



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

(11) PI 0506460-0 B1

(22) Data do Depósito: 28/01/2005

(45) Data de Concessão: 04/04/2017



(54) Título: SISTEMA DE PESQUISA SÍSMICA MARÍTIMA, CABO SÍSMICO MARÍTIMO E MÉTODO DE AQUISIÇÃO DE UM CAMPO DE ONDA ACÚSTICA

(51) Int.Cl.: G01V 1/20; G01V 1/38

(30) Prioridade Unionista: 30/01/2004 GB 0402012.9

(73) Titular(es): WESTERNGECO SEISMIC HOLDINGS LIMITED

(72) Inventor(es): EVERHARD JOHAN MUYZERT; JAMES EDWARD MARTIN; ROBERT MONTGOMERY LAWS; PHILIP ANDREW FELTON CHRISTIE

"SISTEMA DE PESQUISA SÍSMICA MARÍTIMA, CABO SÍSMICO MARÍTIMO
E MÉTODO DE AQUISIÇÃO DE UM CAMPO DE ONDA ACÚSTICA"

[001] A presente invenção se relaciona a um método e aparelho para adquirir dados sísmicos a partir de sensores sísmicos em um sistema de aquisição sísmico, tipo cabo ou serpentina.

Campo da Invenção

[002] Em uma exploração sísmica marítima, uma pluralidade de sensores sísmicos é encapsulada em longos cabos plásticos tubulares tendo um comprimento de muitas milhas. Dependendo da pesquisa se chamam "Cabos de Fundo de Mar" (OBC de Ocean Bottom Cable) ou "Serpentinas".

[003] Uma serpentina é rebocada por um navio de aquisição sísmica através da água a uma certa profundidade. Uma fonte sísmica marítima, tal como uma "pistola de ar" (airgun), é usada para gerar ondas acústicas. As ondas acústicas são refletidas a partir de camadas geológicas, e retornam para superfície da água na forma de ondas de pressão. As ondas de pressão são detectadas por sensores de pressão, e convertidas em sinais elétricos.

[004] Uma serpentina rebocada compreende uma pluralidade de elementos hidrofones sensíveis à pressão encapsulados em um envoltório a prova de água e eletricamente ligados a um equipamento de gravação a bordo do navio. Cada elemento hidrofone na serpentina é projetado para converter energia mecânica presente nas variações de pressão, que envolvem o elemento hidrofone, em sinais elétricos. Esta serpentina pode ser dividida em várias seções (ou módulos) distintas que podem ser desacopladas umas das outras, individualmente a prova de água. Serpentinhas individuais podem ser rebocadas em

paralelo através de paravanos para criar um arranjo bidimensional de elementos hidrofones. Barramentos de dados correndo cada módulo na serpentina transportam o sinal a partir dos elementos hidrofones para o equipamento de gravação (os chamados "Dados Acústicos").

[005] Um hidrofone pode produzir sinais elétricos em resposta às variações de pressão de onda acústica através dos hidrofones. Diversos hidrofones podem ser acoplados para formar uma seção ativa de um arranjo de sensores acústicos ou serpentinas. Sinais elétricos a partir de hidrofones múltiplos de uma seção ativa são tipicamente combinados para prover resposta de sinal médio e/ou amplificar relação sinal:ruído.

[006] Recentemente, uma nova geração de serpentinas foi introduzida usando os chamados receptores de ponto. Nestas serpentinas, os sinais podem ser gravados por hidrofones individuais. Os detalhes de um novo projeto de serpentina, comparado com serpentinas convencionais, estão descritos no "Oilfield Review", ed. verão de 2001 pps 16-31. A propósito da presente invenção, é importante salientar que em ambas, serpentinas receptoras de ponto ou convencionais, os hidrofones são dispostos em arranjo essencialmente linear na direção da serpentina.

[007] As ondas de som refletidas não apenas retornam diretamente para os sensores de pressão onde foram detectadas primeiramente, mas aquelas mesmas ondas de som refletidas são refletidas uma segunda vez a partir da superfície da água e voltam para os sensores de pressão. As ondas de som refletidas pela superfície, com certeza, se atrasam um tempo proporcional a duas vezes a profundidade dos sensores de

pressão e aparecem como sinais secundários ou "sinais fantasmas". Pelo fato de as ondas de som diretas ou refletidas pela superfície chegarem muito próximas em tempo, tendem a interferir entre si, ou com sinais que se propagam através dos estratos geológicos e compartilham o mesmo instante de chegada. Por conseguinte, deseja-se determinar a direção de propagação das ondas de som, de modo que as ondas que se propagam para cima ou para baixo possam ser mais prontamente separadas durante o processamento de dados.

[008] Nas chamadas serpentinas rebocadas de sensor dual, a serpentina inclui uma combinação de sensores de pressão e velocidade. O sensor de pressão é tipicamente um hidrofone, e os sensores de movimento ou velocidade são geofones ou acelerômetros. Na patente U.S. Nº 6.512.980, a serpentina é descrita portando pares de sensores de pressão e sensores de movimento combinados com um terceiro sensor - um sensor de referência de ruído. O sensor de referência de ruído é descrito como uma variante do sensor de pressão de técnica anterior.

[009] Na prática, serpentinas rebocadas de sensor dual são difíceis de usar, porque os geofones na serpentina geram sinais proporcionais às vibrações da serpentina. Também frequentemente não é fácil correlacionar os sinais produzidos por hidrofones e geofones.

[0010] Adicionalmente se sabe como posicionar dois hidrofones individuais em um arranjo vertical. Com certeza seria relativamente fácil identificar a direção de propagação das ondas sônicas a partir de diferenças em tempo medidas que uma onda em particular chega aos respectivos sensores compondo o arranjo vertical, por exemplo, o determinado na

patente U.S. Nº 3.592.281. Este método requer dois cabos de hidrofones separados. Uma vez cada cabo custa aproximadamente meio milhão de dólares, a solução é inviabilizada por sua complexidade e alto custo, com respeito a duplicar o número de serpentinas.

[0011] Nas patentes U.S. Nºs 4.547.869 e 4.692.907 sugeriu-se montar um arranjo substancialmente vertical de sensores dentro da mesma serpentina, com espaçamento de poucas polegadas. Mas um cabo de serpentina torce e vira quando rebocado através da água, o que torna difícil distinguir os sensores no arranjo vertical. A patente '907 sugere uso de sensores com flutuabilidade diferencial em câmaras cheias de líquido.

[0012] A patente '869 descreve um sistema de aquisição com base em fibras ópticas monomodal usando a diferença nas variações de fase devido à pressão hidrostática do sinal óptico de pares diametralmente opostos de sensores de fibra como meio para identificar orientação dos sensores de fibra. Uma serpentina similar está descrita na EP 0175026 A1.

[0013] Fora do campo de pesquisas sísmicas, arranjos de grupos de hidrofones foram sugeridos para antenas lineares (WO 03/019224 A1).

[0014] À luz da descrição acima, trata-se de um objetivo da presente invenção prover um sistema de aquisição sísmica incluindo arranjos de hidrofones em um cabo, ou em uma pluralidade de cabos rebocados por um navio sísmico.

Sumário da Invenção

[0015] De acordo com um primeiro aspecto da presente invenção, provê-se um sistema de pesquisa sísmica marítima com um cabo marítimo com uma pluralidade de sensores de

pressão piezo-cerâmicos, sendo que a citada pluralidade de sensores de pressão é arranjada em grupos de pelo menos dois sensores de pressão, a saída do grupo representativa do gradiente de pressão vertical no local do grupo. O citado sistema compreende um ou mais transdutores eletro-mecânicos para determinar a posição relativa dos citados pelo menos dois sensores de pressão, para determinar sua separação vertical.

