(12) **PATENT**

(19) NO (11) **339152** (13) **B1**

NORGE (51) Int Cl.
G01V 1/50 (2006.01)

Patentstyret

(21)	Søknadsnr	20072759	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr	2005.12.22 PCT/US2005/46827
(22)	Inng.dag	2007.05.30	(85)	Videreføringsdag	2007.05.30
(24)	Løpedag	2005.12.22	(30)	Prioritet	2005.01.14, US, 60/644,318 2005.11.09, US, 60/734,797
(41)	Alm.tilgj	2007.08.13			
(45)	Meddelt	2016.11.14			

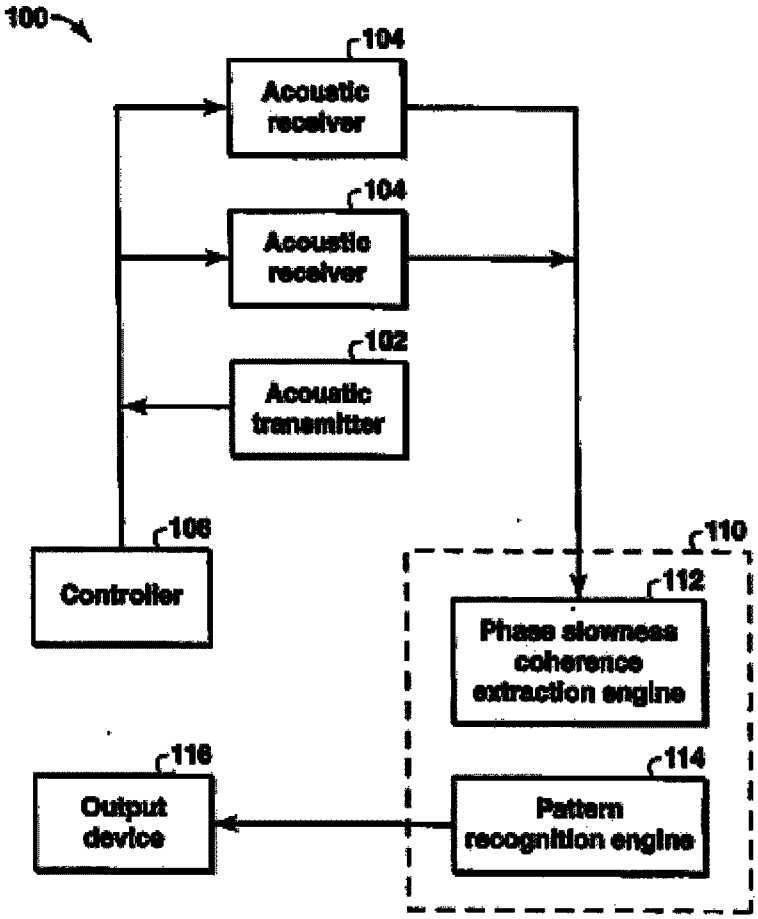
(73) Innehaver ExxonMobil Upstream Research Company, P. O. Box 2189, Corp-urc-sw348, US-TX77252-2189 HOUSTON, USA
(72) Oppfinner Hezhu Yin, 4427 Greystone Way, US-TX77479 SUGAR LAND, USA
Xiaojun Huang, 6318 East Mystic Meadow, US-TX77021 HOUSTON, USA
(74) Fullmektig Bryn Aarflot AS, Postboks 449 Sentrum, 0104 OSLO, Norge

(54) Benevnelse **Fremgangsmåte for å anslå seismisk langsomhet i undergrunnen**

(56) Anførte publikasjoner US 2002093879 A1
US 6654688 B1

(57) Sammendrag

Fremgangsmåte for estimering av seismisk langsomhet av en geologisk undergrunns-formasjon ved hjelp av bølgeformer registrert av et akustisk loggeverktøy i et borehull i undergrunnen. Seismisk langsomhet blir utledet fra de registrerte bølgeformer etter transformasjon til frekvensdomenet (804) ved forskjellige frekvenser (806), og dataene omdannes til en kurve (808) som viser langsomheten, og som kan brukes som en objektiv funksjon for en anomali, slik som et lokalt maksimum eller minimum (810), og som kan bli identifisert som representative for et estimat av den seismiske langsomheten for undergrunnen i det aktuelle området.



Denne søknad krever prioritet fra både US foreløpig søknad nr. 60/644.318 innlevert 14. januar 2005 og 60/734.797 innlevert 9. november 2005.

Bakgrunn for oppfinnelsen

Denne oppfinnelse vedrører generelt akustisk brønnlogging, og særlig estimering av formasjonslangsomhet ved bruk av et akustisk brønnloggeverktøy.

Formasjonskompresjonslangsomhet og formasjonsskjærlangsomhet er to av de viktigste parametere som brukes ved leting etter og produksjon av hydrokarbon. Konvensjonelt måles de ved hjelp av sonisk logging. Et sonisk loggeverktøy består av to primære deler: datainnsamling og databehandling. Datainnsamling gjøres ved å sende et loggeverktøy ned inn i en lete- eller produksjonsbrønn, og den akustiske kilde på loggeverktøyet sender et akustisk signal som deretter forplanter seg langs brønnen og registreres ved flere mottakere med jevn innbyrdes avstand, og som har en avstand bort fra kilden. Formasjonskompresjonslangsomhet og formasjons-skjærlangsomhet blir deretter estimert ved behandling av de registrerte bølgeformer, ved bruk av gruppe-soniske behandlingsteknikker, så som langsomhet-tid kohe-rensmetoden (slowness-time coherence, STC).

Studier i den senere tid har vist at STC gir en nøyaktig langsomhetsestimering når, og kun når, de akustiske bølger som forplantes langs en brønnboring er ikke-dispersive, eller når flere ankomster som befinner seg i bølgeformene er godt separert i langsomhet-tiddomenen. Når de underliggende bølgeformer er dispersive eller bølgeformene består av blandede modi med like eller tilnærmede like gruppehastigheter, så som i tilfelle av vaierledning lekk-P-modus (for kompresjons-langsomhet i svært langsom formasjon), produserer vaierledningen dipolmodus (for skjærlangsomhet), kvadrupolmodus (for skjærlangsomhet) i logging under boring (logging while drilling, LWD) eller en monopolmodus (for kompresjonslangsomhet) i LWD, STC en systematisk feil i langsomhetsestimeringen. Mengden av disse systematiske feil er stor nok til å resultere i negative implikasjoner ved leting etter og produksjonen av hydrokarboner, så som at olje kan misoppfattes som vann ved vurdering av mulighetene. Videre, det korrelogram som produseres av STC-metoden, som for det inneværende brukes som et kvalitetskontrollverktøy for lang-

somhetsestimering av industrien, reflekterer ikke nøyaktigheten av langsomhetsestimeringen.

Nylig har flere løsningsmåter blitt utviklet for å løse problemene ved begrensningene av de eksisterende metoder og anordninger for estimering av formasjonslangsomhet. Disse faller i to kategorier: modelldrevet dispersjonskorreksjon og fasehastighetsbehandling. Løsningsmåtene med modelldrevet dispersjonskorreksjon har blitt tilpasset de store loggeselskapene, så som Schlumberger og Baker Hughes. De har blitt utviklet for å løse problemer ved vaierledning dipolmodus og lekk-P-modus. Baker Hughes anvender også sin løsningsmåte på sine kvadrupol LWD-data. Den modelldrevne løsningsmåte gjør likevel bruk av STC og korrigerer dispersjonseffekter ved anvendelse av en teoretisk beregnet dispersjonskurve for den korresponderende modus. Dispersjonskorreksjonen av den modelldrevne løsningsmåte er kun nøyaktig under flere antagelser som i virkeligheten er vanskelige å oppfylle, inkludert sirkulært borehull, homogen og isotropisk formasjon og god kunnskap om et mangfold av formasjons- og slamegenskaper, inkludert langsomhet og tetthet. I det tilfelle hvor bølgeformene inneholder flere ankomster som ikke er godt separert i langsomhet-tid domenen, vil ikke alle modelldrevne metoder komme fram til den korrekte formasjonslangsomhet. Løsningsmåten med fasehastighetsbehandling estimerer momentan faselangsomhet for hvert mottakerpar, hvilket potensielt kan gi mer nøyaktig langsomhetsestimering enn STC-metoden. Imidlertid, ettersom formasjonslangsomhetsverdien beregnes ved å ta gjennomsnittet over det ønskede gangtidsintervall, genererer fasehastighetsbehandlingen likevel en systematisk feil i langsomhetsestimering. Faselangsomhetsbehandlingen kan også være beheftet med enkelte stabilitetsproblemer.

Den foreliggende oppfinnelse er rettet mot å overvinne en eller flere av begrensningene ved eksisterende fremgangsmåter og anordninger for estimering av formasjonslangsomhet.

Oppsummering av oppfinnelsen

I henhold til et aspekt av den foreliggende oppfinnelse tilveiebringes en fremgangsmåte for estimering av formasjonslangsomhet ved bruk av bølgeformer som er registrert av et akustisk loggeverktøy, hvilken inkluderer ekstrahering av en faselangsomhetskoherens av de registrerte bølgeformer ved en flerhet av frekvenser innenfor

et område av frekvenser og faselangsomheter; konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en formasjonslangsomhetskurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens; og bestemmelse av en eller flere anomalier innenfor formasjonslangsomhetskurven, hvor lokaliseringen av en av anomaliene av formasjonslangsomhetskurven er representativ for den estimerte formasjonslangsomhet.

I henhold til et annet aspekt av den foreliggende oppfinnelse tilveiebringes en fremgangsmåte for bestemmelse av en kvalitet av en bestemmelse av et estimat av en formasjonslangsomhet ved bruk av bølgeformer som er registrert av et akustisk loggeverktøy som er posisjonert inne i en brønnboring som skjærer gjennom en underjordisk formasjon, hvilken inkluderer ekstrahering av en faselangsomhetskoherens av de registrerte bølgeformer ved en flerhet av frekvenser innenfor et område av frekvenser og faselangsomheter; konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en formasjonslangsomhetskurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens; bestemmelse av en eller flere anomalier innenfor formasjonslangsomhetskurven, hvor lokaliseringen av en av anomaliene av formasjonslangsomhetskurven er representativ for den estimerte formasjonslangsomhet; posisjonering av loggeverktøyet ved en flerhet av dybder inne i borehullet, gjentakelse av ekstrahering, konvertering og bestemmelse ved hver dybde; generering av en avbildning av formasjonslangsomhetskurven over et spekter av dybdene; og generering av verdier for den estimerte formasjonslangsomhet ved spekteret av dybder og konstruering av en formasjonsestimatkurve; hvor kvaliteten av den estimerte formasjonslangsomhet som er bestemt er en funksjon av i hvilken grad formasjonsestimatkurven ligger over en kant av avbildningen av formasjonslangsomhetskurven.

I henhold til et annet aspekt av den foreliggende oppfinnelse har det blitt tilveiebrakt et system for estimering av formasjonslangsomhet ved bruk av bølgeformer som er registrert av et akustisk loggeverktøy, hvilken inkluderer midler for ekstrahering av en faselangsomhetskoherens av de registrerte bølgeformer ved en flerhet av frekvenser innenfor et spekter av frekvenser og faselangsomheter; midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en formasjonslangsomhetskurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens; og midler for bestemmelse av en eller flere anomalier innenfor formasjonslang-

somhetskurven; hvor lokaliseringen av en av anomaliene av formasjonslangsomhetskurven er representativ for den estimerte formasjonslangsomhet.

I henhold til et annet aspekt av den foreliggende oppfinnelse har det blitt tilveiebrakt et system for bestemmelse av en kvalitet av en bestemmelse av et estimat av en formasjonslangsomhet ved bruk av bølgeformer som er registrert av et akustisk loggeverktøy som er posisjonert inne i en brønnboring som skjærer gjennom en underjordisk formasjon, hvilken inkluderer midler for ekstrahering av en faselangsomhetskoherens av de registrerte bølgeformer ved en flerhet av frekvenser innenfor et spekter av frekvenser og faselangsomheter; midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en formasjonslangsomhetskurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens; midler for bestemmelse av en eller flere anomalier innenfor formasjonslangsomhetskurven, hvor lokaliseringen av en av anomaliene av formasjonslangsomhetskurven er representativ for den estimerte formasjonslangsomhet; posisjonering av loggeverktøyet ved en flerhet av dybder inne i borehullet; gjentakelse av ekstrahering, konvertering og bestemmelse av hver dybde; generering av en avbildning av formasjonslangsomhetskurven over et spekter av dybdene; og midler for generering av verdier for den estimerte formasjonslangsomhet ved spekteret av dybder og konstruering av en formasjonsestimatkurve; hvor kvaliteten av de estimerte formasjonslangsomheter som er bestemt er en funksjon av i hvilken grad formasjonsestimatkurven ligger over en kant av avbildningen av formasjonslangsomhetskurven.

Kort beskrivelse av tegningene:

Figur 1 er en skjematisk illustrasjon av en eksemplifiserende utførelse av et system for estimering av formasjonslangsomhet.

Figur 2 er en fragmentarisk tverrsnittsillustrasjon av systemet på figur 1 under operasjonen av systemet.

Figur 3 er en grafisk illustrasjon av typiske bølgeformer som er detektert under operasjonen av systemet på figur 1.

Figur 4 er en flytskjemaillustrasjon av en eksemplifiserende utførelse av en fremgangsmåte for operering av systemet på figur 1.

Figur 5 er en grafisk illustrasjon av en eksemplifiserende utførelse av en faselangsomhetskoherens som er generert under implementeringen av fremgangsmåten på figur 4 ved hjelp av systemet på figur 1.

Figur 6 er en grafisk illustrasjon av en eksemplifiserende utførelse av en kurve som inneholder informasjon som er representativ for den formasjonslangsomhet som genereres under implementeringen av fremgangsmåten på figur 4 ved hjelp av systemet på figur 1.

Figur 7 er en grafisk illustrasjon av en eksemplifiserende utførelse av et histogram som inneholder informasjon som er representativ for den formasjonslangsomhet som genereres under implementeringen av fremgangsmåten på figur 4 ved hjelp av systemet på figur 1.

Figur 8A er en flytskjemaillustrasjon av en eksemplifiserende utførelse av en fremgangsmåte for operering av systemet på figur 1.

Figur 8B er en grafisk illustrasjon av en eksemplifiserende utførelse av typiske bølgeformer som detekteres under operasjonen av fremgangsmåten på figur 8A.

Figur 8C er en grafisk illustrasjon av en eksemplifiserende utførelse av et koherens-skinnkart (engl.: coherence semblance map) som er ekstrahert under operasjonen av fremgangsmåten på figur 8A.

Figur 8D er en eksemplifiserende utførelse av en formasjonslangsomhetskurve som er ekstrahert under operasjonen av fremgangsmåten på figur 8A.

Figur 9A er en flytskjemaillustrasjon av en eksemplifiserende utførelse av en fremgangsmåte for operering av systemet på figur 1.

Figur 9B er en grafisk illustrasjon av en eksemplifiserende utførelse av typiske bølgeformer som er detektert under operasjonen av fremgangsmåten på figur 9A.

Figur 9C er en grafisk illustrasjon av en eksemplifiserende utførelse av et koherens-skinnkart som er ekstrahert under operasjonen av fremgangsmåten på figur 9A.

Figur 9D er en eksemplifiserende utførelse av en dispersjonskurve som er ekstrahert under operasjonen av fremgangsmåten på figur 9A.

Figur 9E er en eksemplifiserende utførelse av et histogram som er ekstrahert under operasjonen av fremgangsmåten på figur 9A.

Figur 10A er en flytskjemaillustrasjon av en eksemplifiserende utførelse av en fremgangsmåte for operering av systemet på figur 1.

Figur 10B er en grafisk illustrasjon av en eksemplifiserende utførelse av typiske bølgeformer som er detektert under operasjonen av fremgangsmåten på figur 10A.

Figur 10C er en grafisk illustrasjon av en eksemplifiserende utførelse av et koherens-skinnkart som er ekstrahert under operasjonen av fremgangsmåten på figur 10A.

Figur 10D er en eksemplifiserende utførelse av en dispersjonskurve som er ekstrahert under operasjonen på figur 10A.

Figur 10E er en eksemplifiserende utførelse av en sannsynlighetstetthetsfunksjon som er ekstrahert under operasjonen av fremgangsmåten på figur 10A.

Figur 11A er en flytskjemaillustrasjon av en eksemplifiserende utførelse av en fremgangsmåte for operering av systemet på figur 1.

Figur 11B er en grafisk illustrasjon av en eksemplifiserende utførelse av typiske bølgeformer som er detektert under operasjonen av fremgangsmåten på figur 11A.

Figur 11C er en grafisk illustrasjon av en eksemplifiserende utførelse av et koherens-skinnkart som er ekstrahert under operasjonen av fremgangsmåten på figur 11A.

Figur 11D er en eksemplifiserende utførelse av en formasjonslangsomhetskurve som er ekstrahert under operasjonen av fremgangsmåten på figur 11A.

Figurene 12A, 12B, 12C og 12D er flytskjemaillustrasjoner av en eksemplifiserende utførelse av en fremgangsmåte for operering av systemet på figur 1.

Figur 12I er en grafisk illustrasjon av en eksemplifiserende utførelse av typiske bølgeformer som er detektert under operasjonen av fremgangsmåten på figurene 12A-D.

Figur 12J er en grafisk illustrasjon av en eksemplifiserende utførelse av et koherens-skinnkart som er ekstrahert under operasjonen av fremgangsmåten på figurene 12A-D.

Figur 12K er en eksemplifiserende utførelse av en formasjonslangsomhetskurve som er ekstrahert under operasjonen av fremgangsmåten på figurene 12A-D.

Figur 12L er en eksemplifiserende utførelse av en dispersjonskurve som er ekstrahert under operasjonen av fremgangsmåten på figurene 12A-D.

Figur 12M er en eksemplifiserende utførelse av et histogram som er ekstrahert under operasjonen av fremgangsmåten på figurene 12A-D.

Figur 12N er en eksemplifiserende utførelse av en histogramavbildning som er ekstrahert under operasjonen av fremgangsmåten på figurene 12A-D.

Figur 12O er en eksemplifiserende utførelse av en stykkevis kontinuerlig histogramavbildning som er ekstrahert under operasjonen av fremgangsmåten på figurene 12A-D.

Figur 12P er en eksemplifiserende utførelse av en stykkevis kontinuerlig histogramavbildning som er ekstrahert under operasjonen av fremgangsmåten på figurene 12A-D.

Figur 13A er en flytskjemaillustrasjon av en eksemplifiserende utførelse av en fremgangsmåte for kvalitetskontroll for operering av systemet på figur 1.

Figur 13B er en grafisk illustrasjon av eksemplifiserende utførelse av plottingen av en formasjonslangsomhetsestimatkurve på en formasjonslangsomhetsavbildning av fremgangsmåten på figur 13A.

Figur 14A er en flytskjemaillustrasjon av en eksemplifiserende utførelse av en fremgangsmåte for kvalitetskontroll for operering av systemet på figur 1.

Figur 14B er en grafisk illustrasjon av en eksemplifiserende utførelse av plottingen av en formasjonslangsomhetsestimatkurve på en langsomhetshistogramavbildning i fremgangsmåten på figur 14A.

Detaljert beskrivelse av illustrative utførelsesformer

Med initial henvisning til figur 1, et system 100 for estimering av formasjonslangsomhet inkluderer en konvensjonell akustisk sender 102 og en flerhet av konvensjonelle akustiske mottakere 104. Den akustiske sender 102 og de akustiske mottakere 104 er funksjonsdyktig koplet til en konvensjonell kontroller 106. De akustiske mottakere 104 er også funksjonsdyktig koplet til en signalbehandlingsmotor 110 som inkluderer en faselangsomhetskoherens ekstraksjonsmotor 112 og en mønstergjenkjenningsmotor 114. En konvensjonell utgangsinnretning 116 er koplet til signalbehandlingsmotoren 110 og kontrolleren 106. Designen og den generelle operasjon av den akustiske sender 102, de akustiske mottakere 104, kontrolleren 106 og utgangsinnretningen 116 anses som velkjente for personer som har ordinær fagkunnskap innen teknikken.

Under operasjon av systemet 100, som illustrert på figur 2, kan den akustiske sender 102 og de akustiske mottakere 104 være posisjonert inne i en loggesonde 200 og være båret inne i en brønnboring 202 som skjærer gjennom en underjordisk formasjon 204. I en eksemplifiserende utførelse er den akustiske sender 102 og de akustiske mottakere 104 sentralt posisjonert inne i brønnboringen 202, og brønnboringen 202 kan, eller kan ikke, inkludere en fôret seksjon. Den akustiske sender 102 kan da opereres på en konvensjonell måte for å generere og sende akustiske signaler inn i og gjennom formasjonen 204, hvilke deretter kan detekteres og behandles av de akustiske mottakere 104 for derved å generere en serie av bølgeformer 300, som illustrert på figur 3.

I en eksemplifiserende utførelse, som illustrert på figur 4, under operasjon av systemet 100, implementerer systemet en fremgangsmåte 400 for estimering av formasjonslangsomhet for formasjonen, hvor bølgeformene 300 behandles ved hjelp av faselangsomhetskoherens ekstraksjonsmotoren 112 for å generere faselangsomhetskoherensen 500 ved hver frekvens over forhåndsbestemte frekvens- og langsomhetsintervaller i trinn 402, som illustrert på figur 5. I en eksemplifiserende utførelse, som illustrert på figur 5, inkluderer faselangsomhetskoherensen 500 et koherensskinnkart 500a og en dispersjonskurve 500b, som begge er generert fra bølgeformene 300.

I en eksemplifiserende utførelse, i trinn 402, er frekvens- og langsomhetsintervallene valgt til å dekke den ønskede borehullsmodus, så som for eksempel lekk-P-modus, dipolmodus, kvadrupolmodus, S-modus eller P-modus. I en eksemplifiserende utførelse, i trinn 402, kan faselangsomhetskoherensekstraksjonen tilveiebringes som offentliggjort i en eller flere av de følgende: 1) Lang et al., Estimating Slowness Dispersion From Arrays of Sonic Logging Waveforms, *Geophysics*, vol. 52, nr. 4 (april 1987), side 530-544; 2) US-patent nr. 6.691.036; og/eller 3) Nolte et al., 1997, Dispersion analysis of split flexural waves, *Borehole Acoustics and Logging/Resevoir Delineation Consortia Annual Report,* MIT.

I en eksemplifiserende utførelse, i trinn 404, blir faselangsomhetskoherensen ved hver frekvens over et forhåndsbestemt frekvensintervall som er bestemt i trinn 402 deretter behandlet av mønstergjenkjenningsmotoren 114 for å generere estimatet av verdien av formasjonslangsomheten. I en eksemplifiserende utførelse, i trinn 404, blir faselangsomhetskoherensen som er generert i trinn 402 konvertert til

en formasjonslangsomhetskurve 600 hvor størrelsen av formasjonslangsomhetskurven er en funksjon av langsomhet, som illustrert i figur 6. Videre, i en eksemplifiserende utførelse, er formasjonslangsomheten tilknyttet en anomali i formasjonslangsomhetskurven 600. I en eksemplifiserende utførelse er den anomali som er tilknyttet formasjonslangsomhetsverdien et lokalt maksimum eller minimum av formasjonslangsomhetskurven 600, og langsomhetsverdien for det lokale minimum eller maksimum er representativ for formasjonens langsomhet. I en eksemplifiserende utførelse kan formasjonslangsomheten deretter fremskaffes for eksempel ved bruk av en konvensjonell optimeringsmetode for å bestemme det lokale maksimum eller minimum av kurven 600.

