(12) **PATENT**

(11) **343045** (13) **B1**

(19) NO

NORGE (51) Int Cl.

G01V 3/08 (2006.01)
G01V 3/12 (2006.01)

Patentstyret

(21)	Søknadsnr	20093416	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr	2008.04.02 PCT/US2008/004283
(22)	Inng.dag	2009.11.25	(85)	Videreføringsdag	2009.11.25
(24)	Løpedag	2008.04.02	(30)	Prioritet	2007.04.26, US, 60/926,392
(41)	Alm.tilgj	2010.01.26			
(45)	Meddelt	2018.10.15			

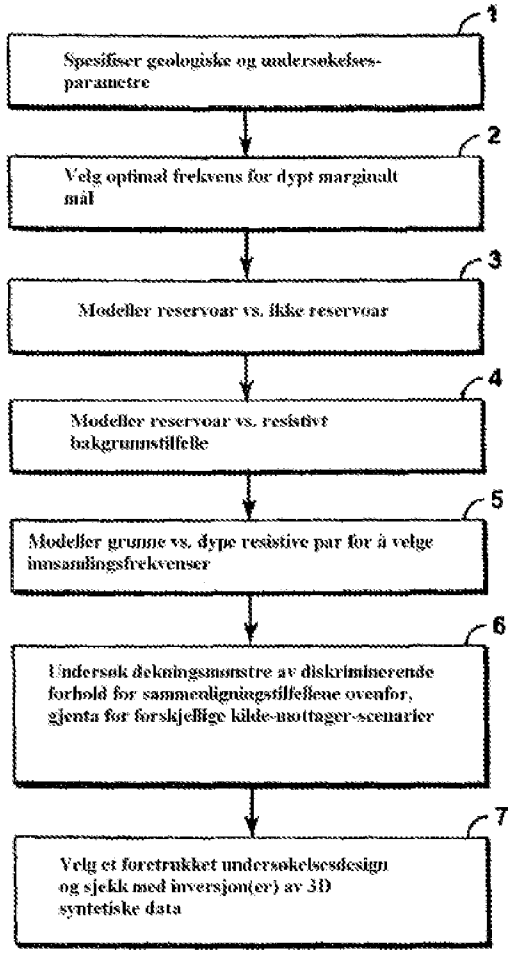
(73) Innehaver ExxonMobil Upstream Research Co, P.O. Box 2189, TX77252-2189 HOUSTON, USA
(72) Oppfinner Kenneth E Green, 11002 Tupper Lake Drive, TX77042 HOUSTON, USA
Scott C Hornbostel, 4457 Clay Street, TX77023 HOUSTON, USA
(74) Fullmektig OSLO PATENTKONTOR AS, Postboks 7007 M, 0306 OSLO, Norge

(54) Benevnelse **Fremgangsmåte for å designe en kartlegging av undergrunnen med en kontrollert elektromagnetisk kilde**

(56) Anførte publikasjoner US 2006132137 A1

(57) Sammendrag

En fremgangsmåte for å designe en kontrollert kilde elektromagnetisk undersøkelse som vil skille mellom et definert dypt reservoar i undergrunnen (2) av marginal interesse og spesifiserte falske positive resitivitetsstrukturer (3, 4, 5). En reservoarmodell og en falsk positiv modell konstrueres for hvert falskt positivt scenario. Resistiviteten av den falske modellen kan innstilles til å gi elektromagnetiske data som ligner nok på reservoar-modellen ved fremadmodellering slik at enhver forskjell faller i modellens null-rom. Et null-rom diskrimineringsforhold («NSDR») blir definert, for eksempel som topp normalisert forskjell av de to relaterte modellerte elektromagnetiske feltdatasett. En fremvisning av områdedekning av NSDR-verdier (6) tillater bestemmelse av slike ytterligere data som kan være nødvendig for å skille ut det falske positive legemet, og en undersøkelsesdesign utvikles i samsvar med dette (7). Reduksjon av antallet variabler som påvirker fremvisningene av områdedekning er en nøkkelegenskap for fremgangsmåten.



Oppfinnelsens område

Denne oppfinnelsen vedrører generelt området geofysisk prospektering, og nærmere bestemt elektromagnetiske metoder benyttet til å lete etter hydrokarboner. Spesifikt er oppfinnelsen en fremgangsmåte for å designe en kontrollert kilde elektromagnetisk undersøkelse for marint bruk.

Bakgrunn for oppfinnelsen

Den marine kontrollert kilde elektromagnretiske («CSEM») metoden bruker typisk en tauet bipol kilde og utplasserte mottagere på havbunnen for å kartlegge variasjoner i resistiviteten under havbunnen, se for eksempel US-patent 6 628 119 til Eidesmo et al.

Standard fremgangsmåter for å bestemme mottagerposisjoner og lokasjon av kilde tauelinje i en undersøkelse er utsatt for flere begrensninger:

Tilgjengelige fremvisninger av dekning av undergrunnsarealet er typisk utilstrekkelig for å evaluere en gitt undersøkelsesdesign,

Det er så mange variabler at det kan være vanskelig å innstille en undersøkelse for spesifikke geofysiske oppgaver (f.eks. typer data slik som forskjellige komponenter av **E**- og **B**-felt, geometriparametre for undersøkelsen, reservoar og grunnparametre, og inversjonsparametre),

Metoder basert på multiple inversjoner er meget tidsforbrukende, og

Fremgangsmåter for fremadmodellering svikter nå det gjelder å undersøke inversjonens nullrom-spørsmål (dvs at andre modeller kan gi en tilsvarende datarespons).

Maurer et al. («Design strategier for elektromagnetiske geofysiske undersøkelser», *Inverse Problems* **16**, 1097-1117 (2000)) summerer de fire familier av gjeldende fremgangsmåter for EM undersøkelsesdesign. Den første og vanligste fremgangsmåten involverer bruk av gjentatt fremadmodellering for å se på dataene som ville resultere for forskjellige innsamlinger og grunnscenarier. Vanligst blir en enkel overseilings kildelinje undersøkes for reservoar og ikke-reservoar tilfeller for å se om et reservoar kan detekteres. Denne fremgangsmåten blir uoverkommelig for

optimalisering av rekognoserende undersøkelser på grunn av de mange parametre som skal undersøkes og det påkrevede antallet fremadmodeller. Den undersøker heller ikke null-rom-spørsmål – dvs at flere modeller kan ha lignende data slik at den som analyserer dataene ikke enkelt kan skille mellom dem.

Uttrykket *null-rom* betyr samlingen av mulige forskjeller fra en bestemt grunnkonduktivitetsmodell som vil frembringe lite eller ingen endringen i de spesifikke innsamlede data. Strengt talt ville null-rommet inkludere bare modellforskjeller som frembringer ingen endring i dataene. Imidlertid brukes uttrykket her noe løst for å inkludere modellendinger som frembringer bare små dataendringer som ville bli mindre enn de forventede støynivå i dataene. Det eksisterer et null-rom-problem når to eller flere forskjellige konduktivitetsstrukturer produserer meget lignende data og det er et betydelig undersøkelsesbehov for å skjelne disse tilfeller. Hvis disse tilfellene ikke kan skjelnes basert på de gitte data, vil også en fremgangsmåte slik som inversjon også være ute av stand til å skille dem (med mindre ytterligere geologisk eller annen *a priori* informasjon blir inkludert eller ytterligere passende feltdata blir fremskaffet).

En andre familie av fremgangsmåter for undersøkelsesdesign undersøker datafølsomhet i forhold til modellpertubasjoner. En følsomhetsfremvisning vil illustrere sonene i undergrunnen som mest påvirker en bestemt dataverdi for bestemte lokasjoner av kilde og mottager. Fremvisningen gir en ide om den arealmessige utstrekningen av sonen som påvirker en bestemt måling. Begrensninger for denne fremgangsmåten inkluderer behovet for å modellere mange parametre og målepunkter og også det faktum at pertubasjonen er i forhold til en bestemt startmodell.

En tredje familie av fremgangsmåter eksaminerer et modifisert følsomhetsplott – funksjonen for «dataviktighet». Disse funksjonene uttrykker påvirkningen av hvert datapunkt på det endelige inversjonsresultatet. Dette kan være nyttig for å velge de bestemte data som er mest nødvendig i undersøkelsesdesignen. En svakhet er at dataviktigheten begunstiger delene av modellen med høyest oppløsning. Viktigheten blir også nødvendigvis bestemt med henblikk på et bestemt modelleksempel.

Den fjerde familien av foreslåtte fremgangsmåter er basert på global optimalisering. En objektiv funksjon blir minimalisert med henblikk på noen forenklede undersøkelsesparametre. På grunn av kompleksiteten til denne

fremgangsmåten, er bare enkle tilfeller mulig. Et eksempel kan være å velge de beste 30 datapunktene ut av et sett med 200 mulige offset-frekvens-par. Denne fremgangsmåten er for begrenset optimalisering av CSEM undersøkelsesparametre fordi bare små delsett av modellen og datarommene kan betraktes.

I tillegg til disse fremgangsmåtene for undersøkelsesdesign, presenterer Houck og Pavlov («Evaluating reconnaissance CSEM survey designs using detection theory,» *The Leading Edge* **25**, 994-1004 (2006)) en Monte Carlo modell som forutsier verdien av informasjon for konkurrerende undersøkelsesdesignscenarier. Hovedfokus for denne fremgangsmåten er å bestemme sannsynligheten for å skjelne økonomiske fra sub-økonomiske reservoarer av ukjent posisjon gitt en undersøkelseskonfigurasjon og informasjon om den evne til reservoardeteksjon.

Unntatt i enkle tilfeller er gjeldende teknikker ikke tilstrekkelige for å bestemme en optimal CSEM undersøkelsesdesign. Noen svakheter i disse fremgangsmåter omfatter manglende evne til å håndtere de mange mulige undersøkelsemessige og geologiske parametre, mangel på tilfredsstillende diagnostisk fremvisning, og mangel på et middel for å aksessere forskjellige modeller som vil frembringe lignende data (dvs null-rom-problemet). Det er behov for en forbedret teknikk som adresserer disse ulemper, og foreliggende oppfinnelse tilfredsstiller dette behov.

Som et ytterligere eksempel på teknikkens stand vises det til US 2006132137 A1 (MacGregor et al.)

Sammenfatning av oppfinnelsen

I en utførelse er foreliggende oppfinneriske fremgangsmåte en fremgangsmåte for å designe en kontrollert-kilde elektromagnetisk undersøkelse (CSEM) av et område i undergrunnen for resistive legemer, idet nevnte fremgangsmåte omfatter en numerisk diskrimineringsfaktor for å bestemme om en foreslått undersøkelsesdesign kan skjelne mellom to forskjellige hypotetiske scenarier for resistivitetsstrukturen av området i undergrunnen, hvor diskrimineringsfaktoren er relatert til en forskjell mellom to simuleringer av CSEM data som bruker den foreslåtte undersøkelsesdesign, idet en simulering benytter en resistivitetsmodell av en av de to scenarier og den annen simuleringen benytter en resistivitetsmodell av det andre scenariet, og hvor verdier av diskrimineringsfaktoren som representerer de to modellene beregnes for en rekke av (x,y)-posisjoner av en resistivitetsegenskap som avviker mellom de to resistivitetsmodellene, og fremvises

i en 2D områdefremvisning hvor en eller flere undersøkelsesmottagere og minst en kildelinje okkuperer stasjonære posisjoner ifølge den foreslåtte undersøkelsesdesign. Den foreslåtte design kan deretter evalueres basert på områdedekning indikert ved verdiene av diskrimineringsfaktoren i 2D områdefremvisningen. Den foreslåtte undersøkelsesdesignen kan i tillegg varieres ved enten å legge til en eller flere mottagere eller en eller flere kildelinjer, eller begge, eller ved å justere mottageradskillelse eller andre geografiske dimensjoner i undersøkelsen, og deretter gjenta den ovenfor beskrevne prosessen med en revidert foreslått undersøkelsesdesign inntil evalueringen av en endelig undersøkelsesdesign tilfredsstiller et forhåndsvalgt kriterium eller at en annen stoppbetingelse blir oppfylt.

Omfanget av oppfinnelsen fremgår ellers av de vedføyde patentkrav.

Kortfattet beskrivelse av tegningene

Foreliggende oppfinnelse og dens fordeler vil bli bedre forstått ved henvisning til den etterfølgende detaljerte beskrivelse og de vedføyde tegninger hvor:

Fig. 1 er et flyskjema som viser grunntrinn i en utførelse av foreliggende oppfinneriske fremgangsmåte,

Fig. 2 viser en trelags (luft-vann-skifer) modell med et sylindrisk reservoar i skiferlaget, idet modellen illustrerer en modell som kan brukes i trinn 2 og 3 i Fig. 1,

Fig. 3 viser topp normalisert reservoar vs. Ikke reservoar anomali for en Ø-V seilingslinje over en mottager som en funksjon av reservoarsenter (frekvens er 0,35 Hz) for modellen i Fig. 2,

Fig. 4 viser maksimum av topp normalisert reservoar vs. Ikke reservoar anomalier som en funksjon av frekvens, som indikerer at de største relative anomalier opptrer ved mellom 0,35 og 0,5 Hz,

Fig. 5 viser topp normaliserte reservoar vs. Ikke reservoar anomali for en Ø-W seilingslinje ved 5,2 km offset fra en mottager som en funksjon av reservoarsenter (frekvens er 0,35 Hz),

Fig. 6 viser en modell benyttet til å illustrere trinn 4 i Fig. 1, idet modellen har et tynnt sylindrisk reservoar og omgivende tykk resitiv bakgrunns sylinder, hvor modellagene er luft/vann/skifer,

Fig. 7 viser maksimum (over alle bakgrunnslagposisjoner) av topp normalisert reservoar vs. Bakgrunn resistivitets lag (ilinje data) som en funksjon av resistiv bakgrunnskonduktivitet for modellen i Fig. 6, og som viser et minimum som opptrer ved omtrent 0,26 S/m som brukes til å «innstille» modellen i Fig. 6,

Fig. 8 viser normaliserte reservoar vs. bakgrunn resistivt lag (NSDR) for ilinje data, dvs dekningsmønsteret med bakgrunnslagets resistivitet innstilt i samsvar med Fig. 7,

Fig. 9 viser normalisert reservoar vs. bakgrunn resitivt lag (NDSR) for bredside data med offset 5,2 km, dvs påvirkningen på dekningen i Fig. 8 på grunn av tillegg av bredside data,

Fig. 10 viser en modell benyttet til å illustrere trinn 5 i Fig. 1, idet modellen har et par tynne sylindriske resitive skiver med bakgrunnsmodellag luft/vann/skifer,

Fig. 11 viser maksimum av topp normalisert grunt mål ved 1100 m vs. dypt mål ved 2100 m (0,04 S/m) som en funksjon av grunt mål konduktivitet i modellen i Fig. 10, med beste tilpasning opptredende ved grunn konduktivitet av 0,30 S/m med topp forskjell av omtrent 11%,

Fig. 12 visert normalisert grunne (1100 m) vs. dype (2100 m) resistive lag (NSDR) for ilinje data og modellen i Fig. 10, hvor den grunne konduktiviteten er innstilt til å minimalisere dette toppforhold ved 0,35 Hz og topp relativ anomali er 11%,

Fig. 13 viser grunt vs. dypt mål NSDR som en funksjon av frekvens for modellen i Fig. 10 med grunt mål ved 1100 m (0,30 S/m) og dypt mål ved 2100 m (0,04 S/m), idet topp differensierende frekvens opptrer ved 1,4 Hz med toppforskjell av omtrent 32%.