[0016] O cabo da presente invenção pode ser um cabo de fundo de mar ou cabo sísmico vertical, como aquele usado para perfilamento sísmico vertical (VSP). Preferivelmente, no entanto, o cabo é uma dentre a pluralidade de serpentinas rebocadas pelo navio de pesquisa sísmica através de um corpo de água.

[0017] Um grupo é definido (a) pela proximidade; e (b) pelo processamento das saídas dos hidrofones. Os hidrofones de um grupo são essencialmente vizinhos próximos. Em uma serpentina, os hidrofones em um grupo são tipicamente separados de 1 a 10 cm, onde a distância intergrupo é 0,5 ou de 1 metro a 7,5 metros. Em uma configuração preferida, os pelo menos dois sensores de pressão que contribuem para saída do grupo representativa do gradiente de pressão vertical, se localizam em uma seção de cabo menor que 6 cm ou 3 cm de comprimento, permitindo serem montados em um único porta-hidrofone em uma serpentina. Preferivelmente, a separação vertical entre hidrofones em um grupo deve ser menor que 6 cm.

[0018] Em uma variante preferida, os hidrofones de um grupo são espaçados equidistantes.

[0019] Preferivelmente, grande parte dos hidrofones ou

todos eles são arrançados em um plano vertical ao eixo geométrico principal do cabo. No entanto, para uma gravação completa de forma de onda envolvendo aquisição de sinal sísmico transversal, em linha, ou vertical, é importante contar com pelo menos um sensor de pressão localizado fora do plano ou alternativamente, um sensor de um grupo vizinho provendo medição de pressão adicional fora do plano. Em uma variante da presente invenção, um grupo tem 4 hidrofones, em arranjo tetraédrico.

[0020] É vantajoso combinar ou conectar os sinais de saída dos hidrofones e/ou amplificá-los antes do processo de digitalização, porque a diferença de pressão entre dois hidrofones muito próximos pode ser extremamente pequena.

[0021] Trata-se de um aspecto adicional da presente invenção prover um sistema inclinométrico para determinar orientação dos hidrofones em um grupo, em particular a distância vertical entre os hidrofones usados para determinar o gradiente de pressão vertical. A medição da orientação ou ângulo de rotação será necessária, quando um cabo suspenso ou rebocado em um corpo de água for submetido à torção e/ou ser virado. Em uma variante, o sistema inclinométrico compreende um ou mais dispositivos eletro-mecânicos ou eletro-acústicos que não são hidrofones. Os dispositivos são operados de modo a provocar uma resposta que indique orientação ou ângulo de rotação dos hidrofones.

[0022] Em uma primeira configuração, os dispositivos eletro-mecânicos ou eletro-acústicos do sistema inclinométrico são formados por uma ou mais fontes acústicas que emitem sinais ou pulsos acústicos, e um sistema que meça o tempo de chegada dos sinais ou pulsos nos hidrofones.

Preferivelmente, faz-se uso de sistemas de posicionamento sônicos existentes como fontes acústicas. No entanto, podem ser usados características e eventos facilmente identificáveis gerados por fontes sísmicas para esta medição. As fontes preferivelmente se localizam em uma serpentina rebocada paralelamente à serpentina contendo grupos de hidrofones para produzir um ângulo transversal de incidência de sinais sônicos.

[0023] Alternativamente, os dispositivos eletro-mecânicos ou e eletro-acústicos podem assumir a forma de uma pluralidade de pequenos inclinômetros. Descobriu-se que pode ser conseguida uma medição precisa através de pequenos e robustos inclinômetros, preferivelmente em estado sólido. Distribuindo um número suficiente de tais sensores conhecidos ao longo do cabo, pode ser medida sua orientação com respeito à direção horizontal ou vertical.

[0024] Em ambas variantes, a medição independe da pressão hidrostática, i.e. da altura da coluna de água acima dos sensores.

[0025] Estes e outros aspectos da presente invenção serão descritos em detalhes nos exemplos e desenhos anexos que se seguem.

Descrição Resumida dos Desenhos

[0026] A presente invenção será agora descrita por meio de exemplo com referência aos desenhos anexos, nos quais:

[0027] A figura 1 mostra uma ilustração esquemática de um navio rebocando serpentinas e fontes sísmicas;

[0028] A figura 2 mostra uma vista em corte transversal vertical de um cabo serpentina com dois hidrofones;

[0029] A figura 3 mostra uma vista em corte transversal

vertical de um cabo serpentina com três hidrofonos;

[0030] A figura 4 mostra uma vista em corte transversal vertical de um cabo serpentina com dois hidrofonos e uma unidade que gera a soma e a diferença dos sinais produzidos pelos dois hidrofonos como sinais de saída;

[0031] A figura 5 mostra curvas de amplitude relativa da medição de gradiente de pressão em função da frequência de sinal;

[0032] A figura 6 ilustra a amplitude relativa de uma medição de gradiente de pressão em função da frequência de sinal para ângulos de rotação diferentes de um cabo serpentina;

[0033] A figura 7 mostra uma outra vista em corte transversal vertical de um cabo serpentina com 3 hidrofonos com e sem um inclinômetro;

[0034] A figura 8 mostra uma vista em corte transversal vertical de um cabo com 5 hidrofonos arranjados em um plano;

[0035] A figura 9 mostra uma vista em perspectiva de uma seção de cabo serpentina com 2 grupos vizinhos de 3 hidrofonos; e

[0036] A figura 10 mostra uma vista em perspectiva esquemática de um corte de cabo serpentina com um grupo tetraédrico de 3 hidrofonos.

Descrição Detalhada

[0037] Uma típica aquisição sísmica marítima está ilustrada na figura 1. 4 cabos ou serpentinas instrumentadas 10 são rebocadas por um navio 11. Uma rede dianteira 12 e uma rede traseira similar (não mostrada) são usadas para conectar navio e serpentinas. Incorporadas na rede são dispostas fontes sísmicas 13, tipicamente consistindo de um arranjo de

pistolas de ar. Cada serpentina 10 é tipicamente composta de vários segmentos porta-hidrofones acoplados compondo a serpentina. Entre segmentos, as serpentinas portam defletores controláveis 11 (frequentemente chamados de "pássaros") e outros acessórios que ajudam a guiar a serpentina ao longo da trajetória desejada no corpo de água.

[0038] O posicionamento preciso de uma serpentina moderna é controlado por um sistema de posicionamento por satélite, tal como GPS ou GPS diferencial, com receptores GPS na frente e atrás da serpentina. Adicionalmente a posicionamento GPS, sabe-se como monitorar a posição relativa das serpentinas e seções de serpentina através de uma rede de transceptores sônicos 112 que transmite e recebe sinais sônicos e por sonar. Tais sistemas podem ser encontrados em fornecedores, como "Sonardyne".

[0039] O propósito principal de uma serpentina 10 é portar grande número de sensores sísmicos 101, distribuídos ao longo de seu comprimento. Na figura 1, hidrofones são esquematicamente representados em caixas marcadas. Os hidrofones da presente invenção são do tipo de tubo piezo-cerâmico bem conhecido. Como o arranjo geométrico dos hidrofones é um aspecto da presente invenção, os detalhes de diversos possíveis arranjos de hidrofones dentro de um envoltório de serpentina são descritos nas figuras que se seguem.

