



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

(11) PI 0903062-0 B1



(22) Data do Depósito: 19/01/2009

(45) Data de Concessão: 03/12/2019

(54) Título: MÉTODO IMPLEMENTADO POR COMPUTADOR PARA SEPARAÇÃO DE CAMPO DE ONDA E SISTEMA PARA SEPARAÇÃO DE CAMPO DE ONDA

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

(30) Prioridade Unionista: 18/01/2008 US 12/009,440.

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

(72) Inventor(es): TILMAN KLÜVER.

(57) Resumo: MÉTODO PARA SEPARAÇÃO DE CAMPO DE ONDA EM DADOS DE CABO DE GRAVAÇÃO REBOCADO DE SENSOR DUPLO 3D COM ENERGIA DISTORCIDA NA DIREÇÃO DO CABO DE GRAVAÇÃO TRANSVERSAL. A presente invenção refere-se a registros de pressão e registros de velocidade de partícula vertical de dados de cabo de gravação rebocado de sensor duplo são transformados no domínio de número de onda em linha. Uma série de filtros de escala é aplicada aos registros de velocidade de partícula vertical transformados em cada número de onda em linha, onde cada filtro da série de filtros de escala é calculado para uma faixa de número de onda de cabo de gravação transversal diferente e em blocos de traços em linha nos quais todos os eventos sísmicos são aproximadamente lineares. O espectro de pressão e o espectro de velocidade de partícula vertical escalados são combinados para separar os componentes de campo de onda ascendentes e descendentes. Os componentes de campo de onda ascendentes e descendentes separados são transformados por inversão novamente no domínio de tempo-espaco.

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"MÉTODO IMPLEMENTADO POR COMPUTADOR PARA SEPARAÇÃO DE CAMPO DE ONDA E SISTEMA PARA SEPARAÇÃO DE CAMPO DE ONDA"**.

Antecedentes da Invenção

5 1. Campo da Invenção

A presente invenção refere-se, de maneira geral, ao campo de prospecção geofísica. Mais particularmente, a invenção se refere ao campo de processamento de dados sísmicos marinhos.

2. Descrição da Técnica Relacionada

10 Na indústria de óleo e gás, a prospecção geofísica é comumente usada para ajudar na pesquisa de formações subterrâneas e na avaliação das mesmas. As técnicas de prospecção geofísica produzem conhecimento da estrutura da subsuperfície da terra, o que é útil para descobrir e extrair recursos minerais valiosos, particularmente depósitos

15 de hidrocarboneto, tais como óleo e gás natural. Uma técnica bem conhecida de prospecção geofísica é o levantamento sísmico. Em um levantamento sísmico com base em terra, um sinal sísmico é gerado na superfície da terra ou próximo da mesma, o qual percorre então descendente-

20 mente para a subsuperfície da terra. Em um levantamento sísmico marinho, o sinal sísmico pode também percorrer descendente através de um corpo de água que se sobrepõe à subsuperfície da terra. As fontes de energia sísmica são usadas para gerar o sinal sísmico que, depois da propagação para a terra, é pelo menos parcialmente refletido pelos refle-

25 tores sísmicos de subsuperfície. Tais refletores sísmicos são tipicamente interfaces entre as formações subterrâneas que apresentam diferentes propriedades elásticas, especificamente velocidade da onda sonora e a densidade da rocha, o que resulta em diferenças na impedância acústica nas interfaces. A energia sísmica refletida é detectada por sensores sísmicos (também chamados de receptores sísmicos) na ou próximo da su-

30 perfície da terra, em um corpo sobrejacente de água, ou em profundidades conhecidas em perfurações, e registrada.

As fontes sísmicas apropriadas para gerar o sinal sísmico em

levantamentos sísmicos de terra podem incluir explosivos ou vibradores. Os levantamentos sísmicos marinhos tipicamente empregam uma fonte sísmica submersa rebocada por um navio e periodicamente ativada para gerar um campo de onda acústica. A fonte sísmica que gera o campo de onda pode ser de diversos tipos, incluindo uma pequena carga explosiva, uma centelha ou um arco elétrico, um vibrador marinho, e, tipicamente, um canhão. A fonte sísmica pode ser um canhão hidráulico, um canhão de vapor, e, mais tipicamente, um canhão de ar comprimido. Tipicamente, uma fonte sísmica marinha consiste não em um único elemento de fonte, mas em uma disposição espacialmente distribuída de elementos de fonte. Esta disposição é particularmente correta para canhões de ar comprimido, comumente a forma mais comum de fonte sísmica marinha.

Os tipos apropriados de sensores sísmicos incluem tipicamente sensores de velocidade de partícula, particularmente em levantamentos de terra, e sensores de pressão da água (tipicamente sensores de gradiente de pressão de água), particularmente em levantamentos marinhos. Às vezes, sensores de aceleração de partícula são usados no lugar de sensores de velocidade de partícula ou além destes. Os sensores de velocidade de partícula e os sensores de pressão de água são comumente conhecidos na técnica como geofones ou hidrofones, respectivamente. Os sensores sísmicos podem ser desdobrados sozinhos, mas são mais comumente desdobrados em disposições de sensor. Adicionalmente, os sensores de pressão e os sensores de velocidade de partícula podem ser desdobrados juntos em um levantamento marinho, colocados em pares ou pares de disposições.

Em um levantamento sísmico marinho típico, a embarcação de levantamento sísmico percorre sobre a superfície da água, tipicamente em cerca de 5 nós, e contém equipamento de aquisição de dados sísmicos, tal como equipamento de controle de navegação, de controle de fonte sísmica, de controle de sensor sísmico, e de registro. 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 cabos de gravação sísmicos, também denominados de cabos sísmicos, são

estruturas alongadas na forma de cabo rebocadas no corpo de água pela embarcação de levantamento sísmico que reboca a fonte sísmica ou por outro navio de levantamento sísmico. Tipicamente, uma pluralidade de cabos de gravação sísmicos é rebocada atrás de uma embarcação sísmica. Os cabos de gravação sísmicos contêm sensores para detectar os campos de onda refletidos iniciados pela fonte sísmica e refletidos das interfaces de reflexão. Convencionalmente, os cabos de gravação sísmicos contêm sensores de pressão, tais como hidrofones, mas foram propostos cabos de gravação sísmicos, os quais contêm sensores de velocidade de partícula de água, tais como geofones, ou sensores de aceleração de partícula, tais como acelerômetros, além de hidrofones. Os sensores de pressão e os sensores de movimento de partícula podem ser desdobrados nas proximidades, colocados em pares ou pares de disposições ao longo de um cabo sísmico.

Os dados sísmicos resultantes obtidos quando do levantamento são processados para produzirem informação referente à estrutura geológica e às propriedades das formações subterrâneas na área em que é feito o levantamento. Os dados sísmicos processados são processados para exibição e análise de teor de hidrocarboneto potencial destas formações subterrâneas. O objetivo do processamento de dados sísmicos é o de extrair dos dados sísmicos tanta informação quanto possível referente às formações subterrâneas a fim de adequadamente representar em imagem a subsuperfície geológica. A fim de identificar as localizações na subsuperfície da Terra, onde há a probabilidade de encontrar acúmulos de petróleo, grandes somas de dinheiro são gastas no agrupamento, no processamento, e na interpretação de dados sísmicos. O processo de construir superfícies refletoras que definem as camadas de terra subterrâneas de interesse dos dados sísmicos registrados proporciona uma imagem da terra na profundidade ou tempo.

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 a presença ou não de depósitos de petróleo é um empreendimento extre-

mamente caro e demorado. Por essa razão, há uma constante necessidade de aperfeiçoar o processamento e a exibição de dados sísmicos, de modo a produzir uma imagem da estrutura da subsuperfície da Terra que irá aperfeiçoar a capacidade de um interpretador, seja a interpretação feita via um computador ou por uma pessoa, para avaliar a probabilidade de que um acúmulo de petróleo existe em uma localização específica na subsuperfície da Terra.

Dados sísmicos de reflexão de cabo de gravação rebocado de sensor duplo consistem em registros de campo de pressão e de campo de velocidade de partícula vertical. Um elemento central na cadeia de processamento dos dados sísmicos é sua separação em registros contendo apenas os componentes ascendentes e descendentes dos campos de onda de pressão. Esta separação pode ser executada depois da transformação dos dados no domínio de frequência-número de onda ($f-k_x-k_y$), tomando tanto a diferença entre o espectro de frequência-número de onda do registro de pressão e uma versão em escala do espectro de frequência-número de onda do registro de velocidade de partícula vertical, respectivamente, e a soma dos mesmos, e dividindo os espectros resultantes em dois. (É notado que, com o simples uso da inversão do filtro de escala anterior, poderiam ser obtidos alternativamente os componentes ascendentes e descendentes dos campos de onda de velocidade de partícula vertical em tomando uma soma e uma diferença entre, respectivamente, o espectro de frequência-número de onda do registro de velocidade de partícula vertical e uma versão em escala do espectro de frequência-número de onda do registro de pressão, e dividindo os espectros resultantes em dois). A transformação inversa do domínio de frequência-número de onda novamente no domínio de tempo-espaço produz os componentes de campo de onda ascendentes e descendentes desejados. Neste processo, apenas o registro de velocidade de partícula vertical (ou alternativamente, apenas o registro de pressão) é mudado pela escala. Para energia não-evanescente, ele é escalado no domínio de frequência-número de onda por um filtro real que sistematicamente aumenta com o aumento do número de onda para uma determinada frequência. En-

tretanto, a distorção espacial na direção do cabo de gravação transversal é comum demais em levantamentos sísmicos marinhos. No caso de distorção do cabo de gravação transversal, a energia é envolta em um número de onda menor do cabo de gravação transversal k_y . Subsequentemente, se os efeitos de envolvimento no número de onda não forem levados em consideração, então o filtro de escala será computado a partir do número de onda errado, um que é baixo demais. Desse modo, a energia distorcida no registro de velocidade de partícula vertical (ou alternativamente, o registro de pressão) é escalada pelos coeficientes de filtro que são consistentemente baixos demais (ou altos demais, respectivamente).

