



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

(21) **PI 1002737-8 A2**



(22) Data de Depósito: 12/08/2010
(43) Data da Publicação: 29/05/2012
(RPI 2160)

(51) *Int.Cl.:*
G01V 1/00

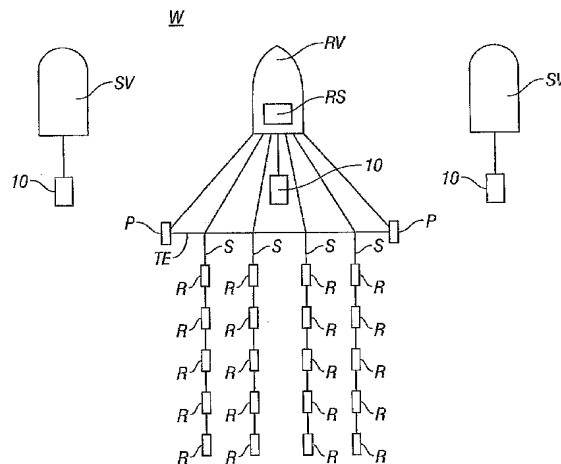
(54) Título: MÉTODO PARA GERAR SINAIS ACIONADORES DE ESPALHAMENTO ESPECTRAL PARA UM ARRANJO DE VIBRADORES SÍSMICOS UTILIZANDO MÚLTIPLAS OPERAÇÕES DE MODULAÇÃO BIFÁSICA EM CADA CHIP DE SINAL ACIONADOR

(30) Prioridade Unionista: 12/08/2009 US 12/462,954

(73) Titular(es): PGS Geophysical AS

(72) Inventor(es): Stig Rune Lennart Tenghamn

(57) Resumo: MÉTODO PARA GERAR SINAIS ACIONADORES DE ESPALHAMENTO ESPECTRAL PARA UM ARRANJO DE VIBRADORES SÍSMICOS UTILIZANDO MÚLTIPLAS OPERAÇÕES DE MODULAÇÃO BIFÁSICA EM CADA CHIP DE SINAL ACIONADOR. A presente invenção refere-se a um método para gerar energia sísmica para levantamento de subsuperfície que inclui operar um primeiro vibrador sísmico acima de uma área da subsuperfície a ser inspecionada e operar pelo menos um segundo vibrador sísmico acima da área substancialmente simultaneamente com a operação do primeiro vibrador sísmico. Cada um dentre o primeiro e o segundo vibrador sísmico possui uma resposta de frequência selecionada diferente. Cada um dentre o primeiro e o segundo vibrador sísmico é operado por um mesmo sinal de espalhamento espectral de sequência direta, onde um número diferente de operações de modulação para cada valor lógico no sinal de espalhamento espectral de sequência direta é selecionado para cada vibrador.



Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"MÉTODO PARA GERAR SINAIS ACIONADORES DE ESPALHAMENTO ESPECTRAL PARA UM ARRANJO DE VIBRADORES SÍSMICOS UTILIZANDO MÚLTIPLAS OPERAÇÕES DE MODULAÇÃO BIFÁSICA EM CADA CHIP DE SINAL ACIONADOR"**.

Antecedentes da Invenção

Campo da Invenção

Esta invenção refere-se em geral à exploração geofísica e em particular, a uma fonte sísmica vibratória útil na exploração geofísica. Mais particularmente, a invenção se relaciona com métodos para utilizar vibradores para aquisição de dados sísmicos.

Antecedentes da Técnica

As fontes de energia sísmica, incluindo vibradores, são utilizadas na exploração geofísica na terra e em áreas cobertas com água da terra. A energia acústica gerada por tais fontes percorre para baixo da terra é refletida a partir de interfaces de reflexão na subsuperfície e é detectada por receptores sísmicos, tipicamente hidrofones ou geofones, próxima ou na superfície da terra ou da água.

Geralmente, o vibrador sísmico inclui uma chapa de base acoplada com a superfície da água ou da terra, uma massa reativa, e dispositivos hidráulicos ou outros dispositivos para causar vibração da massa reativa e da chapa de base. As vibrações tipicamente são conduzidas através de várias frequências em um padrão conhecido como "varredura" ou "chilro". Os sinais detectados pelos receptores sísmicos passam pela correlação cruzada com um sinal detectado por um sensor disposto próximo da chapa de base. O resultado da correlação cruzada é um sinal sísmico que se aproxima do que seria detectado pelos receptores sísmicos se uma fonte de energia sísmica do tipo impulsiva tivesse sido utilizada. Uma vantagem proporcionada pela utilização de vibradores para transmitir energia sísmica para dentro da subsuperfície é que a energia é distribuída através do tempo, de modo que os efeitos sobre o ambiente são reduzidos se comparados com os efeitos ambientais causados pelo uso de fontes impulsivas tal como dinamite ou

canhões de ar.

Não somente os possíveis benefícios ambientais da utilização de vibradores que tornam desejável utilizar vibradores sísmicos nos levantamentos sísmicos. Por se possuir uma fonte de energia sísmica que pode
5 gerar tipos arbitrários de sinais sísmicos, pode existir um benefício substancial em utilizar sinais de energia sísmica mais "inteligentes" do que as varreduras ou chips convencionais. Tais fontes de energia sísmica estariam aptas a gerar sinais possuindo mais dentre as características do ruído de fundo, e assim, serem mais imunes à interferência a partir do ruído, e ao mesmo
10 tempo reduziriam seu impacto ambiental.

Um limite prático para utilizar vibradores para tais esquemas sofisticados de sinal para operar vibradores marinhos em particular é a estrutura de vibradores marinhos conhecidos na técnica. De modo a gerar sinais arbitrariamente na faixa de frequências sísmicas é necessário ter uma fonte
15 que possua uma alta eficiência em tornar a fonte controlável dentro de toda a faixa de frequências sísmicas de interesse. Combinar vários vibradores que são individualmente controláveis, com técnicas mais sofisticadas de geração de sinal tornaria possível gerar sinais sísmicos a partir de várias fontes individuais de energia sísmica ao mesmo tempo, as quais possuem uma correlação cruzada muito baixa, desse modo tornando possível aumentar a eficiência da aquisição de dados sísmicos. Vibradores marinhos hidráulicos conhecidos na técnica tipicamente possuem uma frequência de ressonância que é mais elevada do que o limite superior das frequências sísmicas habituais de interesse. Isto significa que a eficiência da energia do vibrador será
20 relativamente baixa, principalmente em baixas frequências, mas geralmente por toda a faixa de frequências sísmicas. Os vibradores marinhos hidráulicos podem ser difíceis de controlar com respeito ao tipo de sinal e ao conteúdo de frequência. Vibradores sísmicos marinhos convencionais também estão sujeitos à forte distorção harmônica, a qual adicionalmente limita o uso de
25 sinais controladores mais complexos. Tais características do vibrador podem ser entendidas pelo exame da impedância em relação a um vibrador de baixa frequência.

A impedância total que será experimentada por um vibrador pode ser expressa como a seguir:

$$Z_r = R_r + jX_r \quad (\text{Eq. 1})$$

em que Z_r é a impedância total, R_r é a impedância da radiação, e X_r é a impedância reativa.

Em uma análise da transferência de energia de um vibrador marinho, o sistema incluindo o vibrador e a água pode ser aproximado como um pistão com defletor. A impedância da radiação R_r de um pistão com defletor pode ser expressa como:

$$R_r = \pi a^2 \rho_0 c R_1(x) \quad (\text{Eq. 2})$$

e a impedância reativa pode ser expressa como:

$$X_r = \pi a^2 \rho_0 c X_1(x) \quad (\text{Eq. 3})$$

em que:

$$x = 2ka = \frac{4\pi a}{\lambda} = \frac{2\omega a}{c} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$R_1(x) = 1 - \frac{2}{x} J_1(x) \quad (\text{Eq. 5})$$

$$X_1(x) = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin(x \cos \alpha) \sin^2 \alpha d\alpha \quad (\text{Eq. 6})$$

no que ρ_0 é a densidade da água, ω é a frequência angular, k é o número da onda, a é o raio do pistão, c é a velocidade acústica λ é o comprimento de onda e J_1 é uma função de Bessel de primeira ordem.

Aplicar a expansão da série de Taylor para as equações acima proporciona as expressões:

$$R_1(x) = \frac{x^2}{2^2 1! 2!} - \frac{x^4}{2^4 2! 3!} + \dots \quad (\text{Eq. 7})$$

$$X_1(x) = \frac{4}{\pi} \left[\frac{x}{3} - \frac{x^3}{3^2 \cdot 5} + \frac{x^5}{3^2 \cdot 5^2 \cdot 7} - \dots \right] \quad (\text{Eq. 8})$$

Para baixas frequências, quando $x=2ka$ é muito menor do que 1, a parte real e imaginária da expressão de impedância total pode ser aproximada do primeiro termo da expansão da série de Taylor. As expressões para baixas frequências, quando o comprimento de onda é muito maior do que

o raio do pistão se torna:

$$R_1(x) \rightarrow \frac{1}{2}(ka)^2 \quad (\text{Eq. 9})$$

$$X_1(x) \rightarrow \frac{8ka}{3\pi} \quad (\text{Eq. 10})$$

Segue que para baixas frequências, a impedância da radiação R
 5 será menor se comparada com a impedância reativa X, o que sugere geração de sinal com baixa eficiência. Por consequência, existe necessidade de vibrações marinhas eficientes que gerem sinais complexos e existe uma necessidade de melhorar a eficiência de tempo da aquisição de dados sísmicos de operação para proporcionar operação mais econômica e minimizar o
 10 impacto ambiental do levantamento sísmico marinho.

Também existe uma necessidade de sinais acionadores do vibrador sísmico que possam melhorar a eficiência com a qual sinais equivalentes a estes gerados por uma fonte sísmica impulsiva podem ser recuperados a partir de vários vibradores sísmicos operados substancialmente simultaneamente.
 15

Sumário da Invenção

Um método para gerar energia sísmica para levantamento de subsuperfície inclui operar um primeiro vibrador sísmico acima de uma área da subsuperfície a ser levantada e operar pelo menos um segundo vibrador
 20 sísmico acima da área substancialmente simultaneamente com a operação do primeiro vibrador sísmico. Cada um dentre o primeiro e o segundo vibradores sísmicos possui uma resposta de frequência selecionada diferente. Cada um dentre o primeiro e o segundo vibradores é operado por um mesmo sinal de espalhamento espectral de sequência direta, onde um número
 25 diferente de operações de modulação para cada valor lógico no sinal de espalhamento espectral de sequência direta é selecionado para cada vibrador.

Um método para levantamento sísmico de subsuperfície de acordo com outro aspecto da invenção inclui operar vários vibradores sísmicos, cada um possuindo uma resposta de frequência selecionada diferente
 30 acima de uma área da subsuperfície a ser levantada. Os sinais sísmicos se originando a partir dos vários vibradores são detectados em cada um dentre

os vários receptores sísmicos dispostos em localizações separadas acima da área. Cada vibrador é operado por um mesmo sinal acionador de espalhamento espectral de sequência direta. Um número diferente de operações de modulação é selecionado para cada valor lógico no sinal acionador utilizado para cada vibrador. A energia sísmica originando a partir de cada um dos vários vibradores é determinada a partir dos sinais sísmicos detectados.

Outros aspectos e vantagens da invenção serão aparentes a partir da descrição e das reivindicações a seguir.

10 Breve Descrição dos Desenhos

A figura 1 apresenta um levantamento sísmico marinho ilustrativo sendo conduzido utilizando várias fontes de energia sísmica.

A figura 1A apresenta uma implementação ilustrativa de um gerador de sinal de vibrador sísmico.

15 A figura 1B apresenta um dispositivo ilustrativo de detecção de sinal acoplado com um receptor sísmico.

A figura 2 apresenta uma estrutura ilustrativa para um vibrador sísmico hidráulico convencional.

20 A figura 3 apresenta uma estrutura ilustrativa para um vibrador sísmico elétrico.

A figura 4 apresenta outro vibrador ilustrativo em seção transversal.

A figura 5 apresenta outro vibrador ilustrativo em seção transversal.

25 A figura 6 apresenta um espectro de amplitude simulado com duas ressonâncias.

A figura 7 é uma função de autocorrelação ilustrativa para um tipo de sinal de espalhamento espectral de sequência direta.

30 A figura 8 é um exemplo de um código de espalhamento espectral de sequência direta (DSSS).

A figura 9 é um gráfico de conteúdo de frequência de uma fonte sísmica acionada utilizando um sinal codificado de acordo com a figura 8.

A figura 10 é um código de espalhamento espectral ilustrativo utilizando a modulação bifásica.

A figura 11 é um gráfico do conteúdo de frequência de uma fonte sísmica acionada utilizando um sinal codificado de acordo com a figura 10.

5 As figuras 12A e 12B apresentam, respectivamente, um sinal DSSS e a resposta de um vibrador de baixa frequência para o sinal acionador DSSS.

10 As figuras 13A e 13B apresentam, respectivamente, um sinal DSSS e a resposta para um vibrador de frequência mais elevada do que apresentado na figura 12B para o sinal acionador DSSS.

