



(12) PATENT

(19) NO

(11) 328518

(13) B1

NORGE

(51) Int Cl.

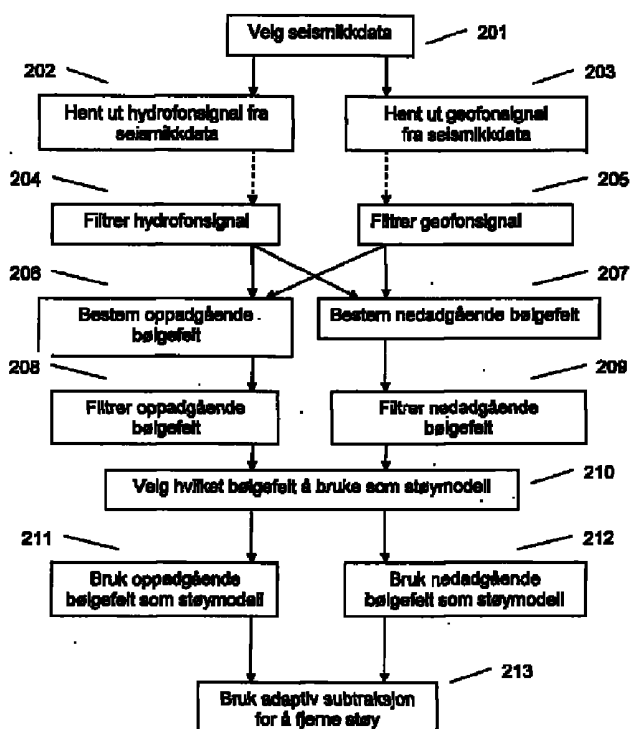
G01V 1/38 (2006.01)

G01V 1/38 (2006.01)

Patentstyret

(21)	Søknadsnr	20040225	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr	
(22)	Inng.dag	2004.01.19	(85)	Videreføringsdag	
(24)	Løpedag	2004.01.19	(30)	Prioritet	2003.01.29, US, 353293
(41)	Alm.tilgj	2004.07.30			
(45)	Meddelt	2010.03.08			
(73)	Innehaver	PGS Exploration (UK) Ltd, PGS Court, Halfway Green, GB-KT121RS WALTON-ON-THAMES, SURREY, Storbritannia			
(72)	Oppfinner	John Brittan, 66 Russel Road, GB-KT122LA WALTON-ON-THAMES, SURREY , Storbritannia			
		Joel Gordon Starr, 1311 Kirby Lake Court, Richmond, TX 77468, US-, USA			
(74)	Fullmektig	Acapo AS, Postboks 1880 Nordnes, 5817 BERGEN, Norge			
(54)	Benevnelse	Fremgangsmåte for behandling av dobbelt-sensor seismikkdata for å dempe støy			
(56)	Anførte publikasjoner	US 5754492			
(57)	Sammendrag				

En fremgangsmåte for å behandle seismikkdata fra samtidige registrerte samlokaliserte trykksensorer og geofoner er beskrevet. Seismikkdataene behandles ved først å bestemme et oppadgående bølgefelt og et nedadgående bølgefelt i seismikkdataene. Adaptiv subtraksjon utføres så på minst en av det oppadgående bølgefeltet og det nedadgående bølgefeltet for å fjerne støyen fra signalet. I alternative utførelsesformer kan det oppadgående bølgefeltet benyttes som en støymodell for det nedadgående bølgefeltet eller det nedadgående bølgefeltet kan benyttes som en støymodell for det oppadgående bølgefeltet.



OPPFINNELSENS BAKGRUNN

1. Oppfinnelsens område

Denne oppfinnelsen vedrører generelt feltet geofysiske undersøkelser. Mer spesielt vedrører oppfinnelsen en fremgangsmåte for å dempe støy i dobbeltsensor seismikkdata.

2. Beskrivelse av relatert teknikk

På feltet geofysiske undersøkelser er kunnskapen om strukturer under overflaten nyttige for å finne og utvinne verdifulle mineralressurser, slik som olje og naturgass. Et velkjent verktøy for geofysisk undersøkelse er en seismikkundersøkelse. En seismikkundersøkelse overfører akustiske bølger som utsendes fra passende energikilder inn i jordgrunnen og samler opp de reflekterte signalene ved bruk av en mottakerrekke. Så utføres seismikkdatabehandlings-teknikker på de innsamlede dataene for å beregne strukturene under overflaten.

I en seismikkundersøkelse dannes seismikksignalene ved å overføre et akustisk signal inn i jorden fra på eller nær jordens overflate, som så vandrer nedadrettet inn i jorden under overflaten. Det akustiske signalet kan også vandre nedadrettet gjennom et legeme av vann i en marinseismikkundersøkelse. Passende seismikkenergikilder som benyttes for å overføre det akustiske signalet kan inkludere eksplosiver eller vibratorer på land og luftkanoner eller marinvibratorer i marinseismikkundersøkelser. Når det akustiske signalet møter en seismisk reflektor, en grenseflate mellom to lag under overflaten som har forskjellige akustiske impedans, reflekteres en del av det akustiske signalet tilbake til overflaten, der den reflekterte energien detekteres av en seismikkmottaker. Forskjellige typer seismikkmottakere detekterer og måler amplituden av forskjellige aspekter ved

de passerende seismikkbølgene.

Passende seismikkmottakere kan inkludere partikkel-
hastighetsdetektorer på land og vanntrykkdetektorer i vann.
Noen ganger benyttes partikkelbevegelses- eller partikkel-
5 akselerasjonsdetektorer i stedet for partikkelhastighets-
detektorer. Både seismikkilder og -mottakere kan utplasseres
enkeltvis eller, mer vanlig, i rekker.

I soner mellom land og dypt vann, slik som våtmark eller
grunt vann, benyttes ofte både hydrofoner og geofoner sammen,
10 samlokalisert i par, og posisjonert på bunnen av vannlegemet.
Denne prosedyren kalles vanligvis en havbunnskabel-under-
søkelse eller en buktkabelundersøkelse.

Seismikkdata fra dobbeltsensorer på havbunnen inneholder
ofte betydelig mer koherent støy enn seismikkdata fra kun en
15 hydrofon. Denne koherente støyen kan tilskrives slambevegelse
(eng. mud roll) og uønskede eller ledede bølgemodi (noen
ganger henvist til som torsjonsbølger eller uønskede S-
bølger). Geofonen er mye mer følsom for disse typene koherent
støy enn hydrofonen. Dette faktum har blitt benyttet i noen
20 kjente fremgangsmåter på fagområdet til å dempe støy fra
geofonsignalet. Det er imidlertid andre typer av støy
inneholdt i vanlige dobbeltsensor seismikkdata. Disse typene
støy inkluderer, men er ikke begrenset til, multippel-
refleksjoner slik som vannkolonnegjenklang, transientstøy, og
25 effekter på grunn av forskjeller i mottakerkopling. Det er
kjent et antall fremgangsmåter på fagområdet for å dempe slik
støy, som bruker forskjellene mellom hydrofon- og geofon-
signalene.

For eksempel viser Dragoset, Jr., W. H., i US
30 Patent Nr. 5,365,492, "Method for Reverberation Suppression",
meddelt 15. nov. 1994, en fremgangsmåte for undertrykking av
vannkolonnegjenklang i seismikkdata fra undersøkelser med en
dobbeltsensor på havbunnen. Trykk- og hastighetssignaler med

inkludert støy detekteres samtidig fra samlokaliserte dobbeltsensorer. Trykksignalet filtreres adaptivt og subtraheres fra hastighetssignalet for å isolere en støy-signatur. Støysignalet adderes tilbake til hastighetssignalet med motsatt polaritet for å gi et støy-fritt hastighets-signal. Det støy-frie hastighetssignalet multipliseres med en skaleringsfaktor og adderes til trykksignalet. Summen autokorreleres og en funksjon, henvist til som en varimax-funksjon, beregnes for den auto-korrelerte summen.

