



(12) PATENT

(19) NO

(11) 334323

(13) B1

NORGE

(51) Int Cl.

G01V 1/38 (2006.01)

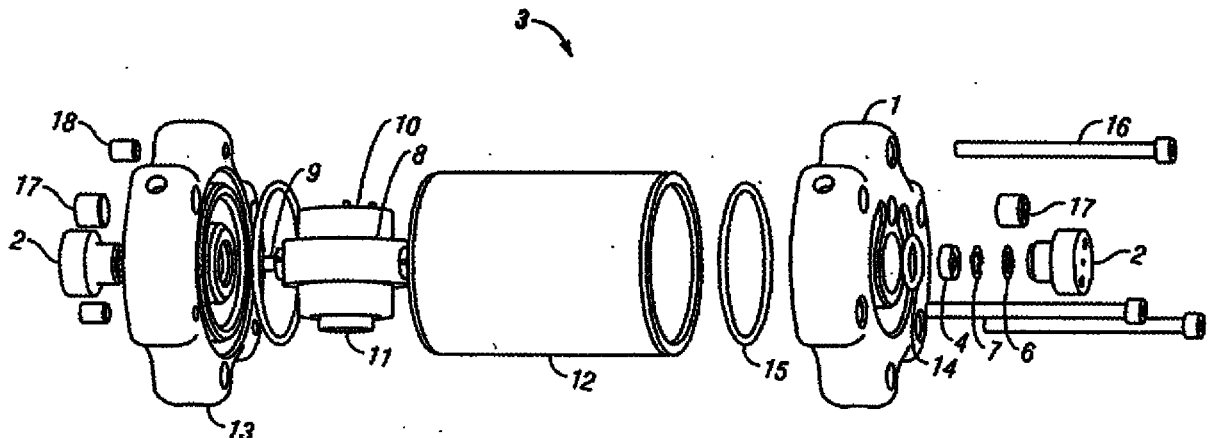
G01V 1/18 (2006.01)

Patentstyret

(21)	Søknadsnr	20033236	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr	
(22)	Inng.dag	2003.07.17	(85)	Videreføringsdag	
(24)	Løpedag	2003.07.17	(30)	Prioritet	2002.08.30, US, 233266
(41)	Alm.tilgj	2004.03.01			
(45)	Meddelt	2014.02.03			
(73)	Innehaver	PGS Americas Inc, 16010 Barker's Point Lane, Suite 600, US-TX77079 HOUSTON, USA			
(72)	Oppfinner	Stig Rune Lennart Tenghamn, 3303 Sage Terrace Drive, US-TX77450 KATY, USA Audun Sødal, Hasselbakkveien 10, 7053 RANHEIM, Norge André Stenzel, 11003 Myrtle Drive, US-TX77469 RICHMOND, USA			
(74)	Fullmektig	Acapo AS, Postboks 1880 Nordnes, 5817 BERGEN, Norge			

(54)	Benevnelse	Apparat og fremgangsmåte for innsamling av multikomponente geofysiske data
(56)	Anførte publikasjoner	US 6172940 B1 US 6061302 A
(57)	Sammendrag	

I en utførelsesform omfatter oppfinnelsen en partikkelhastighetssensor som inkluderer en innkapsling med en geofon anbrakt innenfor innkapslingen. Et fluid som i hovedsak omgir geofonen er inkludert inne i innkapslingen. Partikkelhastighetssensoren har en akustisk impedans innenfor området fra omkring 750,000 Newtonsekunder per kubikkmeter (3 N s m) til omkring 3,000,000 Newtonsekunder per kubikkmeter (3 N s m). I en annen utførelsesform omfatter oppfinnelsen en fremgangsmåte for geofysisk undersøkelse der et seismikksignal dannes i et vannlegeme og detekteres med flere samlokaliserte partikkelhastighets-sensorer og trykkgradientsensorer plassert innenfor en 20 seismikkabel. Utgangssignalet fra enten en av eller både partikkelhastighets-sensorene eller trykkgradientsensorene modifiseres for i hovedsak å utjevne utgangssignalene fra partikkelhastighets-sensorene og trykkgradientsensorene. Utgangssignalene fra partikkelhastighets-sensorene og trykkgradientsensorene kombineres så.



OPPFINNELSENS BAKGRUNN

1. Oppfinnelsens område.

5 Foreliggende oppfinnelse vedrører maringeofysiske undersøkelser. Mer spesielt er oppfinnelsen relatert til sensorer for å detektere seismikksignaler og til innsamling av marinseismikkdata.

2. Beskrivelse av relevant teknikk.

10 Ved seismikkundersøkelser fremskaffes geofysiske data ved å tilføre akustisk energi til jordgrunnen ved overflaten og å detektere seismikkenergi som reflekteres fra grenseflatene mellom forskjellige lag i formasjonene under overflaten. Seismikkbølgen reflekteres når det er en forskjell i
15 impedans mellom laget over grenseflaten og laget under grenseflaten.

Ved marinseismiske undersøkelser benyttes vanligvis en seismisk sjokkgenerator, slik som en luftkanon, for å danne en akustisk puls. Den resulterende seismikkbølgen reflekteres
20 tilbake fra grenseflaten under overflaten og detekteres av sensorer som er utplassert i vannet eller på sjøbunnen.

I en typisk marinseismisk operasjon, taues en streamerkabel bak et undersøkelsesfartøy ved en vanddybde mellom omkring seks og omkring ni meter. Hydrofoner er inkludert i
25 streamerkabelen for å detektere seismikksignaler. En hydrofon er en nedsenkbar trykkgradientsensor som konverterer trykkbølger til elektriske signaler som vanligvis registreres for signalbehandling, og evalueres for å beregne egenskapene for jordens undergrunn (subsurface).

30 Etter at de reflekterte bølgene når streamerkabelen, fortsetter bølgen å forplante seg til vann/luft grenseflaten ved vannoverflaten, som bølgen reflekteres nedover fra, og igjen detekteres av hydrofonene i streamerkabelen. Refleksjonskoeffisienten ved overflaten er nesten lik en i

størrelse og med negativt fortegn. Seismikkbølgen vil være faseskiftet 180 grader. Bølgen som vandrer nedover henvises vanligvis til som "ekko"-signalet (eng.: "ghost" signal), og tilstedeværelsen av denne ekkorefleksjonen danner et hakk i 5 spektralkurven (eng.: spectral notch) i det detekterte signalet. På grunn av hakket i spektralkurven, forsterkes noen frekvenser i det detekterte signalet og noen frekvenser dempes.

På grunn av ekkorefleksjonen virker vannoverflaten som 10 et filter, noe som gjør det vanskelig å registrere data utenfor en valgt båndbredde uten for høy demping eller hakk i spektralkurvene for de registrerte dataene.

Maksimum demping opptrer ved frekvenser hvor avstanden mellom den detekterende hydrofonen og vannoverflaten er lik 15 en halv bølgelengde. Maksimum forsterkning vil opptre ved frekvensene der avstanden mellom den detekterende hydrofonen og vannoverflaten er en kvart bølgelengde. Bølgelengden for den akustiske bølgen er lik hastigheten delt på frekvensen, og hastigheten for en akustisk bølge i vann er omkring 1500 20 meter per sekund. Tilsvarende er plasseringen i frekvensspektret for det resulterende hakket i spektralkurven lett å bestemme. For eksempel, for en streamer ved en vanddybde på 7 meter, som illustrert ved kurve 54 på Figur 1, vil maksimum demping opptre ved en frekvens på omkring 107 Hz og maksimum 25 forsterkning vil opptre ved en frekvens på omkring 54 Hz.

Det har ikke vært praktisk å taue kabler dypere enn omkring 9 meter fordi posisjonen av hakket i frekvensspektret for signalet som detekteres av en hydrofon i hovedsak minsker 30 anvendeligheten av de registrerte dataene. Det har heller ikke vært praktisk å taue kabler ved dybder mindre enn omkring 6 meter, fordi ekkosignalene som reflekteres fra vannoverflaten i hovedsak demper signalet som detekteres av en hydrofon innenfor frekvensbåndet av interesse.

Det er også vanlig å utføre marinseismiske operasjoner 35 der sensorer er plassert på sjøbunnen. Slike operasjoner

betegnes vanligvis som "havbunnsseismikk"-operasjoner. I havbunnsseismikkoperasjoner benyttes både hydrofoner og geofoner for å registrere seismikkdataene, med geofonen vanligvis plassert i direkte kontakt med havbunnen. For å
5 forbedre kontakten mellom geofonen og sjøbunnen, er geofon-sammenstillingen vanligvis laget for å være ganske tung, med en typisk tetthet på mellom 3 og 7 gram per kubikkcentimeter.

En geofon detekterer et partikkelhastighetssignal, mens hydrofonen detekterer et trykkgradientsignal. Geofonen har
10 retningsfølsomhet, mens hydrofonen ikke har det. Tilsvarende vil de oppadgående bølgefeltssignalene detektert av geofonen og hydrofonen være i fase, men de nedadgående bølgefelt-signalene detektert av geofonen og hydrofonen vil være 180 grader ute av fase. Forskjellige teknikker har blitt fore-
15 slått for å bruke denne fasedifferansen til å redusere hakkene i spektralkurven forårsaket av ekkorefleksjonen.

US-patent nr. 4,486,865 til Ruehle, for eksempel, viser et system som sies å undertrykke ekkorefleksjoner ved å
20 kombinere utgangssignalene fra trykk- og hastighets-detektorer. Detektorene er anbrakt parvis, en trykkdetektor og en hastighetsdetektor i hvert par. Et filter sies å endre frekvensinnholdet for i det minste en av detektorene slik at ekko-refleksjonene kansellerer hverandre når utgangssignalene kombineres.

25 US-patent nr. 5,621,700 til Moldovenu viser også bruk av minst ett sensorpar omfattende en trykksensor og en hastighetssensor i en havbunnskabel i en fremgangsmåte for å dempe ekkosignaler og gjenklang fra vannlag.

