



(12) **PATENT**

(19) NO

(11) **335692**

(13) **B1**

NORGE

(51) Int Cl.

G01V 3/38 (2006.01)

G01V 3/12 (2006.01)

Patentstyret

(21)	Søknadsnr	20045628	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr	2003.05.21 PCT/GB2003/02164
(22)	Inng.dag	2004.12.23	(85)	Videreføringsdag	2004.12.23
(24)	Løpedag	2003.05.21	(30)	Prioritet	2002.05.24, GB, 0212052
(41)	Alm.tilgj	2005.01.19			
(45)	Meddelt	2015.01.26			
(73)	Innehaver	ElectroMagnetic GeoServices AS, Stiklestadveien 1, 7041 TRONDHEIM, Norge			
(72)	Oppfinner	Lasse Amundsen, Hoeggveien 54, 7036 TRONDHEIM, Norge			
(74)	Fullmektig	Tandbergs Patentkontor AS, Postboks 1570 Vika, 0118 OSLO, Norge			

(54)	Benevnelse	Fremgangsmåte for å bestemme naturen for strata under sjøbunnen omfattende analyse av den registrerte oppoverrettede elektromagnetiske bølgefeltkomponent
(56)	Anførte publikasjoner	URSIN, B: Review of elastic and electromagnetic wave propagation in horizontally layered media. GEOPHYSICS, 1983.08.01. SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS, US. Vol. 48, Nr. 8. Sider: 1063 - 1081. ISSN 0016-8033. XP002251630. US 4168484 A US 6101448 A
(57)	Sammendrag	

Fremgangsmåte for å behandle en elektromagnetisk bølgefeltrespons under logging på sjøbunnen. Bølgefeltet deles opp slik at dets komponenter i retningen oppover og nedover skilles fra hverandre, idet den siste komponenten representerer refleksjoner fra sjøoverflaten, mens den første komponenten representerer refleksjoner og refraksjoner fra strata nede i sjøbunnen, og føres til analyse.

Fagfelt

Denne oppfinnelse gjelder innhenting av elektromagnetiske data og behandling av slike data. Særlig gjelder oppfinnelsen et system og en fremgangsmåte for å skille de enkelte komponenter fra hverandre i et elektromagnetisk bølgefelt.

Bakgrunn

Marin elektromagnetisk undersøkelse er et viktig verktøy for lokalisering av hydrokarbonreservoarer til havs og å overvåke hydrokarbonproduksjonen under utvinning for å styre reservoarutnyttelsen. En kjent fremgangsmåte for marin elektromagnetisk teknikk involverer bruken av en elektromagnetisk kilde og mottakerkabler slik det er beskrevet i vårt patentskrift WO 01/57555. Elektromagnetisk energi som genereres i denne kilde blir sendt ut både oppover i vannsøylen over og nedover i formasjonen under sjøbunnen. De bølger som sendes nedover blir da delvis reflektert og avbøyd i de enkelte lag nede i grunnen, og energien i de reflekterte og avbøyde bølger vil gå oppover fra disse lag og kunne registreres i en mottakersammenstilling (et array). Særlig kjenner man til at hydrokarbonreservoarer gir kraftig energispredning ved bryting, og dette er av interesse for avbildning av hydrokarbonforekomstene.

Elektromagnetisk undersøkelse kompliseres imidlertid ved bølger som mottas i mottakersammenstillingen, som nedovergående refleksjons- og refraksjonsenergi, etter refleksjon og bryting i grenseflaten mellom luft og vann ved vannoverflaten. Denne grenseflate er egentlig en effektiv reflektor og et effektivt brytningsmedium, og følgelig vil de bølger som brer seg nedover være vanskelige å skille fra de oppovergående bølger fra en flate nede i grunnen. Den nedoverrettede energi skyldes både direkte utbredelse fra den elektromagnetiske kilde etter refleksjon fra grenseflaten mellom luft og vann, og en energi som først er reflektert fra en flate i grunnen og deretter går opp til grenseflaten luft/vann.

Refleksjoner og bryting i vannoverflaten representerer altså et betydelig problem. Dersom slike reflekterte eller brukte bølger ikke blir dempet tilstrekkelig vil de nemlig kunne interferere med og overlappe primære refleksjoner og brytinger fra en flate i grunnen.

På denne bakgrunn er det et mål med oppfinnelsen å komme frem til en fremgangsmåte for å behandle et elektromagnetisk bølgefelt (et EM-bølgefelt) hvor denne vanskelighet reduseres til et minimum.