A superposição de componentes de campo de onda ascendentes e descendentes nos registros originais produz um padrão específico de entalhes fantasmas de receptor nos espectros de frequência-número de onda correspondentes. Toda vez que a energia registrada for cancelada em uma combinação de frequência-número de onda específica, por exemplo, no espectro do campo de pressão, a energia registrada correspondente será a máxima no espectro da velocidade de partícula vertical. Entretanto, esta correspondência ocasiona uma separação incorreta dos componentes de campo de onda ascendentes e descendentes nos entalhes no espectro de frequência-número de onda do registro de pressão (ou, alternativamente, do registro de velocidade de partícula vertical). Nestas localizações, a energia distorcida é incorretamente escalada para o registro de velocidade de partícula vertical (ou, alternativamente, o registro de pressão); desse modo, os componentes de campo de onda separados resultantes são incorretamente computados.

Portanto, há a necessidade de um método para a separação de componentes de campo de onda ascendentes e descendentes em dados sísmicos de cabo de gravação rebocado de sensor duplo 3D que apropriadamente controle a energia distorcida na direção do cabo de gravação transversal.

Breve Sumário Da Invenção

A invenção é um método para separar componentes de campo

de onda ascendentes e descendentes em dados de cabo de gravação rebocados de sensor duplo 3D, que podem ter energia distorcida na direção do cabo de gravação transversal. Registros de pressão e registros de velocidade de partícula vertical dos dados de cabo de gravação são transformados no domínio de número de onda em linha. Uma série de filtros de escala é aplicada aos registros de velocidade de partícula vertical transformados em cada número de onda em linha, onde cada filtro da série de filtros de escala é calculado para uma diferente faixa de número de onda de cabo de gravação transversal e em blocos de traços em linha nos quais todos os eventos sísmicos são aproximadamente lineares. O espectro de pressão e o espectro de velocidade de partícula vertical em escala são combinados para separar os componentes de campo de onda ascendentes e descendentes. Os componentes de campo de onda ascendentes e descendentes separados são transformados por inversão novamente no domínio de tempo-espço.

15 Breve Descrição Dos Desenhos

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

20 a figura 1 é um fluxograma que ilustra as etapas de processamento de uma primeira concretização do método da invenção para separar componentes de campo de onda ascendentes e descendentes em dados de cabo de gravação rebocado de sensor duplo 3D;

25 a figura 2 é um fluxograma que ilustra as etapas iniciais de processamento de uma segunda concretização do método da invenção para separar componentes de campo de onda ascendentes e descendentes em dados de cabo de gravação rebocado de sensor duplo 3D;

a figura 3 é um fluxograma que ilustra as etapas de processamento intermediárias de uma concretização da invenção para processar janelas da figura 2;

30 a figura 4 é um fluxograma que ilustra as etapas de processamento intermediárias de uma concretização da invenção para processar relações espectrais da figura 3;

a figura 5 é um fluxograma que ilustra as etapas de processamento finais da segunda concretização da invenção para separar componentes de campo de onda ascendentes e descendentes em dados de cabo de gravação rebocado de sensor duplo 3D, conforme mostrado nas figuras 1-4;

5 a figura 6 mostra um diagrama que ilustra um terceiro painel exemplificativo, conforme usado no método da invenção;

a figura 7 mostra um diagrama que ilustra máscaras criadas a partir de tiras no terceiro painel exemplificativo na figura 6;

10 a figura 8 mostra um gráfico dos espectros de amplitude do traço de referência comparado com os resultados do método da invenção para diferentes ordens de desdistorção máxima L ;

a figura 9 mostra um gráfico dos espectros de amplitude do traço de referência comparado com mais resultados do método da invenção para diferentes ordens de desdistorção L ;

15 a figura 10 mostra um gráfico do sinal estimado pelo método da invenção e sua diferença com relação ao traço de referência para ordem de desdistorção $L=0$; e

20 a figura 11 mostra um gráfico do sinal estimado pelo método da invenção e sua diferença com relação ao traço de referência para ordem de desdistorção $L=5$.

Enquanto a invenção será descrita em conexão com suas concretizações preferidas, será entendido que a invenção não é limitada às mesmas. Pelo contrário, a invenção se destina a cobrir todas as alternativas, modificações e equivalentes que podem ser incluídos no escopo da invenção, conforme definido pelas reivindicações anexas.

25

Descrição Detalhada da Invenção

30 Antes de o registro de velocidade de partícula vertical poder ser corretamente escalado para a separação de campo de onda, seu espectro precisa ser adequadamente dealiased. Uma maneira convencional de alcançar este objetivo é a interpolação de traço na direção do cabo de gravação transversal a fim de diminuir o espaçamento do cabo de gravação e, subsequentemente, aumentar o número de onda Nyquist do cabo de gravação

transversal. O método da invenção apresenta uma abordagem alternativa para a manipulação adequada de energia distorcida durante a separação de campo de onda, mas sem a necessidade de interpolação de traço explícita.

O método da invenção usa as propriedades cíclicas da transformação rápida de Fourier (FFT). Entretanto, nenhum traço interpolado precisa ser calculado para a separação de campo de onda. Em vez disso, os vários filtros de escala são aplicados ao espectro original do registro de velocidade de partícula vertical em cada número de onda em linha K_x . Cada um destes filtros de escala é calculado para uma faixa de número de onda de cabo de gravação transversal diferente e atua apenas nessa parte da energia no espectro que está, ou, no caso de energia distorcida, deve estar, nesta faixa de número de onda. A separação de campo de onda no método da invenção trabalha em blocos definidos na dimensão em linha para conter apenas eventos sísmicos que são aproximadamente lineares. Para simplicidade e clareza de ilustração apenas, o procedimento é descrito para um único bloco na seguinte discussão.

As figuras 1-5 são fluxogramas que ilustram concretizações da invenção para a separação de campo de onda. As figuras 1 e 2-5 mostram duas concretizações do método da invenção, respectivamente. A figura 2 mostra as etapas iniciais da segunda concretização do método da invenção, as figuras 3 e 4 mostram as etapas intermediárias adicionais do método mostrado na figura 2, e a figura 5 mostra as etapas finais do método mostrado nas figuras 2-4.

As figuras 6-11 ilustram algumas das etapas descritas nos fluxogramas discutidos em referência às figuras 1-5. As figuras 6 e 7 ilustram a relação espectral, o terceiro painel, e suas máscaras, respectivamente. As figuras 8 e 9 ilustram a comparação dos espectros de amplitude a partir dos resultados do método da invenção para diferentes ordens de desdistorção máxima. As figuras 10 e 11 ilustram o sinal estimado pelo método da invenção para desdistorcer ordens $L=0$ e 5, respectivamente.

A figura 1 é um fluxograma que ilustra as etapas de processamento de uma primeira concretização do método da invenção para separar

componentes de campo de onda ascendentes e descendentes em dados de cabo de gravação rebocado de sensor duplo 3D. Os dados de cabo de gravação podem ter energia distorcida na direção do cabo de gravação transversal que será manipulada pelo método da invenção.

5 Na etapa 11, registros de pressão e registros de velocidade de partícula vertical dos dados de cabo de gravação rebocado de sensor duplo são transformados do domínio de tempo-espço ($t-x-y$) no domínio de número de onda em linha ($t-k_x-y$), onde t indica tempo, x e y são as dimensões em linha e (linha cruzada) de cabo de gravação transversal, respectivamente, e
10 k_x , o número de onda em linha.

 Na etapa 12, uma série de filtros de escala é aplicada aos registros de velocidade de partícula vertical transformados da etapa 11 em cada número de onda em linha k_x . Desse modo, os filtros de escala são aplicados em uma fatia da constante k_x . Cada filtro da série de filtros de escala é calculado para uma faixa de número de onda de cabo de gravação transversal
15 diferente e em blocos de traços em linha nos quais todos os eventos sísmicos são aproximadamente lineares. Cada filtro dos filtros de escala atua apenas na porção apropriada da energia no espectro de frequência-número de onda que está na faixa de número de onda correspondente para energia
20 não-distorcida ou deve estar na faixa de número de onda correspondente para energia distorcida.

 Na etapa 13, o espectro de pressão e o espectro de velocidade de partícula vertical escalados da etapa 12 são combinados para separar componentes de campo de onda ascendentes e descendentes.

25 Na etapa 14, os componentes de campo de onda ascendentes e descendentes da etapa 13 são transformados por inversão novamente no domínio de tempo-espço ($t-x-y$).

 A figura 2 é um fluxograma que ilustra as etapas de processamento iniciais de uma segunda concretização do método da invenção para
30 separar os componentes de campo de onda ascendentes e descendentes em dados de cabo de gravação rebocado de sensor duplo 3D. Os dados de cabo de gravação podem ter energia distorcida na direção do cabo de gra-

vação transversal. A figura 2 se expande com a discussão da primeira concretização discutida acima em referência à figura 1.

