



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

(11) PI 1005340-9 B1



* B R P I 1 0 0 5 3 4 0 B 1 *

(22) Data do Depósito: 07/12/2010

(45) Data de Concessão: 04/02/2020

(54) Título: MÉTODO PARA CONVERTER DADOS SÍSMICOS GRAVADOS A PARTIR DE STREAMERS MARINHOS EM DADOS SÍSMICOS DE FONTE SEM FANTASMA

(51) Int.Cl.: G01V 1/36; G01V 3/38; G06F 17/11.

(30) Prioridade Unionista: 07/12/2009 US 12/653,099.

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

(72) Inventor(es): ROALD G. VAN BORSELEN; CHRISTINA D. RIYANTI; CHRISTOPHER P. PAGE; JACOB T. FOKKEMA; PETER M. VAN DEN BERG.

(57) Resumo: MÉTODO PARA REMOÇÃO DE EFEITO FANTASMA DE FONTE DE LARGURA DE BANDA TOTAL DE DADOS DE STREAMER SÍSMICO MARINHO. A presente invenção refere-se a dados sísmicos gravados em um streamer marinho separados como uma coleta de receptor comum. Um parâmetro de frequência de Laplace complexo é utilizado para transformar os dados sísmicos de um domínio de espaço e tempo em um domínio espectral. Um esquema de gradiente conjugado iterativo, utilizando um pré-condicionador físico, é aplicado aos dados sísmicos transformados para fornecer solução de quadrados médios para um conjunto normal de equações para a remoção de efeito fantasma do sistema de equações. A solução é transformada de forma invertida de volta a um domínio de espaço e tempo para fornecer dados sísmicos fonte sem fantasmas, o que é útil para a criação de imagem da subsuperfície da terra.

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "**MÉTODO PARA CONVERTER DADOS SÍSMICOS GRAVADOS A PARTIR DE STREAMERS MARINHOS EM DADOS SÍSMICOS DE FONTE SEM FANTASMA**".

Referências Cruzadas a Pedidos Relacionados

[0001] Não aplicável

Pesquisa ou Desenvolvimento Patrocinado pelo Governo Federal

[0002] Não aplicável

Listagem de Sequência, Tabela ou Listagem de Computador.

[0003] Não aplicável

Antecedentes da Invenção

Campo da Invenção

[0004] A presente invenção refere-se, geralmente, ao campo de prospecção geofísica. Mais particularmente, a invenção refere-se ao campo de eliminação de fantasma de dados de streamer sísmicos marinhos.

Descrição da Técnica Relacionada

[0005] Na indústria de óleo e gás, a prospecção geofísica é comumente utilizada para auxiliar na busca por e avaliação das formações de subsuperfície de terra. Técnicas de prospecção geofísica resultam em conhecimento da estrutura de subsuperfície da terra, que é útil para encontrar e extrair recursos minerais valiosos, particularmente depósitos de hidrocarbono, tal como óleo e gás natural. Uma técnica bem conhecida de prospecção geofísica é uma pesquisa sísmica. Em uma pesquisa sísmica com base terrestre, um sinal sísmico é gerado em ou perto da superfície da terra e então percorre descendentemente para dentro da subsuperfície da terra. Em uma pesquisa sísmica marinha, o sinal sísmico também pode percorrer descendentemente através de um corpo de água sobreposto à subsuperfície da terra. As fontes de energia sísmica são utilizadas para gerar sinal sísmico que, de-

pois de propagar para dentro da terra, é pelo menos parcialmente refletidas pelos refletores sísmicos de subsuperfície. Tais refletores sísmicos são tipicamente interfaces entre formações subterrâneas possuindo diferentes propriedades elásticas, especificamente velocidade de onda sonora e densidade de rocha, que resulta em diferenças de impedância acústica nas interfaces. A energia sísmica refletida é detectada por sensores sísmicos (também chamados receptores sísmicos) em ou perto da superfície da terra, em um corpo de água sobreposto, ou em profundidades conhecidas nos furos. Os sensores sísmicos geram sinais, tipicamente elétricos ou óticos, a partir da energia sísmica detectada, que são gravados para processamento adicional.

[0006] Os dados sísmicos resultantes obtidos na realização de uma pesquisa sísmica, representativos da subsuperfície da terra, são processados para resultar na informação referente à estrutura geológica e propriedades das formações de subsuperfície de terra na área sendo pesquisada. Os dados sísmicos processados são processados para exibição e análise do teor de hidrocarbono em potencial destas formações subterrâneas. O objetivo do processamento de dados sísmicos é a extração a partir dos dados sísmicos do máximo de informação possível referente às formações subterrâneas a fim de criar imagens adequadas da subsuperfície geológica. A fim de se identificar as localizações na subsuperfície da terra onde existe a probabilidade de se encontrar acúmulos de petróleo, grandes somas de dinheiro são gastas na coleta, processamento e interpretação de dados sísmicos. O processo de construção de superfícies refletoras definindo as camadas subterrâneas de interesse a partir dos dados sísmicos gravados fornece uma imagem da terra em profundidade ou tempo.

[0007] A imagem da estrutura da subsuperfície da terra é produzida a fim de permitir que um interprete selecione os locais com a maior probabilidade de ter acúmulos de petróleo. Para se verificar a presen-

ça de petróleo, um poço deve ser perfurado. A perfuração de poços para determinar se os depósitos de petróleo estão presentes ou não, é uma tarefa extremamente cara e demorada. Por esta razão, existe uma necessidade contínua de se aperfeiçoar o processamento e exibição de dados sísmicos, de modo a se produzir uma imagem da estrutura da subsuperfície da terra que aperfeiçoará a capacidade de um interprete, seja a interpretação realizada por uma pessoa ou um computador, em determinar a probabilidade de um acúmulo de petróleo existir em um local em particular na subsuperfície da terra.

[0008] As fontes sísmicas adequadas para a geração do sinal sísmico em pesquisas sísmicas terrestres podem incluir explosivos e vibradores. As pesquisas sísmicas marinhas empregam tipicamente uma fonte sísmica submersa rebocada por um navio e ativada periodicamente para gerar um campo de onda acústica. A fonte sísmica gerando o campo de onda pode ser de vários tipos, incluindo uma carga explosiva pequena, uma fagulha ou arco elétrico, um vibrador marinho, e, tipicamente, uma pistola. A pistola de fonte sísmica pode ser uma pistola de água, uma pistola de vapor, e, mais tipicamente, uma pistola de ar. Tipicamente, a fonte sísmica marinha consiste não de um único elemento fonte, mas de um conjunto distribuído espacialmente de elementos fonte. Essa disposição é particularmente verdadeira para pistolas de ar, atualmente a forma mais comum de fonte sísmica marinha.

[0009] Os tipos adequados de sensores sísmicos incluem tipicamente sensores de velocidade de partícula, particularmente em pesquisas terrestres, e sensores de pressão de água, particularmente em pesquisas marinhas. Algumas vezes os sensores de aceleração de partícula ou sensores de gradiente de pressão são utilizados no lugar de ou em adição aos sensores de velocidade de partícula. Os sensores de velocidade de partícula e os sensores de pressão de água são

comumente conhecidos na técnica como geofones e hidrofones, respectivamente. Os sensores sísmicos podem ser utilizados por si mesmos, mas são mais comumente utilizados em conjuntos de sensores. Adicionalmente, os sensores de pressão e os sensores de velocidade de partícula podem ser utilizados juntos em uma pesquisa marinha, localizados em conjunto em pares ou pares de conjuntos.

[00010] Em uma pesquisa sísmica marinha típica, uma embarcação de pesquisa percorre a superfície da água, tipicamente a cerca de 5 nós, e contém o equipamento de aquisição sísmica, tal como o controle de navegação, o controle de fonte sísmica, o controle de sensor sísmico, e o equipamento de gravação. O equipamento de controle de fonte sísmica faz com que uma fonte sísmica rebocada no corpo de água pela embarcação sísmica seja acionada em momentos selecionados. Os streamers sísmicos, também chamados de cabos sísmicos, são estruturas tipo cabo alongadas rebocadas no corpo de água pela embarcação de pesquisa sísmica que reboca a fonte sísmica ou por outro navio de pesquisa sísmica. Tipicamente, uma pluralidade de streamers sísmicos são rebocados atrás de uma embarcação sísmica. Os streamers sísmicos contêm sensores para detectar os campos de onda refletidos iniciados pela fonte sísmica e refletidos a partir da interfaces refletoras. Convencionalmente, os streamers sísmicos contêm sensores de pressão, tal como hidrofones, mas streamers sísmicos têm sido utilizados contendo sensores de velocidade de partícula de água tal como geofones ou sensores de aceleração de partícula, tal como acelerômetros, em adição aos hidrofones. Os sensores de pressão e os sensores de movimento de partícula são tipicamente desenvolvidos em proximidade, localizados em conjunto em pares ou em pares de conjuntos ao longo de um cabo sísmico.