Skaleringsfaktoren inkrementeres og prosessen itereres inntil varimax-funksjonen nærmer seg verdien 1. Dette gir den optimale skaleringsfaktoren for å undertrykke vannkolonne-gjenklang. Dragoset, Jr., W. H. and Chambers, R. E., i U.S. Patent Nr. 5,442,591, "Method for Adaptively Suppressing Noise Transients in Summed Co-Sensor Seismic Recordings", meddelt 15. aug. 1995, beskriver en fremgangsmåte for å dempe singulær transientstøy slik som forårsaket av biologiske kilder, slik som fisk, i seismikkdata fra undersøkelser med dobbeltsensorer. Trykk- og hastighetssignaler med inkludert støy detekteres samtidig fra samlokaliserte dobbeltsensorer. Den adaptive fremgangsmåten til Dragosets '492 patent, diskutert ovenfor, benyttes til å skalere hastighetssignalene til amplituden for trykksignalene. Trykk- og hastighets-signalene grupperes separat for å danne felles mottakersamlinger. Forholdet R_1 mellom amplitudene for de felles hastighets- og trykk mottakersamlinger bestemmes. I vektete sonevinduer bestemmes en rekke av forhold R_{2i} mellom amplitudene av trykk- og hastighetssignalene. Forholdene R_1 og R_{2i} multipliseres for å gi en utjevningsoperator m_1 . Trykk- og hastighetssignalene kombineres med utjevningsoperatoren i hvert vektete sonevindu for å fremskaffe en transientstøyfri tidsskalareferanse.

Chambers, R. E., Sitton, G. A., and Paffenholz, J, i US

Patent Nr. 5,572,483, "Method of Reducing Noise in Seismic Signals by Adaptive Filtering of a Noise Reference", meddelt 5. nov. 1996, beskriver en fremgangsmåte for å dempe støy i seismikkdata representert som seismikktraser. Den mulige støyen er lokalisert i et sett av seismikktraser. Tilsvarende deler av trasene som inneholder støyen er tidsjustert og deretter stakket for å danne en stakket støytrase. Den stakkede støytrase gjentas ved hver tilsvarende traseposisjon i de valgte trasesettene. Så reverseres tidsjusteringsprosessen for å danne støysignaturtraser ved de opprinnelige tidsposisjonene. Filtre dannes som minimaliserer forskjellen mellom støysignaturtrasene og de opprinnelige seismikktrasene. Støysignaturtrasene filtreres og subtraheres så fra seismikktrasene. Trinnene med dannelse av filtre, filtrering og subtrahering benytter lineære adaptive filtreringsteknikker.

Rigsby, T. B. and Sanders, J. I., i US Patent Nr. 5,621,699, "Apparatus and Method of Calibrating Vertical Particle Velocity Detector and Pressure Detector in a Sea-Floor Cable with In-Situ Passive Monitoring", meddelt Apr. 15, 1997, beskriver en fremgangsmåte for å undertrykke vannkolonnegjenklang i seismikkdata fra undersøkelser med dobbeltsensorer. Geofon- og hydrofon signaler med inkludert støy detekteres samtidig fra samlokaliserte dobbeltsensorer. Geofon- og hydrofonstøysignaler som tilsvarende bakgrunnsstøy for henholdsvis geofonen og hydrofonen frembringes. Et normalisert relativt støysignal for forskjellen mellom geofon- og hydrofonstøysignalene bestemmes. Geofon- og hydrofon signalenes relative amplituder skaleres ved hjelp av en funksjon som er avhengig av det normaliserte støysignalet. De skalerte signalene kombineres så lineært. Starr, J. G., en av oppfinnerne for foreliggende oppfinnelse, i US-patent Nr. 5,754,492, "Method of Reverberation Removal from Seismic Data

and Removal of Dual Sensor Coupling Errors", meddelt 19. mai 1998, og i US-patent Nr. 5,825,716, "Method of Reverberation Removal from Seismic Data and Removal of Dual Sensor Coupling Errors", meddelt 20. oktober 1998, beskriver en fremgangsmåte for å undertrykke vannkolonnegjenklang i seismikkdata fra dobbeltsensorundersøkelser. '716-patentet er avdelt fra '492-patentet. Et oppadgående og et nedadgående bølgefelt bestemmes i seismikkdataene. Det nedadgående bølgefeltet multipliseres med refleksjonskoeffisienten for den frie overflaten og adderes så til det oppadgående bølgefeltet.

Starrs '492-patent og '716-patent beskriver også en fremgangsmåte for å dempe effektene av mottakerkopling i seismikkdata fra rekker av dobbeltsensorer. En responsperiode for gjenklang bestemmes først. Et første kryssutjevningsfilter konstrueres som en funksjon av responsperioden for gjenklang og et andre kryssutjevningsfilter konstrueres som en funksjon av seismikkdataene. Et inverst koplingsfilter utledes som en funksjon av de første og andre filtrene. Det inverse koplingsfilteret benyttes så på dataene.

Geiser, J, Barr, F., and Paffenholz, J. beskriver i sin publikasjon "Vertical Component Coupling of OBC-Data", EAGE 64th Conference & Exhibition, Florence, Italy, 27-30 mai 2002, en fremgangsmåte for å dempe vertikale koplingseffekter i seismikkdata fra tre-komponent dobbeltsensorundersøkelser med havbunnskabler. Antas det at hydrofonen er perfekt koplet til sitt fluidmedium, benyttes dens trykksignal som et referansesignal for den vertikale komponenten av hastighets-signalet fra en geofon. Et minste kvadraters forhold mellom trykk- og vertikalkomponentsignalene minimaliseres for å frembringe en korreksjonsfaktor for hastighetssignalet vertikale komponent. Referansen til Geiser m.fl. drøfter ikke hvordan deres fremgangsmåte ville kunne benyttes, om i det hele tatt, på én-komponent dobbeltsensor seismikkdata.

OPPSUMMERING AV OPPFINNELSEN

Ett aspekt ved oppfinnelsen er en fremgangsmåte for å behandle seismikkdata fra samtidig registrerte samlokaliserte trykksensorer og partikkelhastighetssensorer. Seismikkdataene behandles først ved å bestemme et oppadgående bølgefelt og et nedadgående bølgefelt i seismikkdataene. I alternative utførelsesformer kan det oppadgående bølgefeltet benyttes som en støymodell for det nedadgående bølgefeltet eller det nedadgående bølgefeltet kan benyttes som støymodell for det oppadgående bølgefeltet. Støymodellen brukes til å fjerne støy fra det andre bølgefeltet.

En annen mulig fremgangsmåte for seismikkundersøkelser omfatter utplassering av samlokaliserte hydrofoner og geofoner ved valgte posisjoner på bunnen av et legeme av vann, aktivering av en seismisk energikilde nær de samlokaliserte hydrofonene og geofonene og registrering av signalene detektert av hydrofonene og geofonene. Et oppadgående bølgefelt og et nedadgående bølgefelt bestemmes fra de registrerte signalene. Støy fjernes fra det minst ene av det oppadgående bølgefelt og det nedadgående bølgefelt ved å bruke minst en av det nedadgående bølgefelt og det oppadgående bølgefelt som støymodell.

Andre aspekter og fordeler ved oppfinnelsen vil være åpenbare fra beskrivelsen og kravene som følger.