 As figuras 14A e 14B apresentam, respectivamente, sinais DSSS combinados e a saída dos dois vibradores como apresentados nas figuras 12A, 12B, 13A e 13B.

15 A figura 15 apresenta uma autocorrelação da soma dos sinais nas figuras 13A e 14A.

 A figura 16 apresenta um espectro de frequência ilustrativo de três fontes vibradoras, cada uma operando em uma profundidade diferente na água.

20 A figura 17 apresenta uma função de autocorrelação de um exemplo de um sinal acionador DSSS de 255 chips utilizando uma operação de modulação bifásica por chip.

 A figura 18 apresenta o conteúdo de frequência de um vibrador operador utilizando o sinal acionador DSSS de 255 chips descrito com referência à figura 17.

25 A figura 19 apresenta uma função de autocorrelação do mesmo exemplo do sinal acionador DSSS com 255 chips da figura 17, quando duas operações de modulação bifásica por chip são utilizadas.

 A figura 20 apresenta o conteúdo de frequência de um vibrador operado utilizando o sinal acionador descrito com referência à figura 19.

30 A figura 21 apresenta uma correlação cruzada entre o sinal acionador descrito com referência à figura 17 e o sinal acionador descrito com referência à figura 19.

Descrição Detalhada

A invenção está relacionada com método para utilizar vários vibradores sísmicos. Cada um dos vibradores sísmicos utilizados com os métodos de acordo com a invenção de preferência possui pelo menos duas frequências ressonantes dentro de uma faixa selecionada de frequências sísmicas, e cada um dos vibradores no arranjo de preferência possui uma faixa de frequências diferente dos outros vibradores.

A descrição que segue inclui primeiro uma descrição de um tipo particular de vibrador sísmico que pode ser utilizado de forma vantajosa com os métodos de acordo com a invenção no levantamento sísmico marinho. Tal descrição será seguida pela explicação dos tipos particulares de sinais acionadores que podem ser utilizados para aumentar a faixa de frequências e para permitir a utilização de um mesmo sinal acionador base para detectar o equivalente da energia sísmica impulsiva a partir de sinais detectados pelos sensores sísmicos. A presente invenção é descrita com referência aos vibradores sísmicos marinhos, entretanto, deve ser entendido que os princípios da presente invenção são igualmente aplicáveis para vibradores sísmicos operados na superfície terrestre, e como resultado, a invenção não está limitada em escopo ao uso com vibradores marinhos.

Um exemplo de um levantamento sísmico marinho utilizando várias fontes de energia sísmica de vibrador marinho é apresentado esquematicamente na figura 1. Uma embarcação de gravação de levantamento sísmico RV é apresentada se movendo ao longo da superfície do corpo da água W tal como um lago ou oceano. A embarcação de gravação de levantamento sísmico RV tipicamente inclui equipamento, apresentado como RS e referido por conveniência como um "sistema de gravação" que em momentos selecionados, atua um ou mais vibradores sísmicos 10, determina a posição geodésica dos vários componentes do sistema de aquisição sísmica, e grava sinais detectados por cada um dos vários receptores sísmicos R.

Os receptores sísmicos R tipicamente são empregados em localizações separadas ao longo de um ou mais cabos sismográficos S rebocados em um padrão selecionado na água W pela embarcação de gravação

RV (e/ou por outra embarcação). O padrão é mantido por certo equipamento de reboque TE incluindo dispositivos chamados "paravanas" que proporcionam força lateral para espalhar os componentes do equipamento de reboque TE em posições laterais selecionadas com respeito à embarcação de gravação RV. A configuração do equipamento de reboque TE, das paravanas P e dos cabos sismográficos S é proporcionada para ilustrar o princípio da aquisição de sinais sísmicos de acordo com alguns aspectos da invenção é não é de qualquer modo pretendida para limitar os tipos de dispositivos de gravação que podem ser utilizados, sua maneira de emprego na água ou o número e o tipo de tais componentes.

A embarcação de gravação RV pode rebocar o vibrador sísmico 10. No exemplo da figura 1, vibradores sísmicos adicionais 10 podem ser rebocados em posições relativas selecionadas com respeito à embarcação de gravação RV pelas embarcações fonte SV. O propósito de proporcionar vibradores adicionais 10 rebocados pelas embarcações fonte SV é aumentar a cobertura da subsuperfície proporcionada pelos sinais detectados pelos receptores sísmicos R. O número de tais vibradores adicionais 10 e de suas posições relativas, como apresentado na figura 1 não são pretendidos para limitar o escopo da invenção. adicionalmente, qualquer um ou todos os vibradores 10 podem ser vários vibradores sísmicos localizados próximos, cada um possuindo uma diferente faixa de respostas de frequência.

Em alguns exemplos, como será adicionalmente explicado com referência à figura 16, vários vibradores, cada um possuindo uma faixa de respostas de frequência diferente, podem ser operados com cada um dentre tais vibradores em uma profundidade correspondendo à faixa de frequências do vibrador.

A figura 2 apresenta um exemplo de um vibrador marítimo hidráulico convencional. A alimentação do óleo hidráulico é apresentada por 35 e o retorno do óleo é apresentado por 36. Um pistão (chapa base) 31 gera uma onda de pressão acústica e é disposto dentro de uma carcaça de embreagem (massa reativa) 38. O ar 32 é disposto entre o pistão 31 e a carcaça de embreagem 38. O movimento do pistão 31 é regulado com uma

servoválvula 34. Um acelerômetro 33 é utilizado para proporcionar um sinal de realimentação ou piloto. Montagens de isolamento 37 são montadas na carcaça de embreagem 38 para reduzir as vibrações no sistema de manipulação (não apresentado) utilizado para empregar o vibrador. Devido ao projeto rígido do vibrador, a primeira frequência de ressonância de tal vibrador tipicamente é acima do limite superior da banda de frequência sísmica, e tal vibrador irá possuir eficiência baixa nas frequências sísmicas típicas.

A figura 3 apresenta um exemplo de um tipo diferente de vibrador marítimo que pode ser utilizado de acordo com a invenção. O vibrador marítimo 10 compreende uma fonte do vibrador 20 montada dentro de uma armação 16. Um suporte angular 14 é conectado com a parte de cima da armação 16 e inclui as aberturas 24 que podem ser utilizadas para o emprego do vibrador 10 dentro da água.

A figura 4 apresenta um exemplo de um vibrador em seção transversal parcial, o qual inclui um controlador 8, o qual pode ser um controlador magnetoestritivo e o qual pode, em alguns exemplos, ser formado de uma liga fabricada de térbio, disprósio e ferro. Tal liga pode ter a fórmula $Tb_{(0,3)} Dy_{(0,7)} Fe_{(1,9)}$, tal fórmula sendo conhecida comercialmente como Terfenol-D. Apesar do vibrador ilustrativo particular descrito neste documento apresentar somente um único controlador, uma implementação na qual vários controladores são utilizados está dentro do escopo da invenção. O presente exemplo adicionalmente inclui uma mola de saída do controlador 3 conectada com cada extremidade 13 do controlador 8. Em uma implementação particular, a mola do controlador 3 pode possuir um formato elíptico. No presente exemplo, no qual o controlador 8 compreende Terfenol-D, o controlador 8 adicionalmente compreende o conjunto de circuitos magnético (não especificamente apresentado) que irá gerar um campo magnético quando corrente elétrica é aplicada para o mesmo. O campo magnético irá causar que o material de Terfenol-D se alongue. Por variar a magnitude da corrente elétrica, e por consequência, a magnitude do campo magnético, o comprimento do controlador 8 é variado. Tipicamente, ímãs permanentes são utilizados para aplicar um campo magnético polarizado para o material de Ter-

fenol-D, e a avaliação no campo magnético é gerada pela aplicação de uma corrente elétrica variada para as bobinas elétricas (não apresentadas) que são formadas ao redor do material de Terfenol-D. As variações no comprimento do controlador 8 causam uma alteração correspondente nas dimensões da mola externa do controlador 3.

A figura 4 apresenta componentes adicionais do vibrador, incluindo uma mola interna 4, com massas 7 conectadas com a mesma. Como adicionalmente discutido abaixo, a mola interna do controlador 4 com as massas 7 conectadas com a mesma pode estar incluída para proporcionar uma segunda frequência de ressonância do sistema dentro da faixa de interesse de frequências sísmicas. Apesar de que um sistema vibrador que inclui somente a mola externa 3 tipicamente poderia exibir uma segunda frequência de ressonância, para sistemas possuindo um tamanho adequado para o uso em exploração geofísica marítima, a segunda frequência de ressonância em tal caso seria muito maior do que as frequências dentro da faixa de interesse de frequências sísmicas (tipicamente, de 0 até 300 Hz).

Os suportes de montagem 28, apresentados na figura 4, são conectados de forma fixa nas extremidades superior e inferior dos mesmos com as chapas de extremidade superior e inferior 18 (apresentadas na figura 3). O controlador 8 é conectado de forma fixa em uma localização longitudinalmente central do mesmo com os suportes de montagem 28, para manter um ponto de referência estável para o controlador 8. O movimento das extremidades 13 da haste do controlador é irrestrito com respeito aos suportes de montagem 28.

O exemplo apresentado na figura 4 adicionalmente inclui um casco externo 2, junto ao qual a mola externa 3 é conectada através de elementos de transmissão 5. A forma do casco 2 geralmente é referida como flextensional. Em uma implementação particular, o casco externo 2 compreende duas partes laterais que podem ser substancialmente imagens de espelho uma da outra, e incluem duas vigas de extremidade 1, com as partes laterais do casco 2 sendo conectadas de forma articulada com as vigas de extremidade 1 pelas dobradiças 6. A figura 4 apresenta uma das partes late-

rais do casco externo 2, denotada como a parte lateral do casco 2a. Quando totalmente montada, a segunda parte lateral do casco (não apresentada na figura 3), compreendendo substancialmente uma imagem de espelho da parte lateral do casco 2a, será articuladamente conectada pelas dobradiças 6 com as vigas de extremidade 1, para completar um casco flexensional envolvendo o controlador montado 8, a mola externa 3 e a mola interna 4.

A figura 5 apresenta uma seção transversal da montagem na figura 4 montada no vibrador marítimo 10.

Com referência à figura 3, o vibrador marítimo 10 adicionalmente compreende as chapas de extremidade de cima e debaixo 18. O casco externo montado 2, compreendendo as duas partes laterais do casco e as duas vigas de extremidade 1 é conectado de forma vedada com as chapas de extremidade de cima e debaixo 18. Apesar do casco externo 2 ser engatado de forma vedada com as chapas de extremidade de cima e debaixo 18, quando o vibrador marítimo 10 está em operação, o casco externo 2 irá permitir o movimento com respeito às chapas de extremidade 18, de modo que a conexão entre as chapas de extremidade 18 e o casco externo 2 será uma conexão flexível, que pode ser proporcionada, por exemplo, por uma membrana flexível 22 (não apresentada em detalhes).

A figura 6 apresenta os resultados a partir de uma simulação de elemento finito de um exemplo do vibrador. Uma primeira frequência de ressonância 11 resulta substancialmente a partir da interação da mola externa 3 com o controlador. Uma segunda frequência de ressonância 12 resulta substancialmente da interação da mola interna do controlador 4 com as suas massas adicionadas 7 com o controlador 8.

A mola externa do controlador 3 e a mola interna do controlador 4 apresentadas nas figuras poderiam ser tipos diferentes de molas destas apresentadas. Por exemplo, as molas podem ser molas espirais ou outros tipos de molas que executem substancialmente de forma similar. Essencialmente, as molas 3 e 4 são dispositivos de tendência que proporcionam uma força relacionada com uma quantidade de deslocamento do dispositivo de tendência. De forma similar, a mola externa 3 e a mola interna do controla-

dor 4 podem utilizar um diafragma, um pistão em um cilindro lacrado ou um cilindro hidráulico para obter substancialmente o mesmo resultado.

Por introduzir uma ressonância na extremidade inferior do espectro de frequência sísmico, a energia acústica de baixa frequência pode ser gerada de forma mais eficiente. Na ressonância, a parte imaginária (reativa) da impedância é substancialmente cancelada, e a fonte acústica está apta a transmitir de forma eficiente energia acústica para dentro da água. Ao construir qualquer implementação específica do vibrador marítimo, a análise de elemento finito pode ser utilizada, como é conhecida pelos versados na técnica, para determinar a primeira e a segunda frequências de ressonância. Em qualquer análise, os princípios seguintes de operação são relevantes. Se o casco externo for aproximadamente como um pistão, então, para baixas frequências, a carga de massa, ou a massa de fluido equivalente atuando sobre o casco pode ser expressa como:

$$M = \rho_0 \frac{8a^3}{3} \quad (\text{Eq. 11})$$

em que, M é a carga da massa, ρ_0 é a densidade da água, e a é o raio equivalente para um pistão que corresponde ao tamanho do casco externo.