[00011] Depois que a onda refletida alcança um cabo streamer, a onda continua a propagar-se para a interface água/ar na superfície a

água, a partir de onde a onda é refletida descendente, e é novamente detectada pelos hidrofones no cabo streamer. A superfície da água é um bom refletor e o coeficiente de reflexo na superfície da água é quase uma unidade em termos de magnitude e é negativa em sinal para sinais sísmicos. As ondas refletidas na superfície serão, desta forma, alteradas em fase por 180 graus com relação às ondas de propagação ascendente. A onda de propagação descendente gravada pelos receptores é comumente referida como reflexo de superfície ou sinal "fantasma" do receptor. Os sinais fantasma são ondas que primeiro se propagaram a partir da fonte sísmica para cima até a superfície da água antes de se propagarem descendente para dentro da subsuperfície e de volta para os receptores. Devido ao reflexo na superfície, a superfície da água age como um filtro, que cria fendas espectrais no sinal gravado, tornando difícil gravar-se os dados fora de uma largura de banda selecionada. Devido à influência do reflexo de superfície, algumas frequências no sinal gravado são amplificadas e algumas frequências são atenuadas.

[00012] Atualmente na técnica de prospecção sísmica marinha geofísica, uma embarcação reboca streamers muito longos que possuem muitos receptores sísmicos anexados, tipicamente hidrofones (apesar de outros tipos de receptores poderem ser empregados). Estes receptores registram uma parte de um campo de onda acústica espalhado, originado no som de uma fonte sísmica. O campo de onda acústica gerado pela fonte sísmica é espalhado pelo reflexo e refração na terra. Na aquisição sísmica marinha convencional, os receptores do streamer são localizados em configurações de conjunto em uma posição de profundidade particular abaixo da superfície do mar. Devido a essa disposição, o chamado reflexo primário, a resposta direta da fonte para a subsuperfície e subsequentemente para os receptores, é perturbado pelo reflexo fantasma, a partir da onda que percorre da fonte para a

subsuperfície e subseqüentemente através da superfície do mar para os receptores. A eliminação do reflexo fantasma do receptor dos dados sísmicos marinhos é o primeiro estágio no pré-processamento de dados para aumentar a potência de resolução. Esse procedimento é conhecido como "eliminação de fantasma" de receptor. A eliminação do reflexo fantasma dos dados sísmicos marinhos é outro estágio desejado no pré-processamento de dados para aumentar ainda mais a potência de resolução. Esse procedimento é conhecido como eliminação de fantasma.

[00013] Desta forma, existe a necessidade de criar-se um método para a eliminação de fantasma de dados sísmicos marinhos que permanecem estáveis em todas as frequências, mesmo na presença de fendas espectrais nos dados sísmicos. Adicionalmente, o método deve operar sem qualquer conhecimento anterior da subsuperfície.

Breve Sumário da Invenção

[00014] A presente invenção é um método de conversão de dados sísmicos gravados em streamers marinhos em dados sísmicos sem fantasma. Os dados sísmicos gravados a partir de streamers marinhos são obtidos, e separados como um coletor receptor. Um parâmetro complexo de frequência de Laplace é utilizado para transformar os dados sísmicos de um domínio de espaço e tempo em um domínio espectral. Um esquema de gradiente conjugado iterativo, utilizando o pré-condicionador com base física, é aplicado aos dados sísmicos transformados, para fornecer a solução de mínimos quadrados para um conjunto normal de equações para um sistema de equações de eliminação de fantasma. A solução é transformada de forma invertida de volta para um domínio de espaço e tempo para fornecer dados sísmicos fonte sem fantasma, que são úteis para a criação de imagens da subsuperfície da terra.

Breve Descrição dos Desenhos

[00015] A presente invenção e suas vantagens podem ser mais facilmente compreendidas com referência à descrição detalhada a seguir e aos desenhos em anexo, nos quais:

a figura 1 é um fluxograma mostrando uma primeira modalidade da invenção para a eliminação de fantasma de dados de streamer sísmicos marinhos;

a figura 2 é um fluxograma mostrando uma parte inicial de uma segunda modalidade da invenção para a eliminação de fantasma dos dados de streamer sísmicos marinhos;

a figura 3 é um fluxograma mostrando uma parte final de uma segunda modalidade da invenção para a eliminação de fantasma de dados de streamer sísmicos marinhos, iniciado na figura 2; e

a figura 4 é um fluxograma mostrando uma modalidade da invenção para um esquema de gradiente conjugado pré-condicionado iterativo utilizado para a eliminação de fantasma de dados de streamer sísmicos marinhos.

[00016] Enquanto a invenção será descrita com relação às suas modalidades preferidas, será compreendido que a invenção não está limitada às mesmas. Ao contrário, a invenção deve cobrir todas as alternativas, modificações e equivalências que podem ser incluídas no escopo da invenção, como definido pelas reivindicações em anexo.

Descrição Detalhada da Invenção

[00017] Um procedimento para a eliminação de fantasma dos dados sísmicos marinhos é a decomposição dos campos de onda sísmicos para resultar em um componente de campo de onda de subida. Um método para a decomposição dos campos de onda sísmicos em componentes de campo de onda de subida e de descida é solucionar um sistema tipo Fourier de equações no qual a solução deriva de uma inversão de um sistema com um kernel de Fourier bem definido. Em um exemplo desse método, o sistema de equações é derivado no do-

mínio de Laplace, onde a transformada de Laplace de avanço a partir do domínio de espaço-tempo (x,t) para o domínio de Laplace (x,s) é definida em geral como:

$$\tilde{p}(x,s) = \int_{t \in T} \exp(-st) p(x,t) dt \quad (1)$$

e a transformada de Laplace de retrocesso correspondente é definida como:

$$\chi_T(t) p(x,t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{s-j\infty}^{s+j\infty} \exp(st) \tilde{p}(x,s) ds \quad (2)$$

com

$$\chi_T(t) = \begin{cases} 1, & t > t_0 \\ \frac{1}{2}, & t = t_0 \\ 0, & t < t_0 \end{cases} \text{ para } t \in \{T, \partial T, T'\};$$

$$T = \{t \in \mathfrak{R}; t > t_0\}; \partial T = \{t \in \mathfrak{R}; t = t_0\}; T' = \{t \in \mathfrak{R}; t < t_0\}$$

[00018] Aqui, t é tempo, x e espaço, $j = \sqrt{-1}$ é a unidade imaginária, e s é um parâmetro de frequência de Laplace, discutido em maiores detalhes abaixo.

[00019] A seguir, a invenção será mostrada como agindo no campo de onda de pressão p(x,t), tipicamente detectado pelos sensores de pressão tal como hidrofones, apesar de o tipo de campo de onda, e o tipo de sensores empregados não serem uma restrição para a invenção. A invenção pode ser empregada com qualquer tipo de sensor sísmico adequado e seus campos de onda detectados. Como um exemplo, os campos de onda de movimento de partícula e os sensores de movimento de partícula podem ser empregados. A modificação das equações a seguir para acomodar outros campos de onda é direta.

[00020] Na transformada de Laplace fornecida acima nas equações (1) e (2), o parâmetro Laplace s, o parâmetro de frequência, é convencionalmente um número puramente imaginário e é definido como:

$$s = j\omega = j2\pi f \quad (3)$$

onde ω é a frequência circular e f é a frequência real.

[00021] Um problema surge quando da utilização do parâmetro de frequência de Laplace convencional s de acordo com a equação (3). Fendas espectrais nos dados sísmicos gravados ocorrem quando a interferência destrutiva ocorre entre as ondas sísmicas com combinações particulares de frequências e números de onda. Quando o conjunto tipo Fourier de equações de eliminação de fantasma é solucionado para estas frequências f onde as fendas espectrais ocorrem, então, o sinal medido para essas combinações de frequências e números de onda é igual a zero, visto que apenas ruído de fundo é gravado. Quando da utilização de um parâmetro de frequência de Laplace que é puramente imaginário, tal como definido na equação (3) acima, o processo de inversão se torna instável. Esta instabilidade então resulta em artefatos irreparáveis, sendo introduzidos nos resultados da decomposição de campo de onda sísmica utilizada para a eliminação de fantasma.

[00022] Para se manusear a instabilidade resultante destas fendas espectrais, o método da invenção emprega um parâmetro de frequência de Laplace que é uma variável complexa com ambas as partes real e imaginária. Desta forma, o parâmetro de frequência de Laplace s é agora fornecido não pela equação (3), mas por:

$$\underline{s = j\omega + \varepsilon = j2\pi f + \varepsilon} \quad (4)$$

onde ε é uma parte real adicional do parâmetro de frequência de Laplace complexo s . A seguir, o termo "complexo" será utilizado para designar que o parâmetro de frequência de Laplace possui ambas as partes real e imaginária, como na equação (4). Este parâmetro de frequência de Laplace complexo s será utilizado nas transformadas de Laplace e de domínio espectral e nas equações de eliminação de fantasma da invenção, como discutido abaixo.