KORT BESKRIVELSE AV TEGNINGENE

Oppfinnelsen og dens fordeler vil lettere kunne forstås med henvisning til den følgende detaljerte beskrivelse og de vedføyde tegningene, der

FIG. 1 viser et oppriss av en typisk seismikkundersøkelse som benytter en havbunnskabel,

FIG. 2 viser et flytskjema som illustrerer behandlings-elementene i en utførelse av oppfinnelsens fremgangsmåte for

å behandle seismikkdata,

FIG. 3 viser et skjematisk bilde av oppadgående og nedadgående bølgefelter i vannkolonnen,

FIG. 4 viser det registrerte seismikksignalet for et eksempel på et oppadgående bølgefelt,

FIG. 5 viser det oppadgående bølgefeltet fra FIG. 4 etter bruk av oppfinnelsens fremgangsmåte, og

FIG. 6 viser forskjellen mellom FIG. 4 og FIG. 5.

Idet oppfinnelsen vil bli beskrevet i forbindelse med dens foretrukne utførelsesformer, vil det bli forstått at oppfinnelsen ikke er begrenset til disse. Tvert imot er oppfinnelsen ment å dekke alle alternativer, og ekvivalenter som kan inkluderes innen omfanget av oppfinnelsen, som definert av de vedføyde kravene.

DETALJERT BESKRIVELSE

Oppfinnelsen vedrører generelt fremgangsmåter for å dempe støy i seismikkdata innsamlet fra undersøkelser med dobbeltsensor havbunnskabler. Mer spesielt, så inkluderer oppfinnelsen en fremgangsmåte for å dempe koherent støy, slik som slambevegelse og uønskede S-bølger, som geofonen er mer følsom for enn hydrofonen.

FIG. 1 viser et oppriss av en typisk seismikkundersøkelse som bruker en havbunns(eller sjøbunns)kabel. Et legeme av vann 101, som kan være havet eller en sjø eller lignende, over en del av jorden 102 er begrenset ved sin overflate av en vann/luft grenseflate 103 og ved sin bunn av en vann/jord grenseflate 104. Et seismikkundersøkelsesfartøy eller -skip 105 i vannlegemet 101 plasserer sjøbunnskabler 106 på sjøbunnen 104 (bare én er vist, for enkelhet). Sjøbunnskabelen 106 inneholder par av samlokaliserte dobbeltsensorer (bare ett par er vist, for enkelhet) romlig atskilt langs dens lengde. Hvert sensorpar inneholder

vanligvis en hydrofon 107 og en geofon 108. Seismikkilden 109 kan bli slept av seismikkundersøkelsesskipet 105 eller av et annet seismikkundersøkelsesskip (ikke vist). Seismikkilden 109 slepes gjennom vannlegemet 101 og aktiveres for å avgi

5 akustiske bølger ved valgte intervaller i nærheten av sjøbunnskablene 106. Signaler fra sensorparene (hydrofon 107 og geofon 108) registreres av utstyr (ikke vist) vanligvis anbrakt i eller dannende en del av sjøbunnskabelen 106. Sjøbunnskabelen 106 flyttes så til et annet sted,

10 seismikkilden 109 slepes igjen og aktiveres og signalene registreres. Prosessen gjentas inntil seismikkundersøkelsen er fullført over et valgt område.

FIG. 2 viser et flytskjema som illustrerer behandlings-trinnene i et utførelseseksempel av oppfinnelsens fremgangsmåte for å behandle seismikkdata. Ved 201 utvelges seismikk-

15 data for seismikkdatabehandling. Seismikkdataene er av en type innsamlet fra undersøkelser med dobbeltsensor havbunnskabler. Samlokaliserte sensorpar er stilt opp i rekke på sjøbunnen i havkabler. Sensorparene inkluderer fortrinnsvis

20 minst en sensor som detekterer vanntrykk, og en sensor som detekterer partikkelhastighet for seismikkbølger som passerer dem. Sensorer som detekterer vanntrykk og detekterer partikkelhastighet er vanligvis kjent på fagområdet som hydrofoner og geofoner, henholdsvis. Oppfinnelsen er

25 imidlertid ikke begrenset til disse to spesielle sensorene. Andre sensorer inkluderende, men ikke begrenset til, partikkelbevegelsesdetektorer eller partikkelakselerasjonsdetektorer, kan benyttes med passende enkel modifikasjon av oppfinnelsens fremgangsmåte. Bare for begrepsmessig klarhet

30 vil de to sensorene som benyttes til å danne dobbeltsensorseismikkdataene bli henvist til som hydrofoner og geofoner. Ved 202 innhentes et hydrofonsignal fra seismikkdataene valgt ved trinn 201. På samme vis, ved 203, innhentes et geofon-

signal fra seismikkdataene valgt ved 201. Det innhentede geofonsignalet, ved 203, tilsvarer det innhentede hydrofon-signalet, ved 202. Dette betyr at hydrofon- og geofon-signalene innhentet ved 202 og 203, henholdsvis, ble

5 registrert samtidig fra samlokaliserte hydrofoner og geofoner i dobbeltsensor seismikkundersøkelser som dannet seismikk-dataene valgt ved 201.

Hydrofoner og geofoner reagerer ikke mekanisk på tilsvarende fysiske effekter av trykk og hastighet,

10 henholdsvis, fra en passerende seismikkbølge med signaler av samme amplitude. Forskjeller i signalresponsen mellom geofoner og hydrofoner skyldes at forskjellige konstanter for måleverdiomforming eller ringingsrespons for forskjellige detektorer bestemmer omvandlingen av den detekterte mekaniske

15 effekt til et elektrisk signal. Hydrofoner og geofoner kopler heller ikke fysisk til det omkringliggende medium med den samme effektiviteten. Hydrofoner kopler vanligvis godt til det omkringliggende vannmedium. Ved bruk av en havbunnskabel kopler imidlertid geofoner vanligvis ikke godt til sjøbunnen.

20 Det er vanligvis verken mulig eller økonomisk å manuelt feste geofonene til sjøbunnen.

Valgfritt, så justeres eller filtreres, ved 204 og 205, hydrofon- og geofonsignalene innhentet ved 202 og 203, henholdsvis, for å kompensere for inkluderte forskjeller i

25 deres respons på seismikksignalet, dersom responsene ikke matcher. Disse responsforskjellene og deres korrektive filtre er velkjent på fagområdet. Disse responsforskjellene inkluderer, men er ikke begrenset til forskjeller mellom hydrofoner og geofoner med hensyn til deres omforming av

30 måleverdier, ringingsrespons, og koplingseffektivitet. Et hvilket som helst slikt filter kan anvendes på én av eller både hydrofon og geofonsignalene, slik det er velkjent på fagområdet.

Ettersom geofonddataene inneholder signal pluss støy og hydrofonddataene inneholder primært signal, kan en modell for støyen oppnås ved å sammenligne geofonddataene og hydrofonddataene.

5 FIG. 3 viser et skjematisk bilde av oppadgående og nedadgående bølgefelter i vannkolonnen. Et vannlegeme 301 over jorden 302 er begrenset ved vannoverflaten 303 av en vann/luft grenseflate og ved sjøbunnen av 304 av en vann/jord grenseflate, begge gode reflektorer av akustisk energi.

10 Ettersom forskjellen i akustisk impedans mellom luft og vann er så stor, så er refleksjonskoeffisienten ved vannoverflaten 303 i hovedsak lik -1 . Det negative fortegnet indikerer en polaritetsvending, dvs. et faseskift på 180° . Forskjellen i akustisk impedans mellom vann og jord er ikke så stor, så

15 refleksjonskoeffisienten ved sjøbunnen 304 tas som r . Verdien av r ($-1 < r < 1$) avhenger av den akustiske impedansen for materialet i jorden 302 rett ved og under sjøbunnen 304 (dvs. den akustiske impedansen til sjøbunnen). Et oppadgående bølgefelt 305, som returnerer fra minst én refleksjon fra en

20 grenseflate mellom de underliggende lag i jorden 302, kommer inn i vannlegemet 301 og fortsetter til vannoverflaten 303. Bølgefeltet reflekteres delvis ved vannoverflaten 303 og en del blir igjen et nedadgående bølgefelt 306. Bølgefeltet reflekteres delvis ved sjøbunnen 304 og en del blir igjen et

25 oppadgående bølgefelt 307. På samme vis reflekteres bølgefeltet delvis ved vannoverflaten 303 og en del blir igjen et nedadgående bølgefelt 308. Denne prosessen med multippelrefleksjoner fortsetter i det uendelige.

