



(12) PATENT

(11) 343049

(13) B1

NORGE

(19) NO

(51) Int Cl.

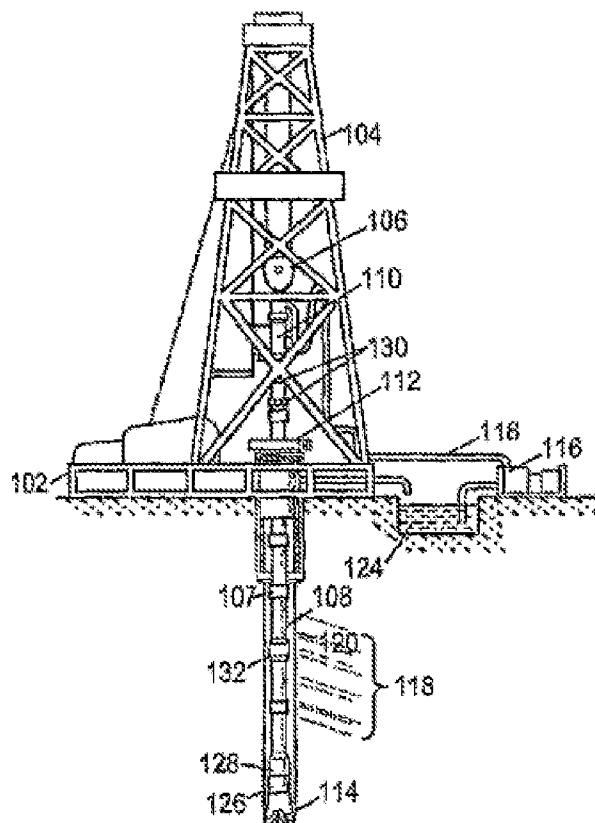
G01V 3/30 (2006.01)

G01V 3/18 (2006.01)

Patentstyret

(21)	Søknadsnr	20092661	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr	2007.03.16 PCT/US2007/064221
(22)	Inng.dag	2009.07.13	(85)	Videreføringsdag	2009.07.13
(24)	Løpedag	2007.03.16	(30)	Prioritet	2007.03.16, WO, PCT/US07/064221
(41)	Alm.tilgj	2009.10.09			
(45)	Meddelt	2018.10.15			
(73)	Innehaver	Halliburton Energy Services Inc, 10200 Bellaire Boulevard, TX77072 HOUSTON, USA			
(72)	Oppfinner	Guoyu Hu, 17118 Willow Ranch Drive, TX77095 HOUSTON, USA Michael Bittar, 8711 Wheatland Drive, TX77064 HOUSTON, USA			
(74)	Fullmektig	ZACCO NORWAY AS, Postboks 2003 Vikå, 0125 OSLO, Norge			
(54)	Benevnelse	Robuste inversjonssystemer og fremgangsmåter for asimutsensitiv resistivitetslogging			
(56)	Anførte publikasjoner	US 7138803 B2, US 7657377 B			
(57)	Sammendrag				

Fremgangsmåter og systemer for å bestemme den horisontale resistiviteten, vertikal resistivitet og relativ inklinasjonsvinkel for anisotropiske bakkeformasjoner er beskrevet. Noen av de fremlagte fremgangsmåter og systemer måler sinusaktig variasjon av asimutisk sensitiv resistivitet. Resistivitetssloggeverktøymålinger, bestemmer parametere som representerer de sinusaktige variasjonene og utføre inversjon basert på de sinusaktige parametere. Når utført på denne måten vil inversjonsprosessen kunne gi mer nøyaktige og konsistente resistivitet- og inklinasjonsvinklestimater. De sinusaktige parametere har foretrukket formen av gjennomsnitt og topp-til-topp målinger, men kan også ha andre former. Videre vil bruk av slike sinusaktige parametere muliggjøre en pakket representasjon av resistivitetssloggeverktøymålinger, som muliggjør signifikant mer effektiv kommunikasjon og lagring av disse målingene. De pakke representasjonene fortsetter å muliggjøre retningsgrensedeteksjon og geostyring.



- I omr³ det for petroleum brønnboring og logging er resistivitetsloggeverktøy ofte brukt for ³ gi en indikasjon om den elektriske resistiviteten i fjellformasjoner omkring et bakkeborehull. Slik informasjon med hensyn til resistivitet er hensiktsmessig i ³ bedømme tilstedeværelsen eller fraværet av hydrokarboner. Et typisk resistivitets-
- 5 loggeverktøy inkluderer en senderantenne og et par av mottakerantenner plassert i forskjellig avstand fra senderantennen langs aksen til verktøyet. Senderantennen blir brukt til ³ opprette elektromagnetiske felt i den omkringliggende formasjonen. På sin side vil det elektromagnetiske feltet i formasjonen indukere en elektrisk spenning i hver mottakerantenne. På grunn av geometrisk spredning og absorpsjon av den omkringliggende bakkeformasjonen vil de induerte spenningene i de to mottakerantennene ha
- 10 forskjellige faser og amplitude. Eksperimenter har vist at faseforskjellen (F) og amplitudeforholdet (dempningen A) til den induerte spenningen i mottakerantennene indikerer resistiviteten til formasjonen. Formasjonsomr³ det (som definert av en radiell avstand fra verktøyaksen) til hvilken en slik resistivitetsmåling fører til er en funksjon
- 15 av frekvensen og avstanden fra senderen til midtpunktet mellom de to mottakerne. Dermed kan man oppnå flere radiale dybder med undersøkelse av resistivitet enten ved ³ anordne flere sendere i forskjellig avstand fra mottakerparet eller ved ³ operere en enkelt sender på flere frekvenser.
- 20 Dersom en formasjon er elektrisk isotropisk vil resistivitetene målt i de forskjellige dybdene av undersøkelsen ved et slikt resistivitetsloggeverktøy være den samme. Imidlertid, dersom resistiviteten er samsvarende med de forskjellige dybdene i undersøkelsen er forskjellig vil slike forskjeller indikere at formasjonen som blir målt er elektrisk anisotropisk. I elektrisk anisotropiske formasjoner vil anisotropien generelt
- 25 være tilstede på grunn av ekstremt fin lagdeling under sedimentoppbyggingen av formasjonen. Dermed, i et formasjonskoordinatsystem orientert slik at x-y planet er parallell med formasjonslagene og z-aksen er normal på formasjonslagene, vil resistiviteter R_x og R_y i retningen x og y respektivt være den samme, men resistiviteten R_z i z-retningen er forskjellig fra R_x og R_y . Dermed vil resistiviteten i en retning parallell med planet i formasjonen (dvs. x-y planet) være kjent som den horisontale resistiviteten R_h , og resistiviteten i retningen normalt på planet i formasjonen (dvs. z-retningen) være kjent som den vertikale resistiviteten R_v . Indeksen for anisotropi, h , er definert som
- 30
$$h = [R_v/R_h]^{1/2}.$$
- 35 Den relative inklinasjonsvinkelen q er vinkelen mellom verktøyaksen og normalen på planet til formasjonen. Dersom aksen til et resistivitetsloggeverktøy er normalt på planet

til en anisotropisk formasjon (dvs. $q = 0^\circ$), vil b³ de faseskiftet og amplitudeattenuasjonsm³ lingene reflektere bare den horisontale resistiviteten. Imidlertid, dersom aksene til verktrøyet er hellende med hensyn til normalen til formasjonsplanet (dvs. for ikke-null relativ inklinasjonsvinkel), vil fjellanisotropien p³ virke resistiviteten utledet fra fase-
 5 skiftm³ lingene (_faseskiftresistivitet_ eller R_F) forskjellig fra det som p³ virker resistiviteten utledet fra amplitudeattenuasjonsm³ linge (_amplitudeattenuasjonsresistivitet_ eller R_A). For relativt sm³ relative inklinasjonsvinkler (dvs. q mindre enn omkring 45°), vil forskjellen mellom faseskift og amplitudeattenuasjonsresistiviteter v³re relativt
 10 liten. Imidlertid, denne forskjellen blir signifikant for relative inklinasjonsvinkler st³rr enn omkring 50° , og forskjellen er stor for horisontale borehull (dvs. $q = 90^\circ$).

Dermed har anisotropi og inklinasjonsvinkler hver signifikante effekter p³ resistivitetsloggeverktrøym³ linge. Som et resultat b³nr resistivitetsloggesystemet ta hensyn til formasjonsanisotropi og relativ inklinasjonsvinkel dersom n³yaktige resistivitetslog-
 15 ginger skal bli oppn³dd.

US7138803 beskriver en fremgangsm³ te for generering av et signal for styring av en borestreng i referanse til leiegrensene i en undergrunns formasjon. Fremgangsm³ ten omfatter samtidig ³ bestemme nedhulls den horisontale resistivitet, den vertikale
 20 resistivitet og den relative helningsvinkel for anisotrope undergrunns formasjoner ved bruk av en antenne-konfigurasjon hvori en senderantenne (T1 - TN) og en mottagerantenne (R1, R2) er orientert i hvert sitt plan som ikke er parallell og p³ en slik m³ te at den vertikale resistivitet og den relative helningsvinkel blir koblet fra
 25 hverandre. Fortrinnsvis er enten sender eller mottager montert i en vanlig brukt orientering i et f³rst³ plan som st³rr vinkelrett p³ verktrøyaaksen, mens den andre antenne er montert i et andre plan som ikke er parallellt med det f³rst³ plan.

I US patent 6.163.155 fremlegger Michael Bittar en slik fremgangsm³ te som anvender resistivitetsloggeverktrøye som har hellende sender- og/eller mottakerantenne.
 30 Fremgangsm³ ter i henhold til denne fremlagte fremgangsm³ ten er blitt utviklet og er presentert her.

Det er frembrakt en loggeverktrøye som har en verktrøyaakse innbefatter: en f³rst³ senderantenne for ³ sende en elektromagnetisk b³lje som har en f³rst³ frekvens inn i en
 35 formasjon; en andre senderantenne for ³ sende en elektromagnetisk b³lje som har en andre frekvens inn i en formasjon; i det minste ³ mottakerantenne for ³ ta imot en

- elektromagnetisk bølge fra formasjonen, hvor i det minste én av sender- og mottakerantennene er skråstilt med hensyn til verktøyaksen; en rotasjonsvinkelsensor for å bestemme en asimutisk vinkel til loggeverktøyet; en prosessor koplet til i det minste den ene mottakerantennen og rotasjonsvinkelsensoren for å samle minst én formasjonsmåling for minst tre asimutiske vinkler ved hver av de første og andre frekvenser, og å bestemme basert på nevnte målinger minst én sinusaktig parameter som karakteriserer den asimutiske variasjonen av i det nevnte minst én formasjonsmåling ved den første frekvensen og minst én tilleggs sinusaktig parameter som karakteriserer den asimutiske variasjonen av i det nevnte minst én formasjonsmåling ved den andre frekvensen.

- Det er også frembrakt en fremgangsmåte, innbefatter: å sende en første elektromagnetisk bølge med en første frekvens fra en første senderantenne inn i en formasjon; å ta imot en elektromagnetisk bølge som har den første frekvensen fra formasjonen med en mottakerantenne, hvor i det minste én av sender- og mottakerantennene er skråstilt med hensyn til en verktøyaakse; å sende en andre elektromagnetisk bølge som har en andre frekvens fra en andre senderantenne inn i en formasjon, hvor den andre frekvensen er forskjellig fra den første frekvensen; å ta imot en elektromagnetisk bølge som har den andre frekvensen fra formasjonen med en mottakerantenne; å gjenta nevnte sending og mottak for å samle minst én formasjonsmåling ved hver de første og andre frekvenser for minst tre asimutiske vinkler; å bestemme en asimutisk variasjon av i det nevnte minst én formasjonsmåling ved hver av de første og andre frekvenser; og å lagre i det minste én sinusaktig parameter som karakteriserer den asimutiske variasjonen av i det minste én formasjonsmåling ved den andre frekvensen.

Kort beskrivelse av tegningene

- En bedre forståelse av de forskjellige fremlagte utførelser kan bli oppnådd når følgende detaljerte beskrivelse er betraktet i samband med følgende tegninger, hvor:

- Figur 1 viser en illustrasjon av logging mens det bores miljø som inkluderer hellende formasjonsleier.
- Figur 2 viser en illustrasjon av kabellinjeloggemiljø som inkluderer hellende formasjonsleier.

Figur 3 er en skjematisk perspektivtegning av et kartesisk koordinatsystem i en sedimentnr bakkeformasjon.

- 5 Figur 4 viser en relasjon mellom koordinatsystemene til et borehull og et hellende formasjonsleie.

Figur 5 viser et koordinatsystem for ³ spesifisere orienteringen av skr³ stilte sløyfeantennener.

10

Figur 6 viser et blokkdiagram over kretsen brukt i henhold til foreliggende oppfinnelse.

Figur 7A-7N viser forskjellige illustrerende antennekonfigurasjoner for et resistivitetsloggeverktøy.

15

Figur 8 viser en illustrasjon av et elektromagnetisk resistivitetsloggeverktøy som har kompenserte m³ ligger.

Figur 9 er en illustrerende graf over m³lt amplitudeattenuasjon kontra resistivitet.

20

Figur 10 er en illustrerende graf over m³lt faseskift kontra resistivitet.

Figur 11 viser en illustrerende deling av en borehullomkrets i asimutiske binger.

- 25 Figur 12 viser en illustrerende graf over m³lt faseresistivitet som en funksjon av rotasjonsvinkel for forskjellige signalfrekvenser.

Figur 13 viser en illustrerende graf over m³lt faseresistivitet som en funksjon av rotasjonsvinkel for forskjellige sender-mottakeravstander.

30

Figur 14 er en illustrerende graf som sammenlikner fase- og attenuasjonsresistiviteter for forskjellige relativ inklinasjonsvinkler.

- 35 Figur 15 er en illustrerende graf som sammenlikner faseresistivitet som en funksjon over inklinasjonsvinkel for forskjellige sender-mottakeravstander.