[00023] Em uma modalidade, a parte real ε do parâmetro de fre-

quência de Laplace complexo s pode ser uma constante. Em outras modalidades, ~~o parâmetro~~ ^{constante} real ε pode variar como uma função de uma combinação de parâmetros como tempo, localização espacial ou frequência. Desta forma, a parte real ε pode ser expressa como, mas não limitada ao seguinte:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \text{constant}; \\ \varepsilon &= \varepsilon(\mathbf{x}), \text{ onde } \mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3); \\ \varepsilon &= \varepsilon(t); \quad \varepsilon = \varepsilon(\mathbf{x}, t); \\ \varepsilon &= \varepsilon(f); \quad \varepsilon = \varepsilon(\mathbf{x}, f). \end{aligned}$$

[00024] Aqui, x_1 e x_2 são coordenadas espaciais horizontais, tal como direções em linha e linha cruzada, respectivamente, e x_3 é uma coordenada espacial vertical, tal como profundidade.

[00025] A invenção é um método para a eliminação de fantasma de dados de streamer sísmicos marinhos. A invenção opera sem qualquer conhecimento a priori da subsuperfície. A operação de eliminação de fantasma é realizada em dados gravados para cada posição de receptor separadamente. Os dados gravados são separados em coletores de receptor comuns, cada coletor contendo todos os dados fonte de uma posição de receptor comum. Então, para cada frequência, a invenção compreende um método para solucionar um sistema de equações de eliminação de fantasma. A solução do sistema das equações é obtida utilizando um método iterativo de gradiente conjugado pré-condicionado. O pré-condicionador é baseado na física do problema em mãos, ao invés de na matemática (como seria o caso de uma abordagem convencional). Como um pré-condicionador eficiente, o inverso da distribuição de fonte horizontal é empregado, visto que uma distribuição de fonte mais geral pode ser tratada como uma perturbação da distribuição de fonte horizontal regular simples.

[00026] No entanto, o método de eliminação de fantasma convencional utilizando o parâmetro de frequência de Laplace imaginário da

equação (3) ainda pode tornar-se instável em fendas no domínio de frequência. Desta forma, o método da invenção emprega o parâmetro de frequência de Laplace complexo da equação (4), que fornece estabilidade para o procedimento de eliminação de fantasma. Desta forma, a decomposição de campo de onda pode ser aplicada através de uma largura de banda sísmica total, mesmo na presença de fendas espectrais nos dados sísmicos. O uso desse parâmetro de frequência de Laplace complexo é descrito em detalhes abaixo na discussão com referência ao fluxograma na figura 2.

[00027] A figura 1 é um fluxograma mostrando uma primeira modalidade da invenção para a eliminação de fantasma de dados de streamer sísmicos marinhos.

[00028] No bloco 11, os dados sísmicos gravados a partir dos streamers marinhos são separados em um coletor de receptor comum.

[00029] No bloco 12, um parâmetro de frequência de Laplace complexo é utilizado para transformar os dados sísmicos do bloco 11 de um domínio de espaço-tempo em um domínio espectral.

[00030] No bloco 13, um esquema de gradiente conjugado iterativo, utilizando o pré-condicionador com base física, é aplicado aos dados sísmicos transformados, para fornecer uma solução de mínimos quadrados para um conjunto normal de equações para um sistema de eliminação de fantasma das equações.

[00031] No bloco 14, os dados sísmicos do bloco 13 são transformados de forma invertida de volta para um domínio de espaço e tempo para fornecer dados sísmicos fonte sem fantasmas.

[00032] A figura 2 é um fluxograma mostrando uma parte inicial de uma segunda modalidade da invenção para a eliminação de fantasma dos dados de streamer sísmicos marinhos. A parte final será discutida abaixo com referência ao fluxograma na figura 3.

[00033] No bloco 21, os dados sísmicos gravados com um streamer

marinho são separados em um coletor de receptor comum. Os dados shot (ativação de fonte sísmica) para cada posição de receptor, e para todos os momentos gravados t , são considerados como dados sísmicos de entrada. A posição espacial das fontes em um quadro de coordenadas Cartesianas é fornecida por $\underline{x^s}=(x^{s_1}, x^{s_2}, x^{s_3})$. Na invenção, a profundidade de fonte $\underline{x^{s_3}}=x^{s_3}(x^{s_1}, x^{s_2})$ é uma função de valor único das coordenadas horizontais $\underline{x^{s_1}}$ e $\underline{x^{s_2}}$. Dessa forma, as distribuições fonte não são verticais, mas não necessariamente horizontais. Do contrário, as posições das fontes não devem ser uma restrição da invenção.

[00034] No bloco 22, uma parte real ε do parâmetro de frequência de Laplace complexo s na equação (4) é determinada. Em várias modalidades, a parte real ε pode ser como expresso nos exemplos fornecidos na equação (5) acima, mas a invenção não está restrita a estes exemplos. Pela utilização de diferentes valores da parte real ε no parâmetro de frequência de Laplace s , a estabilização da inversão no método da invenção pode variar para fornecer a estabilização adicional na solução do sistema de equações de eliminação de fantasma abaixo.

[00035] No bloco 23, os dados sísmicos gravados para uma posição de receptor são obtidos a partir dos dados sísmicos obtidos no bloco 21.

[00036] No bloco 24, os dados sísmicos gravados para uma posição de receptor a partir do bloco 23 são transformados temporalmente do domínio de espaço e tempo no domínio de espaço e frequência de Laplace. Em uma modalidade da invenção, o campo de onda espalhado $\underline{p^{sct}}$ nos locais fonte é transformado do domínio de espaço e tempo $(\underline{x^{s_1}}, \underline{x^{s_2}}, \underline{x^{s_3}}, t)$ para o domínio de espaço e frequência de Laplace $(\underline{x^{s_1}}, \underline{x^{s_2}}, \underline{x^{s_3}}, s)$ pela transformada de Laplace de avanço fornecida na equação (1), logo:

$$\underline{p^{sct}} = \underline{p^{sct}}(x_{1,q}^S, x_{2,r}^S, x_{3,q,r}^S; s) \quad (6)$$

utilizando o parâmetro de frequência de Laplace complexo s da invenção nessa transformação, como fornecido não pela equação (3) convencional, mas pela equação (4) acima. Aqui, \underline{p}^{sct} é o campo de onda acústica espalhado no domínio de espaço e frequência, $\underline{x}_{1,q}^s$ é uma coordenada de fonte em linha, q é um número fonte em linha, $\underline{x}_{2,r}^s$ é uma coordenada fonte em linha cruzada, r é um número fonte em linha cruzada, $\underline{x}_{3,q,r}^s$ é a profundidade de fonte como uma função de $\underline{x}_{1,q}^s$ e $\underline{x}_{2,r}^s$, e utilizando ε , como determinado no bloco 22, como a parte real do parâmetro de complexo de frequência de Laplace s . Esta transformação do campo de onda espalhado \underline{p}^{sct} nos locais fonte é realizada para cada posição de receptor.

[00037] No bloco 25, os dados sísmicos transformados a partir do bloco 24 são obtidos para uma frequência f .

[00038] No bloco 26, os dados sísmicos transformados para uma frequência a partir do bloco 25 são transformados a partir do domínio de espaço e frequência de Laplace para um domínio espectral. Em uma modalidade da invenção, o campo de onda espalhado \underline{p}^{sct} é transformado do domínio de espaço e frequência de Laplace $(\underline{x}_{1,q}^s, \underline{x}_{2,r}^s, \underline{x}_{3,q,r}^s, s)$ em um domínio espectral $(s\alpha_n, s\beta_m, \underline{x}_{3,q,r}^s, s)$ por:

$$\underline{P}_{n,m}^{sct} = \Delta x_1^s \Delta x_2^s \sum_{q=-\frac{1}{2}N+1}^{\frac{1}{2}N} \sum_{r=-\frac{1}{2}M+1}^{\frac{1}{2}M} \exp(js\alpha_n x_{1,q}^s + js\beta_m x_{2,r}^s) \underline{p}^{sct}, \quad (7)$$

onde

$$s\alpha_n = n\Delta(s\alpha), \quad s\beta_m = m\Delta(s\beta), \quad (8)$$

e

$$\Delta(s\alpha) = \frac{2\pi}{N\Delta x_1^s}, \quad \Delta(s\beta) = \frac{2\pi}{M\Delta x_2^s}. \quad (9)$$

[00039] Aqui, $\underline{p}_{n,m}^{sct}$ é o campo de onda acústica espalhado no domínio espectral, n é um número espectral em linha, m é um número espectral em linha cruzada, Δx_1^s é uma distância de amostragem fonte

em linha. Δx^s_2 é uma distância de amostragem fonte em linha cruzada, js_{α_n} é um parâmetro Fourier espectral em linha, $\Delta(s\alpha)$ é a distância de amostragem espectral em linha, js_{β_m} é um parâmetro Fourier espectral em linha cruzada, $\Delta(s\beta)$ é a distância de amostragem espectral em linha cruzada, N é o número total de fontes em linha, e M é o número total de fontes de linha cruzada. O parâmetro de frequência de Laplace complexo s da invenção também é utilizado nesta transformação em domínio espectral.