US-patent nr. 4,935,903 til Sanders m.fl. viser et
30 marinseismisk refleksjonsundersøkelsessystem som detekterer seismikkbølger som vandrer i vann ved hjelp av par av trykksensor-partikkelhastighetssensorer (for eksempel hydrofon-geofon par) eller alternativt vertikalt atskilte trykksensorer. I stedet for å filtrere for å eliminere
35 ekkorefleksjonsdata, nødvendiggjør systemet en forbedring av

primære refleksjonsdata for bruk i pre-stakk behandling ved å legge til ekkodata.

US-patent nr. 6,172,940 B1 en fremgangsmåte for å måle akustisk intensitet under vann ved hjelp av en
5 undervannsprobe som består av to geofoner der geofonene er montert på innsiden av et akustisk transparent, gummiskall som reduserer effektene av støy på grunn av strøm.

US-patent nr. 4,979,150 tilveiebringer en fremgangsmåte for marinseismikkundersøkelser som sies å dempe koherent støy
10 som resulterer fra vannkolonne gjenklang ved anvendelse av en skalafaktor på utgangssignalet fra en trykktransduser og en partikkelhastighetstransduser plassert i hovedsak ved siden av hverandre i vannet. I denne fremgangsmåten kan transduserne plasseres enten på sjøbunnen eller ved et sted i
15 vannet over bunnen, selv om sjøbunnen sies å være foretrukket.

Fire-komponent system har også blitt benyttet på sjøbunnen. Et fire-komponent system benytter en hydrofon for å detektere et trykksignal sammen med en tre-komponent geofon
20 for deteksjon av partikkelhastighetssignaler i tre ortogonale retninger: vertikal, i-linje (eng.: in line) og på-tvers (eng.: cross line). Utgangssignalet fra den vertikale geofonen benyttes i sammenheng med hydrofonsignalet til å kompensere for overflaterrefleksjonen. De tre ortogonalt
25 plasserte geofonene brukes for å detektere skjærbølger, inkludert forplantningsretningen for skjærbølgene.

Anvendeligheten av å samtidig registrere trykk og vertikal partikkelbevegelse i marinseismiske operasjoner har lenge blitt erkjent. Imidlertid må en geofon (eller
30 akselerometer) for måling av vertikal partikkelbevegelse bli opprettholdt i en passende orientering for å detektere signalet nøyaktig. Det å opprettholde en slik orientering er ikke trivielt i en marin streamer og betydelig mer problematisk enn å opprettholde en slik orientering på sjøbunnen.

Undersøkellesstreamere tauet bak marine fartøyer er vanligvis over en engelsk mil lang.

Moderne marinseismiske streamere kan benytte mer enn 10.000 transdusere. For å opprettholde en partikkelhastighetssensor (en geofon eller akselerator) i passende orientering for å detektere vertikal bevegelse, har det i tidligere kjent teknikk blitt foreslått forskjellige løsninger. Bruk av kardangoppheng har blitt foreslått gjentatte ganger. Ett eksempel er et "kardanglåssystem for seismikksensorer" beskrevet i US-patent nr. 6,061,302 til Brink m.fl. Et annet eksempel er en "dobbel kardang geofon" beskrevet i US-patent nr. 5,475,652 til McNeel m.fl. Nok et annet eksempel er en "selvorienterende retningsfølsom geofon" beskrevet i US-patent nr. 4,618,949 til Lister. Uansett, så er ingen streamere som inneholder både hydrofoner og geofoner i kommersiell bruk.

I tillegg til problemet med å opprettholde orienteringen, så har kraftig støy fra streamerkablene blitt ansett for hindrende for bruk av partikkelhastighetssensorer i streamere. Fordi spenningsutgangssignalet fra partikkelhastighetssensorer vanligvis ikke er så kraftig som utgangssignalet fra hydrofoner, har støynivået i streamerkabler vært ufordelaktig for bruk av partikkelhastighetssensorer.

I havbunnskabler er sensorene plassert på sjøbunnen og er derfor mindre utsatt for støy dannet av vibrasjoner i kabelen. Geofoner er vanligvis kardansk opphengt for å sikre en korrekt retning og lages av tung messing eller et lignende materiale for å sikre god kontakt med havbunnen. Geofonhuset er vanligvis fylt med et fluid for å forbedre koplingen mellom sensoren og sjøbunnen. På grunn av variasjon i egenskapene for sjøbunnen fra sted til sted, kan imidlertid en impedansmistilpasning mellom sjøbunnen og sensoren og sensorhuset forårsake problemer. Slik mistilpasning i impedans kan forårsake forskjellige typer forvrengninger i både hydrofonsignalet og geofonsignalet. Grenseflateeffekter for hydro-

fonen og geofonen på grunn av deres nærhet til sjøbunnen kan også endre responsen for hydrofonen og geofonen, og gir opphav til et behov for å korrigere amplitudeverdiene ved behandling for å bli i stand til å bruke signalet til elimi-

5 nering av "ekko"-refleksjonen fra overflaten.

Følgelig fortsetter det å være et behov for et forbedret system for innsamling av marinseismiske data.

OPPSUMMERING AV OPPFINNELSEN

10 I en utførelsesform omfatter oppfinnelsen en partikkelhastighetssensor som inkluderer en innkapsling med en geofon anbrakt i innkapslingen. Et fluid som i hovedsak omgir geofonen er inkludert inne i huset. Partikkelhastighets-

15 sensoren har en akustisk impedans innenfor området på omkring 750,000 Newtonsekunder per kubikkmeter (Ns/m^3) til omkring 3,000,000 Newtonsekunder per kubikkmeter (Ns/m^3).

I en annen utførelsesform omfatter oppfinnelsen en fremgangsmåte for geofysiske undersøkelser der et seismikk-signal dannes i et legeme av vann og detekteres med flere

20 samlokaliserte partikkelhastighetssensorer og trykkgradient-sensorer plassert i en seismikkabel utplassert i vannlegemet. Utgangssignalet fra en av eller både partikkelhastighets-

25 sensorer og trykkgradientsensorer modifiseres for i hovedsak å utjevne utgangssignalene fra partikkelhastighetssensorene og trykkgradientsensorene innenfor minst et valgt frekvens-

område. Utgangssignalene fra samlokaliserte partikkelhastig-

hetssensorer og trykkgradientsensorer kombineres så.

I nok en annen utførelsesform omfatter oppfinnelsen en fremgangsmåte for behandling av marinseismiske data for å

30 redusere hakkene i spektralkurven som resulterer fra ekko-refleksjoner fra overflaten der amplitude- og fasevariasjonen med frekvensen for utgangssignalet fra en hastighetssensor fra et sensorpar av en samlokalisert partikkelhastighets-

35 sensor og en trykkgradientsensor bestemmes uavhengig av en hvilken som helst variasjon i amplitude eller fase med

frekvens for partikkelhastighetssensorutgangssignalet som resulterer fra impedansmistilpasningen mellom partikkelhastighetssensoren og et medium som en seismikkbølge koples til partikkelhastighetssensoren fra. Utgangssignalet fra en av eller både partikkelhastighetssensorene og trykkgradient-sensorene modifiseres for å kompensere for den bestemte amplitude- og fasevariasjonene for å danne modifiserte utgangssignaler. De modifiserte utgangssignalene summeres så.

10 KORT BESKRIVELSE AV TEGNINGENE

Figur 1 viser frekvensspektret for et seismikksignal detektert av en hydrofon ved en vanndybde på 7 meter.

Figur 2 illustrerer et typisk utførelsesform av oppfinnelsen, der flere streamerkabler taues bak et seismikkundersøkelsesfartøy.

Figur 3 viser geofonsammenstillingen med delene forstørret eller skilt ut for illustrasjon.

Figur 4 viser et tverrsnitt av en geofonsammenstilling.

Figur 5 viser partikkelhastighetssensorer og trykkgradientensensorer i en seismisk streamerkabel.

Figurene 6A og 6B viser en typisk fase- og amplituderespons for en partikkelhastighetssensor.

Figur 7 viser den simulerte utgangsresponsen for en hydrofon og en geofon ved en vanndybde på 26 meter.

Figur 8 fremviser faktiske hydrofon- og geofondata fra en felttest med kabelen ved omkring 26 meter.

Figur 9 viser en summering av hydrofon- og geofondataene vist på Figur 8.

Figur 10 viser en simulering av streamerdata ved en-meters dypde.

BESKRIVELSE AV FORETRUKNE UTFØRELSESFORMER

Figur 2 illustrerer en vanlig konfigurasjon ved geofysiske undersøkelser der flere streamerkabler 30 taues bak

et fartøy 32. En eller flere seismikkilder 34 taues også vanligvis bak fartøyet. Seismikkilden, som vanligvis er en luftkanon, men kan også være en vannkanon eller annen type kilde som er kjent for de med vanlige ferdigheter på fag-

5 området, sender seismisk energi eller bølger inn i jordgrunnen og bølgene reflekteres tilbake av reflektorer i jordgrunnen og registreres av sensorer i streamerne.

Paravaner 35 benyttes for å holde kablene 30 i den ønskede laterale posisjonen. Oppfinnelsen kan imidlertid også

10 realiseres i seismikkabler som holdes ved en i hovedsak stasjonær posisjon i et legeme av vann, enten flytende ved en valgt dybde eller liggende på bunnen av legemet av vann, i disse tilfellene kan kilden taues bak et fartøy for å danne sjokkbølger på forskjellige steder, eller kilden kan også

15 holdes i en stasjonær posisjon. Seismikksensorer ifølge utførelsesformene av den foreliggende oppfinnelsen anbringes i streamerkabler, slik som kabler 30.