I en eksemplifiserende utførelse, i trinn 404, som illustrert på figur 6, er størrelsen av formasjonslangsomhetskurven 600 en funksjon av den annen ordens deriverte av en forskjellig formasjonslangsomhetskurve 602 hvis størrelse er en funksjon av en summasjon over frekvenser av faselangsomhetskoherensen 500.

I en eksemplifiserende utførelse, i trinn 404, kan størrelsen av kurven 600 være: 1) en summasjon over frekvenser av den n-te potens av faselangsomhetskoherensen 500; 2) en summasjon over frekvenser av de n-te ordens deriverte av faselangsomhetskoherensen; 3) n-te ordens deriverte av en summasjon over sekvenser av den n-te potens av faselangsomhetskoherensen; 4) sannsynlighetstetthetsfunksjonen av faselangsomhetspopulasjonen i dispersjonskurven 500b; 5) en summasjon over frekvenser av den n-te potens av koherens-skinnkartet 500a; 6) n-te ordens deriverte av en summasjon over frekvenser av den n-te potens av koherens-skinnkartet; og/eller 7) et histogram 700 av faselangsomhetspopulasjonen i dispersjonskurven 500b, som illustrert på figur 7. En terskel kan brukes til på forhånd å nulle ut små skinnpunkter. Avhengig av datakvaliteten og karakteristikaene, vil personen med fagkunnskap innen teknikken være i stand til å identifisere andre valg for en formasjonslangsomhetskurve som er egnet for den foreliggende oppfinnelse, så som et histogram eller en sannsynlighetstetthetsfunksjon av dispersjonskurven som er modifisert av karakteristikaene for dataene. Eksempler på karakteristikaene for dataene inkludert, men ikke begrenset til, bølgespektra, verdiene av koherens-skinnkartet ved hvert respektive langsomhetsfrekvenspunkt, eller den n-te potens av verdiene av koherens-skinnkartet ved hvert respektive langsomhet-frekvenspunkt. For eksempel, anta at ved en gitt frekvens, er verdier av langsomhets-fre-

kvenspunkter på koherens-skinnkartet angitt som $\rho=[\rho_1\rho_2...\rho_n]$ og hver komponent av ρ, ρ_i (i=1,2...n), er tilknyttet en langsomhetsverdi. Langsomhetsverdien, DT, som er tilknyttet maksimumskomponenten av ρ (angitt som ρ_m, er tatt som langsomheten av bølgen ved frekvensen). Ved beregning av histogrammet, blir antallet av langsomhetsverdier ved denne frekvensen telt som $(n\rho_m)^1$ istedenfor 1, hvor $\underline{\rho_m}$ er et heltall som er nærmest ρ_m. (I det foregående er I og n reelle tall som er større enn null.) Det skal forstås at det uttrykket som her brukes, "formasjonslangsomhetskurve", også kan kalles en "objektiv funksjon", et uttrykk som vil være velkjent for de som arbeider innen feltet. Den objektive funksjon må være en størrelse som er en funksjon av langsomhet, det vil si at formasjonslangsomhetskurven må være en slik størrelse som er plottet i forhold til langsomhet. Den foreliggende oppfinnelse og de vedføyde krav er ikke begrenset til de spesifikke eksempler som her er gitt for formasjonslangsomhetskurven.

I en eksemplifiserende eksperimentell implementering av fremgangsmåten 400, som illustrert på figur 5, tilveiebrakte faselangsomhetskoherensen 500 et frekvensdomene koherens-skinnkart, og, som illustrert på figur 6, størrelsen av formasjonslangsomhetskurven 600 var lik den annen deriverte av summasjonen over frekvenser i koherens-skinnkartet 500a. Et lokalt maksimum 604 av formasjonslangsomhetskurven 600 ga en korresponderende formasjonslangsomhet på 215 µs/ft.

I en eksemplifiserende utførelse kan fremgangsmåten 400 implementeres av systemet 100 for å generere en akustisk logg ved gjentakelse av fremgangsmåten ved hver loggedybde. Kurven 600, som er generert fra faselangsomhetskoherens 500, kan deretter plottes som et fargekodet kart i dybde- og langsomhetsdomenene.

I en eksemplifiserende utførelse er den akustiske sender 102 og de akustiske mottakere 104 tilveiebrakt som del av et konvensjonelt akustisk nedihulls loggeverktøy hvor frekvensbåndet og signal-til-støy forholdet for bølgeformene 300 er valgt til å være passende for den operasjonelle omgivelse for det valgte borehull 202 og formasjonen 204 på en konvensjonell måte.

I en eksemplifiserende utførelse, under operasjon av systemet 100, blir flere representative sampler av bølgeformer 300 generert og analysert for å bestemme et optimalt sett av parametere for videre operasjon av systemet 100, ved implementering av fremgangsmåten 400, så som for eksempel frekvens- og langsomhetsområdet. Videre, i en eksemplifiserende utførelse, under operasjon av systemet 100, blir

den mest egnede størrelse og anomali som kan peke ut formasjonslangsomheten fra kurven 600 også karakterisert fra et hvilken som helst antall av sampelkjøringer av systemet.

I en eksemplifiserende utførelse, i trinn 404, varierer den foretrukne størrelse og anomali i kurven 600 som en funksjon av karakteristikaene for en modus og bølgeformdata. Særlig, for å estimere formasjonsskjærlangsomheten fra vaierledning dipolmodus eller LWD kvadrupolmodus, eller estimere formasjonskompresjonslangsomhet fra vaierledning lekk-P-modus, er den foretrukne størrelse i kurven summasjonen over alle frekvenser av den n-te potens av koherens-skinnkartet 500a som er generert i trinn 402. Formasjonslangsomhetsverdien kan deretter bestemmes ved å søke etter et av de lokale maksima av den første ordens deriverte av størrelsen med hensyn på langsomhet.

Alternativt, hvis vaierlednings dipoldataene eller lekk-P-dataene inneholder signifikant energi rundt den kritiske frekvens, er det mer ønskelig, i trinn 404, å fremskaffe histogrammet, det modifiserte histogram, sannsynlighetstetthetsfunksjonen eller den modifiserte sannsynlighetstetthetsfunksjon av faselangsomhetsfordelingen av dispersjonskurven 500b som er generert i trinn 402, og deretter velge formasjonslangsomheten ved et lokalt maksimum av sannsynlighetstetthetsfunksjonen eller av histogrammet.

Alternativt, i tilfelle av monopol logging under boring (logging while drilling, LWD), hvor energien av formasjonskompresjonsankomsten kun kan overgå vektrørankomster i frekvensstoppbåndet, avhenger den foretrukne metodologi for trinn 404 av langsomhetsdifferansen mellom vektrørankomsten og formasjonskompresjonsankomsten. Når langsomheten av formasjonskompresjonsankomsten er forskjellig fra vektrørankomsten, slik at summasjonen av den n-te potens av koherens-skinnkartet 500a har to lokale maksima, hvor et av dem korresponderer til formasjonskompresjonsankomsten, kan den foretrukne størrelse i trinn 404 enten være summasjon av den n-te potens av koherens-skinnkartet 500a eller sannsynlighetstetthetsfunksjonen eller histogrammet. Anomalien som deretter brukes til å bestemme formasjonskompresjonslangsomheten er det lokale maksimum av størrelsen. Når langsomheten av formasjonskompresjonsankomsten og borerørankomsten for øvrig er like, er den foretrukne størrelse i trinn 404 den første ordens deriverte av summasjonen av den n-te potens av koherens-skinnkartet 500a. Den anomali som

deretter brukes til å bestemme formasjonskompresjonslangsomhet er det lokale maksimum/minimum av størrelsen. Når formasjonskompresjonsankomsten er langsommere enn borerørankomsten, er anomalien et lokalt minimum, ellers er den et lokalt maksimum.

I flere eksemplifiserende eksperimentelle implementeringer av fremgangsmåten 400 som bruker systemet 100, ble bølgeformene 300, faselangsomhetskoherensen 500 og/eller kurven 600 behandlet videre ved bruk av konvensjonelle dataglattingsmetoder.

I en eksemplifiserende utførelse tilveiebringer operasjon av systemet 100 som bruker fremgangsmåten 400 en fremgangsmåte for estimering av formasjonskompresjonslangsomhet og formasjonsskjærlangsomhet ved hjelp av en kombinasjon av frekvens-domene-skinn (frequency-domain-skinn, FDS)-analyse og automatisk mønstergjenkjenning (automatic pattern recognition, APR), på bølgeformene 300. I en eksemplifiserende utførelse er fremgangsmåten 400: 1) datadrevet; 2) ikke påvirket av modusdispersjon, borehullsform, formasjonens heterogenitet/anisotropi, og/eller 3) ikke påvirket av andre formasjons- og slamegenskaper. I en eksemplifiserende utførelse ekstraherer fremgangsmåten 400 formasjonslangsomheten fra dispersive bølgeformer eller bølgeformer som inneholder flere modi som ikke godt kan separeres i langsomhet-tiddomenen. Videre, i en eksemplifiserende utførelse, er fremgangsmåten 400 i stand til å tilveiebringe en korrekt formasjonslangsomhetsverdi når en fremgangsmåte som bruker langsomhets tidskoherens (slowness time coherence, STC) produserer en korrekt formasjonslangsomhet. I en eksemplifiserende utførelse tar fremgangsmåten 400 ikke gjennomsnitt av langsomhet over frekvens eller -tidsintervaller, slik det ville bli gjort i en STC-fremgangsmåte eller fremgangsmåter som er basert på fasehastighetsbehandling. I en eksemplifiserende utførelse tilveiebringer fremgangsmåten 400 et bedre kvalitetskontrollkart enn det konvensjonelt brukte STC-baserte korrelagram, som ikke viser nøyaktigheten av langsomhetsestimeringen hvis bølgeformene 300 er dispersive eller hvis bølgeformene utgjøres av blandede modi som ikke er godt separert i langsomhet-tidsdomenen.

Med henvisning til figur 8A, i en eksemplifiserende utførelse, implementerer systemet 100 en fremgangsmåte 800 for estimering av en verdi for formasjonslangsomheten hvor, i trinn 802, bølgeformdata $w_i(t)$, for i = 1 til N, hvor N = antall akustiske mottakere 104, som illustrert i figur 8B, ekstraheres ved operering av den

akustiske sender 102 og akustiske mottakere 104 på en konvensjonell måte. En Fourier transformasjon $W_i(f)$, for i = 1 til N, av de ekstraherte akustiske data blir deretter generert i trinn 804. I en eksemplifiserende utførelse, i trinn 804, blir lengden N_{fft} av Fourier transformasjonen $W_i(f)$ valgt til å være minst fire ganger lengre enn tidsdomenesignalet $w_i(t)$.

Et koherens-skinnkart P(DT,f), hvor DT = langsomhet, som illustrert på figur 8C, blir deretter generert fra Fourier transformasjonen $W_i(f)$ i trinn 806. I en eksemplifiserende utførelse blir koherens-skinnkartet P(DT, f) generert fra Fourier transformasjonen $W_i(f)$ i trinn 806 ved bruk av den metodologi som er beskrevet i Nolte et al., 1997, Dispersion analysis of split flexural waves, *Borehole Acoustics and Logging/Reservoir Delineation Consortia Annual Report*, MIT. Under eller etter generering av koherens-skinnkartet er en valgmulighet å påføre en terskel for å nulle ut små skinnpunkter. Koherens-skinnkartet kan valgfritt også glattes for å redusere støy, ved bruk av kjente støyreduksjonsteknikker.

En formasjonslangsomhetskurve E(DT) som illustrert på figur 8D, blir deretter generert fra koherens-skinnkartet P(DT, f) i trinn 808 i samsvar med den følgende ligning:

$$E(DT) = \int_{f_{min}}^{f_{max}} P(DT, f)^n df$$

I en eksemplifiserende utførelse blir formasjonslangsomhetskurven E(DT) generert i trinn 808 ved en summasjon av koherens-skinnkartet P(DT, f) innenfor et område av frekvenser og langsomheter.

Som illustrert på figur 8D, et estimat 820 av verdien av formasjonslangsomheten DTE blir deretter bestemt i trinn 810 ved bestemmelse av det lokale maksimum eller minimum av en n-te ordens derivert 821 av langsomhetskurven E(DT), 822 på figur 8D, i samsvar med en av de følgende ligninger:

$$DTE = \underset{DT}{MAX} \frac{\partial^n(E)}{\partial \mathrm{DT}^n}$$

$$DTE = \underset{DT}{MIN} \frac{\partial^n(E)}{\partial \mathrm{DT}^n}$$

I en eksemplifiserende utførelse, i trinn 808 og 810, kan den optimale verdi for n variere som en funksjon av de operasjonelle betingelser. Som et resultat av dette, i en eksemplifiserende utførelse, kan den optimale verdi for n, i trinnene 808 og 810, bestemmes ved bruk av en empirisk analyse.

I flere eksemplifiserende utførelser kan de operasjonelle trinn i fremgangsmåten 800 utføres ved hjelp av et eller flere elementer i systemet 100. I en eksemplifiserende utførelse implementeres fremgangsmåten 800 ved hjelp av systemet 100 når systemet opererer i en av de følgende operasjonelle modi: 1) vaierledning lekk-P (DTC); eller 2) dipol (DTS).

Med henvisning til figur 9A, i en eksemplifiserende utførelse, implementerer systemet 100 en fremgangsmåte 900 for estimering av en verdi for formasjonslangsomheten hvor, i trinn 902, bølgeformdata $w_i(t)$, for i = 1 til N, hvor N = antall akustiske mottakere 104, som illustrert på figur 9B, ekstraheres ved operering av den akustiske sender 102 og akustiske mottakere 104 på en konvensjonell måte. En Fourier transformasjon $W_i(f)$, hvor i varierer fra 1 til N av de ekstraherte akustiske data blir deretter generert i trinn 904. I en eksemplifiserende utførelse, i trinn 904, blir den N_{fft} verdi som brukes for generering av Fourier transformasjonen $W_i(f)$ valgt til å være minst fire ganger lengre enn tidsdomenesignalet $w_i(t)$.

Et koherens-skinnkart P(DT, f), hvor DT = langsomhet, som illustrert på figur 9C, blir deretter generert fra Fourier transformasjonen $W_i(f)$ i trinn 906. I en eksemplifiserende utførelse blir koherens-skinnkartet P(DT, f) generert fra Fourier transformasjonen $W_i(f)$ i trinn 906 ved bruk metodologien som er offentliggjort i Nolte et al. En dispersjonskurve DTp(f), som illustrert på figur 9D, blir deretter generert fra koherens-skinnkartet P(DT, f) i trinn 908 i samsvar med den følgende ligning:

$$DTp(f) = \underset{DT}{\max} (P(DT, f))$$

Et histogram H(DT) av dispersjonskurven DTp(f), som illustrert på figur 9E, blir deretter bestemt i trinn 910 på en konvensjonell måte, med histogrambeholdere som korresponderer til forskjellige langsomheter. Et estimat av verdien av formasjonslangsomheten DTE blir deretter bestemt i trinn 912 ved bestemmelse av langsomhetsbeholderen med et lokalt maksimum i histogram H(DT). I mange tilfeller korresponderer det langsomste lokale maksimum (eksempelvis lokalisert ved en langsomhet på ca 215 μs/ft på figur 9E) nært med formasjonens skjærlangsomhet, og det hurtigste lokale maksimum som er synlig i histogrammet korresponderer nært med Schölte faststoff-fluidlangsomheten. Ved å søke etter en signifikant endetopp i histogrammet, unngår trinn 912 å sette langsomheten basert på støyende, avvikende verdier i dataene.

Flere alternativer eksisterer for akkumulering av histogrammet H(DT) av dispersjonskurven DTp(f). Først, som offentliggjort ovenfor, kan dispersjonskurven plottes som verdier som korresponderer til de koherens-skinnkartpunkter som dispersjonskurven ligger over, slik at histogrammet akkumulerer den maksimum koherensverdi som observeres ved hver frekvens. Denne løsningsmåte verdsetter histogrambidrag ved frekvenser hvor det observeres en sterkere koherens mer enn frekvenser hvor det observeres mindre koherens. Dispersjonskurven kan alternativt plottes ved bruk av en fast verdi (så som 1) for hvert punkt, idet histogrammet akkumulerer disse faste verdier. Histogrammet kan alternativt vektes ved hjelp av en vektingsfaktor, eksempelvis et valgt karakteristika av dataene, så som bølgespektraene, langsomhet-frekvenskoherensverdien, og kombinasjoner av slike karakteristikkdata.

Histogramløsningsmåten har blitt forklart med bruk av visuelle koherensskinnkart og dispersjonskurver for å hjelpe til med en forståelse av løsningsmåten. De som har fagkunnskap innen teknikken forstår imidlertid at den matematiske prosess for å komme fram til histogrammet fra bølgeformdataene ikke krever disse visuelle begrep. Denne løsningsmåte kan derfor implementeres ved bruk av funksjoner som søker etter den langsomhet som har maksimum koherens ved hver frekvens, og inkrementere den korresponderende histogrambeholder med den vektede eller uvektede koherensverdi, ettersom hva som er ønskelig.

I flere eksemplifiserende utførelser kan de operasjonelle trinn i fremgangsmåten 900 utføres ved hjelp av et eller flere elementer i systemet 100. I en eksemplifiserende utførelse implementeres fremgangsmåten 900 ved hjelp av systemet 100

når systemet opererer i en av de følgende driftsmodi: 1) vaierledning lekk-P (DTC); eller 2) dipol (DTS).

Med henvisning til figur 10A, i en eksemplifiserende utførelse, implementerer systemet 100 en fremgangsmåte 1000 for estimering av en verdi for formasjonslangsomheten hvor, i trinn 1002, bølgeformdata $w_i(t)$, for i = 1 til N, hvor N = antall akustiske mottakere 104, som illustrert på figur 10B, ekstraheres ved operering av den akustiske sender 102 og akustiske mottakere 104 på en konvensjonell måte. En Fourier transformasjon $W_i(f)$, hvor i varierer fra 1 til N, av de ekstraherte akustiske data blir deretter generert i trinn 1004. I en eksemplifiserende utførelse, i trinn 1004, blir den N_{fft} verdi som brukes for generering av Fourier transformasjonen $W_i(f)$ valgt til å være minst fire ganger lengre enn tidsdomenesignalet $w_i(t)$.

Et koherens-skinnkart P(DT, f), hvor DT = langsomhet, som illustrert på figur 10C, blir deretter generert fra Fourier transformasjonen $W_i(f)$ i trinn 1006. I en eksemplifiserende utførelse blir koherens-skinnkartet P(DT, f) generert fra Fourier transformasjonen $W_i(f)$ i trinn 1006 ved bruk av den metodologi som er offentliggjort i Nolte et al. En dispersjonskurve DTp(f), som illustrert på figur 10D, blir deretter generert fra koherens-skinnkartet P(DT, f) i trinn 1008 i samsvar med den følgende ligning:

$$DTp(f)=\max_{DT}(P(DT,f))$$

En sannsynlighetstetthetsfunksjon PDF(DT) av dispersjonskurven DTp(f), som illustrert på figur 10E, blir deretter bestemt i trinn 1010 på en konvensjonell måte. Et estimat av verdien av formasjonslangsomheten DTE blir deretter bestemt i trinn 1012 ved bestemmelse av det lokale maksimum av sannsynlighetstetthetsfunksjonen PDF(DT).

I flere eksemplifiserende utførelser kan de operasjonelle trinn i fremgangsmåten 1000 utføres ved hjelp av et eller flere elementer i systemet 100. I en eksemplifiserende utførelse implementeres fremgangsmåten 1000 ved hjelp av systemet 100 når systemet opererer i en av de følgende operasjonelle modi: 1) vaierledning lekk-P (DTC); eller 2) dipol (DTS).

Med henvisning til figur 11A, i en eksemplifiserende utførelse implementerer systemet 100 en fremgangsmåte 1100 for estimering av en verdi for formasjonslangsomheten hvor, i trinn 1102, det velges en initial dybde. Bølgeformdata $w_i(t)$, for i = 1

til N, hvor N = antall akustiske mottakere 104, som illustrert på figur 11B, blir deretter ekstrahert ved den valgte dybde ved operering av den akustiske sender 102 og akustiske mottakere 104 på en konvensjonell måte i trinn 1104. En Fourier transformasjon $W_i(f)$, hvor i varierer fra 1 til N, av de ekstraherte akustiske data blir deretter generert i trinn 1106. I en eksemplifiserende utførelse, i trinn 1106, blir den N_{fft} verdi som brukes for generering av Fourier transformasjonen $W_i(f)$ valgt til å være minst fire ganger lengre enn tidsdomenesignalet $W_i(t)$.

Et koherens-skinnkart P(DT, f), hvor DT = langsomhet, som illustrert på figur 11C, blir deretter generert fra Fourier transformasjonen $W_i(f)$ i trinn 1108. I en eksemplifiserende utførelse genereres koherens-skinnkartet P(DT, f) fra Fourier transformasjonen $W_i(f)$ i trinn 1108 ved bruk av den metodologi som er offentliggjort i Nolte et al. En formasjonslangsomhetskurve E(DT), som illustrert på figur 11D, blir deretter generert fra koherens-skinnkartet P(DT, f) i trinn 1110 i samsvar med den følgende ligning:

$$E(\mathrm{DT}) = \int_{f_{min}}^{f_{max}} \mathrm{P}(\mathrm{DT}, \mathrm{f})^{\mathrm{n}}\, df$$

I en eksemplifiserende utførelse genereres langsomhetskurven E(DT) i trinn 1110 ved en summasjon av koherens-skinnkartet P(DT, f) for et spekter av frekvenser og langsomheter.

Som illustrert på figur 11D, et estimat 1130 av verdien av formasjonslangsomheten DTE for den valgte dybde blir deretter bestemt i trinn 1112 ved bestemmelse av det lokale maksimum av en n-te ordens derivert 1131 av langsomhetskurven E(DT), hvilket er 1132 på figur 11D, i samsvar med den følgende ligning:

$$\mathrm{DTE} = \underset{\mathrm{DT}}{\mathrm{MAX}} \frac{\partial^{\mathrm{n}}(\mathrm{E})}{\partial \mathrm{DT}^{\mathrm{n}}}$$

I en eksemplifiserende utførelse, i trinn 1110 og 1112, kan den optimale verdi for n variere som en funksjon av de operasjonelle betingelser. Som et resultat av dette, i en eksemplifiserende utførelse, kan den optimale verdi for n, i trinn 1110 og 1112, bestemmes ved bruk av en empirisk analyse.

Hvis den valgte dybde er sluttdybden, ender fremgangsmåten 1100 deretter i trinn 1114. Alternativt, hvis den valgte dybde ikke er sluttdybden, så velges den neste

dybde i trinn 1116, og fremgangsmåten 1100 går deretter videre for å implementere trinn 1104, 1106, 1108, 1110 og 1112 for å bestemme estimatet av verdien av formasjonslangsomheten DTE for den neste valgte dybde. Som et resultat av dette genererer fremgangsmåten 1100 dermed en formasjonslangsomhetskurve DTE(dybde) som tilveiebringer de estimerte formasjonslangsomhetsverdier for et spekter av valgte dybder.

I flere eksemplifiserende utførelser kan de operasjonelle trinn i fremgangsmåten 1100 utføres ved hjelp av et eller flere elementer i systemet 100. I en eksemplifiserende utførelse implementeres fremgangsmåten 1100 ved hjelp av systemet 100 når systemet opererer i den følgende operasjonelle modus: LWD P-LOG.

Med henvisning til flytskjemaet på figurene 12A-D, i en eksemplifiserende utførelse, implementerer systemet 100 en fremgangsmåte 1200 for estimering av en verdi for formasjonslangsomheten hvor, i trinn 1202, det velges en initial dybde. Bølgeformdata $w_i(t)$ for i = 1 til N, hvor N = antall akustiske mottakere 104, som illustrert på figur 12I og akustiske mottakere 104 på en konvensjonell måte i trinn 1204. En Fourier transformasjon $W_i(f)$, hvor i varierer fra 1 til N, av de ekstraherte akustiske data blir deretter generert i trinn 1206. I en eksemplifiserende utførelse, i trinn 1206, blir den N_{fft} verdi som brukes for generering av Fourier transformasjonen $W_i(f)$ valgt til å være minst fire ganger lengre enn tidsdomenesignalet $w_i(t)$.