30 En sjøbunnskabel 309, plassert i vannlegemet 301 på sjøbunnen 304, inneholder par av samlokaliserte dobbelt-sensorer romlig atskilt langs dens lengde. Bare én sjøbunnskabel 309 og bare ett par sensorer er vist, for enkelhet. Hvert sensorpar inneholder vanligvis en hydrofon 310 og en

geofon 311. Et oppadgående bølgefelt som, slik som bølgefelt 305, som passerer hydrofonen og geofonen 311 fra undersiden, ville danne elektriske impulser i begge sensorene. Dette første oppadgående bølgefeltet 305 vil danne et positivt elektrisk signal i både hydrofonen 310 og geofonen 311, ifølge sedvane innen industrien. Når det oppadgående bølgefelt 305 reflekteres delvis ved vannoverflaten 303, har det resulterende nedadgående bølgefelt 306 en 180° fasevending. Derved vil den urettede (eng.: omni-directional) hydrofonen 310 respondere på det polaritetsomvendte nedadgående bølgefeltet 306 med et negativt elektrisk signal. Den rettede geofonen 311 vil imidlertid respondere på det polaritetsomvendte nedadgående bølgefeltet 306, som nå kommer ovenfra, med et annet positivt elektrisk signal. Geofonen 311 har igjen snudd signalets allerede en gang snudde polaritet. Derfor danner det nedadgående bølgefeltet 306 polaritetsomvendte signaler mellom hydrofonene 310 og geofonene 311.

Videre, reflekteres det polaritetsomvendte nedadgående bølgefeltet 306 delvis fra vannbunnen 304 uten faseomvending og det resulterende oppadgående bølgefelt 307 passerer et par hydrofoner 310 og geofoner 311 fra undersiden igjen. Denne gangen danner det polaritetsomvendte oppadgående bølgefelt 307 et negativt elektrisk signal i hydrofonen 310 og et negativt elektrisk signal i geofonen 311. Ved en andre delvis refleksjon ved vannoverflaten 303 har det resulterende nedadgående bølgefelt 308 gjennomgått en andre 180° faseomvending, tilbake til den opprinnelige polariteten. Derved vil det nedadgående bølgefelt 308 danne et positivt elektrisk signal ved hydrofonen 310 og et negativt elektrisk signal ved geofonen 311. Denne prosessen med vekslende elektriske signaler fortsetter i det uendelige. Derfor fortsetter det elektriske signalet dannet av hydrofonen 310 med vekslende negativ og positiv polaritet, mens det

tilsvarende elektriske signalet dannet av geofonen 311 fortsetter med vekslende positive og negative polariteter. Disse forskjellig vekslende polaritetene har blitt benyttet på fagområdet til å danne oppadgående og nedadgående bølgefelter fra hydrofon- og geofonsignalene.

Å bestemme de oppadgående og nedadgående bølgefelter kan utføres ved hjelp av en hvilken som helst teknikk som er kjent på fagområdet seismikkbehandling. Et ikke-begrensende eksempel vil her bli vist. I følge analysen i kolonne 3 og 4 i Starr, US-patent Nr. 5,754,492, diskutert i bakgrunnsseksjonen her, så bestemmes den relative polariteten og amplituden for P-bølgen for et hvilket som helst gitt tidspunkt ved produktet av refleksjonskoeffisientene for hver suksessive refleksjon mellom vannoverflaten og vannbunnen.

For seismikkdetektorer lokalisert på sjøbunnen 304, kan trykkresponsen P og partikkelhastighetsresponsen V uttrykkes som funksjoner av variabelen Z .

$$Z = e^{i\omega\tau},$$

der e er Euler-tallet som representerer eksponentialfunksjonen, i er det imaginære tall $\sqrt{-1}$, ω er frekvensen, og τ er toveisgangtiden gjennom vannlegemet 301. Toveisgangtiden kan beregnes ved følgende uttrykk:

$$\tau = \frac{2d}{v \cos \theta},$$

der d er den vertikale vanndybden, v er den seismiske energiens hastighet i vannet, og θ er innfallsvinkelen.

Trykkresponsen, $P(Z)$, uttrykt ved Z , er gitt av ligningen

$$P(Z) = Z^0 + (1+r)Z^1 - r(1+r)Z^2 + r^2(1+r)Z^3 - \dots + \dots, \quad (1)$$

der r er refleksjonskoeffisienten for vannbunnen. Som for ligning (1) så er partikkelhastighetsresponsen, $V(Z)$, uttrykt ved Z , gitt av ligningen:

5

$$\frac{\alpha}{\cos\theta}V(Z) = Z^0 - (1-r)Z^1 + r(1-r)Z^2 - r^2(1-r)Z^3 + \dots = \dots \quad (2)$$

der α er den akustiske impedansen.

10

Beregning av de lukkede formene av Ligningen (1) og (2) gir uttrykkene:

$$P(Z) = 1 + \frac{(1-r)Z}{1+rZ} = \frac{1+Z}{1+rZ} \quad (3)$$

15

og

$$\frac{\alpha}{\cos\theta}V(Z) = 1 - \frac{(1+r)Z}{1+rZ} = \frac{1-Z}{1+rZ} . \quad (4)$$

20

Det vendes så tilbake til FIG. 2, der ved 206 et oppadgående bølgefelt bestemmes i seismikkdataene. Å bestemme det oppadgående bølgefelt omfatter fortrinnsvis å kombinere hydrofon- og geofonsignalet som innhentes ved 202 og 203, henholdsvis. Spesielt omfatter kombinerings av hydrofon- og geofondata fortrinnsvis addering av hydrofon- og geofon-signalene.

25

Det oppadgående vektorbølgefeltet, $U(Z)$, bestemmes fortrinnsvis ved addering av ligningene (3) og (4), som gir det følgende uttrykket:

30

$$U(Z) = \frac{1}{2} \left[\frac{\alpha}{\cos\theta}V(Z) + P(Z) \right] = \frac{1}{2} \left[\frac{1+Z}{1+rZ} + \frac{1-Z}{1+rZ} \right] = \frac{1}{1+rZ} . \quad (5)$$

Ved 207 bestemmes på samme vis et nedadgående bølgefelt fra seismikkdataene. Å bestemme det nedadgående bølgefeltet omfatter fortrinnsvis å kombinere hydrofon- og geofondataene innhentet ved 202 og 203, henholdsvis, for å danne et nedadgående bølgefelt. Spesielt omfatter (det) å kombinere hydrofon- og geofondataene å subtrahere hydrofondataene fra geofondataene.

Det polaritetsomvendte nedadgående vektorbølgefeltet, $D(Z)$, bestemmes fortrinnsvis ved å subtrahere ligning (3) fra ligning (4), som gir det følgende uttrykket:

$$D(Z) = \frac{1}{2} \left[\frac{\alpha}{\cos \theta} V(Z) + P(Z) \right] = \frac{1}{2} \left[\frac{1+Z}{1+rZ} - \frac{1-Z}{1+rZ} \right] = \frac{Z}{1+rZ}. \quad (6)$$

Så snart de oppadgående og nedadgående bølgefeltene er bestemt, ved 206 og 207 henholdsvis, vil signalet i de oppadgående og nedadgående bølgefeltene bli separert ved hjelp av et lineært faseskift, men støyen er lik i de to bølgefeltene. Det nedadgående bølgefeltet kan derfor brukes som en støymodell for det oppadgående bølgefeltet. På samme vis kan det oppadgående bølgefeltet brukes som en støymodell for det nedadgående bølgefeltet. I en utførelsesform kan så adaptiv subtrahering brukes, til å fjerne støyen fra geofondataene.

