais. Estes equipamentos de processamento de dados, bem conhecidos na técnica, compreenderão qualquer combinação apropriada ou rede de equipamentos de processamento computador, incluindo, mas

não limitado a, hardware (processadores, dispositivos de armazenamento temporário e permanente, e quaisquer outros equipamentos de processamento de computador apropriados), software (sistemas operacionais, programas de aplicação, bibliotecas de programas matemáticos, e qualquer outro software apropriado), conexões (elétrica, ótica, sem-fio, ou de outra forma), e periféricos (dispositivos de entrada e saída, tais como teclado, dispositivos de apontar e scanners, dispositivos de exibição tais como monitores e impressoras, mídia de armazenamento legível por computador tais como fitas, discos, discos rígidos, e qualquer outro equipamento apropriado).

[0064] Em outra modalidade, a invenção pode ser implementada como o método descrito acima, especificamente executada usando um computador programável para executar o método. Em outra modalidade, a invenção pode ser implementada como um programa de computador armazenado em um meio legível por computador para executar o método descrito acima. Em outra modalidade, a invenção pode ser implementada como um meio legível por computador com um programa de computador armazenado no meio, de modo que o programa tem lógica operável para fazer com que um computador programável execute o método descrito acima.

[0065] Deve ser entendido que o conteúdo precedente é meramente uma descrição detalhada de modalidades específicas desta invenção e que várias mudanças, modificações e alternativas às modalidades descritas podem ser feitas de acordo com esta descrição sem se afastar do escopo da invenção. A descrição precedente, portanto, não tem o objetivo de limitar o escopo da invenção. Em vez disso, o escopo da invenção é para ser determinado apenas pelas reivindicações em anexo e seus equivalentes.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para criação de imagem da subsuperfície da terra, **caracterizado** pelo fato de que compreende as etapas de:

girar (10,23) um sistema de coordenadas de dados de velocidade de três eixos geométricos, obtidos juntamente com dados de pressão em um estudo sísmico marinho, para conformar para uma direção de radiação da direção de velocidade associada com uma representação no domínio de onda plana dos dados de pressão;

aplicar (11,24) decomposição de onda plana na direção de radiação aos dados de velocidade no sistema de coordenadas girado, de modo que o vetor de velocidade aponte na direção do raio;

combinar (12) os dados de pressão e os dados de velocidade girados e decompostos para gerar pelo menos um dos campos de ondas ascendente e descendente; e

usar (13) o pelo menos um dos campos de ondas ascendente e descendente em um domínio tempo-espaco para criar a imagem da subsuperfície da terra.

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que a rotação dos dados de velocidade compreende:

obter (20) dados sísmicos marinhos usando sensores de movimento de três eixos geométricos e um sensor de pressão;

determinar (21) orientações dos sensores de movimento de três eixos geométricos;

determinar (22) a direção de radiação da decomposição de onda plana a ser executada; e

girar (23) o sistema de coordenadas dos sensores de movimento de três eixos geométricos para adequar a direção da radiação da decomposição de onda plana.

3. Método, de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado** pelo fato de que os sensores de movimento de três eixos geométricos

compreendem geofones de três eixos geométricos.

4. Método, de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado** pelo fato de que os sensores de movimento de três eixos geométricos compreendem acelerômetros de três eixos geométricos.

5. Método, de acordo com a reivindicação 4, **caracterizado** pelo fato de que compreende ainda integrar dados do acelerômetro para fornecer dados de velocidade de três eixos geométricos.

6. Método, de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado** pelo fato de que a rotação do sistema de coordenadas dos sensores de movimento de três eixos geométricos compreende:

aplicar (24) rotação de vetor através do uso de matrizes de rotação.

7. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que a etapa de aplicar a decomposição de onda plana compreende ainda:

transformar inversamente (30) os dados de velocidade girados a partir do domínio de onda plana de volta para o domínio de tempo-espaco para gerar dados de velocidade omni-direcionais.

8. Método, de acordo com a reivindicação 7, **caracterizado** pelo fato de que a combinação dos dados de pressão e dados de velocidade girados e decompostos compreende:

multiplicar (31) os dados de velocidade omni-direcionais pela impedância acústica da água para gerar dados de velocidade em escala; e

combinar (31) os dados de velocidade em escala com os dados de pressão no domínio tempo-espaco.