Et koherens-skinnkart P(DT, f), hvor DT = langsomhet, som illustrert på figur 12J, blir deretter generert fra Fourier transformasjonen $W_i(f)$ i trinn 1208. I en eksemplifiserende utførelse blir koherens-skinnkartet P(DT, f) generert fra Fourier transformasjonen $W_i(f)$ i trinn 1108 ved bruk av den metodologi som er offentliggjort i Nolte et al. En formasjonslangsomhetskurve E(DT), som illustrert på figur 12K, blir deretter generert fra koherens-skinnkartet P(DT, f) i trinn 1210 i samsvar med den følgende ligning:

$$E(DT) = \int_{f_{min}}^{f_{max}} P(DT, f)^n df$$

I en eksemplifiserende utførelse blir langsomhetskurven E(DT) generert i trinn 1210 ved hjelp av en summasjon av koherens-skinnkartet P(DT, f) for et spekter av frekvenser og langsomheter.

Som illustrert på figur 12K, blir en verdi for en kandidat av formasjonslangsomheten $DTE_{candidate}$ for den valgte dybde deretter bestemt i trinn 1212 ved bestemmelse av det lokale maksimum av en n-te ordens derivert av langsomhetskurven E(DT) i samsvar med den følgende ligning:

$$DTE_{candidate} = \underset{DT}{MAX} \frac{\partial^n (E)}{\partial \mathrm{DT}^n}$$

I en eksemplifiserende utførelse, i trinn 1210 og 1212, kan den optimale verdi for n variere som en funksjon av de operasjonelle betingelser. Som et resultat av dette, i en eksemplifiserende utførelse, kan den optimale verdi for n, i trinn 1210 og 1212, bestemmes ved bruk av en empirisk analyse.

Hvis den valgte dybde er sluttdybden genererer fremgangsmåten 1200 deretter en vektor $DTE_{candidate}$(dybde) i trinn 1216. Alternativt, hvis den valgte dybde ikke er sluttdybden, så velges den neste dybde i trinn 1218, og fremgangsmåten 1200 går deretter videre for å implementere trinn 1204, 1206, 1208, 1210 og 1212 for å bestemme verdien for en kandidat av formasjonslangsomheten $DTE_{candidate}$ for den neste valgte dybde.

I trinn 1220 velges en initial dybde, og bølgeformdata $w_i(t)$, for i = 1 til N, hvor N = antallet akustiske mottakere 104, som illustrert på figur 12I, ekstraheres ved den valgte dybde ved operering av den akustiske sender 102 og akustiske mottakere 104 på en konvensjonell måte i trinn 1222. En Fourier transformasjon $W_i(f)$, hvor i varierer fra 1 til N, av de ekstraherte akustiske data genereres i trinn 1222. I en eksemplifiserende utførelse, i trinn 1224, blir den N_{fft} verdi som brukes for generering av Fourier transformasjonen $W_i(f)$ valgt til å være minst fire ganger lengre enn tidsdomenesignalet $w_i(t)$.

Et koherens-skinnkart P(DT, f), hvor DT = langsomhet, som illustrert på figur 12J, genereres fra Fourier transformasjonen $W_i(f)$ i trinn 1226. I en eksemplifiserende utførelse genereres koherens-skinnkartet P(DT, f) fra Fourier transformasjonen $W_i(f)$ i trinn 1226 ved bruk av den metodologi som er offentliggjort i Nolte et al. En dispersjonskurve DTp(f), som illustrert på figur 12L, blir deretter generert fra koherens-skinnkartet P(DT, f) i trinn 1228 i samsvar med den følgende ligning:

$$DTp(f)=\max_{DT} P(DT,f))$$

Et histogram H(DT), som illustrert på figur 12M, av dispersjonskurven DTp(f) genereres deretter i trinn 1230 på en konvensjonell måte. Et modifisert histogram H'(DT) genereres deretter i trinn 1232 ved behandling av histogrammet H(DT) ved velging av de N histogramverdier som har høyest verdi og setting av deres verdi til 1, og setting av verdien av alle andre histogramverdier til null, innenfor histogrammet H(DT).

Hvis den valgte dybde ikke er bestemt til å være sluttdybden i trinn 1234, så velges deretter den neste dybde i trinn 1236, og fremgangsmåten 1200 går deretter videre for å implementere trinn 1222, 1224, 1226, 1228, 1230 og 1232 for å bestemme histogrammet H'(DT) for den neste valgte dybde.

Hvis den valgte dybde bestemmes til å være sluttdybden i trinn 1234, genereres deretter en histogramavbildning H'(DT, dybde), som illustrert på figur 12N, for alle histogramverdier med verdi ulik null i trinn 1238, og en stykkevis kontinuerlig histogramavbildning H''(DT,dybde), som illustrert på figur 12O, genereres i trinn 1240 ved ekstrapolering av mellomliggende verdier innenfor histogramavbildningen.

I en eksemplifiserende utførelse kan trinnene 1202, 1204, 1206, 1208, 1210, 1212, 1214 og 1216 i fremgangsmåten 1200 utføres parallelt med, og kan bruke felles innganger og/eller utganger med trinnene 1220, 1222, 1224, 1226, 1228, 1230, 1232, 1234, 1236, 1238 og 1240 i fremgangsmåten 1200.

I trinn 1242 velges en initial dybde, og hvis verdien av den stykkevise kontinuerlige histogramavbildning H''(DT, dybde) ved den valgte dybde finnes å være lik null i trinn 1244, så settes formasjonslangsomheten DTE(dybde) ved den valgte dybde til en NULL VERDI i trinn 1246. Alternativt, hvis verdien av den stykkevise kontinuerlige histogramavbildning H''(DT, dybde) ved den valgte dybde ikke finnes å være lik null i trinn 1244, så settes formasjonslangsomheten DTE(dybde) ved den valgte dybde til å være lik formasjonslangsomheten $DTE_{candidate}$ (dybde) ved den valgte dybde i trinn 1248.

Hvis den valgte dybde ikke er sluttdybden i trinn 1250, velges deretter den neste dybde i trinn 1252, og trinnene 1244, 1246, 1248 og 1250 gjentas, som

påkrevd. Hvis den valgte dybde er sluttdybden i trinn 1250, så går fremgangsmåten 1200 videre til trinn 1254 og velger en initial dybde.

Hvis verdien av den stykkevise kontinuerlige histogramavbildning H''(DT, dybde) ved den valgte dybde finnes å være lik en NULL VERDI i trinn 1256, så settes formasjonslangsomheten DTE(dybde) ved den valgte dybde til et gjennomsnitt av de nærmeste tilstøtende formasjonslangsomhetsverdier innenfor DTE(dybde) med verdi ulik NULL i trinn 1258. Alternativt, hvis verdien av den stykkevise kontinuerlige histogramavbildning H''(DT, dybde) ved den valgte dybde ikke finnes å være lik en NULL VERDI i trinn 1256, eller etter trinn 1258, hvis den valgte dybde ikke er sluttdybden i trinn 1260, så velges den neste dybde i trinn 1262, og trinnene 1256, 1258 og 1260 blir deretter gjentatt, som påkrevd. Hvis den valgte dybde er sluttdybden i trinn 1260, så går fremgangsmåten 1200 videre til trinn 1264 og genererer vektoren DTE(dybde), som inneholder de formasjonslangsomhetsverdier som er bestemt av den foreliggende oppfinneriske fremgangsmåte for spekteret av valgte dybde, som illustrert på figur 12P. På denne tegningen representerer kurven med prikket linje den foreliggende oppfinneriske fremgangsmåte som bruker bølgeformdata som er innsamlet i et oljefelt ved hjelp av et verktøy for logging under boring (logging-while-drilling, LWD). For sammenlikning, de andre kurver viser resultater som er fremkommet ved hjelp av konvensjonelle fremgangsmåter ved bruk av LWD-data (stiplet linje) og ved bruk av bølgeformdata som er fremskaffet med separat vaierledning monopol logging etter fullføring av boring (heltrukket linje).

I flere eksemplifiserende utførelser kan de operasjonelle trinn i fremgangsmåten 1200 utføres ved hjelp av et eller flere elementer i systemet 100. I en eksemplifiserende utførelse implementeres fremgangsmåten 1200 ved hjelp av systemet 100 når systemet opererer i den følgende operasjonelle modus: LWD P-logg.

I en eksemplifiserende utførelse, under operasjonen av fremgangsmåtene 800, 900, 1000, 1100 og 1200, blir koherens-skinnkartet P(DT, f) generert fra Fourier transformasjonen $W_i(f)$, i trinnene 806, 906, 1006, 1108, 1208 henholdsvis 1226. ved bruk av den følgende ligning:

$$P(DT,f)=\frac{\left|\sum_{i=1}^{N}W_i(f)e^{j2\pi f\cdot DT\cdot(i-1)\cdot\Delta z}\right|}{\left(\sum_{i=1}^{N}|W_i(f)|^2\right)^{1/2}}$$

hvor:

DT	=	langsomhet;
f	=	frekvens;
P(DT,f)	=	koherens-skinnkart for et spekter av frekvenser (f) og langsomheter (DT);
$W_i(f)$	=	Fourier transformasjon av bølgeformdataene $w_i(t)$;
Δz	=	avstand mellom de akustiske mottakere 104; og

relasjonen mellom $W_i(f)$ og $w_i(t)$ er gitt den følgende relasjon:

$$w_i(t)=\int_{-\infty}^{\infty}W_i(f)e^{-j2\pi ft}2\pi df$$

Med henvisning til figur 13A, i en eksemplifiserende utførelse, implementerer systemet 100 en fremgangsmåte 1300 for kvalitetskontroll hvor en formasjonslangsomhetsavbildning E(DT, dybde), hvor DT = langsomhet, genereres i trinn 1302 ved generering av langsomhetskurver E(DT) for et spekter av operasjonelle dybder. En formasjonslangsomhetsestimatkurve DTE(dybde) genereres deretter i trinn 1304 for det spekter av operasjonelle dybder som er valgt i trinn 1302.

Formasjonslangsomhetsestimatkurven DTE(dybde) blir deretter plottet på formasjonslangsomhetsavbildningen E(DT, dybde) i trinn 1306, som illustrert på figur 13B. Hvis det bestemmes at formasjonslangsomhetsestimatkurven DTE(dybde) ligger over en kant av formasjonslangsomhetsavbildningen E(DT, dybde) i trinn 1308, så bestemmes det at kvaliteten av langsomhetsestimatkurven DTE(dybde) er god i trinn 1310. Alternativt, hvis det bestemmes at formasjonslangsomhetsestimatkurven DTE(dybde) ikke ligger over en kant av formasjonslangsomhetsavbildningen E(DT, dybde) i trinn 1308, så bestemmes det at kvaliteten av langsomhetsestimatkurven DTE(dybde) ikke er god i trinn 1312. På figur 13B representerer kurven med prikket linje den foreliggende oppfinneriske fremgangsmåte som bruker LWD-data, og de

andre to kurver er resultatene av konvensjonelle fremgangsmåter som bruker LWD-data (stiplet linje) og som bruker data som fremskaffes ved hjelp av separat vaierledning monopol logging (heltrukket linje).

I en eksemplifiserende utførelse kan formasjonslangsomhetsavbildningen E(DT, dybde) og formasjonslangsomhetsestimatkurven DTE(dybde) genereres i trinn 1302 og 1304 ved bruk av en eller flere av de operasjonelle trinn i en hvilken som helst av fremgangsmåtene 400, 800, 900, 1000, 1100 og/eller 1200 som er beskrevet ovenfor.

Med henvisning til figur 14A, i en eksemplifiserende utførelse, implementerer systemet 100 en fremgangsmåte 1400 for kvalitetskontroll hvor en formasjonslangsomhetshistogramavbildning H(DT, dybde), hvor DT = langsomhet, genereres i trinn 1402 ved generering av langsomhetshistogrammer H(DT) for et spekter av operasjonelle dybder. En formasjonslangsomhetsestimatkurve DTE(dybde) genereres deretter i trinn 1404 for det spekter av operasjonelle dybder som er valgt i trinn 1302.

Formasjonslangsomhetsestimatkurven DTE(dybde) blir deretter plottet på langsomhetshistogramavbildningen H(DT, dybde) i trinn 1406, som illustrert på figur 14B. Hvis det bestemmes at formasjonslangsomhetsestimatkurven DTE(dybde) ligger over en kant av langsomhetshistogramavbildningen H(DT, dybde) i trinn 1408, så bestemmes det at kvaliteten av langsomhetsestimatkurven DTE(dybde) er god i trinn 1410. Alternativt, hvis det bestemmes at formasjonslangsomhetsestimatkurven DTE(dybde) ikke ligger over en kant av langsomhetshistogramavbildningen H(DT, dybde) i trinn 1408, så bestemmes det at kvaliteten av langsomhetsestimatkurven DTE(dybde) ikke er god i trinn 1412. I figur 14B representerer kurven med heltrukket linje den foreliggende oppfinneriske fremgangsmåte, mens kurven med stiplet linje viser resultater som er fremkommet ved bruk av konvensjonelle fremgangsmåter.

I en eksemplifiserende utførelse kan formasjonslangsomhetshistogram-avbildningen H(DT, dybde) og formasjonslangsomhetsestimatkurven DTE(dybde) genereres i trinn 1402 og 1404 ved bruk av et eller flere av de operasjonelle trinn i en hvilken som helst av fremgangsmåtene 400, 800, 900, 1000, 1100 og/eller 1200 beskrevet ovenfor.

Ytterligere eksempler som implementerer trekk som finnes i en eller flere eksemplifiserende utførelser kan finnes i Huang et al., "A Data-Driven Approach to Extract Shear and Compressional Slowness From Dispersive Waveform Data", skrift

og visningsgrafer som ble presentert 9. november 2005 på den 75. Annual Meeting of the *Society of Exploration Geophysics*, Houston, Texas, 7.-11. november 2005.

En fremgangsmåte for estimering av formasjonslangsomhet ved bruk av bølgeformer som er registrert av et akustisk loggeverktøy som er posisjonert inne i et borehull som skjærer gjennom formasjonen har blitt beskrevet, hvilken inkluderer ekstrahering av en faselangsomhetskoherens av de registrerte bølgeformer ved en flerhet av frekvenser innenfor et spekter av frekvenser og faselangsomheter; konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en formasjonslangsomhetskurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens; og bestemmelse av en eller flere anomalier innenfor formasjonslangsomhetskurven; hvor lokaliseringen av en av anomaliene av formasjonslangsomhetskurven er representativ for den estimerte formasjonslangsomhet. I en eksemplifiserende utførelse omfatter anomaliene lokale maksima av formasjonslangsomhetskurven. I en eksemplifiserende utførelse omfatter anomaliene lokale minima av formasjonslangsomhetskurven. I en eksemplifiserende utførelse omfatter ekstrahering av en faselangsomhetskoherens av de registrerte bølgeformer ved en flerhet av frekvenser innenfor et spekter av frekvenser og faselangsomheter generering av et faselangsomhetskoherens-skinnkart. I en eksemplifiserende utførelse omfatter konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en formasjonslangsomhetskurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens generering av en summasjon av faselangsomhetskoherensen for et spekter av frekvenser og langsomheter. I en eksemplifiserende utførelse omfatter bestemmelse av en eller flere anomalier innenfor formasjonslangsomhetskurven bestemmelse av en n-te ordens derivert av formasjonslangsomhetskurven. I en eksemplifiserende utførelse omfatter konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en formasjonslangsomhetskurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en dispersjonskurve; og generering av et histogram av dispersjonskurven. I en eksemplifiserende utførelse omfatter anomaliene lokale maksima av histogrammet. I en eksemplifiserende utførelse omfatter konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en formasjonslangsomhetskurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en dispersjonskurve; og generering av en sannsynlighetstetthetsfunksjon av dispersjons-

kurven. I en eksemplifiserende utførelse omfatter anomaliene lokale maksima av sannsynlighetstetthetsfunksjonen. I en eksemplifiserende utførelse omfatter fremgangsmåten videre posisjonering av loggeverktøyene inne i en brønnboring som skjærer gjennom en underjordisk formasjon; og gjentagelse av trinnene med ekstrahering, konvertering og bestemmelse ved en flerhet av dybder inne i brønnboringen. I en eksemplifiserende utførelse inkluderer fremgangsmåten videre generering av en formasjonslangsomhetsavbildning fra formasjonslangsomhetskurvene som er generert ved hver dybde hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens og dybde. I en eksemplifiserende utførelse inkluderer fremgangsmåten videre bestemmelse av et estimat av formasjonslangsomheten ved flerheten av dybder inne i borehullet og generering av en formasjonslangsomhetsestimatkurve hvis størrelse er en funksjon av dybde. I en eksemplifiserende utførelse omfatter konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en kurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en dispersjonskurve, og generering av et histogram av dispersjonskurven. I en eksemplifiserende utførelse omfatter fremgangsmåten videre generering av et modifisert histogram fra histogrammet ved setting av de n histogramverdier som har høyeste verdi lik én og alle de gjenværende histogramverdier lik null. I en eksemplifiserende utførelse omfatter fremgangsmåten videre generering av en histogramavbildning ved bruk av histogrammene som er generert ved hver dybde. I en eksemplifiserende utførelse omfatter fremgangsmåten videre interpolering mellom verdiene av histogramavbildningen for å beregne mellomliggende histogramverdier. I en eksemplifiserende utførelse omfatter ekstrahering av faselangsomhetskoherensen av de registrerte bølgeformer innenfor spekteret av frekvenser og faselangsomheter generering av et frekvensdomene-skinn av de registrerte bølgeformer. I en eksemplifiserende utførelse omfatter konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av en summasjon over frekvenser av en n-te potens av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens beregning av

størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av en summasjon over frekvenser av n-te ordens deriverte av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av en n-te ordens derivert av en summasjon over frekvenser av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av en sannsynlighetsfordeling av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av en summasjon over frekvensene av en n-te potens av et koherens-skinnkart. I en eksemplifiserende utførelse omfatter konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av en n-te ordens derivert av en summasjon over frekvenser av et koherens-skinnkart. I en eksemplifiserende utførelse omfatter konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av et histogram av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter formasjonslangsomheten formasjonskompresjonslangsomhet. I en eksemplifiserende utførelse omfatter formasjonslangsomheten formasjonsskjærlangsomhet. I en eksemplifiserende utførelse omfatter den operasjonelle modus av loggeverktøyet en vaierledning diopolmodus; og hvor konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av en summasjon over frekvenser av den n-te potens av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter

den operasjonelle modus av loggeverktøyet en kvadrupolmodus for logging under boring; og hvor konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av en summasjon over frekvenser av den n-te potens av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter den operasjonelle modus av loggeverktøyet en vaierledning lekk-P-modus; og hvor konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av en summasjon over frekvenser av den n-te potens av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter den operasjonelle modus av loggeverktøyet en vaierledning dipolmodus som har signifikant energi rundt en kritisk frekvens; og hvor konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til kurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter beregning av størrelsen av kurven som en funksjon av et histogram av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter den operasjonelle modus av loggeverktøyet en vaierledning dipolmodus som har signifikant energi rundt en kritisk frekvens; og hvor konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av en sannsynlighetstetthet av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter den operasjonelle modus av loggeverktøyet en lekk-P-modus som har signifikant energi rundt en kritisk frekvens; og hvor konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter beregning av størrelsen av formasjonens langsomhetskurve som en funksjon av et histogram av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter den operasjonelle modus av loggeverktøyet en lekk-P-modus som har signifikant energi rundt en kritisk frekvens; og hvor konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonens langsomhetskurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter beregning av stør-

relsen av formasjonens langsomhetskurve som en funksjon av en sannsynlighetstetthet av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter den operasjonelle modus av loggeverktøyet en monopolmodus for logging under boring; hvor en energi i en formasjonskompresjonsbølgeankomst kan overgå en vektrørbølgeankomst i et frekvensstoppbånd; hvor en langsomhet av formasjonskompresjonsbølgeankomsten er forskjellig fra vektrørbølgeankomsten, slik at en summasjon av den n-te potens av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter en flerhet av lokale maksima, hvor i det minste ett av de lokale maksima korresponderer til formasjonskompresjonsbølgeankomsten; og hvor konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonens langsomhetskurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av summasjonen av den n-te potens av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter den operasjonelle modus av loggeverktøyet en modus for monopol logging under boring; hvor en energi i en formasjonskompresjonsbølgeankomst kan overgå en vektrørbølgeankomst i et frekvensstoppbånd; hvor en langsomhet av formasjonskompresjonsbølgeankomsten er forskjellig fra vektrørbølgeankomsten, slik at en summasjon av den n-te potens av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter en flerhet av lokale maksima, hvor i det minste ett av de lokale maksima korresponderer til formasjonskompresjonsbølgeankomsten; og hvor konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av summasjonen av en sannsynlighetsfordeling av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter den operasjonelle modus av loggeverktøyet en modus for monopol logging under boring; hvor en energi i en formasjonskompresjonsbølgeankomst kan overgå en vektrørbølgeankomst i et frekvensstoppbånd; hvor en langsomhet av formasjonskompresjonsbølgeankomsten er forskjellig fra vektrørbølgeankomsten, slik at en summasjon av den n-te potens av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter en flerhet av lokale maksima, hvor i det minste ett av de lokale maksima korresponderer til formasjonskompresjonsbølgeankomsten; og hvor konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte

faselangsomhetskoherens omfatter beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av summasjonen av et histogram av det ekstraherte faselangsomhetshistogram. I en eksemplifiserende utførelse omfatter minst en av anomaliene et lokalt maksimum av størrelsen. I en eksemplifiserende utførelse omfatter den operasjonelle modus av loggeverktøyet en modus for monopol logging under boring, hvor en energi i formasjonskompresjonsbølgeankomsten kan overgå en vektrørbølgeankomst i et frekvensstoppbånd; hvor en langsomhet av formasjonskompresjonsbølgen ikke er vesentlig forskjellig fra vektrørbølgeankomsten; og hvor konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhet omfatter beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av summasjonen av en første ordens derivert av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter i det minste en av anomaliene et lokalt maksimum av størrelsen. I en eksemplifiserende utførelse omfatter minst en av anomaliene et lokalt minimum av størrelsen. I en eksemplifiserende utførelse bestemmes den estimerte formasjonslangsomhet kun som en funksjon av data som befinner seg innenfor de registrerte bølgeformer. I en eksemplifiserende utførelse bestemmes den estimerte formasjonslangsomhet ved tilstedeværelse av modusdispersjonseffekter. I en eksemplifiserende utførelse er egenskapene til formasjonen ikke homogene. I en eksemplifiserende utførelse er egenskapene til formasjonen anisotropiske.

En fremgangsmåte for bestemmelse av en kvalitet av en bestemmelse av et estimat av en formasjonslangsomhet ved bruk av bølgeformer som er registrert av et akustisk loggeverktøy som er posisjonert inne i en brønnboring som skjærer gjennom en underjordisk formasjon har blitt beskrevet, hvilken inkluderer ekstrahering av en faselangsomhetskoherens av de registrerte bølgeformer ved en flerhet av frekvenser innenfor et spekter av frekvenser og faselangsomheter; konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en formasjonslangsomhetskurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens; bestemmelse av en eller flere anomalier innenfor formasjonslangsomhetskurven, hvor lokaliseringen av en av anomaliene av formasjonslangsomhetskurven er representativ for den estimerte formasjonslangsomhet; posisjonering av loggeverktøyet ved en flerhet av dybder inne i borehullet; gjentakelse av ekstrahering, konvertering og bestemmelse ved hver

dybde; generering av en avbildning av formasjonslangsomhetskurven over et spekter av dybdene; og generering av verdier for den estimerte formasjonslangsomhet ved spekteret av dybder og konstruering av en formasjonsestimatkurve; hvor kvaliteten av den estimerte formasjonslangsomhet som er bestemt er en funksjon av i hvilken grad formasjonsestimatkurven ligger over en kant av avbildningen av formasjonslangsomhetskurven. I en eksemplifiserende utførelse omfatter konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en formasjonslangsomhetskurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en dispersjonskurve; og generering av en sannsynlighetstetthetsfunksjon av dispersjonskurven.