[0040] Uma vista em seção transversal de porta-hidrofone 21 em um cabo serpentina 20 está mostrada na figura 2. 2 hidrofones 210 e 202 são arranjados diametralmente opostos nas aberturas 203, 204 do porta-hidrofone 21. Uma capa externa metálica flexível 22 protege os hidrofones do contato

direto com a água. Cada hidrofone consiste de um tubo vazado de material piezo-cerâmico. A pressão provoca deformação do tubo que, por sua vez, gera um sinal elétrico que adequadamente amplificado e calibrado serve para medição da pressão.

[0041] Dependendo do tipo de serpentina, um ou mais membros de reforço 23 de fios trançados correm através da serpentina, ao longo do comprimento de seus segmentos ou ao longo de todo seu comprimento. Um cabo tronco para transmissão de dados, compreendendo uma pluralidade de condutores elétricos e/ou fibras ópticas 24 comunicam dados ao longo do comprimento da serpentina de/para um navio sísmico. O porta-hidrofone 21 mostrado é um dentre um grande número de porta-hidrofones distribuídos ao longo da serpentina. Uma serpentina tipicamente inclui câmaras adicionais (não mostradas) entre os porta-hidrofones a serem preenchidas com um líquido (por exemplo, querosene) e/ou material de flutuação sólido (tal como espuma), permitindo ajustar flutuabilidade da serpentina.

[0042] Tipicamente, os hidrofones usados em serpentinas sísmicas marítimas são dispositivos cilíndricos com o eixo geométrico principal (X) paralelo ao eixo geométrico principal da serpentina, de modo que a aceleração da serpentina na direção das linhas transversal (Y) e vertical (Z) seja cancelada. O eixo geométrico Y e o eixo geométrico Z são ambos mostrados na figura 2 com o eixo geométrico X (não mostrado), (eixo geométrico da serpentina) salientado.

[0043] É conhecido que o gradiente de pressão vertical em uma localização X ao longo da serpentina pode ser medido usando 2 hidrofones a uma certa distância vertical.

O gradiente de pressão vertical dP/dz pode ser calculado a partir de 2 gravações de hidrofone verticalmente separadas com a subtração das duas medições.

$$[1] \quad dP(x)/dz = (P_1(x) - P_2(x)) / dz$$

onde,

$P_1(x)$ e $P_2(x)$ indicam as pressões respectivamente medidas pelo hidrofone de cima 201 e hidrofone de baixo 202.

[0044] A pressão total pode ser determinada a partir do sinal de um dos hidrofones ou da média das duas medições.

[0045] No arranjo de hidrofone vertical da figura 2, a medição de gradiente de pressão vertical não é sensível à aceleração em linha ou gradiente de pressão em linha porque ambos sensores de pressão têm a mesma coordenada (X). Por conseguinte, os dados de gradiente de pressão serão menos contaminados.

[0046] Na figura 3, uma variante do grupo de hidrofones acima é mostrada. O exemplo do porta-hidrofone 31 inclui um hidrofone central 303 que é adicionado ao grupo de 2 hidrofones verticais separados 301 e 302, como descrito. Uma vez que os outros elementos da figura 3 já foram descritos na figura 2, utilizou-se um número equivalente e omitido uma descrição adicional destes elementos. Na variante da figura 3, é considerado vantajoso o fato de a medição do gradiente de pressão poder ser efetivamente conseguida por conexão física, conectando eletricamente o pólo (+) de um hidrofone com o pólo (-) do outro, e vice-versa. A diferença de potencial entre as conexões produz a diferença de pressão dP . O terceiro hidrofone adicional 303 é usado para a medição de pressão média P .

[0047] Por causa de a diferença entre dois sinais de

hidrofone ser muito pequena, esta subtração executada localmente nos sensores antes de digitalização é potencialmente mais precisa que o arranjo da figura 2.

[0048] No exemplo da figura 4, 2 hidrofones 401 e 402 são usados para determinar a diferença de pressão $P_1 - P_2$, e a soma de pressão $P_1 + P_2$ usando um cilindro elétrico ou uma rede apropriada 44 de condutores. Os hidrofones 401 e 402 são conectados de tal modo que uma saída do circuito 44 seja proporcional à diferença entre os hidrofones e, portanto, ao gradiente de pressão, enquanto o outro é proporcional à soma e à pressão média entre os dois hidrofones, i.e. $P_1 - P_2$ e $P_1 + P_2$, respectivamente. Uma vez que outros elementos da figura 4, já foram descritos na figura 2, números equivalentes foram usados e pôde ser omitida uma descrição adicional destes elementos.

[0049] Vale notar que uma grande faixa dinâmica do sistema de gravação é necessária para se alcançar a precisão requerida de medição do gradiente de pressão.

[0050] A resposta de amplitude teórica de dois hidrofones em uma dada separação vertical para uma onda de pressão que se propaga verticalmente em função da frequência e separação de sensor pode ser expressa como:

$$[2] \quad F(\omega) = \exp(-ikz) - \exp(ikz) = 1 + i2\text{sen}(\omega z/c)$$

onde,

z é metade da separação de sensor vertical. A resposta $F(\omega)$ foi modelada para 6 diferentes separações de sensor: 2 cm (51), 6 cm (52), 20 cm (53), 1 metro (54), 2 metros (55) e 5 metros (56), e lançada na figura 5. Por exemplo, no caso de uma separação de 6 cm entre hidrofones, refletindo limite superior de separação vertical entre hidrofones de um grupo

dentro de um cabo serpentina, a curva 52 prevê um sinal de gradiente de pressão com respeito à pressão naquela frequência de -57 dB a 5 Hz, -38 dB a 50 Hz, e -32 dB a 100 Hz.

[0051] A amplitude do sinal de gradiente de pressão diminui com o decréscimo da frequência, a 5 Hz é 0,001412 vezes mais fraco que o sinal de pressão (-57 dB). Com respeito a uma saída digitalizada, isto significa que os primeiros 10 bits significativos de uma gravação de pressão não são usados (i.e., zeros). Quando se subtrai os hidrofones antes da gravação, não ocorre esta perda de bits, embora um pré-amplificador adicional possa ser requerido para amplificar o sinal de gradiente mais fraco.

[0052] Através da medição e sabendo o gradiente de pressão dP/dz , vários métodos conhecidos podem ser aplicados para atenuar ou eliminar fantasmas dos dados sísmicos. Tais métodos estão descritos, por exemplo, no Pedido de Patente Internacional publicado WO 02/01254 e Patente do Reino Unido GB 2363459.

[0053] É conhecido, por exemplo, o uso do gradiente de pressão vertical dado por:

$$P^u(x) = 0.5 \left[P(x) + \frac{1}{ik_z} * dP(x) / dz \right]$$

[3]

onde, $P^u(x)$ é o campo de onda sem fantasmas crescente na X ao longo do serpentina, $p(x)$ é a gravação de pressão bruta, e k_z o número de onda vertical ou domínio FK usando dados de serpentina e a relação entre o número de onda linear horizontal e vertical, ignorando o número de onda transversal.

$$[4] \quad k^2 = \omega^2 / c^2 = k_x^2 + k_z^2$$

[0054] Um dos maiores problemas a ser superado com a presente invenção é provocado pela rotação da serpentina em torno de seu eixo geométrico (X) longitudinal. É sabido que a serpentina pode torcer e virar daí removendo de suas posições desejadas os hidrofones verticalmente arranjados. Esta rotação da serpentina em torno de seu eixo geométrico principal introduz um erro na medição de gradiente de pressão vertical das mudanças de hidrofones.