- Figur 16 er en illustrerende graf som sammenlikner faseresistivitet som en funksjon av inklinasjonsvinkel for forskjellige signalfrekvenser.
- Figur 17 er et flytdiagram over en illustrerende resistivitetsloggefremgangsm³te.
- 5 Figur 18 er en illustrerende graf over verktøyreaksjonen p³ en asimutisk orientering.
- Figur 19 er en illustrerende graf over verktøyreaksjonen p³ en asimutisk orientering motsatt den i figur 18, og
- 10 Figur 20 er en illustrerende graf over forskjellen mellom verktøyreaksjonene i figur 18 og 19.
- Mens foreliggende oppfinnelse er gjenstand for forskjellige modifikasjoner og alternative former vil spesifikke utførelser av denne vNre vist som eksempel i tegningene og vil her vNre beskrevet i detalj. Det bnr vNre forst³tt, imidlertid, at tegningene og den detaljerte beskrivelsen til disse ikke er ment ³ begrense foreliggende oppfinnelse til bestemte former som er fremlagt.
- 15
- 20 Detaljert beskrivelse
- Fremlagt her er forskjellige fremgangsm³ter og systemer for ³ bestemme horisontal resistivitet, vertikal resistivitet og relativ inklinasjonsvinkel i anisotropiske bakkeformasjoner. Noen av de fremlagte fremgangsm³ter og systemer m³ler sinusvariasjon av
- 25 asimutisk sensitivitetsresistivitetsloggeverktøym³linger, bestemmer parametere som er representative for sinusvariasjonen, og utfnr inversjon basert p³ sinusparameterne. N³r utfnrt p³ denne m³ten vil inversjonsprosessen kunne gi mer nnyaktige og konsistente resistivitets- og inklinasjonsvinkelestimer. Sinusparameterne tar foretrukket formen av gjennomsnitt og topp-til-toppm³linger, men kan ogs³ ta andre former. Videre vil bruk
- 30 av slike sinusparametere muliggjnr en pakket representasjon av resistivitetsloggeverktøym³lingene, som muliggjnr signifikant mer effektiv kommunikasjon og lagring av disse m³lingene. Den pakkede representasjonen fortsetter ³ muliggjnr retningsgrensedeteksjon og geostyring.
- 35 Den fremlagte verktøykonfigurasjonen og operasjonen er best forst³tt i sammenhengen av stjrre systemer hvor de virker. Fnlgelig er et illustrerende logging mens det bores

(LWD) miljø vist i figur 1. En boreplattform 102 understøtter et boret³ 104 som har en løpeblokk 106 for ³ heise og senke en borestreng 108. Et rotasjonsrør 110 understøtter borestrengen 108 når den blir senket gjennom et rotasjonsbor 12. En borekrone 14 blir drevet av en nedhullsmotor og/eller rotasjon av borestrengen 8. Når borekronen 14 roterer skaper den et borehull 16 som g³ r gjennom forskjellige formasjoner 18. En pumpe 20 sirkulerer borefluid gjennom materret 22 til rotasjonsrøret 10, nedhulls gjennom det indre av borestrengen 8, gjennom ³ pninger i borekronen 14, tilbake til overflaten via den ringformede ³ pningen rundt borestrengen 8 og inn i en oppbevaringsgrop 24. Borefluidet transporterer avskjuringen fra borehullet inn i gropen 24 og hjelper til ³ beholde borehullintegritet.

Den fremlagte verktykonfigurasjonen og virkning er best forstått i sammenhengen av stjerne systemer hvor de virker. Følgelig er et illustrerende logging mens det bores (LWD) miljø vist i figur 1. En boreplattform 102 er utstyrt med et boret³ 104 som understøtter en talje 106 for ³ heve og senke en borestreng 108. Taljen 106 henger opp en toppdriv 110 som er brukt til ³ rotere borestrengen 108 og til ³ senke borestrengen gjennom brønnhodet 112. Koblet til den lavere enden av borestrengen 108 er det en borekrone 114. Når borekronen 114 roterer skaper den et borehull 120 som g³ r gjennom forskjellige formasjoner 118. En pumpe 116 sirkulerer borefluid gjennom et forsyningsrør 118 til toppdriv 110, nedhulls gjennom det indre av borestrengen 108, gjennom ³ pninger i borekronen 114, tilbake til overflaten via den ringformede ³ pningen rundt borestrengen 108 og inn i en oppbevaringsgrop 124. Borefluidet transporterer skjuringen fra borehullet inn i gropen 124 og hjelper til i ³ beholde integriteten til borehullet 120.

I brønner som anvender akustisk telemetri for LWD vil nedhullssensorer (inkludert resistivitetsloggeverktøy 126) være koplet til en akustisk telemetrisender 128 som sender telemetrisignaler i formen av akustiske vibrasjoner i rørvæggen til borestrengen 108. En akustisk telemetrimottakermatrise 130 kan være koplet til røret under toppdrivet 110 for ³ ta imot sendte telemetrisignaler. En eller flere gjentakermøduler 132 kan være valgfritt anordnet langs borestrengen for ³ ta imot og sende om igjen telemetrisignalene.

Et elektromagnetisk resistivitetsloggeverktøy 126 er integrert i bunnhullsammensetningen når borekronen 114. Når borekronen strekker borehullet gjennom formasjonen vil loggeverktøy 126 samle inn målinger relatert til forskjellige formasjonsegenskaper ³

5 vel som verktrøyorientering og posisjon og forskjellige andre borebetingelser. Logge-
 verktrøyet 126 kan ha formen av en borekrage, dvs. et tykkvegget rør som gir vekt og
 stivhet for ³ hjelpe i boreprosessen. En telemetrisub 128 kan inkludere ³ overføre verk-
 trøym³linger til en overflatemottaker 130 og til ³ ta imot kommandoer fra overflate-
 mottakeren. I noen alternative utførelser vil telemetrisub'en 128 samle inn og lagre
 verktrøym³linger for senere gjenvinning n³r verktrøyet blir brakt tilbake til overflaten.

10 Orienteringsm³lingene kan bli utført ved ³ bruke en asimutisk orienteringsindikator,
 som kan inkludere magnetometre, inkinometre og/eller akselerometre, selv om andre
 sensortyper slik som gyroskoper ogs³ kan bli brukt. Foretrukket inkluderer verktrøyet et
 3-akset fluksportmagnetometer og et 3-akset akselerometer. Som vist i teknikkens stand
 vil kombinasjonen av disse to sensorsystemene muliggjøre m³lingen av verktrøyside-
 vinkelen, borehullinklinasjonsvinkel og borehullasimutvinkel. I noen utførelser vil
 verktrøysiden og hullets inklinasjonsvinkel v³re beregnet fra akselerometersensor-
 15 utgangen. Magnetometersensorutgangene blir brukt til ³ beregne hullets asimut. Med
 verktrøysiden vil hullinkinasjonen og hullasimutiinformasjonen, forskjellige resistivitets-
 loggeverktrøy fremlagt her kunne bli brukt til ³ styre borekronen til det ønskede leiet.
 Spesifikt vil en asimutreaksjonsforskjell i reaksjonsforholdet kunne bli brukt effektivt til
³ komme inn i en ønsket lastzone eller ³ v³re innenfor en lastzone av interesse.

20 P³ forskjellige tidspunkter under boreprosessen vil borestrengen 108 bli fjernet fra
 borehullet, som vist i figur 2. Med en gang borestrengen er blitt fjernet vil loggeopera-
 sjoner kunne bli utført ved ³ bruke et kabellinjeloggeverktrøy 134, dvs. en fjlerinstru-
 mentsonde opphengt i en kabel 142 som har ledere for ³ sende effekt til verktrøyet og
 25 telemetri fra verktrøyet til overflaten. En resistivitetsavbildningsdel av loggeverktrøyet
 134 kan ha sentraliserte armer 136 som sentrerer verktrøyet innenfor borehullet n³r
 verktrøyet blir trukket oppover. En loggefasilitet 144 samler inn m³linger fra logge-
 verktrøyet 134, og inkluderer beregningsfasiliteter for ³ prosessere og ³ lagre m³lingene
 samlet av loggeverktrøyet.

30 Figurer 1 og 2 viser formasjoner 118 som ikke er normale p³ borehullet, en situasjon
 som kan opptre naturlig eller kan opptre p³ grunn av retningsboreoperasjoner. N³r det
 m³les formasjonsresistivitet og orientering er det hensiktsmessig ³ bruke formasjons-
 koordinatsystemet, som vist i figur 3. Figur 3 viser en del av sediment³rformasjonsleie
 35 der z-aksen er orientert normalt p³ planet til formasjonen i retningen av sediment³r-
 opphopningen. Som tidligere nevnt vil formasjonsresistivitetene, n³r m³lt langs denne

aksen, ofte vil være forskjellig fra formasjonsresistiviteten ρ i x-y planet. I et hellende leie vil x-aksen være valgt ρ orientert i retningen til den dypeste hellingen, dvs. nedoverbakke.

- 5 Relasjonen mellom formasjonskoordinatsystemet og borehullkoordinatsystemet er vist i figur 4. z-aksen til borehullkoordinatsystemet er opplinjert med borehullets lange akse, og x-aksen til borekoordinatsystemet er rettet mot nordsiden (eller alternativt den høye siden) av hullet. Som vist i figur 4 vil de to koordinatsystemene være relatert via to rotasjoner. Begynnende med formasjonskoordinatsystemet (x, y, z) til en første rotasjon av vinkel b bli gjort omkring z-aksen. Det resulterende koordinatsystemet er benevnt (x', y', z') . Vinkel b er den relative anslagsvinkelen, som indikerer retningen til formasjonshellingen relativ til borehullets koordinatsystem. En andre rotasjon av vinkel q blir ρ gjort omkring y' -aksen. Dette opplinjerer formasjonskoordinatsystemet med borehullkoordinatsystemet. Vinkel q er den relative inklinasjonsvinkelen, som er hellingsvinkelen til leiene relativ til den lange aksen i borehullet.

- Den vertikale resistiviteten er generelt funnet ρ resistiviteten som ρ normalt ρ planet til formasjonen, og den horisontale resistiviteten er resistiviteten som ρ innenfor planet til formasjonen. Bestemmelse av hver av disse parameterne (inklinasjonsvinkel, anslagsvinkel, vertikal resistivitet og horisontal resistivitet) er vanskelig. Følgelig, fremlagt her, er en forbedret nedhullsfremgangsmåte og apparat for samtidig ρ bestemme horisontal resistivitet, vertikal resistivitet og relativ inklinasjonsvinkel for anisotropiske bakkeformasjoner. Noen systemutførelser anvender et elektromagnetisk loggeverktøy som har en antennekonfigurasjon hvor en senderantenne og en mottakerantenne er orientert i ikke-parallele plan slik at den vertikale resistiviteten og den relative inklinasjonsvinkelen er frakoplet. Foretrukket vil verken senderen eller mottakeren være montert i en konvensjonell orientering i et første plan som er normalt ρ verktøyaksen, og den andre antennen er montert i et andre plan som ikke er parallell med det første planet. Den fremlagte utførelsen er passende for LWD-anvendelser, og er også ρ anvendbar ρ kabellinje og muligens andre anvendelser.

- Også fremlagt her er forbedrede nedhullsfremgangsmåte og apparater for ρ styre et nedhullsverktøy under retningsstyringsoperasjonen for ρ beholde borehullet innenfor en ønsket geologisk formasjon ved ρ anordne en forhåndsindikasjon av resistiviteten for et gitt leie før innføring i dette leiet. I noen utførelser vil denne styringsegenskapen bli oppnådd ved ρ gi sender- og mottakerantenner som er montert i ikke-parallele plan og ρ

beregne asimetrisk forskjell eller forholdet mellom fasebaserte eller amplitudebaserte reaksjoner til mottakerantennene. Med en slik antenneanordning vil det asimetriske forholdet eller forskjellen til reaksjonene indikere om resistiviteten i et nærliggende leie er høyere eller lavere enn resistiviteten til leiet man er i. Med slik informasjon kan boreoperatøren styre boreapparatet for å beholde borehullet i et ønsket geologisk leie.

Figur 5 viser et koordinatsystem for å spesifisere orienteringen av en sløyfeantenne. Verktøykoordinatsystemet (x, y, z) har en z-akse orientert parallell med den lange akse til loggeverktøyet. x-aksen er rettet mot verktøysidens risselinje, som er brukt til å spesifisere verktøyorientering. I verktøykoordinatsystemet vil orienteringen av sløyfeantennen være representert av en normal vektor N som er normal på planet til sløyfeantennens vinninger. Hellingsvinkelen til antennen er vinkelen θ mellom z-aksen og normalvektoren N . Den asimetriske orienteringen α av sløyfeantennen er vinkelen α mellom x-aksen og projeksjonen av normalvektoren N i x-y planet.

Figur 6 viser et illustrerende loggeverktøy 10 som har N koaksiale senderantenner $T_1, T_2, T_3, \dots, T_N$ i avstand langs lengden av loggeverktøyet. Det illustrerende loggeverktøyet 10 har også to hellende mottakerantenner R_1 og R_2 som er aksielt i avstand fra hverandre fra senderantennene og fra hverandre. Foretrukket vil senderen og mottakerantennene være montert i fordypninger i verktøyet 10 og være beskyttet av ikke-ledende materiale eller et materiale med ikke-ledende egenskaper. I noen verktøyutførelser konstruert for å virke på mer enn én frekvens, for eksempel $f_1=2$ MHz og $f_2=1$ MHz, vil hver mottakerantenne inkludere et par av spoler, der en spole er innstilt på f_1 og 1 spole er innstilt på f_2 . I slike utførelser vil spolene i hvert par kunne være plassert side-ved-side rundt periferien av verktøyet 10 eller kan være konsentrisk stablet. Senderen og mottakerantennene kan være fremstilt i henhold til figuren i US patent nr. 4,940,943. Det bør være forstått at legemet til verktøyet 10 er foretrukket laget av stål for å forhindre verktøyet 10 fra å bli en svak link i borestrengen 14.