[00040] No bloco 27, um sistema de equações é determinado para a eliminação de fantasma de fonte dos dados sísmicos transformados para uma frequência a partir do bloco 26. O sistema de equações será definido utilizando o parâmetro de frequência de Laplace s da invenção para fornecer a estabilidade na solução das equações. No caso geral no qual os locais fonte são localizados de maneira arbitrária, o campo de onda no domínio espectral não pode ser determinado de forma explícita. Portanto, o procedimento de eliminação de fantasma da invenção compreende a solução de um sistema de equações. Para o caso geral com posições fonte arbitrárias $x^S = (x^S_{1,q}, x^S_{2,r}, x^S_{3,q,r})$ no domínio espectral, as profundidades das fontes são fornecidas por uma função de valor único das coordenadas de fonte horizontais. Especificamente, a profundidade de fonte é escrita como $x^S_{3,q,r} = x^S_3(x^S_{1,q}, x^S_{2,r})$. Nos sistemas de aquisição marinha modernos, esta informação de posição de fonte é gravada. A operação de eliminação de fantasma pode então ser escrita de forma compacta como a solução de um sistema de equações:

$$\sum_{n=-\frac{1}{2}N+1}^{\frac{1}{2}N} \sum_{m=-\frac{1}{2}M+1}^{\frac{1}{2}M} K_{q,r,n,m} P_{n,m}^{dgh} = p_{q,r}^{sct}, \quad q = -\frac{1}{2}N+1, \dots, \frac{1}{2}N, \quad r = -\frac{1}{2}M+1, \dots, \frac{1}{2}M \quad (10)$$

na qual a matriz de sistema $K_{q,r,n,m}$ é fornecido por:

$$K_{q,r;n,m} = \frac{\Delta(s\alpha)\Delta(s\beta)}{4\pi^2} \sum_{n=-\frac{1}{2}N+1}^{\frac{1}{2}N} \sum_{m=-\frac{1}{2}M+1}^{\frac{1}{2}M} \exp(-js\alpha_n x_{1,q}^S - js\beta_m x_{2,r}^S) 2\sinh(s\Gamma_{n,m} x_{3,q,r}^S) \quad (11)$$

[00041] Aqui, o vetor desconhecido $\underline{p}_{n,m}^{dgh}$ é o campo de onda acústica sem fantasma em profundidade zero e é fornecido no domínio espectral como:

$$\underline{p}_{n,m}^{dgh} = p_{n,m}^{dgh}(s\alpha_n, s\beta_m, 0; s) \quad (12)$$

onde o vetor conhecido $\underline{p}_{q,r}^{sct}$ são os dados sísmicos registrados no domínio de espaço e frequência fornecido como:

$$\underline{p}_{q,r}^{sct} = p^{sct}(x_{1,q}^S, x_{2,r}^S, x_{3,q,r}^S; s) \quad (13)$$

e o coeficiente de propagação vertical $\underline{s}\Gamma_{n,m}$ é:

$$\underline{s}\Gamma_{n,m} = j\sqrt{\left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 - (s\alpha_n)^2 - (s\beta_m)^2}, \quad (14)$$

onde c é a velocidade de onda acústica na água. A matriz de sistema $\underline{K}_{q,r,n,m}$ é uma função do parâmetro de frequência de Laplace complexo s .

[00042] No bloco 28, o processo continua para o bloco 31 da figura 3 para solucionar o sistema das equações determinado no bloco 27. O uso do parâmetro de frequência de Laplace totalmente complexo s com uma parte real ε diferente de zero, a partir da equação (4), ao invés de, a partir da equação (3), fornece estabilidade na solução das equações.

[00043] A figura 3 é um fluxograma mostrando uma parte final de uma segunda modalidade da invenção para a eliminação de fantasmas fonte dos dados de streamer sísmicos marinhos. A parte final continua o processo inicial discutido acima com referência ao fluxograma na figura 2.

[00044] No bloco 31, um conjunto normal de equações é determinado a partir do conjunto de equações de eliminação de fantasma no bloco 27 da figura 2. Visto que o vetor conhecido $\underline{p}_{q,r}^{sct}$ é definido no

domínio espectral, uma solução de mínimos quadrados no domínio de espaço e frequência é empregado na modalidade da invenção. Ambos os lados da equação (10) são multiplicados pela conjugação complexa da matriz de sistema $\underline{K}_{q,r,n',m'}$ e os resultados são somados através de todos os valores dos números fonte em linha e linha cruzada q e r , respectivamente. Depois do intercâmbio da última soma através de q e r e da soma através de n e m , um sistema de equações normais é obtido, como se segue:

$$\sum_{n=-\frac{1}{2}N+1}^{\frac{1}{2}N} \sum_{m=-\frac{1}{2}M+1}^{\frac{1}{2}M} A_{n',m';n,m} P_{n,m}^{dgh} = B_{n',m'}, \quad n' = -\frac{1}{2}N+1, \dots, \frac{1}{2}N, \quad m' = -\frac{1}{2}M+1, \dots, \frac{1}{2}M \quad (15)$$

[00045] Aqui, a matriz $\underline{A}_{n',m',n,m}$, uma quantidade conhecida é fornecida por

$$A_{n',m';n,m} = \sum_{q=-\frac{1}{2}N+1}^{\frac{1}{2}N} \sum_{r=-\frac{1}{2}M+1}^{\frac{1}{2}M} \overline{K_{q,r;n',m'}} K_{q,r;n,m} \quad (16)$$

e o vetor $\underline{B}_{n',m'}$, uma quantidade conhecida é fornecida por:

$$B_{n',m'} = \sum_{q=-\frac{1}{2}N+1}^{\frac{1}{2}N} \sum_{r=-\frac{1}{2}M+1}^{\frac{1}{2}M} \overline{K_{q,r;n',m'}} P_{q,r}^{scf} \quad (17)$$

onde n e n' são números espectrais em linha, m e m' são números espectrais de linha cruzada, e a linha superior acima da matriz de sistema $\underline{K}_{q,r,n',m'}$ designa a conjugação complexa.

[00046] A invenção fornece um método para o fornecimento da solução deste conjunto linear de equações normais na equação (15) de forma estável, mesmo na presença de fendas espectrais nos dados sísmicos, pela utilização de um parâmetro de frequência de Laplace complexo. A disposição geométrica das posições fonte não é uma restrição da invenção. A invenção aplica-se ao caso simples de distribuições fonte horizontais regulares além de o caso geral de distribuições fonte não horizontais irregulares. A invenção será mostrada primeiro para o caso simples e então para o caso geral.

[00047] O caso simples de uma distribuição de fonte convencional, considerado em uma configuração estritamente horizontal, é apenas um caso especial do caso geral manuseado pela invenção. Neste caso horizontal simples, a posição de profundidade de fonte x_3^S é constante e a inversão do sistema de equações reduz o procedimento de eliminação de fantasma padrão. O sistema de equações pode ser solucionado por uma transformada de Fourier discreta invertida. Em particular, o sistema de equações fornecido geralmente em equações (10) e (11) se torna o sistema mais simples de equações:

$$\frac{\Delta(s\alpha)\Delta(s\beta)}{4\pi^2} \sum_{n=-\frac{1}{2}N+1}^{\frac{1}{2}N} \sum_{m=-\frac{1}{2}M+1}^{\frac{1}{2}M} \exp(-js\alpha_n x_{1,q}^S - js\beta_m x_{2,r}^S) 2\sinh(s\Gamma_{n,m} x_3^S) P_{n,m}^{dgh} = P^{sct}(x_{1,q}^S, x_{2,r}^S, x_3^S; s), \quad q = -\frac{1}{2}N+1, \dots, \frac{1}{2}N, \quad r = -\frac{1}{2}M+1, \dots, \frac{1}{2}M. \quad (18)$$

[00048] Aqui, a eliminação de fantasma para a constante x_3^S pode ser realizada explicitamente no domínio espectral. O campo fonte sem fantasma no domínio espectral no nível de profundidade zero, $p_{n,m}^{dgh}$ como definido na equação (12), pode ser obtido diretamente como:

$$P_{n,m}^{dgh} = \frac{P_{n,m}^{sct}}{2\sinh(s\Gamma_{n,m} x_3^S)} \quad (19)$$

[00049] Para a solução do conjunto geral de equações lineares nas equações normais fornecidas na equação (15), muitos solucionadores eficientes estão disponíveis, tal como os solucionadores diretos e solucionadores iterativos. Um solucionador iterativo muito eficiente é um método iterativo de gradiente conjugado pré-condicionado com base na minimização das discrepâncias entre os dados medidos e a resposta modelada. Em uma modalidade adicional da invenção, a equação (10) é considerada e uma solução para o campo de onda sem espectral de eliminação de fantasma $p_{n,m}^{dgh}$ é desenvolvida empregando um esquema iterativo gradiente conjugado, tal como uma função ERR de erro fornecido por:

$$\text{ERR} = \frac{\sum_{q=-\frac{1}{2}N+1}^{\frac{1}{2}N} \sum_{r=-\frac{1}{2}N+1}^{\frac{1}{2}N} \left| P_{q,r}^{scf} - \sum_{n=-\frac{1}{2}N+1}^{\frac{1}{2}N} \sum_{m=-\frac{1}{2}M+1}^{\frac{1}{2}M} K_{q,r;n,m} P_{n,m}^{dgh} \right|^2}{\quad} \quad (20)$$

seja minimizado.