Et system for estimering av formasjonslangsomhet ved bruk av bølgeformer som er registrert av et akustisk loggeverktøy som er posisjonert inne i en brønnboring som skjærer gjennom formasjonen har blitt beskrevet, hvilket inkluderer midler for ekstrahering av en faselangsomhetskoherens av de registrerte bølgeformer ved en flerhet av frekvenser innenfor et spekter av frekvenser og faselangsomheter; midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en formasjonslangsomhetskurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens; og midler for bestemmelse av en eller flere anomalier innenfor formasjonslangsomhetskurven; hvor lokaliseringen av en av anomaliene av formasjonslangsomhetskurven er representativ for den estimerte formasjonslangsomhet. I en eksemplifiserende utførelse omfatter anomaliene lokale maksima av formasjonslangsomhetskurven. I en eksemplifiserende utførelse omfatter anomaliene lokale minima av formasjonslangsomhetskurven. I en eksemplifiserende utførelse omfatter midlene for ekstrahering av en faselangsomhetskoherens av de registrerte bølgeformer ved en flerhet av frekvenser innenfor et spekter av frekvenser og faselangsomheter midler for generering av et faselangsomhetskoherens-skinnkart. I en eksemplifiserende utførelse omfatter midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en formasjonslangsomhetskurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens midler for generering av en summasjon av faselangsomhetskoherens for et spekter av frekvenser og langsomheter. I en eksemplifiserende utførelse omfatter midler for bestemmelse av en eller flere anomalier innenfor formasjonslangsomhetskurven midler for bestemmelse av en n-te ordens derivert av formasjonslangsomhetskurven. I en eksemplifiserende utførelse omfatter midler for

konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en formasjonslangsomhetskurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en dispersjonskurve; og midler for generering av et histogram av dispersjonskurven. I en eksemplifiserende utførelse omfatter anomaliene lokale maksima av histogrammet. I en eksemplifiserende utførelse omfatter midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en formasjonslangsomhetskurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en dispersjonskurve; og midler for generering av en sannsynlighetstetthetsfunksjon av dispersjonskurven. I en eksemplifiserende utførelse omfatter anomaliene lokale maksima av sannsynlighetstetthetsfunksjonen. I en eksemplifiserende utførelse omfatter systemet videre midler for posisjonering av loggeverktøyene inne i en brønnboring som skjærer gjennom en underjordisk formasjon; og midler for gjentagelse av trinnene med ekstrahering, konvertering og bestemmelse ved en flerhet av dybder inne i brønnboringen. I en eksemplifiserende utførelse omfatter systemet videre midler for generering av en formasjonslangsomhetsavbildning fra formasjonslangsomhetskurvene som er generert ved hver dybde hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens og dybde. I en eksemplifiserende utførelse omfatter systemet videre midler for bestemmelse av et estimat av formasjonslangsomheten ved flerheten av dybder inne i borehullet og generering av en formasjonslangsomhetsestimatkurve hvis størrelse er en funksjon av dybde. I en eksemplifiserende utførelse omfatter midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en kurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en dispersjonskurve; og midler for generering av et histogram av dispersjonskurven. I en eksemplifiserende utførelse omfatter systemet videre midler for generering av et modifisert histogram fra histogrammet ved å sette de n histogramverdier som har høyest verdi lik én og alle gjenværende histogramverdier lik null. I en eksemplifiserende utførelse omfatter systemet videre midler for generering av en histogramavbildning ved bruk av histogrammene som er generert ved hver dybde. I en eksemplifiserende utførelse omfatter systemet videre midler for interpolering mellom verdier av histogramavbildningen for å beregne mellomliggende histogramverdier. I en eksemplifiserende

utførelse omfatter midlene for ekstrahering av faselangsomhetskoherensen av de registrerte bølgeformer innenfor spekteret av frekvenser og faselangsomheter midler for generering av et frekvensdomene-skinn av de registrerte bølgeformer. I en eksemplifiserende utførelse omfatter midlene for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens midler for beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av en summasjon over frekvenser av en n-te potens av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens midler for beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av en summasjon over frekvenser av n-te ordens deriverte av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens midler for beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av en n-te ordens derivert av en summasjon over frekvenser av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens midler for beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av en sannsynlighetsfordeling av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens midler for beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av en summasjon over frekvenser av en n-te potens av et koherensskinnkart. I en eksemplifiserende utførelse omfatter midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens midler for beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av en n-te ordens derivert av en summasjon over frekvenser av et koherensskinnkart. I en eksemplifiserende utførelse omfatter midler for konvertering av den ekstraherte

faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens midler for beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av et histogram av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter formasjonslangsomheten formasjonskompresjonslangsomhet. I en eksemplifiserende utførelse omfatter formasjonslangsomheten formasjonsskjærlangsomhet. I en eksemplifiserende utførelse omfatter den operasjonelle modus av loggeverktøyet et vaierledning dipolmodus; og hvor midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter midler for beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av en summasjon over frekvenser av den n-te potens av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter den operasjonelle modus av loggeverktøyet en modus for kvadrupol logging under boring; og hvor midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter midler for beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av en summasjon over frekvenser av den n-te potens av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter den operasjonelle modus av loggeverktøyet en vaierledning lekk-P-modus; og hvor midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter midler for beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av en summasjon over frekvenser av den n-te potens av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter den operasjonelle modus av loggeverktøyet en vaierledning dipolmodus som har signifikant energi rundt en kritisk frekvens; og hvor midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til kurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter midler for beregning av størrelsen av kurven som en funksjon av et histogram av den ekstraherte faselangsomhet. I en eksemplifiserende utførelse omfatter den operasjonelle modus av loggeverktøyet en vaierledning dipolmodus som har signifikant energi rundt en kritisk frekvens; og hvor midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funk-

sjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter midler for beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av en sannsynlighetstetthet av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter den operasjonelle modus av loggeverktøyet en lekk-P-modus som har signifikant energi rundt en kritisk frekvens; og hvor midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter midler for beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av et histogram av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter den operasjonelle modus av loggeverktøyet en lekk-P-modus som har signifikant energi rundt en kritisk frekvens; og hvor midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter midler for beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av en sannsynlighetstetthet av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter den operasjonelle modus av loggeverktøyet en modus for monopol logging under boring; hvor en energi i en formasjonskompresjonsbølgeankomst kan overgå en vektrørbølgeankomst i et frekvensstoppbånd; hvor en langsomhet av formasjonsbølgeankomsten er forskjellig fra vektrørbølgeankomsten, slik at en summasjon av den n-te potens av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter en flerhet av lokale maksima, hvor minst ett av de lokale maksima korresponderer til formasjonskompresjonsbølgeankomsten; og hvor midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter midler for beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av summasjonen av den n-te potens av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter den operasjonelle modus av loggeverktøyet en modus for monopol logging under boring; hvor en energi i en formasjonskompresjonsbølgeankomst kan overgå en vektrørbølgeankomst i et frekvensstoppbånd; hvor en langsomhet av formasjonskompresjonsbølgeankomsten er forskjellig fra vektrørbølgeankomsten, slik at en summasjon av den n-te potens av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter en flerhet av lokale maksima, med minst ett av de lokale maksima korresponderende til formasjonskompresjons-

bølgeankomsten; og hvor midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter midler for beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av summasjonen av en sannsynlighetsfordeling av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter den operasjonelle modus av loggeverktøyet en modus for monopol logging under boring; hvor en energi i en formasjonskompresjonsbølgeankomst kan overgå en vektrørbølgeankomst i et frekvensstoppbånd; hvor en langsomhet av formasjonskompresjonsbølgeankomsten er forskjellig fra vektrørbølgeankomsten, slik at en summasjon av den n-te potens av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter en flerhet av lokale maksima, med minst et av de lokale maksima korresponderende til formasjonskompresjonsbølgeankomsten; og hvor midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter midler for beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av summasjonen av et histogram av det ekstraherte faselangsomhetshistogram. I en eksemplifiserende utførelse omfatter minst én av anomaliene et lokalt maksimum av størrelsen. I en eksemplifiserende utførelse omfatter den operasjonelle modus av loggeverktøyet en modus for monopol logging under boring; hvor en energi i en formasjonskompresjonsbølgeankomst kan overgå en vektrørbølgeankomst i et frekvensstoppbånd; hvor en langsomhet av formasjonskompresjonsbølgen ikke er signifikant forskjellig fra vektrørbølgeankomsten; og hvor midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til formasjonslangsomhetskurven hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhet omfatter midler for beregning av størrelsen av formasjonslangsomhetskurven som en funksjon av summasjonen av en første ordens derivert av den ekstraherte faselangsomhetskoherens. I en eksemplifiserende utførelse omfatter minst én av anomaliene et lokalt maksimum av størrelsen. I en eksemplifiserende utførelse omfatter minst én av anomaliene et lokalt minimum av størrelsen. I en eksemplifiserende utførelse bestemmes den estimerte formasjonslangsomhet kun som en funksjon av data som befinner seg innenfor de registrerte bølgeformer. I en eksemplifiserende utførelse bestemmes den estimerte formasjonslangsomhet ved tilstedeværelsen av modusdispersjonseffekter. I en eksemplifise-

rende utførelse er egenskapene til formasjonen ikke homogene. I en eksemplifiserende utførelse er egenskapene til formasjonen anisotropiske.

Et system for bestemmelse av en kvalitet av en bestemmelse av et estimat av en formasjonslangsomhet ved bruk av bølgeformer som er registrert av et akustisk loggeverktøy som er posisjonert inne i en brønnboring som skjærer gjennom en underjordisk formasjon har blitt beskrevet, hvilket inkluderer midler for ekstrahering av en faselangsomhetskoherens av de registrerte bølgeformer ved en flerhet av frekvenser innenfor et spekter av frekvenser og faselangsomheter; midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en formasjonslangsomhetskurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens; midler for bestemmelse av en eller flere anomalier innenfor formasjonslangsomhetskurven, hvor lokaliseringen av en av anomaliene av formasjonslangsomhetskurven er representativ for den estimerte formasjonslangsomhet; posisjonering av loggeverktøyet ved en flerhet av dybder inne i borehullet; gjentagelse av ekstrahering, konvertering og bestemmelse ved hver dybde; generering av en avbildning av formasjonslangsomhetskurven over et spekter av dybdene; og midler for generering av verdier for den estimerte formasjonslangsomhet ved spekteret av dybder og konstruering av en formasjonsestimatkurve, hvor kvaliteten av de estimerte formasjonslangsomheter som er bestemt er en funksjon av i hvilken grad formasjonsestimatkurven ligger over en kant av avbildningen av formasjonslangsomhetskurven. I en eksemplifiserende utførelse omfatter midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en formasjonslangsomhetskurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens midler for konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en dispersjonskurve; og generering av en sannsynlighetstetthetsfunksjon av dispersjonskurven.

Selv om illustrative utførelser av oppfinnelsen har blitt vist og beskrevet, er et bredt spekter av modifikasjon, forandringer og utbytting tenkelig i den foregående offentliggjøring. I enkelte tilfeller kan enkelte trekk ved den foreliggende oppfinnelse anvendes uten en korresponderende bruk av de andre trekk. Det er følgelig passende at de vedføyde krav tolkes bredt og på en måte som er i overensstemmelse med oppfinnelsens omfang.

PATENTKRAV

1. Fremgangsmåte for estimering av formasjonslangsomhet ved bruk av bølgeformer som er registrert av et akustisk loggeverktøy som er posisjonert ved en første dybde inne i et borehull som skjærer gjennom en underjordisk formasjon,

karakterisert ved at den omfatter:

ekstrahering av en faselangsomhetskoherens av de registrerte bølgeformer ved en flerhet av frekvenser innenfor et spekter av frekvenser og faselangsomheter;

konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en formasjonslangsomhetskurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens; og

bestemmelse av minst en anomali innenfor formasjonslangsomhetskurven;

hvor lokaliseringen av en av anomaliene av formasjonslangsomhetskurven er representativ for den estimerte formasjonslangsomhet.

2. Fremgangsmåte som angitt i krav 1,

karakterisert ved at anomaliene omfatter minst en anomali fra gruppen av anomalier bestående av lokale maksima og lokale minima av formasjonslangsomhetskurven.

3. Fremgangsmåte som angitt i krav 1,

karakterisert ved at ekstrahering av en faselangsomhetskoherens av de registrerte bølgeformer ved en flerhet av frekvenser innenfor et spekter av frekvenser og faselangsomheter omfatter:

generering av et faselangsomhetskoherensskinnkart.

4. Fremgangsmåte som angitt i krav 3,

karakterisert ved at den videre omfatter glatting av faselangsomhetskoherensskinnkartet.

5. Fremgangsmåte som angitt i krav 3,

karakterisert ved at den videre omfatter utnulling av alle skinnpunkter på skinnkartet som har en skinnverdi som er lavere enn en terskel.

6. Fremgangsmåte som angitt i krav 1,
k a r a k t e r i s e r t v e d at konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en formasjonslangsomhetskurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter:

generering av en summasjon over frekvenser av faselangsomhetskoherensen for et spekter av frekvenser og langsomheter.

7. Fremgangsmåte som angitt i krav 6,
k a r a k t e r i s e r t v e d at generering av en summasjon over frekvenser av faselangsomhetskoherensene omfatter å ta den n-te potens av faselangsomhetskoherensverdiene.

8. Fremgangsmåte som angitt i krav 1,
k a r a k t e r i s e r t v e d at bestemmelse av minst en anomali innenfor formasjonslangsomhetskurven omfatter:

bestemmelse av en n-te ordens derivert av formasjonslangsomhetskurven, hvor n er et reelt tall som er større enn null.

9. Fremgangsmåte som angitt i krav 1,
k a r a k t e r i s e r t v e d at konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en formasjonslangsomhetskurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter:

konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en dispersjonskurve; og

generering av et histogram av dispersjonskurven.

10. Fremgangsmåte som angitt i krav 9,
k a r a k t e r i s e r t v e d at anomaliene omfatter lokale maksima av histogrammet.

11. Fremgangsmåte som angitt i krav 9,
k a r a k t e r i s e r t v e d at konvertering av den ekstraherte faselangsomhets-koherens til en dispersjonskurve omfatter velging av, for hver frekvens i flerheten, en langsomhet, korresponderende til denne frekvensen, tilknyttet den største størrelse av alle faselangsomhetskoherensverdiene som korresponderer til denne frekvensen, og inkludering av den valgte langsomhet som et punkt på dispersjonskurven.

12. Fremgangsmåte som angitt i krav 9,
k a r a k t e r i s e r t v e d at den videre omfatter glatting av den ekstraherte fase-langsomhetskoherens før konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en dispersjonskurve.

13. Fremgangsmåte som angitt i krav 9,
k a r a k t e r i s e r t v e d at generering av et histogram av dispersjonskurven omfatter akkumulering av dispersjonskurven i en flerhet av histogrambeholdere som korresponderer til forskjellige langsomheter.

14. Fremgangsmåte som angitt i krav 13,
k a r a k t e r i s e r t v e d at akkumulering av dispersjonskurven i en flerhet av histogrambeholdere som korresponderer til forskjellige langsomheter omfatter, for hvert frekvenspunkt på dispersjonskurven, inkrementering av den histogrambeholder som korresponderer til langsomheten av dispersjonskurvefrekvenspunktet med størrelsen av dispersjonskurvefrekvenspunktet.

15. Fremgangsmåte som angitt i krav 13,
k a r a k t e r i s e r t v e d at akkumulering av dispersjonskurven i en flerhet av histogrambeholdere som korresponderer til ulike langsomheter omfatter, for hvert frekvenspunkt på dispersjonskurven, inkrementering av den histogrambeholder som korresponderer til langsomheten av dispersjonskurvefrekvenspunktet med én.

16. Fremgangsmåte som angitt i krav 13,
karakterisert ved at akkumulering av dispersjonskurven i en flerhet av histogrambeholdere som korresponderer til forskjellige langsomheter omfatter, for hvert frekvenspunkt på dispersjonskurven, inkrementering av den histogrambeholder som korresponderer til langsomheten med en vektingsfaktor.

17. Fremgangsmåte som angitt i krav 16,
karakterisert ved at vektingsfaktoren er valgt basert i det minste delvis på bølgespekteret i de registrerte bølgeformer, de langsomhets frekvenskoherens-verdier som korresponderer til dispersjonskurven, og kombinasjoner av disse.

18. Fremgangsmåte som angitt i krav 1,
karakterisert ved at konvertering av den ekstraherte faselangsomhets-koherens til en formasjonslangsomhetskurve hvis størrelse er en funksjon av den ekstraherte faselangsomhetskoherens omfatter:

konvertering av den ekstraherte faselangsomhetskoherens til en dispersjons-kurve; og

generering av en sannsynlighetstetthetsfunksjon av dispersjonskurven.

19. Fremgangsmåte som angitt i krav 18,
karakterisert ved at anomaliene omfatter lokale maksima av sannsynlig-hetstetthetsfunksjonen.

20. Fremgangsmåte som angitt i krav 1 og som er egnet for produsering av hydro-karboner fra den underjordiske formasjon,
karakterisert ved at den videre omfatter:

produsering av hydrokarboner fra formasjonen ved anvendelse av den estimerte formasjonslangsomhet.

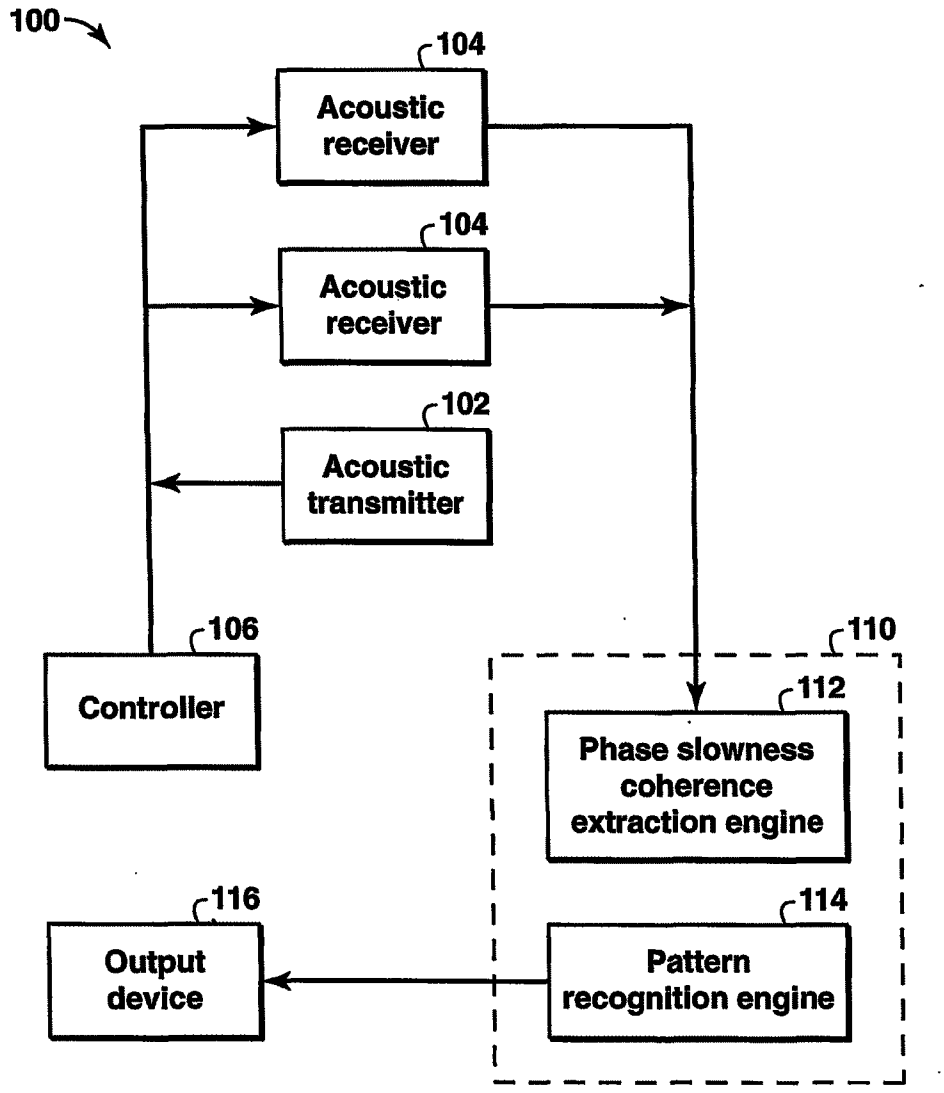

100
104
Acoustic receiver
104
Acoustic receiver
102
Acoustic transmitter
106
Controller
110
112
Phase slowness coherence extraction engine
116
Output device
114
Pattern recognition engine