9. Método, de acordo com a reivindicação 7, **caracterizado** pelo fato de que a combinação dos dados de pressão e dados de velocidade girados e decompostos compreende as etapas de:

dividir (33) os dados de pressão pela impedância acústica

da água para gerar dados de pressão em escala; e

combinar (33) os dados de pressão em escala com os dados de velocidade omni-direcionais no domínio tempo-espaco.

10. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que a aplicação da decomposição de onda plana compreende ainda:

aplicar (40) decomposição de onda plana na direção da radiação aos dados de pressão.

11. Método, de acordo com a reivindicação 7, **caracterizado** pelo fato de que a combinação dos dados de pressão e dados de velocidade girados e decompostos compreende ainda:

multiplicar (41) os dados de velocidade girados e decompostos pela impedância acústica da água para gerar dados de velocidade em escala;

combinar (41) os dados de velocidade em escala com os dados de pressão em um domínio de onda plana, gerando o pelo menos um dos campos de onda ascendente e descendente; e

transformar inversamente (42) o pelo menos um dos campos de onda ascendente e descendente do domínio de onda plana de volta para o domínio tempo-espaco.

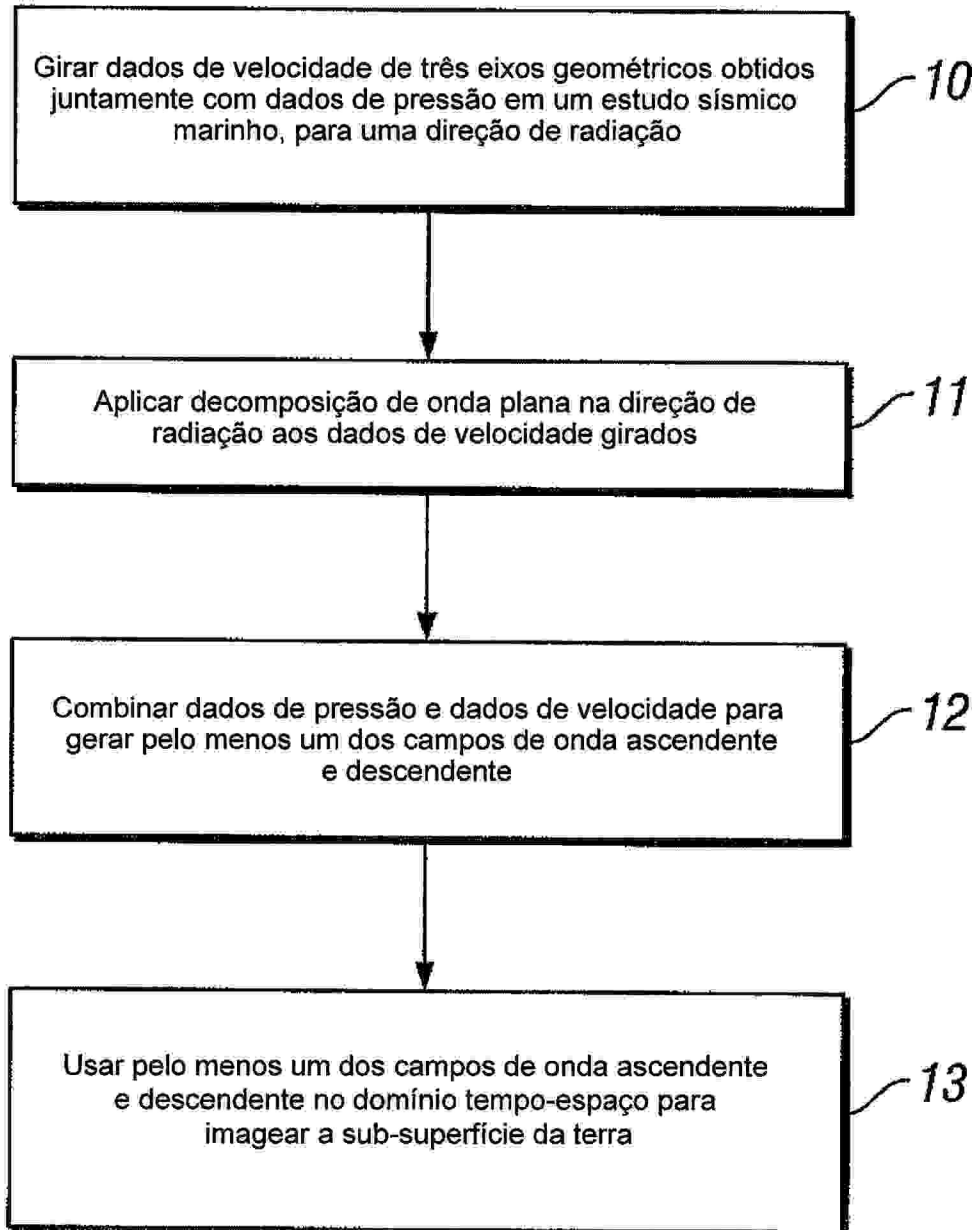
12. Método, de acordo com a reivindicação 7, **caracterizado** pelo fato de que a combinação dos dados de pressão e dados de velocidade girados e decompostos compreende ainda:

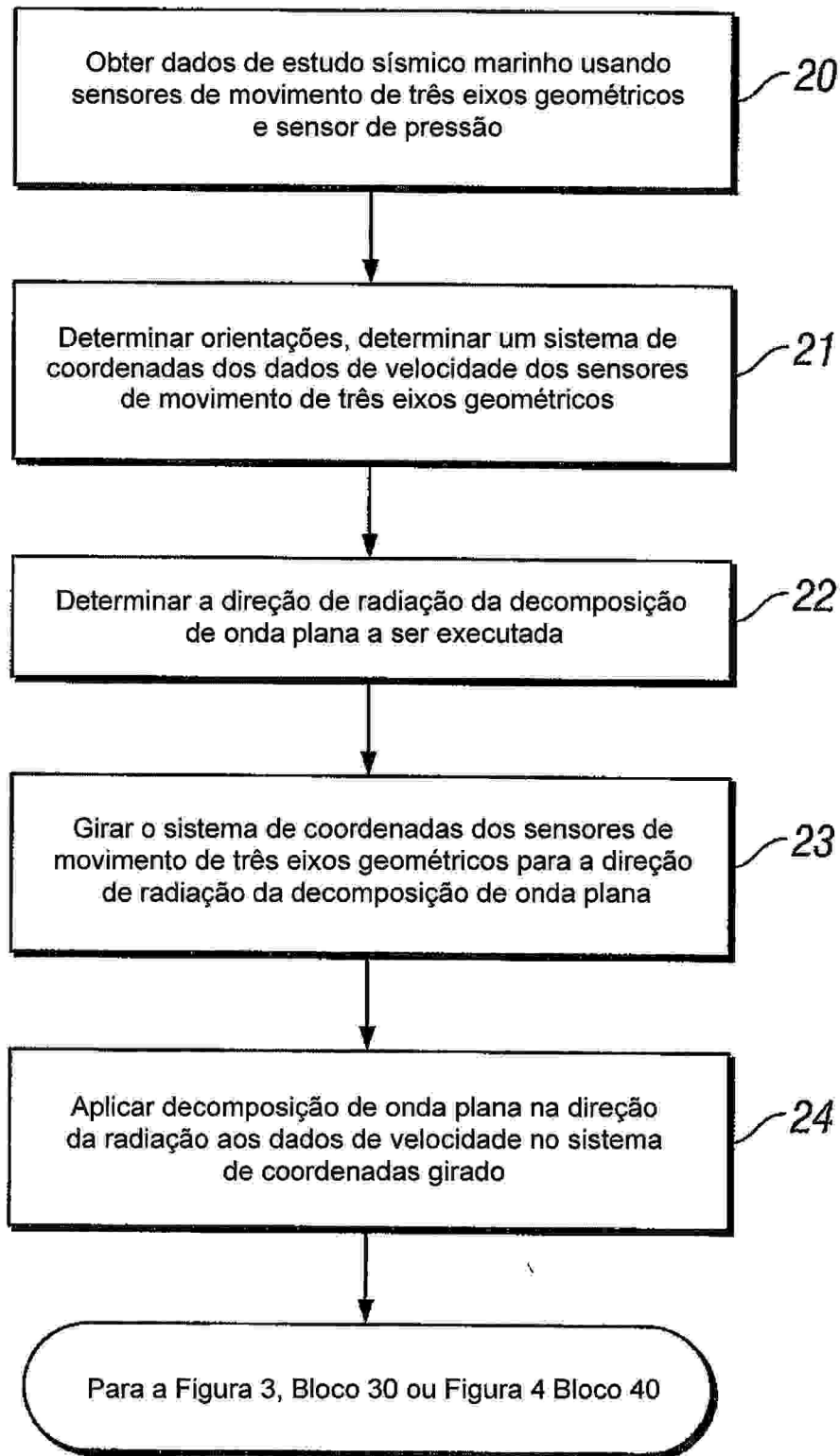
dividir (44) os dados de pressão pela impedância acústica da água para gerar dados de pressão em escala;