[00050] Retornando para a figura 3, no bloco 32, as equações normais do bloco 31 são pré-condicionadas com um pré-condicionador de base física. Um pré-condicionador é frequentemente utilizado nos métodos iterativos de gradiente conjugado para tornar as equações bem condicionadas. Os pré-condicionadores padrão, tal como os tipos ILU (decomposição inferior e superior incompleta) de múltiplos níveis, por exemplo, são normalmente baseados na estrutura matemática da matriz do sistema. Infelizmente, para o presente problema, estes pré-condicionadores com base matemática são ineficientes. Em uma modalidade da invenção, um pré-condicionador é utilizado e é baseado na física do problema sendo solucionado, que é o caso geral de uma distribuição de fonte discutida acima.

[00051] Uma distribuição de fonte não horizontal irregular pode ser considerada uma perturbação de uma distribuição de fonte horizontal regular, de modo que o inverso da matriz do sistema de uma distribuição de fonte não horizontal irregular seja aproximada pelo inverso da matriz de sistema de uma distribuição de fonte horizontal regular. Desta forma, o inverso da matriz de sistema de uma distribuição de fonte horizontal equivalente é considerado o pré-condicionador. Note-se que se a distribuição de fonte for horizontal, então o esquema iterativo de gradiente conjugado termina dentro de uma iteração única com este pré-condicionador. Para uma distribuição de fonte horizontal, o sistema das equações normais da equação (15) é diagonal e a solução é obtida diretamente como:

$$\underline{P_{n,m}^{dgh}} = [A_{n,m;n,m}]^{-1} B_{n,m} \quad (21)$$

[00052] Em uma modalidade da invenção, o pré-condicionador $\underline{\tilde{P}_{n,m}}$

empregado, seguindo a equação (16), é:

$$\tilde{P}_{n,m} = [A_{n,m;n,m}]^{-\frac{1}{2}} = \left(\sum_{q=-\frac{1}{2}N+1}^{\frac{1}{2}N} \sum_{r=-\frac{1}{2}M+1}^{\frac{1}{2}M} |K_{q,r;n,m}|^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (22)$$

[00053] Por motivos de conveniência, a equação (10) pode ser escrita na forma compacta:

$$\sum_n K_{q,n} P_n^{dgh} = p_q^{sct}, \quad (23)$$

onde n representa (n,m) e q representa (q,r) agora. O pré-condicionador $\tilde{P}_{n,m}$ é uma função do parâmetro de frequência de Laplace complexos s.

[00054] No bloco 33, um esquema iterativo de gradiente conjugado pré-condicionado é aplicado para solucionar o sistema das equações na equação (23), o conjunto normal pré-condicionado de equações do bloco 32. Em cada iteração, designada com o número k, um valor aproximado do campo de onda fonte espectral sem fantasma $\underline{P_n^{dgh(k)}}$ é obtido com um erro residual $\underline{r_q^{(k)}}$. Desta forma, na iteração k, o erro residual k é fornecido por:

$$\underline{r_q^{(k)}} = p_q^{sct} - \sum_n K_{q,n} P_n^{dgh(k)}. \quad (24)$$

[00055] Uma modalidade particular da invenção para um esquema iterativo de gradiente conjugado pré-condicionado é descrito abaixo com referência à discussão do fluxograma da figura 4.

[00056] No bloco 34, é determinado se quaisquer frequências selecionadas no bloco 25 da figura 2 permanecem. Se as frequências permanecerem, o processo retorna para o bloco 25 da figura 2. Se nenhuma frequência permanecer, então o processo continua para a etapa 35. Desta forma, a solução pelas interações de gradiente conjugado é repetida para cada frequência f.

[00057] No bloco 35, é determinado se quaisquer posições de re-

ceptor selecionadas no bloco 23 da figura 2 permanecem. Se as posições de receptor permanecerem, o processo retorna para o bloco 23 da figura 2. Se nenhuma das posições de receptor permanecer, então o processo continua para a etapa 36. Desta forma, a solução pelas interações de gradiente conjugado é repetida para cada posição de receptor.

[00058] No bloco 36, as soluções de fonte sem fantasma do bloco 33 são transformadas a partir do domínio espectral de volta para o domínio de espaço e tempo. Depois da obtenção do campo de onda fonte sem fantasma no domínio espectral, o campo de onda fonte sem fantasma $\underline{p^{dgh} = p^{dgh}(x_{1,q}^S, x_{2,q}^S, 0; s)}$ com profundidade zero no domínio de espaço e tempo é obtido como:

$$\underline{p^{dgh} = \frac{\Delta(s\alpha)\Delta(s\beta)}{4\pi^2} \sum_{n=-\frac{1}{2}N+1}^{\frac{1}{2}N} \sum_{m=-\frac{1}{2}M+1}^{\frac{1}{2}M} \exp(-js\alpha_n x_{1,q}^S - js\beta_m x_{2,r}^S) P_{n,m}^{dgh}} \quad (25)$$

[00059] O campo de onda fonte sem fantasma $\underline{p^{dgh}}$ é uma função do parâmetro de frequência de Laplace complexo s .

[00060] A figura 4 é um fluxograma mostrando uma modalidade da invenção para um esquema de gradiente conjugado pré-condicionado iterativo utilizado para eliminação de fantasma de dados de fonte de streamer sísmico marinho. Este é o esquema referido no bloco 33 da figura 3, acima.

[00061] No bloco 41, uma estimativa inicial zero para o contador de iteração $k = 0$ é selecionado. Em uma modalidade, esta estimativa é:

$$\underline{P_n^{dgh(0)} = 0, \quad r_q^{(0)} = P_q^{scf}} \quad (26)$$

[00062] Em outras modalidades, escolhas diferentes para a estimativa inicial do esquema de gradiente conjugado podem ser utilizadas. Por exemplo, diferentes escolhas podem incluir, mas não estão limitadas à solução obtida por uma frequência anterior ou a solução para uma posição de receptor diferente.

[00063] No bloco 42, uma estimativa para o contador de iteração $k = 1$ é calculada. Em uma modalidade, estas estimativas são:

$$\begin{aligned} g_n^{(1)} &= \tilde{P}_n \sum_q \overline{K_{q,n}} r_q^{(0)}, & v_n^{(1)} &= \tilde{P}_n g_n^{(1)}, \\ K v_n^{(1)} &= \sum_n K_{q,n} v_n^{(1)}, & \alpha^{(1)} &= \frac{\sum_n |g_n^{(1)}|^2}{\sum_q |K v_n^{(1)}|^2}, \end{aligned} \quad (27)$$

$$\underline{P_n^{dgh(1)} = P_n^{dgh(0)} + \alpha^{(1)} v_n^{(1)}, \quad r_q^{(1)} = r_q^{(0)} - \alpha^{(1)} K v_n^{(1)}.$$

[00064] No bloco 43, o contador de iteração k é aumentado por 1. Desta forma, $k = k + 1$, resultando em $k = 2, 3, \dots$, sequencialmente.

[00065] No bloco 44, uma estimativa para o contador de iteração k é calculada, utilizando as estimativas para o contador de iteração $k - 1$. Em uma modalidade, essa estimativa é:

$$\begin{aligned} g_n^{(k)} &= \tilde{P}_n \sum_q \overline{K_{q,n}} r_q^{(k-1)}, & v_n^{(k)} &= \tilde{P}_n g_n^{(k)} + \frac{\sum_n |g_n^{(k)}|^2}{\sum_n |g_n^{(k-1)}|^2} v_n^{(k-1)}, \\ K v_n^{(k)} &= \sum_n K_{q,n} v_n^{(k)}, & \alpha^{(k)} &= \frac{\sum_n |g_n^{(k)}|^2}{\sum_q |K v_n^{(k)}|^2}, \end{aligned} \quad (28)$$

$$\underline{P_n^{dgh(k)} = P_n^{dgh(k-1)} + \alpha^{(k)} v_n^{(k)}, \quad r_q^{(k)} = r_q^{(k-1)} - \alpha^{(k)} K v_n^{(k)}.$$

[00066] No bloco 45, um critério de erro é calculado para a estimativa de iteração atual k do residual $r_q^{(k)}$ a partir do bloco 44. Em uma modalidade, este critério de erro é:

$$\underline{\frac{\sum_q |r_q^{(k)}|^2}{\sum_q |P_q^{scr}|^2} < 10^{-3}} \quad (29)$$

[00067] No bloco 46, é determinado se o critério de erro no bloco 45 foi satisfeito. Se o critério de erro não tiver sido satisfeito, então o processo iterativo retorna para o bloco 43 para continuar com outro conjunto de estimativas. Se o critério de erro for satisfeito, então o processo iterativo termina.

[00068] Quando da utilização da abordagem de inversão e utiliza-

ção do parâmetro de frequência de Laplace complexo s , o método de decomposição de fonte sem fantasma da invenção pode ser reformulado em diferentes domínios, incluindo, mas não limitado a domínio de lentidão de frequência ou domínio lentidão de tau ou domínio de espaço e tempo.