Ved 208 båndpassfiltreres det oppadgående bølgefeltet dannet ved 206 for å beholde bare den lavere delen av frekvensspektret. I praksis er støyen som blir fjernet vanligvis begrenset til den lavere delen av frekvensspektret. Derved filtreres vanligvis støymodellen (enten det oppadgående eller nedadgående bølgefeltet bestemt ved 206 og 207, henholdsvis) for å beholde bare støyen i frekvenspassbåndet. Vanligvis kan denne lavere delen av spektret omfatte

frekvensene mindre enn omkring 20Hz, men oppfinnelsen er ikke begrenset til dette passbåndet. Ved 209 båndpassfiltreres på samme vis det nedadgående bølgefeltet dannet ved 207 for å beholde bare den lavere delen av frekvensspektret. Igjen kan den lavere delen vanligvis omfatte frekvensene lavere enn omkring 20Hz, men oppfinnelsen er ikke begrenset til dette passbåndet.

Ved 210 velges ett av de oppadgående og nedadgående bølgefeltene filtrert ved 208 og 209, henholdsvis, for bruk som en støymodell for det andre bølgefeltet, det andre bølgefeltet er det nedadgående eller oppadgående bølgefeltet. Det andre bølgefeltet vil så bli henvist til som "inputsignalet". Dersom det båndpassfiltrerte oppadgående bølgefeltet benyttes som støymodellen og det nedadgående bølgefeltet benyttes som "inputsignalet", så fortsetter prosessen som vist ved 211. Alternativt, dersom det båndpassfiltrerte nedadgående bølgefeltet benyttes som støymodell, og det oppadgående bølgefeltet benyttes som "inputsignalet", så fortsetter prosessen som vist ved 212.

Ved 213 skilles støy- og signalenergien i det valgte "inputsignalet" ved adaptiv subtraksjon av støymodellen, slik som bestemt ved 211 eller 212 fra det spesielle "inputsignalet" valgt ved 210. I adaptiv subtraksjon utformes et sett av filtre $f(t)$, basert på en valgt vindusstørrelse og filterlengde, som når (den blir) konvolvert med "støymodellen" minimaliserer den totale energien i et "utgangssignal". "Utgangssignal" som benyttet her betyr støymodellen (om det er oppadgående eller nedadgående bølgefelt etter båndpassfiltrering) konvolvert med filtrene $f(t)$, der konvolusjonen blir subtrahert fra "inputsignalet", (det andre av det oppadgående eller nedadgående bølgefelt), eller som vist i det følgende uttrykket:

$$\text{output_signal} = \text{input_signal} - (f(t) * \text{noise_model}) \quad (7)$$

I utførelsesformer av en fremgangsmåte i henhold til oppfinnelsen, deles "inputsignal"- og støymodelldatasettene opp i atskilte vinduer. Vinduene kan hver ha bruker-spesifiserte lengder på tids- og romvinduene. Fortrinnsvis overlapper vinduene hverandre i retningene for både tid og rom med omkring 50 prosent av vinduslengden i tids- og/eller romretningen. Dermed vil hver tidssample (bortsett fra ved toppen, bunnen, ved kantene på venstre side og på høyre side i en trasesamling) bli kopiert inn i fire vinduer. Så brukes, i noen utførelsesformer, en cosinus-kvadrert avdemping i hvert vindu på samplene fra midten av samlingen (a) oppover og nedover (i tidsretningen) og (b) mot venstre og mot høyre (dvs. i den positive x-retningen).

Den totale energien E for utgangssignalet vil minimaliseres, i minste kvadrats mening, når filtrene er riktig bestemt. Den totale energien E i hvert vindu er definert som:

$$E = \sum_i^m \sum_j^n \text{output_signal}[(i-1)\Delta t, (j-1)\Delta x]^2 \quad (8)$$

der hvert vindu inneholder m sampler i tid og n sampler i rom. De optimale filtrene $f(t)$ er tidskonvolusjonsfiltre som kan variere fra vindu til vindu. Der et hvilket som helst datavindu enten i støymodellen eller inputsignalet er sammensatt av bare nuller, så vil ikke den adaptive subtraksjonen operere på det vinduet og outputsignalet vil være ekvivalent med inputsignalet i det vinduet.

Bestemmelsen av minstekvadratsfilteret utføres på en vinu-til-vindu basis med resultatene uavhengige fra vindu til vindu. Dermed kopieres de overlappende seksjonene ut flere ganger, multiplikasjonsfiltrert og så summert sammen

ved slutten. I denne utførelsesformen er filtrene for hvert vindu minste-kvadrats Wiener filtre, som er beregnet på en konvensjonell måte ved bruk av Wiener-Levinson algoritmen.

5 Når filtrene $f(t)$ bestemmes og energien i hvert vindu minimaliseres, så representerer utgangssignalet et oppadgående eller nedadgående bølgefelt som har minimum koherent støy.

FIG. 4 viser det registrerte seismikksignalet for et eksempel på et oppadgående bølgefelt. Seismikksignalet
10 inkluderer eksempler på koherent støy forårsaket av uønskede S bølger 401 og slambevegelse 402.

FIG. 5 viser det oppadgående bølgefeltet fra FIG. 4 etter anvendelse av oppfinnelsens fremgangsmåte. Effektene av den koherente støyen i FIG. 4 har i hovedsak blitt eliminert
15 ved 501 og 502. FIG. 6 viser forskjellen mellom FIGUR 4 og 5.

Utførelsesformer av en fremgangsmåte i henhold til oppfinnelsen kan forbedre fortolkningen av seismikkundersøkelser med dobbeltsensor sjøbunnskabler ved å redusere mengden koherent støy som er tilstede i dataene fra kildene
20 slik som slambevegelse og uønskede S-bølger.

P a t e n t k r a v

1. Fremgangsmåte for å behandle seismikkdata fra samtidig
5 registrerte samlokaliserte trykksensorer og partikkel-
hastighetssensorer, omfattende
 å bestemme et oppadgående bølgefelt fra seismikkdataene,
 å bestemme et nedadgående bølgefelt fra seismikkdataene,
og *karakterisert ved*
10 å fjerne støy fra det minst ett av det oppadgående
bølgefeltet og det nedadgående bølgefeltet ved å bruke det
andre av det nedadgående bølgefeltet og det oppadgående
bølgefeltet som en støymodell.
- 15 2. Fremgangsmåte ifølge krav 1, der bestemmelsen av det
oppadgående bølgefeltet omfatter
 å innhente trykk- og partikkelbevegelsessignaler fra
seismikkdataene, og
 å kombinere trykk- og partikkelbevegelsessignalene.
20
3. Fremgangsmåte ifølge krav 2, der det å kombinere
trykksensor- og partikkelbevegelsessensorsignalene omfatter å
addere trykksensor- og partikkelbevegelsessensorsignalene.
- 25 4. Fremgangsmåte ifølge krav 1, der det å bestemme det
nedadgående bølgefeltet omfatter
 å frembringe trykksensor- og partikkelbevegelsessensor-
signaler fra seismikkdataene, og
 å kombinere trykksensor- og partikkelbevegelses-
30 sensorsignalene.
5. Fremgangsmåte ifølge krav 4, der det å kombinere
trykksensor- og partikkelbevegelsessensorsignalene omfatter å

subtrahere trykksensorsignalet fra partikkelbevegelses-signalet.