Fig. 14 viser et NSDR plott som illustrerer minimum (over et sett av tre dybdepar) av den maksimale diskrimineringsforholdsverdien for de tre frekvensene (f1 fast ved 0,35 Hz, f2 og f3 varierer på x-y-aksene), hvor det kan legges merke til at addisjon av en ytterligere frekvens ved 1,4 Hz vil heve det minimale NSDR til 325

(fra 11% med 0,35 Hz alene),

Fig. 15 viser endringen i Fig. 12 når 1,4 andre frekvens endres til 1,05 Hz, idet t normaliserte grunne (1100 m) vs. dype (2100 m) NSDR øker til en ny toppverdi av 28%,

Fig. 16 viser dekningsmønsteret for en undersøkelsesdesign med fem mottagere og seks kildelinjer med den maksimale (topp) reservoar vs. ikke reservoar anomalien fremvist ved bruk av ilinje og bredside mønstre,

Fig. 17 viser dekningsmønsteret med samme undersøkelsesdesign som i Fig. 16, med rotkvadratsummen av reservoar vs. ikke reservoar anomalier fremvist med bruk av ilinje og bredside mønstre,

Fig. 18 viser dekningsmønsteret for samme undersøkelsesdesign som i Fig. 16, med den maksimale reservoar vs. ikke reservoar bakgrunns NSDR fremvist ved bruk av ilinje og bredside mønstre,

Fig. 19 viser dekningsmønsteret for samme undersøkelsesdesign som i Fig. 16, med rotkvadratsummen av reservoar vs. resistiv bakgrunns NSDR fremvist ved bruk av ilinje og bredside mønstre,

Fig. 20 viser dekningsmønsteret for samme undersøkelsesdesign som i Fig. 16, med det maksimale grunne (1100 m) vs. dype (2100 m) NSDR illustrert for tilfellet med bare 0,35 Hz (ilinje og bredside data inkludert),

Fig. 21 viser dekningsmønsteret for samme undersøkelsesdesign som i Fig. 16, med det maksimale grunne (1100 m) vs. dype (2100 m) NSDR illustrert for de kombinerte 0,35 Hz og 1,05 Hz tilfeller (ilinje og bredside data inkludert),

Fig. 22 viser dekningsområdet for en enkelt mottager og to kildelinjer (en over mottageren og en med 6 km bredside offset) for den maksimale (topp) reservoar vs. Ikke reservoar anomalien fremvist ved bruk av ilinje og bredside mønstre,

Fig. 23 viser dekningsmønsteret for en enkelt mottager og to kildelinjer (en over mottageren og en med 6 km bredside offset) for den maksimale (topp) mere resistive horisontale resistivitet vs. uendret horisontal resistivitet NSDR fremvist ved bruk av ilinje og bredside mønstre,

Fig. 24 viser dekningsmønsteret for en enkelt mottager og to kildelinjer (en over mottageren og en med 3 km bredside offset) for den maksimale (topp) mere resistive horisontale resistivitet vs. uendret horisontal resistivitet NSDR fremvist ved bruk av ilinje og bredside mønstre,

Fig. 25 viser dekningsområdet for alternerende (staggered) mottagere (6 km avstand) og to kildelinjer (6 km adskillelse) for den maksimale (topp) reservoar vs. ikke reservoar anomalien fremvist ved bruk av ilinje og bredside mønstre,

Fig. 26 viser dekningsområdet for alternerende mottagere (6 km avstand) og to kildelinjer (6 km adskillelse) for den maksimale (topp) mere resistive horisontale resistivitet vs. uendret horisontal resistivitet NSDR fremvist ved bruk av ilinje og bredside mønstre,

Fig. 27 viser dekningsområdet for alternerende mottagere (6 km avstand) og multiple kildelinjer (6 km adskillelse) for den maksimale (topp) reservoar vs. ikke reservoar anomalien fremvist ved bruk av ilinje og bredside mønstre,

Fig. 28 viser dekningsområdet for alternerende mottagere (6 km avstand) og multiple kildelinjer (6 km adskillelse) for den maksimale (topp) mere resistive horisontale resistivitet vs. uendret horisontal resistivitet NSDR fremvist ved bruk av ilinje og bredside mønstre,

Fig. 29 viser dekningsområdet for alternerende mottagere (6 km avstand) og multiple kildelinjer (6 km adskillelse) for den rotkvadratsum reservoar vs. ikke reservoar anomalien fremvist ved bruk av ilinje og bredside mønstre,

Oppfinnelsen vil bli beskrevet i forbindelse med den foretrukne utførelsen. I den utstrekning den etterfølgende detaljerte beskrivelse er spesifikk for en bestemt utførelse eller bestemt anvendelse av oppfinnelsen, er dette imidlertid ment bare å være illustrativt, og må ikke oppfattes å begrense omfanget av oppfinnelsen. Motsatt er den ment å dekke alle alternativ, modifikasjoner og ekvivalenter som kan inkluderes innen ånden og omfanget av oppfinnelsen som definert av de vedføyde krav.

Detaljert beskrivelse av eksempelutførelser

Figur 1 er et flytskjema som viser grunntrinn for en utførelse av foreliggende oppfinneriske fremgangsmåte for CSEM undersøkelsesdesign. Uttrykket undersøkelsesdesign betyr å bestemme i det minste kildelinjene og mottagerlokasjonene i undersøkelsen, og kildetransmisjonsfrekvensen eller -frekvensene. Fremgangsmåten begynner ved trinn 1 med spesifikasjonen av noen inngangsparametre og fortsetter så med en serie modelleringstrinn som bestemmer innsamlingsfrekvensene og kilde og mottager utlegg (layout). Undersøkelsesdesignen er valgt å optimalisere dekningen slik at en etterfølgende inversjon vil avdekke konduktivitetsstrukturen i undergrunnen i tilstrekkelig grad.

Utvalgte geologiske og undersøkelsesmessige inngangsparametre blir bestemt i trinn 1. Disse parametre kan for eksempel inkludere: en modell over bakgrunnskonduktivitet, et dybdeområde av interesse for potensielle reservoarer, andre reservoaregenskaper (f.eks. resistivitet og arealutstrekning), og et estimat av den magnetotelluriske støyterskel etter dataprosessering. Reservoaregenskapene benyttes til å bestemme et reservoar av marginal interesse, mens den magnetotelluriske støyterskelen hjelper til å finne et maksimalt nyttbart offset. Andre viktige inngangsparametre inkluderer vannbunnstopografi og muligens andre forhold som påvirker mottagerplassering eller kilde tauelinjebegrensninger og begrensninger for undersøkelseskostnader.

Foreliggende fremgangsmåte for undersøkelsesdesign bruker to viktige konsepter for å optimalisere de innsamlede undersøkelsesdata for senere inversjon. Det første konseptet er reduksjonen av variabler slik at optimal undersøkelsesdesign enkelt kan relateres til kilde og mottagergeometrier. Det andre konseptet er «null-rom diskrimineringsforholdet» eller NSDR (for «Null Space Discriminating Ratio»). Dette forhold kan fremvises for å bestemme hvilke ytterligere data som kreves for å skjelne mellom to undergrunns-scenarier som ellers vil være tvetydig under inversjon. Disse konsepter forklares i nærmere detalj nedenfor.

Områdefremvisninger og variabelreduksjon

Et betydelig aspekt ved foreliggende oppfinneriske fremgangsmåte er bruk av områdefremvisninger til å illustrere datafølsomheten for viktige forhold (ratios) slik som tilfellet reservoar-til-ikke-reservoar. Fig. 2 viser et sylindrisk reservoar 21 in en bakgrunnsmodell 20 av luft 22, vann 23 og skifer 24. En enkel vannbunnsmottager

og kilde seilingslinje 25 blir benyttet. (Av effektivitetsårsaker kan en ekvivalent modell med en enkel kilde og linje av mottagere substitueres ved resiprositet.) Amplituden av forskjellen av de elektriske feltdata med og uten reservoaret blir da normalisert ved divisjon med amplituden av ikke reservoar dataene. Toppen på denne normaliserte forskjell (over et område av offset) kan fremvises som en funksjon av senteret av lokasjonen av reservoarlegemet for dette bestemte kilde-mottager-scenario, som vist i Fig. 3A og 3B hvor det kan ses at det er to lokasjoner hvor et reservoar, hvis det var et der, ville være detekterbart med de simulerte elektriske feltdata benyttet til å generere figuren. Figur 3 benytter konturer av konstante verdier (av de normaliserte elektriske feltforskjellene) til å overbringe resultatene. I praksis vil en fargefremvisning typisk brukes med de normaliserte forskjellene representert av en fargeskala.

I fig. 3, er målestokken på hver akse avstand i meter. Origo - sentrum av plottet i dette tilfellet - er (x,y) plasseringen av én mottaker. Plottet viser normalisert elektrisk feltforskjell inntegnet på reservoarplasseringen, etter som modelleringsberegningen er gjort for ulike reservoarlokasjoner. Beregningene forutsetter en Ø-V (x-akse) kildelinje, hvor det er tatt hensyn til forskjeller fra ulike offset for å finne det plottede antallet for hver reservoarlokasjon. Dermed illustrerer fremvisningen topp relativ anomali forårsaket av det sylindriske reservoaret som funksjon av reservoarlokasjon (dvs. undergrunnsdekningen som tilbys av denne kilde-mottager-kombinasjonen.) For eksempel, hvis støynivået var slik at anomalien (normalisert forskjell) må være minst 0,2 i størrelse for å bli oppdaget, ville denne kildelinjen og mottakerplasseringen avsløre tilstedeværelsen av et slikt reservoarlegeme kun dersom sentrum lå innenfor en av de to minste konturovaler i fremvisningen. Andre scenarier med flere mottakere og/eller kildelinjer kan vises på lignende måte. Ved frembringelsen av denne fremvisningen, holdes mange variabler fast for å gjøre undersøkelsesdesignprosessen praktisk.

I foreliggende oppfinneriske fremgangsmåte, kan valg av inversjonsparametere og algoritmer, for eksempel, ignoreres ved å fokusere på det fremadmodellerte datadomene. I stedet er det antatt at inversjon vil korrekt sortere ut den riktige grunnmodellen så lenge tilstrekkelige data er gitt for dens diskriminering.

Dataparametrene forenkles ved å ta (i en utførelse av oppfinnelsen) en kompleks differanse mellom de tre E-felt målinger (dvs. E_x, E_y, og E_z med og uten reservoar) for å bestemme anomalien. Størrelsen av denne total-felt-anomalien blir så normalisert, fortrinnsvis av størrelsen uten et reservoar. Som et resultat vil enhver

forskjell i E_x, E_y, eller E_z i amplitude eller fase bli innfanget. Dette, selvfølgelig, forutsetter at alle komponenter er tilgjengelige. En annerledes dekningsfremvisning vil være nødvendig dersom en eller flere komponenter mangler eller er ubrukelig. En annerledes dekningsfremvisning vil også bli nødvendig hvis magnetfeltintensitet brukes i stedet for (eller i tillegg til) de elektriske feltmålingene. Dataene kan da bli ytterligere kollapset ved å vurdere bare topp relative anomali over alle oppnådde offset. De akseptable offsets kan være begrenset av en antatt støyterskel (for eksempel amplituden før normalisering må være større enn 1 x 10exp-15 V/m).

Reservoar parametrene kan forenkles ved å anta et marginalt reservoar for denne innledende analyse. (*Marginal* betyr minimalt akseptabelt fra et økonomisk interesse ståsted.) For det aktuelle eksemplet (Fig. 2, 3), blir en økonomisk reservoarsone av marginale størrelse (en 4 km^2 sirkulær skive av 400 meter tykkelse og 25 ohm-m resistivitet) valgt på den dype enden av måldyp (for eksempel, fra 2100 m til 2500 m under vannbunnen). De relative anomalier vises som en funksjon av plasseringen av dette marginale målreservoaret. Større eller grunnere reservoarene ville gi en større anomali. (Den separate oppgaven av å diskriminere dype fra grunne resistive legemer omtales senere.)

Etter denne reduksjonen i variabler, er de store gjenværende parametrene kilde og mottaker geometri, som ønsket. Evnen til å detektere det dype, marginale reservoaret kan nå bli vurdert for ulike mottager og kildelinje scenarier.

Reservoar vs ikke reservoar tilfelle

Målet for trinn 3 er at undersøkelsen må kunne skille det dype, marginale reservoaret valgt i trinn 1 fra bakgrunnsresistivitet. I-linje datadekningsmønsteret i fig. 3 modelleres for en bestemt frekvens (0,35 Hz i dette tilfellet). For denne modellen, er topp relativ anomali 23%. Andre frekvenser ville ha ulike toppverdier som vist i fig. 4. Denne figuren kan brukes til å velge en optimal fundamental frekvens som kreves i trinn 2 av oppfinnelsens utførelse i Fig. 1. Toppanomalien for dette dype målet opptrer ved en frekvens på mellom 0,35 og 0,5 Hz i Fig. 4. Normalt vil man velge en fundamental frekvens som er nær eller litt mindre enn toppfrekvensen. I dette tilfellet vil 0,35 Hz velges fordi dens dekningsmønster er noe bredere enn den ville bli på 0,5 Hz.

I trinn 3 i Fig. 1 blir en rekke anomalidekningsplott som fig. 3 generert for enkel-mottaker, enkel-kilde-linje par ved den valgte optimale frekvens. Som beskrevet

ovenfor, blir disse generert ved hjelp av en rekke modelleringsevalueringer med ulike reservoarposisjoner. Forskjellene mellom data med og uten reservoaret blir normalisert, fortrinnsvis ved å dele med amplituden av dataene uten reservoaret. Topp (over offset) normalisert anomali er illustrert som en funksjon av midten av den modellerte reservoarposisjon som tidligere omtalt i forbindelse med fig. 3.

Tilsvarende enkel-mottager fremvisninger kan modelleres for forskjellige kildelinje-offset fra mottagerposisjonen. Et eksempel er vist i Fig. 5 for det tilfelle hvor kildelinjen har 5,2 km offset fra mottageren (den stiplede linjen y = 5,2 km). Et sett av disse enkel-mottager, enkel-kildelinje fremvisninger kan deretter kombineres for multiple mottagere og kildelinjer. Disse kilde-mottager-geometrier kan evalueres for å finne en undersøkelsesdesign med tilstrekkelig romlig dekning hvor tilstedeværelsen av det dype reservoaret vil tilstrekkelig påvirke de innsamlede data.

NSDR (null-rom diskrimineringsforhold)

I trinn 4 og 5 i Fig. 1 er en egenskap ved noen utførelser av foreliggende oppfinnelse som vil bli kalt Null-rom diskrimineringsforhold bragt inn i bildet. Dette forholdet er en normalisert forskjell mellom to modeller hvor forskjellen vil falle inn i inversjonsnull-rommet for et valgt sett data. Det kan kalles et ”diskriminerende” forhold fordi om det blir ikke-ubetydelig på grunn av ytterligere data, indikerer dette at dataene nå kan skjelne mellom de to modellerte tilfeller. Leseren vil legge merke til at teknikken i trinn 3 ovenfor også kan betraktes å være en anvendelse av NSDR-fremgangsmåten. Mer generelt benytter foreliggende oppfinneriske fremgangsmåte en numerisk diskrimineringsfaktor som utledes fra simulerte data som et kvantitativt mål av den grad data modellert ved bruk av en foreslått undersøkelsesdesign er i stand til å skjelne et gitt resistivitetsscenario fra et andre slikt scenario.