Et bør være forstått at loggeverktøyet 10 også har passende elektronisk krets for å prosessere signalene mottatt av mottakerantennene som fremlagt videre nedenfor, som dermed kvarterer de mottatte signalene til en logg eller annen indikasjon av formasjonsresistivitet. Det bør også være forstått at de prosesserte signalene kan bli tatt opp innenfor den elektroniske seksjonen av verktøyet 10 eller kan bli fremført til overflaten via et telemetrisystem for samtidig prosessering og utlesning på overflaten.

Avstanden mellom spolene brukt for R_1 og R_2 er foretrukket seks tommer (15,2 cm) langs den langsgående akselen til verktøyet 10, men andre mottakeravstander kan også bli brukt. Avstanden mellom mottakerpar og påfølgende sendere i avstand vil variere i noen anvendelser, som diskutert heretter i større detalj. En foretrukket konfigurasjon inneholder en avstand mellom T_1 og R_1/R_2 på 12 tommer (30,5 cm) / 18 tommer (45,7 cm), en avstand mellom T_2 og R_1/R_2 på 24 tommer (61,0 cm) / 30 tommer (76,2 cm), og en avstand mellom T_3 og R_1/R_2 på 36 tommer (91,4 cm) / 42 tommer (106,7 cm). I den foregående setningen betyr det videre først uttrykket "12 tommer (30,5 cm) / 18 tommer (45,7 cm)", for eksempel, indikerer at avstanden mellom T_1 og R_1 er 12 tommer (30,5 cm) og at avstanden mellom T_1 og R_2 er 18 tommer (45,7 cm), basert på R_1 og R_2 som er seks tommer (15,2 cm) fra hverandre. Slik avstandskonfigurasjon er noen ganger referert til her ved å bruke et forkortet uttrykk på for eksempel "12/18".

Fremdeles med referanse til det illustrerte loggeverktøyet i figur 6 er forsterkere $A_1, A_2, A_3, \dots, A_N$ koplet til senderspolene $T_1, T_2, T_3, \dots, T_N$, respektivt. Hver av forsterkerne på sin side er drevet av en oscillator $F_1, F_2, F_3, \dots, F_N$. De operative frekvensene til oscillatorne er foretrukket mellom omkring 0,5 MHz opp til omkring 4 MHz. På grunn av effekt-demping på større dybder som undersøkes vil det i slike tilfeller være en lengre avstand mellom senderne der frekvensene foretrukket er i overensstemmelse med relasjonen $F_1 \propto \sqrt{d_1}, F_2 \propto \sqrt{d_2}, F_3 \propto \sqrt{d_3}, \dots, F_N \propto \sqrt{d_N}$. Oscillatorne $F_1, F_2, F_3, \dots, F_N$ er kontrollert av en igangsetterkrets 30 for en sender med grensesnitt til en mikroprosessor 32, som på sin side har grensesnitt med en kommunikasjonsgrensesnittkrets 34 og en analog-til-digital (A/D) konverterer 36. Kommunikasjonsgrensesnittkretsen 34 muliggjør kommunikasjon mellom mikroprosessoren 32 og en verktøykontroller, integrert hukommelse, en telemetrienheter og/eller en ekstern port for å kommunisere med operatører eller datamaskiner med en gang verktøyet er blitt fjernet fra borchullet.

Mottakerantennene R_1 og R_2 er respektivt koplet til forsterkere 40 og 42, som er koplet, respektivt, til blanderkretser 44 og 46. oscillatorer $F_1, F_2, F_3, \dots, F_N$ er koplet til en oscillatorvelgerkrets 48, utgangen til denne er koplet til inngangen av blanderkretsene 44 og 46. Oscillatorvelgerkrets 48 har grensesnitt til mikroprosessor 32 for å bestemme hvilken oscillator som blir koplet til blanderkretsene.

De respektive utgangene fra blanderkretsene 44 og 46 driver lavpassfiltre 50 og 52, respektivt, utgangene av disse driver amplitudemålekretser 54 og 56, respektivt. Utgangene av amplitudemålekretser 54 og 56 er koplet til en multiplerkrets 60.

Utgangene fra lavpassfilterkretsene 50 og 52 er også koplet til inngangene til en relativ fasemålerkrets 62, utgangen av denne er matet inn i multiplekser 60. Under kontroll av mikroprosessen 32 sender multiplekser 60 videre en valgt en av sine innganger til A/D-konvertereren 36 for sampling og konvertering til en digital verdi som mikroprosessen 32 kan lagre og prosessere. Mikroprosessen 32 samler videre verktyriorienteringsmålinger fra orienteringssensorer 70, og bestemmer en verktyriorientering som er assosiert med hver resistivitetsmåling utledet fra de samlede mottakersignalene.

Under operasjon av innretningen og krets illustrert i figur 6 blir det videre forstått at det er vanskelig å prosessere mellomliggende frekvenssignaler heller enn de nominelle signalene mottatt av mottakerpar R_1 og R_2 . Følgelig vil oscillatorene F_1 , F_2 , F_3 og F_N være konstruert til å gi frekvenser som er svært nær de tilsvarende frekvensene F_1 , F_2 , F_3 og F_N . For eksempel, F_N kan være satt til å være en frekvens på 1.998 MHz og dermed gi en mellomliggende frekvens som kommer ut av blandekretsen 44 og 46 på 0.002 MHz (2 KHz). På tilsvarende måte kan F_2 og F_3 være satt på 1.998 MHz og 0.998 MHz, respektivt. Dermed vil bare signalene som går gjennom lavpassfiltrene 50 og 52 være de mellomliggende frekvensene som er oppnådd ved å blande frekvensene til F_1 , F_2 , F_3 og F_N med frekvensene F_1 , F_2 , F_3 og F_N , respektivt. Det blir videre forstått at amplitudemålingskretsen 54 gir en måling av amplituden til signalet mottatt av mottakerantenne R_1 , mens amplitudemålingskrets 56 måler amplituden til innkomne signaler mottatt av mottakerantenne R_2 . Tilsvarende vil relativ fasemålerkrets 62 gi en indikasjon om faseforskjellen mellom signalene mottatt i mottakerantenne R_1 og signalene mottatt i mottakerantenne R_2 . Amplitudemålingene (A) og fasemålingene (F) (alternativt, amplitudeforholdet og faseforskjellsmålinger) indikerer hver formasjonsresistivitet.

Det blir videre forstått at frekvensene F_1 , F_2 , F_3 og F_N alle kan være den samme frekvensen selv om noen utførelser anvender forskjellige frekvenser som tar hensyn til rikt effektuttap i formasjonen for større sender-mottakerantenneavstander. Foretrukket vil de individuelle senderantennene avfyres i sekvens, selv om det i noen alternative utførelser er mulig at senderantennene virker samtidig. Imidlertid, en fagmann vil forstå at samtidig sending av alle sendersignalene vanligvis vil kreve tilleggsfiltre og prosesseringskrets for å muliggjøre at instrumentet korrekt skal skille mellom de forskjellige frekvensene.

I tillegg til antennekonfigurasjonen i figur 6 illustrerer figurene 7A-7N et utall av forståtte sender/mottakerantennekonfigurasjoner, som hver har azimuthisk sensitivitet på

grunn av en skr³stilt senderantenne, en skr³stilt mottakerantenne, eller begge. Figur 7A viser verktr^yet som har en koaksial senderantenne T₁ og en skr³stilt mottakerantenne R₁. Figur 7B sier et verktr^y som har en skr³stilt senderantenne T₁ og en koaksial mottakerantenne R₁. Imidlertid, antennekonfigurasjonen inkluderer ikke n^odvendigvis en koaksial antenne. Figur 7C vier et verktr^y som har en senderantenne T₁ skr³stilt i en vinkel φ_1 og en mottakerantenne R₁ skr³stilt p³ en vinkel φ_{R1} .

Mens antennekonfigurasjonene i figurer 7A-7C gir hensiktsmessige resistivitetsm³linger, vil slike m³linger generelt lide av asymmetriske reaksjoner i leiegrensene, som ofte g^onr resistivitetsloggene un^odvendig vanskelige³ tolke. For³ adressere dette sp^orsm³l kan symmetriske antennekonfigurasjoner bli anvendt. Figur 7D viser et verktr^y som har en skr³stilt mottakerantenne R₁ posisjonert midtveis mellom to koaksialsenderantenner T₁, T₂. Figur 7E viser et verktr^y som har en koaksial mottakerantenne R₁ posisjonert midtveis mellom to skr³stilte senderantenner T₁, T₂. De skr³stilte senderantennene i figur 7E er parallelle, men dette er valgfritt, som vist i senderantennene i figur 7F, som er skr³stilt i motsatte asimutriske vinkler. Som f^onr vil antennekonfigurasjonen ikke n^odvendigvis inkludere en koaksial antenne. Figur 7G vier et verktr^y som har en f^orste senderantenne T₁ skr³stilt p³ en vinkel φ_1 , en andre senderantenne T₂ skr³stilt p³ en vinkel φ_2 , og en mottakerantenne R₁ skr³stilt p³ en vinkel φ_{R1} .

Antennekonfigurasjonene i figurer 7A-7G er passende for³ g^onrre absolutte (ikke-differensielle) attenuasjons- og faseskiftsm³linger. Mens slike m³linger er hensiktsmessige beh^over de ikke³ ha tilstrekkelig romlig oppl^osning. For³ adressere dette sp^orsm³let kan forskjellige antennekonfigurasjoner bli anvendt. Figur 7H viser et verktr^y som har en koaksial senderantenne T₁ og et par av skr³stilte mottakerantenner R₁ og R₂. Figur 7I vier et verktr^y so har en skr³stilt senderantenne T₁ og et par av koaksialmottakerantenner R₁ og R₂. Denne antennekonfigurasjonen inkluderer ikke n^odvendigvis en koaksial antenne, og paret av mottakerantenner er ikke n^odvendigvis parallelle. Figur 7J viser et verktr^y som har en senderantenne T₁ skr³stilt p³ en vinkel φ_1 , en f^orste mottakerantenne R₁ skr³stilt p³ en vinkel φ_{R1} , og en andre mottakerantenne R₂ skr³stilt p³ en vinkel φ_{R2} .

Selv om det ikke er passende for³ gi en forbedret romlig oppl^osning viser figur 7K en antennekonfigurasjon som har et par av samplasserte mottakerantenner R₁ og R₂, som er skr³stilt i forskjellige asimutriske retninger. Denne antennekonfigurasjonen kan v^onrre s^orlig hensiktsmessig for³ utlede et retningsstyrresignal.

Ved ³ kombinere symmetriske og differensielle antennekonfigurasjonskonstruksjoner er det mulig ³ skape antennekonstruksjoner som gir kompenserte m³linger, dvs. m³linger som er beskyttet mot feil som skyldes temperaturindusert drift i de elektroniske krets-

5 komponentene. Figur 7L viser et verktrøy som har et par av skr³stilte mottakerantenner R₁ og R₂ som har et midtpunkt sentrert mellom to koaksialsenderantenner T₁ og T₂. Figur 7M viser et verktrøy som hare t par av koaksialmottakerantenner R₁ og R₂, som har et midtpunkt sentrert mellom to skr³stilte senderantenner T₁ og T₂. Legg merke til at de skr³stilte antenne kan vNre parallelle, men det er ikke nrdvendigvis at de er det. Videre,

10 i hver av de foreg³ende antennekonfigurasjonene kan sender- og mottakerrollene bli byttet om i henhold til prinsippet om resiprositet. Figur 7N, for eksempel, viser et par av koaksialsenderantenner T₁ og T₂, som har et midtpunkt sentrert mellom to skr³stilte mottakerantenner R₁ og R₂. Videre vil hver av de foreg³ende antennekonfigurasjonene kunne ha tilleggssender- og mottakerantenner som kan vNre tilstede for ³ muligjgjnre

15 m³linger p³ tilleggssender-mottakerantenneavstander.

Figur 8 illustrerer amplitude- og fase m³lingene som kan bli gjort av et kompensert resistivitetsloggeverktrøy 802. Som reaksjon p³ et signal fra en senderantenne 808 m³ler mottakerantenner 810 og 812 signaler som har en attenuasjon A₁ og A₂, respektivt, og som har faseskift F₁ og F₂, respektivt. Fra at disse m³lingene vil en fjrste differensiell

20 attenuasjon (logA₂-logA₁) og en differensiell fase (F₂-F₁) kunne bli bestemt. Tilsvarende, som reaksjon p³ et signal fra senderantenne 814 m³ler mottakerantenner 810 og 812 signaler som har en attenuasjon A₄ og A₃, respektivt, og som har faseskift F₄ og F₃, respektivt. Fra disse m³lingene kan en andre differensiell attenuasjon (logA₄-logA₃)

25 og andre differensielle fase (F₄-F₃) kunne bli bestemt. Den fjrste og andre differensielle attenuasjonsm³lingen kan s³ bli laget gjennomsnitt av (slik som den fjrste og andre differensielle fase m³lingen) for ³ oppn³ en kompensert m³ling, dvs. en m³ling der faste forspenninger i elektronikken er kansellert ut.

30 Figur 9 viser en illustrerende relasjon mellom attenuasjon og isotropisk formasjonsresistivitet for et skr³stilt antenneresistivitetsloggeverktrøy. Figur 10 vier en refererende relasjon mellom fastskift og isotropisk formasjonsresistivitet for en skr³stilt antenne resistivitetsloggeverktrøy. Slike relasjoner er kjent i teknikkens stand og vil bli anvendt i beskrivelsen nedenfor.