Av dokumenter som viser kjent teknikk nevnes:

URSIN, B: «Review of elastic and electromagnetic wave propagation in horizontally layered media». GEOPHYSICS, 1983.08.01. SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS, US. Vol. 48, Nr. 8. Sider: 1063 – 1081. ISSN 0016-8033 omhandler en gjennomgang av elastisk og elektromagnetisk bølgeutbredelse i horisontalt lagdelte media, og beskriver bølgefeltseparasjon for elektromagnetiske bølgefelt.

US4168484A omhandler måling av enten usammenhengende eller kontinuerlig impedans-overganger i ulike medier for å identifisere eller avgrense deres egenskaper og natur ved å overføre strålingsenergi til slike medier for å produsere reflekterte bølger derfra. Omfattende dekonvolving av de utgående og returnerende bølger, og integrere den resulterende refleksjon impuls-respons-funksjon, slik som å muliggjøre hensiktsmessig tolkning av det resulterende bilde for identifisering og beslektede formål.

US6101448A omhandler fremgangsmåte for svekking av multipler i signaler registrert under en marin seismisk undersøkelse omfattende bruk av et flerkomponent datasett fra undersøkelsen, og summere valgte komponenter av datasettet etter filtrering av komponenter med et filter som kombinerer registrerte data fra mer enn en mottakerplassering og opererer uten å skille mellom P- og S-bølgedata.

Oppsummering

Således har man ifølge oppfinnelsen kommet frem til en fremgangsmåte for å behandle et slikt bølgefelt, ved å dekomponere det til eller løse det opp i sine enkelte bølgefeltkomponenter, nemlig de oppoverrettede og nedoverrettede bestanddeler og deretter analysere den oppoverrettede bestanddel i form av bølgefeltkomponenter. Optimal behandling, analyse og tolkning av elektromagnetiske data krever imidlertid full informasjon om bølgefeltet i sin opprinnelse, slik at dette kan løses opp slik at de oppoverrettede og nedoverrettede komponenter kan skilles fra hverandre.

På et sted like over eller under sjøbunnen vil refleksjoner og refraksjoner ved vannoverflaten alltid være nedoverrettede bølgemodi, og de refleksjoner og refraksjoner som har interesse fra en flate nede i grunnen vil være motsattrettede, nemlig oppoverrettede bølgemodi. Oppløsningen eller dekomponeringen av det elektromagnetiske bølgefelt til oppoverrettede og nedoverrettede komponenter like over eller under sjøbunnen vil bringe vannoverflaterrefleksjonene og -refraksjonene til den nedoverrettede komponent, mens flaterefleksjoner fra grunnen og refraksjoner i denne vil inneholdes i den oppoverrettede komponent.

Det er således et ytterligere mål med denne oppfinnelse å komme frem til en teknikk som deler opp de elektromagnetiske bølger som er registrert langs en eller flere mottakersammenstillinger, til oppoverrettede og nedoverrettede bølgekomponenter.

Fortrinnsvis utføres denne oppløsning av bølgefeltet til sine enkelte komponenter ved bruk av de kjente Maxwells likninger:

$$\Delta x E(x, t) = \mu(z) \delta_t H(x, t) \quad (1)$$

$$\Delta x H(x, t) = [\sigma(z) + \epsilon(z) \delta_t] E(x, t) \quad (2)$$

for elektriske og magnetiske felter, henholdsvis i et isotropisk medium, hvor:

$x E$ og $x H$ egentlig skulle vært skrevet $\times E$ og $\times H$, idet krysssymbolet betyr vektormultiplikasjon med det elektriske felt E hhv. magnetfeltet H , hvor $x = (x_1, x_2, x_3)$ angir et fast koordinatsystem hvis dybdeakse er rettet positivt nedover og $x_3 = z$, og hvor μ er magnetisk permeabilitet, ϵ er magnetisk permittivitet og σ er elektrisk ledningsevne, alle som funksjon av høyden z : $\mu = \mu(z)$, $\epsilon = \epsilon(z)$ og $\sigma = \sigma(z)$.

Denne teknikk kan brukes på elektromagnetiske data som er registrert over et arealgitter, langs en profil (linje) eller i enkelte mottakerstasjoner. Hver registrert komponent av det elektromagnetiske bølgefelt bør kalibreres på riktig måte før oppløsningsteknikken anvendes. En slik kalibrering sikrer at feltkomponentene så godt som mulig tilfredsstiller Maxwells likninger, og fortrinnsvis omvandles likningene (1) og (2) ovenfor ved bruk av en fouriertransformasjonsfunksjon med hensyn til tid og horisontalkoordinat i rommet.