O casco externo 2 possui um fator de transformação T_{shell} entre o eixo geométrico longo e curto de sua elipse, de modo que a deflexão das duas partes laterais do casco (parte lateral 2a na figura 4 e sua imagem de espelho no outro lado do casco externo 2) irão possuir uma amplitude mais elevada do que a deflexão das vigas de extremidade 1 (as quais interconectam as duas partes laterais do casco 2) causada pelo movimento do elemento de transmissão 5. Adicionalmente, a mola externa 3 cria uma carga de massa maior sobre o controlador 8 desde que a mola externa 3 também possui um fator de transformação entre o eixo geométrico longo e o eixo geométrico curto de sua elipse, com o eixo geométrico longo sendo substancialmente o comprimento do controlador 8 e o eixo geométrico curto sendo a largura da mola formatada de forma elíptica. Referindo-se a este fator de transformação como T_{spring} , a carga de massa sobre o controlador 8 será expressa como:

$$M_{driver} = (T_{shell})^2 \cdot (T_{spring})^2 \cdot \rho_0 \frac{8a^3}{3} \quad (\text{Eq. 12})$$

A primeira ressonância, $f_{ressonance}$ para o vibrador será substancialmente determinada pela seguinte relação de massa-mola.

$$f_{ressonance} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M_{driver}}} \quad (\text{Eq. 13})$$

5 em que K = constante da mola, e M_{outer} = carga de massa sobre o controlador 8.

K representa a constante de mola para a mola externa 3 combinada com o controlador 8, onde a mola externa 3 é conectada com o casco externo 2, através dos elementos de transmissão 5, da viga de extremidade 1 e das dobradiças 6.

Para proporcionar transmissão eficiente de energia com a faixa de interesse de frequências sísmicas, é importante ter o vibrador configurado para possuir uma segunda frequência de ressonância dentro da faixa de interesse de frequências sísmicas. Na ausência da mola interna, a segunda frequência de ressonância ocorreria quando a mola externa do controlador 3, atuando junto com o controlador 8, tiver o seu segundo modo próprio. Esta frequência de ressonância, entretanto, normalmente é muito maior do que a primeira frequência de ressonância, e por consequência, estaria fora da faixa de interesse de frequências sísmicas. Como é evidente a partir da equação anterior, a frequência ressonante será reduzida se a carga de massa na mola externa 3 for aumentada. Esta carga de massa poderia ser aumentada pela adição de massa para o controlador 8, entretanto, de modo a adicionar massa suficiente para obter uma segunda frequência de ressonância dentro da faixa de interesse de frequências sísmicas, a quantidade de massa que precisaria ser adicionada para o controlador tornaria tal sistema impraticável para o uso em operações sísmicas marítimas. Em um vibrador de exemplo prático, uma segunda mola, a mola interna do controlador 4, é incluída dentro da mola externa do controlador 3, com as massas adicionadas 7 no lado da mola interna 3. O efeito de tal massa adicionada é equivalente a adicionar a massa na extremidade do controlador 8.

$$M_{inner} = (T_{inner})^2 \cdot M_{added} \quad (\text{Eq. 14})$$

A mola extra, isto é, a mola interna do controlador 4, irá possuir um fator de transformação T_{inner} , e irá adicionar para a carga da massa do controlador 8. O uso da mola interna 4, com a massa adicionada, permite
 5 que a segunda ressonância do sistema seja sintonizada de modo que a segunda ressonância fique dentro da faixa de interesse de frequências sísmicas, desse modo melhorando a eficiência do vibrador na banda de frequência sísmica. A segunda ressonância pode ser determinada pela expressão:

$$f_{resonance2} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{inner} + K_{driver}}{(T_{inner})^2 \cdot M_{added}}} \quad (\text{Eq. 15})$$

10 na qual K_{inner} = constante da mola da mola interna e K_{driver} = constante da mola da montagem externa do controlador.

Uma vantagem possível de utilizar uma estrutura do controlador, como explicada neste documento, é que as várias frequências ressonantes podem proporcionar uma resposta de largura de banda mais ampla do que é
 15 possível utilizando as estruturas de vibrador de ressonância única. Uma vantagem particular de utilizar um vibrador possuindo um elemento de ativação eletricamente operado (controlador) é que a resposta do vibrador para um sinal de controle de entrada será mais linear. Isto pode ser possível pelo uso de tipos particulares de sinais do controlador a serem explicados abaixo.

20 Ao utilizar o sistema apresentado na figura 1, pode ser vantajoso utilizar mais do que um vibrador sísmico 10 substancialmente de forma simultânea ou mesmo ao mesmo tempo de modo a aumentar a eficiência com a qual os sinais sísmicos relacionados com as formações de subsuperfície (abaixo do leito de água), podem ser obtidos. Os sinais sísmicos detectados
 25 por cada um dos receptores R em tal circunstância irão resultar na energia sísmica sendo detectada a qual resulta a partir de cada um dos vibradores 10 realmente em operação na hora da gravação do sinal.

Em outros exemplos, operar os vibradores simultaneamente pode incluir acionar cada vibrador com um sinal de "espalhamento espectral de
 30 sequência direta". A geração do sinal de espalhamento espectral de sequência direta ("DSSS") utiliza um sinal codificado modulado com uma fre-

quência de "chip" selecionada para determinar o conteúdo de frequência (largura de banda) do sinal transmitido, um "chip" significa um bit com pulso formatado do sinal codificado da sequência direta. Os sinais de espalhamento espectral de sequência direta também podem ser configurados pela seleção apropriada da frequência de chip e da forma de onda de um sinal de banda base de modo que o sinal DSSS resultante possua características espectrais similares ao ruído de fundo.

Na presente invenção, o mesmo sinal DSSS pode ser utilizado para acionar cada um dos vários vibradores em vários vibradores. O sinal acionador utilizado para diretamente operar cada vibrador no arranjo pode ser modulado utilizando um número único de operações de modulação bifásica para cada chip na sequência codificada. O número de operações de modulação bifásica para cada chip pode ser selecionado para proporcionar o equivalente de uma taxa única de frequência de chip, e assim o conteúdo de frequência do sinal acionador, para o sinal acionador utilizado para operar cada vibrador dentre os vários vibradores. O dito anteriormente será adicionalmente explicado abaixo com referência às figuras 17 até 20.

Uma implementação ilustrativa de um gerador de sinal para criar tipos particulares de sinais de vibrador utilizados na invenção é apresentada esquematicamente na figura 1A. Um oscilador local 30 gera um sinal portador de banda base. Em um exemplo, o sinal portador de banda base pode ser um pulso com duração selecionada da corrente direta, ou da corrente direta contínua. Em outros exemplos, o sinal de banda base pode ser uma varredura ou chip, como utilizado no levantamento sísmico de fonte de vibrador, por exemplo, atravessando uma faixa de 10 até 150 Hz. Um gerador de número pseudo-aleatório ("PRN") ou gerador de código 32 gera uma sequência de números +1 e -1 de acordo com certos tipos de esquemas de codificação, como será explicado abaixo. A saída do gerador PRN 32 e a saída do oscilador local 30 são misturadas em um modulador 34. A saída do modulador 34 é conduzida para um amplificador de potência 36, cuja saída finalmente opera um dos vibradores sísmicos 10. Uma configuração similar pode ser utilizada para operar cada um dos vários vibradores, tal como a-

presentado na figura 1.

Os sinais gerados pelo dispositivo apresentado na figura 1A podem ser detectados utilizando um dispositivo, tal como apresentado na figura 1B. Cada um dos receptores sísmicos R pode ser acoplado com um pré-amplificador 38, diretamente ou através de um multiplexador adequado (não apresentado). A saída do pré-amplificador 38 pode ser digitalizada em um conversor de analógico para digital ("ADC") 40. O modulador 42 mistura a saída de sinal a partir do ADC 40 com o código idêntico produzido pelo gerador PRN 32. Como será explicado abaixo, o dispositivo de geração de sinal apresentado na figura 1A, e o seu dispositivo de detecção de sinal correspondente apresentado na figura 1B geram e detectam um DSSS.

Uma explicação teórica da geração e da detecção do sinal DSSS pode ser entendida como a seguir. O sinal DSSS, representado por u_i , pode ser gerado pela utilização de um "código de espalhamento" espectral, representado por c_i e gerado, por exemplo, pelo gerador PRN (32 na figura 1A), para modular uma portadora de banda base. Uma portadora de banda base pode ser gerada, por exemplo, pelo oscilador local (30 na figura 1A). A portadora de banda base possui uma forma de onda representada por $\Psi(t)$. O código de espalhamento possui elementos individuais c_{ij} (chamados "chips"), cada um dos quais possui o valor +1 ou -1 quando $0 \leq j < N$ e 0 para todos os outros valores de j . Se um gerador PRN adequadamente programado for utilizado, o código irá autorrepetir após um número selecionado de chips. N é o comprimento (o número de chips) do código antes da repetição acontecer. A portadora de banda base de preferência é centrada no tempo em $t = 0$ e sua amplitude é normalizada de modo que no tempo zero, a amplitude da portadora de banda base seja igual à unidade, ou ($\Psi(0) = 1$). O tempo de ocorrência de cada chip i dentro do código de espalhamento pode ser representado por T_c . O sinal utilizado para acionar cada vibrador pode assim ser definido pela expressão:

$$u_i(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} c_i^j \psi(t - jT_c) \quad (\text{Eq. 16})$$

A forma de onda $u_i(t)$ é determinística, de modo que a sua função de auto-

correlação é definida pela expressão:

$$R_u(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)u(t-\tau)dt \quad (\text{Eq. 17})$$

em que τ é o atraso de tempo entre os sinais correlacionados. A função de autocorrelação periódica separada para $a = a_j$ é definida por

$$R_{a,a}(l) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{N-1-l} a_j a_{j+l}, 0 \leq l \leq N-1 \\ \sum_{j=0}^{N-1+l} a_{j-l} a_j, 1-N \leq l < 0 \\ 0, |l| \geq N \end{cases} \quad (\text{Eq. 18})$$

Utilizando uma fórmula similar à Eq. 17, é possível determinar a correlação cruzada entre dois sinais diferentes pela expressão:

$$R_{u,u'}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)u'(t-\tau)dt \quad (\text{Eq. 19})$$

A função de autocorrelação periódica separada para $a = a_j$ e $b = b_j$, é definida pela expressão:

$$R_{a,b}(l) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{N-1-l} a_j b_{j+l}, 0 \leq l \leq N-1 \\ \sum_{j=0}^{N-1+l} a_{j-l} b_j, 1-N \leq l < 0 \\ 0, |l| \geq N \end{cases} \quad (\text{Eq. 20})$$

O sinal detectado pelos receptores (R na figura 1) irá incluir energia sísmica se originando a partir de um dos vibradores para o qual a informação sísmica é para ser obtida, bem como vários tipos de interferência, tal como ruído de fundo, representado por $n(t)$, e a partir da energia se originando a partir de outros vibradores transmitindo ao mesmo tempo, mas com códigos de espalhamento espectral de sequência direta diferentes (representados por $c_k(t)$ onde $k \neq i$). O sinal recebido em cada receptor, represen-

tado por $x_i(t)$, ou seja, o sinal detectado por cada um dos receptores (R na figura 1) em um sistema com M vibradores sísmicos operando ao mesmo tempo, pode ser descrito pela expressão:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^M u_j(t) + n(t) \quad (\text{Eq. 21})$$

5 A energia a partir de cada vibrador irá penetrar nas formações geológicas de subsuperfície abaixo do leito da água (ou abaixo da superfície da terra), e sinais refletidos a partir da subsuperfície serão detectados nos receptores após um tempo de percurso "bidirecional" dependendo das posições dos vibradores e dos receptores e da distribuição de velocidade sísmica na água e na subsuperfície abaixo do leito da água, ou da superfície terrestre. Se o sinal transmitido do vibrador para o código de espalhamento espectral de sequência direta i ocorrer no tempo $t = t_0$, então o sinal recebido resultante a partir do mesmo ocorre no tempo $t = \tau_k + l_k T_c + t_0$ após a transmissão, onde l_k = a qualquer número sendo um número inteiro e τ_k = ao desalinhamento entre o sinal recebido e o tempo de chip T_c . O sinal recebido pode ser misturado com o código de espalhamento idêntico utilizado para produzir cada sinal de saída do vibrador, $u_i(t_0)$, como apresentado na figura 1B. Tal mistura irá proporcionar um sinal que pode ser correlacionado com o sinal utilizado para acionar cada vibrador particular. A saída da mistura pode ser utilizada para determinar a resposta sísmica dos sinais se originando a partir de cada respectivo vibrador. O dito anteriormente pode ser expresso como a seguir para os sinais detectados:

$$\begin{aligned} y_i(\tau_i + l_i T_c + t_0) &= u_i(t_0) x_i(\tau_i + l_i T_c + t_0) = u_i(0) x_i(\tau_i + l_i T_c) \\ &= u_i(0) \left(\sum_{k=1}^K u_k(\tau_k + l_k T_c) + n(t) \right) \\ &= u_i(\tau + l_i T_c) u_i(0) \\ &\quad + \sum_{k=1, k \neq i}^M u_k(\tau_k + l_k T_c) u_i(0) + u_i(t) n(t) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 22})$$