6. Fremgangsmåte ifølge krav 1,
5 omfattende å filtrere seismikkdataene for å kompensere for en forskjell i måleverdiomformingen mellom trykksensorene og partikkelbevegelsessensorene.

7. Fremgangsmåte ifølge krav 1,
10 omfattende å filtrere seismikkdataene for å kompensere for ringningsresponsforskjellen mellom trykksensorene og partikkelbevegelsessensorene.

8. Fremgangsmåte ifølge krav 1,
15 omfattende å filtrere seismikkdataene for å kompensere for forskjeller i koplingseffektivitet mellom trykksensorene og partikkelbevegelsessensorene.

9. Fremgangsmåte ifølge krav 1,
20 omfattende å filtrere støymodellen til å inneholde bare støyens frekvenspassbånd.

10. Fremgangsmåte ifølge krav 9,
25 der støyens frekvenspassbånd har en øvre grense ved nesten omkring 20 Hz.

11. Fremgangsmåte ifølge krav 1,
der det å fjerne støyen omfatter adaptiv subtraksjon av støymodellen fra den minst ene av de oppadgående og
30 nedadgående bølgefeltene.

12. Fremgangsmåte ifølge krav 11,
der den adaptive subtraksjonen omfatter

å dele støymodellen og den minst ene av de oppadgående og nedadgående bølgefeltene i separate vinduer, der vinduene har forhåndsvalgte vinduslengder for tid og rom, der vinduene har en 50% overlapping i retningene for både tid og rom,

- 5 å bruke en cosinus-kvadrats reduksjon på samplene fra midten av en trasesamling oppover, mot venstre og mot høyre.

- 13 Fremgangsmåte ifølge krav 11,
der den adaptive subtraksjonen i hovedsak fjerner støy fra
10 det oppadgående bølgefeltet.

14. Fremgangsmåte ifølge krav 11,
der den adaptive subtraksjonen i hovedsak fjerner støy fra
det nedadgående bølgefeltet.

- 15 15. Fremgangsmåte ifølge krav 1,
der trykksensorene omfatter hydrofoner.