Na etapa 20, os registros de pressão e de velocidade de partícula vertical são divididos em blocos no domínio de tempo-espço (t - x - y). Cada bloco compreende todos os traços na dimensão do cabo de gravação transversal (y) e todos os pontos de amostra na dimensão de tempo (t). Entretanto, o bloco é limitado na dimensão em linha (x) de modo que todos os eventos sísmicos dentro do bloco sejam aproximadamente lineares. Desse modo, os blocos podem se sobrepor na dimensão em linha. Quando os blocos estiverem sobrepostos, eles terão que ser adequadamente combinados depois da separação de campo de onda.

Na etapa 21, é selecionado um bloco da etapa 20.

Na etapa 22, registros de pressão e de velocidade de partícula vertical no bloco selecionado na etapa 21 são transformados do domínio t - x - y no domínio t - k_x - y .

Na etapa 23, são selecionadas duas fatias, com a constante k_x , uma de um registro de velocidade de partícula vertical transformado e uma de um registro de pressão correspondente, ambas da etapa 22.

Na etapa 24, as duas fatias, com a constante k_x , selecionadas na etapa 23 são separadas em diversas janelas que contêm todos os traços na dimensão de cabo de gravação transversal, mas não necessariamente todos os pontos de amostra de traço na dimensão de tempo. As janelas podem ficar sobrepostas na dimensão de tempo. Quando as janelas ficarem sobrepostas, elas terão que ser adequadamente combinadas depois da separação de campo de onda.

Na etapa 25, são selecionadas duas janelas correspondentes, uma do registro de pressão e uma do registro de velocidade de partícula vertical, ambas da etapa 24.

Na etapa 26, é selecionada uma ordem de desdistorção máxima, um número inteiro designado por L . A faixa de número de onda de cabo de gravação transversal original corresponde a $L=0$.

Na etapa 27, as janelas selecionadas na etapa 25 são enviadas

para a etapa 31 da figura 3 para processamento adicional.

Na etapa 28, é determinado se alguma janela adicional sobra para ser selecionada na etapa 25 na fatia com a constante k_x , selecionada na etapa 23. Se janelas adicionais sobrarem para serem selecionadas, então, o processo retornará para a etapa 25. Se nenhuma janela adicional sobrar para ser selecionada, o processo procederá para a próxima etapa 29.

Na etapa 29, é determinado se alguma fatia adicional com a constante k_x sobra para ser selecionada na etapa 23. Se fatias adicionais sobrarem para serem selecionadas, então, o processo retornará para a etapa 23. Se nenhuma fatia adicional sobrar para ser selecionada, então, o processo procederá para a próxima etapa 30.

Na etapa 30, é determinado se algum bloco adicional sobra para ser selecionado na etapa 21. Se blocos adicionais sobrarem para serem selecionados, então o processo retornará para a etapa 21. Se nenhum bloco adicional sobrar para ser selecionado, o processo terminará para o fluxograma na figura 2. O processo procede agora para o fluxograma na figura 3.

A figura 3 é um fluxograma que ilustra as etapas de processamento de uma concretização do método da invenção para processar janelas da figura 2. Cada dita janela é submetida ao seguinte procedimento.

Na etapa 31, duas janelas selecionadas são obtidas da etapa 27 da figura 2, uma de um registro de pressão e uma de um registro de velocidade de partícula vertical.

Na etapa 32, um filtro de escala é computado para ser aplicado na separação de campo de onda para a corrente k_x e para uma faixa de número de onda de cabo de gravação transversal desejada que é L vezes maior do que a faixa de número de onda Nyquist fornecida pelas janelas de dados.

Na etapa 33, a janela da etapa 31 do registro de velocidade de partícula vertical é provida com L vezes seu número de traços por traços zero na dimensão de cabo de gravação transversal. Aqui, L é a ordem de desdistorção máxima na etapa 26 da figura 2.

Na etapa 34, a janela da etapa 33 provida do registro de veloci-

dade de partícula vertical é provida com L vezes seu número de amostras em um traço por amostras zero na dimensão de tempo, gerando um primeiro registro estendido. Aqui, L é a ordem de desdistorção máxima selecionada na etapa 26 da figura 2.

5 Na etapa 35, o primeiro registro estendido da etapa 34 é periodicamente zerado por traços L entre cada dois traços vivos, gerando um segundo registro estendido.

Na etapa 36, as primeira e segunda janelas estendidas dos registros de velocidade de partícula vertical, das etapas 34 e 35, respectivamente, são transformadas do domínio de número de onda em linha ($t-k_x-y$) no domínio de frequência-número de onda ($f-k_x-k_y$). O espectro do primeiro registro estendido da etapa 34 é denominado de "primeiro espectro", a seguir, enquanto que o espectro do segundo registro estendido da etapa 35 é denominado de "segundo espectro", respectivamente. As faixas de frequência e de número de onda apresentam agora $(L+1)$ vezes o número de amostras, como está presente nos espectros originais das janelas selecionadas na etapa 25 da figura 2. Os números de amostras no domínio de frequência-número de onda dos espectros originais são denominados de n_f para a dimensão de frequência e n_k para a dimensão do número de onda de cabo de gravação transversal, respectivamente.

10
15
20

Na etapa 37, as faixas de frequência de ambos os primeiro e segundo espectros da etapa 36 são reduzidas, considerando apenas as amostras n_f mais internas para todos os números de onda.

Na etapa 38, uma pequena quantidade de ruído branco é acrescentada ao segundo espectro, na medida em que é reduzida, da etapa 37. Esta adição de ruído branco é para impedir problemas, se o segundo espectro for pequeno, quando usado como um divisor na próxima etapa 39.

25

Na etapa 39, a relação é tomada do primeiro espectro da etapa 37 e do segundo espectro da etapa 38. A relação resultante dos primeiro e segundo espectros é denominada de "terceiro painel", a seguir.

30

Na etapa 40, o filtro de escala da etapa 32 e o terceiro painel da etapa 39 são enviados para a etapa 41 da figura 4 para processamento adi-

cional. As extremidades do processo para o fluxograma na figura 3 e do processo agora procede para o fluxograma na figura 4.

5 A figura 4 é um fluxograma que ilustra as etapas de processamento intermediário de uma concretização do método da invenção para processar relação espectrais da figura 3.

Na etapa 41, o filtro de escala e o terceiro painel são obtidos da etapa 40 da figura 3.

10 Na etapa 42, o terceiro painel da etapa 41 é dividido em 2 vezes as tiras ($L+1$), cada qual com n_k amostras no domínio de número de onda. As tiras são numeradas de $-L$ a L , isto é, de índices L negativos para índices L positivos.

15 Na etapa 43, cada duas tiras correspondentes é combinada em uma máscara, movendo a tira com um índice L positivo para a faixa de número de onda positivo original e movendo a tira com um índice L negativo para a faixa de número de onda negativo original. Se L for ímpar, trocar a posição de ambas as tiras. Nas etapas 42 e 43, são criadas máscaras ($L+1$), cada qual com n_k amostras no domínio de número de onda. As tiras são numeradas de $-L$ a L .

20 Na etapa 45, cada duas tiras correspondentes são combinadas em um filtro, movendo a tira com um índice L positivo para a faixa de número de onda positiva original e movendo a tira com o índice L negativo para a faixa de número de onda negativa original. Se L for ímpar, trocar a posição de ambas as tiras. Nas etapas 44 e 45, filtros ($L+1$) são criados, correspondendo às máscaras ($L+1$) criadas nas etapas 42 e 43, e atuando nas diferentes faixas de número de onda das máscaras.

25 Na etapa 46, todos os vetores consistindo das amostras de todas as máscaras na mesma amostra de número de onda de frequência são normalizados. Esta normalização é necessária para assegurar que a energia extra não seja introduzida nos campos de onda separados.

30 Na etapa 47, os filtros e as máscaras correspondentes são multiplicados juntos para criarem a série de filtros de escala.

Na etapa 48, a série de filtros de escala criada na etapa 47 é

enviada para a etapa 51 da figura 5 para processamento adicional.

5 A figura 5 é um fluxograma que ilustra as etapas de processamento finais da segunda concretização do método da invenção para separar componentes de campo de onda ascendentes e descendentes em dados de cabo de gravação rebocado de sensor duplo 3D, conforme mostrado nas figuras 1-4.

Na etapa 51, a série de filtros de escala é obtida da etapa 48 na figura 4.

10 Na etapa 52, a série de filtros de escala da etapa 51 é aplicada ao espectro original da janela do registro de velocidade de partícula vertical da etapa 25 da figura 2.

Na etapa 53, são somados todos os espectros filtrados resultantes da janela dos registros de velocidade de partícula vertical da etapa 52. Esta soma produz o espectro escalado do registro de velocidade de partícula vertical na janela.

15 Na etapa 54, são combinados o espectro do registro de pressão na janela da etapa 25 da figura 2 e o espectro escalado do registro de velocidade de partícula vertical na janela da etapa 53. Isto produz os espectros dos componentes de campo de onda ascendentes e descendentes na janela.

20 Na etapa 55, todos os espectros dos componentes de campo de onda ascendentes e descendentes da etapa 54 são transformados por inversão do domínio de frequência-número de onda ($f-k_x-k_y$) no domínio de número de onda em linha ($t-k_x-y$).