Misturar (figura 1B) o sinal detectado com o código de espalhamento resulta em uma correlação. O resultado da correlação é:

$$\begin{aligned}
R_{yu_i}(\tau_i + l_i T_c) &= \sum_{j=0}^{N-1} \psi(0) \psi(\tau_i) c_i^j c_i^{j+l} \\
&+ \sum_{j=0}^{N-1} \left[\psi(0) \sum_{k=1, k \neq i}^M \psi(\tau_k) c_i^j c_k^{j+l_k} \right] + u_i(t) n(t)
\end{aligned} \tag{Eq. 23}$$

A simplificação das expressões acima proporcionam o seguinte resultado:

$$\begin{aligned}
R_{yu_i}(\tau_i + l_i T_c) &= d_i \psi(0) \psi(\tau_i) \sum_{j=0}^{N-l_i-1} c_i^j c_i^{j+l} \\
&+ \psi(0) \sum_{k=1, k \neq i}^M \left[\sum_{j=0}^{N-l_k-1} \psi(\tau_k) c_i^j c_k^{j+l_k} \right] + u_i(t) n(t) \\
&= \psi(0) \psi(\tau_i) R_{u_i u_i}(l_i) \\
&+ \psi(0) \sum_{k=1, k \neq i}^M \left[\psi(\tau_k) R_{u_i u_j}(l_k) \right] + u_i(t) n(t)
\end{aligned} \tag{Eq. 24}$$

5 Se $R(0) = N$ e $\Psi(0) = 1$, a expressão anterior é simplificada para:

$$\begin{aligned}
R_{yu_i}(0) &= \psi(0)^2 R_{u_i u_i}(0) + \psi(0) \sum_{k=1, k \neq i}^M \left[\psi(\tau_k) R_{u_i u_j}(l_k) \right] + u_i(t) n(t) \\
&= \underbrace{N}_{data} + \underbrace{\sum_{k=1, k \neq i}^M \left[\psi(\tau_k) R_{u_i u_j}(l_k) \right]}_{\text{correlação cruzada}} + \underbrace{u_i(t) n(t)}_{\text{ruído de fundo}}
\end{aligned} \tag{Eq. 25}$$

A equação (25) apresenta que é possível separar os sinais de sequência de espalhamento espectral direto correspondendo a cada código de espalhamento de um sinal possuindo componentes a partir de vários códigos de espalhamento. N na sequência representa a autocorrelação do sinal transmitido, e pela utilização de sinais de espalhamento espectral substancialmente ortogonais ou não correlacionados para acionar cada vibrador marítimo, a correlação cruzada entre os mesmos será muito pequena, comparada com N . Outra vantagem possível é que qualquer ruído que apareça durante uma parte do intervalo de tempo quando os sinais sísmicos são gravados, terá a média calculada para o comprimento do registro como um todo e desse modo atenuado, como pode ser deduzido a partir da Eq. 25.

Em uma implementação prática, uma resposta sísmica da sub-

superfície à energia sísmica transmitida a partir de cada um dos vibradores pode ser determinada pela correlação cruzada dos sinais sísmicos detectados com o sinal utilizado para acionar cada vibrador, onde a correlação cruzada inclui uma variedade de atrasos de tempo selecionados, tipicamente de 0 até um tempo de percurso de energia sísmica bidirecional máximo esperado para as formações de interesse na subsuperfície (normalmente cerca de 5 até 6 segundos). A saída da correlação cruzada pode ser armazenada e / ou apresentada em um formato de traço sísmico, com a amplitude da correlação cruzada em função do atraso de tempo.

A portadora de banda base possui duas propriedades que podem ser otimizadas. A portadora de banda base deve ser selecionada para proporcionar a saída do vibrador com conteúdo de frequência adequado e com uma autocorrelação que possua um pico de correlação bem definido. A equação (25) também apresenta que o comprimento da sequência direta de espalhamento espectral irá afetar a relação de sinal para ruído do sinal do vibrador. Os picos de correlação resultantes da correlação cruzada executada como explicado acima irão aumentar de forma linear com o comprimento (o número de chips) do código de espalhamento. N (sequências mais longas) maiores irão melhorar as propriedades de sinal para ruído do sinal do vibrador.

Utilizando de forma apropriada as sequências de código de espalhamento selecionadas é possível gerar sinais sísmicos que se aproximam do ruído de fundo em estatísticas espectrais. Algumas sequências úteis que podem ser utilizadas para vários vibradores sísmicos são discutidas abaixo.

Sequências de "comprimento máximo" são um tipo de código cíclico que são geradas utilizando um registrador de deslocamento linear que possui m estágios conectados em série, com a saída de certos estágios adicionadas modulo-2 e realimentados para a entrada do registrador de deslocamento. O nome sequência de "comprimento máximo" deriva do fato de que tal sequência é a sequência mais longa que pode ser gerada utilizando um registrador de deslocamento. Matematicamente, a sequência pode ser expressa pelo polinômio $h(x)$

$$h(x) = h_0x_m + h_1x_{m-1} + \dots + h_{n-1}x + h_n \quad (\text{Eq. 26})$$

Para $1 \leq j < m$, então, $h_j = 1$, se existir realimentação no j -ésimo estágio, e $h_j = 0$ se não existir realimentação no j -ésimo estágio. $h_0 = h_m = 1$. Qual estágio h_j deve ser estabelecido para um ou zero não é aleatório, mas
 5 deve ser selecionado de modo que $h(x)$ se torne um polinômio primitivo. "Primitivo" significa que o polinômio $h(x)$ não pode ser fatorado. O número de chips para uma sequência de comprimento máximo é dado pela expressão $N = 2m - 1$, onde m representa o número de estágios no registrador de deslocamento. A sequência de comprimento máximo possui mais um "1" do que
 10 "0". Para uma sequência de 511 chips, por exemplo, existem 256 uns e 255 zeros.

Outro tipo de sequência que pode ser utilizado é a sequência de Gold. A estrutura de sequências de Gold é descrita em, R. Gold, *Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing*, IEEE Trans. Information
 15 Theory, vol. IT-13, pp. 619-621 (1967). As sequências de Gold possuem boas características de correlação cruzada adequadas para o uso quando mais do que um vibrador é utilizado ao mesmo tempo. As sequências de Gold são geradas utilizando duas ou mais sequências de comprimento máximo. É possível gerar $N+2$ sequências de Gold a partir de sequências de comprimento máximo, onde N é o comprimento da sequência. As sequências de
 20 Gold possuem o período $N = 2^m - 1$ e existem para todos os números inteiros m que não são um múltiplo de 4. Uma desvantagem possível das sequências de Gold é que a autocorrelação não é tão boa quanto para as sequências de comprimento máximo.

25 Conjuntos de sequências de Kasami podem ser utilizados em alguns exemplos devido a eles possuírem correlação cruzada muito baixa. Existem dois diferentes conjuntos de sequências de Kasami. Um procedimento similar a este utilizado para gerar as sequências de Gold irá gerar o "conjunto pequeno" de sequências de Kasami com $M = 2^{n/2}$ sequências binárias de período $N = 2^n - 1$, onde n é um número inteiro par. Tal procedimento começa com uma sequência de comprimento máximo, designada a , e formando a sequência a' por dizimar a por $2^{n/2} + 1$. Pode ser apresentado
 30

que a sequência resultante a' é uma sequência máxima com período $2^{n/2} - 1$. Por exemplo, se $n = 10$, o período de a é $N = 1023$ e o período de a' é 31. Portanto, por observar 1023 bits da sequência a' , será observado 33 repetições da sequência de 31 bits. Então, por pegar $N = 2^n - 1$ bits de sequências a e a' , é possível formar um novo conjunto de sequências pela adição, módulo-2, dos bits a a partir de a e dos bits a' a partir de a' e todos os $2^{n/2} - 2$ deslocamentos cíclicos dos bits a a partir de a' . Por incluir a no conjunto, um resultado é um conjunto de $2^{n/2}$ sequências binárias com comprimento $N = 2^n - 1$. As funções de autocorrelação e de correlação cruzada dessas sequências assumem os valores a partir do conjunto $\{-1, -(2^{n/2} + 1), 2^{n/2} - 1\}$. O "conjunto maior" de sequências de Kasami novamente consiste de sequências de período $2^n - 1$, para n sendo um número inteiro par, e contém tanto as sequências de Gold como o conjunto pequeno de sequências de Kasami, como subconjuntos, veja, por exemplo, *Spreading Codes for Direct Sequence CDMA and Wideband CDMA Cellular Networks*, IEEE Communications Magazine, Sept. 1998.

Ao implementar códigos de espalhamento para gerar um sinal acionador para os vibradores, pode ser preferível utilizar a modulação bifásica para gerar os chips no código. Se referindo à figura 8, um código de espalhamento ilustrativo é apresentado, onde o código é representado por uma série de números +1 e -1. O espectro do sinal gerado pelo código de espalhamento acima é apresentado na figura 9. O que é aparente a partir da figura 9 é que existe uma substancial amplitude do sinal em DC (frequência zero). Tal espectro de sinal geralmente não é adequado para a geração de sinal sísmico. Se a modulação utilizada for a bifásica, entretanto, a amplitude do sinal na frequência zero é substancialmente zero. O mesmo código de espalhamento apresentado na figura 8 implementado utilizando a modulação bifásica é apresentado na figura 10. A modulação bifásica pode ser implementada por ter cada bit do sinal de entrada original (chips no código de espalhamento, cada um dos quais é o valor +1 ou -1) representado como dois estados lógicos, os quais, juntos, formam o chip. Cada "+1" lógico na entrada pode ser representado, por exemplo, como uma alteração de polaridade

de -1 para +1. Cada "-1" lógico de entrada no presente exemplo pode ser representado como uma alteração na polaridade de +1 para -1. O espectro do sinal do código de espalhamento apresentado na figura 10 é apresentado na figura 11. A amplitude do sinal na frequência zero é zero, assim tornando tal código mais adequado para a geração de energia sísmica. Como será adicionalmente explicado abaixo com referência às figuras 17 até 20, a saída do modulador (42 na figura 1B) pode ser adicionalmente modificada de modo que um número selecionado de operações de modulação bifásica anteriores (ou seja, alteração na polaridade de -1 para +1 e vice versa), pode ser executado para representar cada +1 ou -1 lógico (chip) do sinal de entrada do código DSSS. Em um exemplo, o mesmo código DSSS pode ser utilizado como um sinal acionador para operar vários vibradores. O número de operações de modulação por chip aplicado para o mesmo código DSSS é de forma única selecionado e utilizado para modular o sinal de acionamento para cada um dos vários vibradores.

Um exemplo de um código DSSS de baixa frequência utilizado para acionar um vibrador adequadamente configurado é apresentado na figura 12A. O código DSSS pode ser configurado para proporcionar uma saída de frequência selecionada pela seleção adequada da taxa de chip. Um espectro da saída de energia de um vibrador adequadamente configurado utilizando o código da figura 12A é apresentado na figura 12B correspondente. A figura 13A apresenta um código DSSS utilizado para acionar um vibrador configurado com frequência mais elevada. As respostas do vibrador (espectro de saída do sinal) de tal vibrador para o código DSSS da figura 13A são apresentadas na figura 13B. Ambos os sinais sísmicos são efetivamente somados. Após a detecção dos sinais a partir de cada vibrador nos sinais sísmicos recebidos como explicado acima, os sinais detectados podem ser somados. Os sinais DSSS combinados são apresentados na figura 14A, e o espectro de saída combinado do vibrador é apresentado na figura 14B. Uma autocorrelação dos sinais somados é apresentada na figura 15 indicando dois picos distintos de correlação, um para cada código DSSS. Cada um dos vários vibradores pode ser operado em uma profundidade selecionada na

água correspondendo às faixas de frequência de cada vibrador.

Como explicado no começo da presente descrição, em alguns exemplos, mais do que um vibrador pode ser utilizado em qualquer localização particular na água, por exemplo, como apresentado na figura 1 por 10 sendo rebocado pela embarcação de levantamento sísmico e como apresentado em 10 sendo rebocado por uma ou mais embarcações de fonte. Em tais configurações com múltiplos vibradores, cada um dos vibradores apresentados por 10 na figura 1 pode ser substituído por dois ou mais vibradores sísmicos marítimos (um "arranjo" de vibradores) construídos como descrito neste documento com referência às figuras. 3 até 6. No presente exemplo, cada 10 arranjo de vibradores em cada localização individual possui dois ou mais vibradores, cada um possuindo uma resposta de frequência diferente. A resposta de frequência do vibrador particular pode ser determinada, por exemplo, como explicado acima com referência às figuras 3, 4 e 5, pela seleção 15 adequada da massa do casco externo, das massas adicionais e das taxas das molas interna e externa.