[0055] Na prática, a rotação de serpentina pode ocorrer durante lançamento ou em operação. Ângulos de rotação de serpentina de até 360° já foram observados. Em um ângulo de 90° , um par de hidrofones, tal como descrito acima nas figuras 2 a 4, não provê separação vertical e nenhum gradiente de pressão vertical pode ser medido.

[0056] Mas mesmo com ângulos menores que 90° , introduz-se um erro na medição do gradiente de pressão. O erro devido a pequenos ângulos de rotação (rotação YZ) está mostrado na figura 6 em pontos que ilustram uma atenuação do sinal de gradiente em separação vertical de 6 cm para ângulo de rotação de 5° (61), 10° (62) e 15° (63). Em um ângulo de 10° , por exemplo, a curva 62 dá um erro de $-36,2$ dB, quase constante com a frequência.

[0057] Para reduzir o erro gerado pela rotação da serpentina, a presente invenção inclui meios para determinar o ângulo de rotação de um ou mais grupos de hidrofones na serpentina lançada.

[0058] Em uma primeira configuração, o ângulo de rotação do cabo pode ser medido usando um ou mais inclinômetros (ou giroscópios) que medem o ângulo de linha transversal com a horizontal. Tais dispositivos inclinométricos têm sido

usados em cabos de fundo de mar mais modernos.

[0059] Uma outra configuração preferida faz um uso novo dos sistemas de posicionamento acústico existentes 112 como descrito acima com referência à figura 1. Tal sistema de posicionamento acústico consiste de transceptores sônicos de alta frequência (1500-4500 Hz) em cada serpentina. Usualmente, os sinais emitidos por estas fontes são escolhidos por outros transceptores no arranjo de serpentina, daí provendo informação de posicionamento relativo. Na presente invenção são usados hidrofones para receber sinais de transceptores sônicos.

[0060] Para fontes acústicas localizadas em serpentinas próximas na mesma elevação que do grupo de hidrofones, os tempos de chegada do sinal acústico direto para os dois hidrofones verticais são idênticos. Isto muda quando os hidrofones do grupo giram em torno do eixo geométrico da serpentina. Um dos hidrofones é deslocado para mais próximo da fonte acústica, enquanto o outro é afastado da mesma. Uma medição precisa dos respectivos tempos de chegada em combinação com as posições relativas conhecidas dos hidrofones produz o ângulo de rotação.

[0061] Tal medição se estende a outros arranjos geométricos dentro de um grupo de hidrofones, desde que os hidrofones mantenham uma distância fixa entre si.

[0062] Como alternativa ao uso de sinal direto, reflexões de fundo de mar do sinal de transceptor sônico ou mesmo de sinais facilmente detectáveis gerados por fontes sísmicas 110 podem ser usadas para determinar diferenças no tempo de percurso entre os hidrofones de um grupo e daí seu ângulo de rotação.

[0063] Usando, por exemplo, fonte sísmica, posições de recepção e profundidade de água, a reflexão de fundo de mar dentro do ângulo esperado de chegada pode ser calculada e comparada com uma estimativa do gradiente de pressão.

[0064] Ao invés de usar uma fonte sísmica ou sônica controlada, as diferenças na pressão hidrostática normal podem ser exploradas para determinar as profundidades relativas dos hidrofones. À medida que o hidrofones giram, a altura da coluna de água muda e, por conseguinte, a pressão estática. Na patente U.S. N° 4.547.869, tal método é usado para sensores de pressão de fibra, que comumente são mais sensíveis a mudanças de pressão mais lentas ou quase-estáticas que hidrofones cerâmicos.

[0065] Uma vez conhecido o ângulo de rotação α com respeito à vertical, seu efeito sobre a medição de gradiente de pressão pode ser corrigido usando:

$$[5] \quad dP/dz = (P_1 - P_2) / (dz \cos \alpha)$$

[0066] Este método será melhor aplicado em ângulos de rotação próximos ao eixo vertical, enquanto para ângulos próximos do eixo horizontal o gradiente de pressão não é medido quando a diferença $P_1 - P_2$ chega a zero. Isto se reconhece como sendo uma fraqueza das configurações acima e as configurações a seguir e os exemplos da presente invenção demonstram variantes que superam tal fraqueza.

[0067] Em uma primeira destas configurações preferidas da presente invenção mostrada na figura 7A, três hidrofones 701, 702, 703, são incluídos em um grupo, sendo que cada hidrofone é localizado em um vértice de triângulo que por sua vez está orientado segundo plano transversal vertical, i.e. perpendicular ao eixo longitudinal do cabo. O mesmo grupo de

hidrofones 701, 702, 703, é mostrado na figura 7B com um inclinômetro tipo MEMS de estado sólido 71. O inclinômetro determina rotação da seção envolvente do cabo serpentina, e, por conseguinte, a orientação dos três hidrofones 701, 702, 703. Os inclinômetros 71 podem ser colocados no local de cada hidrofone, ou serem mais espaçadamente distribuídos ao longo da serpentina. Neste caso, se utilizam modelos mecânicos da serpentina interpolar a rotação das seções de serpentina entre dois inclinômetros.

[0068] Um triângulo equidistante $d_{12}=d_{13}$ é mostrado na figura 7C para ilustrar o relacionamento geométrico e distâncias entre hidrofones. A configuração desta figura 7 tem a vantagem de o gradiente de pressão vertical poder ser obtido por qualquer ângulo de rotação de serpentina, incluindo 90° . Um benefício adicional é o fato de o ruído de interferência sísmica a partir de outras fontes acústicas poder ser reduzido, como será explicado em mais detalhes a seguir.

[0069] Uma vez conhecida a orientação, pode ser calculado gradiente vertical. A pressão considerada será a média das três medições de pressão. Para uma configuração de triângulo equilátero como mostrado na figura 7, o gradiente de pressão vertical pode ser calculado em função do ângulo de rotação de serpentina α por:

$$[6] \quad dP/dz = (P_1 - P_2) / (2d_{12} \cos(30 + \alpha)) + (P_1 - P_3) / (2d_{13} \cos(30 - \alpha))$$

onde,

d_{12} e d_{13} são as distâncias entre hidrofones 701 e 702 e 701 e 703, respectivamente como indicado na figura 7B.

[0070] Ao invés de gravar os sinais de hidrofone diretamente, o arranjo da figura 7 pode ser ampliado usando

um circuito elétrico, como mostrado na figura 4. Saídas representando várias combinações lineares (adições/subtrações) das medições de hidrofone então poderão ser geradas. Por exemplo, assim será possível produzir pressão média $P_1+P_2+P_3$ e as diferenças P_1-P_2 e P_1-P_3 .

[0071] Para um ângulo de rotação de serpentina conhecido, o gradiente de pressão vertical pode então ser calculado usando equação 6.

[0072] Outra configuração alternativa está na figura 8, com dois sensores de gradiente de pressão ortogonais, cada um deles tendo dois hidrofones conectados 801-804 em combinação com um quinto hidrofone 805. Esta configuração é uma extensão do grupo de hidrofones mostrado na figura 3. E similarmente ao exemplo da figura 4, o hidrofone central 805 do grupo da figura 8 pode ser omitido quando dois pares de hidrofones são ambos somados e subtraídos usando um circuito elétrico antes da digitalização.