Foreliggende oppfinneriske fremgangsmåte og særlig trinn 4 og 5 er innrettet til å se at tilstrekkelig data blir samlet inn slik at inversjonsprosessen kan finne en passende reservoarløsning uten forvirring fra andre vanskelige modeller som bare avviker i null-rommet av dataene. NSDR-analysen kan utføres i det fremad-modellerte datadomene uten å gripe til faktiske inversjoner. Dette unngår flere tidsforbrukende inversjoner. Man kan fremdeles velge å gjøre et utvalg av inversjonseksempler som en stikkprøve.

Gjenstanden for trinn 4 i Fig. 1 er den potensielle tvetydigheten mellom et målreservoar og en økning i bakgrunnsresistiviteten. Gjenstanden for trinn 5 er den potensielle tvetydigheten mellom utvalgte par av resistive legemer ved forskjellige dybder. Disse to trinn fører typisk til addisjonen av respektivt bredside data og multi-frekvens data til undersøkelsen.

Disse to diskrimineringer (sammen med trinn 3 diskriminering av reservoar fra ikke reservoar) kan være tilstrekkelig for noen problemer ved undersøkelsesdesign. Man kan tenke seg andre tilfeller som også kan være av interesse, inkludert: Diskriminering av et reservoar fra en isotrop skifer, diskriminering av forskjellige reservoarkantlokasjoner, og diskriminering av økonomisk fra sub-økonomiske reservoarer. Disse tilleggstrinn kan inkluderes i forskjellige utførelser av oppfinnelsen, men er ikke vist i Fig. 1.

Enhver potensiell tvetydighet i inversjonsprosessen kan analyseres ved bruk av NSDR-konseptet. Det første trinnet vil være å spesifisere de to tvetydige modelltilfellene som gir lignende dataresultater. Forskjellen mellom disse to tilfellene normaliseres med amplituden av en av tilfellene til å gi NSDR. NSDR kan nå studeres som en funksjon av tilleggsdata som kan bringes til å bære. I noen tilfeller vil tilleggsdata være i stand til å diskriminere mellom disse to, innledningsvis tvetydige modellene. Hvis dette er tilfelle kan dekningsfremvisninger av NSDR illustrere delene av undergrunnen son nå kan inverteres nøyaktig uten denne tvetydigheten.

Det kan være at ingen hypotetiske tilleggsdata vil bli funnet som er i stand til utføre denne diskrimineringen. (Eller tilleggsdataene kan bedømmes å være for kostbare.) I dette tilfelle vil de inverterte resultatene forbli tvetydige i forhold til disse to scenarier. Det er mulig at geologisk informasjon eller andre geofysiske data kan brukes til å gjøre diskrimineringen.

I andre tilfeller kan det være at det er en foreslått tvetydighet men at det ikke kan spesifiseres to modeller som har lignende data over det hele. Hvis dette er tilfelle er det ingen sann tvetydighet siden dataene allerede er i stand til å utføre diskrimineringen.

Reservoar vs. resistiv bakgrunn tilfelle

I trinn 4 i Fig. 1 blir tvetydigheten mellom et målreservoar og en økning i

bakgrunnsresistiviteten undersøkt, fortrinnsvis ved bruk av i-linje data. Figur 6 illustrerer to modeller som presenterer en slik tvetydighet. En modell er den samme som Fig. 2 med sylindrisk skive reservoar 21, og den annen modell erstatter skive 21 med den større sylinderen 61 av lavere resistivitet. I dette eksempelet har bakgrunnssylinderen 61 et fire kvadratkilometers (tverrsnitt) areal og går fra 1,5 til 4,0 km under vannbunnen. Reservoaret 21 har også et fire kvadratkilometers område, men går fra 2,1 til 2,5 km under vannbunnen (som i foregående eksempel).

NSDR-analysen begynner med å velge bakgrunnsresistiviteten (stor sylinder 61) slik at i-linje dataene er tilnærmet de samme som i-linje dataene for det tynne sylinder reservoaret 21. Denne tilpassede bakgrunnsmodellen vil bli benyttet til å danne NSDR for videre analyse.

Figur 7 viser resultatet av et sveip av modeller med varierende bakgrunnskonduktivitet. Hvert datapunkt representerer maksimal normalisert forskjell (eller NSDR) mellom reservoartilfellet og bakgrunnstilfellet (stor sylinder) over alle sylinderposisjoner for en gitt bakgrunnskonduktivitet. Minimum opptrer ved en bagrunnssylinderverdi av 0,26 S/m som gir data med mindre enn 3% forskjell fra reservoarmodellen ved alle offset. Dette er nært nok til å betraktes som ikke skjelnbart på grunn av støy og annen forventet variabilitet i dataene.

Figur 8 viser dekningsmønsteret for dette NSDR ved bruk av i-linje data. (iI praksis vil Figur 8 typisk være en fargefremvisning.) som bemerket ovenfor, er NSDR overalt mindre enn 3% (og er utenfor konturlinjene mindre enn 2%) hvilket betyr at disse i-linje dataene er ute av stand til å diskriminere mellom de to tilfellene av et tynnt reservoar og en bred bakgrunnssylinder med tilpasset resistivitet.

Tilleggsdata (bredside data i dette tilfellet)blir deretter undersøkt for å se om NSDR blir stort nok til å gjøre denne diskrimineringen. I dette tilfellet viser fremvisningen et område mellom mottageren og bredside kildelinjen 91 hvor de to tilfeller avviker med nesten 10%. Igjen illustrerer Fig. 8 og 9 maksimal NSDR-verdi for alle dataene i den indikerte kildelinje/mottagerkombinasjon som en funksjon av posisjonen av paret med store sylinder og reservoar.

Lignende enkelt-mottager fremvisninger kan modelleres for forskjellige kildelinje-offset fra mottagerposisjonen. Disse fremvisninger kan deretter kombineres for et sett mottagere og kildelinjer. Ideelt vil dataene fra disse sammensatte

fremvisninger vise dekning over alt for denne diskriminering av reservoar vs. Strukturer av høyere bagrunnsresistivitet.

Grunn vs. dyp resistivitet par

I trinn 5 i Fig. 1 undersøker vi den potensielle tvetydighet mellom utvalgte par av resistive legemer ved forskjellige dybder. For eksempel kan en uøkonomisk gassforekomst feilaktig tas å være et dypere, økonomisk hydrokarbonreservoar, med mindre fremgangsmåten kan diskriminere mellom disse to scenarier ved å tilveiebringe data som er tilstrekkelige til å tillate inversjonen å korrekt posisjonere de resistive legemene i dybde. Et eksempel på et dybdepar er gitt i Fig. 10. som før er det første trinnet ved designing av NSDR å innstille de to modellene slik at deres data er tilsvarende. I dette eksempelet har det dypere legemet sin konduktivitet satt til 0,04 S/m mens det grunnere legemet er innstilt til å minimalisere maksimalforskjellen mellom de to tilfellene. Bakgrunnsskiferen i luft/vann/skifer-modellen er satt til en konduktivitet av 0,5 S/m.

Figur 11 illustrerer maksimal topp-NSDR for sammenligningen av resistive legemer ved 1100 m og 2100 m som en funksjon av konduktiviteten ved 1100 m. (Konduktiviteten av legemet ved 2100 m er satt til 0,04 S/m). Ved en grunn konduktivitet av 0,3 S/m har de to tilfellene data som avviker med mindre enn 11% for alle områdeposisjoner av de resistive legemer med i-linje data ved 0,35 Hz. Områdefordelingen av dette innstilte NSDR for i-linje data er vist i Fig. 12. (Hvor det her brukes uttrykket maksimal topp, vil topp vise til forskjellige kilde-mottager-offset, mens maksimal viser til forskjellige område (x,y) posisjoner av de resistive legemene.)

I noen situasjoner kan denne 11% forskjell være nok til å skjelne de to dybder og intet nul-rom-forhold vil bli involvert. Hvis man fremdeles mistenker noen tvetydighet, kan de to tilfellene justeres til å gi mer tilsvarende data – for eksempel ved å tillate det grunne legemet å variere i diameter eller konduktivitetsfordeling. De to tilfellene vil da representere et null-rom-forhold og man kan studere det relaterte NSDR. For gjeldende eksempel vil det antas at 11%-anomalien ikke er tilstrekkelig og at en ytterligere frekvens er ønskelig for å skjelne de to tilfellene klarere.

I Fig. 13 blir NSDR bygget fra de innstilte resistive legemer ved 1100 m og 2100 m studert som en funksjon av frekvensen. Det relative null ved 0,35 Hz er åpenbart

hvor de to tilfellene har blitt innstilt å være tilsvarende. Også åpenbart er den økende diskrimineringen ved høyere frekvenser. De to dybdene kan best skjelnes ved 1,4 Hz hvor topp relativ forskjell er 32%.

Andre dybdepar kan tilsvarende studeres for å hjelpe i valget av de optimale innsamlingsfrekvensene. Basert på de geofysiske tolkningsbehov, kan et sett dybder velges ut for hvilke diskriminering er viktig. I det gjeldende eksempelet vil det antas at det er viktig å skjelne resistive legemer ved 500 m, 1100 m, og 2100 m. Dette fører til tre dybdepar: 500 m – 1100 m, 500 m – 2100 m, og 1100 m – 2100 m. De to første parene vil bli studert på en tilsvarende måte som den benyttet for 1100 m – 2100 m tilfellet.

Kombinasjonen av disse tre tilfeller kan evalueres ved bruk av en fremvisning slik som Fig. 14. Her er minimaks NSDR (minimum over settet av tre dybdepar av maksimum over de tre frekvensene ved et gitt dybdepar) illustrert som en funksjon av de andre og tredje frekvensene som modelleres. (Det antas en innledende frekvens på 0,35 Hz). I dette eksempelet er det intet åpenbart behov for en tredje frekvens siden tillegget av 1,4 Hz modellen er tilstrekkelig til å heve minimaks NSDR til 32% (fra 11% ved 0,35 Hz alene). Legg også merke til at 1100-2100-dybdeparet er det kritiske paret siden disse minimaks-verdier er de samme som ville blitt oppnådd fra dette paret alene.

På dette punktet må det overveies noen kompromisser ved valget av de passende frekvensene for undersøkelsen slik at de nødvendige data alle kan samles inn i en enkelt passering av kilden langs hver undersøkelseslinje, ikke absolutt essensielt men meget ønskelig fra et kostnadsstandpunkt. Hovedspørsmålet vil være å finne et sett frekvenser som kan samles ved bruk av tilgjengelige CSEM kildebølgeformer. Firkantbølgen inkluderer for eksempel en grunnfrekvens og den odde harmoniske. Logaritmisk adskilte multi-topp bølgeformer, slik som tre-topp, fire-topp og penta-topp bølgeformer beskrevet i PCT patentpublikasjon WO 2005/117326 kan også overveies. Andre tilfeldige samlinger av frekvenser kan settes sammen ved bruk av tidsdelte multiple bølgeformer som beskrevet i PCT patentsøknad WO 2007/046952.

For dette tilfellet velges kilde transmisjonsfrekvenser på 0,35 Hz og 1,05 Hz., som kan genereres med en enkel firkantbølge med grunnfrekvens på 0,35 Hz. Den øvre frekvensen vil en lett redusert NSDR-verdi fra den optimale verdien ved 1,4 Hz men har fordelen av å ha et bredere dekningsmønster (fra den reduserte frekvensen) så

vel som at den er lett å generere som den tredje harmoniske av 0,35 Hz firkantbølgen. Dekningsmønsteret for 1100 m vs. 2100 m NSDR ved 1,05 Hz er illustrert i Fig. 15. NSDR har en maksimalverdi av 28% sammenlignet med maksimum av 11% for de samme modellene ved 0,35 Hz (Fig. 12).

Dekningsmønstre og undersøkelsesdesign

I trinn 6 i Fig. 1, bli dekningsmønstre av diskrimineringsforholdene ovenfor undersøkt for utvalgte kilde-mottager-scenarier. På dette trinn kan feltbegrensninger slik som vannbunns-topografi og produksjonsinfrastruktur overveies ved plasseringen av forskjellige kildelinjer og mottagere.

Disse scenario dekningsmønstre konstrueres ved bruk av enkelt-mottager, enkel-kildelinje mønstrene illustrert tidligere, for eksempel Fig. 3, 5, 8, 9, 12 og 15 pluss andre tilsvarende mønstre som ikke er vist her. Det totale mønsteret er en kompositt av disse individuelle mønstre og kan settes sammen på minst to måter. I den første fremgangsmåten, er verdien postet i en gitt områdelokasjon den maksimale relative anomali over alle individuelle mønstre som ville gjelde der. Med andre ord betyr tilstedeværelsen av reservoaret (eller andre NSDR) i en gitt lokasjon at minst en kilde-mottager-kombinasjon vil ha den postede relative anomali.

I den andre fremgangsmåten er verdien postet i en gitt områdelokasjon en rotkvadratsum av alle NSDR-verdiene som ville gjelde ved denne lokasjon. Denne verdien oppnås ved å ta kvadratrotsummen av kvadratene av alle relevante NSDR-verdier. Denne fremgangsmåte vil passe hvis de forskjellige målingene kan betraktes å være uavhengige evalueringer av denne lokasjon i undergrunnen hver med tilfeldige, ukorrelerte feil. Den første fremgangsmåten vil føre til en mer konservativ evaluering mens den andre fremgangsmåten vil fange opp verdien av et flertall målinger i en gitt lokasjon. Disse spørsmål vil bli klargjort i det senere eksempel. Personer som arbeider i feltet vil være i stand til å tenke ut andre måter å ende på en enkelt verdi som skal postes i en gitt lokasjon (x,y).

Kvadratrotsummen (RSS, for Root Square Sum)av NSDR-verdiene er nyttig fordi den tillater grove sammenligninger mellom forskjellige undersøkelser. En enkelt 40% anomali kan for eksempel være omtrent ekvivalent med fire målinger av 20% hver (dvs. 40% = $\sqrt{4}$ x 20%). Av denne årsak kan RSS-verdien også kalles en «ekvivalent anomali». Antallet målinger som kombineres er kjent som fold i en

seismisk setting. For å bestemme en akseptabel undersøkelsesdesign vil redundansen eller folden velges slik at den ekvivalente anomali er over en forhåndsbestemt verdi. En ekvivalent anomali av 100%, kan for eksempel betraktes som akseptabel for forskjellige undersøkelser.

Hvert innsamlingsscenario kan undersøkers for reservoar vs. Ikke reservoar anomali så vel som for alle viktige NSDR-verdier under betraktning. Ideelt vil scenariet demonstrere tilstrekkelig dekning av det aktuelle område for alle disse NSDR'er. Hull i dekningen er uønsket siden de indikerer lokasjoner hvor reservoarer ville overses eller hvor viktige tvetydigheter i modellen ville forbli uløst. Ideell dekning må selvfølgelig balanseres mot de tilhørende innsamlingskostnader.