16. Fremgangsmåte ifølge krav 1,
20 der partikkelbevegelsessensorene omfatter geofoner.

17. Fremgangsmåte ifølge 1,
der partikkelbevegelsessensorene omfatter akselerasjons-
sensorer.

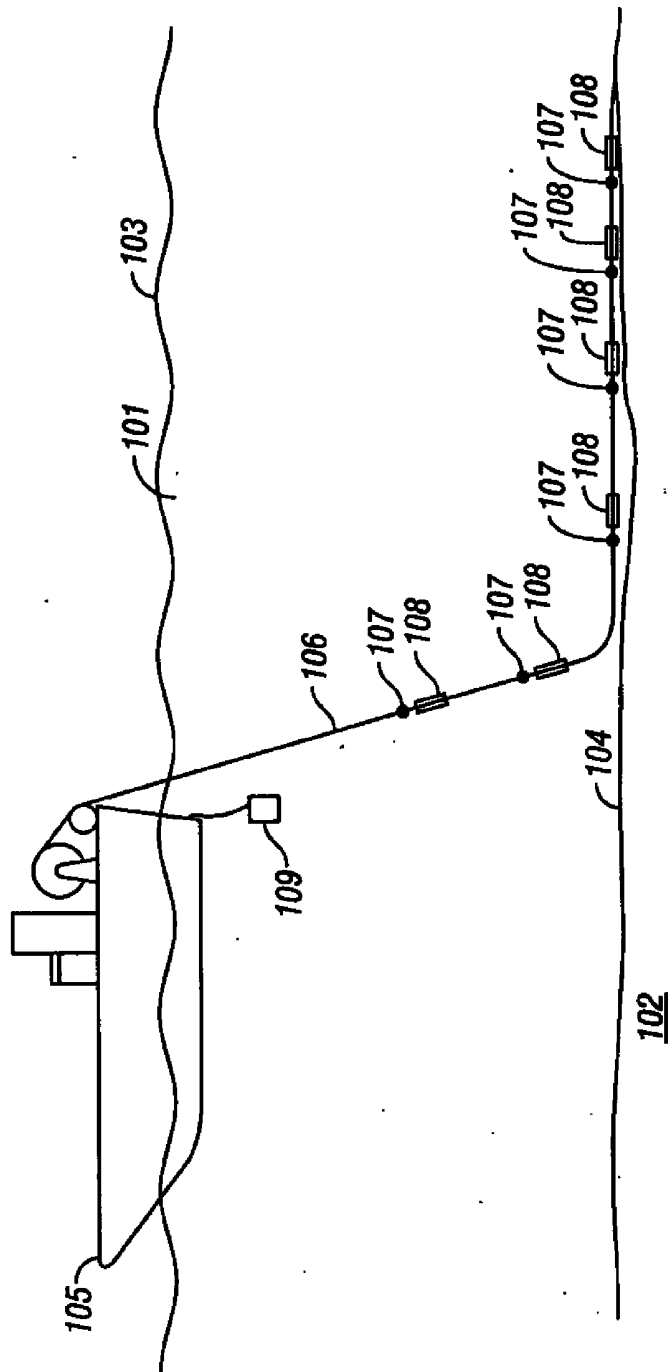


FIG. 1