FIG 1

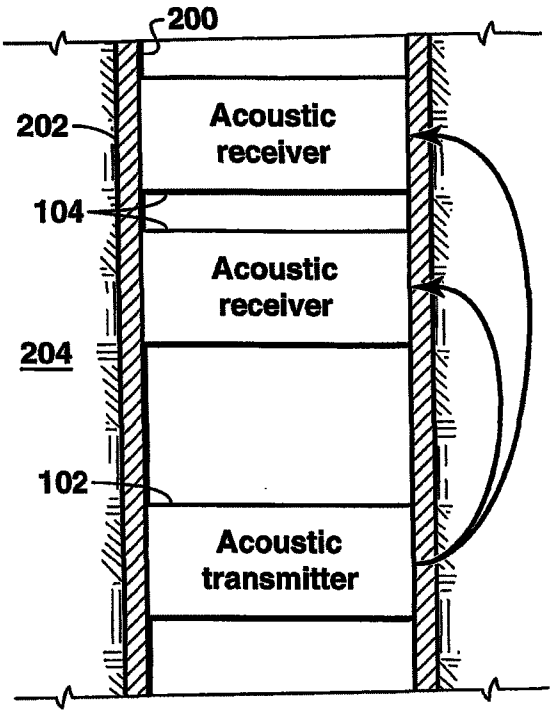

200
202
Acoustic receiver
104
Acoustic receiver
204
102
Acoustic transmitter

FIG. 2

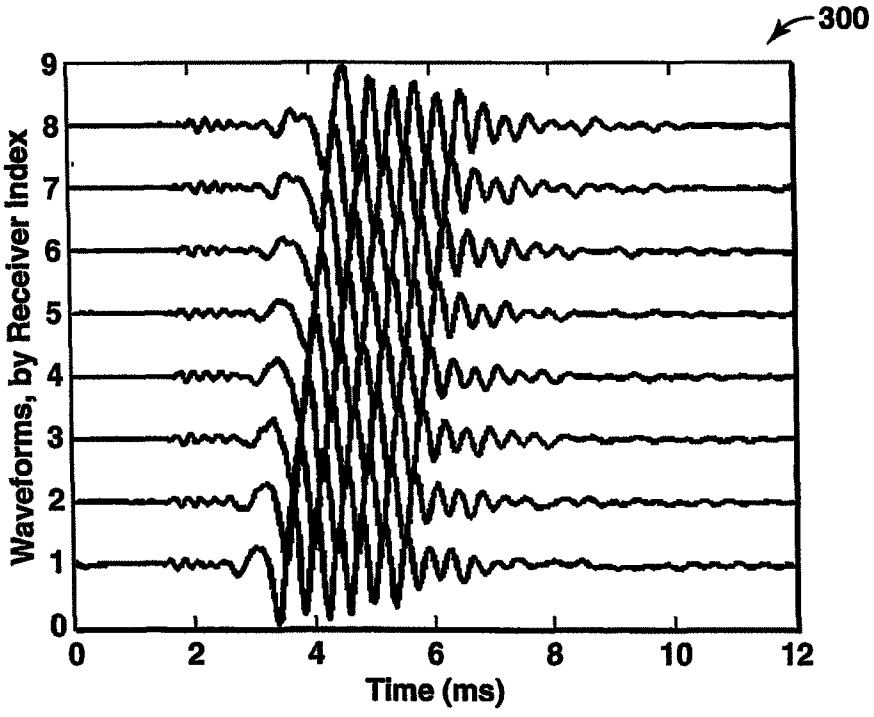

300
Waveforms, by Receiver Index
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
0
2
4
6
8
10
12
Time (ms)

FIG. 3

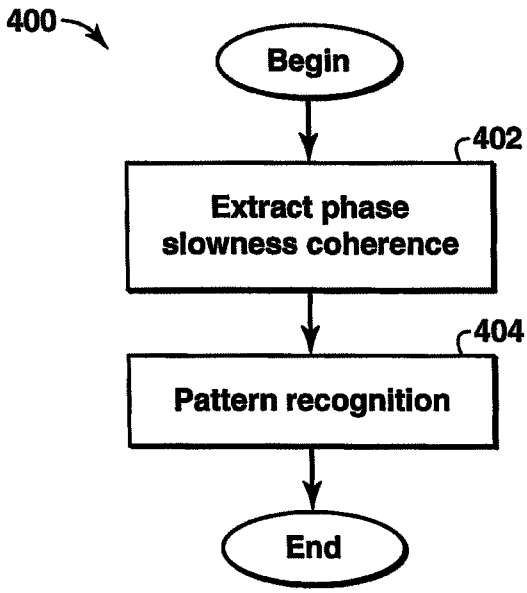

400
Begin
402
Extract phase slowness coherence
404
Pattern recognition
End

FIG. 4

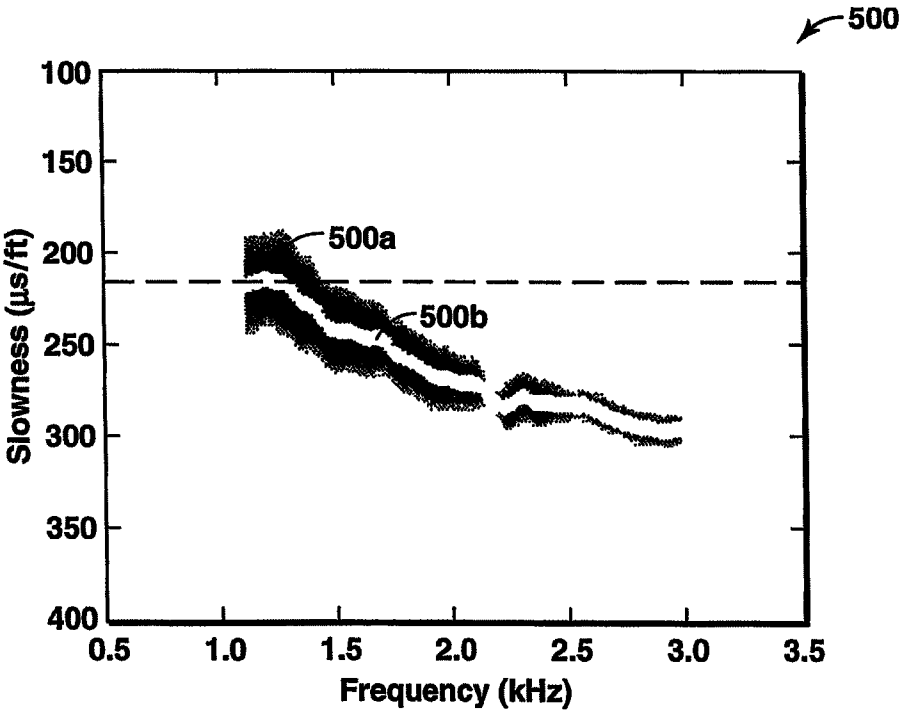

500
100
150
200
250
300
350
400
Slowness (μs/ft)
500a
500b
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5
Frequency (kHz)

FIG. 5

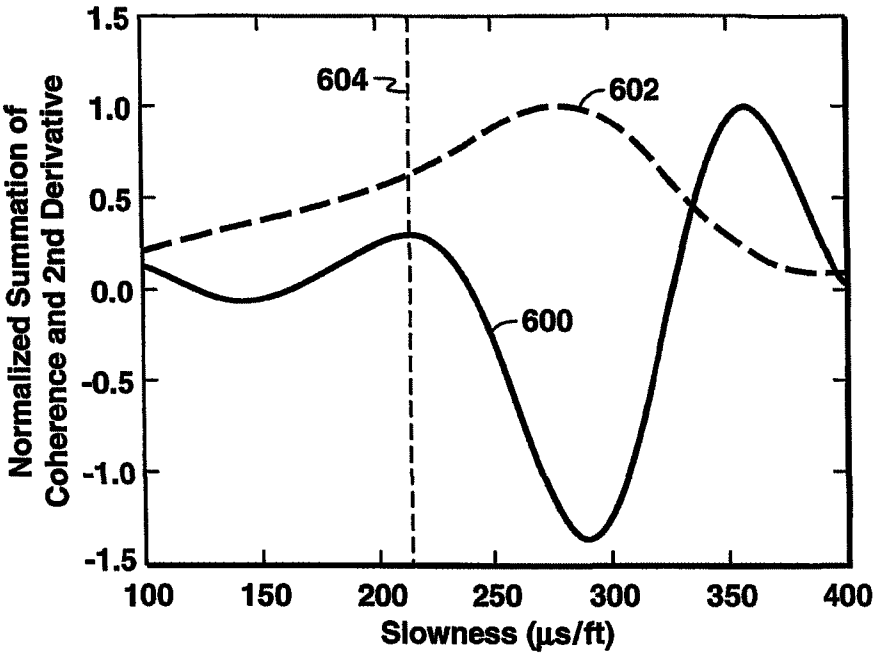

1.5
1.0
0.5
0.0
-0.5
-1.0
-1.5
Normalized Summation of Coherence and 2nd Derivative
604
602
600
100
150
200
250
300
350
400
Slowness (µs/ft)

FIG. 6

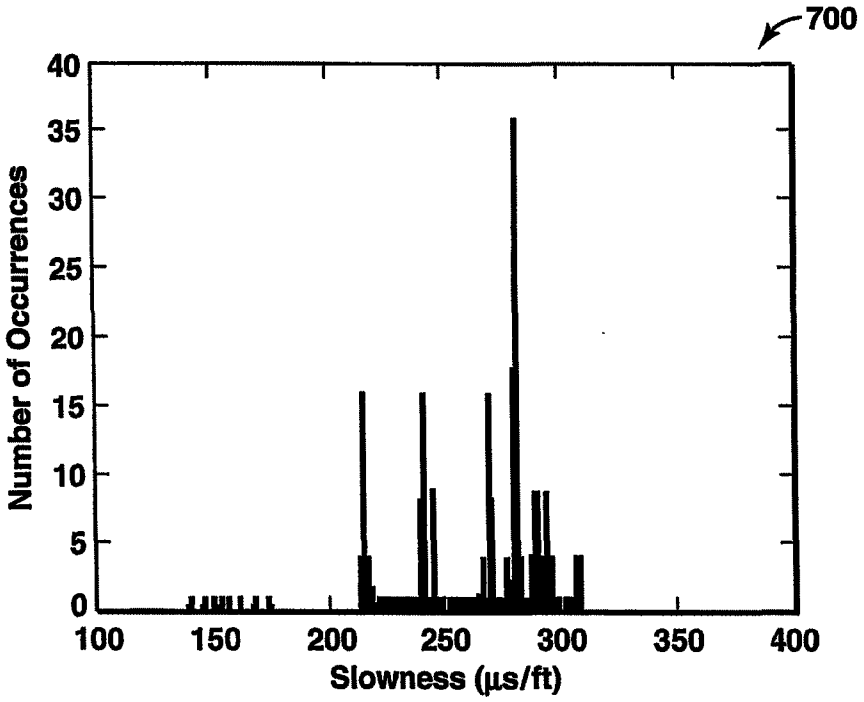

700
40
35
30
25
20
15
10
5
0
Number of Occurrences
100
150
200
250
300
350
400
Slowness (µs/ft)

FIG. 7

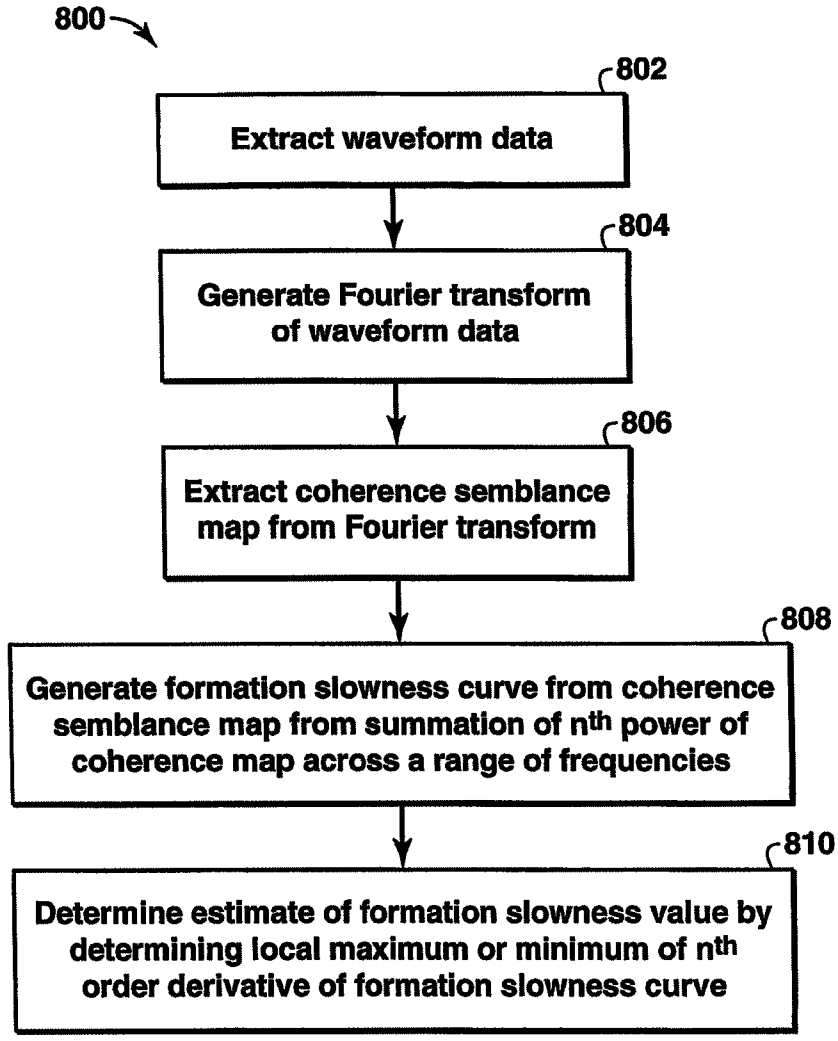

800
802
Extract waveform data
804
Generate Fourier transform of waveform data
806
Extract coherence semblance map from Fourier transform
808
Generate formation slowness curve from coherence semblance map from summation of nth power of coherence map across a range of frequencies
810
Determine estimate of formation slowness value by determining local maximum or minimum of nth order derivative of formation slowness curve

FIG. 8A

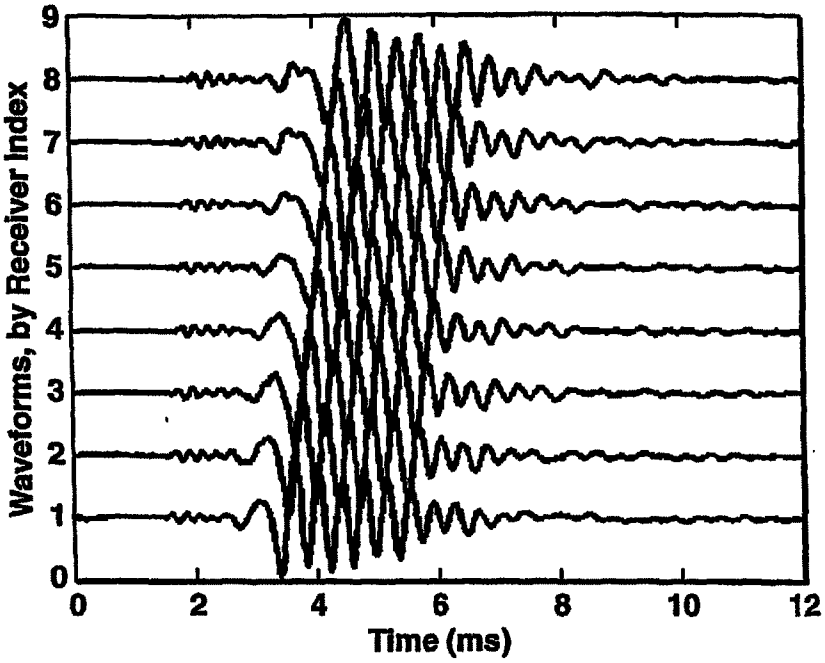

Waveforms, by Receiver Index
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
0
2
4
6
8
10
12
Time (ms)

FIG. 8B

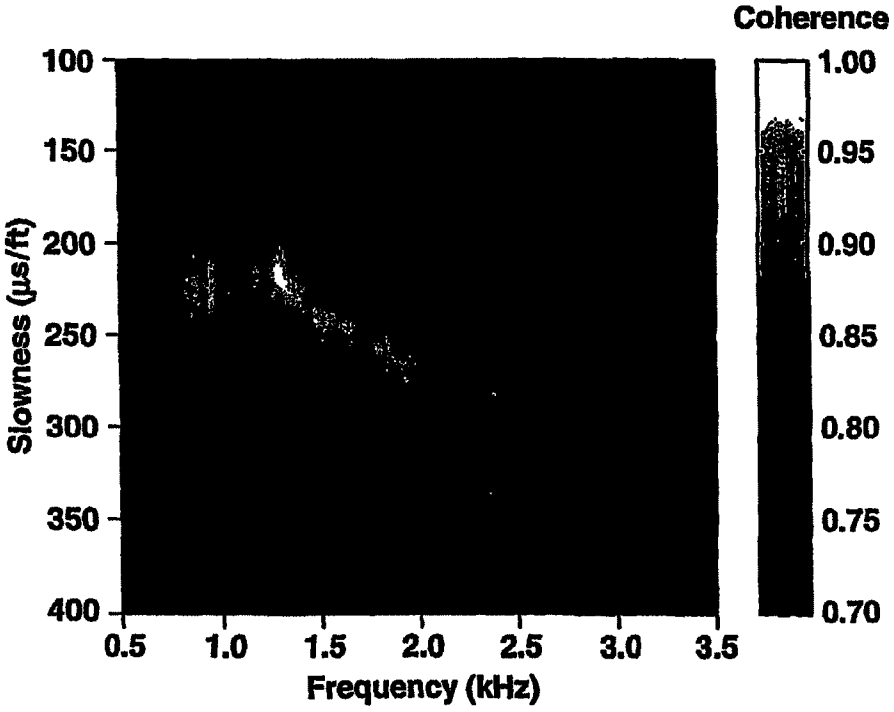

Coherence
1.00
0.95
0.90
0.85
0.80
0.75
0.70
Slowness (μs/ft)
100
150
200
250
300
350
400
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5
Frequency (kHz)

FIG. 8C

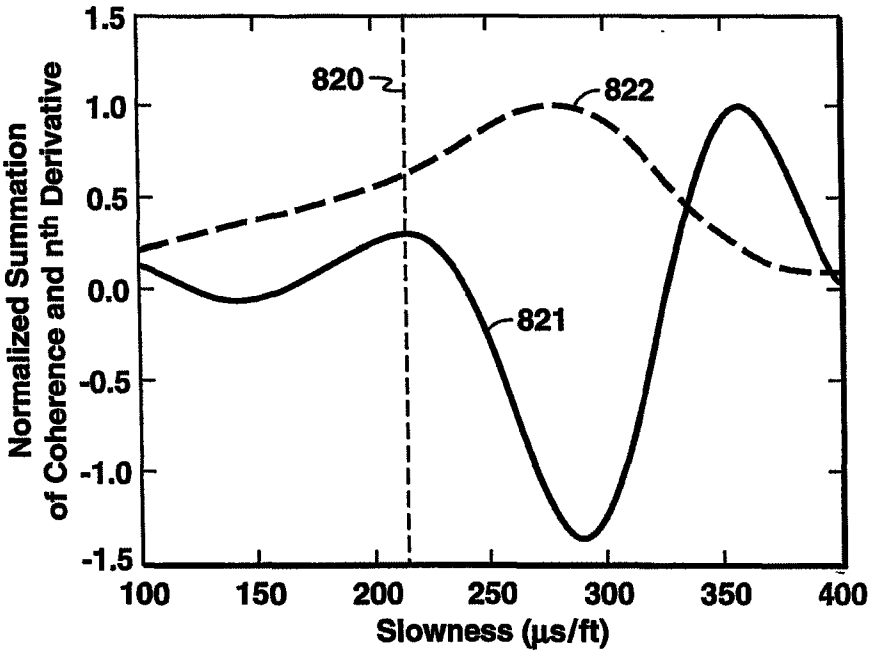

1.5
1.0
0.5
0.0
-0.5
-1.0
-1.5
Normalized Summation of Coherence and nth Derivative
820
822
821
100
150
200
250
300
350
400
Slowness (μs/ft)

FIG. 8D

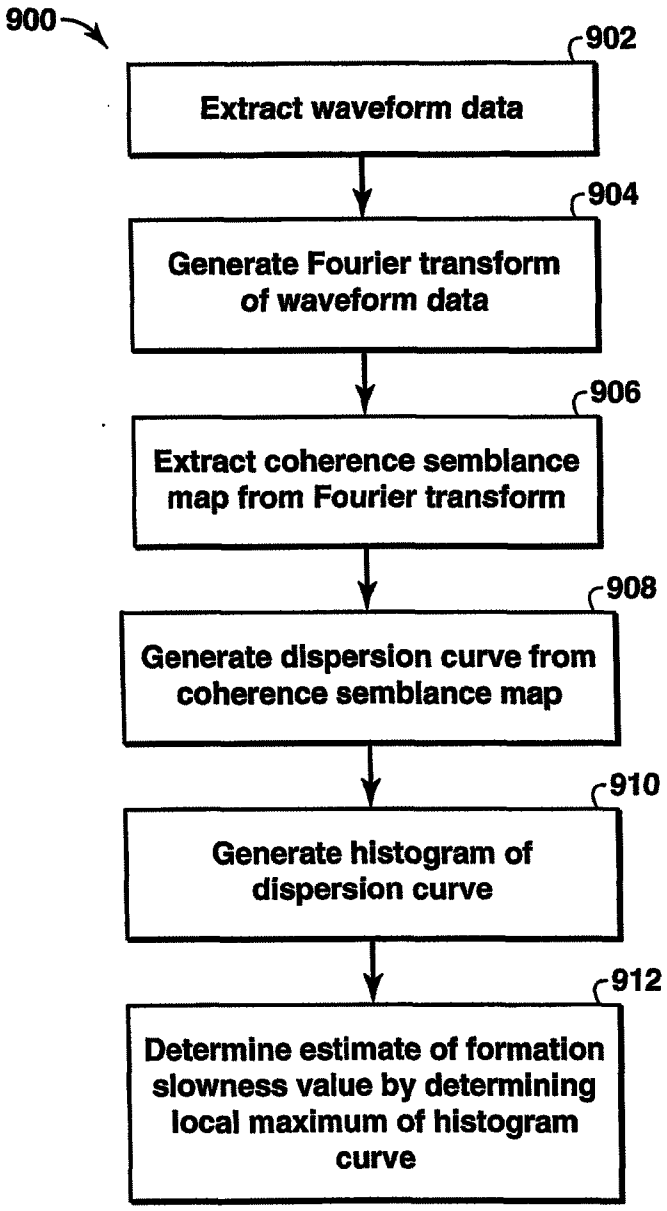

900
902
Extract waveform data
904
Generate Fourier transform of waveform data
906
Extract coherence semblance map from Fourier transform
908
Generate dispersion curve from coherence semblance map
910
Generate histogram of dispersion curve
912
Determine estimate of formation slowness value by determining local maximum of histogram curve

FIG. 9A

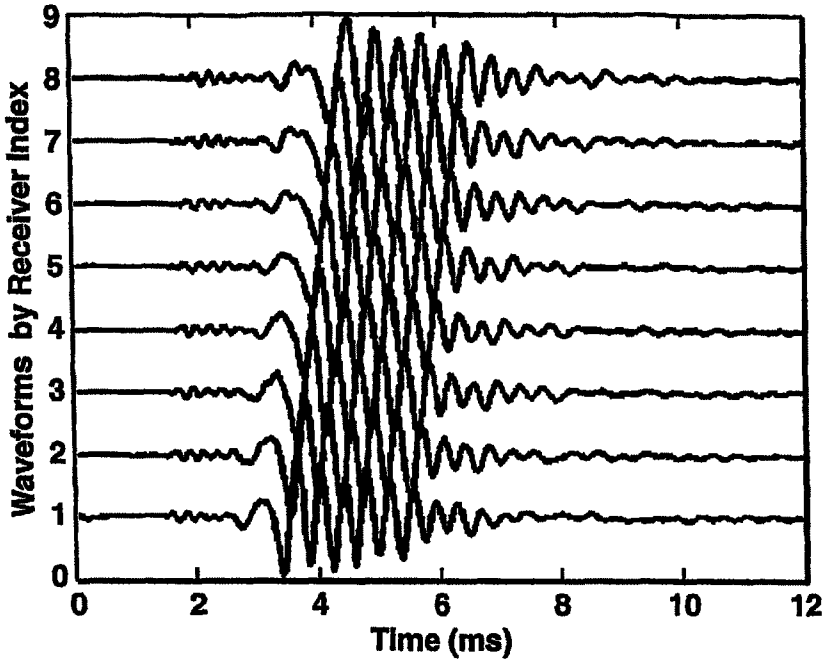

Waveforms by Receiver Index
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
0
2
4
6
8
10
12
Time (ms)