Geralmente, levantamentos sísmicos marítimos utilizam uma faixa de frequências de fonte de cerca de 1 até 100 Hz. Em alguns exemplos, um arranjo de vibradores pode incluir um vibrador na faixa de baixa 20 frequência para gerar uma parte de baixa frequência do sinal sísmico, por exemplo, 3 até 25 Hz, e outro vibrador da faixa de frequência mais alta para gerar energia sísmica de frequência mais alta (por exemplo, 25 até 100 Hz). Como explicado acima, o tipo revelado de vibrador marítimo pode possuir duas ou mais frequências de ressonância dentro da banda de frequência 25 sísmica. Para estar apto a obter maior eficiência a partir de cada um dos vibradores no arranjo, cada um dos vibradores pode ser configurado para possuir uma alta eficiência de resposta dentro de somente uma parte selecionada da faixa de frequências sísmicas de interesse. Utilizar vários vibradores, cada um possuindo uma faixa de respostas de frequência relativamente 30 estreita, mas diferente, irá garantir a operação mais eficiente de cada vibrador no arranjo de vibradores. Em um exemplo específico, é possível rebocar cada um dos vibradores no arranjo em profundidades diferentes se-

lecionadas para melhorar a saída acústica do arranjo.

Adicionalmente, como explicado acima, é possível acionar cada um dos vibradores em um arranjo com um sinal acionador possuindo uma faixa correspondente de frequências. Por acionar cada vibrador com um sinal de acionamento possuindo uma faixa de frequências correspondendo à faixa de frequências do vibrador, é possível otimizar a saída de cada vibrador no arranjo.

Como um exemplo, um arranjo de vibradores inclui três vibradores fabricados como explicado acima com referência às figuras 3 até 5, cada um operando nas seguintes faixas de frequência:

Vibrador 1: 5 até 15 Hz

Vibrador 2: 15 até 45 Hz

Vibrador 3: 45 até 120 Hz

Em um exemplo, cada vibrador é rebocado em uma profundidade de modo que a amplitude da energia sísmica se propagando em uma direção para baixo (em direção ao leito da água) a partir de cada vibrador é amplificada pelo efeito de reflexão de energia sísmica a partir da superfície da água (isto é, o fantasma da fonte). Por rebocar os vibradores em tais profundidades, pode ser possível obter até 6 dB de melhoramento na saída do arranjo devido ao fantasma de superfície. Uma resposta ilustrativa de um arranjo com três vibradores com profundidades do vibrador apropriadamente selecionadas é apresentada graficamente na figura 16. As curvas na figura 16 representam a saída dos três vibradores acima rebocados em 30 metros, 15 metros e 7 metros, respectivamente, apresentados por 50, 52, e 54 na figura 16. O que pode ser observado na figura 16 é que por utilizar vibradores marítimos possuindo resposta de frequência apropriadamente selecionada, e pela seleção apropriada da profundidade de operação de cada vibrador, é possível utilizar o fantasma de superfície para amplificar a propagação de energia em uma direção para baixo a partir de cada vibrador no arranjo. De modo a causar que a saída dos vibradores em cada arranjo atue como uma fonte única de energia sísmica (e assim, a soma da saída dos vibradores apresentada na figura 16) também é necessário considerar o atraso que

será causado pela operação dos vibradores em diferentes profundidades. Somar as fontes juntas exige utilizar expressões similares às seguintes (se a velocidade acústica na água for assumida como sendo 1500 metros / seg.) para compensar a profundidade diferente de cada vibrador:

$$5 \quad \text{Vibrator1}(t) + \text{Vibrator2}(t+dt_{\text{source2}}) + \text{Vibrator3}(t+dt_{\text{source3}})$$

$$dt_{\text{vibrator2}} = (\text{vibrator_depth1} - \text{vibrator_depth2})/1500$$

$$dt_{\text{vibrator3}} = (\text{vibrator_depth1} - \text{vibrator_depth3})/1500.$$

Por proporcionar um arranjo de vibradores e por seleccionar vibradores no arranjo com resposta de frequência específica e por operar cada vibrador em uma profundidade correspondendo à sua resposta de frequência, o resultado é uma otimização tanto da resposta de frequência do vibrador como das profundidades nas quais rebocar cada vibrador para obter a máxima potência em penetrar a subsuperfície.

Referindo-se à figura 17, um exemplo da utilização de números diferentes de operações de modulação bifásica em cada chip do sinal acionador DSSS será explicado. A figura 17 apresenta a função de autocorrelação de um código DSSS com 255 chips de comprimento máximo (explicado acima) onde cada chip é modulado por uma operação de modulação bifásica. Quando tal sinal é utilizado para acionar um vibrador sísmico possuindo uma faixa de frequências, por exemplo, de 6 até 35 Hz, o espectro de saída resultante de tal vibrador é apresentado na figura 18.

A figura 19 apresenta a função de autocorrelação do mesmo código DSSS de comprimento máximo com 255 chips, mas este tempo modulado por duas operações de modulação bifásica por chip. O comprimento do chip é constante. Se tal sinal for utilizado para operar um vibrador possuindo uma faixa de frequências, por exemplo, de 35 até 70 Hz, um espectro de saída resultante do vibrador é apresentado na figura 20. A figura 21 apresenta que a correlação cruzada entre o sinal DSSS modulado utilizando uma operação bifásica por chip e o mesmo sinal DSSS modulado utilizando duas operações bifásicas por chip pode ser suficientemente baixa para permitir de forma única determinar o vibrador particular que é a fonte da energia sísmica nos sinais detectados pelos receptores sísmicos (R na figura 1).

Em uma implementação prática do dito anteriormente, um número de operações de modulação bifásica por chip pode ser selecionado para corresponder à faixa de frequências do respectivo vibrador.

Os vibradores sísmicos e métodos para operar tais vibradores de acordo com os vários aspectos da invenção podem proporcionar detecção mais robusta do sinal sísmico, podem reduzir o impacto ambiental do levantamento sísmico por espalhar a energia sísmica através de uma faixa de frequências relativamente ampla, e podem aumentar a eficiência do levantamento sísmico por permitir a operação simultânea de várias fontes sísmicas enquanto permitindo a detecção de energia sísmica a partir de fontes individuais das fontes sísmicas.

Enquanto a invenção foi descrita com respeito a um número limitado de concretizações, os versados na técnica, tendo o benefício desta revelação, irão apreciar que outras concretizações podem ser imaginadas, as quais não se afastam do escopo da invenção como revelado neste documento. Por consequência, o escopo da invenção somente deve ser limitado pelas reivindicações anexas.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para gerar energia sísmica para levantamento de subsuperfície, compreendendo:

5 operar um primeiro vibrador sísmico acima de uma área da subsuperfície a ser levantada; e

operar pelo menos um segundo vibrador sísmico acima da área substancialmente simultaneamente com a operação do primeiro vibrador sísmico, cada um possuindo uma faixa de resposta de frequência selecionada diferente, cada um dentre o primeiro e o segundo vibradores operado por
10 um mesmo sinal de acionador de espalhamento espectral de sequência direta, onde um número diferente de operações de modulação para cada valor lógico no sinal de espalhamento espectral de sequência direta é selecionado para cada vibrador.

2. Método de acordo com a reivindicação 1, onde cada número
15 de operações de modulação é selecionado para corresponder à faixa de respostas de frequência de cada vibrador.

3. Método de acordo com a reivindicação 1, onde o sinal de espalhamento espectral de sequência direta compreende pelo menos um dentre um código de sequência de comprimento máximo, um código de sequência
20 de Gold e um código de sequência de Kasami.

4. Método de acordo com a reivindicação 1, onde a área de subsuperfície compreende um corpo de água, e onde um tempo de atuação de cada vibrador corresponde a uma profundidade na qual cada vibrador é operado no corpo de água de modo que o primeiro e pelo menos um segundo
25 vibrador atuam como um arranjo de vibradores.

6. Método de acordo com a reivindicação 5, onde cada um dos vibradores é operado em uma profundidade de água de modo que um fantasma da superfície amplifica uma saída para baixo de cada vibrador dentro de uma faixa de frequências selecionada.

30 7. Método de acordo com a reivindicação 1, onde a operação de modulação compreende a modulação bifásica.

8. Método para levantamento sísmico de subsuperfície, compre-

endendo:

operar vários vibradores sísmicos, cada um possuindo uma faixa de respostas de frequência selecionada diferente acima de uma área da subsuperfície a ser levantada; e

- 5 detectar sinais sísmicos se originando a partir dos vários vibradores em cada um dentre vários receptores sísmicos dispostos em localizações separadas acima da área;

onde cada vibrador é operado por um mesmo sinal acionador de espalhamento espectral de sequência direta;

- 10 onde um número diferente de operações de modulação para cada valor lógico no sinal acionador é selecionado para cada vibrador; e

determinar a energia sísmica originando a partir de cada um dos vários vibradores nos sinais sísmicos detectados.

9. Método de acordo com a reivindicação 8, onde cada número
15 de operações de modulação é selecionado para corresponder à faixa de respostas de frequência de cada vibrador.

10. Método de acordo com a reivindicação 8, onde o sinal de espalhamento espectral de sequência direta compreende pelo menos um dentre um código de sequência de comprimento máximo, um código de sequência de Gold e um código de sequência de Kasami.
20

11. Método de acordo com a reivindicação 8, onde cada vibrador possui pelo menos duas frequências de ressonância em uma banda de frequências selecionada.

12. Método de acordo com a reivindicação 8, onde a área de subsuperfície compreende um corpo de água, e onde um tempo de atuação
25 de cada vibrador corresponde a uma profundidade na qual cada vibrador é operado no corpo de água de modo que o primeiro e pelo menos um segundo vibrador atuam como um arranjo de vibradores.

13. Método de acordo com a reivindicação 12, onde cada um
30 dos vibradores é operado em uma profundidade de água de modo que um fantasma da superfície amplifica uma saída para baixo de cada vibrador dentro de uma faixa de frequências selecionada.