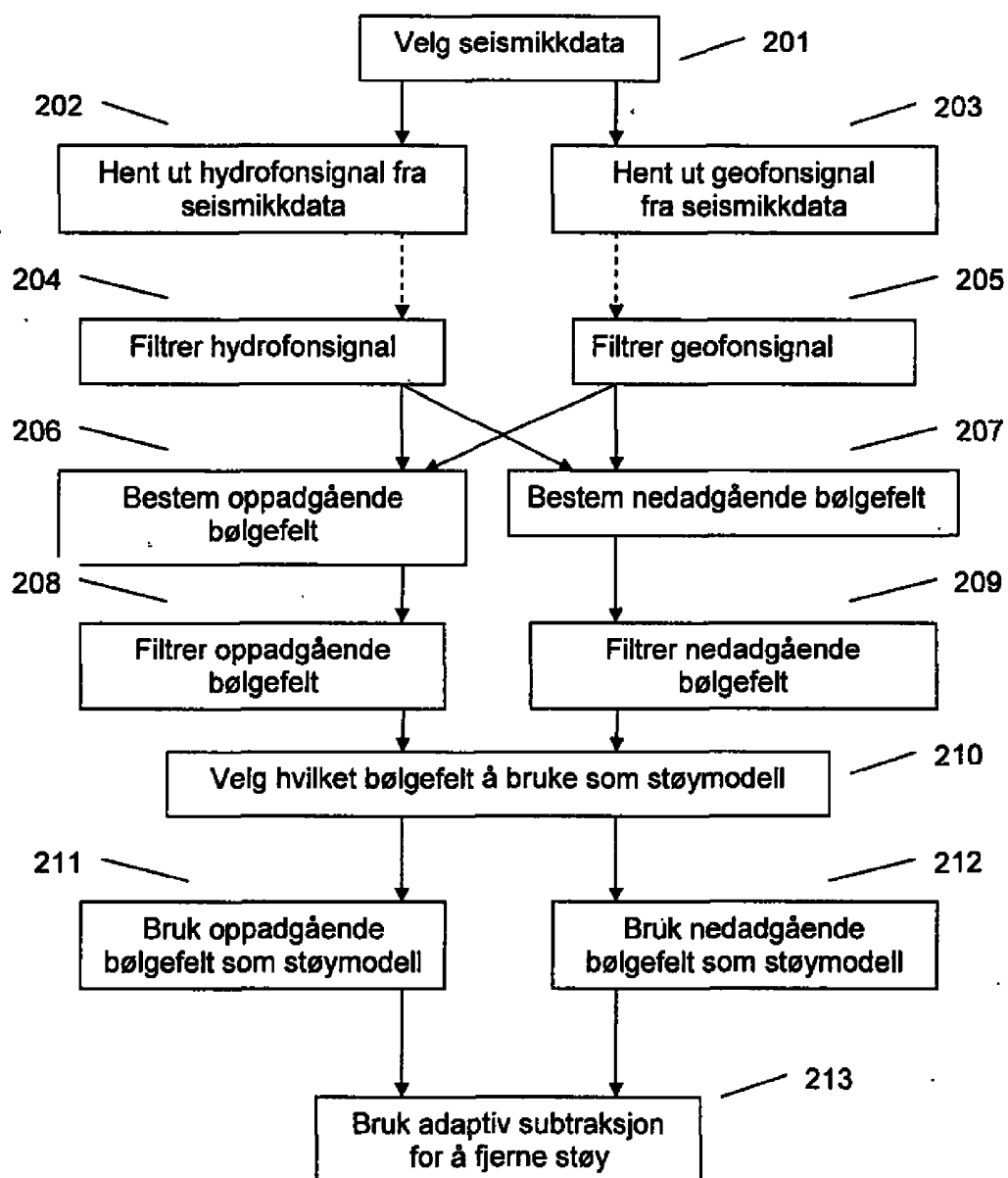


FIG. 2

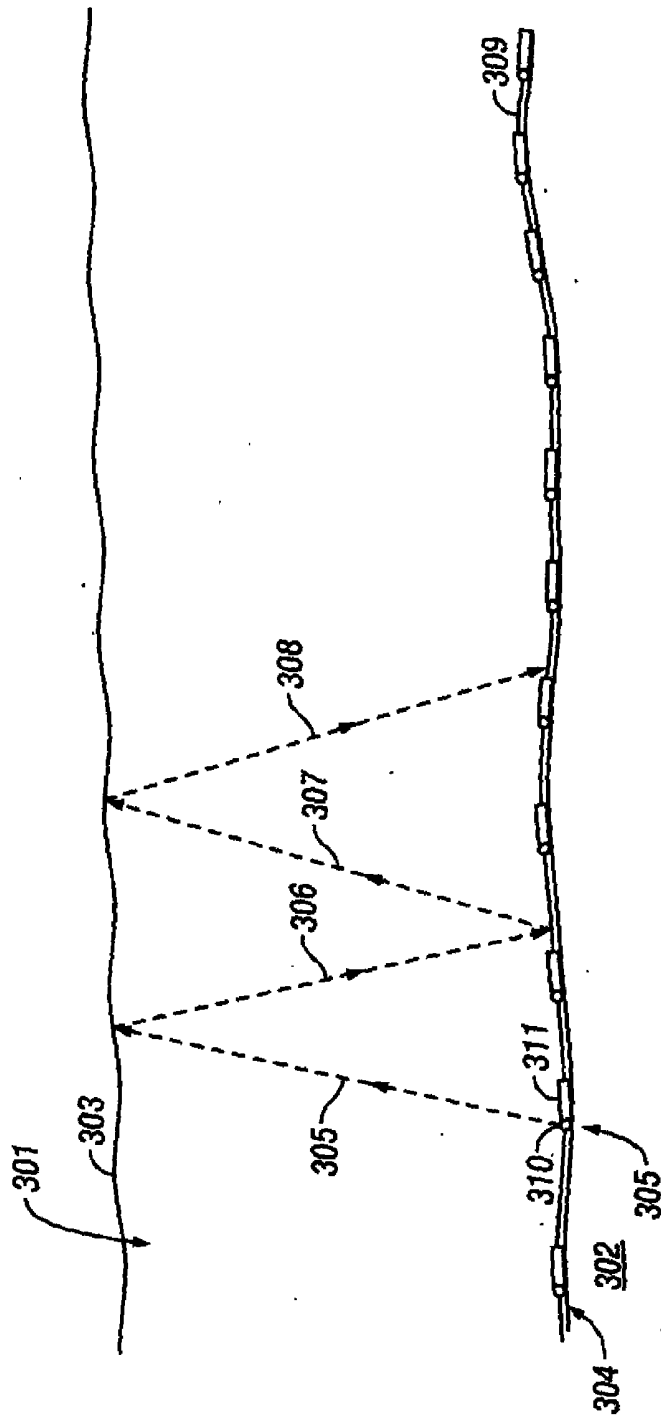


FIG. 3

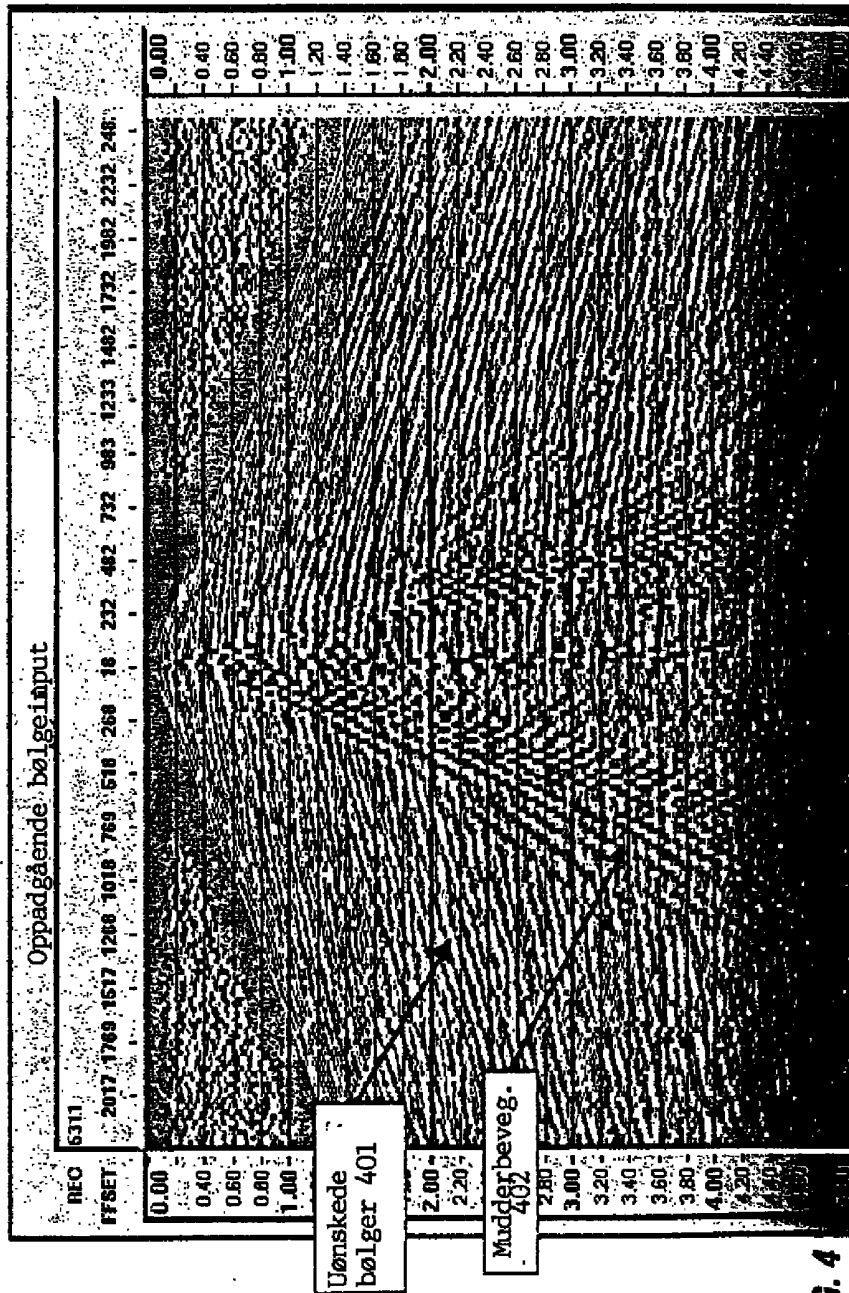
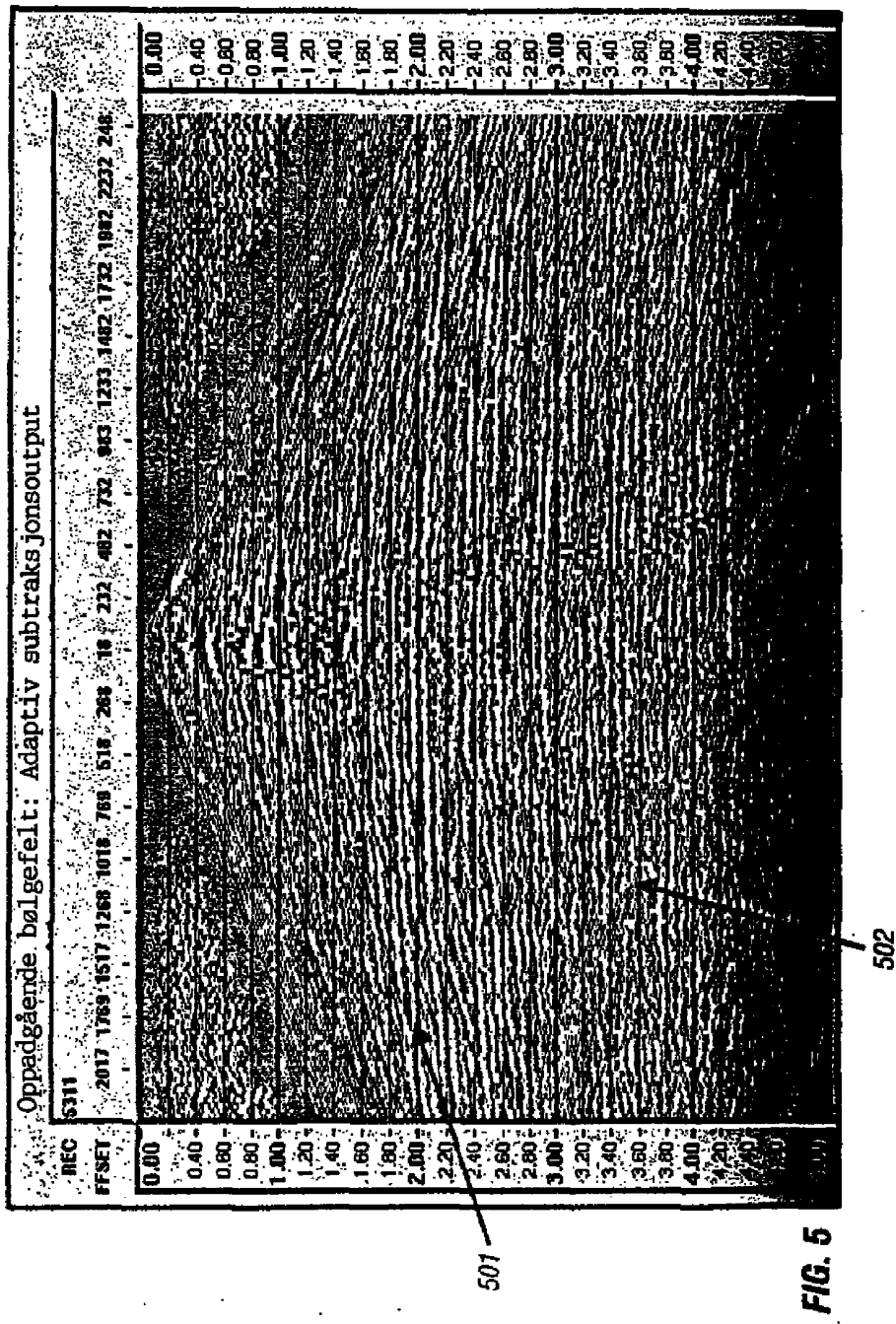


FIG. 4



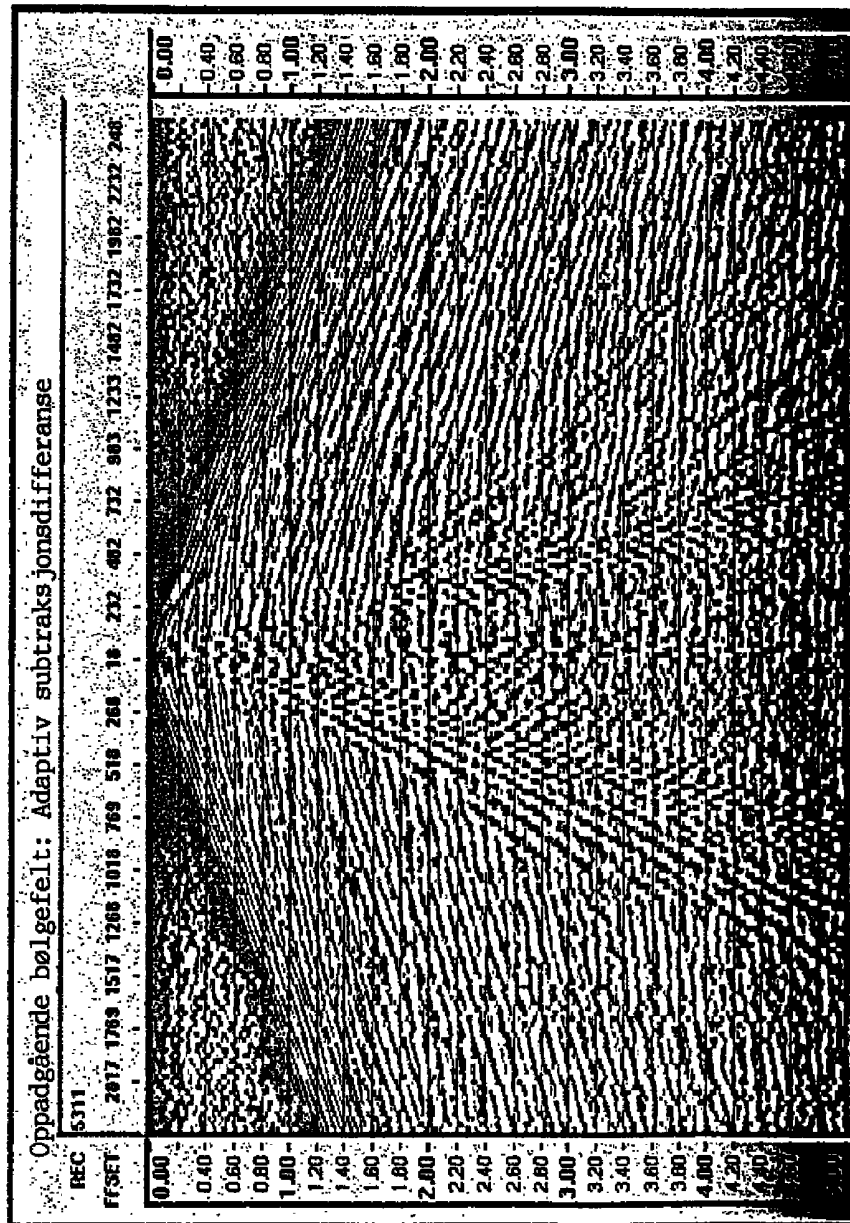


FIG. 6