I en spesiell utførelsesform omfatter foreliggende oppfinnelse en partikkelhastighetssensor i form av en geofon-

20 sammenstilling. En slik geofonsammenstilling vises på figurene 3 og 4. Figur 3 viser geofonsammenstillingen 3 med delene forstørret eller skilt ut for illustrasjon. Figur 4 viser en tverrsnittseksjon av geofonsammenstillingen 3 på Figur 3 med de forskjellige delene sammenstilt (ikke for-

25 størret).

Det vises så til figurene 3 og 4, der geofonen 10 er montert i en innkapsling 20 omfattende en ytre hylse 12 og endekapsler 1 og 13. Geofonen 10 er sikret i en festering (eller holdeinnretning) 8. Akslinger 9 strekker seg fra

30 motsatte sider av en monteringsring inn i lagerhylsene 2. Lagre 4 som er plassert mellom akslingene 9 og lagerhylsene 2 muliggjør rotasjonsbevegelse for akslingene 9 med hensyn til lagerhylsene 2, og gir derved et kardangoppheng. Endekapsler 1 og 13 festes sammen ved hjelp av bolter 16 og gjengede

35 innsettsdeler 18. En fjær 6 gir elektrisk kontakt mellom

akslingene 9, som er elektrisk ledende og er elektrisk koplet til utgangsterminaler (ikke vist) på geofonen, og lagerhylsene 2, som også er elektrisk ledende, og som er elektrisk koplet til streamerkabelens ledningsføring. Spennskiver (eng.: thrust washers) gir forspenning av lagrene 4 for å eliminere uønsket slakk i lagrene. O-ringer 15 gir en forsegling mellom en ytre hylse 12 og endekapsler 1 og 13, og O-ringer 14 gir en forsegling mellom lagerhylsene 2 og endekapslene 1 og 13. En plugg 17 benyttes for å plugge igjen røret som fluidet føres gjennom inn i det indre av geofonkapslingen som omfatter de to endekapslene 1 og 13, og den ytre hylsen 12. Konfigurasjonen av geofonsammenstillingen som er illustrert i Figurene 3 og 4 er en spesiell versjon av en utførelsesform av oppfinnelsen og er ikke ment å være begrensende. Geofonsammenstillingen 3 er festet til et strekkbelastningselement i en seismisk kabel for fast posisjonering.

Kapslingen 20, omfattende endekapslene 1 og 13 og ytterhylsen 12, inneholder et fluid, fortrinnsvis en olje, som i hovedsak omgir geofonen. Fluidet gir kopling mellom geofonen og geofonkapslingen i geofonsammenstillingen. Fluidet bør fortrinnsvis omgi geofonen, men vil fortrinnsvis ikke fylle kapslingen slik at det gis rom for fluidekspansjon og -kontraksjon med endringer i temperatur og trykk. Fluidet har en viskositet som gir en tilstrekkelig demping av geofonbevegelsen til å redusere støy, mens det tillates tilstrekkelig bevegelse av geofonen 10 på lagrene til å opprettholde transduseren i den ønskede orienteringen. Det vil si, viskositeten av fluidet bør være høy nok til å hindre geofonen fra uønskede bevegelser, men lav nok til å forhindre geofonen fra å følge rotasjonsbevegelsen til kapslingen og en streamer som geofonsammenstillingen er montert i. En foretrukket viskositet for et slikt fluid er i området omkring 500 til omkring 5000 centistoke.

En posisjoneringsdel, slik som en vekt 11, kan bli anbrakt på den nedre siden av geofonen 10 for å lette til med å holde sensoren 10 i den ønskede orienteringen. Posisjoneringsdelen 11 kan bli formet i hovedsak av bly, selv om andre materialer som har en tetthet større enn tettheten av geofonen kan benyttes. Alternativt, eller i tillegg, kan en posisjoneringsdel (ikke vist) som har en tetthet som er lavere enn tettheten av fluidet som i hovedsak omgir geofonen 10 bli installert på den øvre siden av geofonen 10 for å hjelpe til med å holde geofonen 10 i den ønskede orienteringen.

Lokalisering av tyngdepunktet for hydrofonen under rotasjonsaksen for det kardanske opphenget som sensoren er anbrakt på vil hjelpe til med å holde geofonen i den ønskede orienteringen.

Partikkelhastighetssensoren ifølge denne oppfinnelsen er tilstrekkelig liten til å passe inn i det indre av en sylindrisk streamerkabel. Typiske indre diametre for slike sylindriske streamerkabler er enten 55 millimeter eller 66 millimeter. Rommet inne i streameren som omgir de seismiske sensorene og annen apparatur (ikke vist) plassert inne i streameren er vanligvis fylt med en væske, slik som en olje, som gir i hovedsak nøytral oppdrift for kablen. Rommet kan også bli fylt med en gel eller halvfast materiale, og streameren kan også være en streamer av et fast materiale.

I en foretrukket utførelsesform av oppfinnelsen velges tettheten for hele geofonsammenstillingen (omfattende fluidet og andre elementer i dette) for å forbedre koplingen mellom geofonsammenstillingen og dens omgivelser. Generelt oppnås den optimale koplingen når geofonsammenstillingens akustiske impedans er omkring den samme som den akustiske impedansen til dens omgivelser, noe som kan oppnås ved å gjøre tettheten for geofonsammenstillingen omkring den samme som tettheten for omgivelsene, og den akustiske hastigheten for geofon-

sammenstillingen omkring den samme som den akustiske hastigheten for dens omgivelser.

Når en akustisk bølge som vandrer i et medium møter grenseflaten til et annet medium, dannes reflekterte og overførte bølger. Videre, når grenseområdet for det andre mediet er mye mindre enn bølgelengden for den akustiske bølgen, resulterer dette i diffraksjon heller enn refleksjon. For plane bølger er den karakteristiske akustiske impedansen for et medium lik tettheten ganger hastigheten, dvs.,

$$z = \pm \rho_0 c \quad (\text{Ligning 1})$$

der, z = akustisk impedans

ρ_0 = tetthet, og

c = hastighet.

La den innfallende og reflekterte bølgen vandre i et fluid med karakteristisk akustisk impedans, $r_1 = \rho_1 c_1$, der ρ_1 er likevektstettheten for fluidet og c_1 er fasehastigheten i fluidet. La så den overførte bølgen vandre i et fluid med karakteristisk impedans $r_2 = \rho_2 c_2$. Dersom den komplekse trykkamplituden for den innfallende bølgen er P_I , den for den reflekterte bølgen er P_R , og den for den overførte bølgen er P_T , så kan trykkrefleksjonskoeffisienten R bli definert som:

$$R = \frac{r_2 - r_1}{r_2 + r_1}, \quad (\text{Ligning 2})$$

og siden $1 + R = T$, kan trykktransmisjonskoeffisienten T uttrykkes som:

$$T = \frac{2r_2}{r_2 + r_1} \quad (\text{Ligning 3})$$

Det følger fra den foregående forklaringen at forbedret mottak vil oppnås dersom partikkelhastighetssensoren lages på en slik måte at tettheten og hastigheten i sensorsammenstillingen, inkludert kapslingen og andre komponenter ligner

på den for det omkringliggende fluidet. Dersom de er like, vil refleksjonskoeffisienten være $R=0$ og transmisjonskoeffisienten vil være $T=1$.

5 Ved å gjøre den akustiske hastigheten i partikkelhastighetssensoren i hovedsak lik den akustiske hastigheten i vannet som sensoren er utplassert i, og ved å gjøre tettheten for partikkelhastighetssensoren lignende tettheten for vannet, dannes en god impedanstilpasning mellom vannet og partikkelhastighetssensoren. Hastighetssensoren vil ha en god
10 impedanstilpasning med de omkringliggende media og det vil ikke opptre noen forstyrrelse av amplituden eller fasen pga. refleksjon, diffraksjon eller andre anomalier for den vandrende bølgen som passerer gjennom sensoren og dens kapsling.

15 I en foretrukket utførelsesform er tettheten for partikkelhastighetssensoren mindre enn omkring to ganger tettheten for vann (omkring 2 g/cm^3) og mer fordelaktig omkring den samme som tettheten for vann (omkring 1 g/cm^3). Tilsvarende bør tettheten for partikkelhastighetssensoren vanligvis være mellom omkring 0.5 g/cm^3 og 2 g/cm^3 , og mer fordelaktig, omkring 1.0 g/cm^3 . Det skal imidlertid forstås at vanntettheten kan variere med saltgehalten, og det kan være nyttig å variere tettheten for partikkelhastighets-
20 sensoren, avhengig av det spesielle vannlegemet som partikkelhastighetssensoren er utplassert i. Fordi tettheten av partikkelhastighetssensoren i følge en foretrukket utførelsesform av oppfinnelsen er i hovedsak mindre enn tettheten for geofonsammenstillinger som typisk er tilgjengelige for bruk ved seismikkoperasjoner på havbunnen, velges
30 forskjellige komponenter som geofonsammenstillingen sammenstilles av. For eksempel kan minst en del av kapslingen dannes av et formbart elastomermateriale, slik som isoplast eller polypropylen, eller et formbart komposittmateriale, slik som en fiberforsterket epoksy.

Fremfor behovet for god akustisk kopling er en partikkelhastighetssensor med lav vekt nyttig, fordi i en foretrukket utførelsesform av oppfinnelsen kreves det at seismikkabelen som sensorene er inkludert i har nøytral oppdrift. Så mange som 10,000 partikkelhastighetssensorer kan benyttes i en enkelt kabel. Tilsvarende gjør en partikkelhastighetssensor som har en tetthet på mindre enn 2 gram per kubikkcentimeter det mulig at den mekaniske konstruksjonen av seismikkabelen oppnår nøytral oppdrift.