[0073] Adicionalmente a ser capaz de operar em todos ângulos de rotação trata-se de uma vantagem adicional da configuração o fato de o gradiente de pressão transversal dP/dy poder ser calculado e usado para reduzir interferência sísmica. O gradiente de pressão transversal será dominado por interferência sísmica quando energia relativa à fonte se propaga predominantemente no plano vertical em linha, assumindo que as linhas sísmicas sejam predominantemente linhas de mergulho. Algum sinal relativo à fonte remanescente pode ser eliminado usando filtro FK aplicado ao gradiente de pressão de linha transversal tomado de disparo comum. A contribuição do ruído de interferência sísmica à gravação de pressão é dada por:

[7]

$$P_{SI} = [dP/dy] = \exp(-k_y y) / [\exp(-k_y y) - \exp(ik_y y)]$$

$$P_{SI} = [dP/dy] / [1 - 2i \sin(ik_y y)]$$

[0074] A equação 7 requer um número de onda transversal k_y que pode ser estimado, quando conhecido o ângulo relativo da fonte de interferência sísmica com respeito à orientação de serpentina. O campo de onda de pressão devido à interferência sísmica então é subtraído do campo de pressão total.

$$[8] \quad P_{ND SI} = P - P_{SI}$$

[0075] Ao invés desta simples subtração, a interferência sísmica também pode ser eliminada com filtragem adaptativa como descrito, por exemplo, no Pedido de Patente Internacional WO 97/25632.

[0076] No exemplo acima, os hidrofones formando um grupo são arrançados em um plano essencialmente perpendicular ao eixo geométrico principal do cabo serpentina. No entanto, para muitas aplicações sísmicas é vantajoso gravar tantos componentes do campo de onda quanto possível dentro das restrições de equipamento. Tal aquisição completa ou quase-completa pode ser realizada usando pelo menos um hidrofone adicional localizado fora do plano definido pelos outros hidrofones. O hidrofone adicional pode ser quer parte do mesmo grupo, i.e. perto dos outros hidrofones do grupo ou membro de um grupo vizinho mais distante, preferivelmente um grupo vizinho de hidrofones.

[0077] No exemplo da figura 9, é mostrada uma vista em perspectiva de uma seção de uma serpentina com dois porta-hidrofones vizinhos 91, 92. Os porta-hidrofones são feitos de material plástico estrutural com furos para que os cabos 93,

94, 95 passem ao longo do comprimento da seção de serpentina. Os dois porta-hidrofones têm baias para montar seis hidrofones 901-904, sendo que somente quatro dos quais são visíveis nesta vista. Os porta-hidrofones adicionalmente incluem anéis seladores 911, 912 e 921, 922 para deslizar capa externa (não mostrada) sobre a serpentina. O espaçamento típico entre os dois grupos de hidrofones é 3,125 metros.

[0078] O gradiente de pressão em linha dP/dx pode ser calculado combinando a saída de um grupo de hidrofones, tal como três hidrofones no porta-hidrofones 91, com a saída de um hidrofone do grupo vizinho no porta-hidrofones 92. A interferência sísmica em linha então pode ser calculada usando o equivalente da equação 7 para direção x , i.e. substituindo y e k_y por x e k_x e subtraindo usando o mesmo procedimento de interferência sísmica transversal descrito. O número de onda em linha k_x , por exemplo, pode ser estimado do espectro f_k da interferência sísmica. Alternativamente, a interferência em linha pode ser eliminada usando métodos de filtragem $f-k$, ou outras técnicas convencionais.

[0079] Na figura 10 uma configuração alternativa é mostrada, onde um grupo de 3 hidrofones 1001 a 1003 em um plano perpendicular ao eixo da serpentina é combinado com um hidrofone adicional fora de plano 1004. Os 4 hidrofones 1001-1004 definem um grupo tetraédrico de hidrofones que podem ser usados para medir o campo de onda acústica completo, i.e. o gradiente de pressão nas direções em linha, vertical, e transversal. Os gradientes de pressão em linha e transversal então podem ser usados para eliminar interferência sísmica de todas direções (quase todas) seguindo o procedimento descrito acima.

[0080] As várias configurações descritas podem ser usadas em Sismômetros de Fundo de Mar (Ocean Bottom Seismometer (OBS)) ou em Cabos de Fundo de Mar (Ocean Bottom Cable (OBC)). A eliminação de fantasmas seria realizada no domínio de receptor comum, porque OBSs usualmente estão distribuídos esparsamente.

[0081] A configuração pode ser aplicada a sistemas recuperáveis ou permanentes, e pode operar em ambientes marítimos ou em zonas de transição.

[0082] A eliminação de fantasmas usando medições de gradiente de pressão pode ser benéfica em telemetria acústica submarina para eliminar fantasmas do sinal recebido antes de processamento adicional. Adicionalmente é possível melhorar o sistema de posição acústico como descrito acima através do uso de medições de gradiente de pressão eliminando fantasmas para remover reflexão de superfície do mar em sinais de fontes acústicas.

REIVINDICAÇÕES

- 1- Sistema de pesquisa sísmica marítima, caracterizado pelo fato de compreender um cabo marítimo com uma pluralidade de hidrofones (701, 702, 703), sendo que a referida pluralidade de hidrofones (701, 702, 703) é arranjada em grupos de pelo menos dois hidrofones (701, 702, 703) com uma saída de grupo sendo representativa do gradiente de pressão vertical (dp, dz) no local do grupo, o citado sistema compreendendo, adicionalmente, um ou mais transdutores eletro-mecânicos configurados para gerar sinais indicativos de um ângulo de rotação para os citados pelo menos dois hidrofones (701, 702, 703).
- 2- Sistema, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de o grupo compreender pelo menos três hidrofones (701, 702, 703).
- 3- Sistema, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de pelo menos dois hidrofones (701, 702, 703) de um grupo serem localizados em um plano perpendicular ao eixo geométrico principal ou longitudinal do cabo.
- 4- Sistema, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de pelo menos dois hidrofones (701, 702, 703) de um grupo serem localizados em um plano perpendicular ao eixo geométrico principal ou longitudinal do cabo, e de uma saída do citado grupo ser combinado com uma saída de um hifrofone adicional localizado fora do citado plano.
- 5- Sistema, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de o grupo compreender quatro hidrofones (701, 702, 703) em uma configuração tetraédrica.
- 6- Sistema, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de os pelo menos dois hidrofones (701, 702, 703)

que contribuem com a saída de grupos representativos do gradiente de pressão vertical serem localizados em uma seção do cabo menor que 10 cm de comprimento, medido na direção principal ou longitudinal do citado cabo.

7- Sistema, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de cada hidrofone (701, 702, 703) de um grupo ser arranjado a uma distância igual dos demais sensores do grupo.

8- Sistema, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de os hidrofones (701, 702, 703) de um grupo serem conectados para prover uma saída representativa de uma combinação linear de sinais individuais de sensor antes da digitalização.

9- Sistema, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de um ou mais transdutores eletro-mecânicos serem uma pluralidade de inclinômetros (71) distribuída ao longo do comprimento do cabo.

10- Sistema, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de os um ou mais transdutores eletro-mecânicos serem uma ou mais fontes acústicas ou sônicas.

11- Sistema, de acordo com a reivindicação 10, caracterizado pelo fato de os um ou mais transdutores eletro-mecânicos serem uma ou mais fontes acústicas localizadas em cabos rebocados em paralelo, tais cabos portando grupos de pelo menos dois hidrofones (701, 702, 703).