25 Na etapa 56, os espectros transformados por inversão da etapa 55 são combinados para todas as janelas da etapa 24 da figura 2 em uma fatia da constante k_x . Esta combinação produz os componentes de campo de onda ascendentes e descendentes em uma fatia.

30 Na etapa 57, todas as fatias da etapa 56 contendo os componentes de campo de onda ascendentes e descendentes calculados das fatias da etapa 23 da figura 2 são combinadas em um bloco. Esta combinação produz os registros dos componentes de campo de onda ascendentes e

descendentes em um bloco no domínio $t-k_x-y$.

Na etapa 58, os componentes de campo de onda ascendentes e descendentes da etapa 57 são transformados por inversão do domínio de número de onda em linha ($t-k_x-y$) novamente no domínio de tempo-espço ($t-x-y$). Esta transformação produz os componentes de campo de onda ascendentes e descendentes no domínio de tempo-espço em um bloco.

Na etapa 59, os componentes de campo de onda ascendentes e descendentes em um bloco obtido da etapa 58 são combinados, produzindo os componentes de campo de onda ascendentes e descendentes finais no domínio de tempo-espço.

O método da invenção pode ser adicionalmente estabilizado por meio do cálculo da série de máscaras para cada janela para o registro de pressão como também por meio da combinação da mesma com a série para o registro de velocidade de partícula vertical antes da etapa de normalização. Desta maneira, sinais comuns de ambos os registros são enfatizados e a influência de ruído aleatório é reduzida. O método tem por objetivo prever a relação de energia distorcida e não-distorcida a partir de sua relação em frequências mais baixas. A aplicação do método da invenção nas janelas de tempo é desejada na medida em que o método assume um número limitado de eventos localmente lineares.

O método da invenção é descrito acima para a concretização na qual o registro de velocidade de partícula vertical é escalado e o registro de pressão não é. Alternativamente, o método da invenção inclui a concretização alternativa na qual o registro de pressão é escalado e o registro de velocidade de partícula vertical não é. A discussão acima pode ser modificada de maneira direta para incluir esta concretização alternativa. Referências aos registros de pressão e aos registros de velocidade de partícula vertical teriam meramente que ser trocadas.

A invenção foi discutida acima como um método, para fins ilustrativos apenas, mas pode também ser implementada como um sistema. O sistema da invenção é preferivelmente implementado por meio de computadores, em particular, computadores digitais, juntamente com outro equipa-

mento de processamento de dados convencional. Tal equipamento de processamento de dados, bem conhecido na técnica, irá compreender qualquer combinação apropriada ou rede de equipamento de processamento de computador, incluindo, mas não limitada a hardware (processadores, dispositivos de armazenamento temporário e permanente, e qualquer outro equipamento de processamento de computador adequado), software (sistemas de operação, programas de aplicação, bibliotecas de programa de matemática, e qualquer outro software apropriado), conexões (elétricas, ópticas, sem fio, ou qualquer outra), e periféricos (dispositivos de entrada e saída, tais como teclados, dispositivos de apontar, e scanners; dispositivos de imagem, tais como monitores e impressoras; meios de armazenamento, tais como discos e unidades de disco, e qualquer outro equipamento apropriado).

Adicionalmente, é notado que a separação de componentes de campo de onda ascendentes e descendentes, acima na etapa 54 da figura 5, pode ser executada em qualquer ponto depois de a série de filtros de escala ser aplicada ao espectro de velocidade de partícula vertical em uma janela, acima na etapa 52 da figura 5. Qualquer mudança resultante na ordem das etapas está dentro do método da invenção.

O procedimento de criar as máscaras e o efeito do método proposto são mostrados nas seguintes figuras. Os dados usados foram emitidos modelados usando 23 cabos de gravação com uma distância de 25 m. O modelo consiste em um único defletor com uma inclinação de 60° na direção do cabo de gravação transversal e nenhuma inclinação na direção do cabo de gravação. As seguintes figuras mostram os resultados para a fatia com $k_x=0$. Nenhuma provisão de janela na dimensão de tempo foi aplicada, visto que os dados contêm apenas um único evento de reflexão e o fantasma do receptor correspondente.

A figura 6 é um diagrama que ilustra um terceiro painel exemplificativo, conforme usado no método da invenção. A figura 6 mostra um terceiro painel exemplificativo depois da redução para amostras n_f para cada número de onda. As tiras 61 que são usadas para construir as máscaras são separadas por linhas verticais 62. As tiras são numeradas e rotuladas de $L=-$

5 a $L=5$.

A figura 7 é um diagrama que ilustra máscaras criadas das tiras no terceiro painel exemplificativo na figura 6. A figura 7 mostra as tiras da figura 6 redistribuídas nas máscaras 71 até $L=4$. As máscaras são mostradas depois da normalização, que é a etapa 46 na figura 4. Cada máscara tem o mesmo número de amostras que o espectro original do registro de velocidade de partícula vertical.

As figuras 8-11 mostram uma comparação entre o campo de pressão isento de fantasma modelado (referência) e aquele estimado para o número de traço 11. A figura 8 mostra um gráfico dos espectros de amplitude de 81 do traço de referência comparado com os resultados 82 do método da invenção para diferentes ordens de desdistorção máxima L . A figura 9 mostra um gráfico dos espectros de amplitude 91 do traço de referência comparado com mais resultados 92 do método da invenção para diferentes ordens de desdistorção máxima L . Quanto maior a ordem de desdistorção escolhida, maior a frequência com relação à qual o espectro do traço estimado é igualado ao espectro do traço de referência.

A figura 10 mostra um gráfico do sinal 101 estimado pelo método da invenção e sua diferença 102 para o traço de referência para a ordem de desdistorção $L=0$. A figura 11 mostra um gráfico do sinal 111 estimado pelo método da invenção e sua diferença 112 para o traço de referência para a ordem de desdistorção $L=5$.

Deve ser entendido que o antecedente é meramente uma descrição detalhada das concretizações específicas desta invenção e que numerosas mudanças, modificações e alternativas às concretizações descritas podem ser feitas de acordo com a descrição aqui apresentada sem se afastar do escopo da invenção. A descrição anterior não se destina, portanto, a limitar o escopo da invenção. Do contrário, o escopo da invenção deve ser determinado apenas pelas reivindicações anexas e seus equivalentes.

REIVINDICAÇÕES

1. Método implementado por computador para separar componentes de campo de onda ascendentes e descendentes em dados de cabo de gravação rebocado de sensor duplo 3D, que compreende:

5 a transformação dos registros de pressão e dos registros de velocidade de partícula vertical dos dados de cabo de gravação no domínio do espaço do número de onda em linha transversal e no tempo em linha;

a aplicação de uma série de filtros de escala nos registros de velocidade de partícula vertical transformados em cada número de onda em linha,;

10 a combinação do espectro de pressão e do espectro de velocidade de partícula vertical escalados no domínio de número de onda-frequência para separar componentes de campo de onda ascendentes e descendentes; a transformação inversa dos componentes de campo de onda ascendentes e descendentes novamente no domínio de tempo-espaço,

caracterizado pelo fato de que

20 cada filtro da série de filtros de escala é calculado para uma faixa de número de onda de cabo de gravação transversal diferente e em blocos de traços em linha nos quais todos os eventos sísmicos são aproximadamente lineares.

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** a transformação dos registros de pressão e dos registros de velocidade de partícula vertical dos dados do cabo de gravação no domínio do espaço do número de onda em linha transversal e no tempo em linha compre-

25 ende: a recuperação dos registros de pressão e dos registros velocidade de partícula vertical originários dos registradores de pressão e dos registradores de velocidade de partícula vertical, respectivamente, montados no cabo de gravação rebocado;

30 a seleção de uma pluralidade de caixas nos dados de cabo de gravação com cada bloco contendo todos os traços na dimensão de cabo de gravação transversal, todos os pontos de amostra de traço na dimensão de

tempo, e apenas traços suficientes na dimensão em linha, de modo que todos os eventos sísmicos dentro de cada bloco sejam aproximadamente lineares;

a transformação dos registros de pressão e dos registros de velocidade de partícula vertical em cada um dos blocos no domínio do espaço do número de onda em linha transversal e no tempo em linha;

a seleção de uma pluralidade de fatias com número de onda em linha constante em cada dos blocos transformados;

a separação de cada fatia em uma pluralidade de janelas com cada janela contendo todos os traços na dimensão de cabo de gravação transversal; e

a execução do seguinte para cada uma das janelas:

a seleção de uma ordem de dealiasing máxima L para a janela;

a computação de um filtro de escala para o número de onda em linha e para uma faixa selecionada números de onda de cabo de gravação transversal;

a provisão da janela com traços zero e amostras zero, gerando um primeiro registro estendido;

o zerar periódico no primeiro registro estendido com amostras zero, gerando um segundo registro estendido;

a transformação dos primeiro e segundo registros no domínio de frequência-número de onda, gerando um primeiro e um segundo espectros, respectivamente;

a redução dos primeiro e segundo espectros; e

a tomada da relação do primeiro espectro - segundo espectro, gerando o terceiro painel.

3. Método, de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado pelo fato de que** a faixa selecionada de números de onda de cabo de gravação transversal é L vezes maior do que uma faixa de número de onda Nyquist para a janela.

4. Método, de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado pelo fato de que** a provisão da janela com traços zero e amostras zero compreende:

a provisão da janela com L vezes o número de traços na janela por traços zero na dimensão de cabo de gravação transversal; e

a provisão da janela com L vezes o número de amostras em um traço por amostras zero na dimensão de tempo.