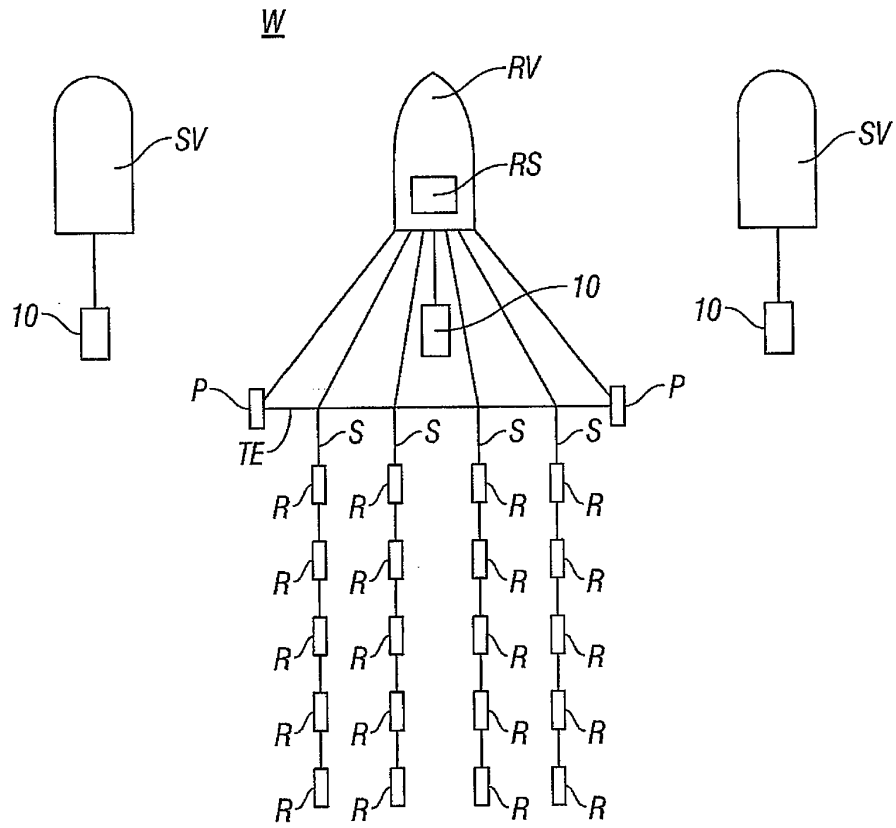


FIG. 1

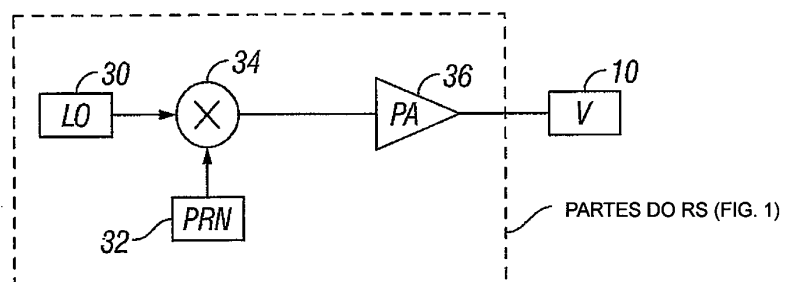


FIG. 1A

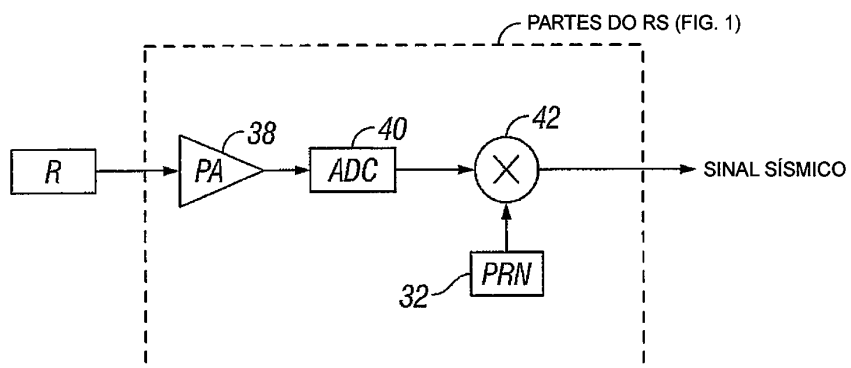


FIG. 1B

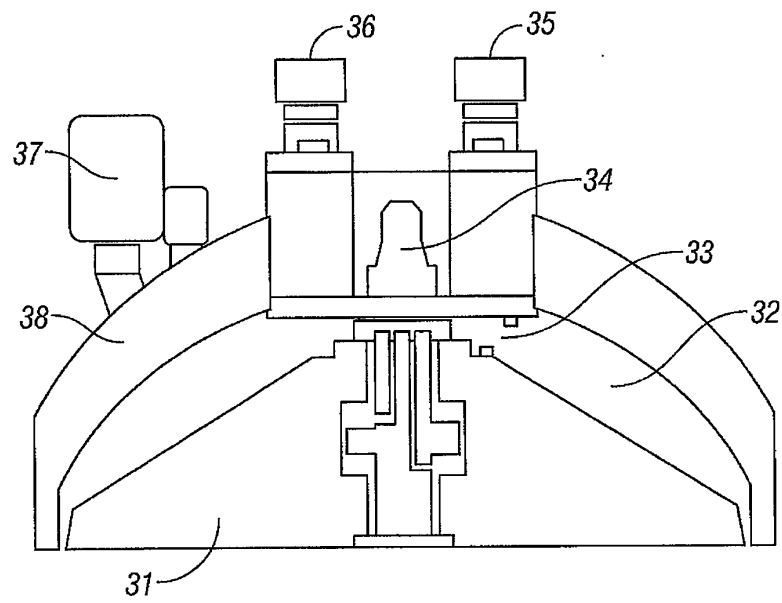


FIG. 2
(TÉCNICA ANTERIOR)