[00069] 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 preferivelmente implementado por meio de computadores, em particular computadores digitais, juntamente com outro equipamento de processamento de dados convencional. Tal equipamento de processamento de dados, bem conhecido da técnica, compreenderá qualquer combinação adequada ou rede de equipamentos de processamento de computador, incluindo, mas não limitado a, hardware (processadores, dispositivos de armazenamento temporário e permanente, e qualquer equipamento de processamento de computador adequado), software (sistemas operacionais, programas de aplicativo, bibliotecas de programas matemáticos, e qualquer outro software adequado), conexões (elétrica, ótica, sem fio ou outra) e periféricos (dispositivos de entrada e saída tal como teclados, dispositivos de apontar, e digitalizadores, dispositivos de exibição tal como monitores e impressoras; mídia de armazenamento legível em computador, tal como fitas, discos e discos rígidos e qualquer outro equipamento adequado).

[00070] Em outra modalidade, a invenção pode ser implementada como o método descrito acima, especificamente realizado utilizando um computador programável para realizar o método. Em outra modalidade, a invenção pode ser implementada como um programa de computador armazenado em um meio legível por computador, com o programa possuindo uma lógica operável para fazer com que um computador programável realize o método descrito acima. Em outra modali-

dade, a invenção pode ser implementada como um meio legível por computador com um programa de computador armazenado no meio, de forma que o programa tenha lógica operável para fazer com que um computador programável realize o método descrito acima.

[00071] Deve-se compreender que o apresentado anteriormente é meramente uma descrição detalhada das modalidades específicas desta invenção e que inúmeras mudanças, modificações e alternativas às modalidades descritas podem ser realizadas de acordo com a descrição apresentada aqui sem se distanciar do escopo da invenção. A descrição anterior, portanto, não deve limitar o escopo da invenção. Ao invés disto, o escopo da invenção deve ser determinado apenas pelas reivindicações em anexo e suas equivalências.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para converter dados sísmicos gravados a partir de streamers marinhos em dados sísmicos de fonte sem fantasma, compreendendo:

utilização de um computador programável para realizar o seguinte:

separar (11) os dados sísmicos gravados a partir de streamers marinhos em uma coleta de receptor comum;

utilizar (12) um parâmetro de frequência de Laplace complexo para transformar os dados sísmicos de um domínio de espaço e tempo em um domínio espectral;

aplicar (13) um esquema de gradiente conjugado iterativo, utilizando um pré-condicionador com base física, aos dados sísmicos transformados, para fornecer uma solução de mínimos quadrados para um conjunto normal de equações para um sistema de eliminação de fantasma da fonte das equações; e

transformar inversamente (14) a solução de volta para um domínio de espaço e tempo para fornecer os dados sísmicos fonte sem fantasma,

caracterizado pelo fato de que a utilização (12) de um parâmetro de frequência de Laplace complexo para transformar os dados sísmicos de um domínio espaço e tempo para um domínio espectral compreende:

a determinação (22) de uma parte real diferente de zero do parâmetro de frequência de Laplace complexo;

a obtenção (23) de dados sísmicos gravados para uma posição de receptor sísmico;

a utilização (24) do parâmetro de frequência de Laplace complexo para transformar os dados sísmicos gravados para a posição de receptor sísmico do domínio de espaço e tempo para um do-

mínio de espaço e frequência;

a obtenção (25) de dados sísmicos transformados para uma frequência; e

a utilização (26) do parâmetro de frequência de Laplace complexo para transformar os dados sísmicos transformados em uma frequência a partir do domínio de espaço e frequência de Laplace para o domínio espectral.

2. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de** que o parâmetro de frequência de Laplace complexo s é fornecido por:

$$s = j\omega + \varepsilon = j2\pi f + \varepsilon$$

em que j é a unidade imaginária $\sqrt{-1}$, ω é a frequência circular, f é a frequência e ε é a parte real diferente de zero determinada do parâmetro de frequência de Laplace complexo s .

3. Método de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado pelo fato de** que a utilização (12) de parâmetro de frequência de Laplace complexo para transformar os dados sísmicos gravados de um domínio espaço e tempo para um domínio espectral compreende:

a transformação (24) do campo de onda acústico espalhado do domínio de espaço e tempo (x_1^S, x_2^S, x_3^S, t) para o domínio de espaço e frequência (x_1^S, x_2^S, x_3^S, s) utilizando uma transformada de Laplace de forma que:

$$p^{sct} = p^{sct}(x_{1,q}^S, x_{2,r}^S, x_{3,q,r}^S; s),$$

em que p^{sct} é o campo de onda acústica espalhado no domínio de espaço e frequência, $x_{1,q}^S$ é uma coordenada fonte em linha, q é um número de receptor em linha, $x_{2,r}^S$ é uma coordenada fonte de linha cruzada, r é um número fonte de linha cruzada, e $x_{3,q,r}^S$ é a profundidade fonte como uma função $x_{1,q}^S$ e $x_{2,r}^S$.

4. Método de acordo com a reivindicação 3, **caracterizado**

peelo fato de que a utilização (12) de um parâmetro de frequência de Laplace complexo para transformar os dados sísmicos transformados compreende:

a transformação (26) do campo de onda espalhado p^{sct} a partir do domínio de espaço e frequência (x_1^s, x_2^s, x_3^s, s) para o domínio espectral $(s\alpha_n, s\beta_m, x_3^s, s)$ por:

$$P_{n,m}^{sct} = \Delta x_1^s \Delta x_2^s \sum_{q=-\frac{1}{2}N+1}^{\frac{1}{2}N} \sum_{r=-\frac{1}{2}M+1}^{\frac{1}{2}M} \exp(js\alpha_n x_{1,q}^s + js\beta_m x_{2,r}^s) p^{sct}$$

em que:

$$s\alpha_n = n\Delta(s\alpha), \quad s\beta_m = m\Delta(s\beta),$$

e

$$\Delta(s\alpha) = \frac{2\pi}{N\Delta x_1^s}, \quad \Delta(s\beta) = \frac{2\pi}{M\Delta x_2^s},$$

e $p^{sct}_{n,m}$ é o campo de onda acústica espalhado no domínio espectral, n é um número espectral em linha, m é um número espectral em linha cruzada, Δx_1^s é uma distância de amostragem de fonte em linha, Δx_2^s é uma distância de amostragem de fonte em linha cruzada, $js\alpha_n$ é um parâmetro Fourier espectral em linha, $\Delta(s\alpha)$ é uma distância de amostragem espectral em linha, $js\beta_m$ é um parâmetro Fourier espectral em linha cruzada, $\Delta(s\beta)$ é uma distância de amostragem espectral em linha cruzada, N é o número total de fontes em linha, e M é o número total de fontes de linha cruzada.

5. Método de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que compreendendo adicionalmente:

a determinação (27) de um sistema de equações para a eliminação de fantasma da fonte dos dados sísmicos transformados para uma frequência;

a determinação (31) de um conjunto normal de equações para a eliminação de fantasma da fonte do sistema de equações; e

a aplicação (32) de um pré-condicionador de base física ao conjunto normal de equações.

6. Método de acordo com a reivindicação 5, **caracterizado pelo fato de** que a determinação (27) de um sistema de equações para a eliminação de fantasma da fonte compreende a aplicação da equação a seguir:

$$\sum_{n=-\frac{1}{2}N+1}^{\frac{1}{2}N} \sum_{m=-\frac{1}{2}M+1}^{\frac{1}{2}M} K_{q,r;n,m} P_{n,m}^{dgh} = P_{q,r}^{sct}, \quad q = -\frac{1}{2}N+1, \dots, \frac{1}{2}N, \quad r = -\frac{1}{2}M+1, \dots, \frac{1}{2}M$$

na qual a matriz de sistema $K_{q,r;n,m}$ é fornecida por

$$K_{q,r;n,m} = \frac{\Delta(s\alpha)\Delta(s\beta)}{4\pi^2} \sum_{n=-\frac{1}{2}N+1}^{\frac{1}{2}N} \sum_{m=-\frac{1}{2}M+1}^{\frac{1}{2}M} \exp(-js\alpha_n x_{1,q}^s - js\beta_m x_{2,r}^s) 2 \sinh(s\Gamma_{n,m} x_{3,q,r}^s).$$

7. Método de acordo com a reivindicação 6, **caracterizado pelo fato de** que a determinação (31) de um conjunto normal de equações compreende a aplicação da equação a seguir:

$$\sum_{n=-\frac{1}{2}N+1}^{\frac{1}{2}N} \sum_{m=-\frac{1}{2}M+1}^{\frac{1}{2}M} A_{n',m';n,m} P_{n,m}^{dgh} = B_{n',m'}, \quad n' = -\frac{1}{2}N+1, \dots, \frac{1}{2}N, \quad m' = -\frac{1}{2}M+1, \dots, \frac{1}{2}M,$$

em que, a matriz $A_{n',m';n,m}$ é fornecida por:

$$A_{n',m';n,m} = \sum_{q=-\frac{1}{2}N+1}^{\frac{1}{2}N} \sum_{r=-\frac{1}{2}M+1}^{\frac{1}{2}M} \overline{K_{q,r;n',m'}} K_{q,r;n,m},$$

o vetor conhecido $B_{n',m'}$ é fornecido por

$$B_{n',m'} = \sum_{q=-\frac{1}{2}N+1}^{\frac{1}{2}N} \sum_{r=-\frac{1}{2}M+1}^{\frac{1}{2}M} \overline{K_{q,r;n',m'}} P_{q,r}^{sct}$$

e n e n' são números espectrais em linha, m e m' são números espectrais em linha cruzada, e a linha superior designa a conjugação complexa.