5 5. Método, de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado pelo fato de que** o zerar periódico do primeiro registro estendido com amostras zero compreende:

a zeração periódica do segundo registro estendido por traços L entre cada dois traços vivos.

10 6. Método, de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado pelo fato de que** a redução dos primeiro e segundo espectros compreende:

a redução das faixas de frequência dos primeiro e segundo espectros para as amostras mais internas com a faixa de frequência igual em tamanho ao número de frequências nos registros de velocidade de partícula vertical transformados.

15 7. Método, de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado pelo fato de que** a tomada da relação dos primeiros espectros - segundos espectros compreende:

o acréscimo de uma pequena quantidade de ruído branco ao segundo espectro antes da divisão.

20 8. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 2 a 7, **caracterizado pelo fato de que** a aplicação de uma série de filtros de escala compreende:

a divisão do terceiro painel em 2 tiras $(L+1)$ numeradas de $-L$ a L ;
25 a combinação de cada duas tiras correspondentemente numeradas em uma máscara;

a divisão do filtro de escala em 2 tiras $(L+1)$ numeradas de $-L$ a L ;
a combinação de cada duas tiras correspondentemente numeradas em um filtro;

30 a normalização das máscaras;

a multiplicação dos filtros e das máscaras correspondentes juntos, gerando uma série de filtros de escala; e

a aplicação da série de filtros de escala em registros de velocidade de partícula vertical transformados.

9. Método, de acordo com a reivindicação 8, **caracterizado pelo fato de que** cada tira compreende metade do número de amostras na dimensão de número de onda de cabo de gravação transversal, como nos registros de velocidade de partícula vertical transformados.

10. Método, de acordo com a reivindicação 8, **caracterizado pelo fato de que** a combinação de cada duas tiras correspondentemente numeradas em um filtro compreende:

10 a movimentação da tira com faixa de L positivo a número de onda positivo;

a movimentação da tira com faixa de L negativo a número de onda negativo; e

a troca da posição das tiras, se L for ímpar.

15 11. Método, de acordo com a reivindicação 8, **caracterizado pelo fato de que** a normalização das máscaras compreende:

a normalização de todos os vetores de amostras em todas as máscaras na mesma amostra de frequência-número de onda.

20 12. Método, de acordo com a reivindicação 8, **caracterizado pelo fato de que** a combinação do espectro de pressão e o espectro de velocidade de partícula vertical escalados compreende:

a soma de todos os registros de velocidade de partícula vertical transformados filtrados, gerando o espectro de velocidade de partícula vertical escalado na janela;

25 a combinação do espectro de pressão e do espectro de velocidade de partícula vertical escalados na janela, gerando os espectros dos componentes de campo de onda ascendentes e descendentes na janela;

a transformação inversa dos espectros dos componentes de campo de onda ascendentes e descendentes do domínio de frequência-número de onda no domínio número de onda em linha;

a combinação dos espectros transformados por inversão de com-

ponentes de campo de onda ascendentes e descendentes em todas as janelas na fatia de constante k_x , gerando os componentes de campo de onda ascendentes e descendentes em uma fatia;

5 a combinação dos componentes de campo de onda ascendentes e descendentes em todas as fatias no bloco, gerando os componentes de campo de onda ascendentes e descendentes no bloco;

a transformação inversa dos componentes de campo de onda ascendentes e descendentes no bloco no domínio de tempo-espço; e

10 a combinação dos componentes de campo de onda ascendentes e descendentes em todos os blocos, gerando os componentes de campo de onda ascendentes e descendentes separados.

13. Sistema para separar os componentes de campo de onda ascendentes e descendentes em dados de cabo de gravação rebocado de sensor duplo 3D, em que o sistema executa o método como definido em qualquer
15 uma das reivindicações 1 a 12, o sistema compreendendo:

registradores de pressão e registradores de velocidade de partícula vertical montados no cabo de gravação rebocado, registrando os registros de pressão e os registros de velocidade de partícula vertical, respectivamente; e

20 um sistema por computador compreendendo:

um meio para transformar os registros de pressão e os registros de velocidade de partícula vertical dos dados de cabo de gravação no domínio do espaço do número de onda em linha transversal e no tempo em linha;

25 um meio para aplicar uma série de filtros de escala nos registros de velocidade de partícula vertical transformados em cada número de onda em linha;

um meio para combinar o espectro do registro de pressão e o espectro do registro de velocidade de partícula vertical escalados no domínio de número de onda-frequência para separar os componentes de campo de onda
30 ascendentes e descendentes; e

um meio para a transformação inversa dos componentes de

campo de onda ascendentes e descendentes separados novamente no domínio de tempo-espço:

caracterizado pelo fato de que cada filtro da série de filtros de escala é calculado para uma faixa de número de onda de cabo de gravação transversal diferente e em blocos de traços em linha nos quais todos os eventos sísmicos são aproximadamente lineares;

14. Sistema, de acordo com a reivindicação 13, **caracterizado pelo fato de que** o meio para transformar registros de pressão e registros de velocidade de partícula vertical dos dados de cabo de gravação no domínio de número de onda em linha compreende;

um meio para selecionar uma pluralidade de blocos nos dados de cabo de gravação com cada bloco contendo todos os traços na dimensão de cabo de gravação transversal, todos os pontos de amostra de traço na dimensão de tempo, e apenas os traços suficientes na dimensão em linha de modo que todos os eventos sísmicos dentro de cada bloco sejam aproximadamente linear;

meios para transformar os registros de pressão e de velocidade de partículas vertical em cada um dos blocos para o domínio do espaço do número de onda em linha transversal e no tempo em linha;

um meio para selecionar uma pluralidade de fatias com número de onda em linha constante em cada um dos blocos transformados;

um meio para separar cada fatia em uma pluralidade de janelas com cada janela contendo todos os traços na dimensão de cabo de gravação transversal; e

um meio para executar o seguinte para cada das janelas:

um meio para selecionar uma ordem de dealiasing máxima L para a janela;

um meio para computar um filtro de escala para o número de onda em linha e para uma faixa selecionada de nws de cabo de gravação transversal;

um meio para prover a janela com traços zero e amostras zero, gerando um primeiro registro estendido;

um meio para periodicamente zerar o primeiro registro estendido com amostras zero, gerando um segundo registro estendido;

um meio para transformar os primeiro e segundo registros estendidos no domínio de frequência-número de onda, gerando um primeiro e um

5 segundo espectros, respectivamente;

um meio para reduzir o primeiro e o segundo espectros; e

um meio para tomar a relação do primeiro espectro ao segundo espectro, gerando um terceiro painel.

10 15. Sistema de acordo com a reivindicação 13 ou 14, **caracterizado pelo fato de que** compreende adicionalmente meios para realizar cada etapa do método como definido nas reivindicações 3 a 12.