I en spesiell utførelse av oppfinnelsen benyttes partikkelhastighetssensorer 3 og trykkgradientsensorer 5 sammen i en sylindrisk seismikkabel 30, som vist i Figur 5. Bruk av både partikkelhastighetssensorer og trykkgradient-sensorer muliggjør at signalforringelse som et resultat av at ekkorefleksjoner fra overflaten i hovedsak blir eliminert fra de registrerte seismikkdataene. Slik signalforbedring oppnås ved kombinasjon av utgangssignalene fra en partikkelhastighetssensor (eller en rekke av partikkelhastighetssensorer) med utgangssignalene fra en trykkgradientsensor (eller en rekke av trykkgradientsensorer) plassert i hovedsak ved det samme sted. Partikkelhastighetssensorer og trykkgradientsensorer plassert ved i hovedsak det samme sted kan i det følgende bli henvist til som "samlokaliserte" sensorer.

Fase- og amplituderresponsen for en trykkgradientsensor er i hovedsak konstant i det seismiske frekvensbåndet som er av interesse (fra omkring 2 Hz til omkring 300 Hz). For eksempel for T-2BX hydrofonen markedsført av Teledyne Instruments, Inc., 5825 Chimney Rock Road, Houston, Texas 77081, har variasjonen i amplitude over et frekvensområde på 2 - 300 Hz blitt målt til mindre enn 1 dB, og variasjonen i fase til mindre enn 0,1 grader. Figurene 6A og 6B viser en typisk amplitude og faserespons for en partikkelhastighets-sensor. På Figur 6A representerer kurve 56 amplitude-variasjon, og på Figur 6B representerer kurve 58 fase-variasjonen. I kontrast til amplitude- og faseresponsen for

hydrofonen, er det klart at det er vesentlige variasjoner i både amplitude- og faseresponsen for en partikkelhastighets-sensor i seismikkfrekvensområdet av interesse.

Videre, i systemer fra den tidligere kjente teknikk, der impedansen til partikkelhastighetssensoren var i hovedsak tilpasset til impedansen av substansen (enten vannet eller vannbunnen) som seismikkbølgen koples med partikkelhastighetssensoren, opptrer ytterligere variasjoner i amplitude og fase i seismikkfrekvensområdet pga. impedansmistilpasningen.

I følge en spesiell utførelsesform av foreliggende oppfinnelse, der impedanstilpasningen mellom vannet og partikkelhastighetssensoren er i større grad nesten like, minimaliseres slike ytterligere variasjoner, og tilsvarende kan utgangssignalet av partikkelhastighetssensoren og utgangssignalet fra trykkgradientsensorene bli tilpasset ved å benytte et passende filter av en type som er kjent for de med vanlige ferdigheter på fagområdet, uten at det kreves ytterligere tilpasning for variasjonene forårsaket av impedansmistilpasning.

I en utførelsesform av foreliggende oppfinnelse er trykkgradientsensoren en hydrofon og partikkelhastighets-sensoren er en geofon. Forholdet mellom akustisk trykk i et medium og den tilhørende partikkelhastigheten er den spesifikke akustiske impedans ($\rho_0 c = p/u$). For en hydrofon som har en god impedanstilpasning til mediet som omgir hydrofonen og som (for eksempel) har en trykkfølsomhet på 20 volt per bar, dvs.

$$H = 20V/\text{bar}, \quad (\text{Ligning 4})$$

der forholdet kan uttrykkes som

$$H = 20V/10^5 N/m^2, \quad (\text{Ligning 5})$$

og en geofon eller en gruppe av geofoner som har en god impedanstilpasning til mediet som omgir geofonen, og har (for eksempel) en spenningsfølsomhet på:

$$G = 20V/m/s, \quad (\text{Ligning 6})$$

vil skalafaktoren (K), som uttrykker forholdet mellom hastighetsutgangssignalet for geofonen og trykkutgangssignalet for hydrofonen være:

$$K = \frac{H \cdot \rho_0 c}{G} = \frac{20 \cdot 10^{-5} [V/N/m^2] \cdot 1.5 \cdot 10^6 [Ns/m^3]}{20 [V/m/s]} = 15 \quad (\text{Ligning 7})$$

5 som indikerer at geofonhastighetsutgangssignalet trenger å multipliseres med en skalafaktor på $K=15$ før trykk og hastighet kan bli sammenlignet. Det vil bli forstått at for hydrofoner og geofoner som har forskjellig følsomhet fra det eksemplet som ble diskutert ovenfor, vil skalafaktoren (K)
10 være forskjellig. Videre, på grunn av variasjonen i amplituden (som vist på Figur 6A) og fase (som vist på Figur 6B) for geofonutgangssignalet som en funksjon av frekvens, er det nødvendig å kompensere for amplitude- og faseresponsen for geofonen før skalafaktoren anvendes.

15 Amplituderresponsen (E) og faseresponsen (ϕ) for geofonen som en funksjon av frekvens kan representeres av de følgende sammenhengene.

$$E = \frac{G \left(\frac{f^2}{f_n^2} \right) \left(\frac{R}{r+R} \right)}{\sqrt{\left(1 - \frac{f^2}{f_n^2} \right)^2 + 4b_1^2 \frac{f^2}{f_n^2}}} \quad (\text{Ligning 8})$$

20

$$\phi = \alpha \cot \left(\frac{2b_1 \frac{f}{f_n}}{1 - \frac{f^2}{f_n^2}} \right) \quad (\text{Ligning 9})$$

der, G = geofonspenningsfølsomhet;

f = frekvens;

f_n = egenfrekvens;

25 r = viklingsresistans;

R = lastresistans; og

b_i = total demping.

Typiske verdier kan være: $f_n = 10$; $r = 350$ Ohm; $R = \infty$; og $b_i = 0.6$.

5 Dersom amplituden og fasen for geofonutgangssignalet justeres for å kompensere for denne variasjon i fase og amplitude med frekvens, vil geofonutgangssignalet i hovedsak ha samme fase og amplitude som hydrofonsignalet. Normalt kan justeringen utføres på grunnlag av beregningene basert på
10 ligningene 8 og 9.

 Som nevnt ovenfor er, i en foretrukket utførelsesform av oppfinnelsen, partikkelhastighetssensorene konstruert for å ha en akustisk impedans i hovedsak lignende den akustiske impedansen til vannet i vannlegemet som partikkelhastighets-
15 sensorene er utplassert i. Tilsvarende, så unngås problemene som påstøtes i tidligere kjente systemer der impedansen for sensoren ikke var tilpasset den akustiske impedansen for mediet som en seismikkbølge ble koplet fra og til sensoren. I systemer i den tidligere kjente teknikk dannet variasjonene i
20 amplitude og fase som en funksjon av frekvens, forårsaket av impedansmistilpasning, vanskeligheter med tilpasning av utgangssignalet fra partikkelhastighetssensoren til utgangssignalet fra trykkgradientsensoren. På grunn av den impedans-tilpasningen som oppnås i en foretrukket utførelsesform av
25 foreliggende oppfinnelse, behøver bare variasjonen i amplitude og fase for selve partikkelhastighetssensoren å bli kompensert for, for å gjøre det mulig at utgangssignalet fra partikkelhastighetssensoren blir kombinert med utgangssignalet fra trykksensoren for å dempe spektralsenkningene
30 forårsaket av ekkoeffektrefleksjonen.

 I en foretrukket utførelsesform av oppfinnelsen kan variasjonene i fase og amplitude med frekvens for partikkelhastighetssensoren bli beregnet basert på kjent (eller bestemmelige) egenskaper for selve partikkelhastighets-

sensoren. Utgangssignalet fra partikkelhastighetssensoren kan modifiseres tilsvarende for å korrigere for variasjon i amplitude og fase med frekvens ved bruk av filterteknikker som er velkjente for de med alminnelige ferdigheter på fagområdet. For samlokaliserte trykkgradientsensorer og partikkelhastighetssensorer, kan utgangssignalet fra trykkgradientsensoren og det filtrerte utgangssignalet fra trykkgradientsensoren så bli summert for å dempe hakkene i spektralkurven som resulterer fra ekkorefleksjonen. Selv om fase og amplituden for utgangssignalet fra partikkelhastighetssensoren i en foretrukket utførelsesform modifiseres for i hovedsak å tilpasses utgangssignalet fra trykkgradientsensoren, vil de med ferdigheter på fagområdet forstå at fasen og amplituden for utgangssignalet fra trykkgradientsensoren kunne bli modifisert for tilpasning til utgangssignalet fra partikkelhastighetssensoren.

Fordi støynivået vanligvis er større ved grunnere vanddybder, kan plassering av streameren ved dybder større enn omkring ni meter (den største dybden der streamerkablene typisk er utplassert) redusere støy detektert av sensorene, og signal-til-støy forholdet for signalene detektert av seismikksensorene forbedres tilsvarende. For slike større dybder er imidlertid senkningene i et hydrofonspektrum som resulterer fra overflateekkeleksjonene ved lavere frekvenser, og et slikt hydrofonsignal anses normalt som uønsket på grunn av hakkene i spektralkurven i frekvensområdet av interesse i seismikkundersøkelser. I følge en utførelsesform av foreliggende oppfinnelse kan utgangssignalet fra partikkelhastighetssensoren som vil ha senkninger i sitt frekvensspektrum ved frekvenser som er forskjellig fra frekvensene for hakkene i frekvensspektret for hydrofonen, bli kombinert med utgangssignalet fra hydrofonen for å kompensere for hakkene i spektralkurven og et signal i hovedsak fritt for ekkoeffekt kan oppnås. Figur 7 viser simulerte utgangsresponser for en hydrofon (kurve 42)

og en geofon (kurve 44) ved en vanddybde på 26 meter. Grafen indikerer at to signaler kan bli kombinert for å kompensere for hakkene i spektralkurven som resulterer fra overflate-refleksjonen. Figur 8 gir faktiske data fra en felttest med kablen ved omkring 26 meter, som bekrefter resultatene indikert i simuleringen. På Figur 8 er utgangssignalet fra geofonen betegnet ved tallet 46 og utgangssignalet fra hydrofonen er betegnet ved tallet 48. Figur 9 viser en summering (kurve 60) av hydrofon- og geofondataene på Figur 8 og illustrerer dempingen av hakkene i spektralkurven.