35

- For ³ muliggjøre samtidig m³ling av resistivitet, anisotropi og inklinasjon vil det fremlagte loggeverktøyet og fremgangsm³ter anvende en eller flere skr³stilte antenner for ³ oppn³ asimutisk-sensitive resistivitetsm³linger. Omkretsen til verktøyet (eller borehull) er delt inn i asimutiske binger som vist i figur 11, og n³r verktøyet roterer og verktøyets siderisslinje g³r gjennom hver asimutisk bing vil et sett med resistivitetsm³linger bli gjort innenfor hver bingep³ en gitt posisjon i borehullet. I forskjellige forst³tte utførelser vil antallet av binger v³re i omr³det fra s³ lavt som 6 eller 8 binger og s³ høyt som 16 eller 32 binger. Avhengig av den relative rotasjon og aksielle traverseringsrater vil flere m³lingssett kunne bli oppn³dd innenfor hver bing og bli kombinert (dvs. ved ³ lage gjennomsnitt). Sett med resistivitetsm³linger kan v³re absolutt fase og/eller attenuasjonsm³linger, eller differensielle fase- og/eller attenuasjonsm³linger. Imidlertid, i det minste i noen utførelser vil resistivitetsm³lingene v³re kompenserte attenuasjonsresistivitet og kompenserte faseresistivitetsm³linger (dvs. bestemt ved ³ bruke relasjoner som de som er i figurer 9-10, og ³ ignorere for tilfellet enhver inklinasjon eller anisotropi i effekt), mens i andre utførelser vil resistivitetsm³linger v³re kompenserte attenuasjonsresistivitetsm³linger (dvs. ved ³ bruke en relasjon som i figur 9). Sett med resistivitetsm³linger kan inkludere m³linger av forskjellige frekvenser og/eller forskjellige sender-mottakeravstander.
- Figur 12 illustrerer asimutisk avhengighet av faseresistivitetsm³linger p³ forskjellige frekvenser i en inklinerende anisotropisk formasjon. Figur 13 illustrerer asimutisk avhengighet av faseresistivitetsm³linger p³ forskjellige sender-mottakeravstander. P³ hver frekvens og avstand vil resistivitetsm³linger v³re tiln³rmet sinusaktiv. Den sinusliknende egenskapen til disse m³lingene er foretrukket utnyttet for ³ pakke de asimutiskavhengige m³lingene inn i et representativt sett av karakteristiske parametere. I noen foretrukne utførelser vil de karakteristiske parameterne v³re (1) en gjennomsnittsverdi, (2) en maks-til-min. forskjellsverdi, og (3) en identifikator av plasseringen av toppen i sinussignalet (dvs. et asimutisk bingetall). Andre sett med representative karakteristiske parametere kan ogs³ bli anvendt. For eksempel, gjennomsnittsverdien kan v³re erstattet med en maksimalverdi, eller en kvadratrot av gjennomsnittlig kvadratisk verdi. Maks-til-min. forskjellsverdien kan v³re erstattet med en maks-til-gjennomsnittlig forskjellsverdi eller med den andre ekstremverdi som, n³r sammenliknet med den f³rste parameteren, indikerer amplituden til den sinusliknende oscillasjonen. Plasseringen av toppen kan v³re erstattet med plasseringen av dalbunnen, eller utelatt helt dersom anslagsvinkelen til formasjonen allerede er kjent. I noen utførelser

kan det vNre tilstrekkelig ³ bestemme et undersett av et representativt sett av sinusparametere for ³ karakterisere et valgt aspekt ved den asimutiske variasjonen.

5 Den pakkede representasjonen av resistivitetsm³linger p³ en gitt dybde i borehullet kan vNre hensiktsmessig for lagring og telemetrikommunikasjoner. Mer viktig, imidlertid, er bruken av disse karakteristiske parameterne i inversjonsprosessen for ³ bestemme vertikal og horisontal resistivitet og formasjonsinklinasjon. N³ r en inversjonsprosess som anvender bare maksimalverdien eller gjennomsnittlig verdi blir det sammenliknet med en inversjonsprosess som anvender en gjennomsnittlig verdi og en maks-til-min. 10 forskjellsverdi, vil en signifikant forbedring i nryaktighet bli observert og de bestemte formasjonskarakteristikkene er mer motstandsdyktige mot m³lestny.

Som et illustrerende eksempel p hvordan inversjonslikningen kan bli utledet betraktes antennekonfigurasjonen i figur 7A. N³ r verktrnyet penetrerer en anisotropisk formasjon p³ en relativ inklinasjonsvinkel q (se figur 4), vil det magnetiske momentet M_T til 15 koaksialsenderantennen kunne bli betraktet som superposisjonen av en horisontal magnetisk dipol (_HMD_), en magnetisk dipol orientert langs formasjonens x-akse) og en vertikal magnetisk dipol (_VMD_, en magnetisk dipol orientert langs formasjonens z-akse), med tilsvarende hroisontale og vertikale komponenter for magnetiske moment- 20 er M_{T_h} og M_{T_v}, respektivt, som er gitt av likningene

$$M_{T_h} = M_T \sin q = I_t A_t \sin q \quad [1]$$

$$M_{T_v} = M_T \cos q = I_t A_t \cos q \quad [2]$$

25

der

I_t = strnymmen i senderspolen,

A_t = tverrsnittsarealet til slenderspolen, og

30

q = den relative inklinasjonsvinkelen (vinkelen mellom verktrnyaksen og normalen til formasjonen).

Som vist av Luling, M.G., _Processing and Modeling 2-MHz Resistivity Tools in Dipping, Laminated, Anisotropic Formations_, SPWLA 35. ³rlige loggesymposium, 35 19.-22. juni 1994, fremstiller HMD magnetiske felt H_{kx} og H_{hz}, og VMD fremstiller magnetiske felt H_{vx} og H_{vz} gitt av fnjlgende likninger:

$$H_{kx} = \frac{M_T \sin q \bar{u} e^{ik_h L}}{4p \frac{a}{i} L^3} \left[3 \sin^2 q - 1 + k_h^2 L^2 \cos^2 q + \frac{ik_h L}{\sin^2 q} + ik_h L - 3ik_h L \sin^2 q \right] \frac{ik_2}{\sin^2 q} e^{ik_h L b} e^{ik_h L} \quad [3]$$

$$5 \quad H_{kz} = \frac{M_T \cos q \bar{u} e^{ik_h L}}{4p \frac{a}{i} L^3} \left[3 \cos q \sin q - k_h^2 L^2 \cos q \sin q - 3ik_h L \cos q \sin q \right] \quad [4]$$

$$H_{vx} = \frac{M_T \sin q \bar{u} e^{ik_h L}}{4p \frac{a}{i} L^3} \left[3 \cos q \sin q - k_h^2 L^2 \cos q \sin q - 3ik_h L \cos q \sin q \right] \quad [5]$$

$$H_{vz} = \frac{M_T \cos q \bar{u} e^{ik_h L}}{4p \frac{a}{i} L^3} \left[3 \cos^2 q - 1 + k_h^2 L^2 \sin^2 q - 3ik_h L \cos^2 q + ik_h L \right] \quad [6]$$

10

hvor

$$k_h = \sqrt{w^2 \frac{\bar{u}}{i} m_e - \frac{is_h}{w}}$$

15

$$k_v = \sqrt{w^2 \frac{\bar{u}}{i} m_e - \frac{is_v}{w}}$$

$$b = \sqrt{\cos^2 q + \frac{\bar{u} k_v}{i k_h}} \sin^2 q$$

- k_h = det komplekse bølgetallet i den horisontale retningen
 20 k_v = det komplekse bølgetallet i den vertikale retningen
 w = vinkelfrekvensen (i radianer/sekunder) for senderspølen = $2\pi f$
 f = frekvensen til senderspølen (i Hertz)
 i = den magnetiske permeabiliteten til formasjonen (antar $i = i_{air}$)
 s_h = den horisontale ledningsevnen til formasjoenn
 25 s_v = den vertikale ledningsevnen til formasjonen
 e_h = den horisontale dielektriske konstanten (antatt)
 e_v = den vertikale dielektriske konstanten (antatt)
 L = avstanden mellom senderspølen og mottakerspølen, og
 $i = \sqrt{-1}$

I mottakerantennen vil H_z -feltet (feltet langs z-aksen til verktrøyet) vNre gitt av likningen

$$5 \quad H_z = (H_{hx} + H_{vx}) \sin q + (H_{vz} + H_{hz}) \cos q \quad [7a]$$

og H_x feltet (feltet normalt p³ z-aksen til verktrøyet og i x-z planet til formasjonskoordinatsystemet) er gitt av likningen

$$10 \quad H_x = (H_{hx} + H_{vx}) \cos q - (H_{vz} + H_{hz}) \sin q \quad [7b]$$

For en mottakerantenne som er skr³ stilt p³ en vinkel α og har en asimutvinkel p³ a (se figur 5), vil spenningen indusert i en mottakersløyfe vNre

$$15 \quad V = i \omega_r n (H_z \cos \alpha_R + H_x \sin \alpha_R \cos a + H_y \sin \alpha_R \sin a) \quad [8]$$

hvor A_r er tverrsnittsseksjonsareal til mottakerspolen. Fra de foreg³ ende likningene kan det bli vist at n³ r senderen og mottakerantennen er parallelle vil den induserte mottaker-spenningen vNre

$$20 \quad V = \frac{i \omega A_r n I_t A_t}{4 \rho L^3} ([2 - ik_h L] e^{ik_h L} - ik_h L e^{ik_h L b}) \quad [9]$$

Likning [9] viser at den induserte spenningen V er avhengig av k_h og b . P³ sin side er k_h avhengig av s_h , og b er avhengig av s_h , s_v og q . Disse relasjonene indikerer at s_v og q er avhengige, og denne avhengigheten forhindrer konvergens av en samtidig lrsning av s_h , s_v og q . For ³ bryte denne avhengigheten og muliggjøre en lrsning for s_h , s_v og q er det rnskelig ³ ha senderantennen og mottakerantennen skr³ stilt p³ forskjellige vinkler. Selv om formuleringen ovenfor er for en koaksial sender med en skr³ stilt mottaker vil teorien om resiprositet gi at de samme resultater ogs³ gjelder for en skr³ stilt sender med en mottaker som ikke er skr³ stilt. Virkelig vil b³ de senderen og mottakeren kunne vNre skr³ stilt gitt at de respektive vinklene for skr³ stilling ikke er den samme, dvs. $\alpha_T \neq \alpha_R$.

De sinusliknende variasjonene i figurer 12-13 er ³ penbare. Figurene 14-16 illustrerer inklinasjonsavhengigheten av sinustoppverdiene for en typisk bakkeformasjon som har

35

en horisontal resistivitet ρ^3 1 ohm-m og en vertikal resistivitet ρ^3 4 ohm-m. Figur 14 viser amplitudeattenuasjonsresistivitet og faseskiftsresistivitet som en funksjon av relativ inklinasjonsvinkel ved ρ^3 bruke et enkelt sender-mottakerpar ρ^3 en enkel sekvens. Figur 15 viser faseskiftsresistivitet som en funksjon av relativ inklinasjonsvinkel ved ρ^3 bruke tre sender-mottakerpar som er i avstand fra hverandre ρ^3 en enkel frekvens. Figur 16 viser faseskiftsresistivitet som en funksjon av relativ inklinasjonsvinkel ved ρ^3 bruke et enkelt sender-mottakerpar ρ^3 tre forskjellige frekvenser.

Figur 17 viser en illustrerende resistivitetsloggeprosess for ρ^3 bestemme horisontal resistivitet, vertikal resistivitet og relativ inklinasjonsvinkel som en funksjon av posisjon langs borehullet. Etter at resistivitetsloggeverktøyet er blitt plassert i et borehull og boring starter med medfølgende rotasjon av loggeverktøyet, begynner loggeprosessen i blokk 1702 med valget av en senderantenne og en senderfrekvens. Når prosessen fortsetter vil valgoperasjonen iterere gjennom hver senderantenne og hver senderfrekvens som er passende for denne senderantennen.

I blokk 1704 vil loggeverktøyet drive den valgte senderantennen ρ^3 den valgte frekvensen, og ρ^3 le mottakerreaksjonene. Loggeverktøyet ρ^3 ler videre verktøyposisjonen og orienteringen som er assosiert med den ρ^3 lte mottakerreaksjonen. I forskjellige utførelser vil mottakerreaksjonene kunne være absolutt faseskift, absolutt attenuasjon, differensielt faseskift og/eller differensiell attenuasjon. I blokk 1706 vil posisjonen og orienteringsinformasjonen bli brukt til ρ^3 assosiere de ρ^3 lte mottakerreaksjoner med en asimutisk bølge. Dersom flere ρ^3 linger er oppnådd for en gitt bølge vil ρ^3 llingene kunne bli kombinert, dvs. ved ρ^3 lage et gjennomsnitt. I blokk 1708 blir en test gjort for ρ^3 bestemme om det er flere ρ^3 linger som blir gjort i denne posisjonen i borehullet (dvs. en test for ρ^3 se om den ρ^3 lte verktøyposisjonen fremdeles er innenfor et forhåndsbestemt område). Dersom det er slik vil blokkene 1702-1708 bli gjentatt.

I den valgfrie blokken 1710 bestemmer loggeverktøyet kompensert fase og/eller attenuasjons ρ^3 linger som tidligere beskrevet med hensyn til figur 8. I blokk 1712 vil loggeverktøyet bestemme et sett med sinusparametere som representerer ρ^3 llingene oppnådd ρ^3 ρ^3 vjrende posisjon i borehullet. Foretrukket vil settet med karakteristiske parametere indikere gjennomsnittet og maks-til-min. forskjellen, og kan også indikere posisjonen til toppen eller dalen for det sinusformede signalet. I noen utførelser vil parameterne bli bestemt fra en parameterisert sinusfunksjon som er tilpasset de ρ^3 lte

data med en minimal kvadratisk feil. De sinusliknende parameterne kan bli kommunisert til overflaten for etterfølgende operasjon som blir utført av overflateberegning-fasiliteter.

- 5 I blokk 1714 vil de karakteristiske parameterne bli invertert for ³ bestemme en eller flere av formasjonsanslagsvinklene, formasjonsinklinasjonsvinkelen, formasjonsresistiviteten (horisontal eller vertikal), og formasjonens anisotropi. De bestemte formasjonsm³lingene blir lagret i formen av en logg, som kan v³re valgfritt fremvist og oppdatert i blokk 1716. I blokk 1718 vil en test bli gjort for ³ bestemme om loggingen
- 10 b³r fortsette (dvs. om boreprosessen skal fortsette), og dersom det er slik vil blokkene 1702-1718 bli gjentatt.