Et av spørsmålene vedrørende dekningsmønstre er studiet av noen utilstrekkelige scenarier for å undersøke de tilhørende svakheter. Det vil alltid være et press for å minimalisere kostnader og dette bør bare gjøres med en full forståelse av hva som ofres. I tillegg kan dekningsstudier brukes til å identifisere kritiske mottager og kildelinje lokasjoner i motsetning til de sekundære, mindre kritiske lokasjonene. I trinn 7 i Fig 1 er det valgt en foretrukket undersøkelsesdesign eller lite sett av foretrukne design. Denne design eller lille sett av design kan deretter valgfritt kontrolleres ytterligere ved modellinversjoner. For dette verifiseringstrinn blir først simulerte datamodellert for hvert innsamlingsscenario. Disse dataene blir deretter invertert og de inverterte resultater sammenlignet med den korrekte modellen. Flere geologiske modeller kan også kontrolleres, om ønskelig, for å validere inversjonens evne til å korrekt diskriminere tilfeller hvor modelltvetydighet fra null-rom problem er et spørsmål. Modellinversjoner kan også sammenlignes med de forskjellige dekningsfremvisninger for å evaluere ethvert innsamlingsspor som er tilbake i det inverterte resultatet. Disse sammenligninger av spor er også nyttig på et senere trinn ved invertering av faktiske inverterte feltdata-resultater.

Eksempel 1

Anta et hypotetisk innsamlingsscenario med fem utsatte mottagere og seks kildelinjer. I dette eksempelet vil kilde-mottager-monstrene generert tidligere bli kombinert for å evaluere det totale dekningsmønsteret. Fire mottagere er lokalisert like utenfor et potensielt reservoarområde mens den femte mottageren er lokalisert i et ikke-reservoar-område. (Å ikke plassere noen mottager over det potensielle reservoarområdet reflekterer det som kan ses i alle enkelt-mottager dekningsfigurene slik som Fig. 3; høyfølsomhetsområdene er aldri direkte under en

mottager.)

Figur 16 viser en kompositt dekningsfremvisning for dette scenario. De brutte linjene er kildelinjene, og de mørke prikkene representerer de stasjonære mottagerne. Den maksimale reservoar vs. Ikke-reservoar anomali fremvises ved bruk av i-linje og bredside mønstre med bredside avstand på 2,6 og 5,2 km. (Avstanden mellom kildelinjer er 2,6 km). I dette (og de etterfølgende) eksempler, blir enkelt-mottager, enkel-kildelinje mønstrene tatt fra de beskrevet i det foregående kapitlet (for eksempel Fig. 3 og 5). evet tidligere er den plottede anomalien basert på en sammenligning av modeller (Fig. 2) med og uten et marginalt reservoar av fire kvadratkilometer områdeutstrekning og 400 m reservoarsone (fra 2,1 km til 2,5 km under vannbunnen) med 25 ohm-m resistivitet. Bakgrunnen er en skifer ved 2 ohm-m unntatt en overgangssone nær vannbunnen hvor konduktiviteten avtar ned fra vannets konduktivitet. Over skiferen er det et saltvannslag av 1,3 km med 3,5 S/m konduktivitet. Kildefrekvensen i disse modellene er 0,35 Hz.

Dekningsmønsteret i Fig. 16 er nokså komplett, hvilket betyr at et reservoar som beskrevet ovenfor vil generere en relativ anomali av over 20% i de fleste potensiallokasjoner som er dekket av undersøkelsen. Det er også noen få områder med mindre toppanomalier. I denne maksimum anomalifremvisning betyr for eksempel en verdi av 22% at minst en av kilde-mottagerparene vil se en 22% anomali for et reservoar i denne lokasjon.

En annen måte å fremvise det sammensatte dekningsmønsteret er ved å bruke kvadratrotsummen som i Fig. 17. Denne fremvisningen innfanger effekten av de multiple kilde-mottager-kombinasjoner som alle relaterer til en gitt områdelokasjon. Det er klart fra denne fremvisningen at det sentrale området av interesse (innefor de fire toppmottagerne) har en multiplisitet av dekning som fører til en forbedret verdi og bør føre til et forbedret inversjonsresultat. God dekning mot bunnen av fremvisningen (en «hale» fra reservoarområdet) fremgår også av både Fig. 16 og 17.

Tilsvarende fremvisninger av maksimal og kvadratrotsum NSDR for reservoar vs. Øket bakgrunnsresistivitet er vist i Fig. 18 og 19. Husk at dette tilfellet er innstilt slik at i-linje dataene gir liten evne til diskriminering. (Se Fig. 8 og 9 for eksempler på i-linje dekning og 5,2 km bredside dekning.) Den sammensatte dekningen for dette NSDR er veldig av hengig av å ha nok bredside informasjon. Det foreslåtte

scenario gir dekning innenfor de fire toppmottagerne med noe dekning ved bunnen fra tilleggsmottageren. Legg merke til at dekningen for dette NSDR har et annet mønster enn reservoar vs. Ikke-reservoar anomalifremvisningen i Fig. 16 og 17.

Det siste spørsmålet behandlet i dette eksempelet er det å skjelne et grunt vs. Dypt resistivt legeme. Det grunne resistive legeme (=,3 S/m) er 1100 m under vannbunnen og har konduktivitet innstilt til å stemme overens med responsen av et 0,04 S/m legeme ved 2100 m ved 0,35 Hz (som beskrevet ovenfor). Det tilhørende i-linje NSDR-mønsteret i Fig. 12 kombineres med tilsvarende bredside mønstre for å gi det sammensatte resultatet i Fig. 20. Legg merke til at denne diskrimineringen er liten, som forventet. Å legge til en andre frekvens på 1,05 Hz fører til den bedre sammensatte dekningen i Fig. 21. (Et eksempel på et individuell i-linje mønster på 1,05 Hz er gitt i Fig. 15). Den sammensatte dekningen for dette eksempelet har noen flere hull på grunn av den høyere frekvensen (og mindre bølgelengde). Hvis denne dybdediskrimineringen er viktig, kan det være nødvendig å overveie tettete kilde eller mottager adskillelse.

Før man bestemmer seg om dette foreslåtte innsamlingsscenario, kan man evaluere andre scenarier med variert avstand eller med en eller flere mottagere eller kildelinjer fjernet, for eksempel. Det kan også være viktig å konstruere andre NSDR-sammenligninger hvor tvetydig inversjon kan forventes. De forskjellige mønstrene kan sammenlignes med senere konduktivitetsinversjonsresultater for å hjelpe til med tolkning av spørsmål rundt innsamlingsspor.

Eksempel 2

For et andre eksempel, overvei en speidingssituasjon hvor hensikten er å dekke et stort område til minimal kostnad. NSDR-fremgangsmåten i foreliggende oppfinnelse kan benyttes til å bestemme den minimalt akseptable undersøkelse som fremdeles vil være i stand til å diskriminere viktige tvetydigheter. For eksempel vil reservoar vs. Ikke-reservoar NSDR bli undersøkt sammen med et NSDR med endring i bare den horisontale resistiviteten. Dekning med henblikk på disse to diskrimineringsforhold vil være tilstrekkelig til å sikre at resistivitetsanisotropi kan bestemmes (siden tilfellet reservoar vs. Ikke-reservoar er relatert til vertikal resistivitet). Diskriminering av anisotropi er lignende reservoar vs. Generelt bakgrunns NSDR beskrevet tidligere. Det er viktig fordi man må vite forskjellen mellom et reservoar og en generell endring i bakgrunnen av åpenbare utvinningsårsaker. Det er kjent at vertikal resistivitet ikke selv kan enkelt

diskriminere mellom et reservoar og en bred men mindre økning i bakgrunnsresistiviteten. Den horisontale resistiviteten er nødvendig for å foreta denne diskrimineringen. Anisotropi defineres som egenskapen hvori de vertikale og horisontale resistivitetene kan avvike.

I dette eksempelet er bakgrunnsresistiviteten omtrent 5 ohm-m (vertikal) og 2,5 ohm-m (horisontal). For reservoar vs. Ikke-reservoar NSDR, er reservoaret en sirkulær sylinder med diameter 4 km, tykkelse 700 m (fra 1,1 til 1,8 km under vannbunnen), og resistivitet 16 ohm-m (vertikal) og 4 ohm-m (horisontal). For endringen i horisontal resistivitet NSDR, har det sylindriske legemet som evalueres en diameter på 4 km, tykkelse på 1,5 km (fra 0,7 til 2,2 km under vannbunnen), og resistivitet 5 ohm-m (vertikal) og 5 ohm-m (horisontal). For sammenligning har bakgrunnen 5 ohm-m (vertikal) og 2,5 ohm-m (horisontal) som bemerket tidligere.

Byggeblokkene for dette eksempelet vil være enkel-mottager følsomhetsmønstrene med en kildelinje over mottageren og også med en kildelinje med bredside offset. Fig. 22 viser den relative reservoaranomalien for den enkle mottageren. Fig. 23 viser den relative anomalien ved sammenligning av et tilfelle med en økning i horisontal resistivitet med et tilfelle uten slik endring. Det er klart fra denne siste figuren at bredside-linjen er essensiell. Bredside offset ble valgt til 6 km i dette eksempelet siden det maksimerer følsomheten for en endring i horisontal resistivitet.

Fig. 24 viser den mindre følsomheten for horisontal resistivitet når bredside offset er 3 km. Her er følsomheten mindre enn halvparten av hva den er med 6 km bredside offset. Topp horisontal følsomhet opptrer slik med en offset av fire ganger måldybden, hvilket er nokså stort. Det synes usannsynlig at dette ville blitt forutsett ved tradisjonelle tilnærminger til undersøkelsesdesign uten fordel av en studie av NSDR horisontal resistivitet ved bruk av foreliggende oppfinneriske fremgangsmåte.

Følsomheten i Fig. 23 motiverer også en optimal mottagerkonfigurasjon. Man legger lett merke til at området med topp følsomhet er en grovt sirkulær sone mellom de to kildelinjene. Hvis en andre mottager ble plassert på den parallelle kildelinjen ved toppen av den sirkulære sonen (motsatt gjeldende mottager), ville det gi unødvendig duplisering av det samme dekningsområde. Som et resultat vil en bedre plassering av mottagerne langs den parallelle kildelinjen være å alternere posisjonene, som vil bli observert i Fig. 25 – 29. De sirkulære høyfølsomhetssonene

vil da overlappe effektivt, som det kan observeres ved å legge merke til det takkede mønsteret av 0,3 konturen i Fig. 26, for eksempel. Denne observasjonen av verdien av alternerende mottagere ville ikke vært åpenbar uten fordel av NSDR-analysen.

Anta deretter at en undersøkelse langs et transsnitt (transect, 2D tverrsnitt) er tilstrekkelig til å møte undersøkelsens mål. I samsvar med den foregående diskusjon er en bestemt og effektiv løsning illustrert i Fig. 25 og 26. To parallelle kildelinjer brukes med 6 km avstand og med alternerende mottagere adskilt med 6 km. Dekningen over området er vist å være tilstrekkelig for diskriminering av både reservoar vs. Ikke-reservoar (Fig. 27) og for horisontal resistivitetsendring vs. Ingen endring (Fig. 28).

DE spesielle løsningene vist i dette eksempelet har nok dekning med henblikk på vertikale og horisontale resistivitetsendringer (dvs. resistivtetsanisotropi). Et eget spørsmål er om disse design vil gi tilstrekkelig redundans eller fold til å se de aktuelle anomaliene. Fig. 29 viser en RSS eller ekvivalent anomalifremvisning korresponderende til Fig. 27. I denne fremvisningen er den ekvivalente anomalien større enn 40%. Hvis en større ekvivalent anomali er nødvendig, vil det kreves en tettere undersøkelse muligens omfattende flere mottagere eller kildelinjer (for eksempel kryssende kildelinjer eller redusert linje- eller mottageravstand). Den reduserte redundansen i en rekognoserende undersøkelse brukes i tilfeller hvor anomalien forventes å være stor, eller med andre ord hvor man er villig til å akseptere at mindre anomalier kan overses.

De spesielle løsningene vist i dette eksempelet har nok dekning med henblikk på vertikale og horisontale resistivitetsendringer (dvs. resistivitetsanisotropi). Et eget spørsmål er om disse design vil gi nok redundans eller fold til å se de aktuelle anomaliene. Fig. 29 viser en RSS eller ekvivalent anomali korresponderende til Fig. 27. I denne fremvisningen er den ekvivalente anomalien større enn 40%. Hvis en større ekvivalent anomali er nødvendig, vil det kreves en tettere undersøkelse muligens omfattende flere mottagere eller kildelinjer (for eksempel kryssende kildelinjer eller redusert linje eller mottager avstand). Den reduserte redundansen i en rekognoserende undersøkelse brukes i tilfeller hvor anomalien forventes å være stor, eller med andre ord der hvor man er villig til å akseptere at mindre anomalier kan overses.

Andre rekognoserende design basert på NSDR-analysen inkluderer: En enkelt

kildelinje med ekstra offset mottagere eller en enkelt kildelinje med innblandende simulerte magnetotelluriske (MT) data. (MT data kan for eksempel simuleres ved å plassere en kilde ved luftoverflategrensen av modellen som forplanter vertikalt nedover, og gjenta som nødvendig for forskjellige frekvenser.) I det første tilfellet vil i-linje og av-linje mottagere alle ha følsomhet for reservoar vs. Ikke-reservoar NSDR mens av-linje mottagerne vil gi det meste av dekningen med henblikk på endringen i horisontal resistivitet NSDR. I det siste tilfellet vil i-linje CSEM data gi følsomheten for reservoar vs. Ikke-reservoar mens MT data vil gi følsomhet for endringer i horisontal resistivitet. Denne MT-følsomhetene skyldes det faktum at MT data er orientert slik at feltene er hovedsakelig horisontale. Andre kombinasjoner av data kan også studeres ved bruk av NSDR-tilnærmingen for å se om tilstrekkelig dekning eksisterer med henblikk på vertikal og horisontal resistivitet.

Den foregående søknaden er innrettet mot bestemte utførelser av foreliggende oppfinnelse med den hensikt å illustrere den. Det vil imidlertid fremgå for fagfolk på området at mange modifikasjoner og variasjoner av utførelsene som her er beskrevet er mulig. Alle slike modifikasjoner og variasjoner er ment å være innen omfanget av foreliggende oppfinnelse, som definert i de vedføyde patentkrav.

Patentkrav

1. Fremgangsmåte for å designe en kontrollert-kilde elektromagnetisk undersøkelse (CSEM) av et område i undergrunnen for resistive legemer, karakterisert ved at nevnte fremgangsmåte omfatter en numerisk diskrimineringsfaktor for å bestemme om en foreslått undersøkelsesdesign kan skjelne mellom to forskjellige hypotetiske scenarier for resistivitetsstrukturen av området i undergrunnen, hvor diskrimineringsfaktoren er relatert til en forskjell mellom to simuleringer av CSEM data som bruker den foreslåtte undersøkelsesdesign, idet en simulering benytter en resistivitetsmodell av en av de to scenarier og den annen simuleringen benytter en resistivitetsmodell av det andre scenariet, og hvor verdier av diskrimineringsfaktoren som representerer de to modellene beregnes for en rekke av (x,y)-posisjoner av en resistivitetsegenskap som avviker mellom de to resistivitetsmodellene, og fremvises i en 2D områdefremvisning hvor en eller flere undersøkelsesmottagere og minst en kildelinje okkuperer stasjonære posisjoner ifølge den foreslåtte undersøkelsesdesign.

2. Fremgangsmåte ifølge krav 1, videre omfattende å evaluere den foreslåtte undersøkelsesdesignen basert på områdedekning indikert ved verdiene av diskrimineringsfaktoren i 2D områdefremvisningen.