På grunn av det potensielt høye støynivået i geofonsignalene ved lave frekvenser, resulterende fra mekaniske vibrasjoner i kablen kombineres ikke, i en spesiell utførelsesform av oppfinnelsen, lavfrekvente geofonsignaler med hydrofonsignalet. I en spesiell utførelsesform av oppfinnelsen fjernes frekvenser i geofonsignalet som er lavere enn omkring den laveste frekvensen til hakkene i spektralkurven i hydrofonspektret fra geofonsignalet før geofonsignalet kombineres med hydrofonsignalet. I en annen utførelsesform av oppfinnelsen kombineres ikke geofonsignaler under omkring 30 Hz med hydrofonsignalet.

Forbedrede resultater frembringes også ved operasjoner ved grunne dybder ved bruk av partikkelhastighetssensorer i seismikkabler i tillegg til trykkgradientssensorer, i forhold til operasjoner som benytter bare trykkgradientssensorer. Ved grunnere dybder, dvs. mindre enn omkring 6 meter, vil et utgangssignal fra en hydrofon bli dempet av overflateekkoet i seismikkfrekvensområdet av interesse. På grunn av faseforskjellen mellom det oppadgående trykkgradientbølgefeltet og det nedadgående trykkgradientbølgefeltet inne i det seismikkfrekvensbåndet av interesse, så er det nedadgående bølgefeltet subtraktivt med hensyn til det oppadgående bølgefeltet og det nedadgående bølgefeltet demper effektivt det oppadgående bølgefeltet. For et geofonsignal er imidlertid resultatet det motsatte, og overflateekkosignalet øker

effektivt amplituden for signalet som detekteres av geofonen. Forskjellen i fase mellom det oppadgående bølgefeltet og det nedadgående bølgefeltet er slik at, for grunne dybder, er signalet som detekteres av geofonen additivt. Tilsvarende
5 oppnås vesentlig forbedrede resultater ved bruk av partikkelhastighetssensorer i tillegg til trykkgradientsensorer ved grunne dybder i forhold til hva som oppnås ved bruk av trykkgradientsensorer alene. I kystområder der vanddybden er ganske grunn, kan det være spesielt anvendelig å være i stand
10 til å utplassere sensorene ved slike grunne dybder.

Figur 10 viser en simulering av et hydrofonsignal (kurve 52) og et geofonsignal (kurve 50) ved en meters dybde. Dempningen av hydrofonsignalet er åpenbar. Kombinasjon av utgangssignalet fra geofonen med utgangssignalet fra hydrofonen for data registrert ved vanddybden på én meter
15 kompenserer også for innvirkningen av overflaterefleksjonen.

Vanligvis vil et hydrofonsignal ha en amplitude som er 10 til 20 ganger større enn amplituden for et geofonsignal. Dette forholdet vil variere avhengig av den spesielle følsomheten for de spesielle sensorene som benyttes. Vanligvis vil en gruppe hydrofoner som er distribuert over en valgt romlig
20 avstand bli koplet i parallell for støydemping, og utgangssignalet fra hydrofonen som registreres for bruk ved data-behandling og -analyse av seismikkdata er det kombinerte utgangssignalet fra flere enkeltvise hydrofoner koplet i
25 parallell. På grunn av den lavere signalamplituden på utgangssignalet fra geofonen for utgangssignalet fra geofonen, vil, i en utførelsesform av oppfinnelsen, en gruppe geofoner tilknyttet en gruppe hydrofoner (samlokaliserte
30 geofoner og hydrofoner) bli koplet i serie for å øke amplituden på utgangssignalet så vel som å dempe støy, og utgangssignalet fra geofonen som registreres for bruk i behandling og analyse av seismikkdata vil være det kombinerte utgangssignalet fra flere enkeltvise geofoner koplet i serie.

35 Avhengig av behovene i en enkelt undersøkelse kan imidlertid

geofongruppene bli koplet i parallell eller serie, eller i en parallell/seriekombinasjon. Selv om diskusjonen her generelt henviser til et utgangssignal fra forskjellige sensorer, er utgangssignalet vanligvis utgangssignalet flere diskrete

5 sensorer sammenkoblet til en sensorrekke. Videre, selv om diskusjonen her generelt henviser til en geofon og en hydrofon, er det hensikten at andre partikkelhastighets-sensorer enn geofoner og andre trykkgradientsensorer enn hydrofoner er innenfor omfanget av foreliggende oppfinnelse.

10 I en utførelsesform vil grupper av omkring 8 trykkgradientsensorer bli benyttet i sammenheng med grupper av omkring 2 til omkring 16 partikkelhastighetssensorer (med et lavere antall heller enn høyere antall av partikkelhastighetssensorer som foretrukket), og hver kombinerte gruppe vil

15 være omkring 12.5 meter atskilt fra en annen slik gruppe. I denne utførelsesformen vil kombinerte grupper av både trykksensorer og partikkelhastighetssensorer bli behandlet som enkeltsensorer.

I en utførelsesform av oppfinnelsen er tre-komponent partikkelhastighetssensorer inkludert i seismikkabelen. Ved

20 "tre-komponent" menes det at i tillegg til en partikkelhastighetssensor (vanligvis en geofon) anbrakt for å avføle bevegelsen i den vertikale retningen, er to partikkelhastighetssensorer anbrakt i ortogonale retninger med hensyn til

25 hverandre (og til den vertikalt anbrakte geofonen) for å avføle horisontal bevegelse. Tilsvarende, vil en tre-komponent partikkelhastighetssensor avføle bevegelsen i den vertikale retningen, i en i-linje retning og i en på-tvers retning. Plassering av disse sensorene i disse tre retningene

30 muliggjør deteksjon av forplantningsretningen for et innfallende signal, og muliggjør også deteksjonen av vibrasjoner eller annen mekanisk oppførsel for kabelen.

Akselerometre kunne bli benyttet som partikkelbevegelses-sensor som et alternativ til bruk av geofoner, selv om

35 utgangssignalet vil måtte bli integrert for å oppnå hastig-

het. Et eksempel på et kommersielt akselerometer som passer for bruk i foreliggende oppfinnelse er VECTOR-SEIS™, tilgjengelig fra Input Output, Inc. i Houston, Texas. Dette spesielle akselerometeret danner et DC-utgangssignal som

5 indikerer variasjonen i orientering av akselerometeret fra en valgt orientering, tilsvarende, dersom sett av 2 (for situasjoner der i-linje retningen er kjent) eller 3 (dersom i-linje retningen ikke er kjent) av disse akselerometrene benyttes, kan sensororienteringen bli beregnet og det er ike

10 nødvendig å opphenge akselerometrene i kardang. Ett enkelt akselerometer kunne også bli benyttet, men det ville trenge å bli opphengt i kardang. Ettersom sensoren kan måle akselerasjon til DC, er det mulig å bestemme den faktiske gravitasjonsvektoren ved å analysere størrelsen av G (gravitasjonsvektoren)

15 som hver sensor opererer under. Resultatene av denne analysen lagres sammen med trase-dataene som retningscosinusverdier og beskriver tensorrotasjonen som kreves for å gjenopprette signalene som om sensoren var utplassert i den virkelige vertikale retning.

20 Den foregående beskrivelse av oppfinnelsen er ment å være en beskrivelse av foretrukne utførelsesformer. Forskjellige endringer i det beskrevne apparatet og fremgangsmåten kan utføres uten å gå utenfor det tilsiktede omfanget som definert ved de vedføyde krav.

25

P a t e n t k r a v

1. En partikkelbevegelsessensorsammenstilling omfattende
en innkapsling (20),
5 en partikkelbevegelsessensor (10) kardansk montert i
nevnte innkapsling (20),
et fluid inne i nevnte innkapsling (20) som i hovedsak
omgir nevnte partikkelbevegelsessensor (10);
der nevnte fluid har en viskositet som gir tilstrekkelig
10 demping av sensorbevegelse til å redusere støy samtidig som
den muliggjør tilstrekkelig bevegelse av nevnte sensor (10)
til å opprettholde en valgt orientering av nevnte sensor (10)
ettersom nevnte innkapsling (20) roteres;
der nevnte partikkelbevegelsessensorsammenstilling (3)
15 er konstruert av komponenter som er valgt slik at
partikkelbevegelsessensorsammenstillingen (3) har en akustisk
impedans innenfor området fra omkring 750,000 Newtonsekunder
per kubikkmeter til omkring 3,000,000 Newtonsekunder per
kubikkmeter; og
20 der partikkelbevegelsessensorsammenstillingen (3) har en
konfigurasjon som tillater nevnte partikkelbevegelsessensor-
sammenstilling (3) å monteres innenfor en intern diameter av
en seismikkstreamerkabel (30) som har en intern diameter som
ikke er større enn omtrent 66 millimeter.
- 25
2. En partikkelbevegelsessensorsammenstilling ifølge krav
1, der den akustiske impedans for nevnte partikkel-
bevegelsessensorsammenstilling (3) er i hovedsak lik den
akustiske impedansen for sjøvann.
- 30
3. En partikkelbevegelsessensorsammenstilling ifølge krav
1, der nevnte partikkelbevegelsessensorsammenstilling (3) har
en tetthet på mindre enn 2 gram per kubikkcentimeter.