- Inversjonsprosessen kan ta formen av en oppslagstabell basert s³jking med interpolasjon, men er foretrukket utført med en lukket form for forovermodell av verk³nyreaksjonene som er forventet som reaksjon p³ estimater av formasjonens inklinasjon, resistivitet og anisotropi. Begynnende med tilfeldige, eller i noen tilfeller forh³ndsbestemte estimater av formasjonens inklinasjon, resistivitet og anisotropi, vil inversjonsprosessen gjentagende oppdatere disse estimatene helt til de sinusaktige parameterverdiene gitt av forovermodellen er lik de m³lte sinusliknende parameterverdiene som er innenfor en
- 15 20 forh³ndsbestemt terskel. Oppdateringsrutinen kan for eksempel anvende Levenberg-Marquardt fremgangsm³ten diskutert av Tianfei Zhu og Larry D. Brown, „Two-dimensional Velocity Inversion and Synthetic Seismogram Computation“, Geophysics, vol. 52, nr. 1, januar 1987, s. 37-50.

- 25 I noen utførelser vil de m³lte karakteristiske parameterverdiene v³re gjennomsnittet og maks-til-min. forskjellsverdiene til de differensielle faseskiftene m³lt som en funksjon av asimut p³ hver av de tre eller flere senderfrekvensene. I andre utførelser vil de karakteristiske parameterverdiene v³re gjennomsnittet og maks-til-min. forskjellsverdiene for de differensielle attenuasjonene m³lt som en funksjon av asimut p³ tre eller flere
- 30 sender-til-mottakeravstander. I enda andre utførelser vil b³de fase- og attenuasjonsinformasjon bli m³lt og brukt som grunnlag for inversjonen. Andre karakteristiske parameterverdier er mulige og kan bli brukt.

- 35 Det henvises n³ til geostyreaspektet for dette systemet, fig. 18 viser den m³lte faseskift og attenuasjonen p³ ¶n asimutisk orientering i et illustrert resistivitetsloggeverk³ny som

har antennekonfigurasjonen som vist i figur 7A, der det er antatt at et borehull går gjennom et isotropisk 20 fots tykt 10Wm leie som er i en sandwich mellom tykke, isotropiske 1Wm leier med en relativ inklinasjonsvinkel på 60°. Reaksjonene vist er for 2-MHz verktrøy med 24/30 antenneavstander, og en mottakerantenne med skråstilt vinkel på 45°. (Videre stimuleringsdetaljer er tilgjengelige i Bittar, US patent nr. 7.138.803.)

5 Imidlertid vil en fagmann kunne forstå at andre frekvenser og antennekonfigurasjoner kan bli brukt. Det målte faseskift og attenuasjon på den motsatte asimutiske orienteringen til det illustrerte resistivitetsloggeverktrøyet er vist i figur 19. Når forskjellen i reaksjon tatt i motsatt asimutisk retning blir tatt hensyn til vil dette resultere i en

10 differensiell reaksjon lik den som er vist i figur 20. (En tilsvarende reaksjon kan bli funnet ved å trekke fra reaksjonen i én asimutisk retning med gjennomsnittet av reaksjonene i alle asimutiske retninger.)

Det bør legges merke til at verktrøyreaksjonen i en grense mellom isotropisk reaksjon

15 fremviser en sinusaktig reaksjon som er svært lik de som er vist i figurene 12 og 13. Den maksimale verdien til reaksjonen finner sted i den asimutiske retningen mot nærliggende grenser i område med høyere ledningsevne og i den asimutiske retningen bort fra nærliggende grenser med område med lavere ledningsevne. Følgelig vil minimumsverdien til reaksjonen finne sted i den asimutiske retningen bort fra grensene med område med høyere ledningsevne og i den asimutiske retningen mot nærliggende grenser

20 med område med lavere ledningsevne. I begge tilfeller vil retningen av styresignalet være konsistent siden verktrøyet krysser en grense.

I utførelser som pakker asimuteresistivitetsmålingsinformasjon inn i sinusaktige parametre slik som gjennomsnitt, en maks-til-min, forskjell og topporienteringsindikatorer, vil maks-til-min, forskjellen og topporienteringsindikatoren kunne bli brukt som styresignaler. En maks-til-min, forskjell og topporienteringsindikator kan bli anvendt med tilsvarende effekt. I noen alternative utførelser vil et forhold mellom maks-til-min, verdien bli anvendt. Boreoperatøren kan kombinere styresignalinformasjonen med

30 verktrøyposisjon og orienteringsmålinger og kunnskap utledet fra testhull eller seismiske undersøkelser for å formulere retningsstyreslutninger. Styresignalene beskrevet her er forventet å være delvis effektive ved at de muliggjør en boligoperatør effektivt å detektere og komme inn i en lastsoner og å muliggjøre at boreoperatøren kan beholde en borehullkurs som maksimaliserer borehullintervallene i lastsonen.

Selv om de foregående spesifikke detaljene som er beskrevet er foretrukne utførelser av foreliggende oppfinnelse vil en fagmann forstå at brønnboring og logging vil kunne ha forskjellige forandringer som kan bli gjort i detaljene av fremgangsmåten og apparatet i henhold til denne oppfinnelsen uten å avvike fra foreliggende oppfinnelse som definert i

5 det vedlagte krav.

P a t e n t k r a v

1. Loggeverktøy som har en verktøyakse, k a r a k t e r i s e r t v e d at verktøyet innbefatter:
- 5 en første senderantenne (T_1) for ³ sende en elektromagnetisk bølge som har en første frekvens (f_1) inn i en formasjon (118);
 en andre senderantenne (T_2) for ³ sende en elektromagnetisk bølge som har en andre frekvens (f_2) inn i en formasjon (118);
 i det minste n mottakerantenne (R_n) for ³ ta imot en elektromagnetisk bølge fra
- 10 formasjonen (118), hvor i det minste n av sender (T_1, T_2)- og mottakerantennene (R_n) er skr³stilt med hensyn til verktøyaksen;
 en rotasjonsvinkelsensor (70) for ³ bestemme en asimutisk vinkel til loggeverktøyet;
 en prosessor (32) koplet til i det minste den ene mottakerantennen (R_n) og
- 15 rotasjonsvinkelsensoren (70) for ³ samle minst n formasjonsmåling for minst tre asimutiske vinkler ved hver av de første og andre frekvenser (f_1, f_2), og ³ bestemme basert på nevnte målinger minst n sinusaktig parameter som karakteriserer den asimutiske variasjonen av i det nevnte minst n formasjonsmåling ved den første frekvensen (f_1) og minst n tilleggs sinusaktig parameter som karakteriserer den
- 20 asimutiske variasjonen av i det nevnte minste n formasjonsmåling ved den andre frekvensen (f_2).
2. Loggeverktøy i henhold til krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at parameteren indikerer en maks-til-min forskjell for formasjonsmålingen.
- 25
3. Loggeverktøy i henhold til krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at den i det minste ene formasjonsmålingen innbefatter i det minste n av en kompleks-spennings, et amplitudeforhold, en faseforskjell utledet fra den mottatte elektromagnetiske bølgen.
- 30
4. Loggeverktøy i henhold til krav 3, k a r a k t e r i s e r t v e d at formasjonsmålingen er bestemt med referanse til den elektromagnetiske bølgen fra den første eller andre senderantennen (T_1, T_2).

5. Loggeverktøy i henhold til krav 3, k a r a k t e r i s e r t v e d at formasjonsm³ lingen er bestemt med referanse til den elektromagnetiske bølgen mottatt av en andre mottakerantenne (R_2).
- 5 6. Loggeverktøy i henhold til krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at den i det minste ene formasjonsm³ lingen er en resistivitetskomponent i formasjonen (118).
7. Loggeverktøy i henhold til krav 6, k a r a k t e r i s e r t v e d at den i det minste ene formasjonsm³ lingen er vertikal resistivitet.
- 10 8. Loggeverktøy i henhold til krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at prosessoren (32) beregner vertikal og horisontal resistivitet i formasjonen.
- 15 9. Loggeverktøy i henhold til krav 8, k a r a k t e r i s e r t v e d at prosessoren (32) videre beregner en relativ inklinasjon for formasjonen.
10. Loggeverktøy i henhold til krav 1, k a r a k t e r i s e r t v e d at den første eller andre senderantennen (T_1, T_2) er skr³ stilt p³ en første vinkel relativ til verktrøyaksen, mottakerantennen er skr³ stilt p³ en andre vinkel relativ til verktrøyaksen, og en forskjell mellom den første og andre vinkelen er mindre enn 90° .
- 20 11. Loggeverktøy i henhold til krav 1, videre k a r a k t e r i s e r t v e d ³ innbefatte en andre mottakerantenne (R_2) orientert parallelt med den første mottakerantennen (R_1) for ³ ta imot en elektromagnetisk bølge fra formasjonen.
- 25 12. Loggeverktøy i henhold til krav 1, videre k a r a k t e r i s e r t v e d den andre senderantenne er orientert parallelt ved den første senderantennen for ³ sende en elektromagnetisk bølge inn i formasjonen.
- 30 13. Fremgangsm³ te, k a r a k t e r i s e r t v e d ³ innbefatte:
³ sende en første elektromagnetisk bølge med en første frekvens (f_1) fra en første senderantenne (T_1) inn i en formasjon (118);
³ ta imot en elektromagnetisk bølge som har den første frekvensen (f_1) fra
35 formasjonen (118) med en mottakerantenne (R_n), hvor i det minste n av sender- og mottakerantennene er skr³ stilt med hensyn til en verktrøyakse;

- ³ sende en andre elektromagnetisk bølge som har en andre frekvens (f_2) fra en andre senderantenne (T_2) inn i en formasjon, hvor den andre frekvensen (f_2) er forskjellig fra den første frekvensen (f_1);
- ³ ta imot en elektromagnetisk bølge som har den andre frekvensen (f_2) fra formasjonen med en mottakerantenne (R_n);
- 5 ³ gjenta nevnte sending og mottak for ³ samle minst n formasjonsmåling ved hver de første og andre frekvenser (f_1, f_2) for minst tre asimetriske vinkler;
- ³ bestemme en asimetriske variasjon av i i det nevnte minste n formasjonsmåling ved hver av de første og andre frekvenser (f_1, f_2); og
- 10 ³ lagre i det minste n sinusaktig parameter som karakteriserer den asimetriske variasjonen av i i det minste n formasjonsmåling ved den andre frekvensen (f_2).
14. Fremgangsmåte i henhold til krav 13, karakterisert ved at formasjonsmålingen er i det minste n av faseskift, attenuasjon og kompleks spenning utledet fra den mottatte elektromagnetiske bølgen.
15. Fremgangsmåte i henhold til krav 13, videre karakterisert ved ³ innbefatte:
- 20 ³ fremvise en resistivitetslogg basert på i i det minste delvis på i i det minste en av de sinusaktige parametrene.
16. Fremgangsmåte i henhold til krav 15, karakterisert ved at resistivitetsloggen representerer i det minste n av en horisontal resistivitet i formasjonen, en vertikal resistivitet i formasjonen og en anisotropikoeffisient til formasjonen (118).
- 25 17. Fremgangsmåte i henhold til krav 16, videre karakterisert ved ³ innbefatte og bestemme en relativ inklinaisonvinkel for formasjonen basert delvis i det minste på i i det minste en av de sinusaktige parametrene.