3. Fremgangsmåte ifølge krav 2, videre omfattende å variere den foreslåtte undersøkelsesdesignen ved enten å legge til en eller flere mottagere eller en eller flere kildelinjer, eller begge, og gjenta fremgangsmåten i krav 22 med en revidert foreslått undersøkelsesdesign inntil evalueringen av en endelig undersøkelsesdesign tilfredsstiller et forhåndsvalgt kriterium eller at en annen stoppbetingelse blir oppfylt.

4. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor en av resistivitetsmodellene inkluderer en resitiv som representerer et mål hydrokarbon reservoar eller annen resistivitetsstruktur av interesse.

5. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor diskrimineringsfaktoren er et null-rom diskrimineringsforhold (NSDR), idet nevnte NSDR er en normalisert forskjell mellom de to simuleringene av CSEM data.

6. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor de to resistivitetsmodellene representerer anisotrop resistivitet, og bare avviker i verdier av en resistvitetskomponent ved utvalgte seller i modellen, og videre omfatter å evaluere den foreslåtte undersøkelsesdesignen for følsomhet for resistiv anisotropi basert på områdedekning indikert ved verdiene av diskrimineringsfaktoren i 2D områdefremvisningen.

7. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor den foreslåtte undersøkelsesdesignen har bare en kildelinje lokalisert direkte over en parallell linje av mottagere, men videre omfattende å kombinere simulerte magnetotelluriske data med de simulerte CSEM data med den hensikt å beregne verdier av diskrimineringsfaktoren.

8. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor den foreslåtte undersøkelsesdesign inkluderer bare en enkelt kildelinje med både i-linje og av-linje mottagere, og videre omfatter å variere den foreslåtte undersøkelsesdesignen og gjenta fremgangsmåten i krav 22 med en revidert foreslått undersøkelsesdesign inntil evalueringen av en endelig undersøkelsesdesign tilfredsstiller et forhåndsvalgt kriterium eller en annen stoppbetingelse oppfylles, forutsatt at alle reviderte undersøkelsesdesign vil følge begrensningene av en enkelt kildelinje med både i-linje og av-linje mottagere, med tillatte variasjoner med henblikk på mottageravstand eller lokasjon i forhold til kildelinjen, eller antall mottagere.

9. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor den foreslåtte undersøkelsesdesignen inkluderer nøyaktig to parallelle kildelinjer med alternerende mottagerposisjoner, og videre omfatter å variere den foreslåtte undersøkelsesdesign og gjenta fremgangsmåten i krav 22 med en revidert foreslått undersøkelsesdesign inntil evalueringen av en endelig undersøkelsesdesign tilfredsstiller et forhåndsvalgt kriterium eller en annen stoppbetingelse oppfylles, forutsatt at alle reviderte undersøkelsesdesign vil følge begrensningene av nøyaktig to parallelle kildelinjer med alternerende mottagerposisjoner, med tillatte variasjoner med henblikk på mottageradskillelse eller lateral avstand fra en kildelinje, eller antallet mottagere.

10. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor restivitetsegenskapen som avviker mellom de tp resistivitetsmodellene er et resistivt legeme som har resistivitet større enn bakgrunn, og dets (x,y) posisjoner viser til laterale posisjoner av legemets sentrum i flere datasimuleringer som kreves for å generere 2D områdefremvisningen av diskrimineringsfaktordata.

11. Anvendelse av en fremgangsmåte ifølge et av kravene 1 - 10 for å produsere hydrokarboner fra et område i undergrunnen, omfattende:

(a) tilveiebringelse av nevnte design for en kontrollert kilde elektromagnetisk undersøkelse av området i undergrunnen,

(b) utførelse av en undersøkelse basert på designen,

(c) identifisering av et reservoar i det minste delvis fra resultatene av nevnte undersøkelse,

(d) boring av en brønn inn i reservoaret, og

(e) produksjon av hydrokarboner fra nevnte reservoar.

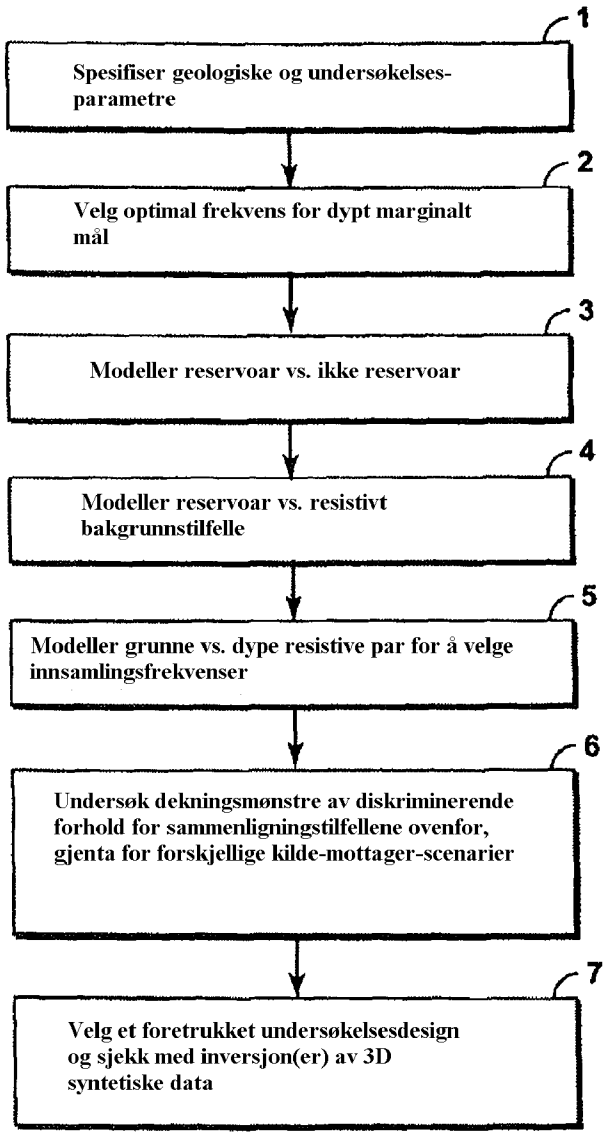

1
Spesifiser geologiske og undersøkelses-parametre
2
Velg optimal frekvens for dypt marginalt mål
3
Modeller reservoar vs. ikke reservoar
4
Modeller reservoar vs. resistivt bakgrunnstilfelle
5
Modeller grunne vs. dype resistive par for å velge innsamlingsfrekvenser
6
Undersøk dekningsmønstre av diskriminerende forhold for sammenligningstilfellene ovenfor, gjenta for forskjellige kilde-mottager-scenarier
7
Velg et foretrukket undersøkelsesdesign og sjekk med inversjon(er) av 3D syntetiske data

Fig. 1

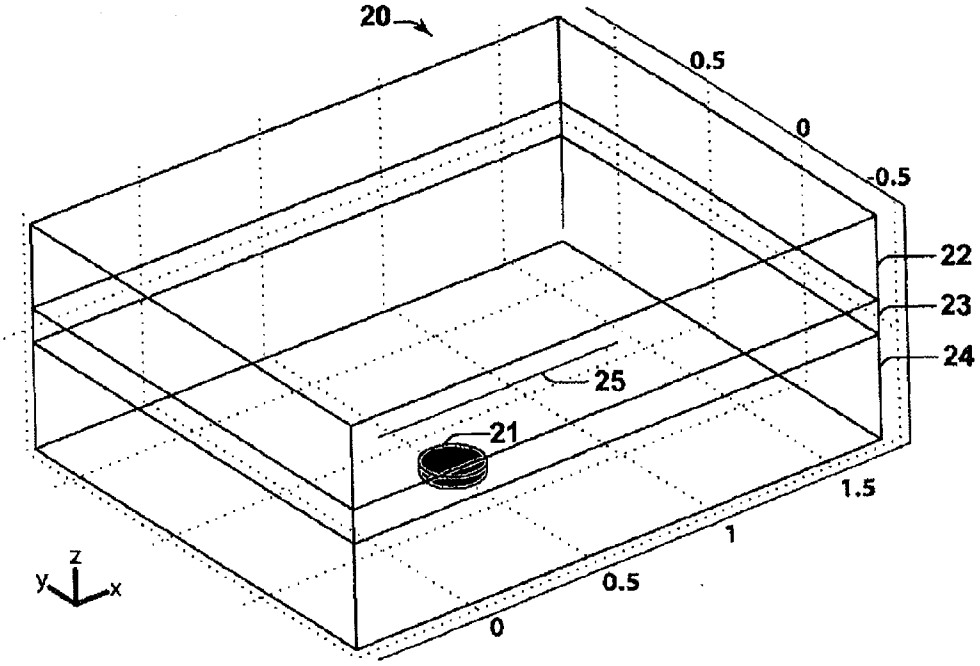

20
0.5
0
-0.5
22
23
24
25
21
1.5
1
0.5
0
z
y
x

Fig. 2

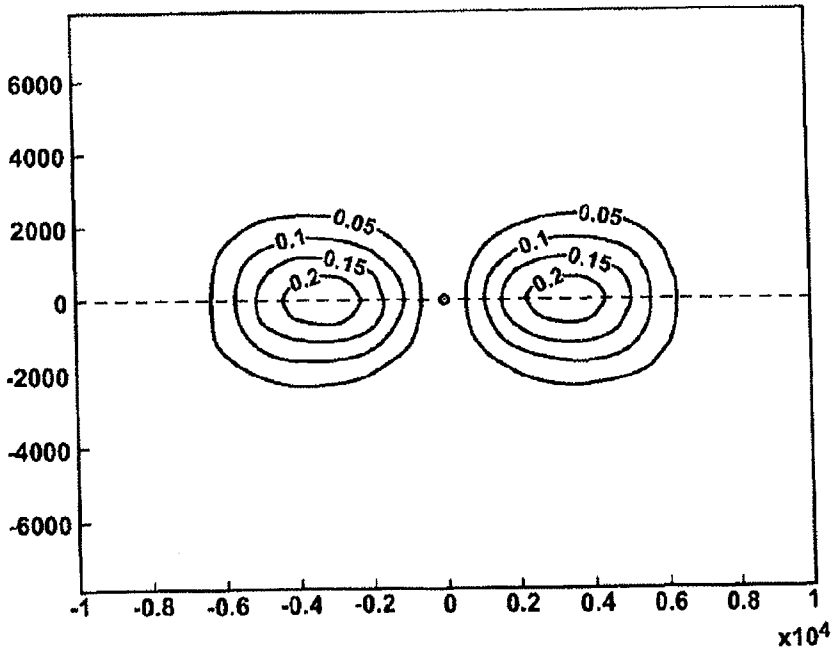

6000
4000
2000
0
-2000
-4000
-6000
0.05
0.1
0.15
0.2
-1
-0.8
-0.6
-0.4
-0.2
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
x10^4

Fig. 3

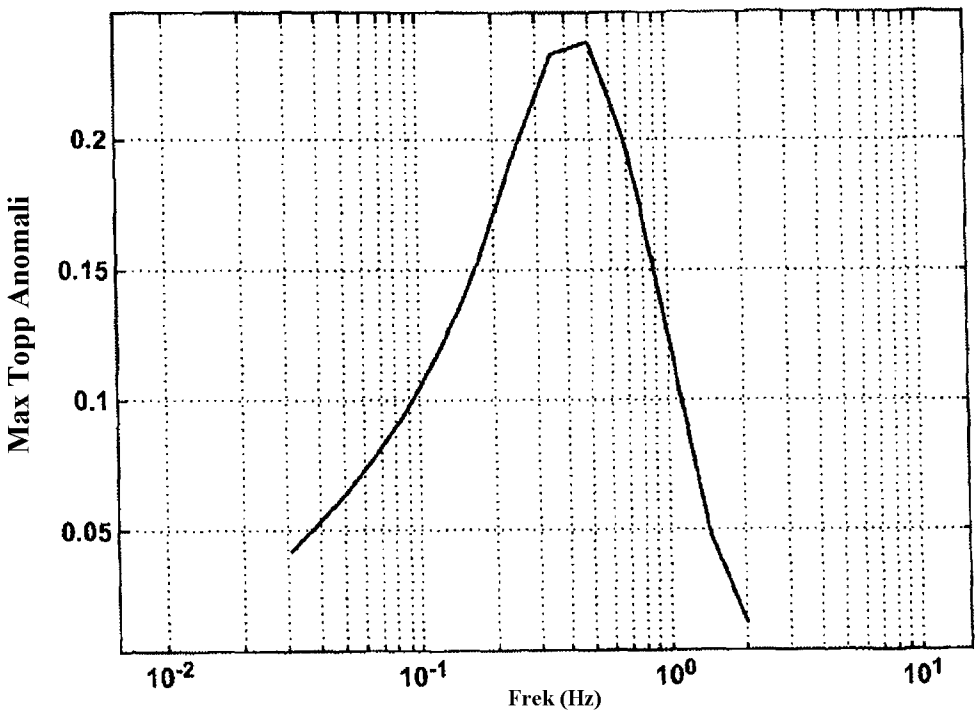

Max Topp Anomali
0.2
0.15
0.1
0.05
10^{-2}
10^{-1}
10^{0}
10^{1}
Frek (Hz)

Fig. 4

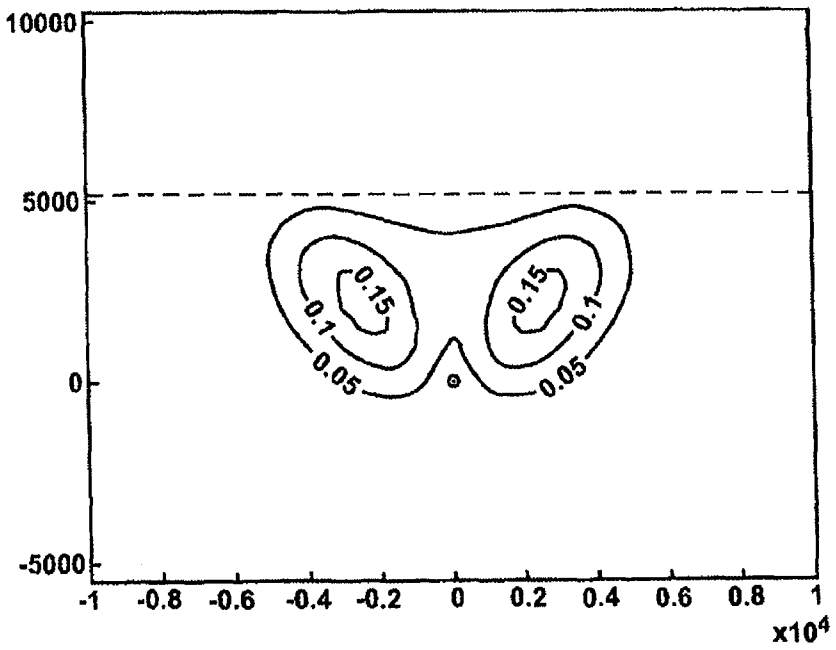

10000
5000
0
-5000
0.15
0.1
0.05
0.15
0.1
0.05
-1
-0.8
-0.6
-0.4
-0.2
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
x10^4