FIG. 9B

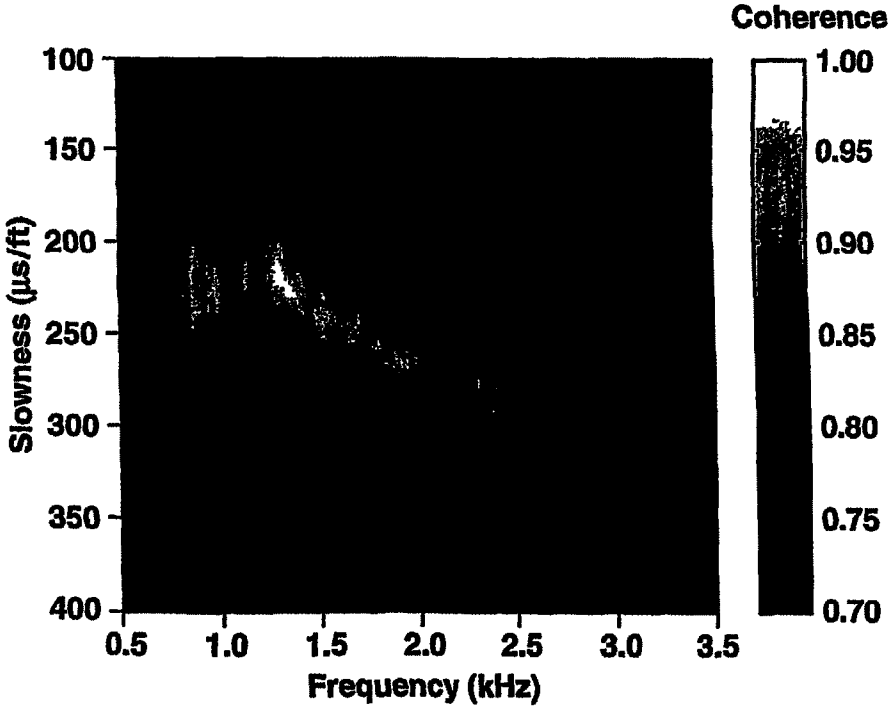

Coherence
1.00
0.95
0.90
0.85
0.80
0.75
0.70
Slowness (µs/ft)
100
150
200
250
300
350
400
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5
Frequency (kHz)

FIG. 9C

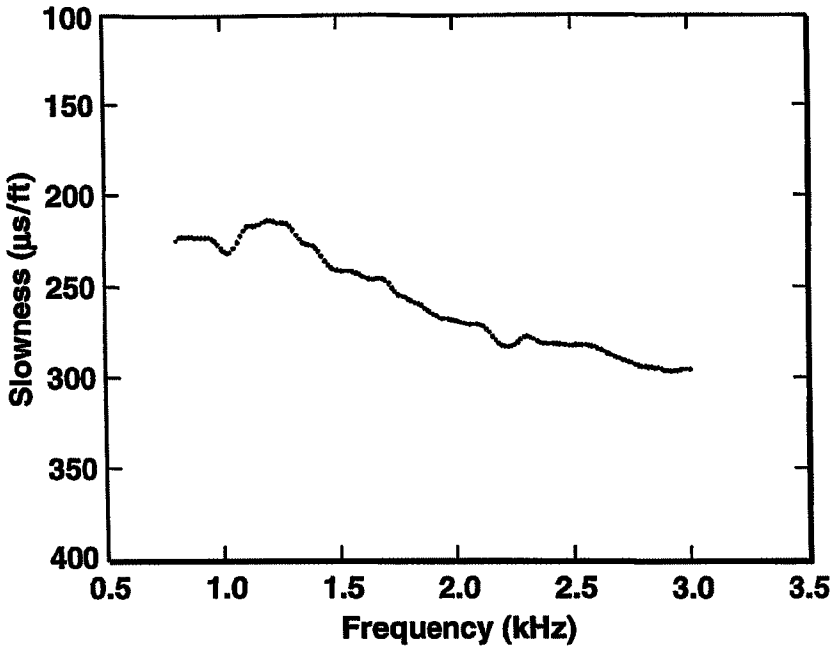

100
150
200
250
300
350
400
Slowness (μs/ft)
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5
Frequency (kHz)

FIG. 9D

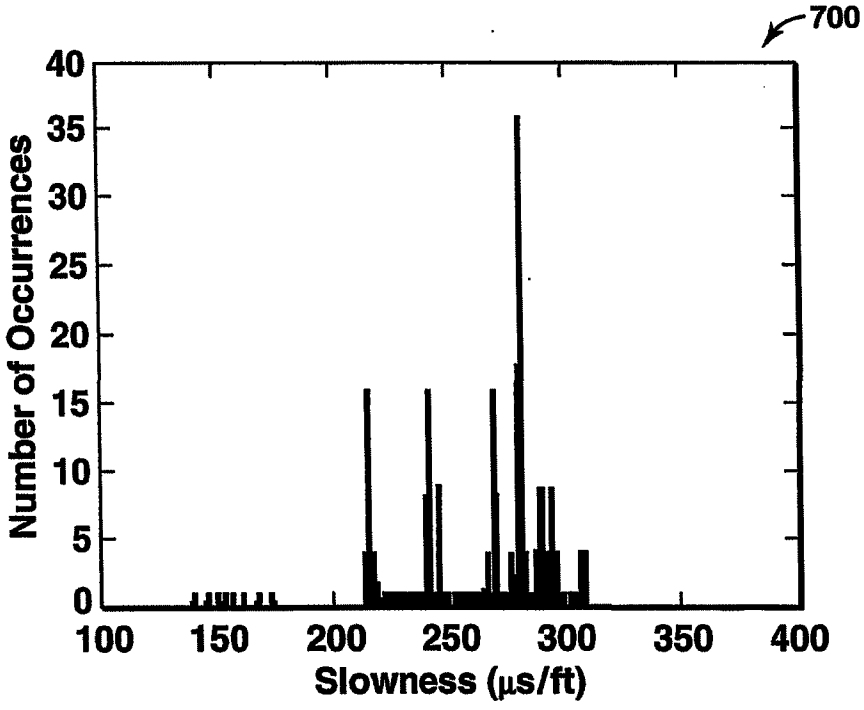

700
40
35
30
25
20
15
10
5
0
Number of Occurrences
100
150
200
250
300
350
400
Slowness (μs/ft)

FIG. 9E

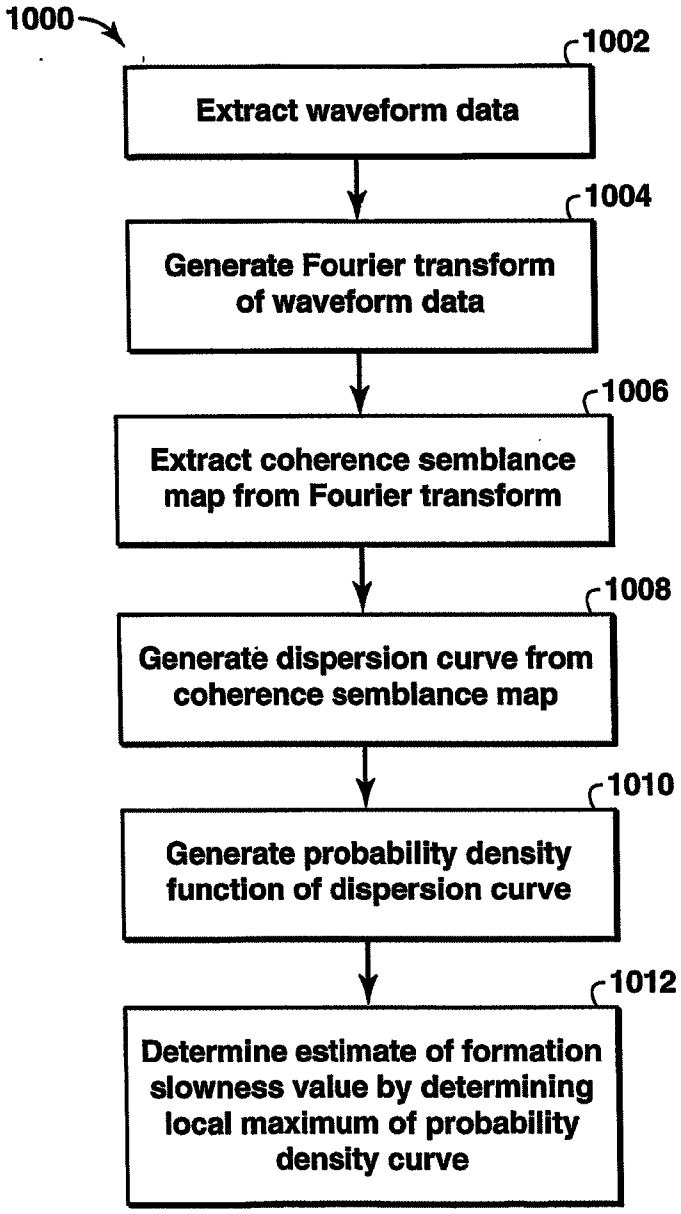

1000
1002
Extract waveform data
1004
Generate Fourier transform of waveform data
1006
Extract coherence semblance map from Fourier transform
1008
Generate dispersion curve from coherence semblance map
1010
Generate probability density function of dispersion curve
1012
Determine estimate of formation slowness value by determining local maximum of probability density curve

FIG. 10A

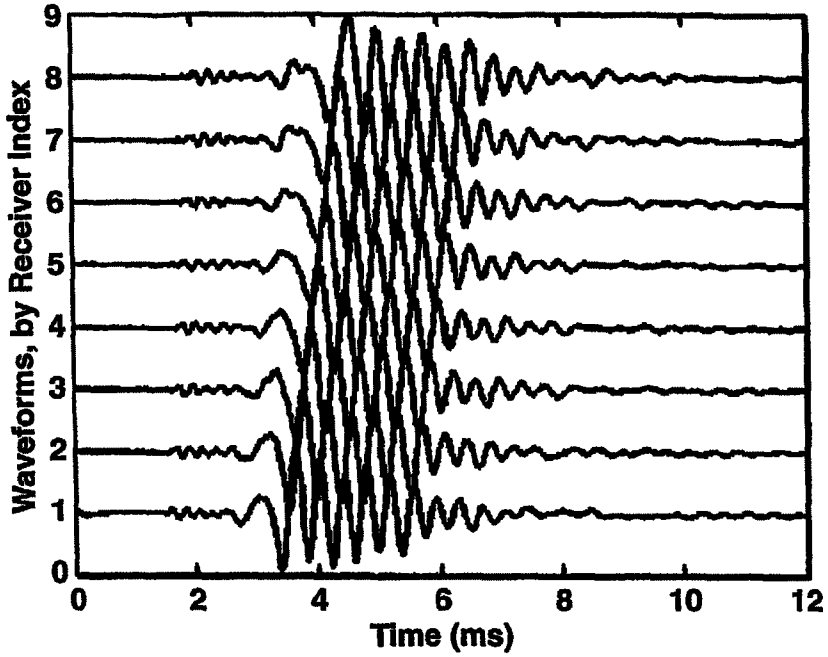


FIG. 10B

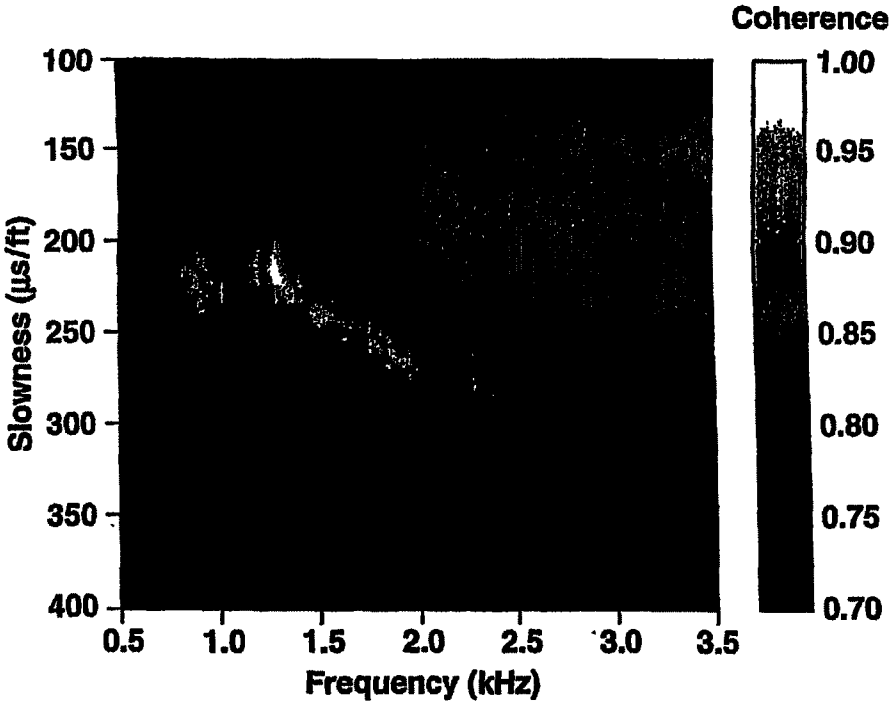


FIG. 10C

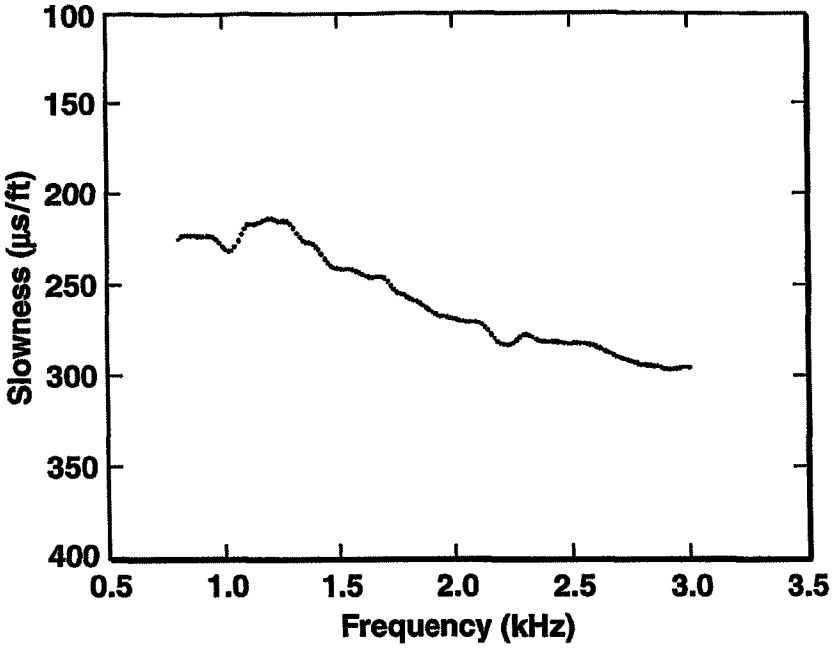


FIG. 10D

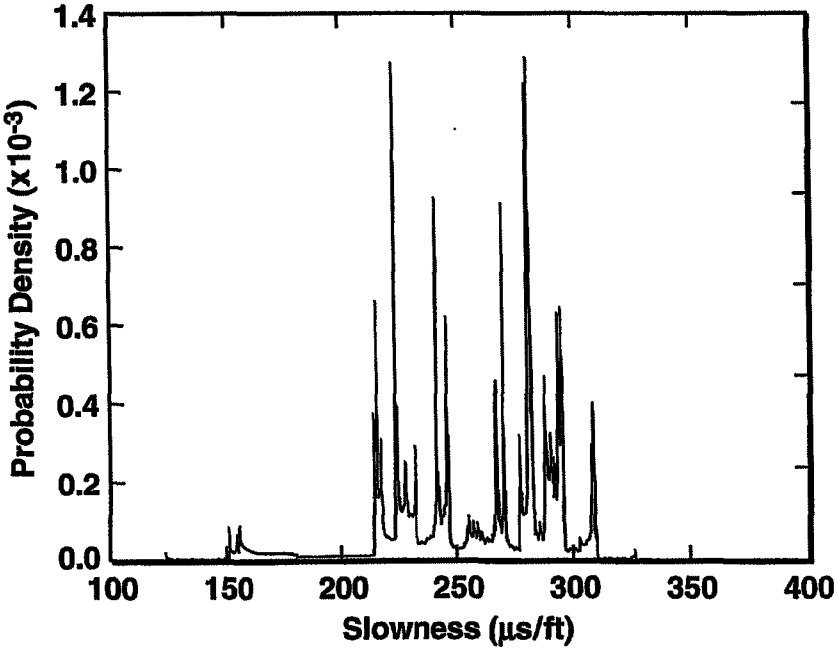


FIG. 10E

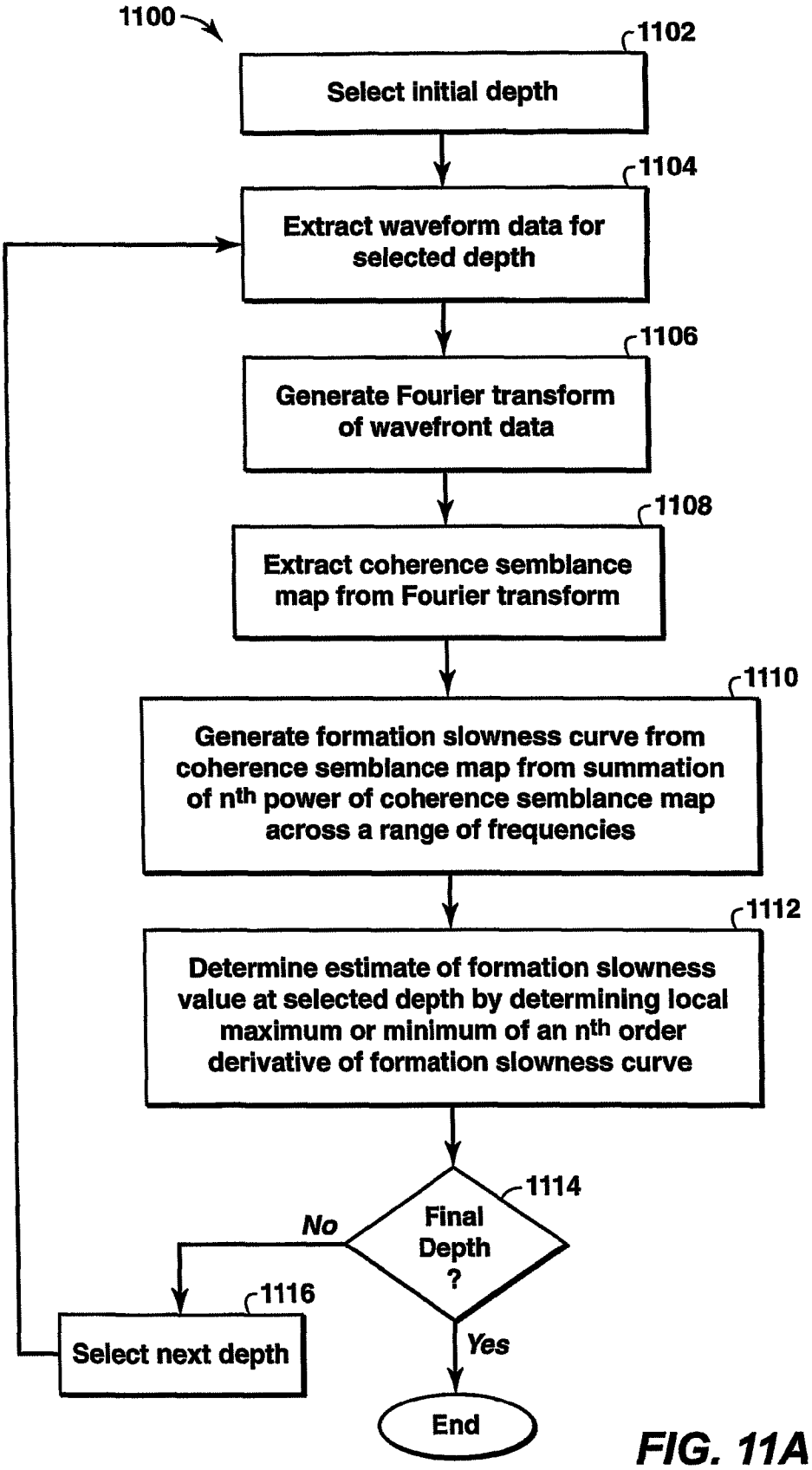

1100
1102
Select initial depth
1104
Extract waveform data for selected depth
1106
Generate Fourier transform of wavefront data
1108
Extract coherence semblance map from Fourier transform
1110
Generate formation slowness curve from coherence semblance map from summation of nth power of coherence semblance map across a range of frequencies
1112
Determine estimate of formation slowness value at selected depth by determining local maximum or minimum of an nth order derivative of formation slowness curve
1114
Final Depth ?
No
Yes
1116
Select next depth
End