12- Sistema, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de os um ou mais transdutores eletro-mecânicos serem adaptados para operar independentemente da pressão hidrostática.

13- Cabo sísmico marítimo, tendo uma pluralidade de hidrofones, caracterizado pelo fato de a citada pluralidade

de hidrofones (701, 702, 703) ser arranjada em grupos de pelo menos dois hidrofones com a saída de grupo representativa do gradiente de pressão vertical (dp , dz) no local do grupo, para uso no sistema de acordo com a reivindicação 1.

14- Método de aquisição de um campo de onda acústica, tendo componentes em linha, transversal, e vertical, usando o sistema de pesquisa sísmica marítima compreendendo um cabo marítimo com uma pluralidade de hidrofones, caracterizado pelo fato de compreender:

- utilizar uma pluralidade de hidrofones (701, 702, 703) disposta em um cabo marítimo para medir o componente vertical do campo de onda acústico;
- gerar uma saída sendo representativa do gradiente de pressão vertical;
- utilizar um ou mais transdutores eletro-mecânicos para gerar sinais indicativos de um ângulo de rotação de uma pluralidade de hidrofones (701, 702, 703); e
- utilizar os referidos sinais indicativos do citado ângulo de rotação, da referida pluralidade de hidrofones (701, 702, 703) para corrigir o referido gradiente de pressão vertical (dp , dz) para efetuar o ângulo de rotação.