Det er et ytterligere mål med oppfinnelsen å komme frem til en tilnærmings-teknikk som egner seg for tilpasning og bruk for registrerte elektromagnetiske data fra separate mottakerstasjoner, dvs. hvor man ikke trenger noen summering eller integrasjon over disse.

Fortrinnsvis utledes den oppoverrettede komponent av EM-bølgefeltet ved hjelp av følgende formler:

$$U^{(E1)} = \frac{1}{2}(E_1 - 1/CE H_2) \quad (50)$$

$$U^{(E2)} = \frac{1}{2}(E_1 - 1/CE H_2) \quad (51)$$

Der betyr $U^{(E1)}$ den oppoverrettede komponent av E_1 , idet E_1 er det elektriske felt i en første horisontal retning, $U^{(E2)}$ er den oppoverrettede komponent av E_2 , og E_2 er det elektriske felt i andre horisontal retning. Videre er H_1 og H_2 magnetfeltet i den første henholdsvis andre retning, C er utbredelseshastigheten for bølgene, og E er den komplekse permittivitet.

Ved å bruke Maxwells likninger får man på denne måte en ny fremgangsmåte for oppløsning av et marint elektromagnetisk bølgefelt til oppoverrettede og nedoverrettede bølgekomponenter. Virkningene som skyldes grenseflaten luft/vann kan da fjernes eller neddempes i et opp/ned-oppløsningstrinn. Analysen fører til resultater uttrykt ved at
 5 filteret for filtrering av bølgenummer eller utbredelseshastighet ("langsomhet") kan multipliseres med de elektromagnetiske data etter fouriertransformasjon, til et domene eller plan for nettopp bølgenummeret eller "langsomheten". Etter bølgefeltoppløsningen blir de filtrerte data inversfouriertransformerte til et romdomene eller -plan for ytterligere prosessering, analyse eller tolkning. For vertikalgående plane bølger vil oppløsnings-
 10 filtrene være uavhengige av "langsomheten", hvorved filtrene blir enkle skalare verdier. Bølgefeltoppløsningen kan deretter utføres direkte i romdomenet. I dette tilfelle utføres skillet mellom oppover- og nedoverrettede bølgekomponenter for hver enkelt mottakerstasjon, i det elektromagnetiske eksperiment, og samme skalamodell kan brukes til å løse opp på tilnærmet måte det elektromagnetiske bølgefelt i oppoverrettede og nedoverrettede
 15 komponenter, også for det elektromagnetiske bølgefelt som brer seg utover i ikke vertikal retning.

For separeringen i oppover- og nedoverrettet bølgebevegelse like over sjøbunnen vil oppløsningsfiltrene være avhengige av vannets materialparametere. For slik komponentoppdeling like under sjøbunnen trengs informasjon til filtrene om den komplekse
 20 bølgehastighet og den komplekse permittivitet (eller resistiviteten, den inverse størrelse av permittiviteten) av sjøbunnmaterialet, eller et estimat over denne hastighet må utføres.

I og med oppfinnelsen har man således en fremgangsmåte for å bestemme naturen av de enkelte strata under sjøbunnen, og en fremgangsmåte for å utnytte dette går ut på å påtrykke et elektromagnetisk bølgefelt på disse strata, registrere en respons på påtrykket
 25 og behandle bølgefeltet som beskrevet ovenfor, idet disse stratas natur vil kunne utledes ved analyse av den oppoverrettede komponent i den registrerte bølgefeltrespons.

Fortrinnsvis påtrykkes EM-feltet ved hjelp av en sender som anordnes ved eller på sjøbunnen, og bølgefeltresponsen registreres i en mottaker som også anordnes der. Fortrinnsvis sendes ved en frekvens på mellom 0,01 og 20 Hz.

Antennen og mottakers med kan være dipolantenne, men andre sender- og mottakerutrustninger kan naturligvis også brukes. Bølgefeltet påtrykkes gjerne i perioder på mellom 3 sekunder og 60 minutter.

De nødvendige magnetiske målinger kan tas ved hjelp av kjente magnetotelluriske instrumenter, eller man kan bruke integrert måleutrustning for registrering av både elektriske og magnetiske felter.

Beskrivelsen av oppfinnelsen nevner her sjøen/havet og sjøbunnen, men det er også klart at dette like gjerne kan gjelde innenlands marine systemer i forbindelse med vannmasser, så som innsjøer, elvedeltaer etc.

Oppfinnelsen kan i praksis utføres på forskjellig måte, og én tilnærming for oppløsning av bølgefeltet skal nå gjennomgå i detalj som et eksempel, slik at det illustreres hvordan utledningen av formel for de oppoverrettede bølgefeltkomponenter gjøres.