4. En partikkelbevegelsessensorsammenstilling ifølge krav 1, der nevnte partikkelbevegelsessensorsammenstilling (3) har en tetthet lik omkring 1 gram per kubikkcentimeter.
- 5 5. En partikkelbevegelsessensorsammenstilling ifølge krav 1, der nevnte partikkelbevegelsessensorsammenstilling (3) har en tetthet i hovedsak lik tettheten for sjøvann.
6. En partikkelbevegelsessensorsammenstilling ifølge krav 10 1, der nevnte fluid har en viskositet som er større enn omkring 500 centistokes og mindre enn omkring 5000 centistokes.
7. En partikkelbevegelsessensorsammenstilling ifølge krav 15 1, der nevnte konfigurasjon som tillater nevnte partikkelbevegelsessensorsammenstilling (3) å monteres innenfor en intern diameter av en seismikkstreamerkabel (30) som har en intern diameter som ikke er større enn omtrent 66 millimeter, omfatter elektriske ledere koplet til nevnte 20 partikkelbevegelsessensor (10) for overføring av utgangssignaler fra partikkelbevegelsessensoren (10) til yttersiden av nevnte innkapsling (20), der hver elektrisk leder omfatter en elektrisk ledende fjær (6) som er i elektrisk kontakt med nevnte partikkelbevegelsessensor (10).
- 25
8. En partikkelbevegelsessensorsammenstilling ifølge krav 1, der den indre diameter av nevnte seismikkstreamerkabel (30) er omkring 55 millimeter.
- 30 9. En partikkelbevegelsessensorsammenstilling i følge krav 1, der den indre diameteren av nevnte seismikkstreamerkabel (30) er omkring 66 millimeter.