FIG. 1

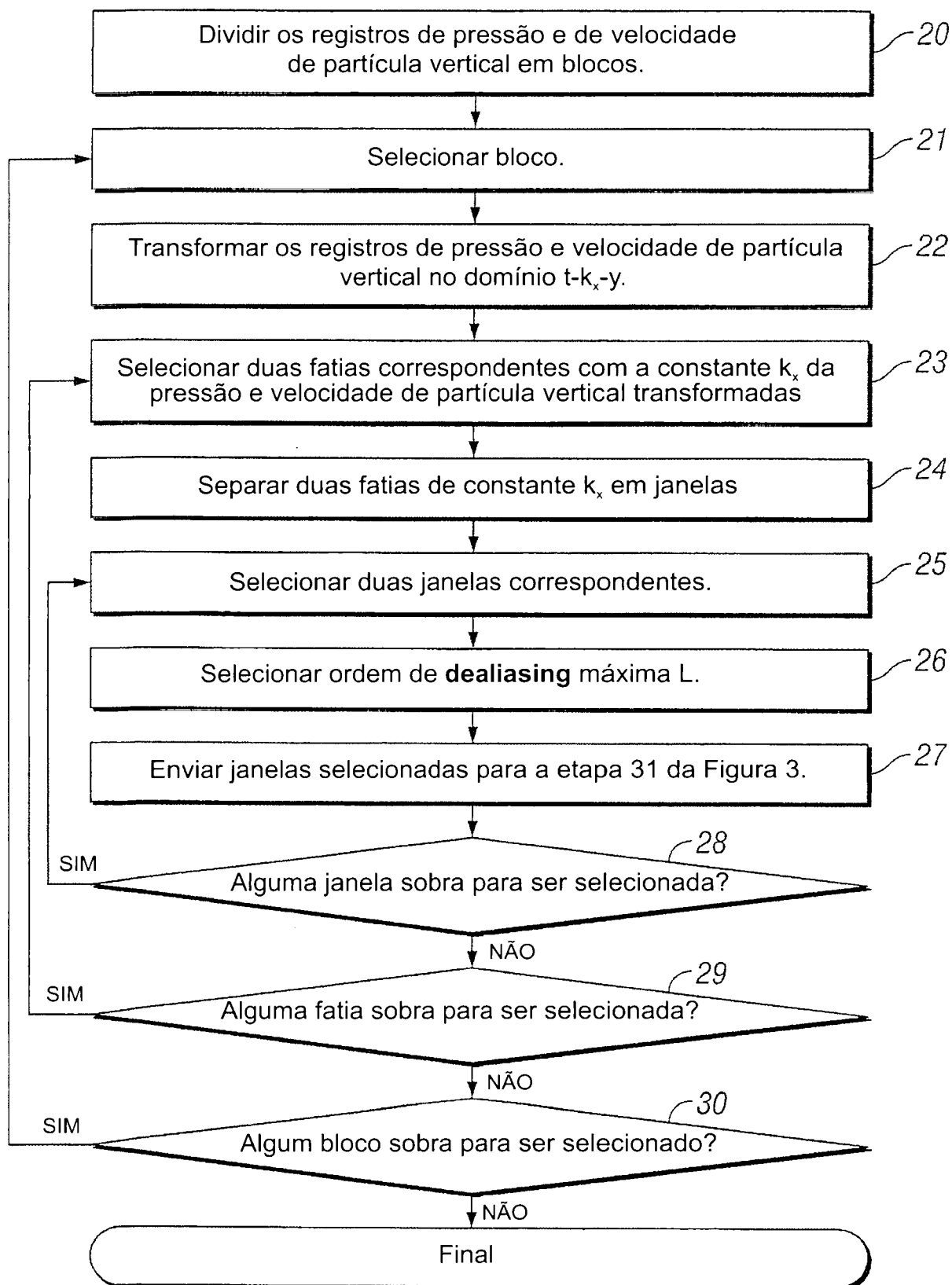


FIG. 2

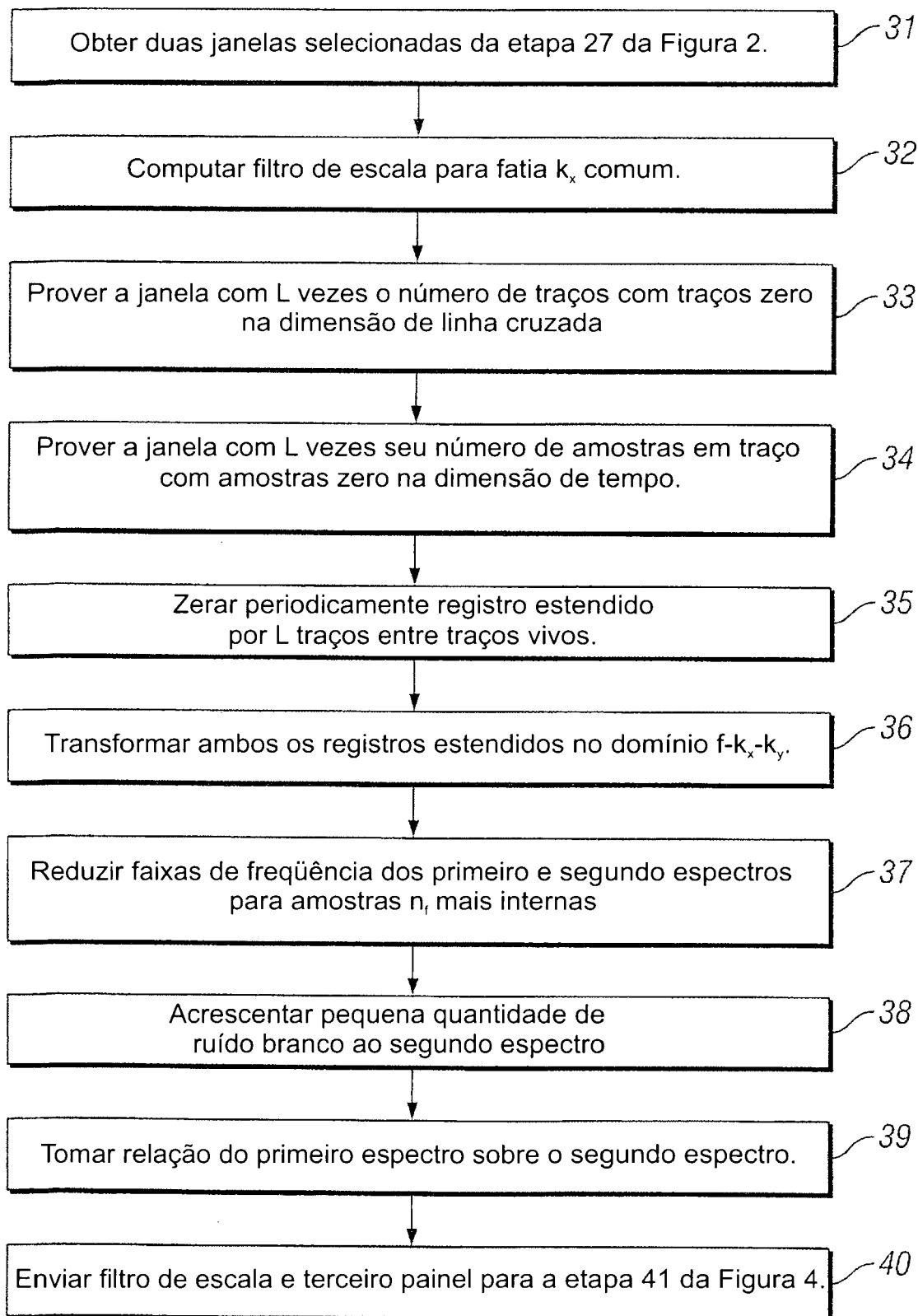
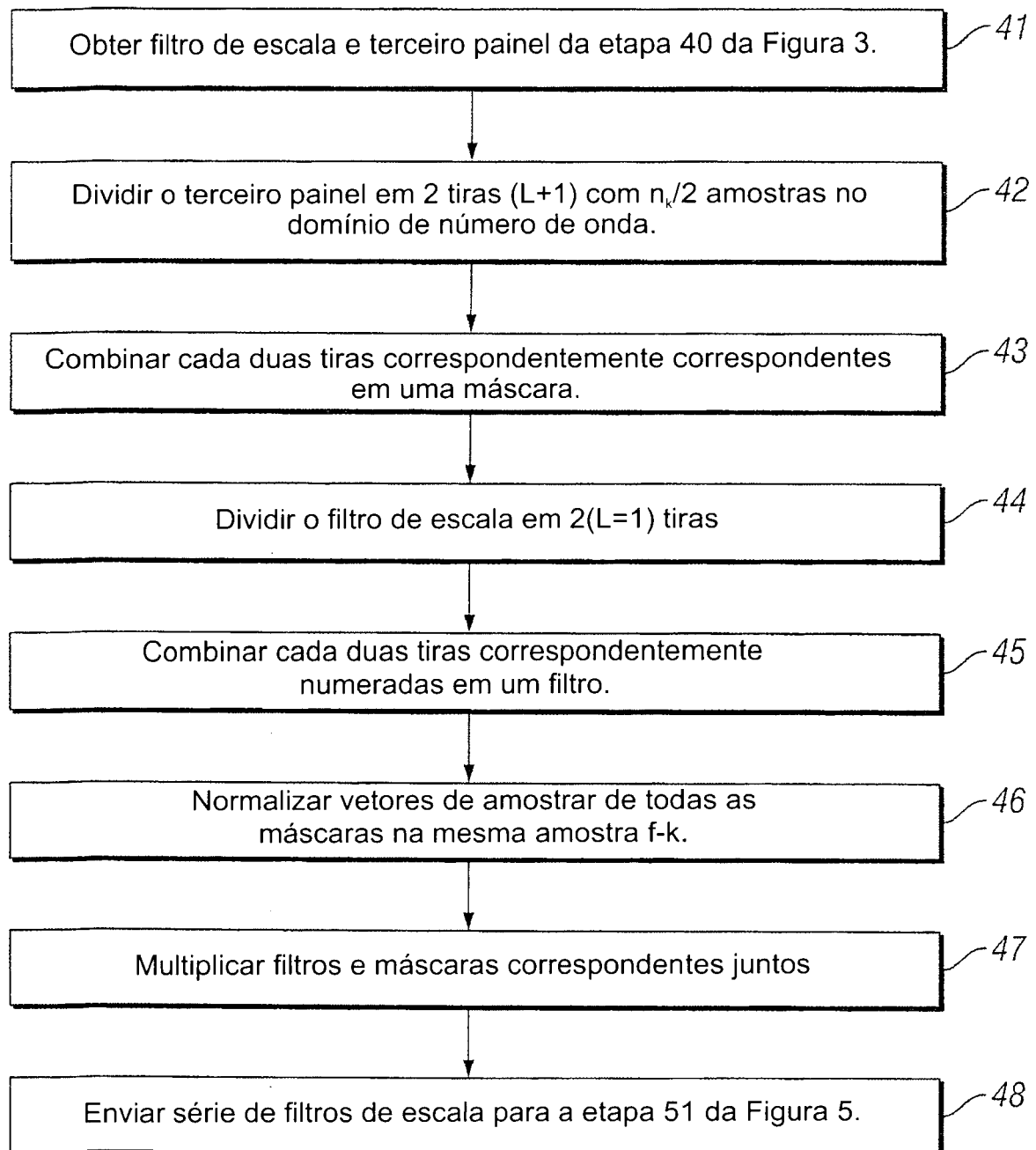