FIG. 11A

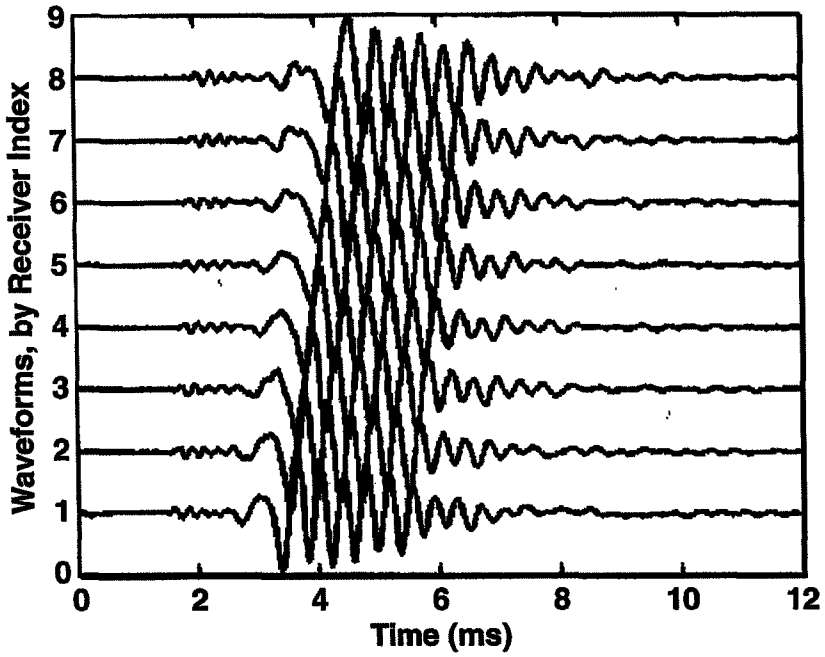


FIG. 11B

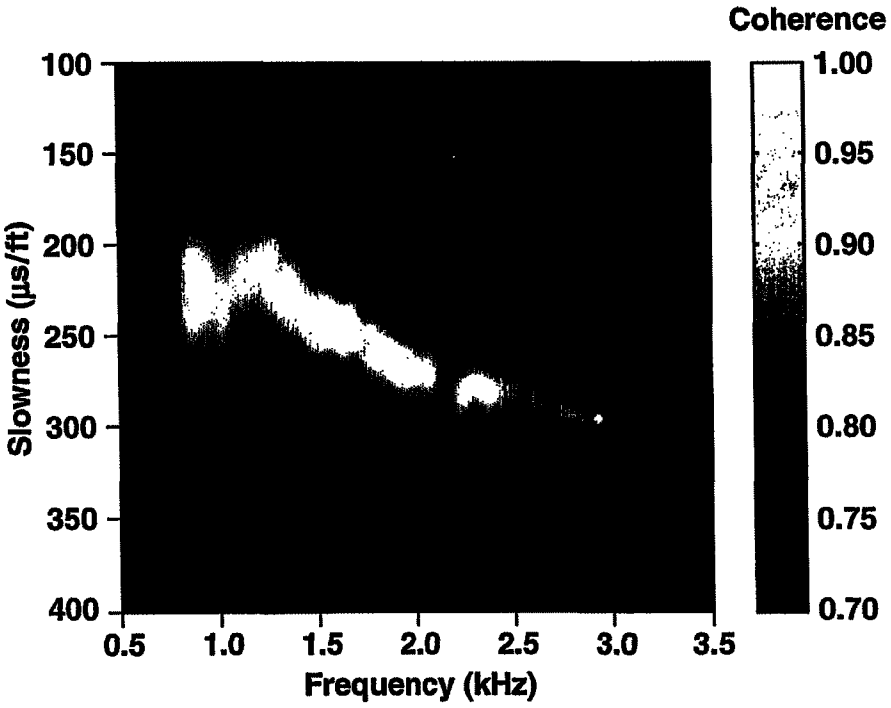


FIG. 11C

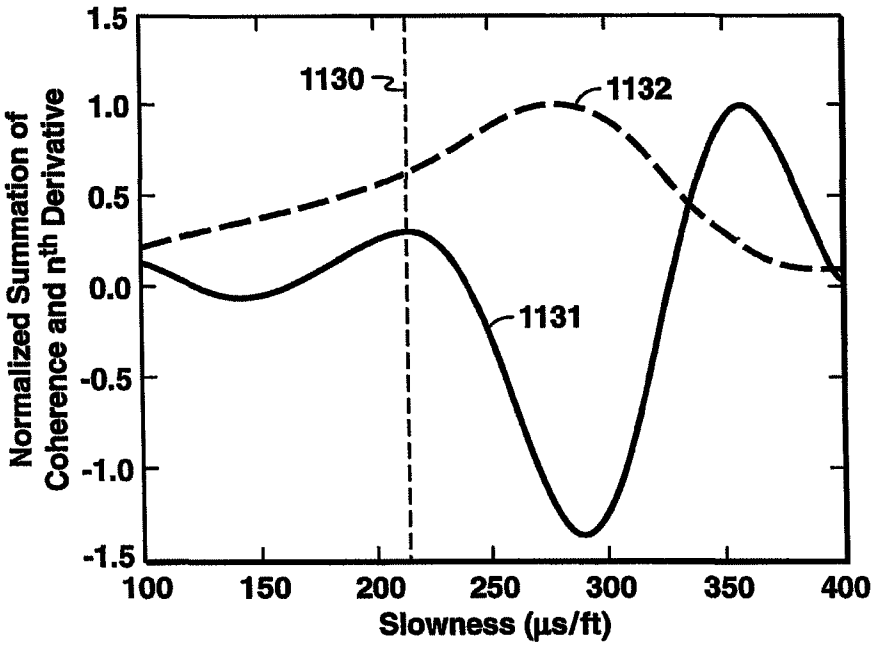
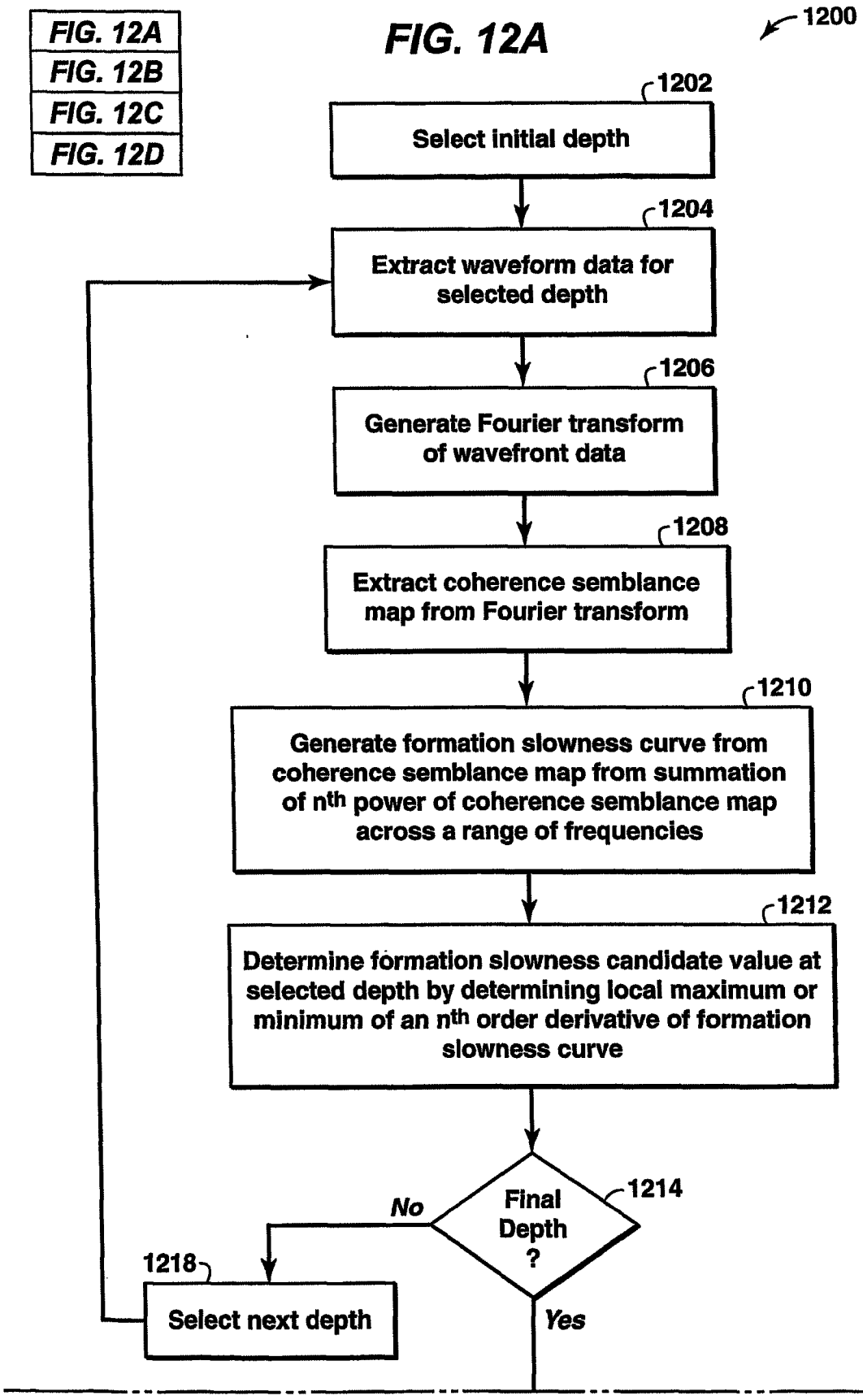

1.5
1.0
0.5
0.0
-0.5
-1.0
-1.5
Normalized Summation of Coherence and nth Derivative
1130
1132
1131
100
150
200
250
300
350
400
Slowness (µs/ft)

FIG. 11D

FIG. 12

FIG. 12A
FIG. 12B
FIG. 12C
FIG. 12D

FIG. 12A



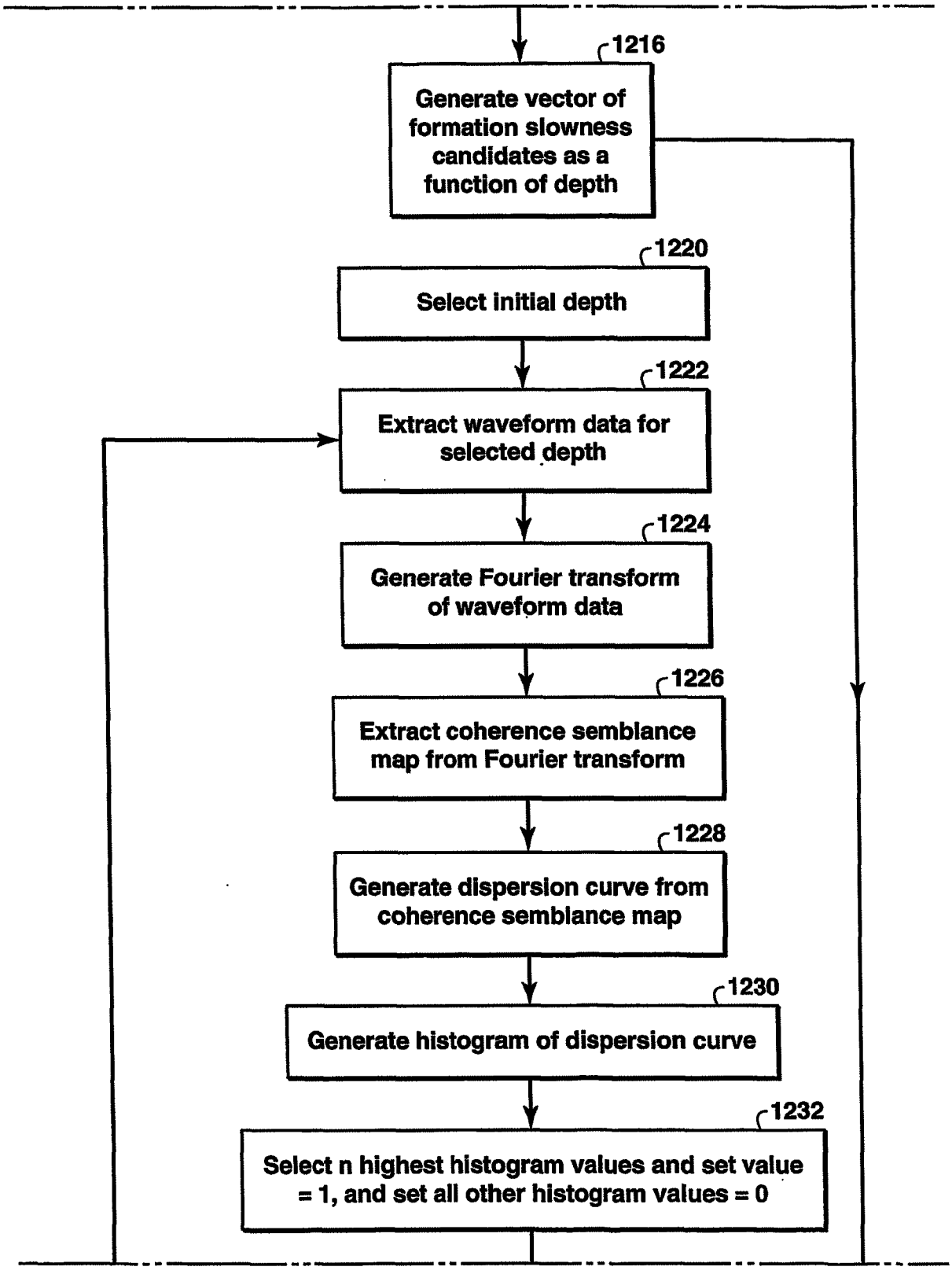

1216
Generate vector of formation slowness candidates as a function of depth
1220
Select initial depth
1222
Extract waveform data for selected depth
1224
Generate Fourier transform of waveform data
1226
Extract coherence semblance map from Fourier transform
1228
Generate dispersion curve from coherence semblance map
1230
Generate histogram of dispersion curve
1232
Select n highest histogram values and set value = 1, and set all other histogram values = 0

FIG. 12B

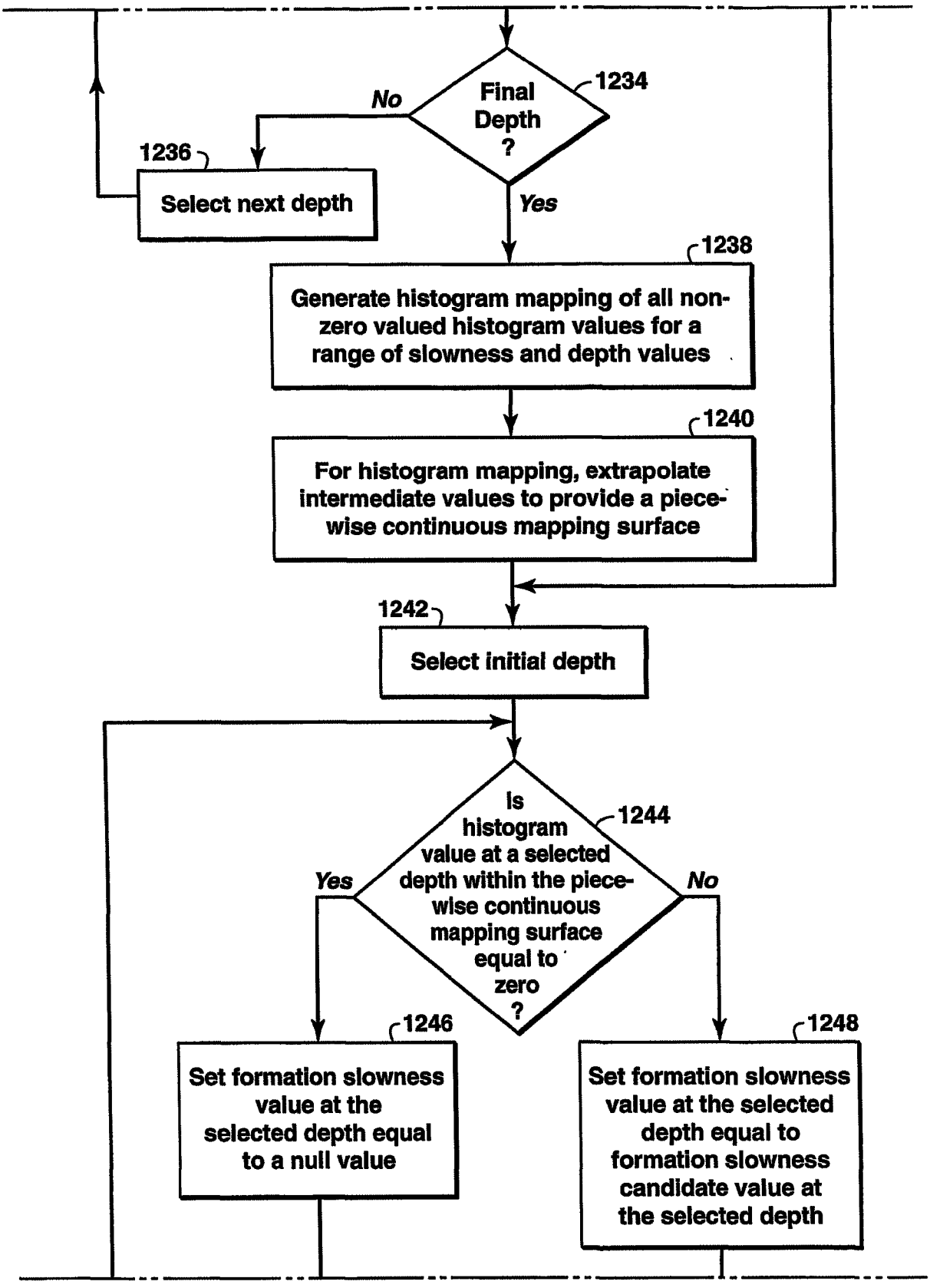

Final Depth ?
1234
No
Yes
1236
Select next depth
1238
Generate histogram mapping of all non-zero valued histogram values for a range of slowness and depth values
1240
For histogram mapping, extrapolate intermediate values to provide a piece-wise continuous mapping surface
1242
Select initial depth
Is histogram value at a selected depth within the piece-wise continuous mapping surface equal to zero ?
1244
Yes
No
1246
Set formation slowness value at the selected depth equal to a null value
1248
Set formation slowness value at the selected depth equal to formation slowness candidate value at the selected depth

FIG. 12C

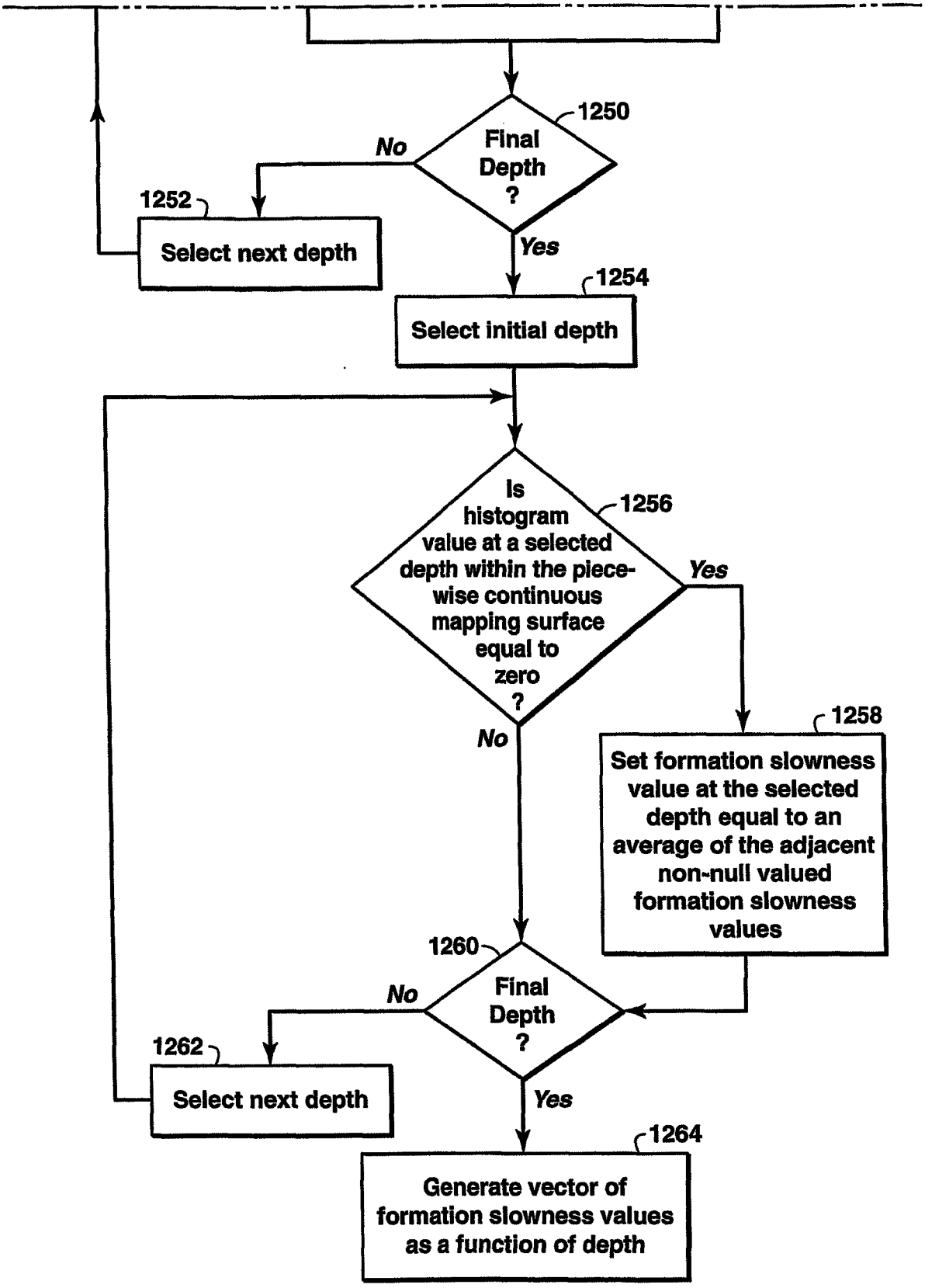

1250
Final Depth ?
No
Yes
1252
Select next depth
1254
Select initial depth
1256
Is histogram value at a selected depth within the piece-wise continuous mapping surface equal to zero ?
Yes
No
1258
Set formation slowness value at the selected depth equal to an average of the adjacent non-null valued formation slowness values
1260
Final Depth ?
No
Yes
1262
Select next depth
1264
Generate vector of formation slowness values as a function of depth

FIG. 12D

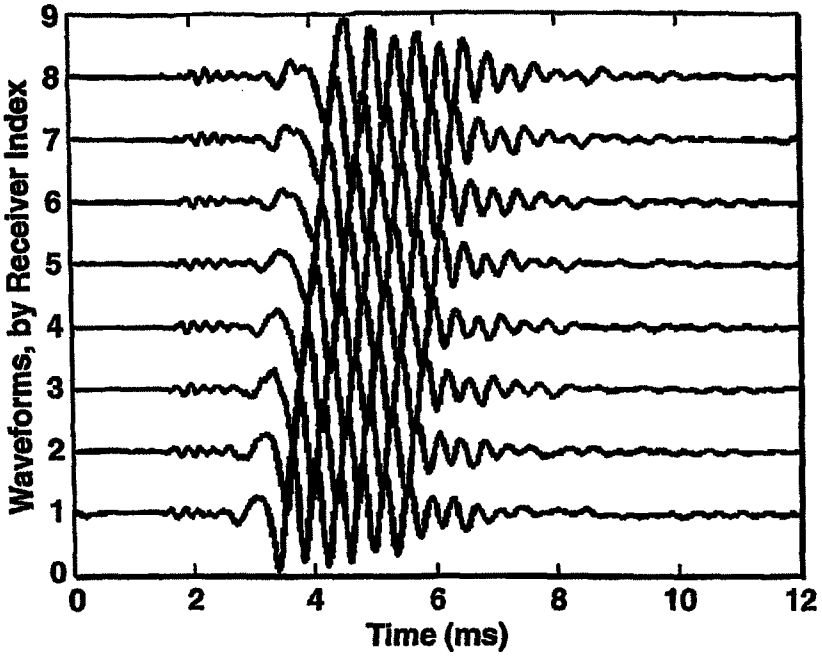


FIG. 12I

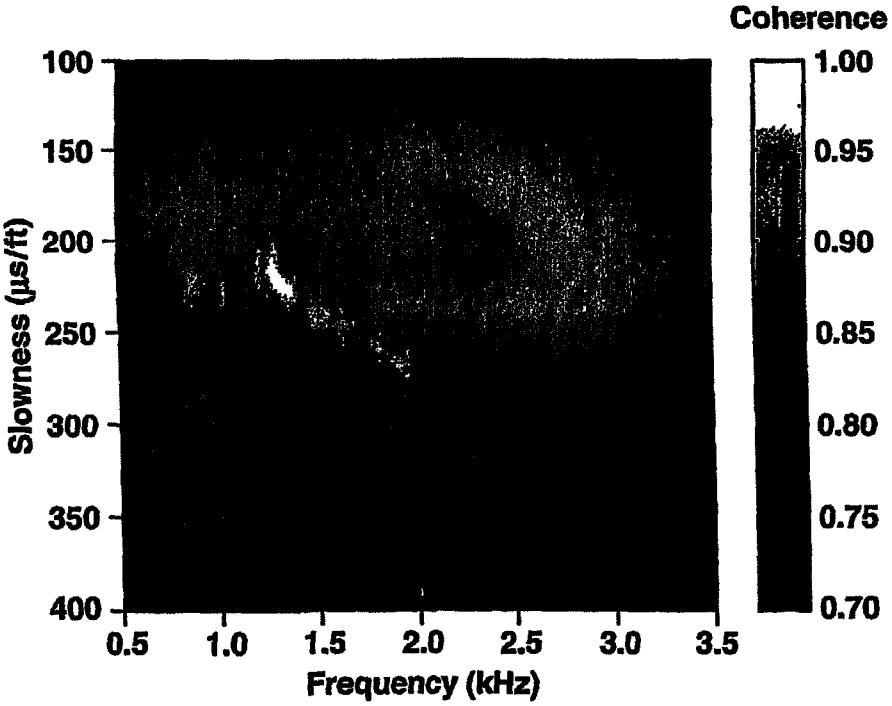


FIG. 12J

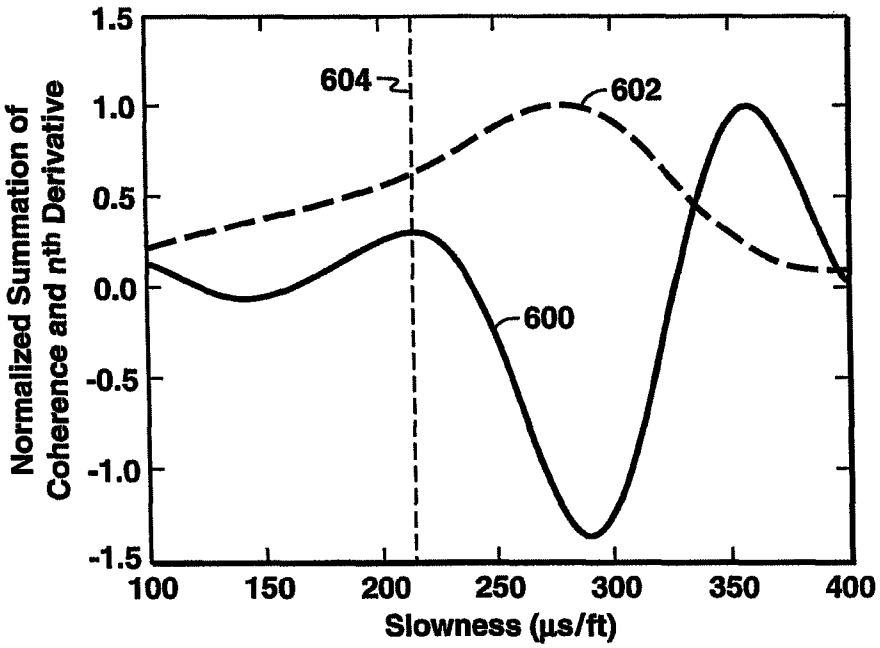

1.5
1.0
0.5
0.0
-0.5
-1.0
-1.5
Normalized Summation of Coherence and nth Derivative
604
602
600
100
150
200
250
300
350
400
Slowness (μs/ft)