8. Método de acordo com a reivindicação 6, **caracterizado pelo fato de** que o pré-condicionador compreende um inverso da matriz de sistema para uma distribuição de fonte horizontal.

9. Método de acordo com a reivindicação 8, **caracterizado**

peelo fato de que a aplicação (32) do pré-condicionador compreende a aplicação da equação a seguir:

$$\tilde{P}_{n,m} = [A_{n,m;n,m}]^{-\frac{1}{2}} = \left(\sum_{q=-\frac{1}{2}N+1}^{\frac{1}{2}N} \sum_{r=-\frac{1}{2}M+1}^{\frac{1}{2}M} |K_{q,r;n,m}|^2 \right)^{-\frac{1}{2}}$$

10. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** a aplicação (13) do esquema de gradiente conjugado iterativo compreende:

a seleção (41) de uma estimativa inicial para o contador de iteração $k = 0$, como se segue:

$$P_n^{dgh(0)} = 0, \quad r_q^{(0)} = P_q^{set}$$

calculando (42) as estimativas para o contador de iteração $k = 1$, como se segue:

$$\begin{aligned} g_n^{(1)} &= \tilde{P}_n \sum_q \overline{K_{q,n}} r_q^{(0)}, & v_n^{(1)} &= \tilde{P}_n g_n^{(1)}, \\ K v_n^{(1)} &= \sum_n K_{q,n} v_n^{(1)}, & \alpha^{(1)} &= \frac{\sum_n |g_n^{(1)}|^2}{\sum_q |K v_n^{(1)}|^2}, \end{aligned}$$

$$P_n^{dgh(1)} = P_n^{dgh(0)} + \alpha^{(1)} v_n^{(1)}, \quad r_q^{(1)} = r_q^{(0)} - \alpha^{(1)} K v_n^{(1)};$$

realizando o seguinte até que um critério de erro (46) seja correspondido:

aumento (43) do contador de iteração por $k = k + 1$; e

cálculo (44) das estimativas para o contador de iteração k , utilizando estimativas anteriores calculadas para $k - 1$ como se segue:

$$\begin{aligned} g_n^{(k)} &= \tilde{P}_n \sum_q \overline{K_{q,n}} r_q^{(k-1)}, & v_n^{(k)} &= \tilde{P}_n g_n^{(k)} + \frac{\sum_n |g_n^{(k)}|^2}{\sum_n |g_n^{(k-1)}|^2} v_n^{(k-1)}, \\ K v_n^{(k)} &= \sum_n K_{q,n} v_n^{(k)}, & \alpha^{(k)} &= \frac{\sum_n |g_n^{(k)}|^2}{\sum_q |K v_n^{(k)}|^2}, \\ P_n^{dgh(k)} &= P_n^{dgh(k-1)} + \alpha^{(k)} v_n^{(k)}, & r_q^{(k)} &= r_q^{(k-1)} - \alpha^{(k)} K v_n^{(k)}. \end{aligned}$$

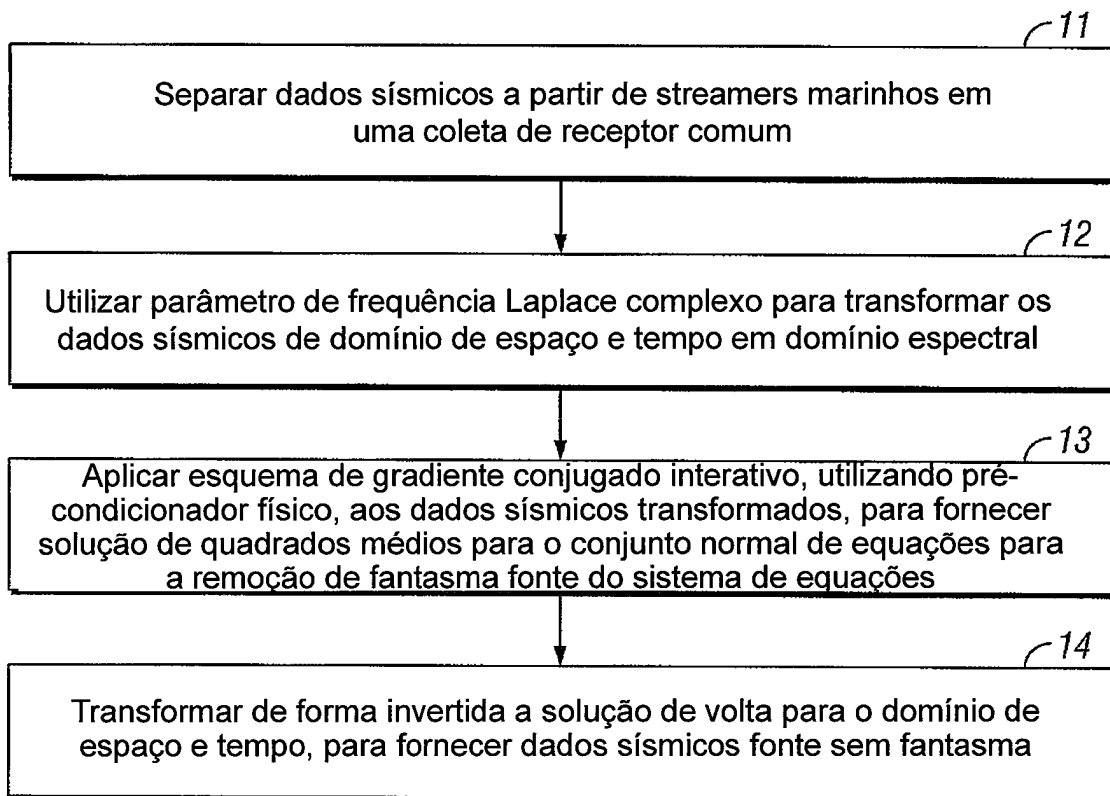
11. Método de acordo com a reivindicação 10, **caracteriza-**

do pelo fato de que o critério de erro é fornecido por:

$$\frac{\sum_q |r_q^{(k)}|^2}{\sum_q |p_q^{sct}|^2} < 10^{-3}.$$

12. Método de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que a transformação inversa (14) da solução compreende a aplicação da equação a seguir:

$$p^{dgh} = \frac{\Delta(s\alpha)\Delta(s\beta)}{4\pi^2} \sum_{n=-\frac{1}{2}N+1}^{\frac{1}{2}N} \sum_{m=-\frac{1}{2}M+1}^{\frac{1}{2}M} \exp(-js\alpha_n x_{1,q}^S - js\beta_m x_{2,r}^S) P_{n,m}^{dgh}.$$