Først skal Maxwells kjente likninger gjennomgå, deretter vises hvordan det elektromagnetiske bølgefelt kan løses opp i sine enkelte komponenter, nemlig oppoverrettede og nedoverrettede bølger.

En liste over de mest brukte symboler er gitt i tillegg A.

Maxwells likninger

Vi skal først vise hvordan Maxwells likninger kan transformeres til det vi her vil kalle "det frekvens-horisontale bølgenummerdomene". La x være lik (x_1, x_2, x_3) og angi et fast koordinatsystem hvis dybdeakse x_3 , her også kalt sett, som har positiv retning nedover fra horisontalplanet x_1, x_2 . I det aktuelle tilfelle antas at sjøbunnen har tre materialparametere av interesse: Den magnetiske permeabilitet μ , den magnetiske permittivitet ϵ og den elektriske ledningsevne σ . Disse tre størrelser regnes ikke å variere i horisontalplanet x_1, x_2 , idet dette da uttrykkes som

$$\mu = \mu(z); \quad \epsilon = \epsilon(z); \quad \sigma = \sigma(z).$$

Maxwells likninger for det elektriske og magnetiske felt vil i samsvar med den konvensjonelle lære være, for et isotropisk medium:

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = -\mu(z) \partial_t \mathbf{H}(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{x}, t) = [\sigma(z) + \epsilon(z) \partial_t] \mathbf{E}(\mathbf{x}, t) \quad (2)$$

hvor $\mathbf{E}$ er det elektriske felt og $\mathbf{H}$ er det magnetiske felt. Ved fouriertransformasjon som funksjon av tiden og horisontalplanet (x_1, x_2) fremkommer:

$$G(k_1, k_2, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dx dy dt \exp[-i(k_1 x_1 + k_2 x_2 - \omega t)] g(x_1, x_2, t) \quad (3)$$

og dens inverse uttrykk:

$$g(x_1, x_2, t) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dk_1 dk_2 d\omega \exp[i(k_1 x_1 + k_2 x_2 - \omega t)] G(k_1, k_2, \omega), \quad (4)$$

Fouriertransformasjonen av likningene 1 og 2 gir videre:

$$\partial_3 E_1 = -i\omega \left[-\frac{p_1 p_2}{\epsilon} H_1 + \left(\mu - \frac{p_1^2}{\epsilon} \right) (-H_2) \right] \quad (5)$$

$$\partial_3 E_2 = -i\omega \left[\left(\mu - \frac{p_2^2}{\epsilon} \right) H_1 - \frac{p_1 p_2}{\epsilon} (-H_2) \right] \quad (6)$$

$$-\partial_3 H_2 = -i\omega \left[\left(\epsilon - \frac{p_2^2}{\mu} \right) E_1 + \frac{p_1 p_2}{\mu} E_2 \right] \quad (7)$$

$$\partial_3 H_1 = -i\omega \left[\frac{p_1 p_2}{\mu} E_1 + \left(\epsilon - \frac{p_1^2}{\mu} \right) E_2 \right] \quad (8)$$

hvor $E_i = E_i(k_1, k_2, z, \omega)$ er det transformerte elektriske felt, etc. Videre er ϵ den komplekse permittivitet

$$\epsilon = \epsilon \left(1 + \frac{i\sigma}{\omega\epsilon} \right) \quad (9)$$

og

$$p_i = k_i/\omega \quad ; \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

Differensiallikningen på matrisevektor form

Likningene 5-8 kan skrives som en ordinær matrisevektor-differensiallikning

$$\partial_3 \mathbf{b} = -i\omega \mathbf{A} \mathbf{b}, \quad (11)$$

hvor $\mathbf{b}$ er en bølgevektor med rangen 4×1 som vist i likning 12 nedenfor:

$$b = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ -H_2 \\ H_1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Systemmatrisen A er en 4×4 matrise delt opp i fire 2×2 undermatriser hvis diagonalledd er null:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & A_1 \\ A_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Undermatrisene A_1 og A_2 i denne matrise er symmetriske:

$$A_1 = \begin{bmatrix} \mu - \frac{p_1^2}{\epsilon} & -\frac{p_1 p_2}{\epsilon} \\ -\frac{p_1 p_2}{\epsilon} & \mu - \frac{p_2^2}{\epsilon} \end{bmatrix}; \quad A_2 = \begin{bmatrix} \epsilon - \frac{p_2^2}{\mu} & \frac{p_1 p_2}{\mu} \\ \frac{p_1 p_2}{\mu} & \epsilon - \frac{p_1^2}{\mu} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

A_1 og A_2 er funksjoner av parametrene i Maxwellslikninger (og derfor også funksjoner av den tredje dimensjon, dybden x_3 eller z) og av størrelsen p_i gitt ved likning 10.