FIG. 3

**FIG. 4**

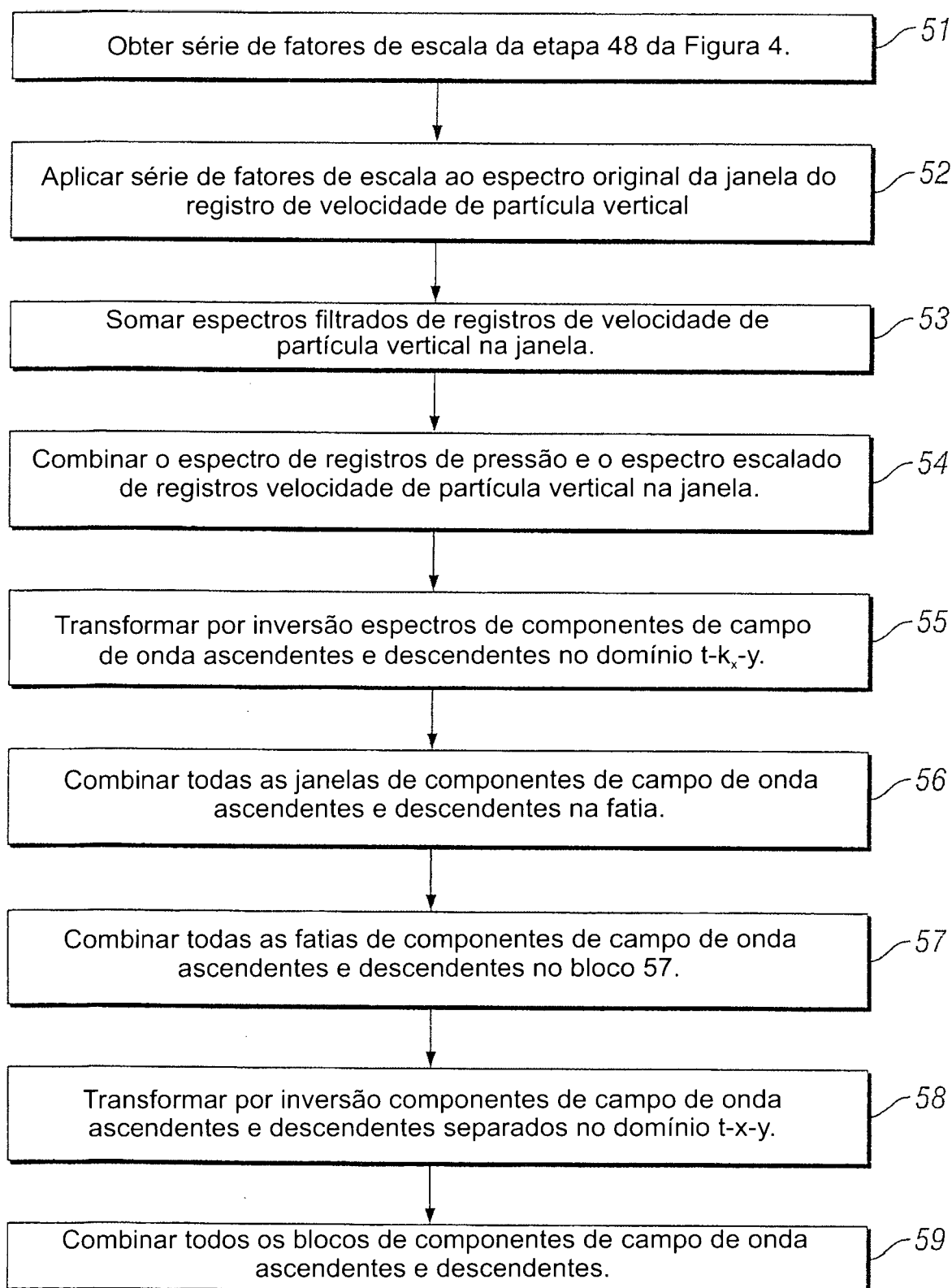


FIG. 5

6/8

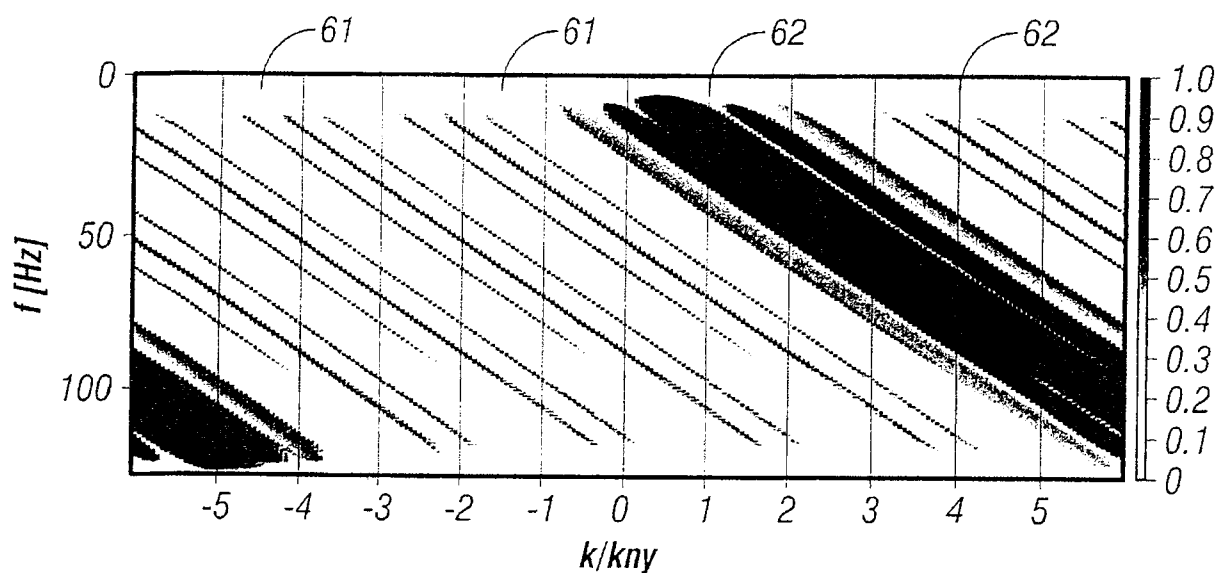


FIG. 6

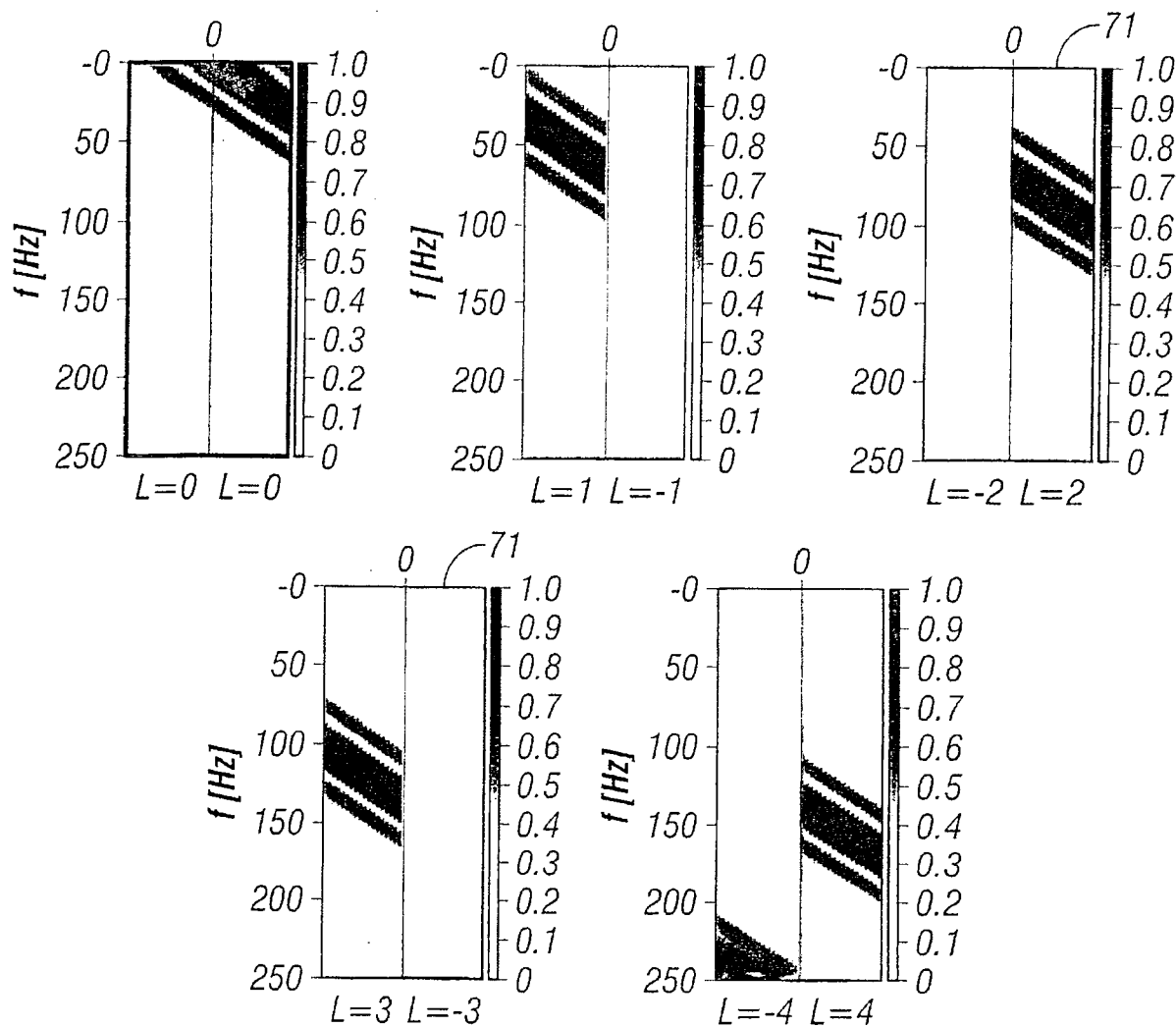


FIG. 7