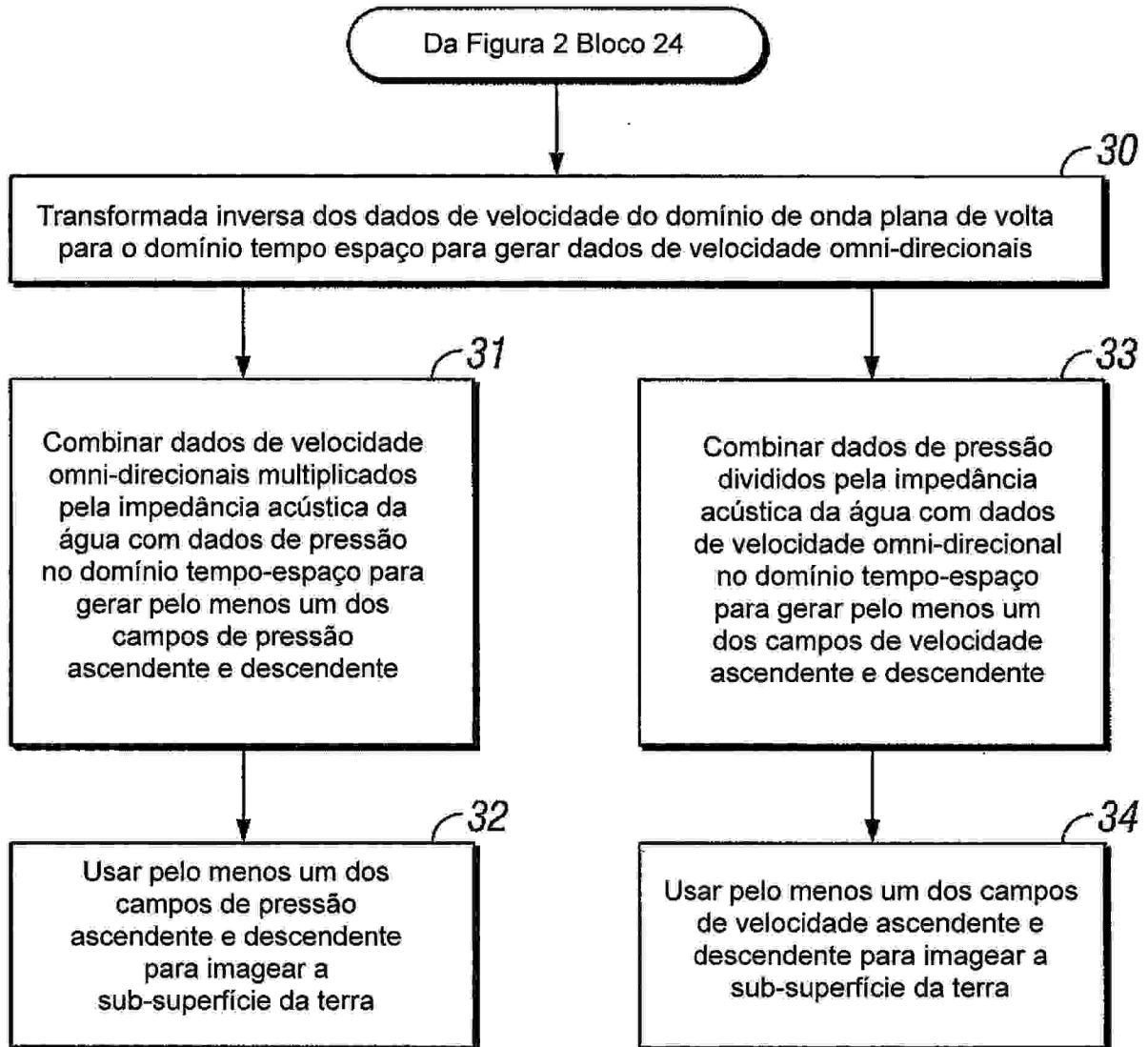
combinar (44) os dados de pressão em escala com os dados de velocidade girados e decompostos no domínio de onda plana, gerando o pelo menos um dos campos de ondas ascendente e descendente; e

transformar inversamente (45) o pelo menos um dos cam-

pos de onda ascendente e descendente do domínio de onda plana de volta para o domínio tempo-espaço.