1/14

FIG. 1

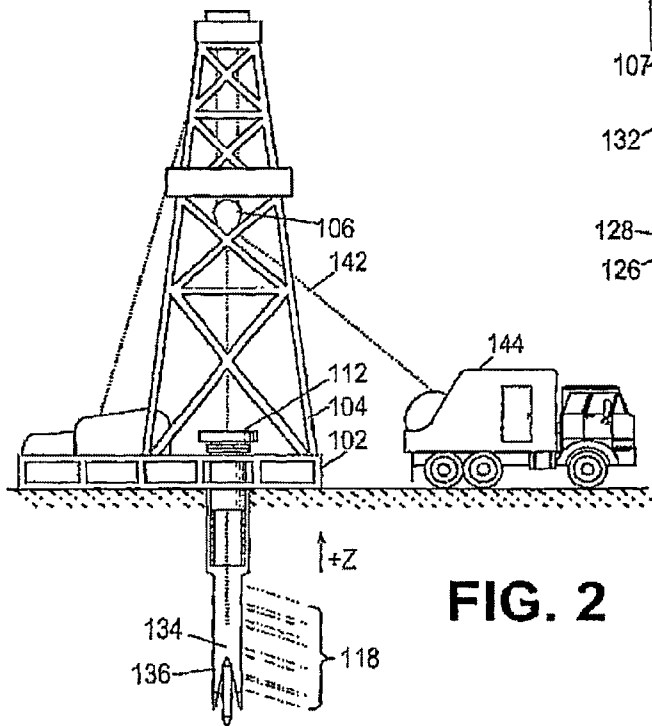
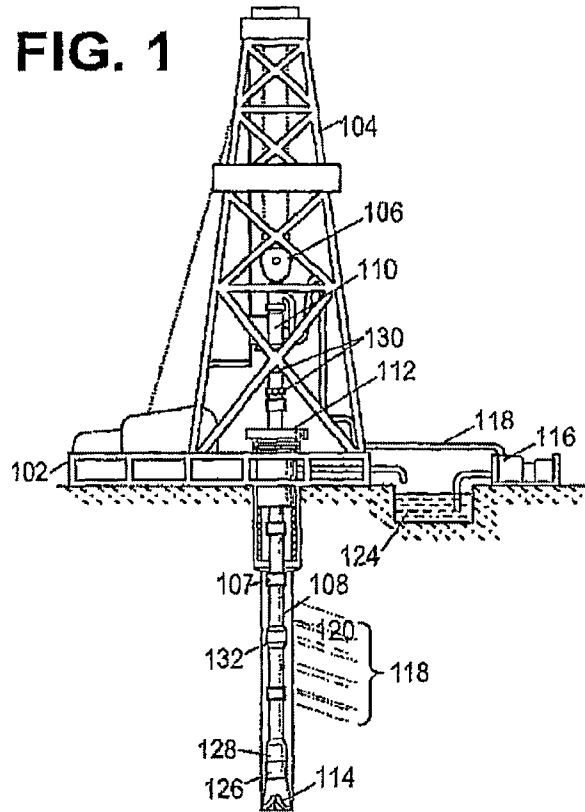
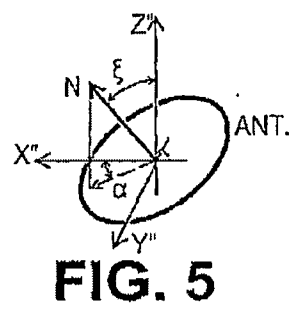
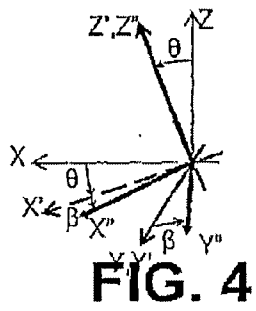
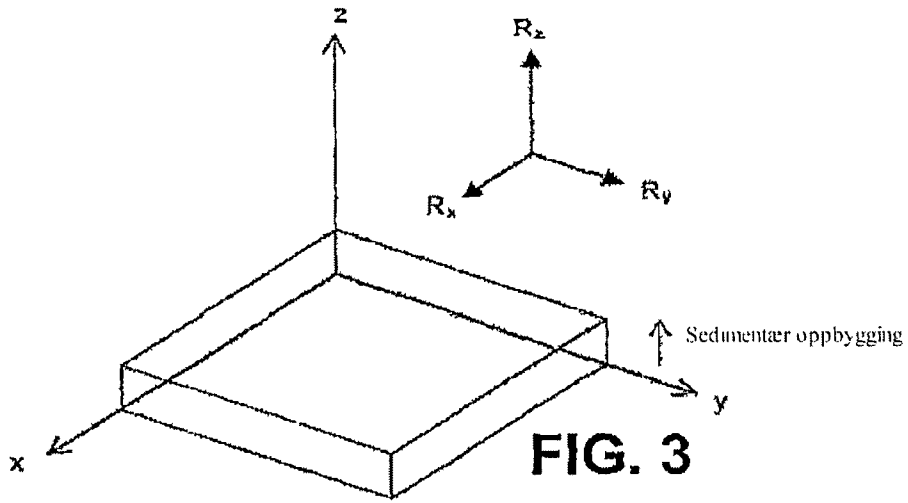
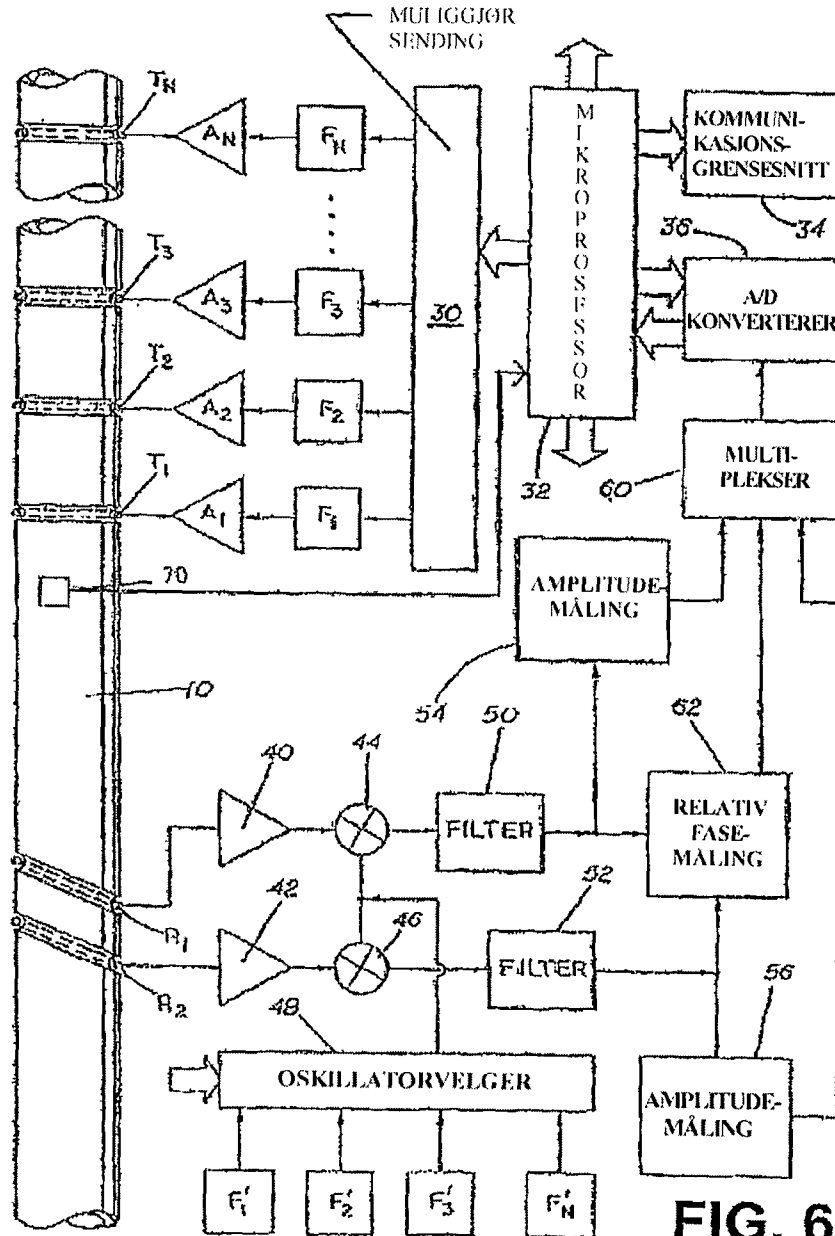


FIG. 2

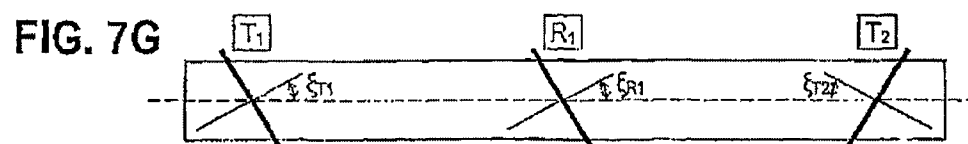
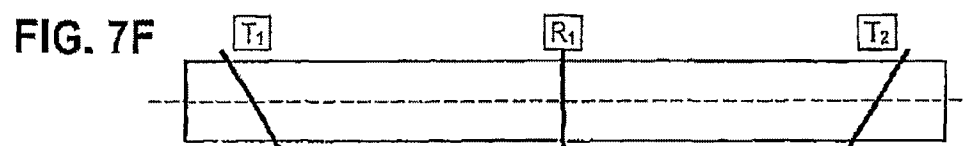
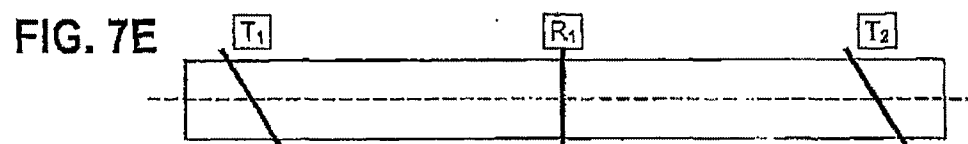
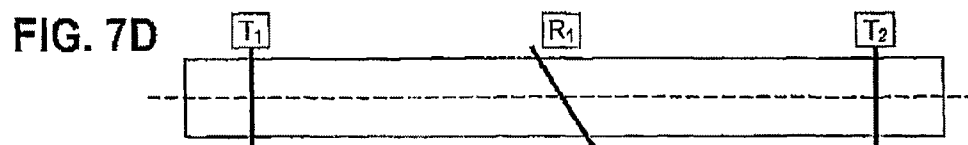
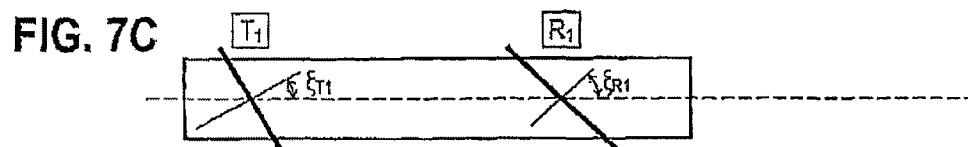
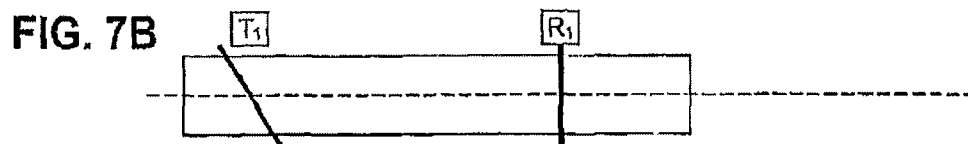
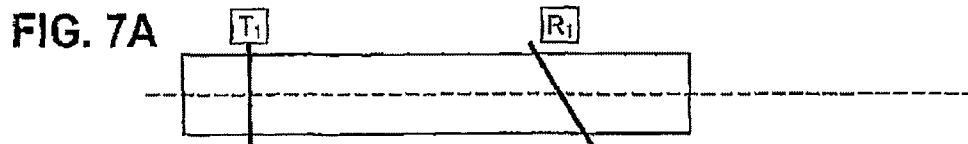
2/14



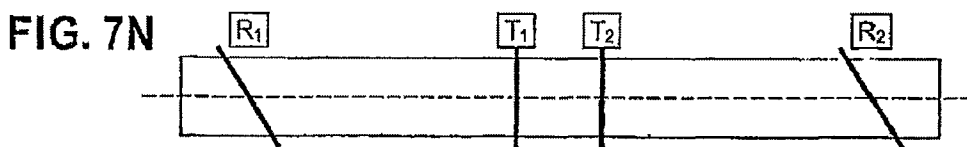
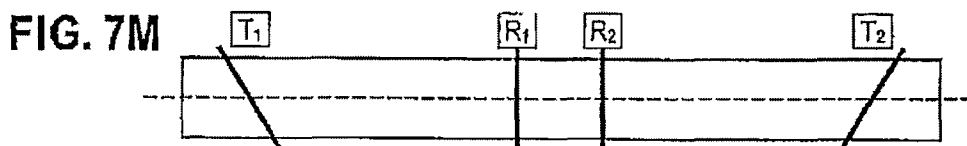
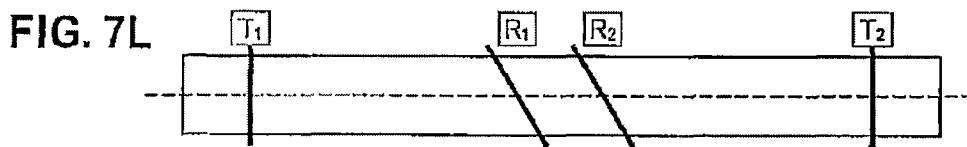
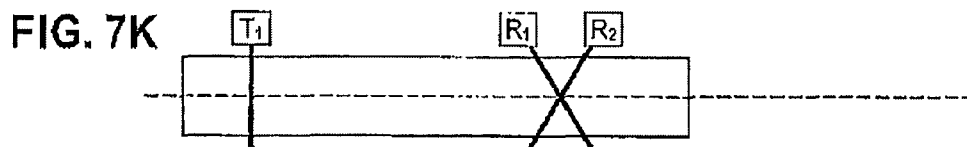
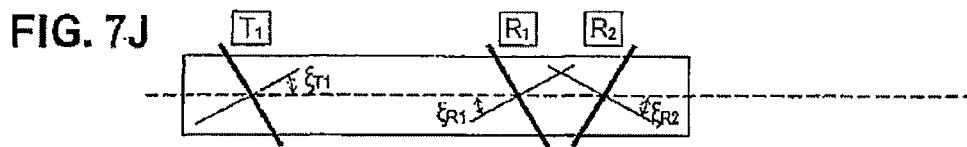
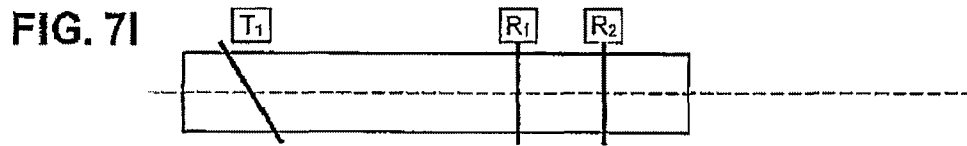
3/14