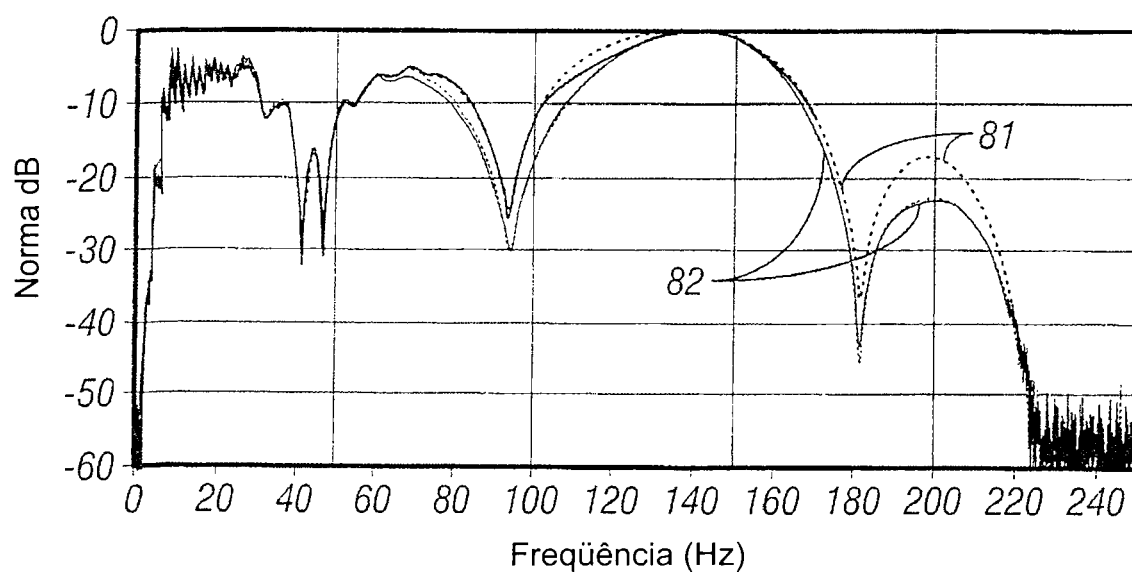


FIG. 8

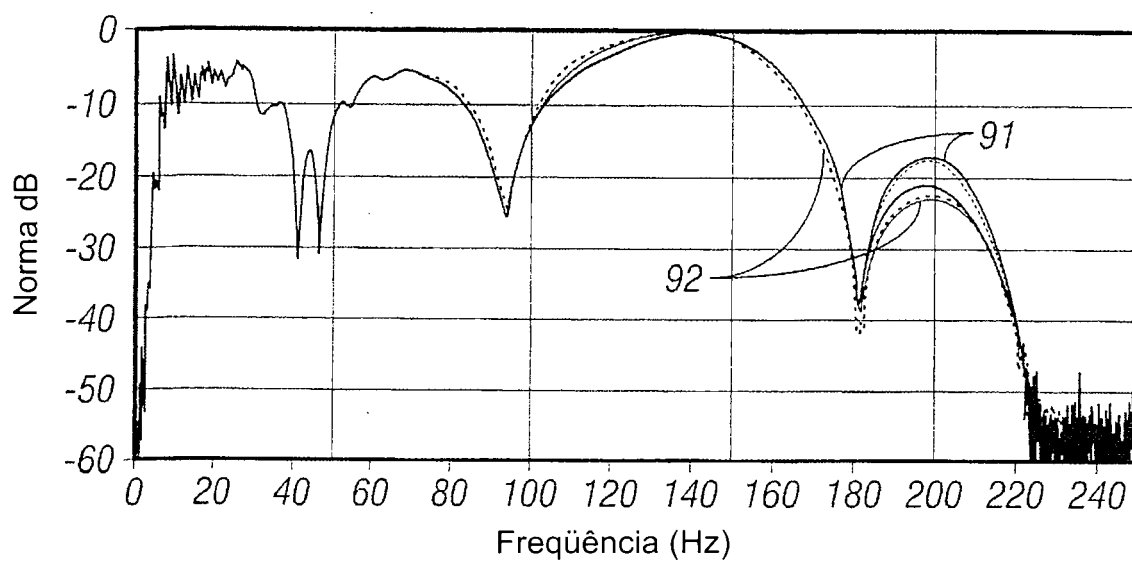


FIG. 9

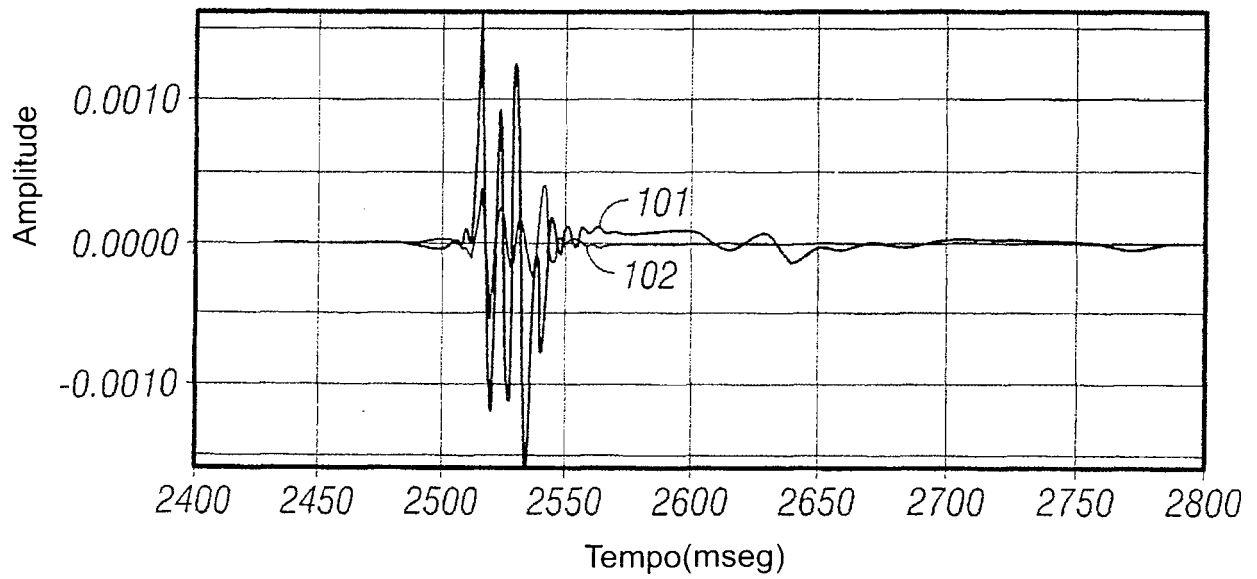


FIG. 10

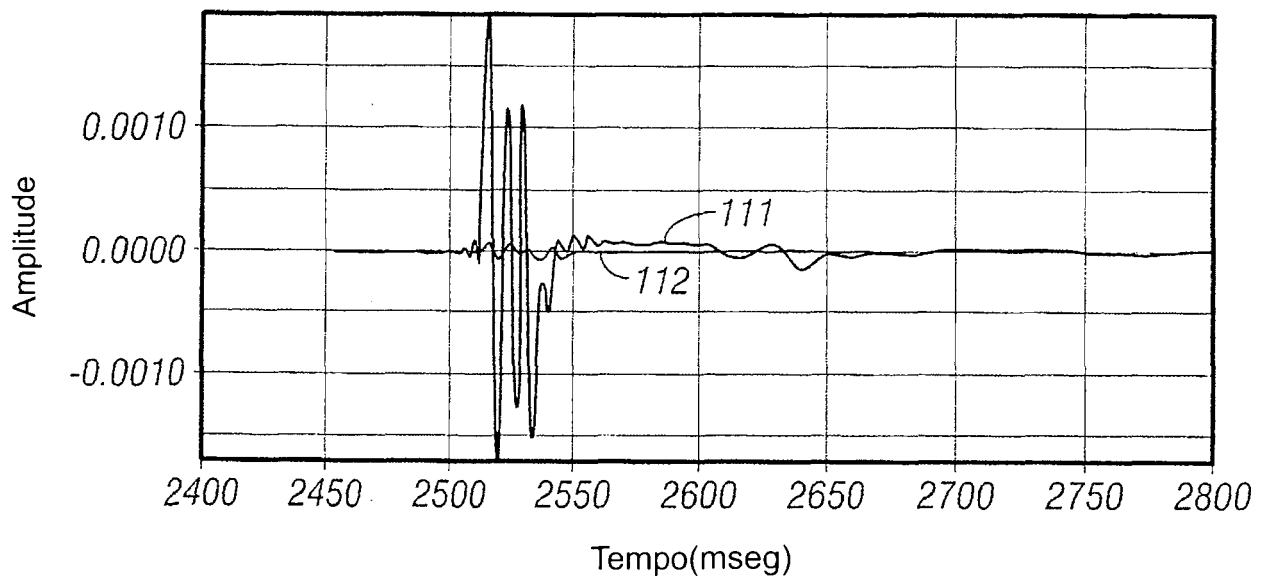


FIG. 11