**FIG. 1**

**FIG. 2**

**FIG. 3**

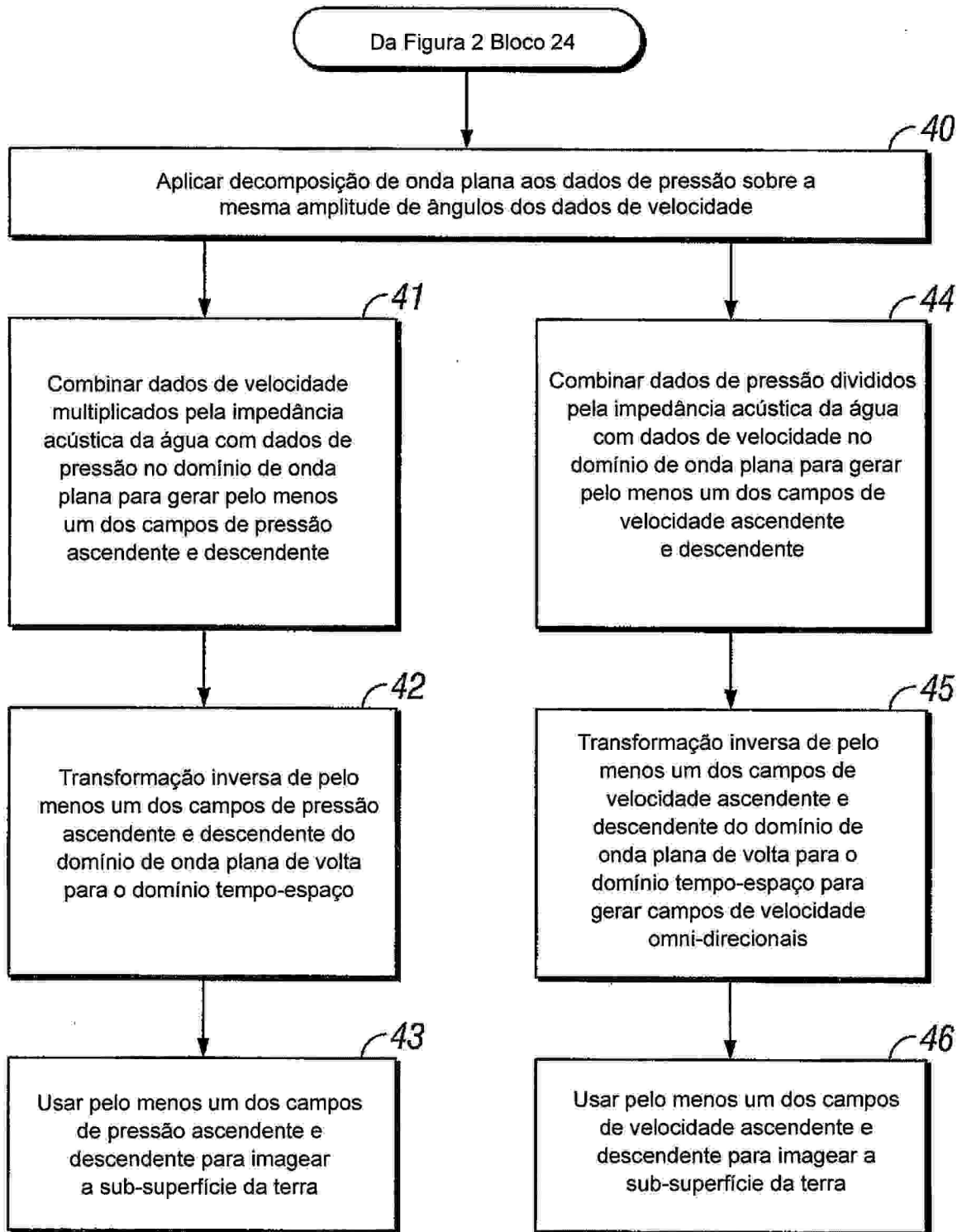


FIG. 4