4/14



5/14



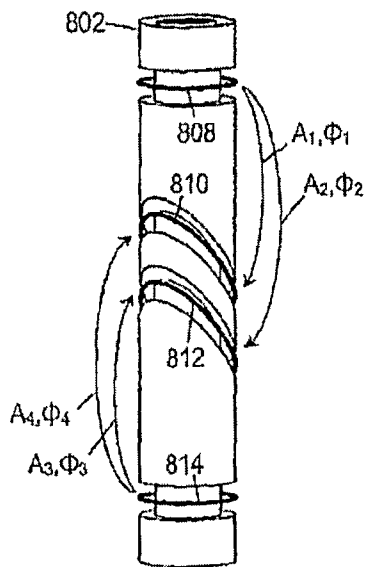


FIG. 8

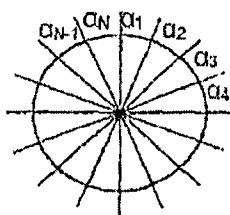
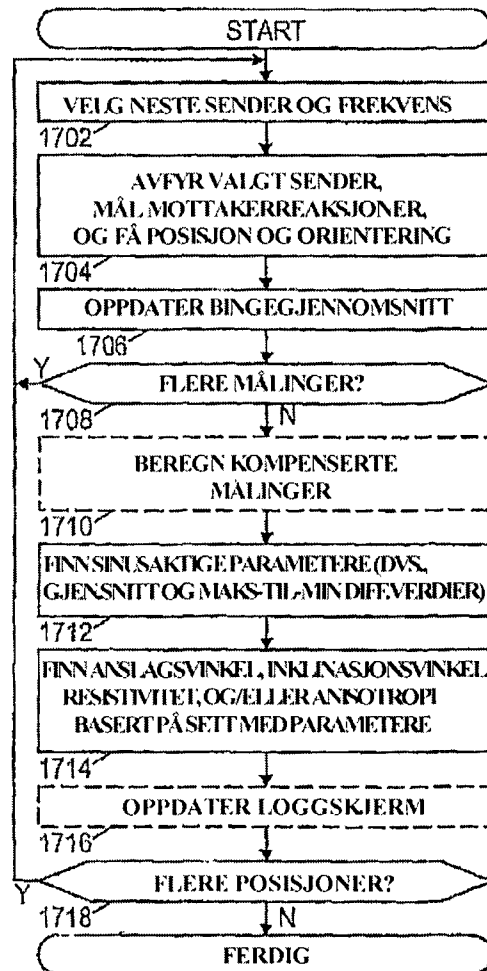
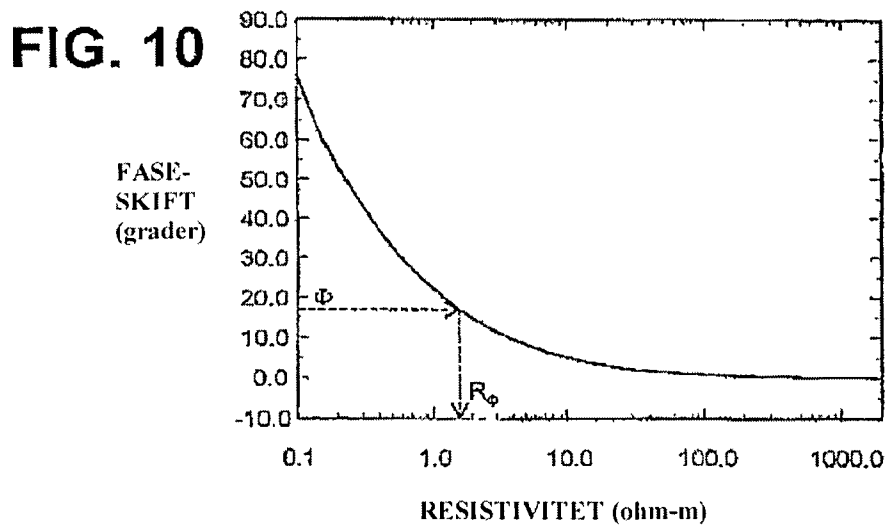
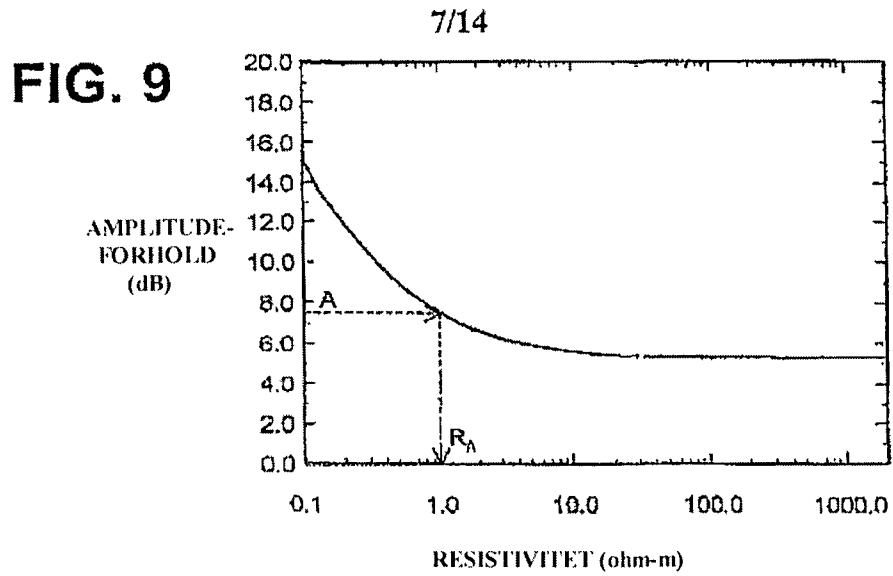


FIG. 11

FIG. 17





8/14

3 FORSKJELLIGE FREKVENSER, SAMME AVSTAND
 ANISOTROPISK FORMASJON; $R_h = 1 \text{ ohm-m}$; $R_v = 4,0 \text{ ohm-m}$

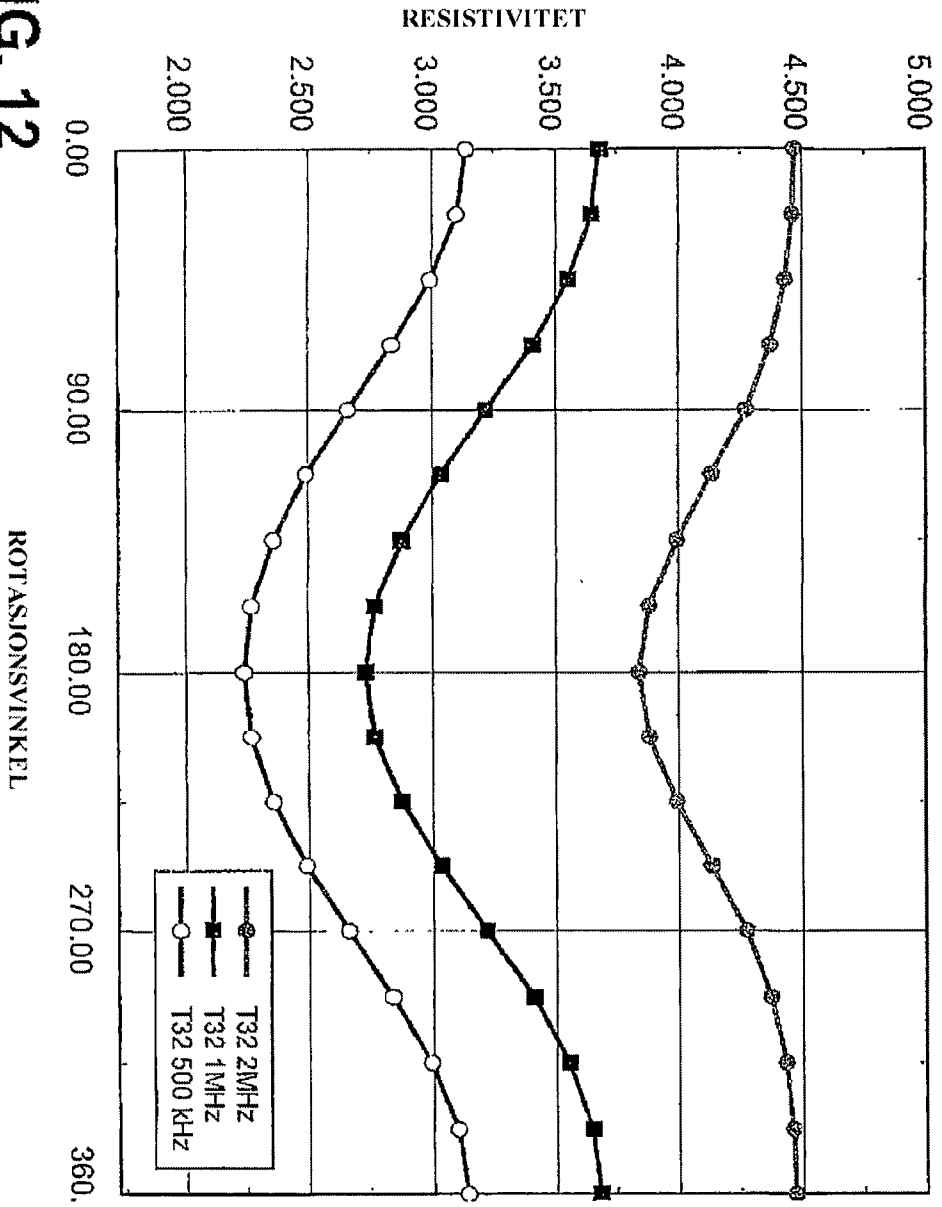


FIG. 12

9/14

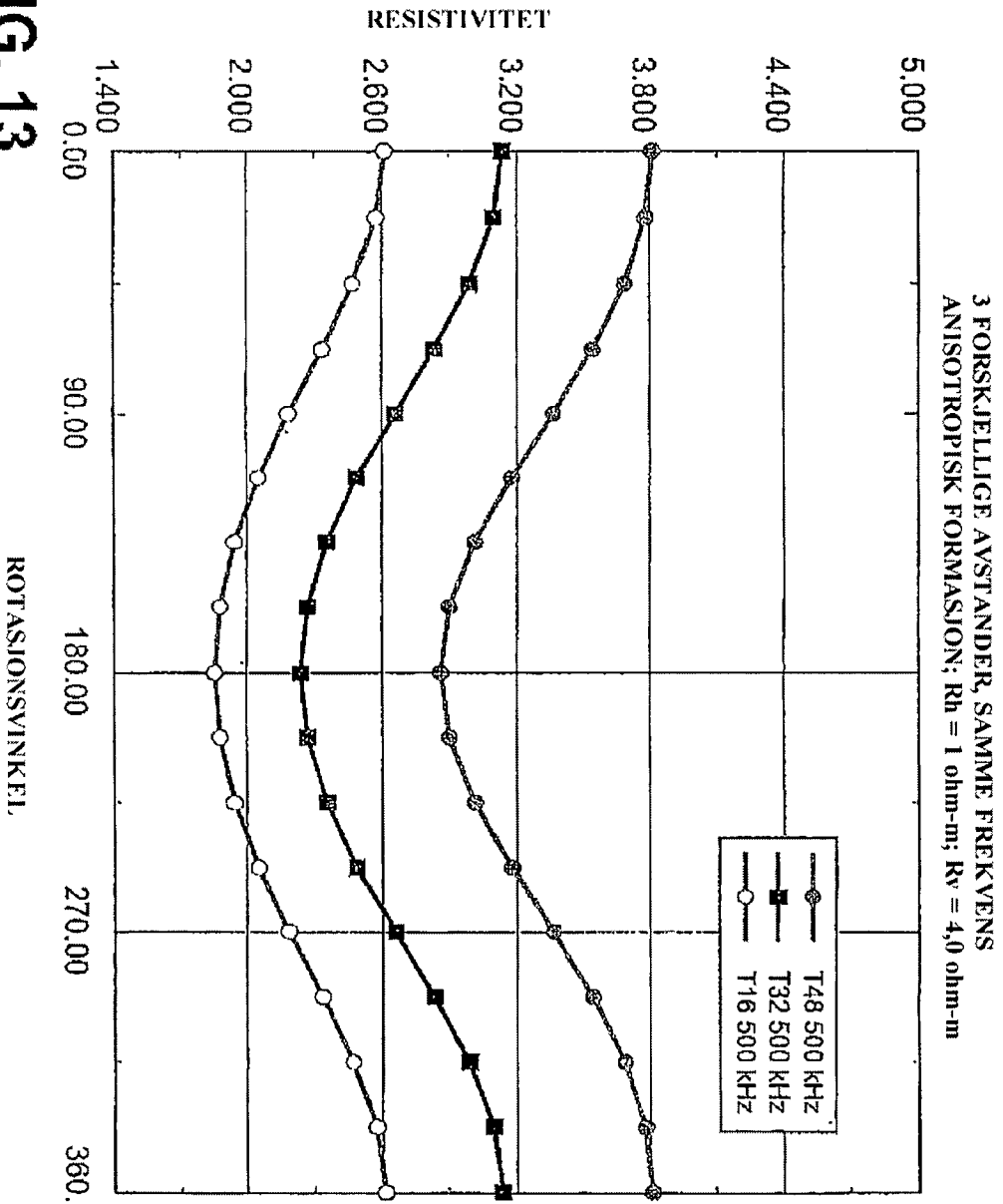


FIG. 13

FIG. 14

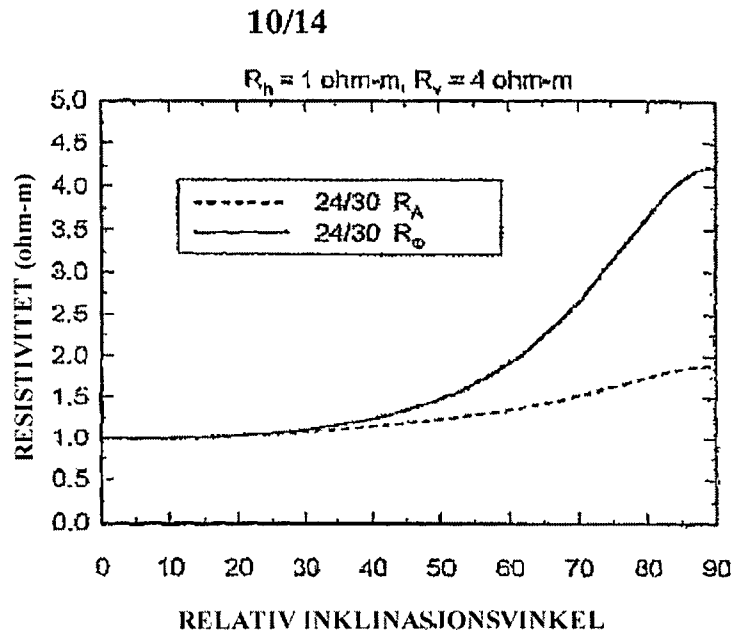
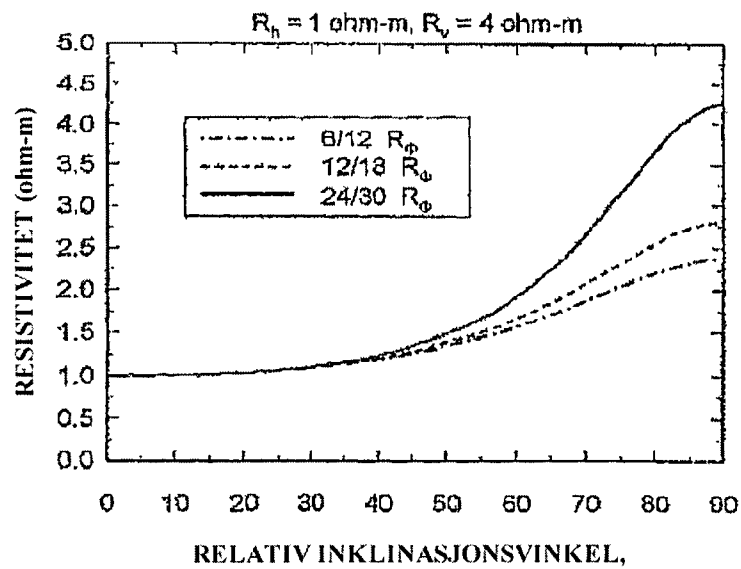