Fig. 5

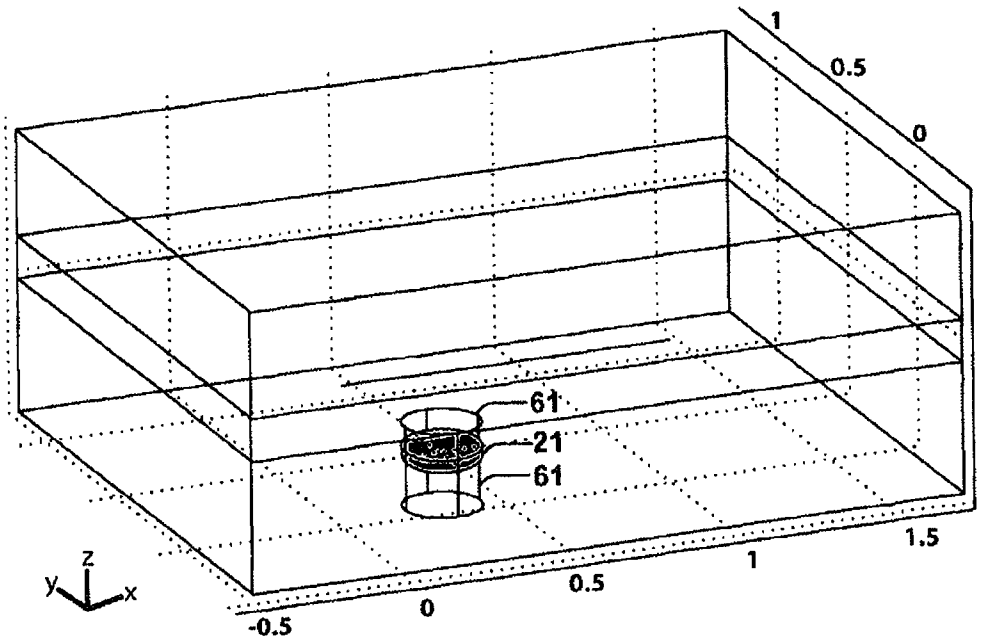


Fig. 6

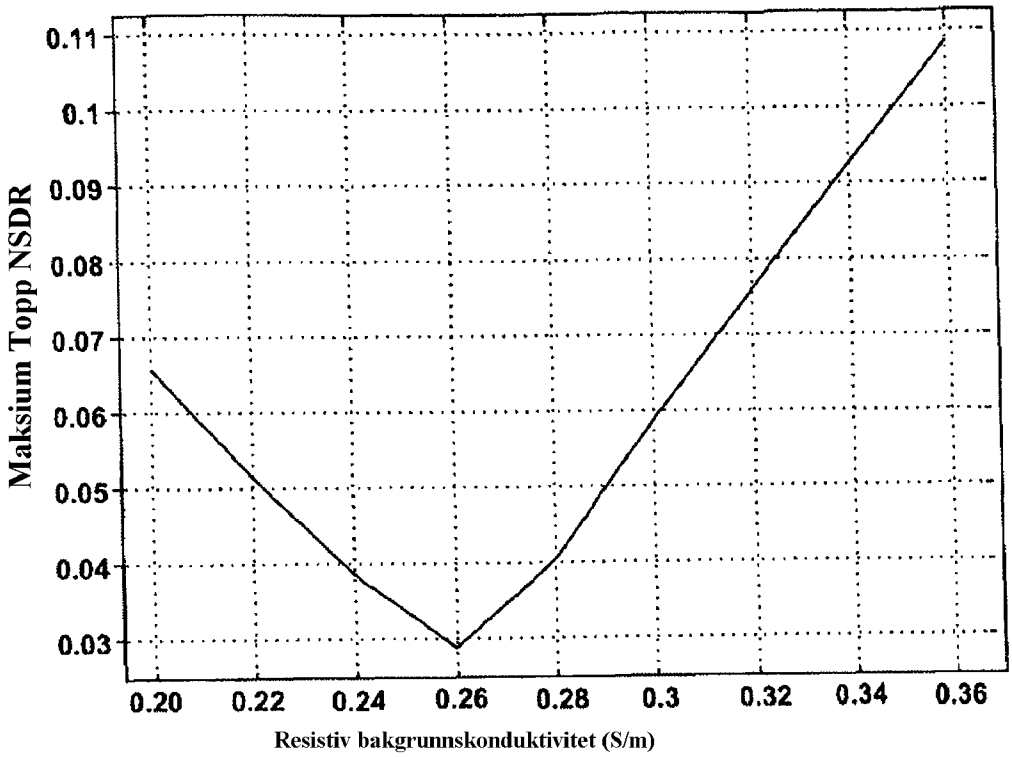

Maksium Topp NSDR
0.11
0.1
0.09
0.08
0.07
0.06
0.05
0.04
0.03
0.20
0.22
0.24
0.26
0.28
0.3
0.32
0.34
0.36
Resistiv bakgrunnskonduktivitet (S/m)

Fig. 7

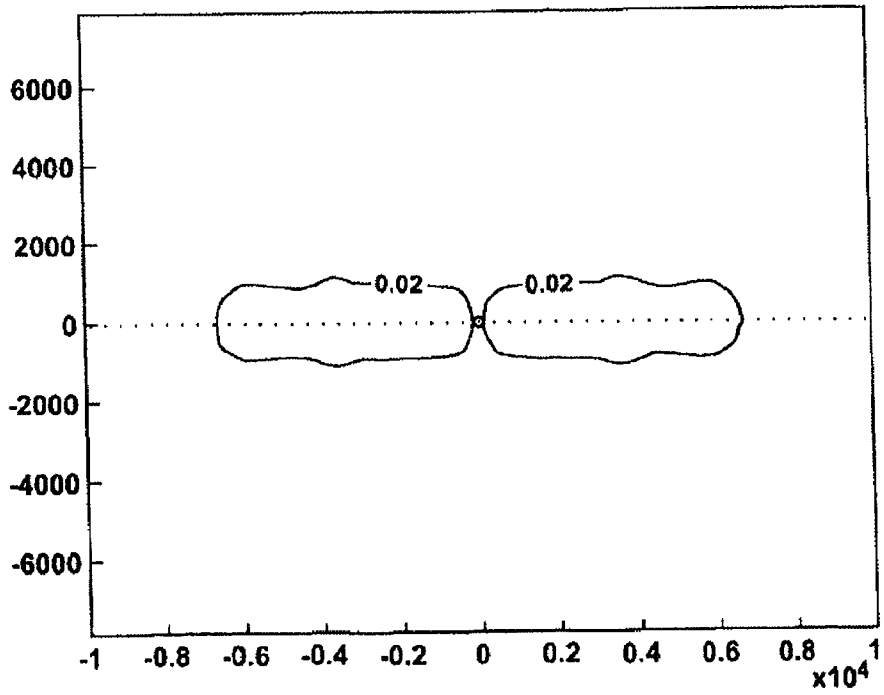

6000
4000
2000
0
-2000
-4000
-6000
0.02
0.02
-1
-0.8
-0.6
-0.4
-0.2
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
x10^4

Fig. 8

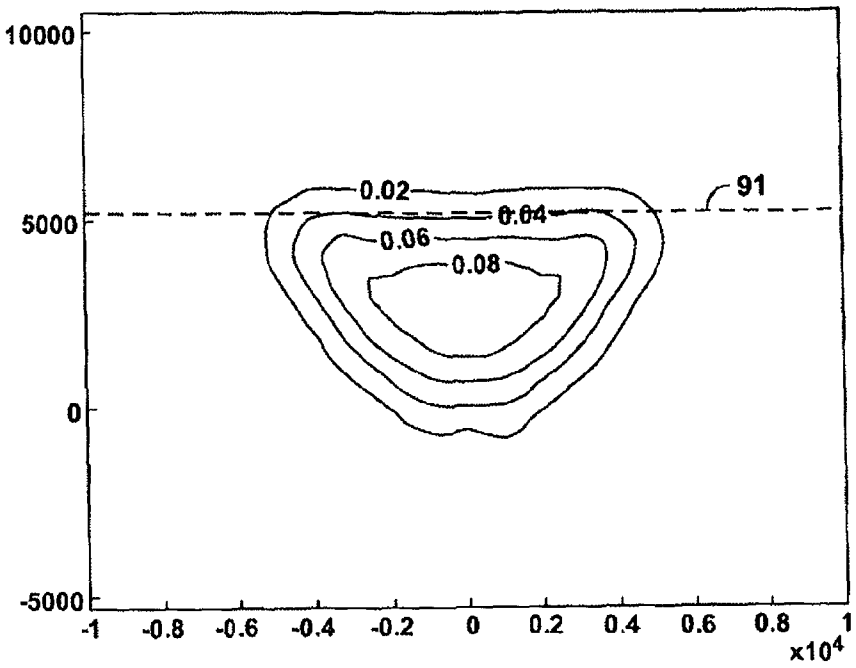

10000
5000
0
-5000
0.02
0.04
0.06
0.08
91
-1
-0.8
-0.6
-0.4
-0.2
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
x10^4

Fig. 9

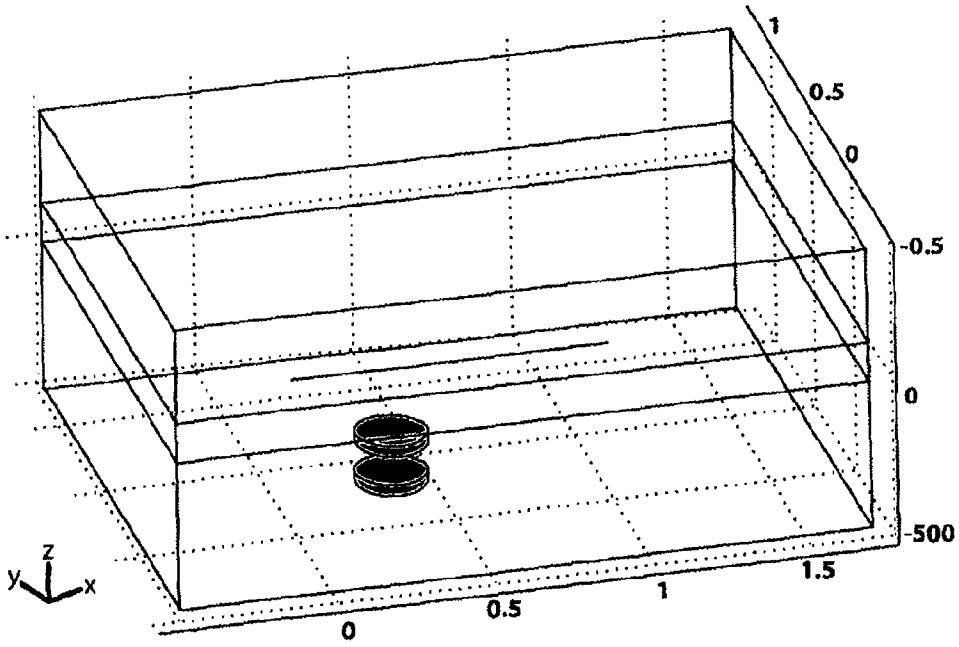

1
0.5
0
-0.5
0
-500
z
y
x
0
0.5
1
1.5

Fig. 10

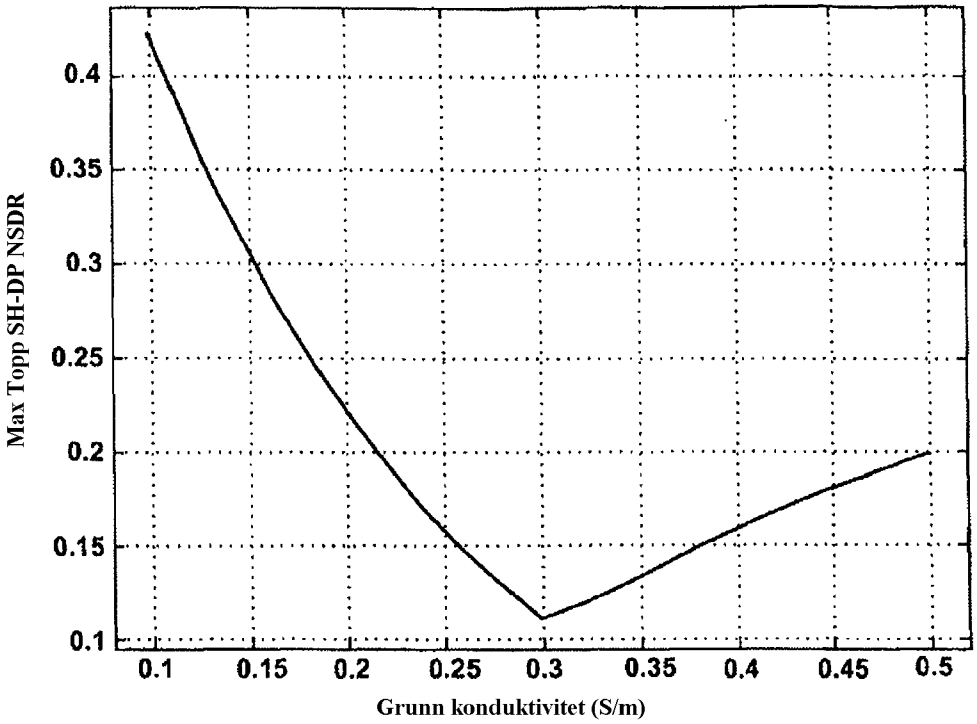

Max Topp SH-DP NSDR
0.4
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.1
0.15
0.2
0.25
0.3
0.35
0.4
0.45
0.5
Grunn konduktivitet (S/m)

Fig. 11

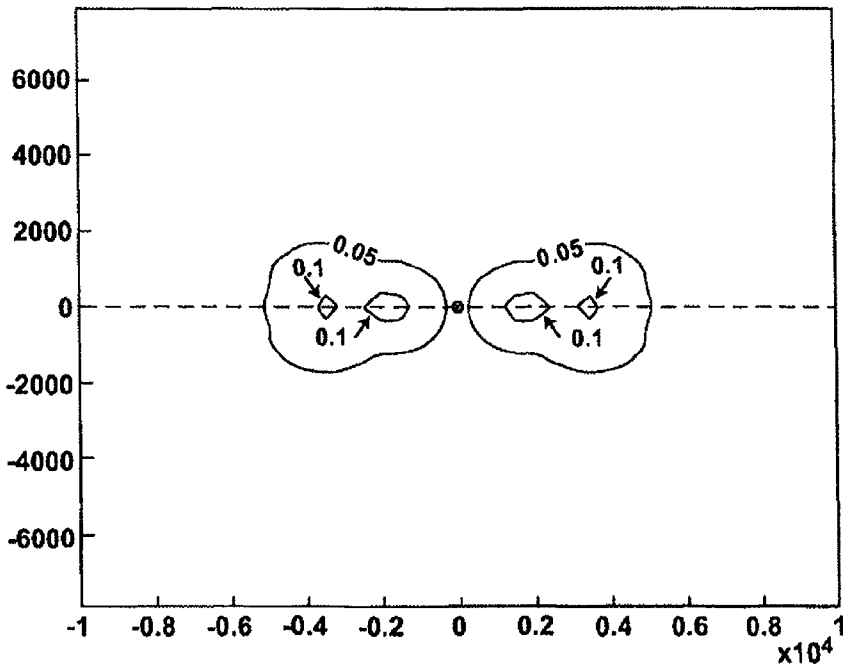

6000
4000
2000
0
-2000
-4000
-6000
0.05
0.1
0.1
0.05
0.1
0.1
-1
-0.8
-0.6
-0.4
-0.2
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
x10^4