1/8

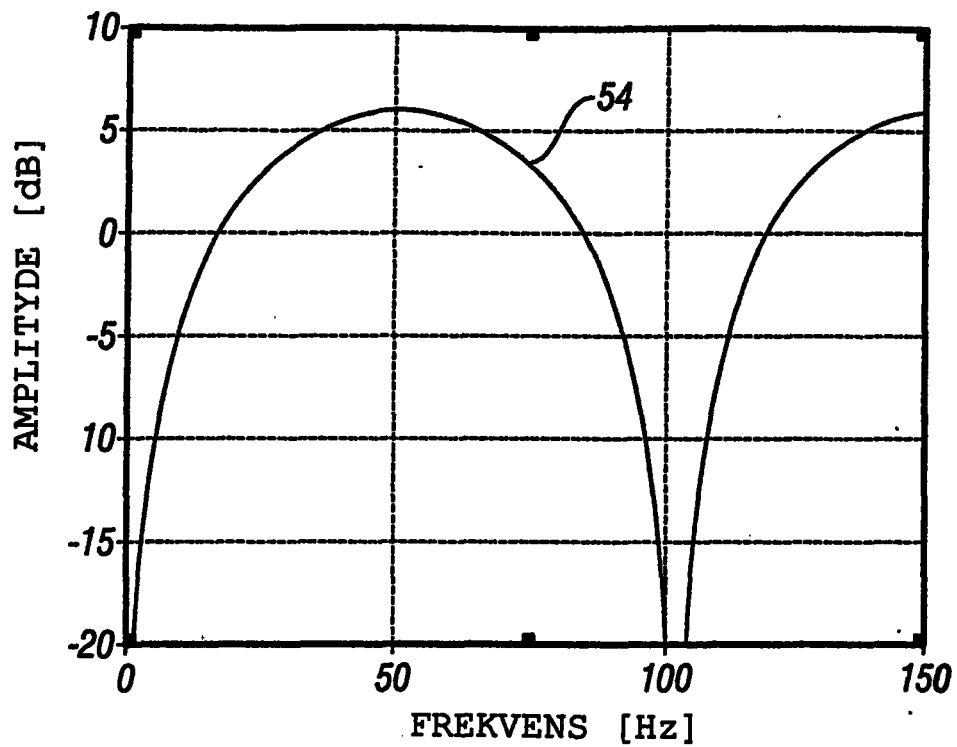


FIG. 1

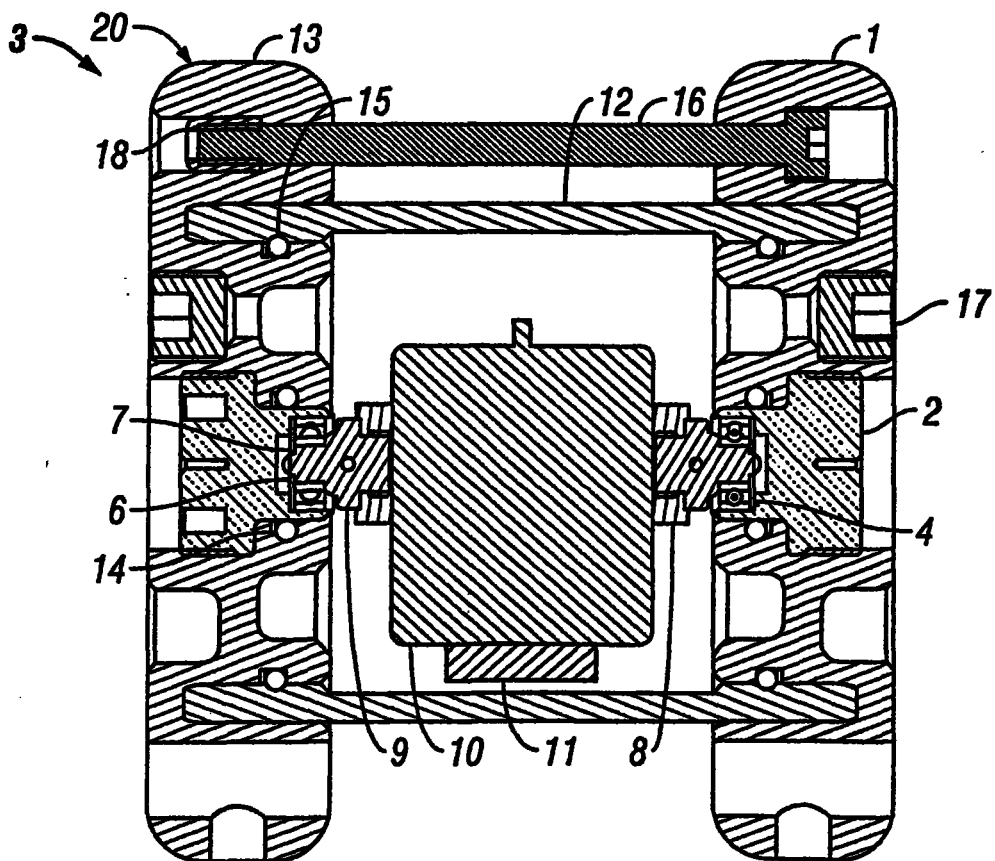


FIG. 4

2/8

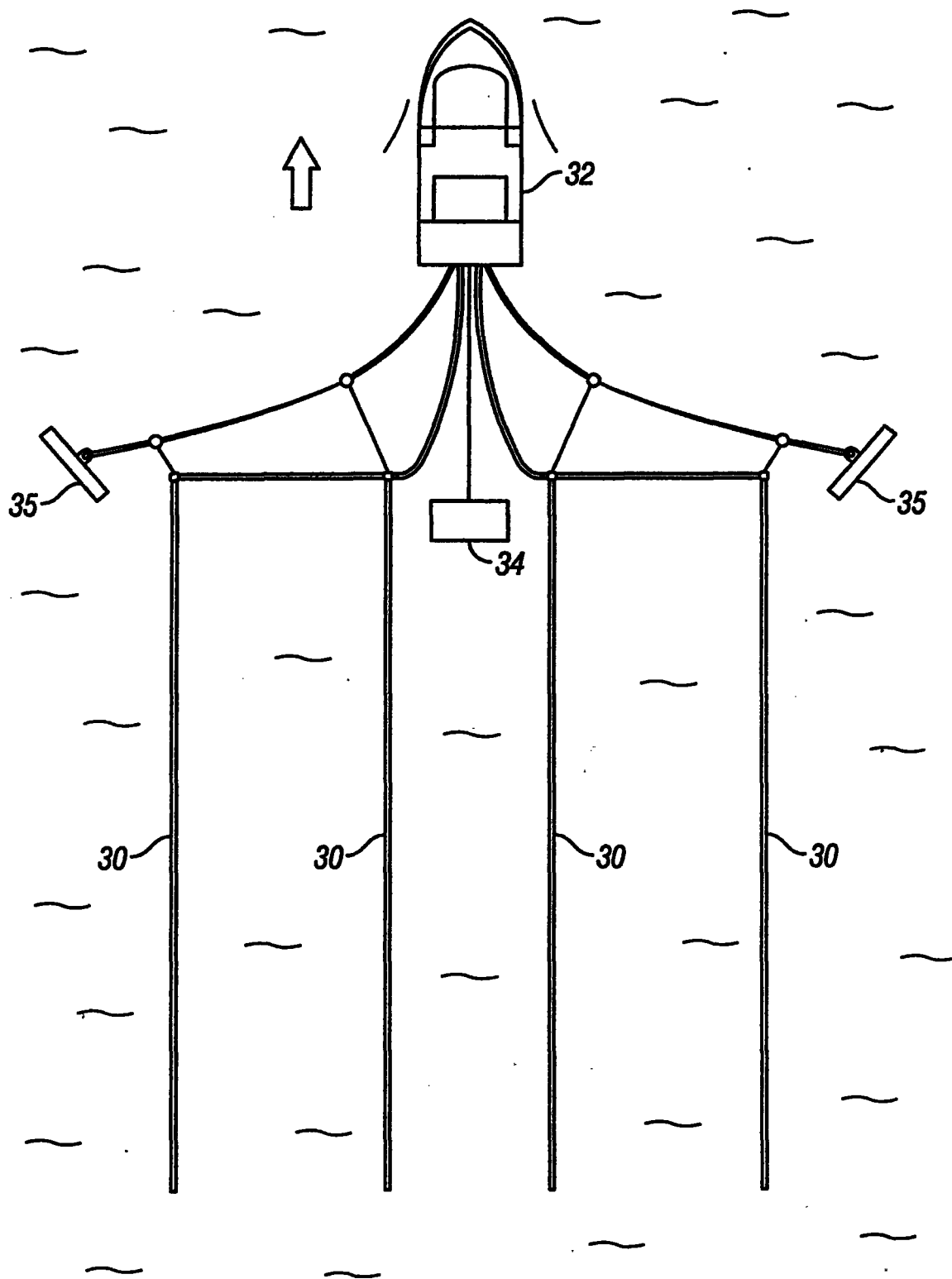


FIG. 2

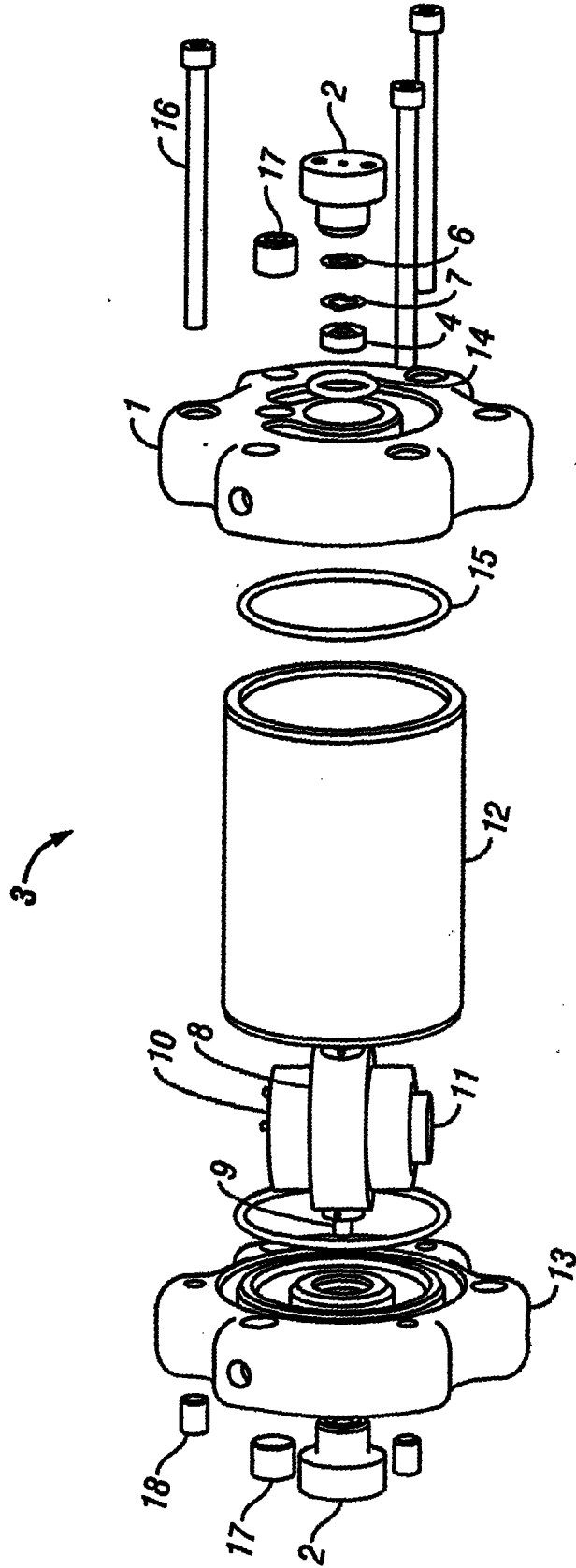


FIG. 3

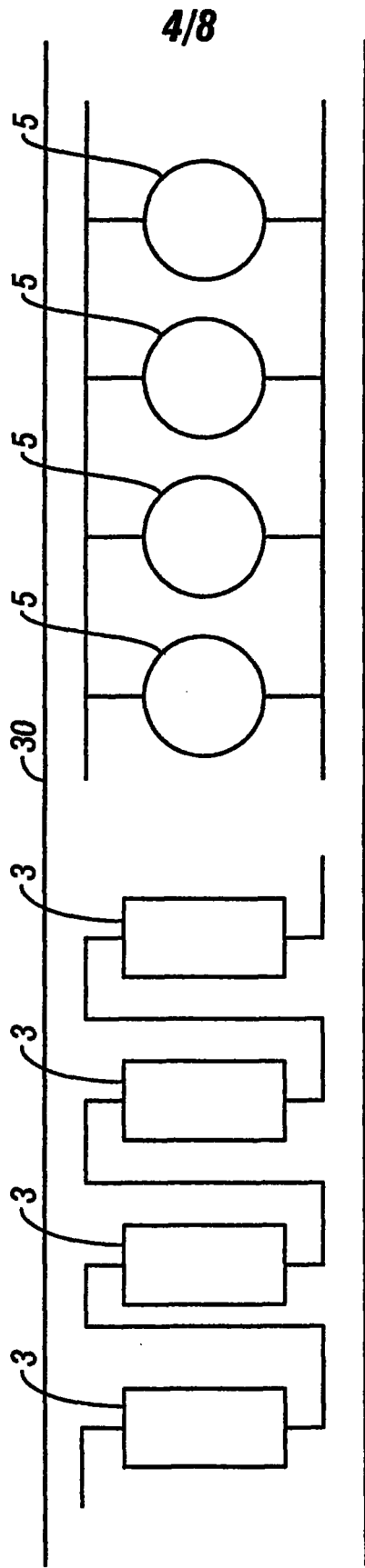


FIG. 5

5/8

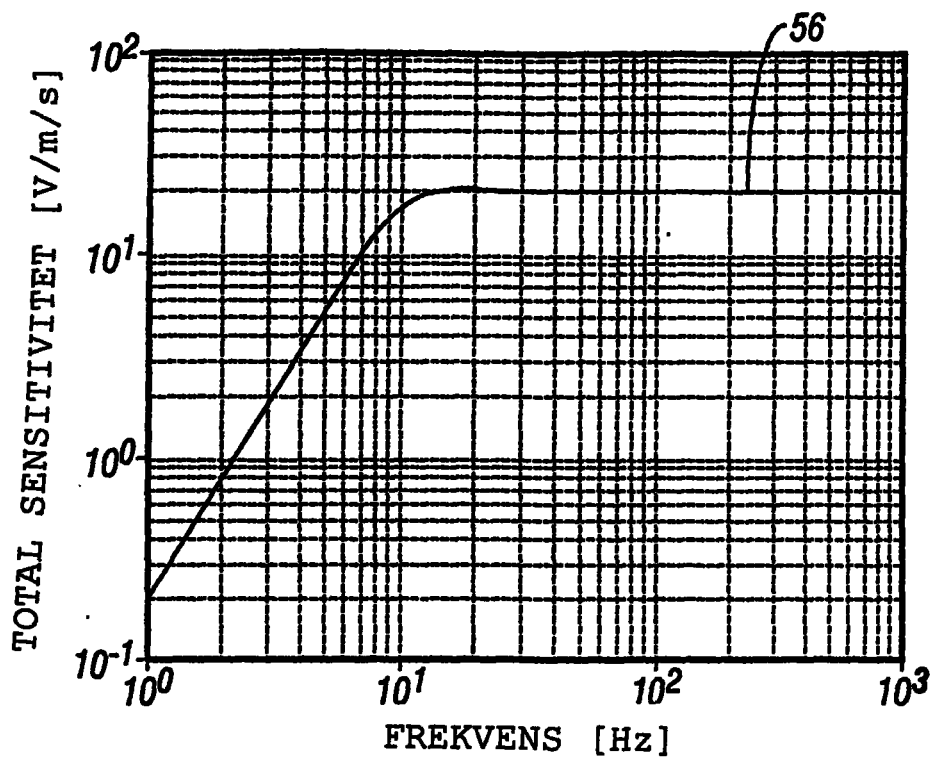