**FIG. 1**

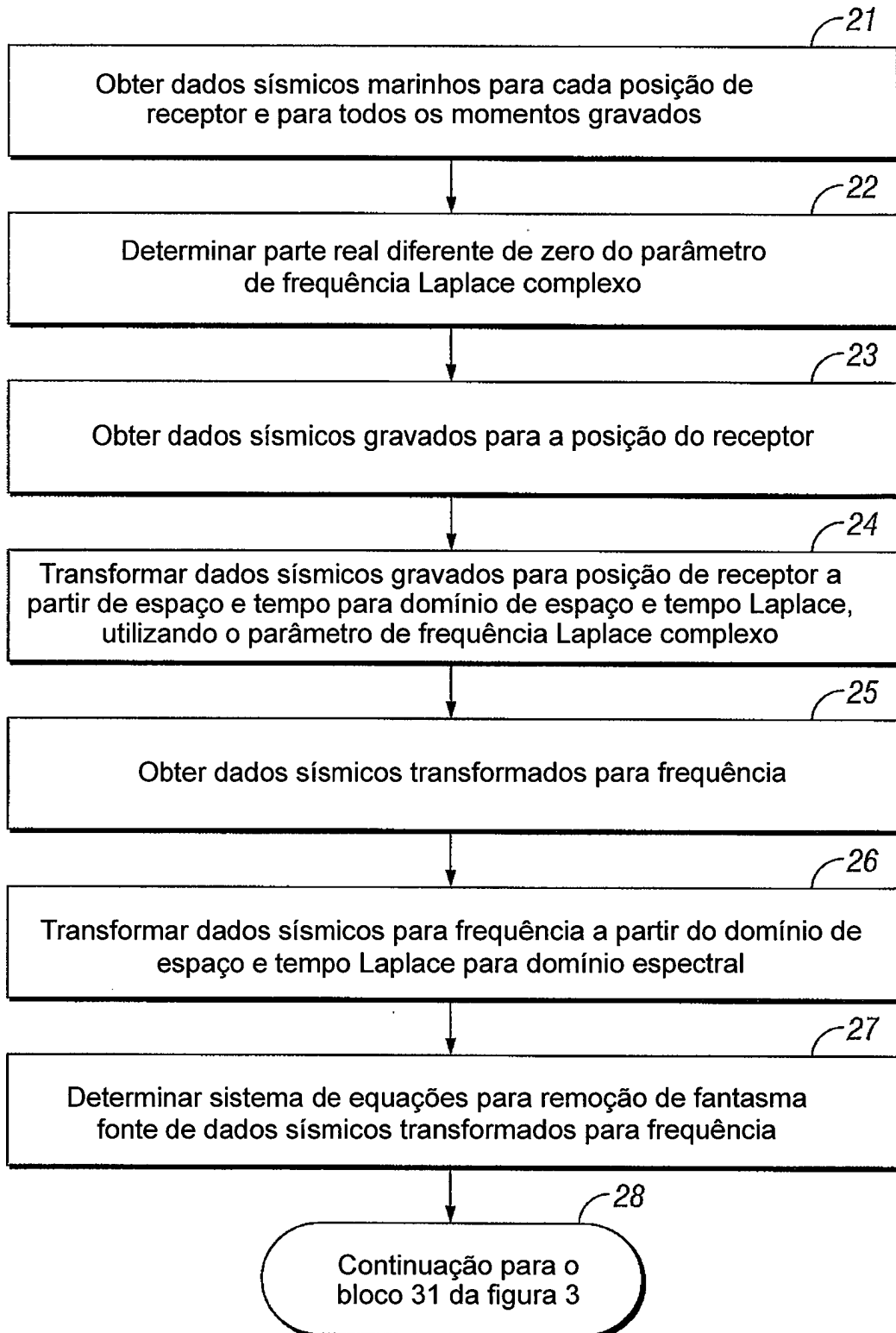


FIG. 2

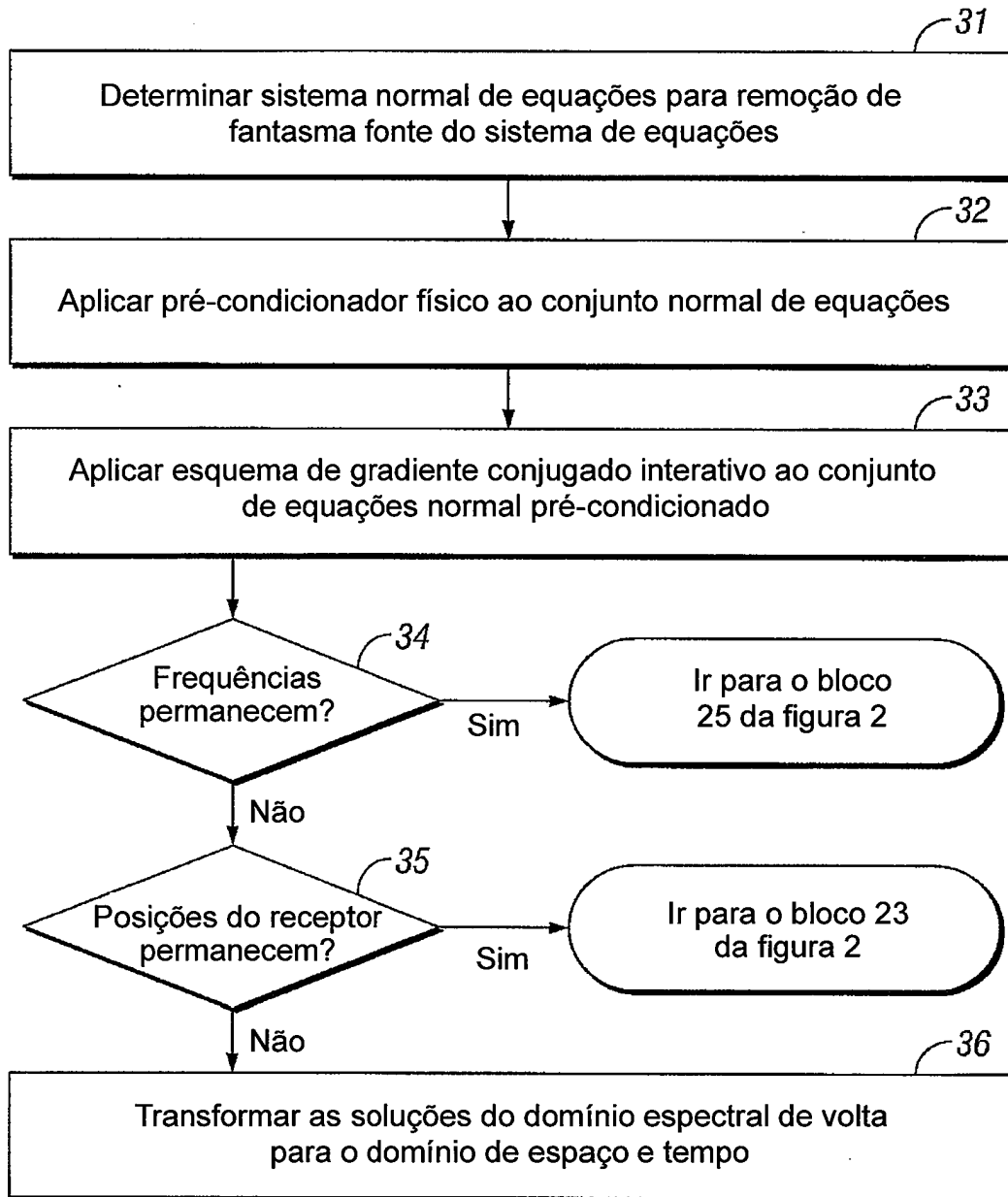


FIG. 3

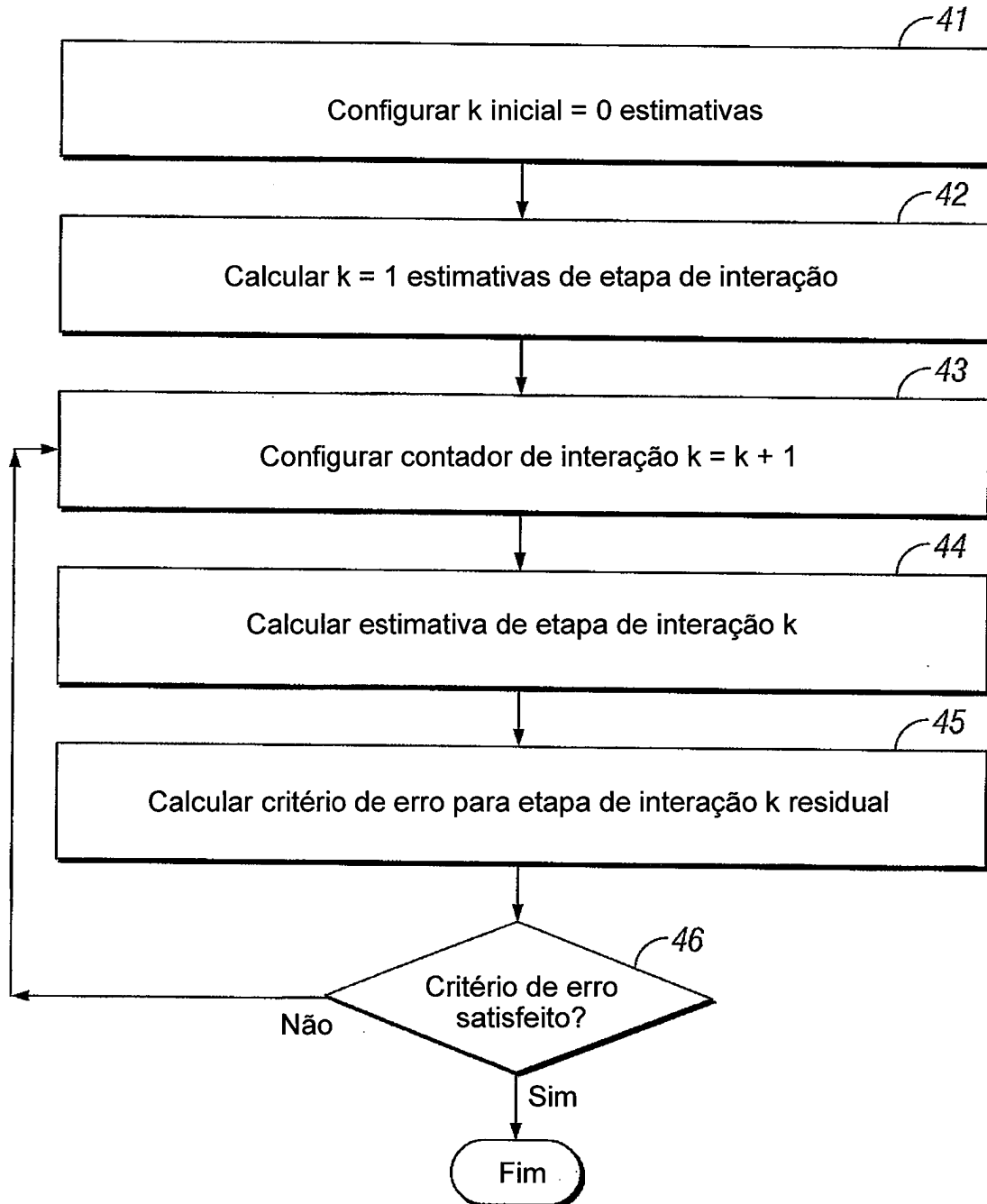


FIG. 4