4/14

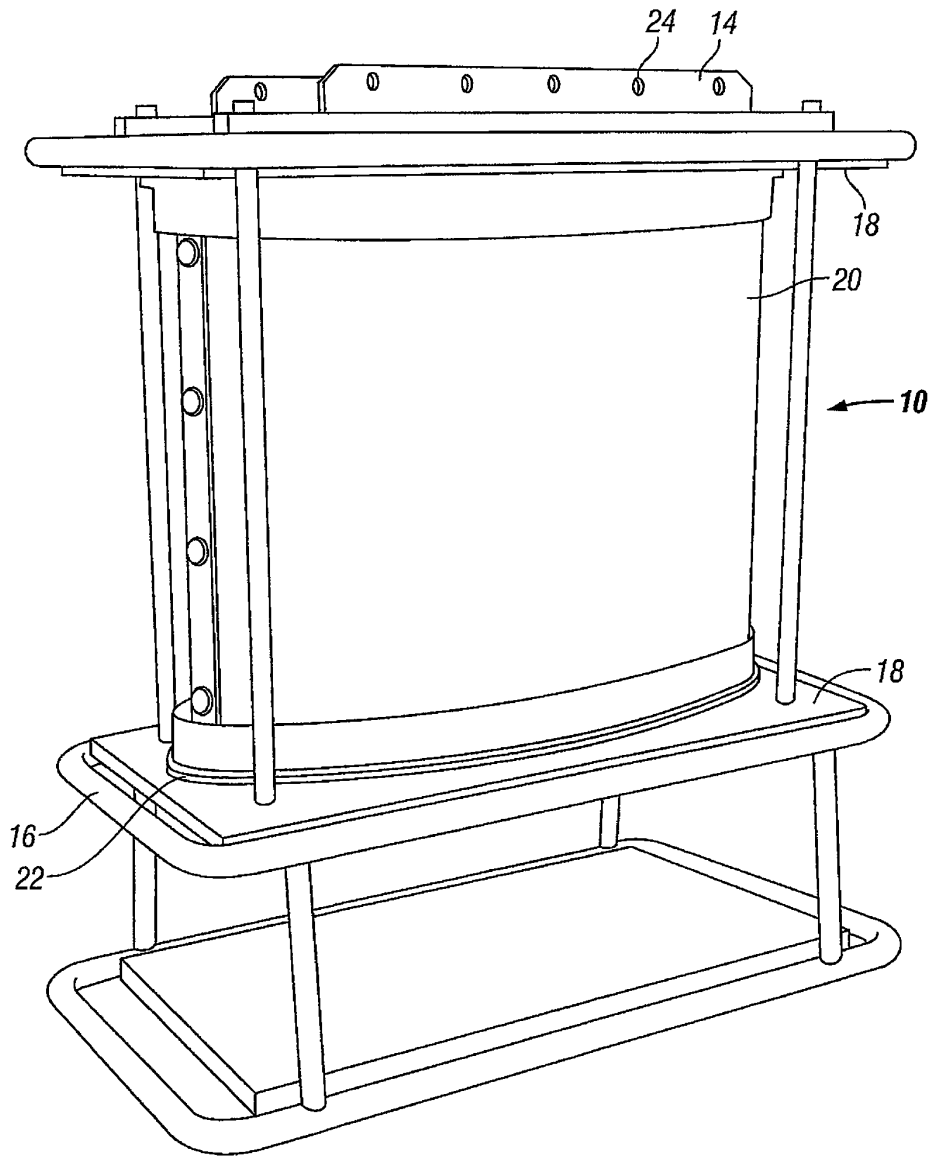


FIG. 3

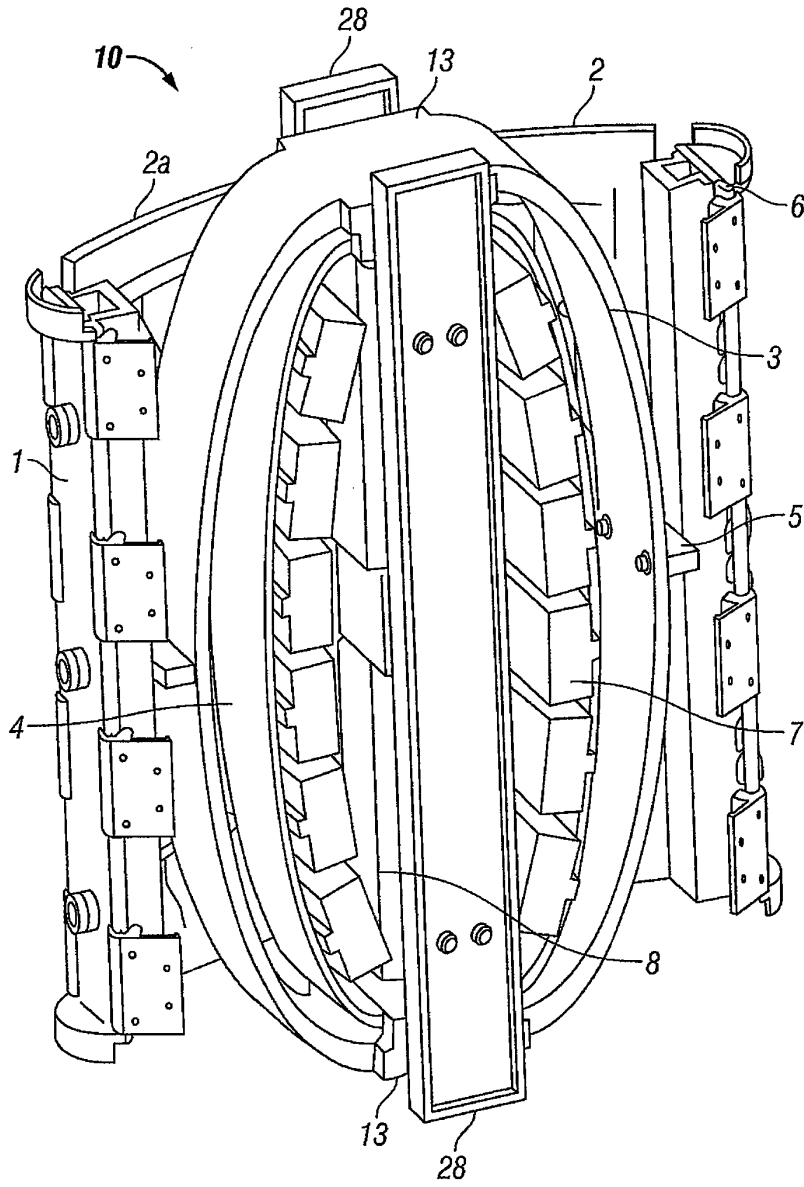


FIG. 4

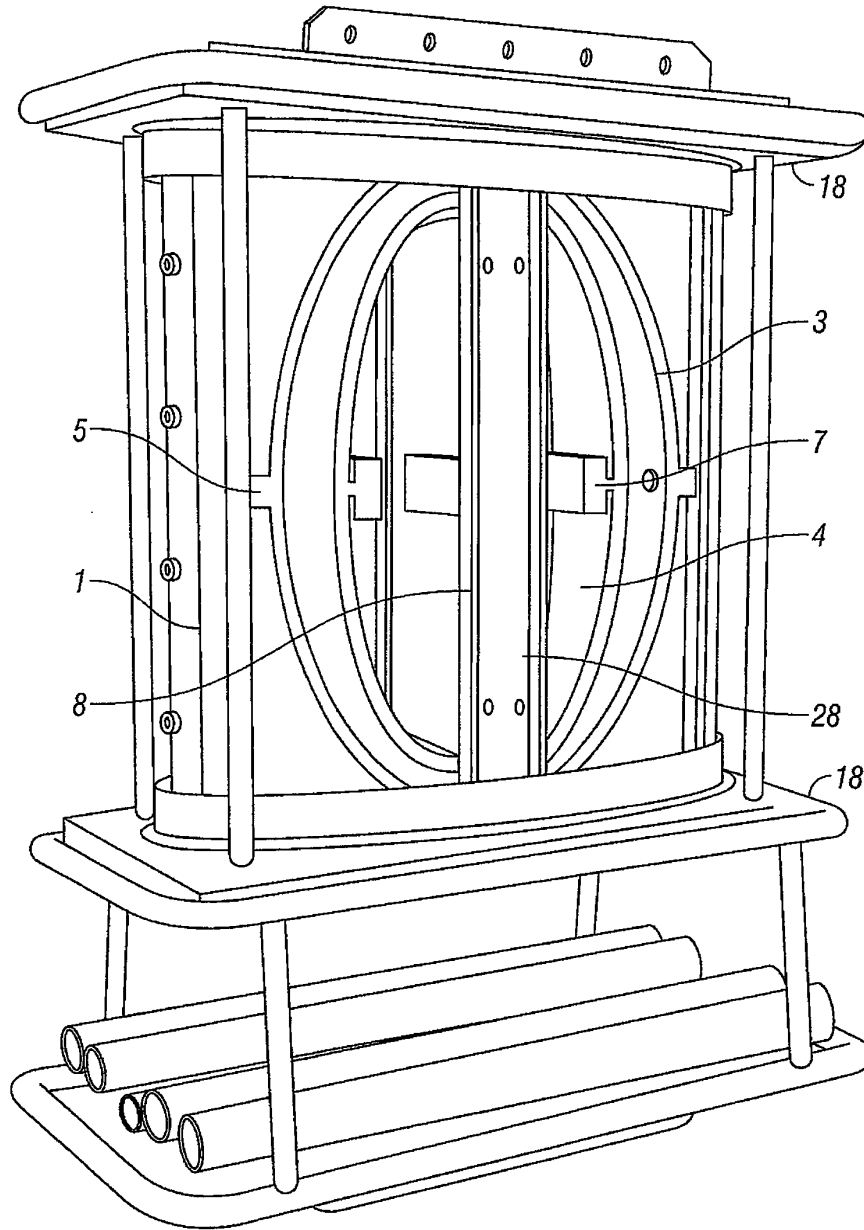


FIG. 5

7/14

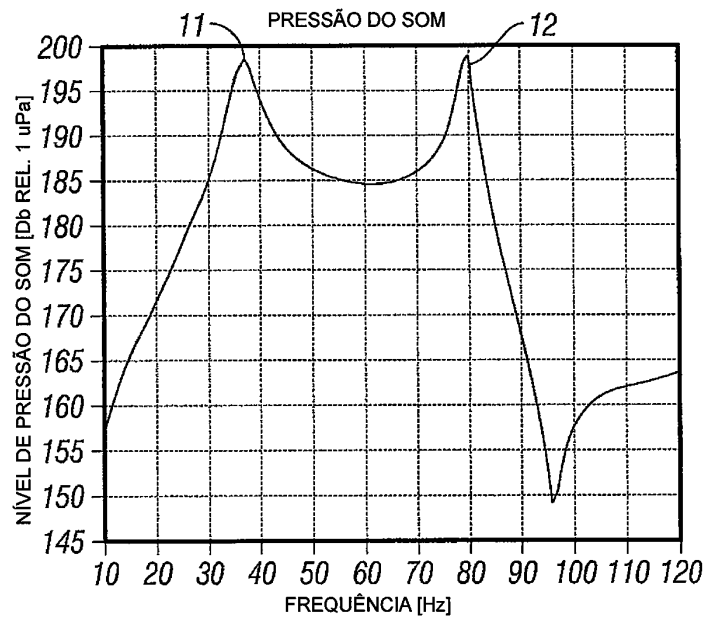


FIG. 6

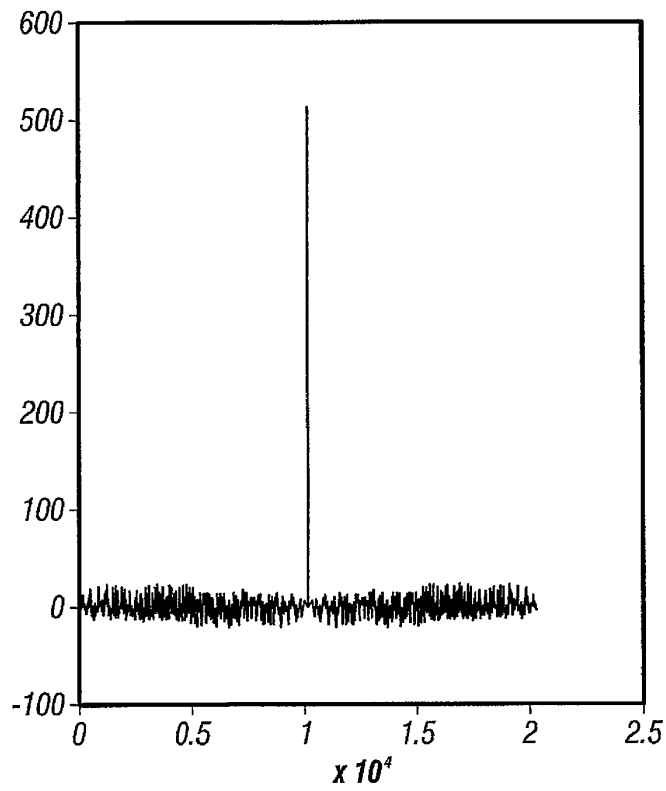


FIG. 7

8/14

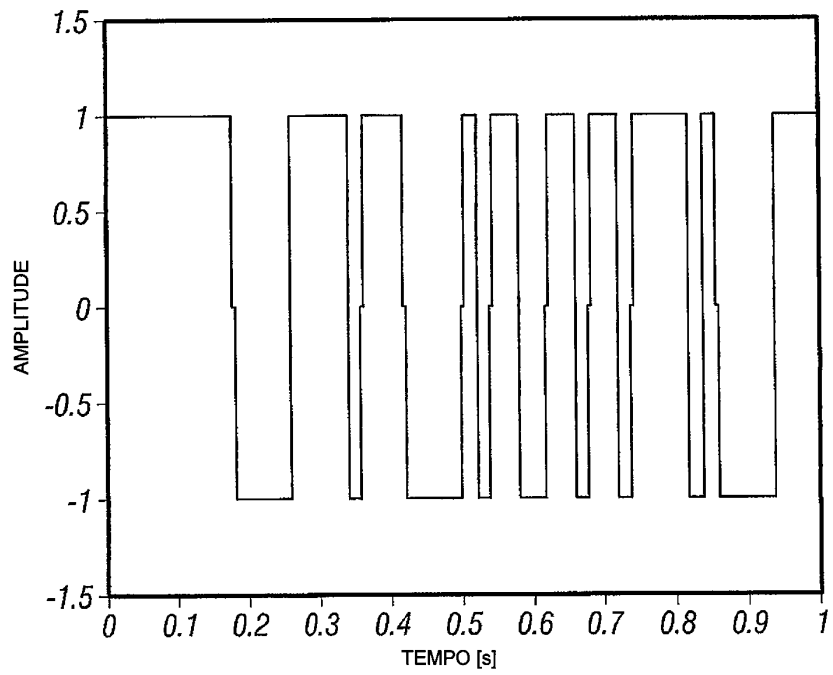


FIG. 8

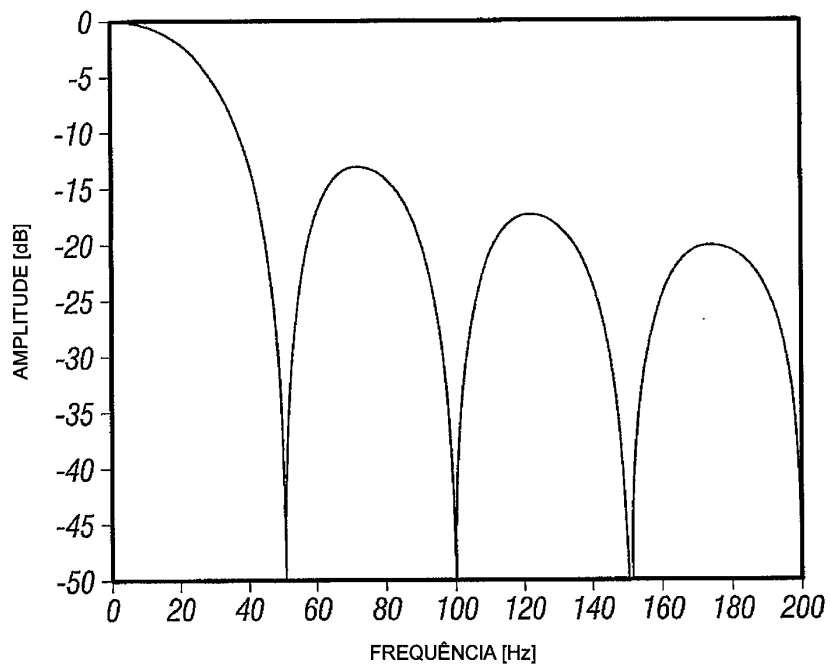


FIG. 9

9/14

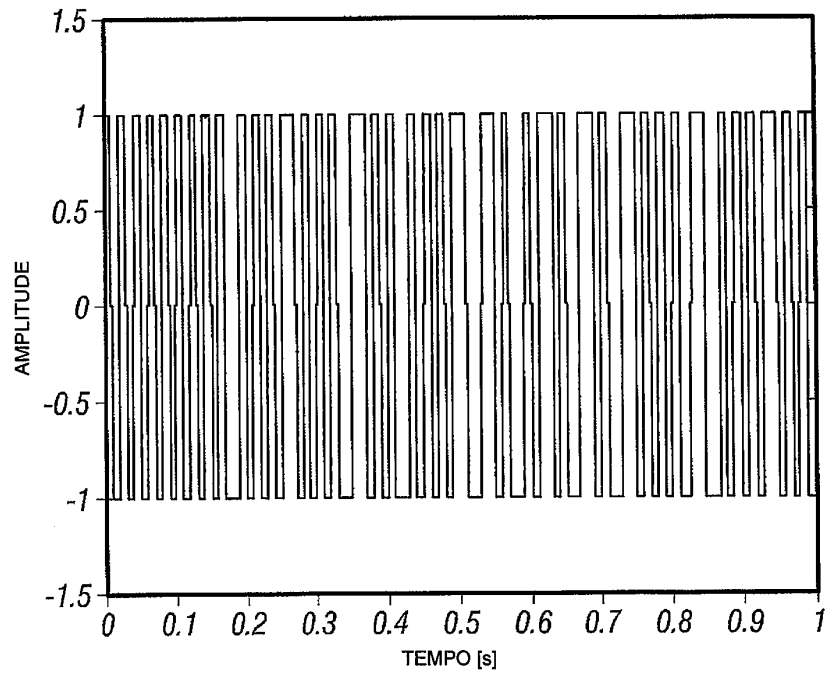


FIG. 10

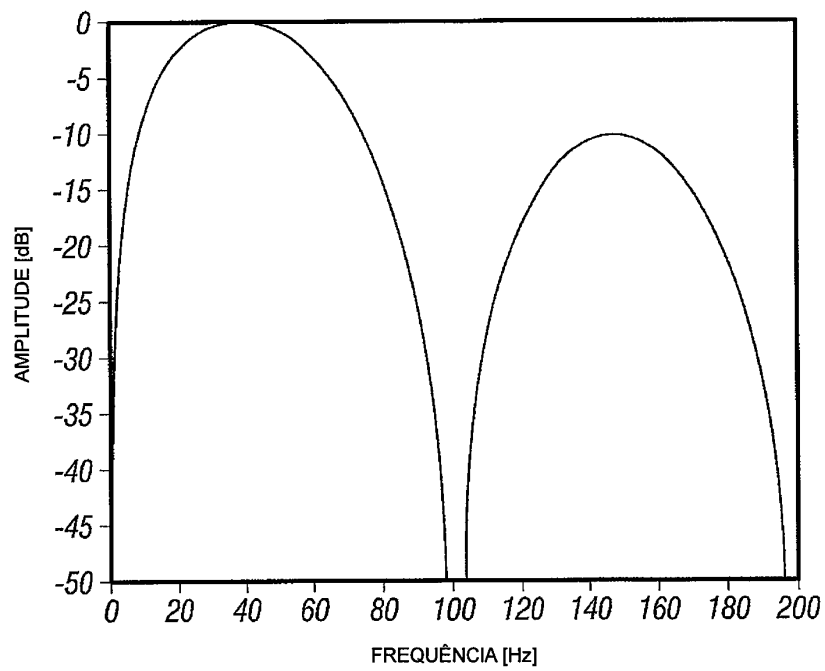


FIG. 11

10/14

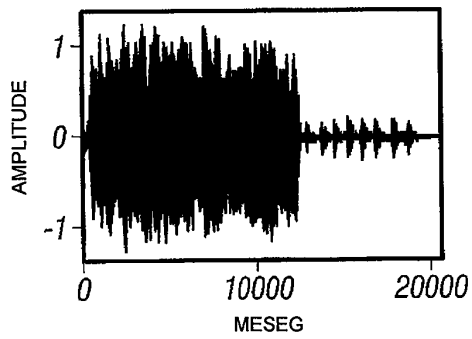


FIG. 12A

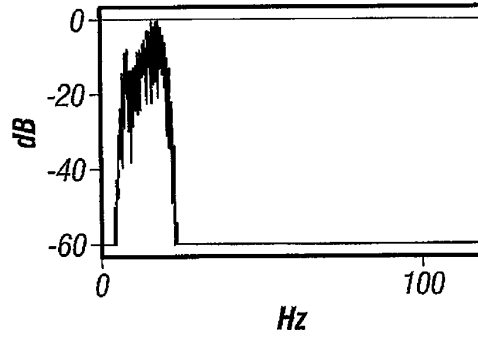


FIG. 12B

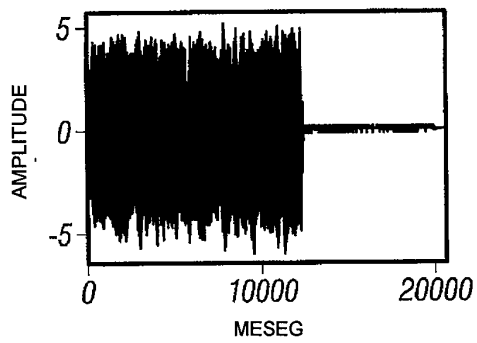


FIG. 13A

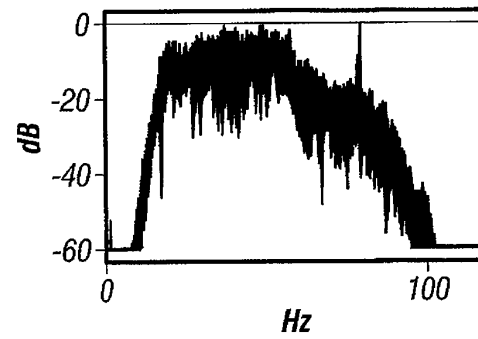


FIG. 13B

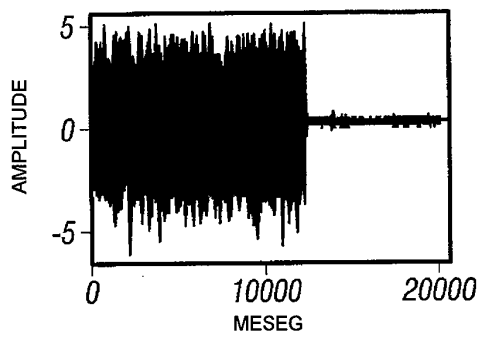


FIG. 14A

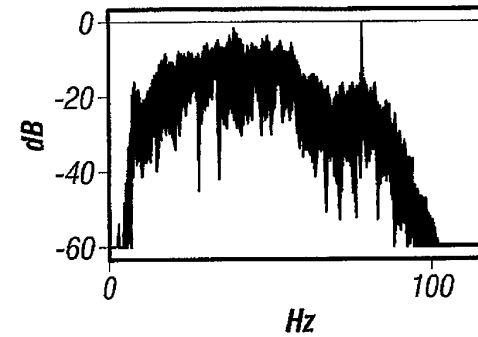


FIG. 14B

11/14

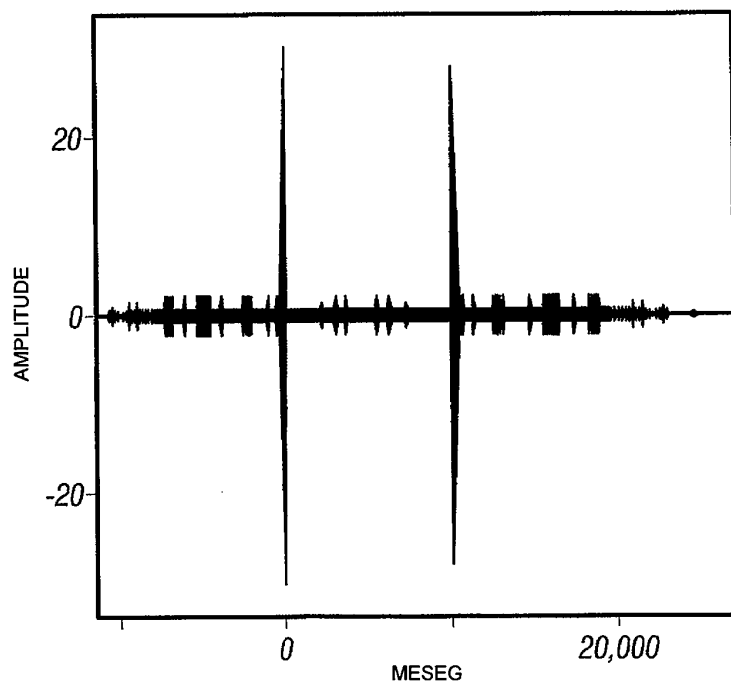


FIG. 15

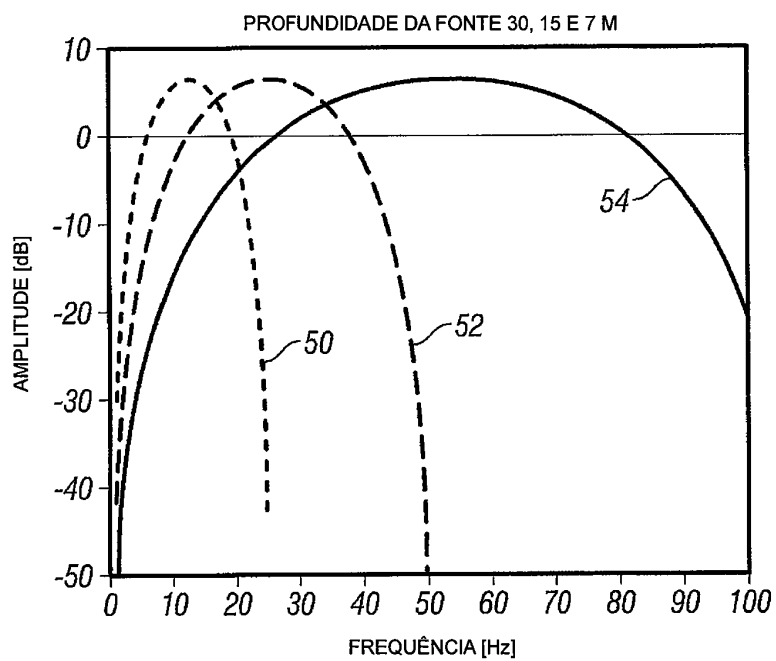


FIG. 16

12/14

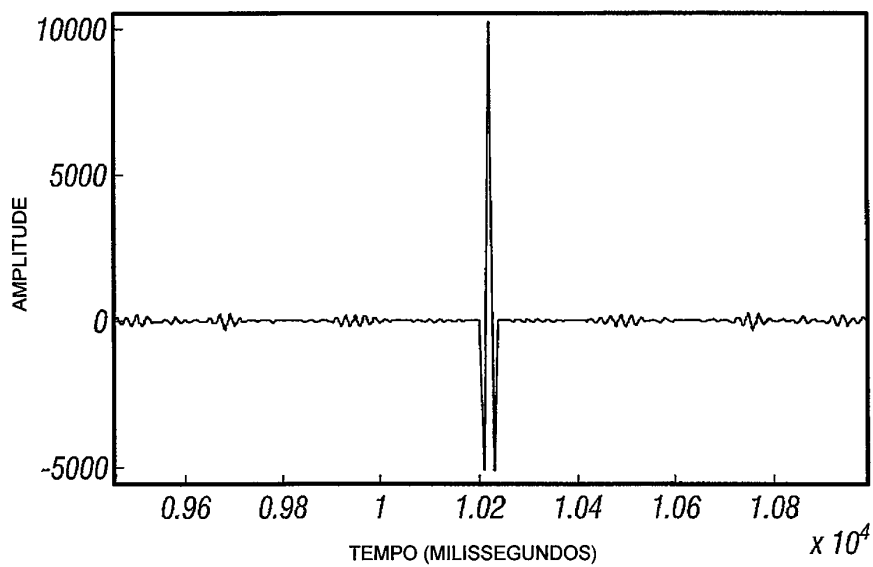


FIG. 17

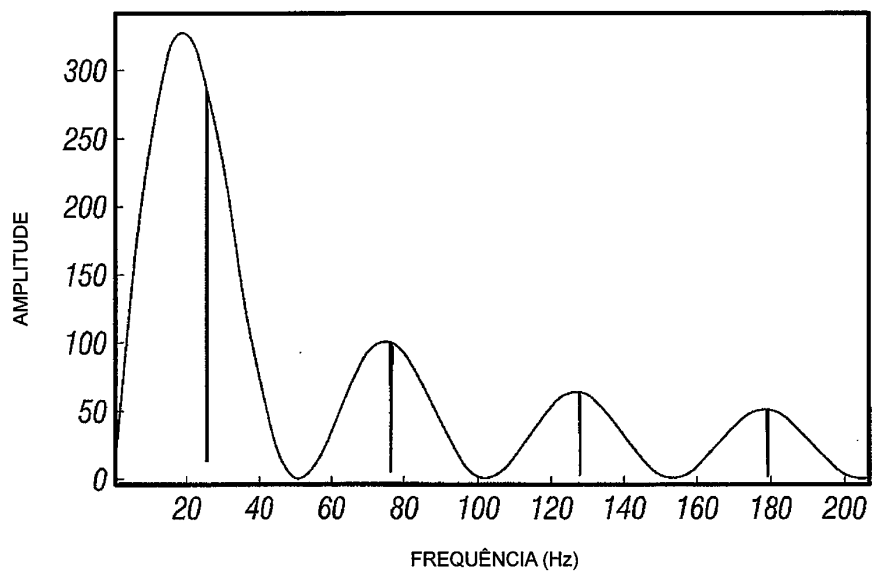


FIG. 18

13/14

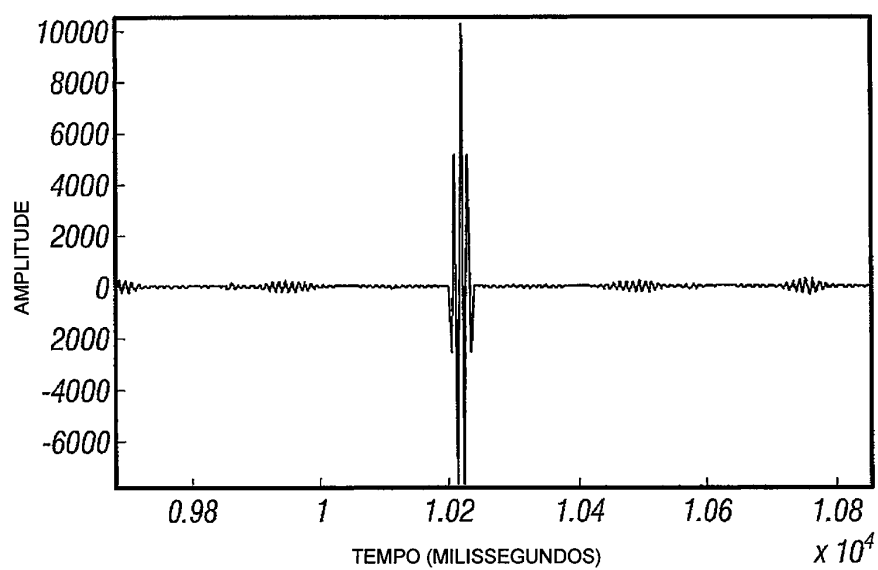