Fig. 12

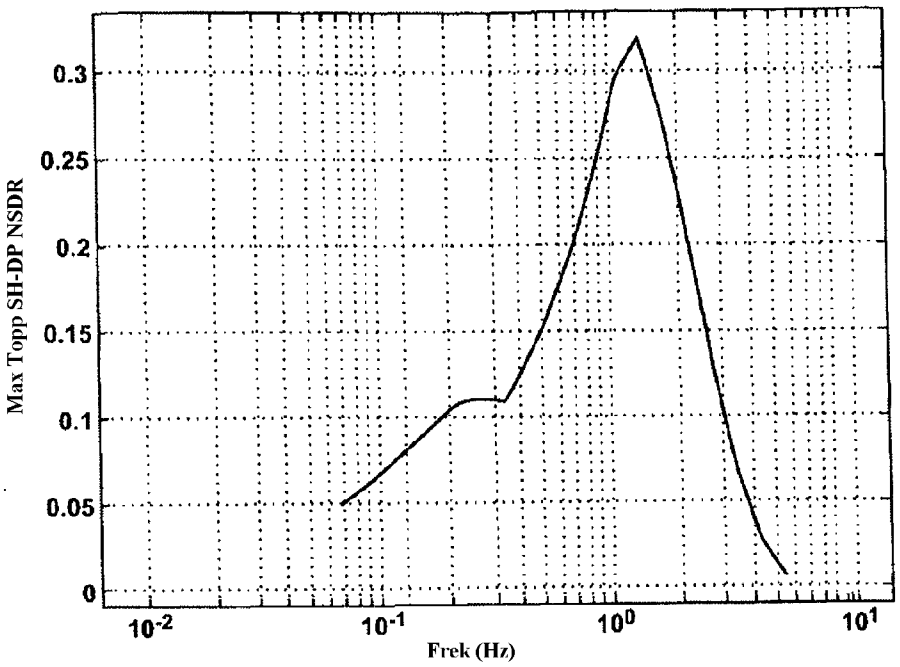

Max Topp SH-DP NSDR
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
10^{-2}
10^{-1}
10^{0}
10^{1}
Frek (Hz)

Fig. 13

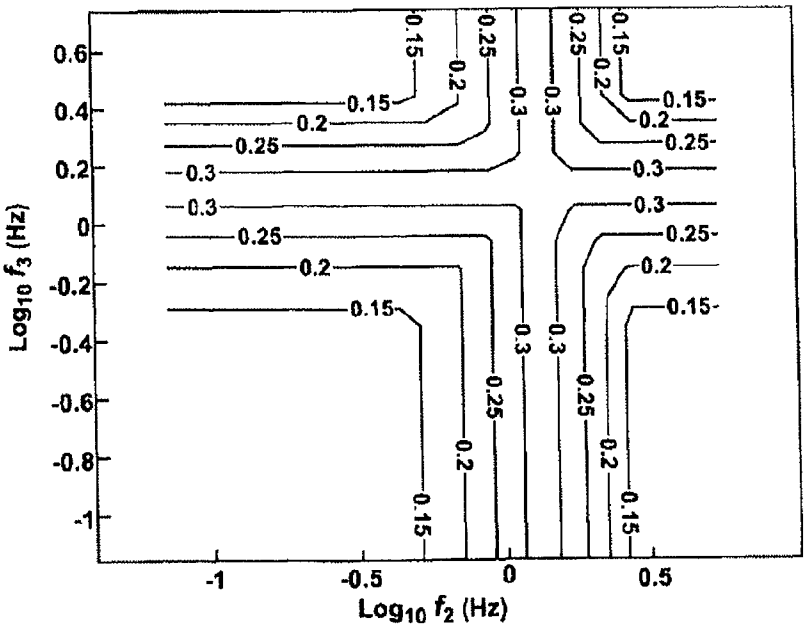

$\text{Log}_{10}\, f_3$ (Hz)
$\text{Log}_{10}\, f_2$ (Hz)
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1
-0.5
0.5
0.15
0.2
0.25
0.3

Fig. 14

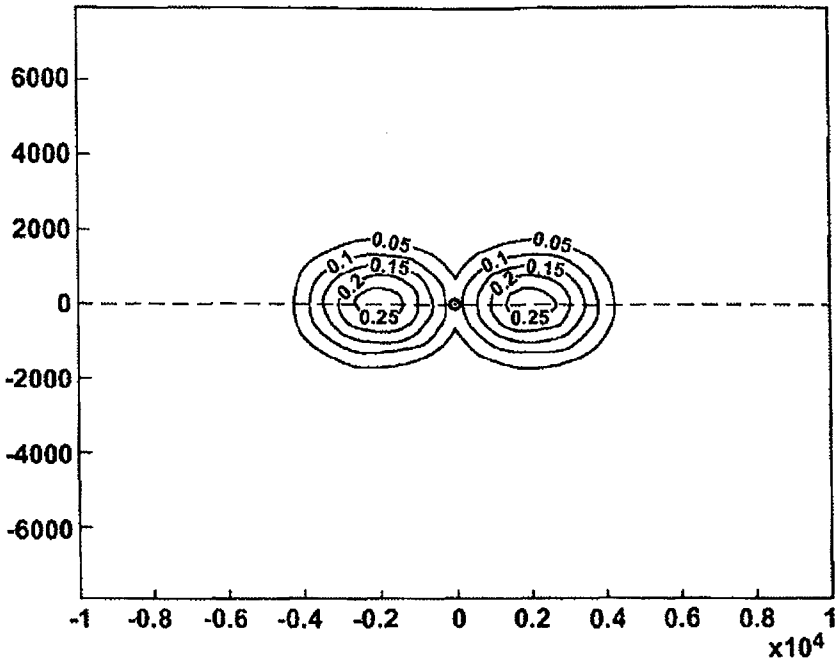

6000
4000
2000
0
-2000
-4000
-6000
-1
-0.8
-0.6
-0.4
-0.2
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
x10^4
0.05
0.1
0.15
0.2
0.25

Fig. 15

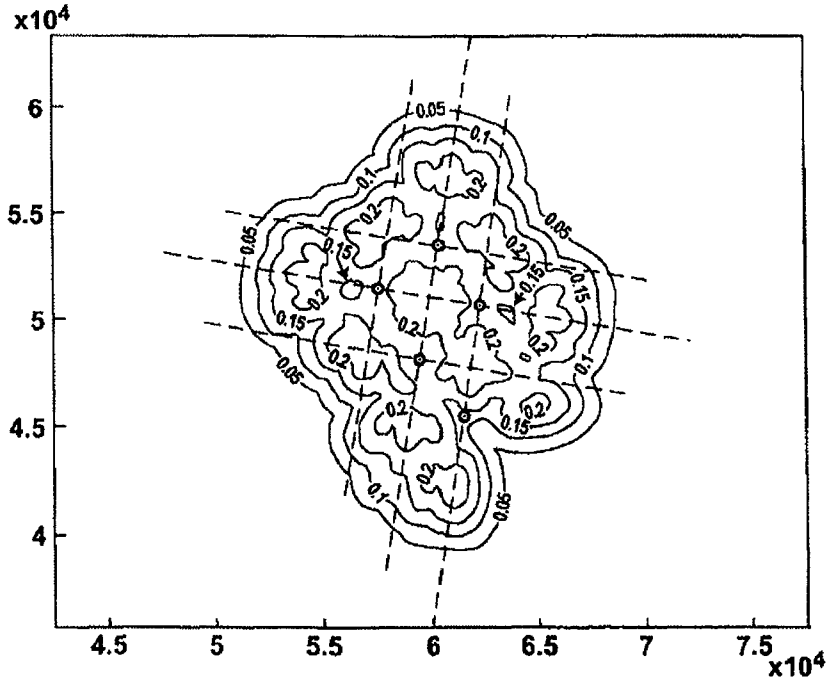

x10^4
6
5.5
5
4.5
4
4.5
5
5.5
6
6.5
7
7.5
x10^4
0.05
0.1
0.15
0.2

Fig. 16

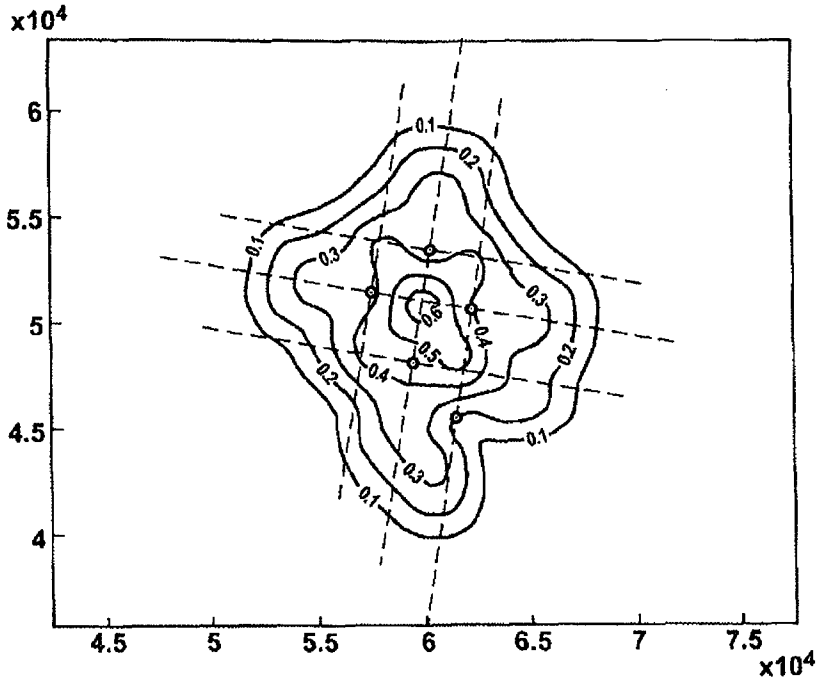

x10^4
6
5.5
5
4.5
4
4.5
5
5.5
6
6.5
7
7.5
x10^4
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6

Fig. 17

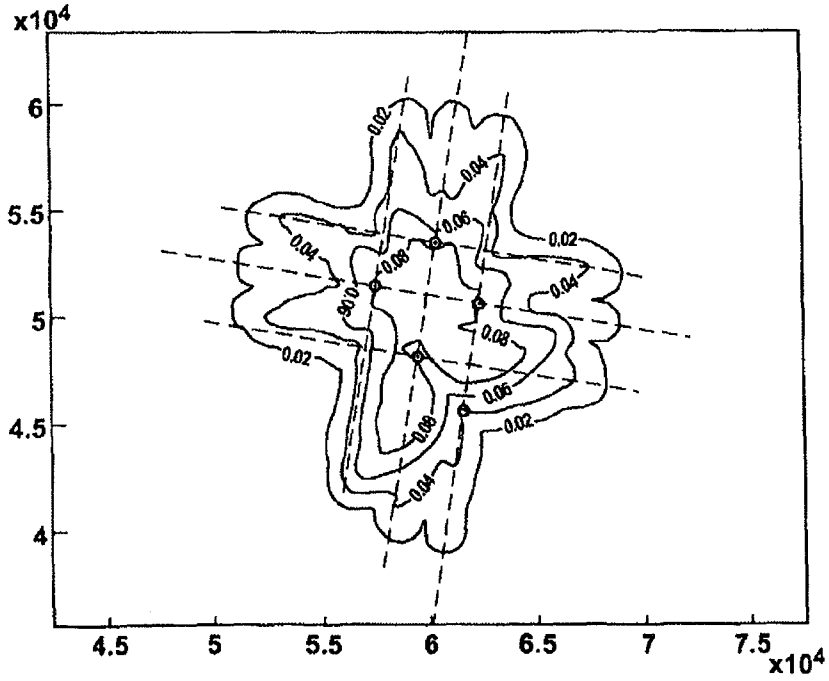

x10^4
6
5.5
5
4.5
4
4.5
5
5.5
6
6.5
7
7.5
x10^4
0.02
0.04
0.06
0.08
0.10

Fig. 18

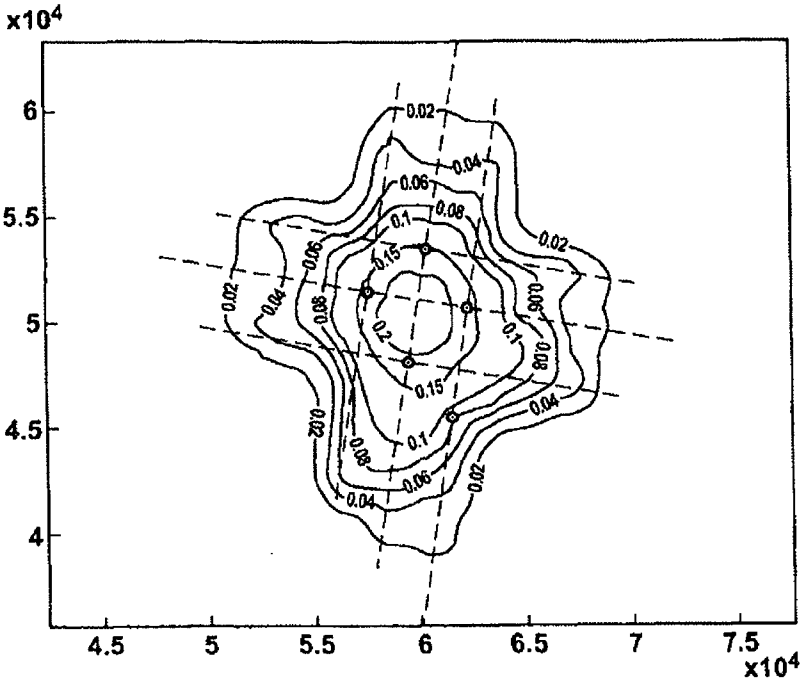

x10^4
6
5.5
5
4.5
4
4.5
5
5.5
6
6.5
7
7.5
x10^4
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
0.15
0.2