FIG. 15



11/14

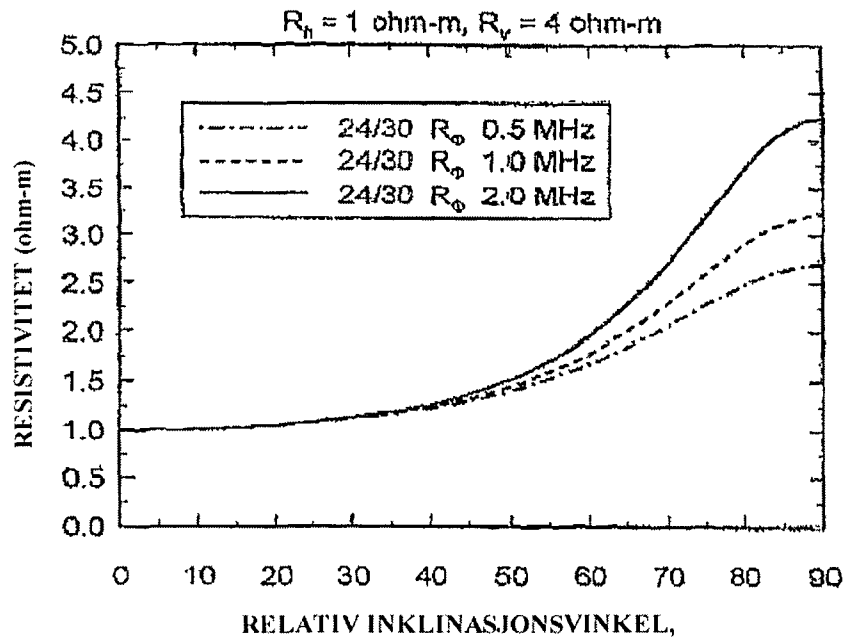


FIG. 16

12/14

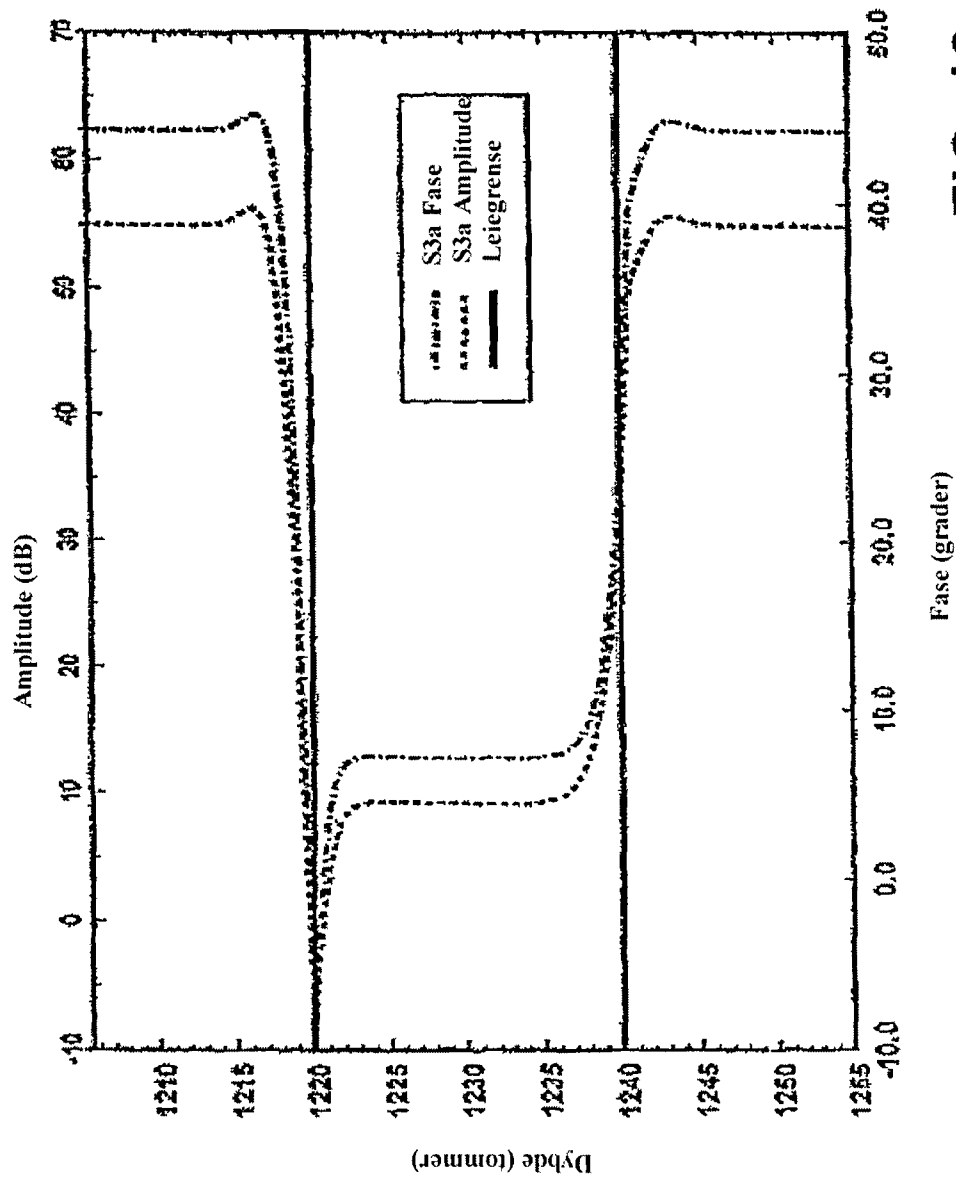


FIG. 18

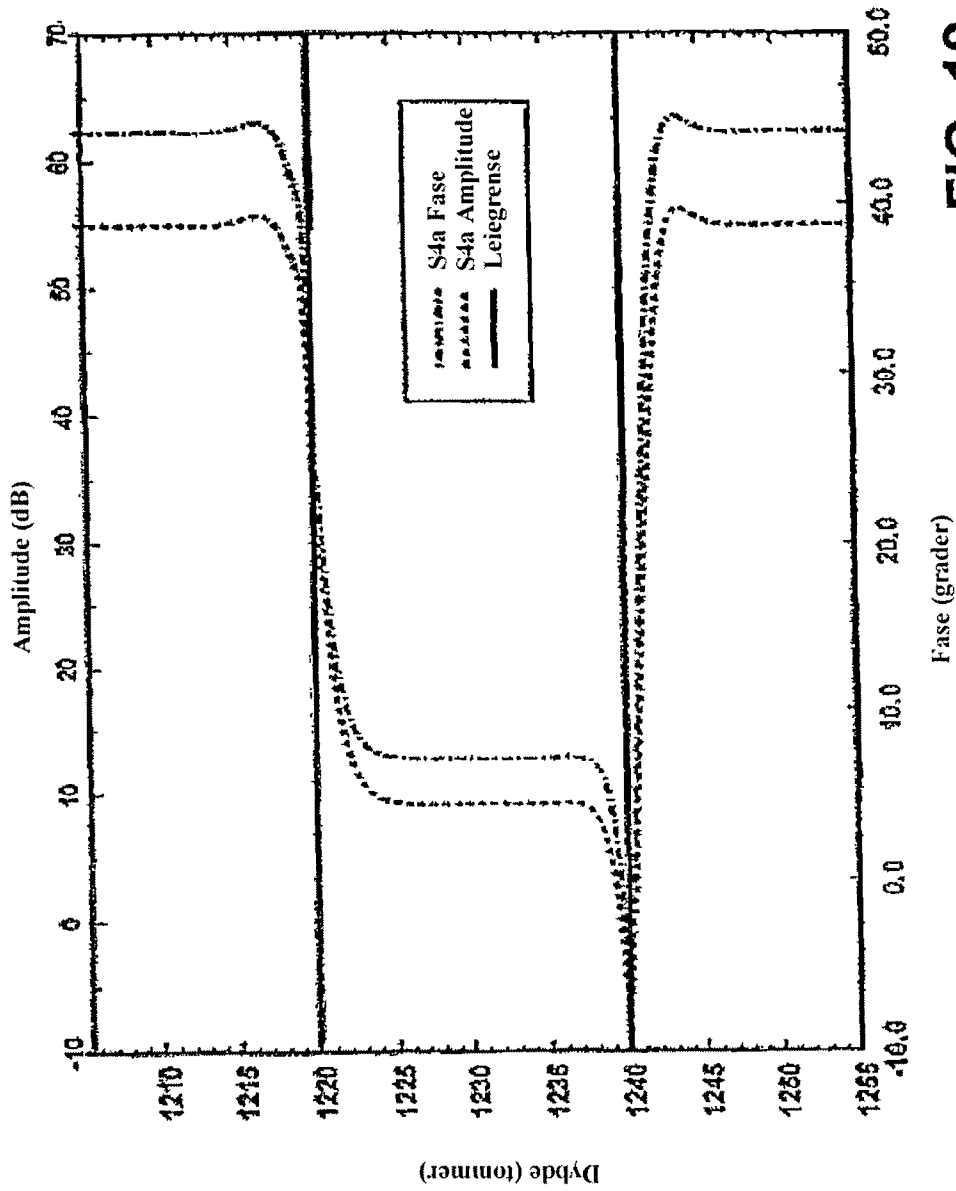


FIG. 19

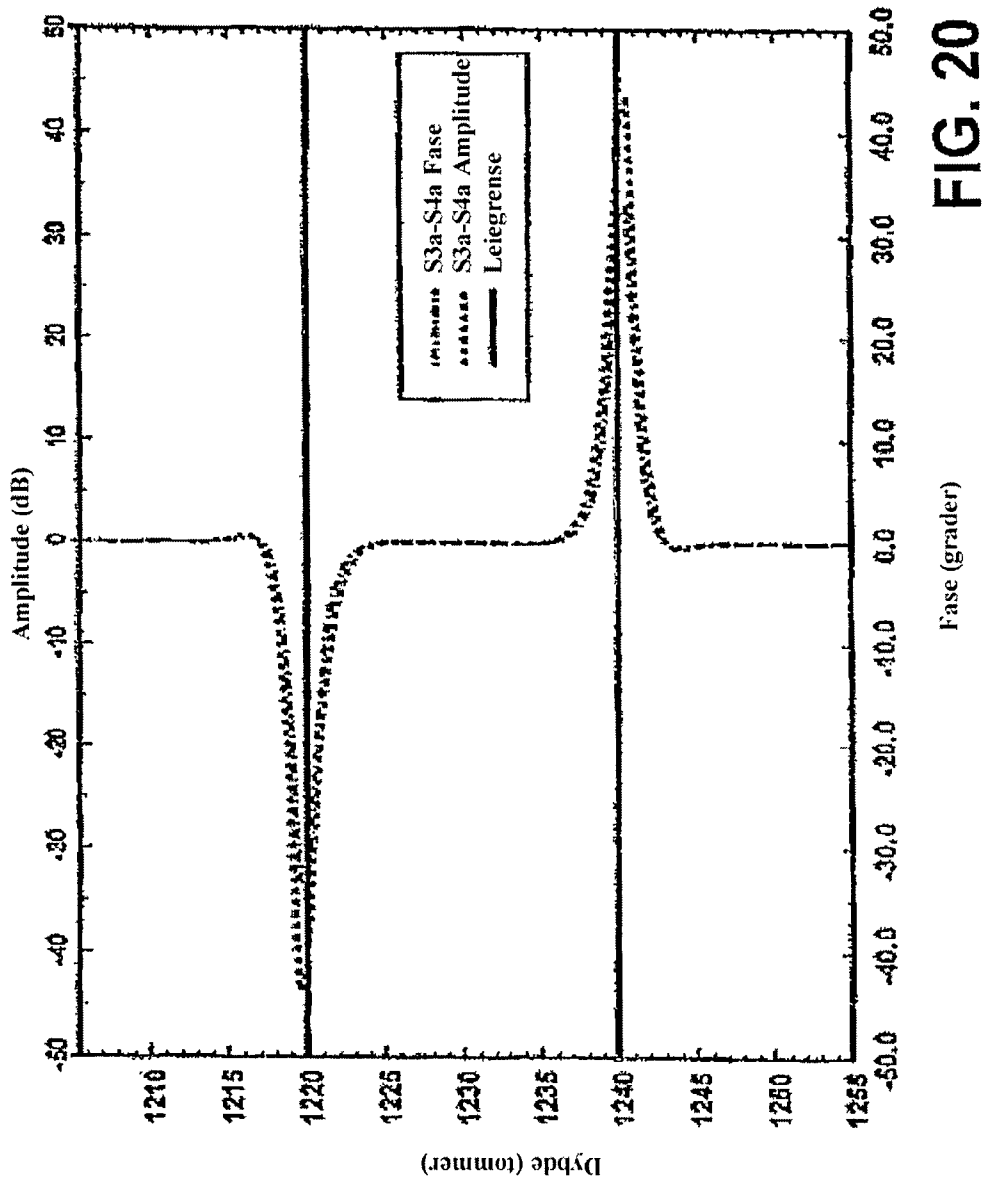


FIG. 20