FIG. 6A

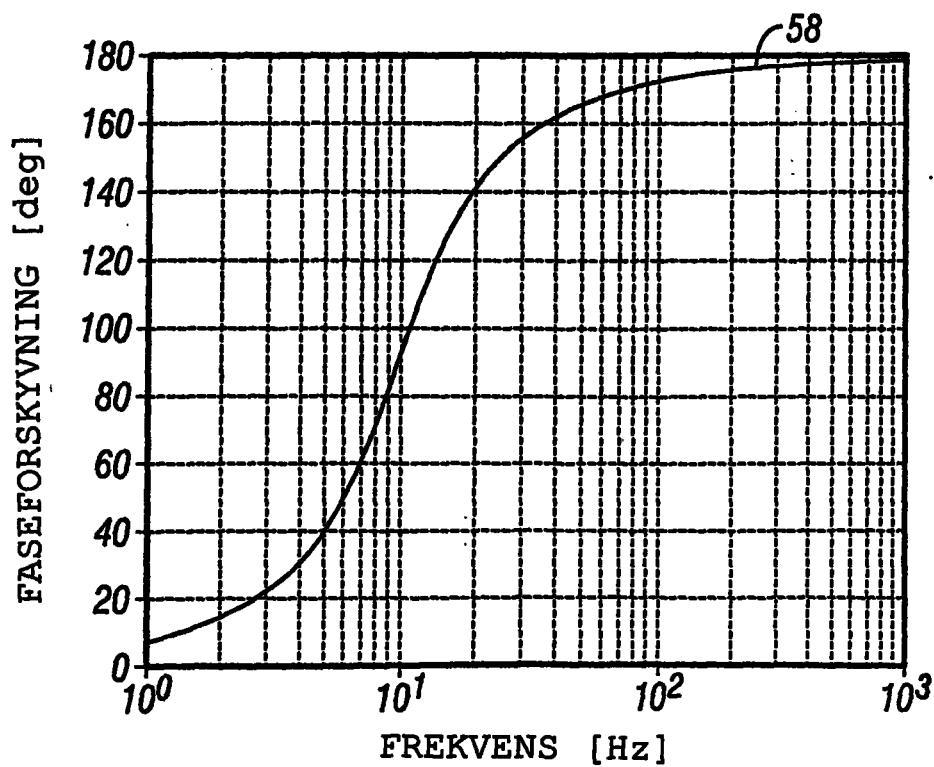


FIG. 6B

6/8

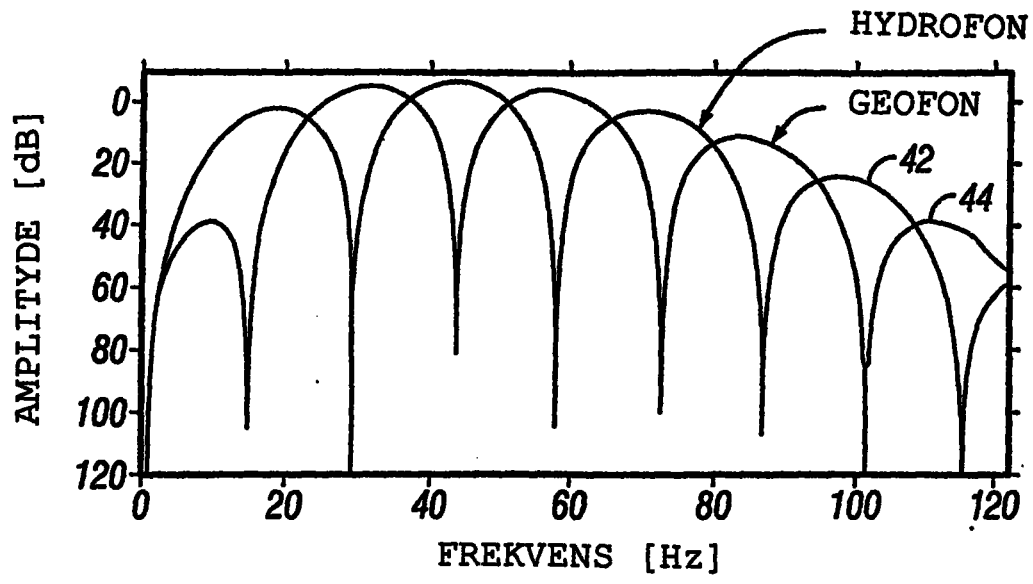


FIG. 7

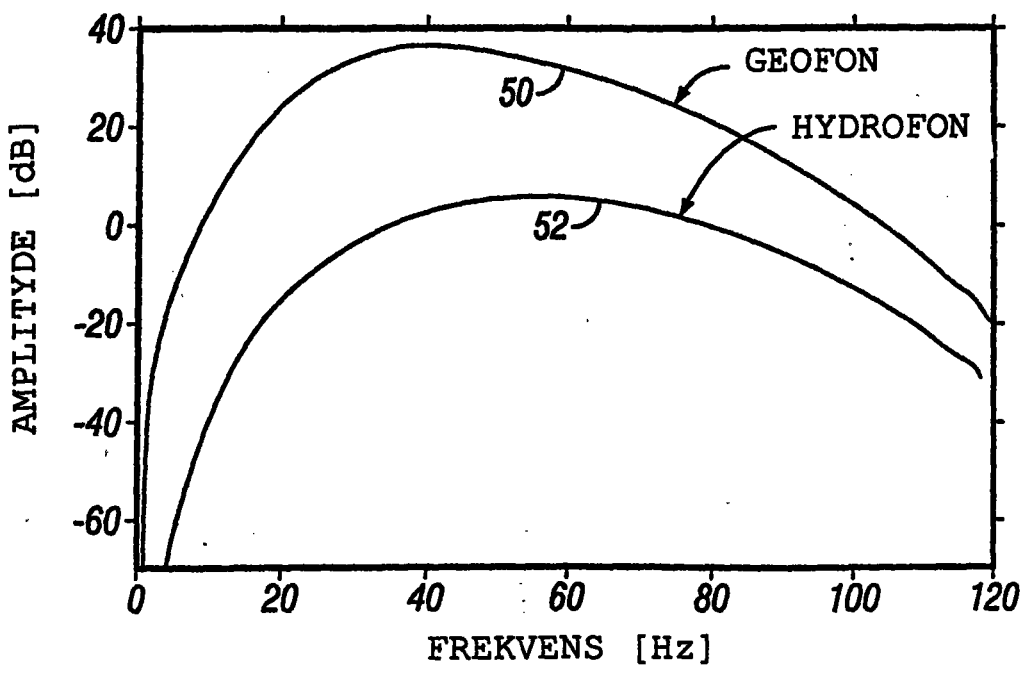
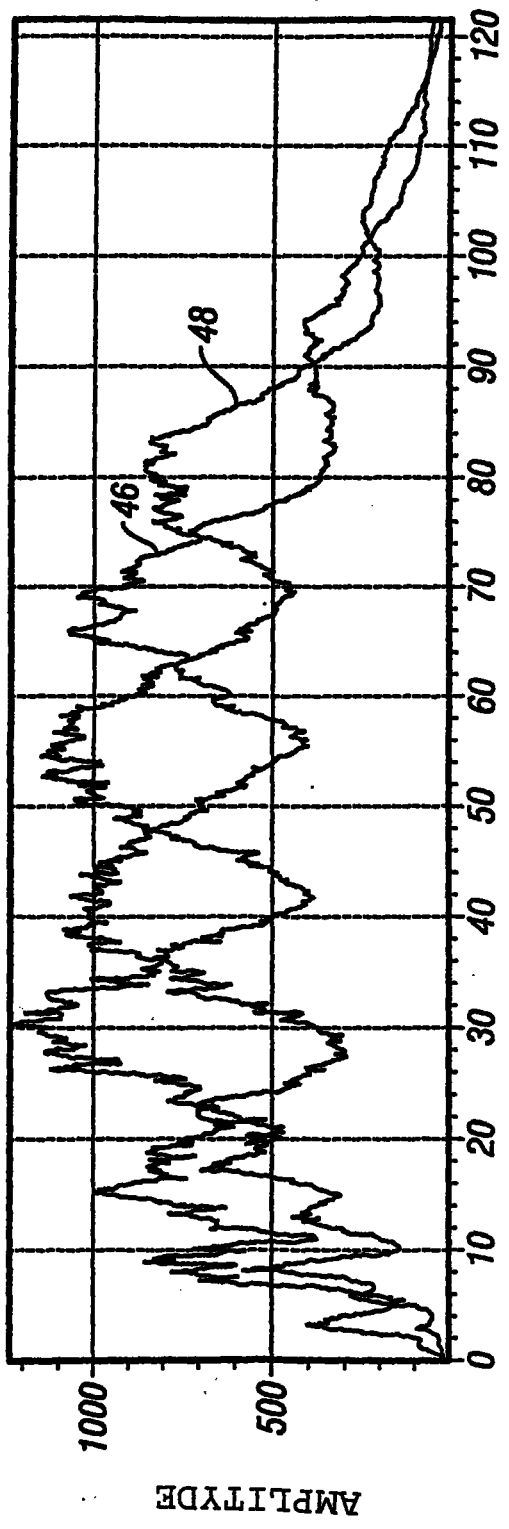


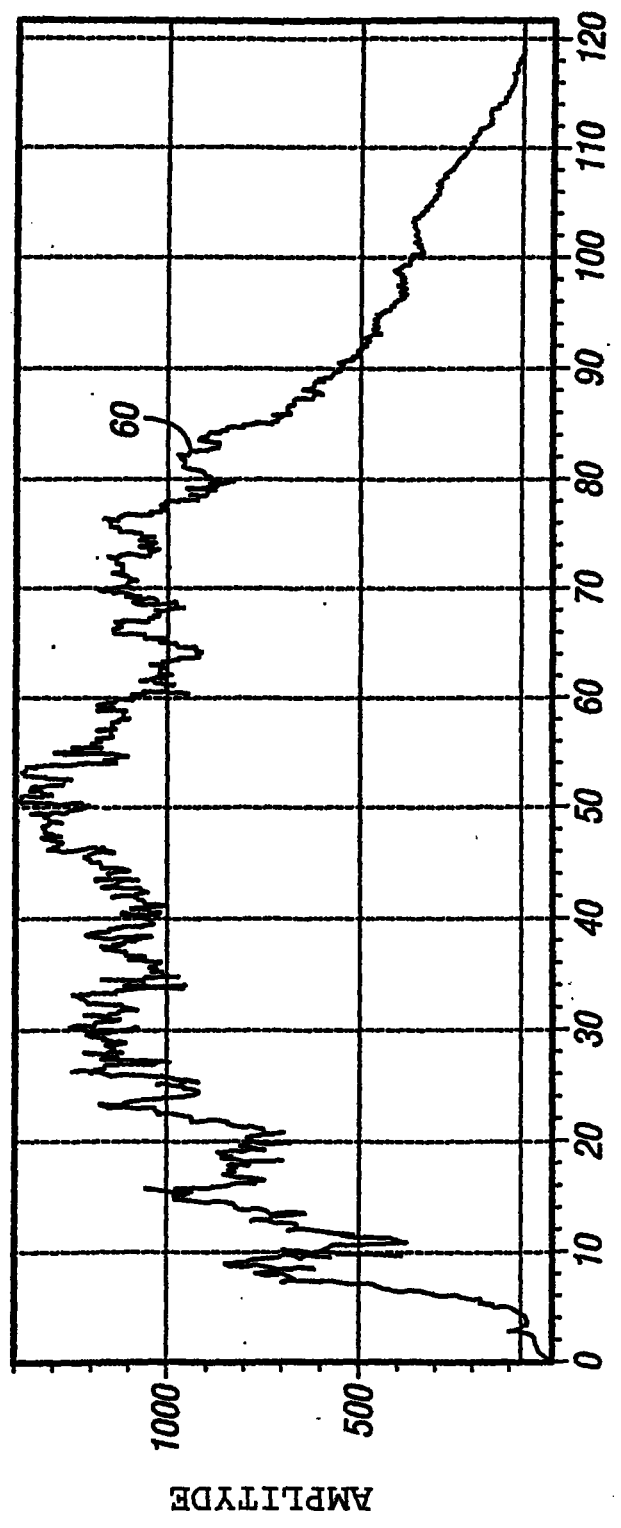
FIG. 10

7/8



FREKVENNS

FIG. 8



FREKVENNS

FIG. 9