1/6

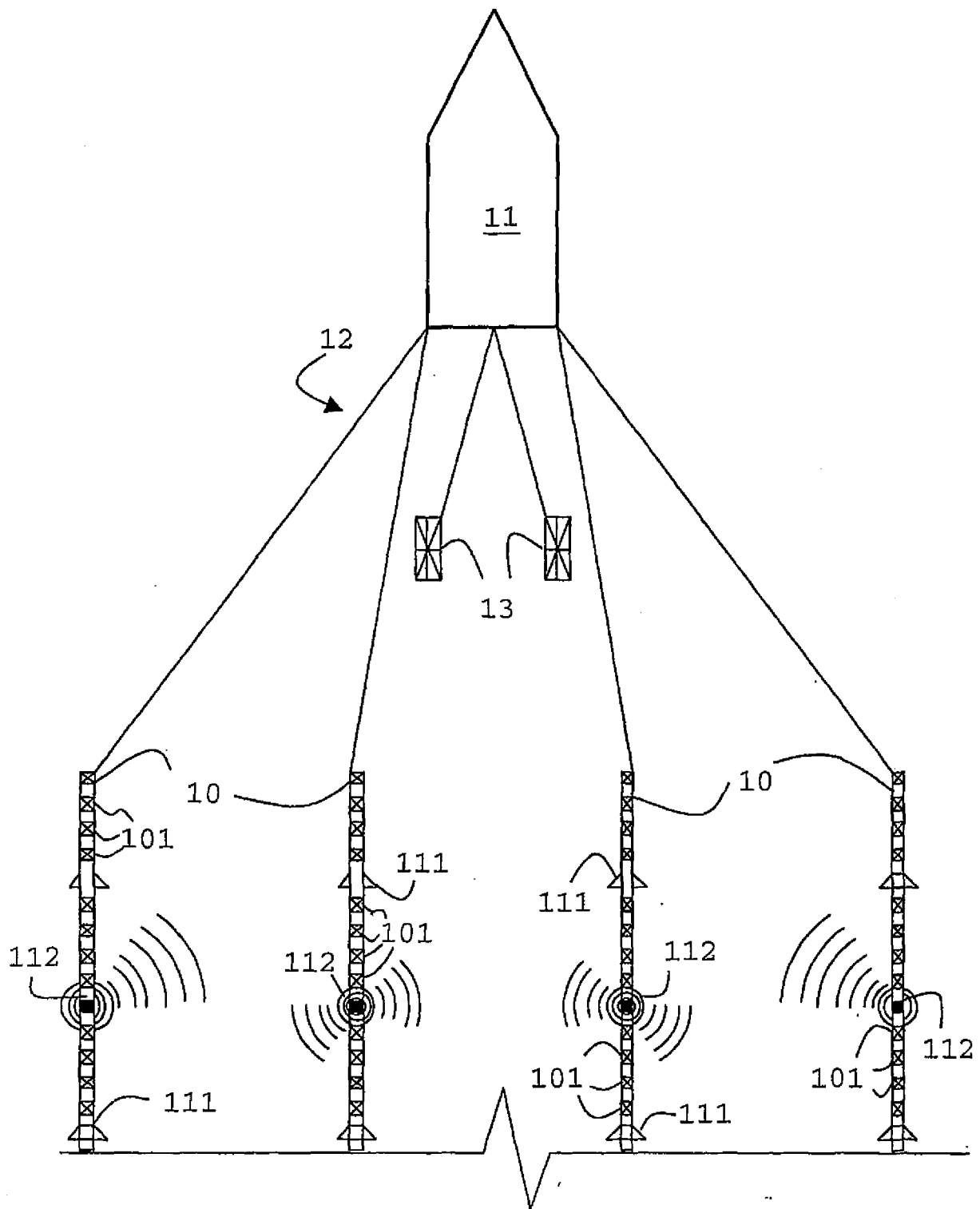


FIG.1

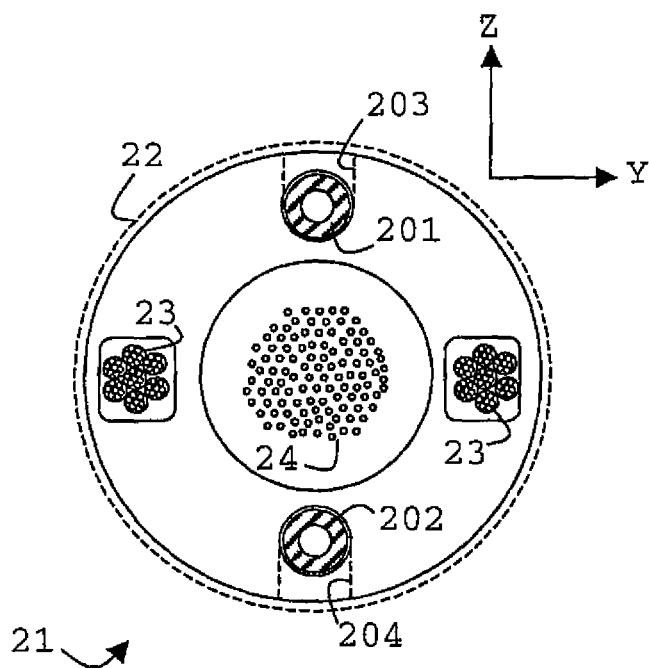


FIG. 2

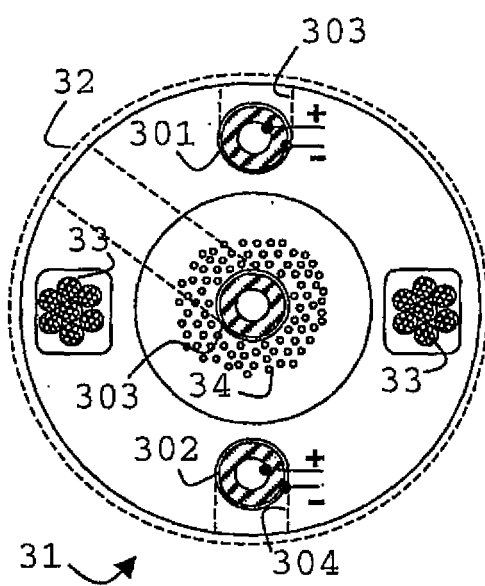


FIG. 3

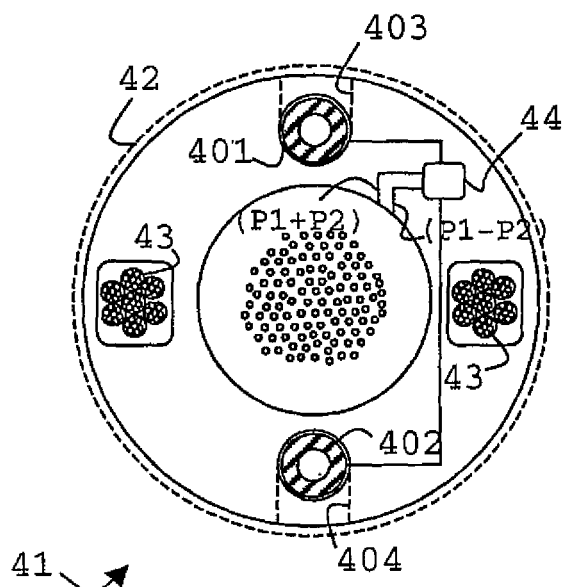


FIG. 4

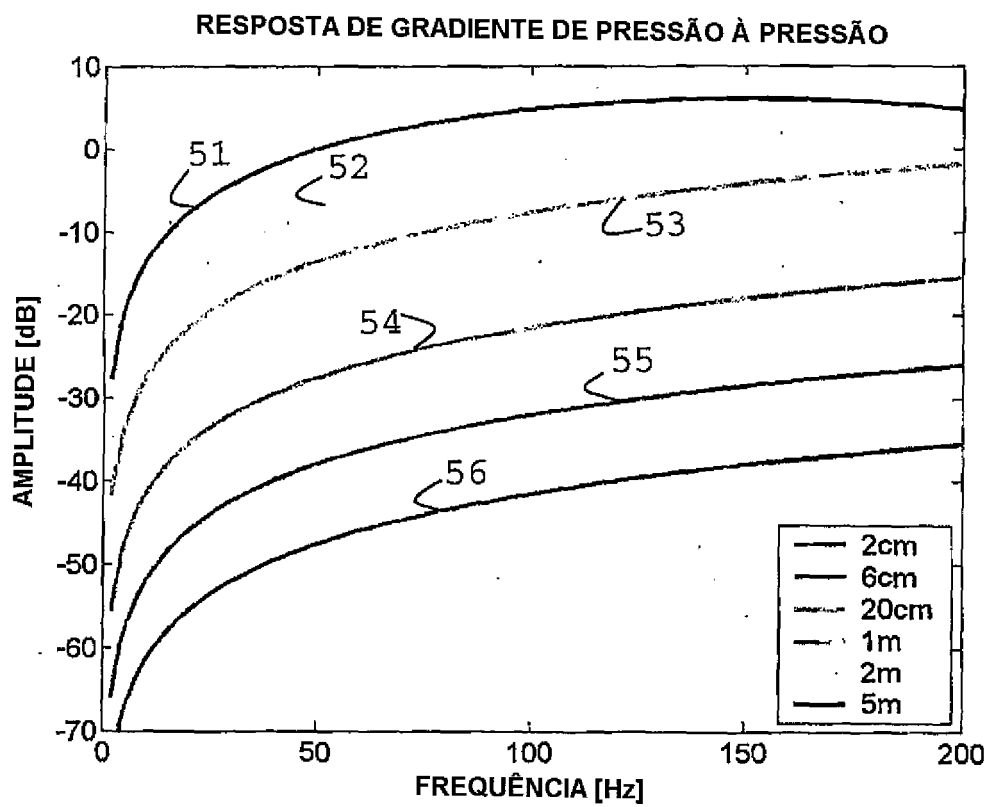


FIG.5

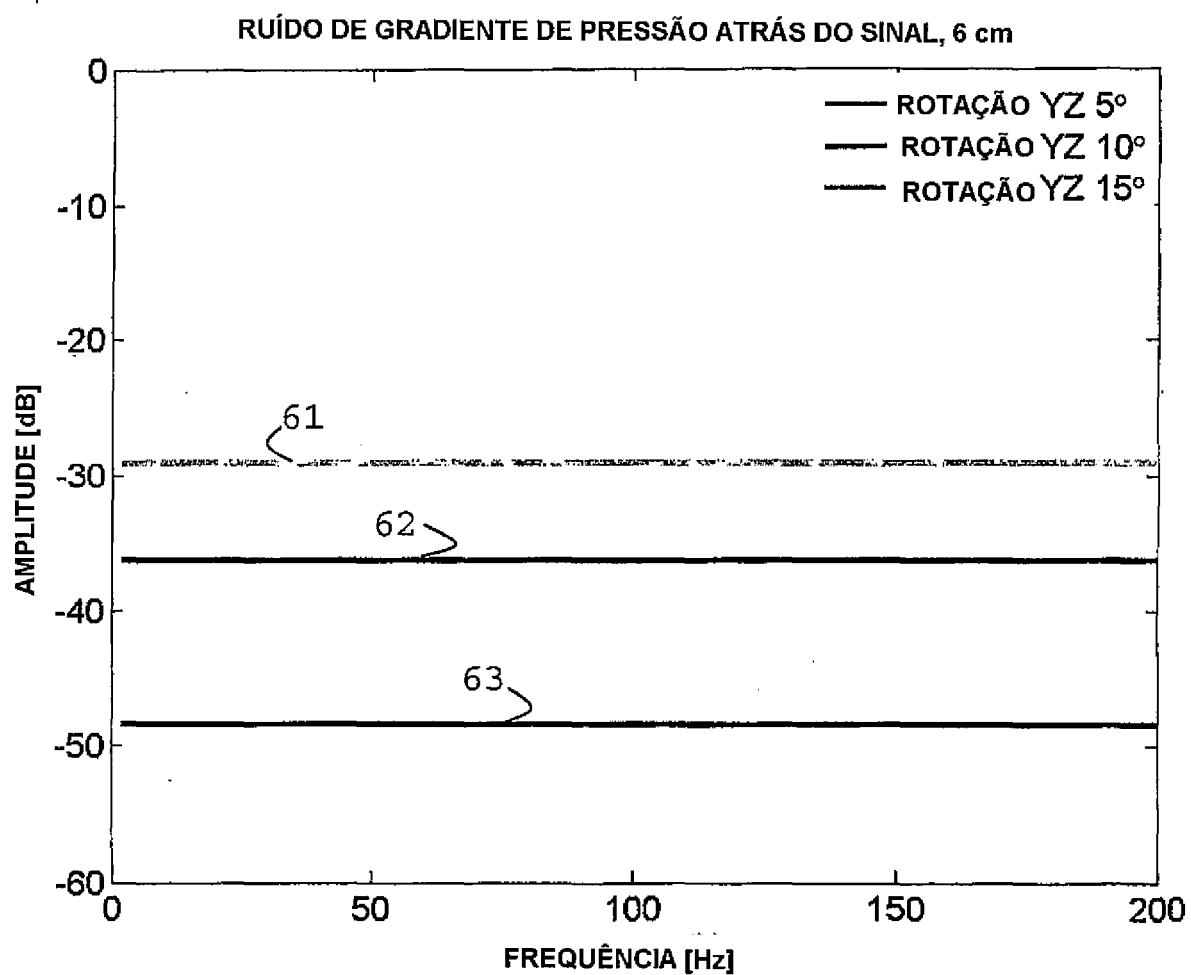


FIG.6