FIG. 19

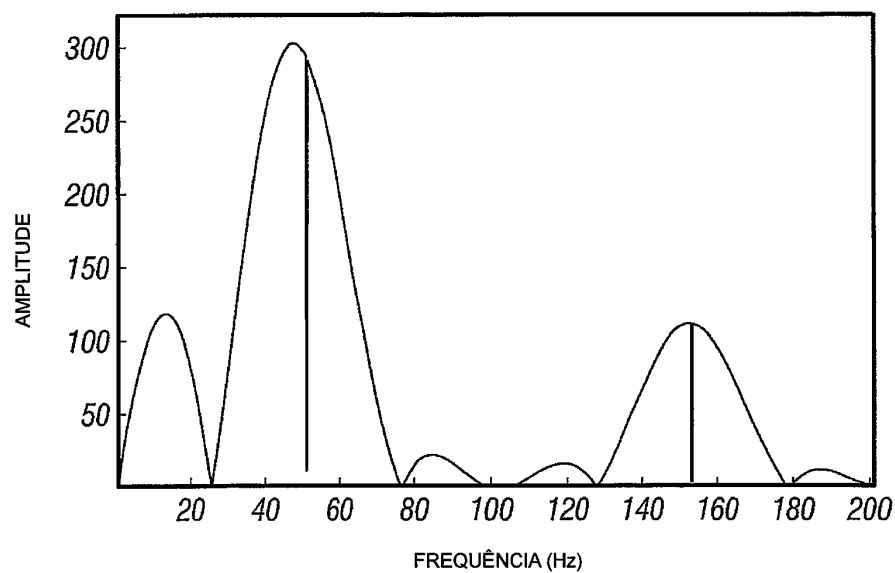


FIG. 20

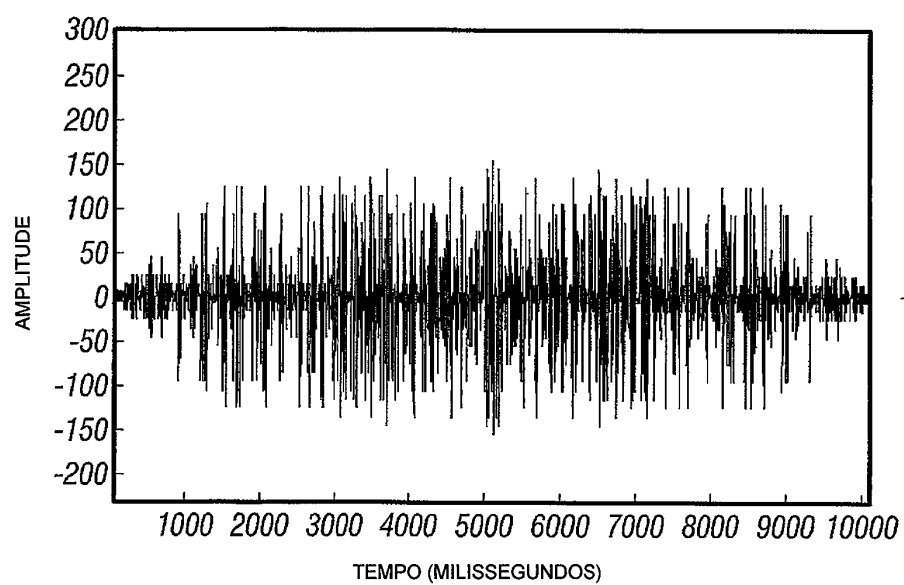


FIG. 21

RESUMO

Patente de Invenção: **"MÉTODO PARA GERAR SINAIS ACIONADORES DE ESPALHAMENTO ESPECTRAL PARA UM ARRANJO DE VIBRADORES SÍSMICOS UTILIZANDO MÚLTIPLAS OPERAÇÕES DE MODULAÇÃO BIFÁSICA EM CADA CHIP DE SINAL ACIONADOR".**

A presente invenção refere-se a um método para gerar energia sísmica para levantamento de subsuperfície que inclui operar um primeiro vibrador sísmico acima de uma área da subsuperfície a ser inspecionada e operar pelo menos um segundo vibrador sísmico acima da área substancialmente simultaneamente com a operação do primeiro vibrador sísmico. Cada um dentre o primeiro e o segundo vibrador sísmico possui uma resposta de frequência selecionada diferente. Cada um dentre o primeiro e o segundo vibrador sísmico é operado por um mesmo sinal de espalhamento espectral de sequência direta, onde um número diferente de operações de modulação para cada valor lógico no sinal de espalhamento espectral de sequência direta é selecionado para cada vibrador.