Fig. 19

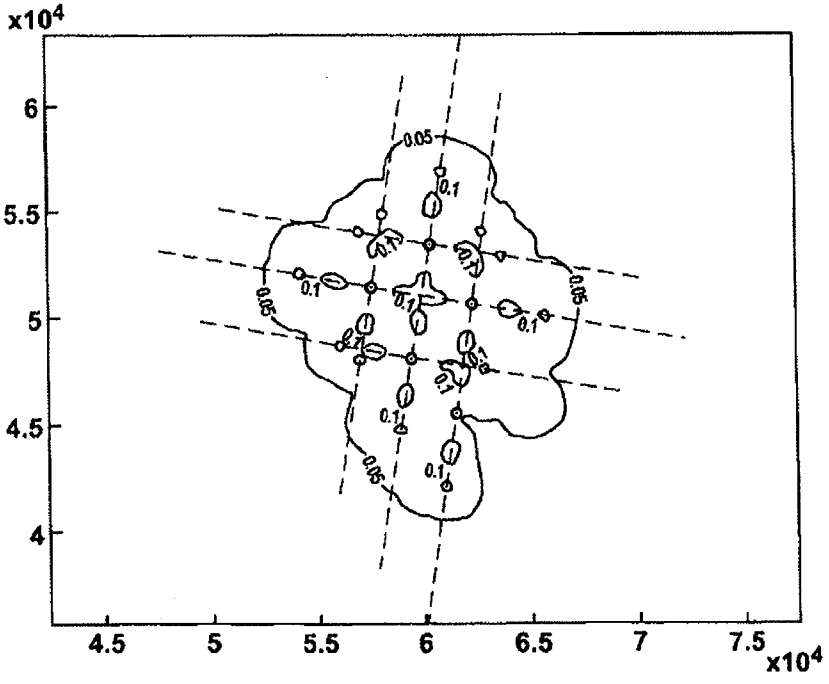

x10^4
6
5.5
5
4.5
4
4.5
5
5.5
6
6.5
7
7.5
x10^4
0.05
0.1

Fig. 20

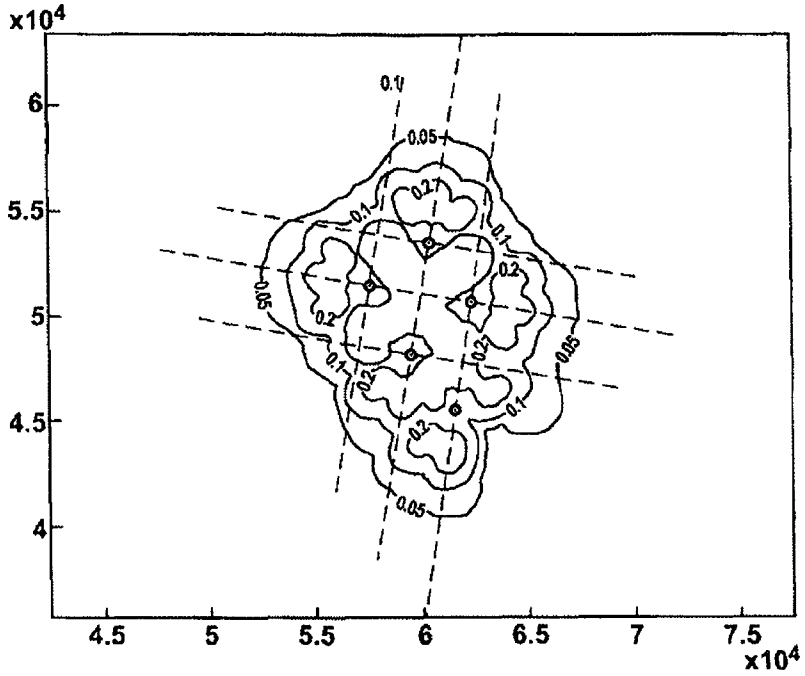

x10^4
6
5.5
5
4.5
4
4.5
5
5.5
6
6.5
7
7.5
x10^4
0.1
0.05
0.2
0.1
0.2
0.05
0.2
0.1
0.2
0.2
0.05
0.1
0.2
0.05

Fig. 21

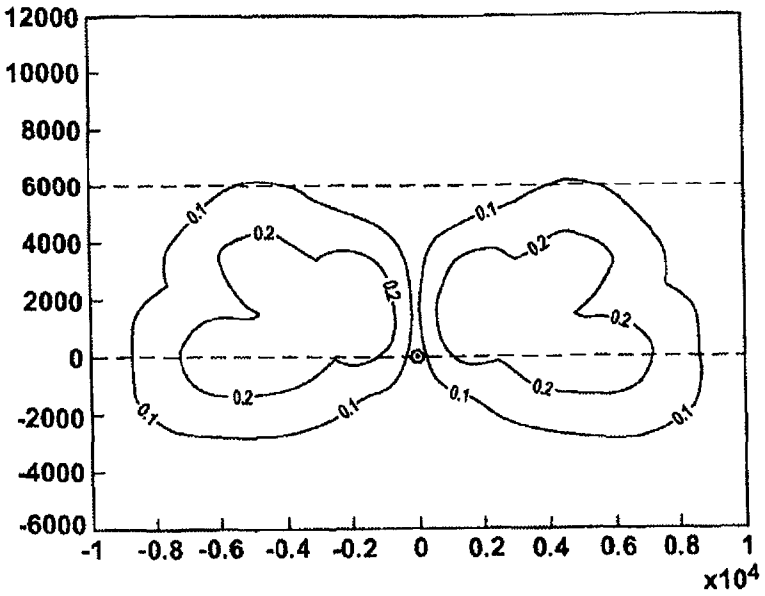

12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
-2000
-4000
-6000
-1
-0.8
-0.6
-0.4
-0.2
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
x10^4
0.1
0.2

Fig. 22

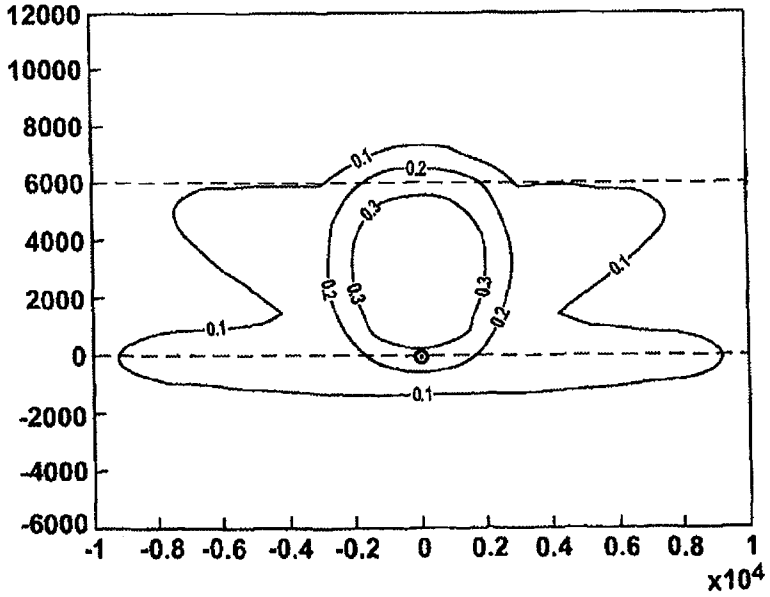

12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
-2000
-4000
-6000
-1
-0.8
-0.6
-0.4
-0.2
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
x10^4
0.1
0.2
0.3

Fig. 23

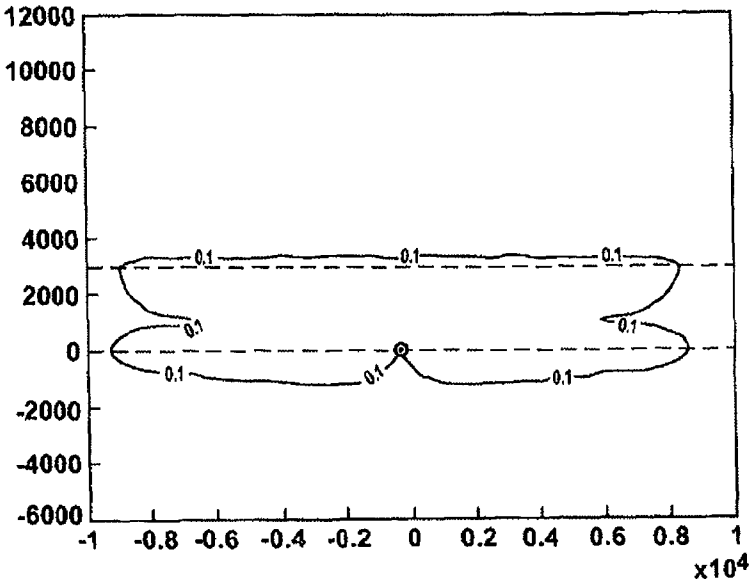

12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
-2000
-4000
-6000
-1
-0.8
-0.6
-0.4
-0.2
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
x10^4
0.1

Fig. 24

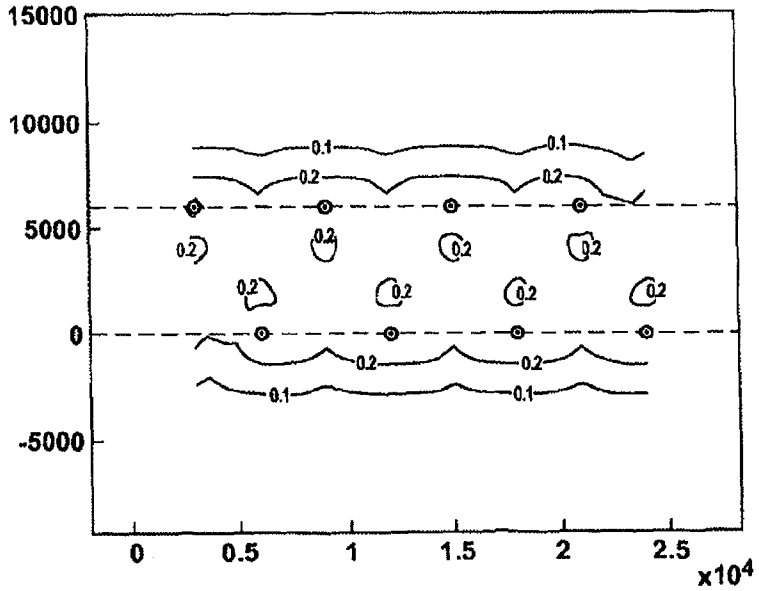

15000
10000
5000
0
-5000
0
0.5
1
1.5
2
2.5
x10^4
0.1
0.2

Fig. 25

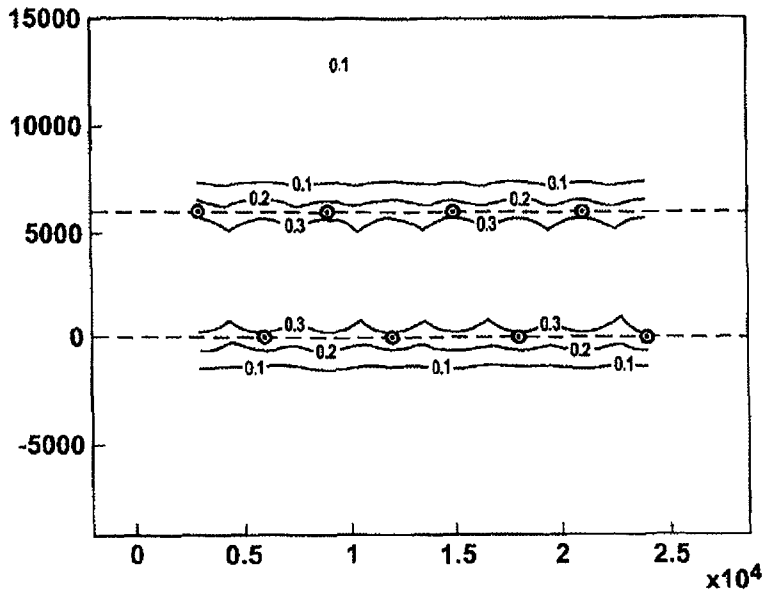

15000
10000
5000
0
-5000
0.1
0.2
0.3
0
0.5
1
1.5
2
2.5
x10^4

Fig. 26

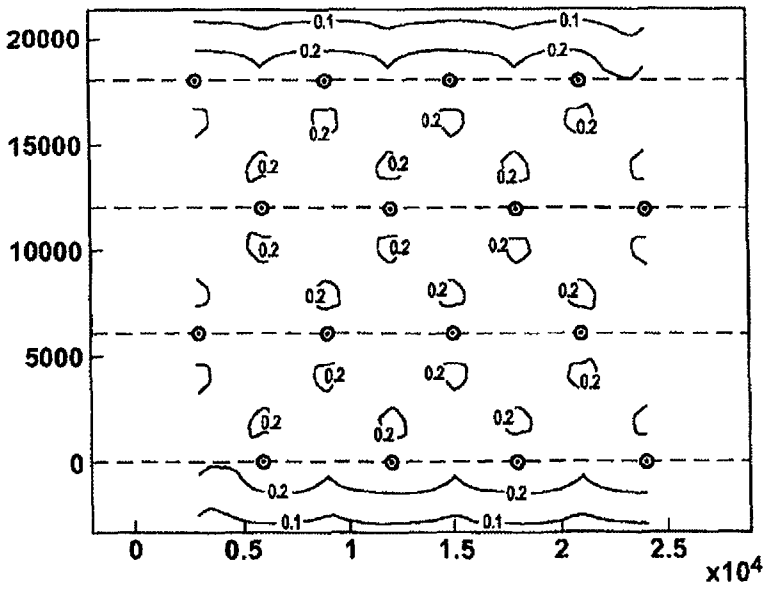

20000
15000
10000
5000
0
0.1
0.2
0
0.5
1
1.5
2
2.5
x10^4

Fig. 27

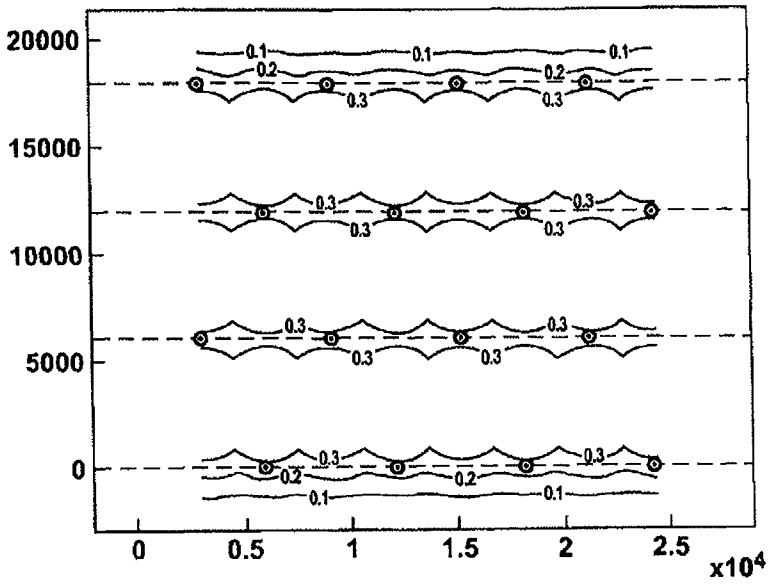

20000
15000
10000
5000
0
0.1
0.2
0.3
0
0.5
1
1.5
2
2.5
x10^4

Fig. 28

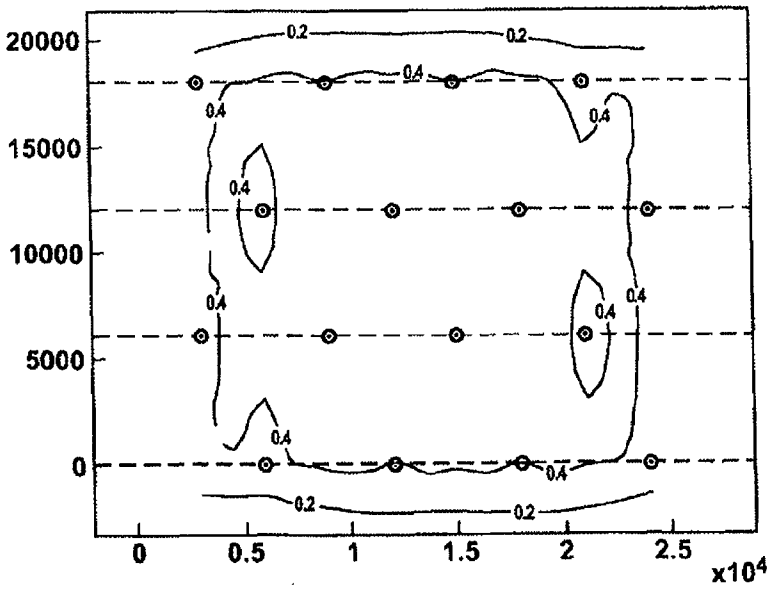

20000
15000
10000
5000
0
0.2
0.4
0
0.5
1
1.5
2
2.5
x10^4

Fig. 29