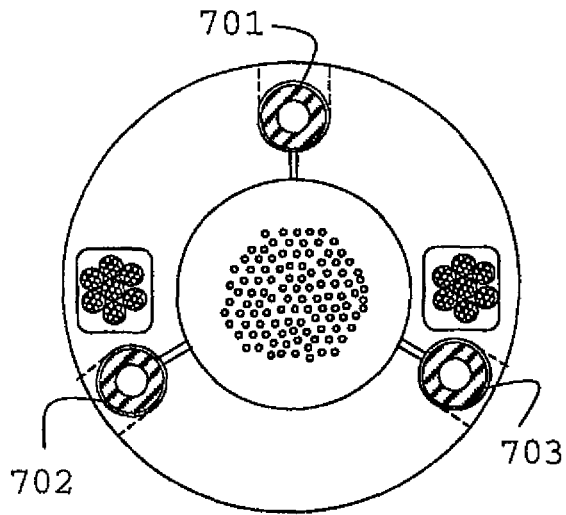


FIG. 7A

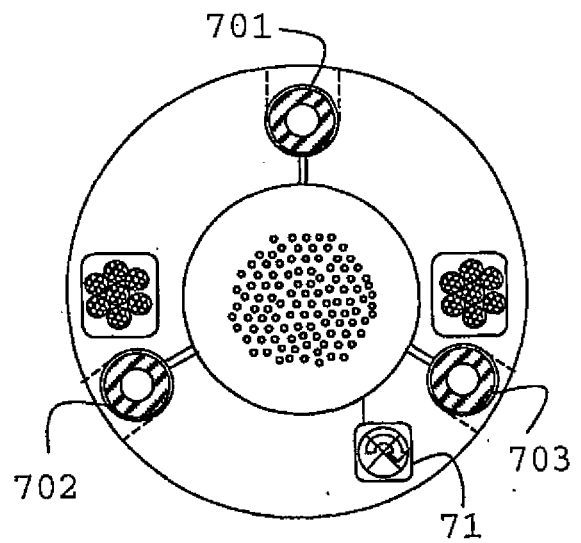


FIG. 7B

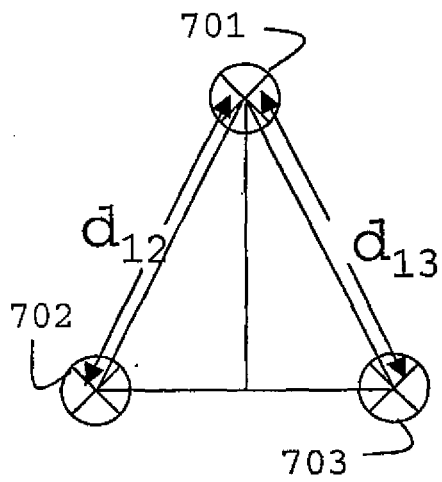


FIG. 7C

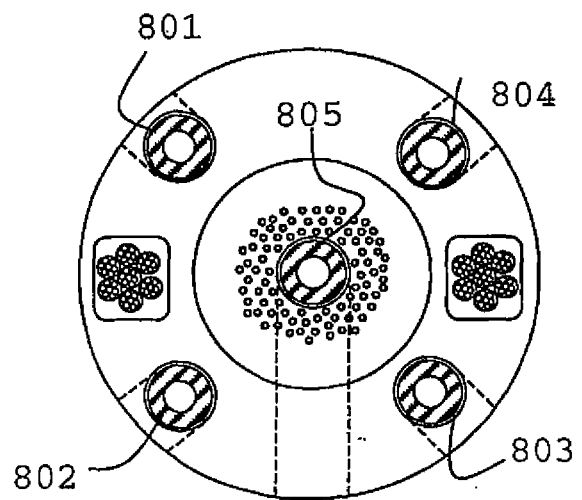


FIG. 8

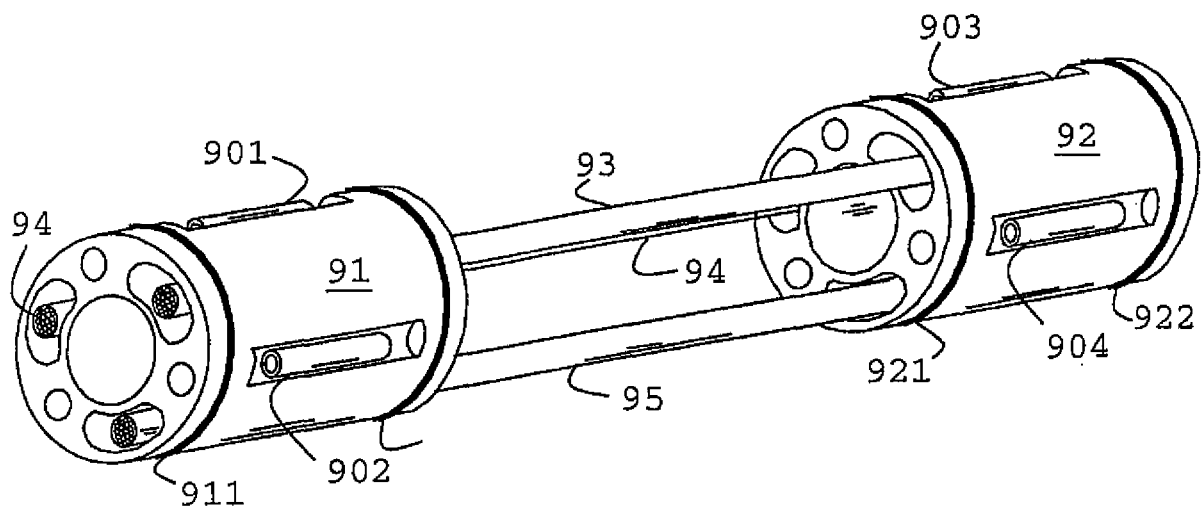


FIG.9

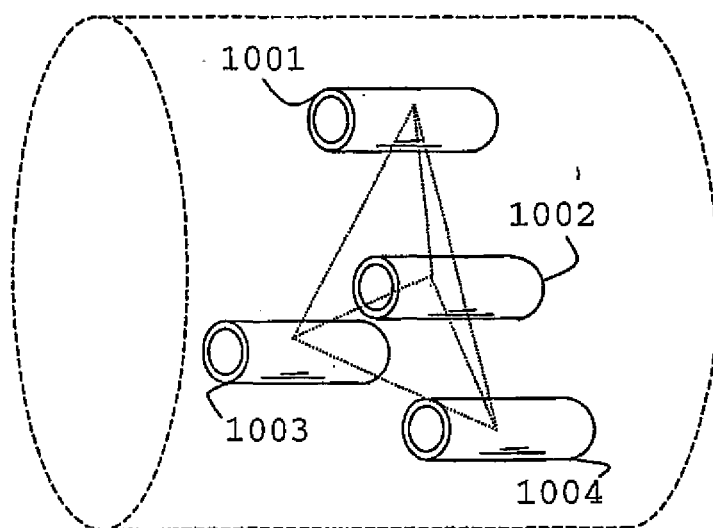


FIG.10