FIG. 12K

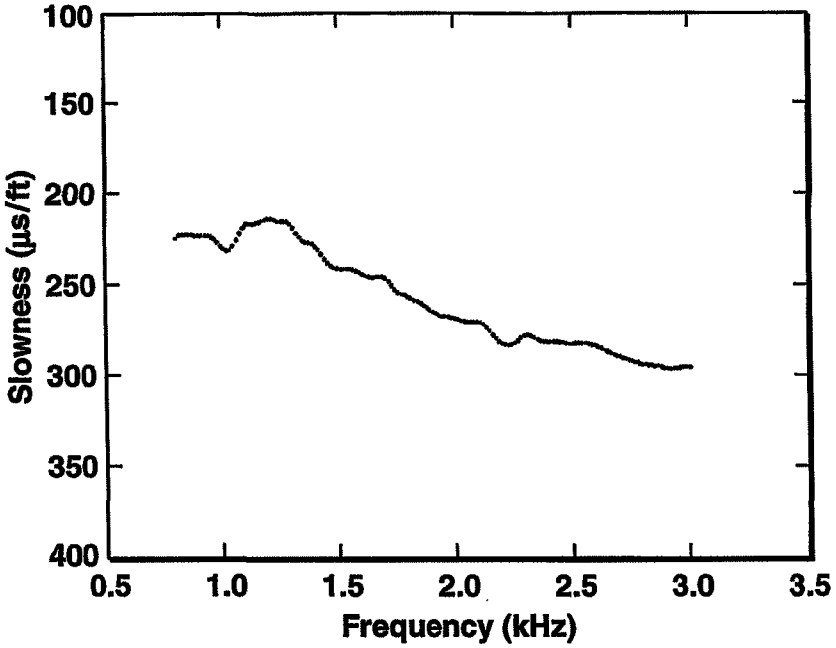


FIG. 12L

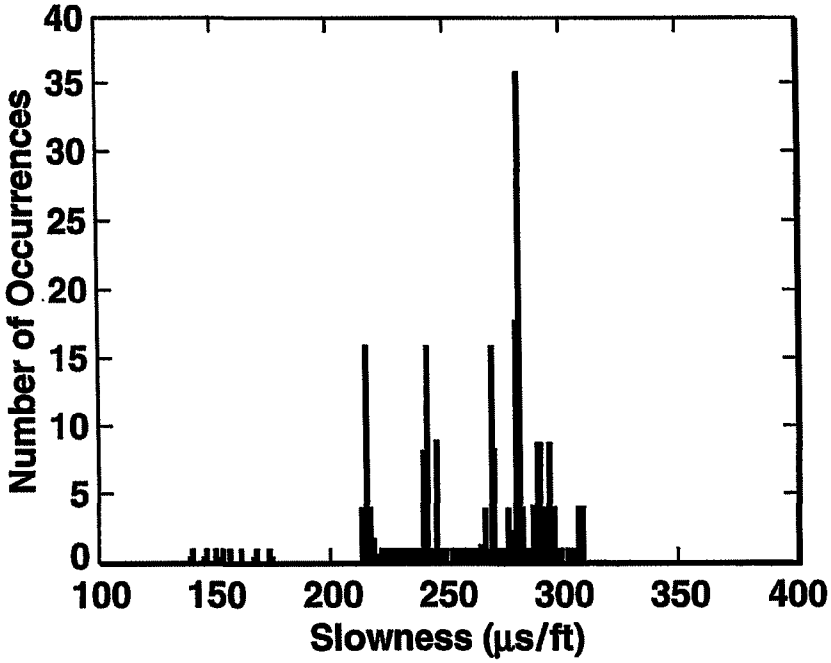


FIG. 12M

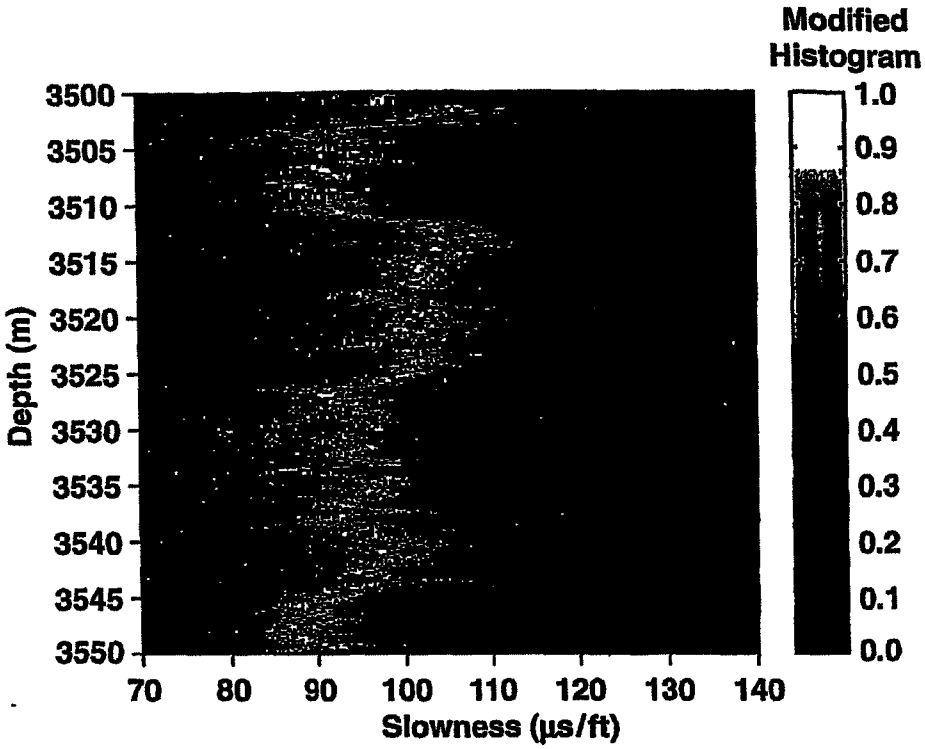


FIG. 12N

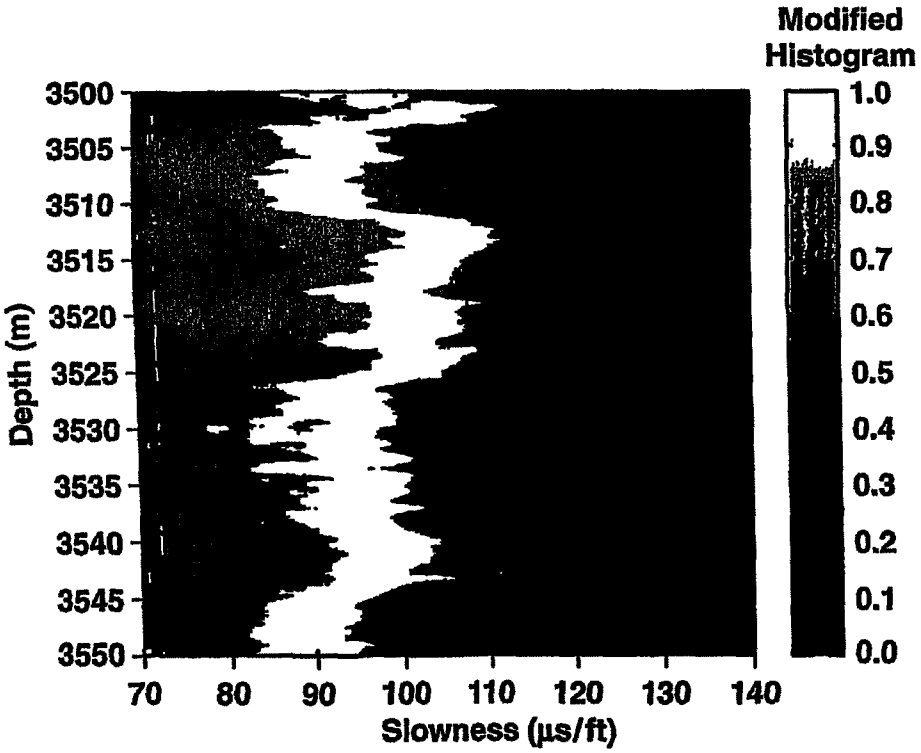


FIG. 12O

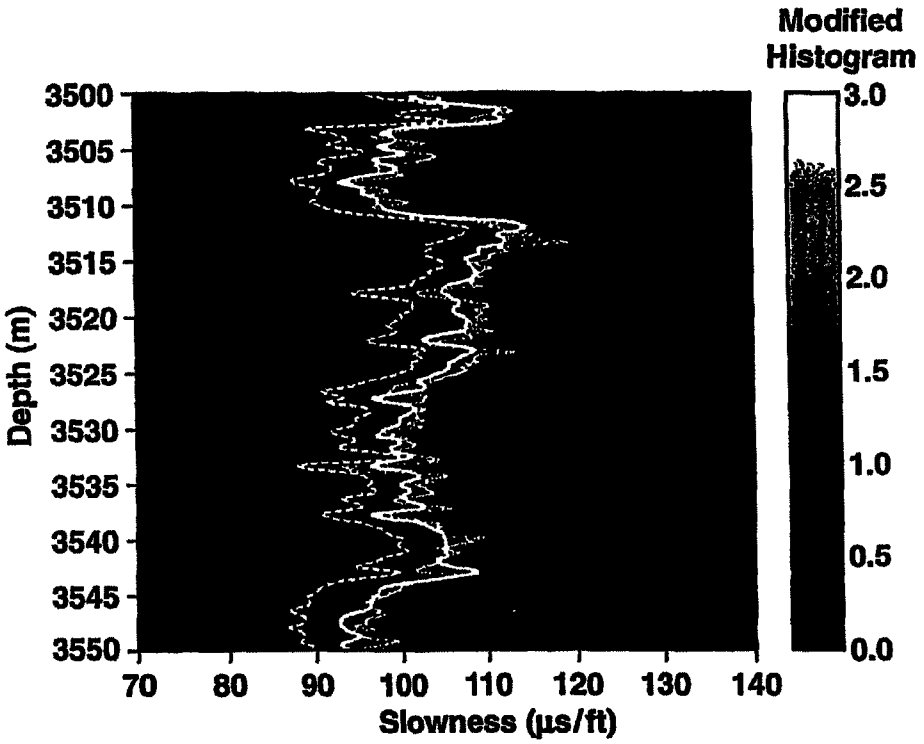

Modified
Histogram
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
Depth (m)
3500
3505
3510
3515
3520
3525
3530
3535
3540
3545
3550
70
80
90
100
110
120
130
140
Slowness (µs/ft)

FIG. 12P

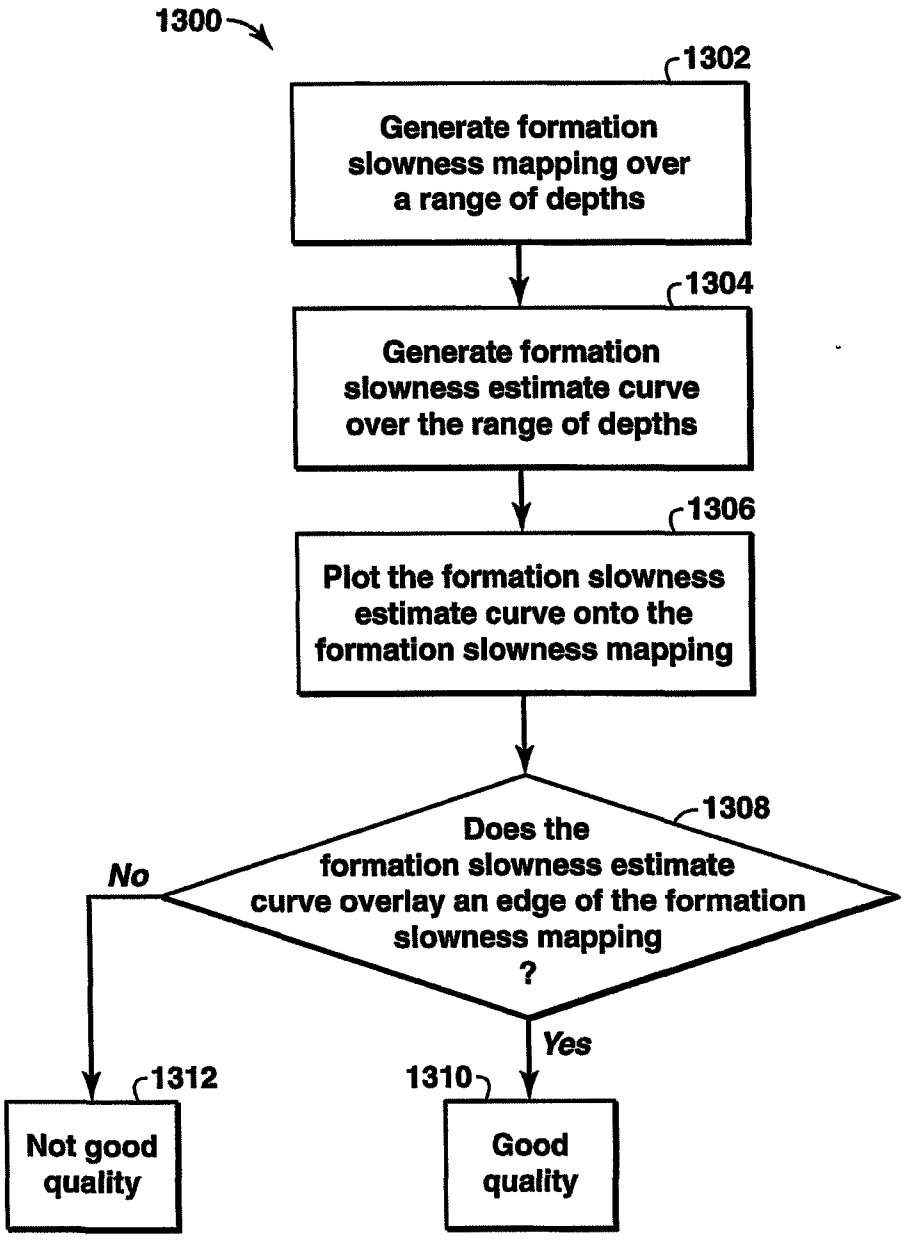

1300
1302
Generate formation slowness mapping over a range of depths
1304
Generate formation slowness estimate curve over the range of depths
1306
Plot the formation slowness estimate curve onto the formation slowness mapping
1308
Does the formation slowness estimate curve overlay an edge of the formation slowness mapping ?
No
Yes
1312
Not good quality
1310
Good quality

FIG. 13A

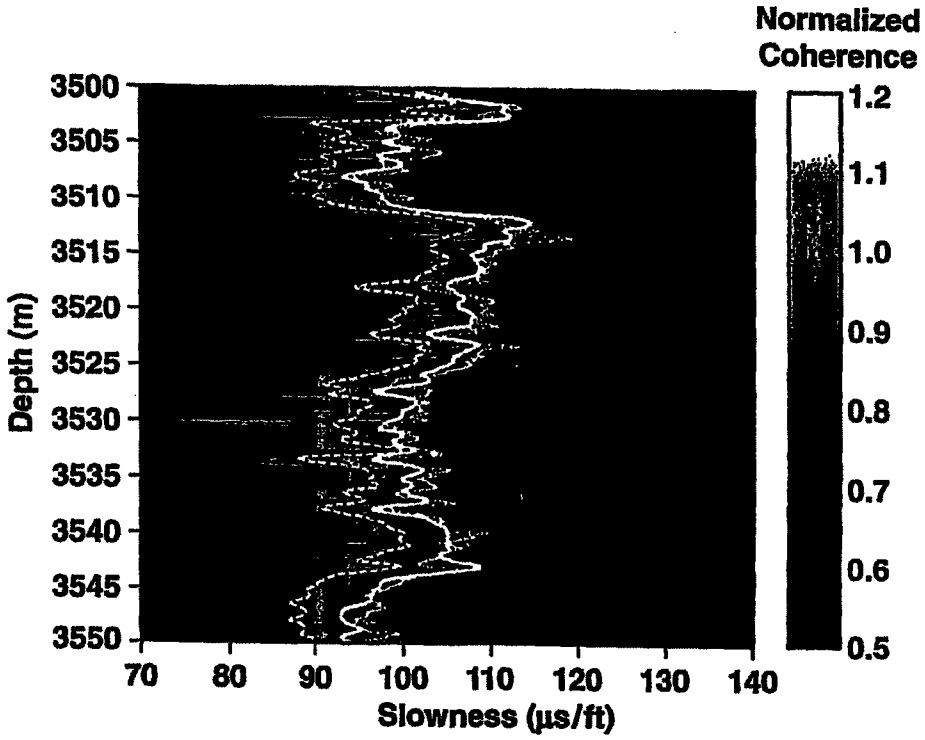

Normalized
Coherence
1.2
1.1
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
Depth (m)
3500
3505
3510
3515
3520
3525
3530
3535
3540
3545
3550
70
80
90
100
110
120
130
140
Slowness (µs/ft)

FIG. 13B

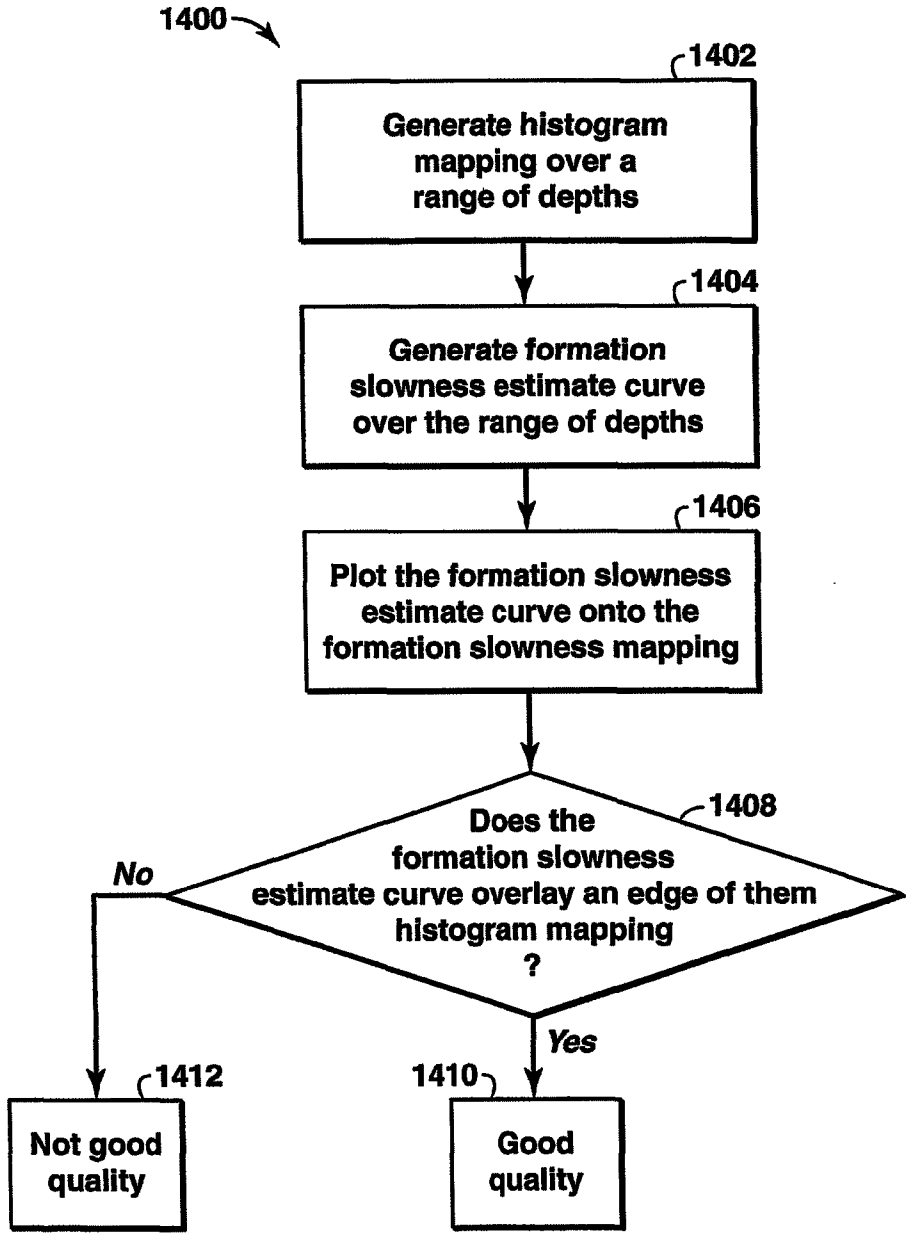

1400
1402
Generate histogram mapping over a range of depths
1404
Generate formation slowness estimate curve over the range of depths
1406
Plot the formation slowness estimate curve onto the formation slowness mapping
1408
Does the formation slowness estimate curve overlay an edge of them histogram mapping ?
No
Yes
1412
Not good quality
1410
Good quality

FIG. 14A

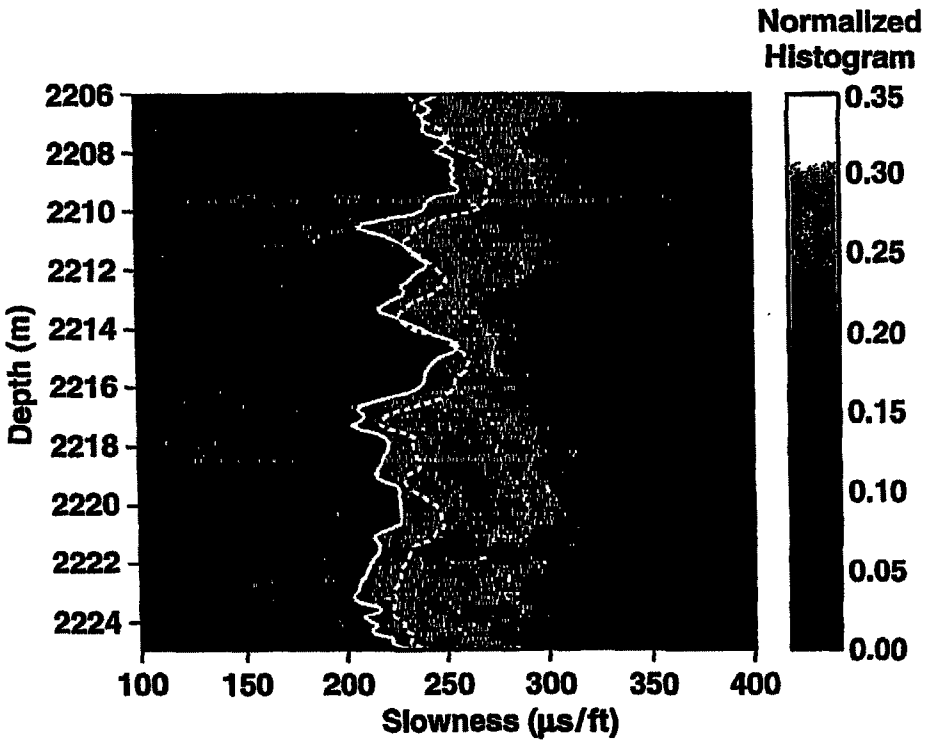

Normalized
Histogram
0.35
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
0.00
Depth (m)
2206
2208
2210
2212
2214
2216
2218
2220
2222
2224
100
150
200
250
300
350
400
Slowness (µs/ft)

FIG. 14B