DEKOMPONERING I OPPOVER- OG NEDOVERRETTEDE BØLGER

For dekomponeringen av det elektromagnetiske felt i oppover- og nedoverrettede bølger vil det være nødvendig å finne de såkalte egenverdier og egenvektorer for systemmatrisen A for gitte bølgenumre og frekvenser. Bølgevektoren b kan dekomponeres i oppoverrettede bølger som det første ledd i formelen 15 nedenfor og i nedoverrettede bølger, som det andre ledd i samme form:

$$w = [U^T, D^T]^T, \quad (15)$$

$$\text{hvor } U^T = [U_1, U_2] \text{ og } D^T = [D_1, D_2], \text{ ut fra den lineære transformasjon } b = Lw, \quad (16)$$

hvor L er den lokale egenvektormatrise for A (det vil si at hver spalte i matrisen L er en egenvektor).

Siden L er egenvektormatrisen for A følger at $A = L\Lambda L^{-1}$, hvor Λ er diagonalmatrisen for de tilsvarende egenverdier av A :

$$\Lambda = \text{diag}[-\lambda_1, -\lambda_2, \lambda_1, \lambda_2] \quad (17)$$

Egenverdiene av A

Egenverdiene Λ er:

$$\lambda_1 = \lambda_2 \equiv q = (c^{-2} - p^2)^{1/2} \quad (18)$$

hvor

$$c^{-2} = \epsilon\mu \quad (19)$$

$$p^2 = p_1^2 + p_2^2 \quad (20)$$

Egenvektormatrisen av A

Egenvektormatrisen av A kan settes opp som :

$$L = \begin{bmatrix} \frac{p_1 p_2}{\epsilon q} & \frac{q_1^2}{\epsilon q} & -\frac{p_1 p_2}{\epsilon q} & -\frac{q_1^2}{\epsilon q} \\ -\frac{q_2^2}{\epsilon q} & -\frac{p_1 p_2}{\epsilon q} & \frac{q_2^2}{\epsilon q} & \frac{p_1 p_2}{\epsilon q} \\ 0 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

og dens inverse matrise blir da:

$$L^{-1} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -\frac{c^2 p_1 p_2 \epsilon}{q} & \frac{c^2 q_1^2 \epsilon}{q} & 0 & 1 \\ -\frac{c^2 q_2^2 \epsilon}{q} & \frac{c^2 p_1 p_2 \epsilon}{q} & -1 & 0 \\ \frac{c^2 p_1 p_2 \epsilon}{q} & -\frac{c^2 q_1^2 \epsilon}{q} & 0 & 1 \\ \frac{c^2 q_2^2 \epsilon}{q} & -\frac{c^2 p_1 p_2 \epsilon}{q} & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Oppoverrettede og nedoverrettede bølger

Fra likning (16) er disse bølger gitt ved likningen:

$$w = L^{-1}b \quad , \quad (23)$$

5 idet dette kan uttrykkes som:

$$10 \quad U_1 = \frac{1}{2} \left[-\frac{c^2 p_1 p_2 \epsilon}{q} E_1 + \frac{c^2 q_1^2 \epsilon}{q} E_2 + H_1 \right] \quad (24)$$

$$U_2 = \frac{1}{2} \left[-\frac{c^2 q_2^2 \epsilon}{q} E_1 + \frac{c^2 p_1 p_2 \epsilon}{q} E_2 + H_2 \right] \quad (25)$$

$$15 \quad D_1 = \frac{1}{2} \left[\frac{c^2 p_1 p_2 \epsilon}{q} E_1 - \frac{c^2 q_1^2 \epsilon}{q} E_2 + H_1 \right] \quad (26)$$

$$D_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{c^2 q_2^2 \epsilon}{q} E_1 - \frac{c^2 p_1 p_2 \epsilon}{q} E_2 + H_2 \right] \quad (27)$$

20

Som vist nedenfor er størrelsene U_1 , D_1 , U_2 og D_2 definert slik at

$$U_1 + D_1 = H_1 ; U_2 + D_2 = H_2 \quad (28)$$

25 Dette innebærer at U_1 og D_1 er den oppoverrettede henholdsvis nedoverrettede komponent i magnetfeltet H_1 , mens U_2 og D_2 er de tilsvarende komponenter i magnetfeltet H_2 . Skaleringen av disse bølger er imidlertid ikke unik. Nedenfor skal vi vise at disse bølger og gitt av likning 27 kan skaleres slik at deres sum akkurat blir de oppoverrettede henholdsvis nedoverrettede bølgekomponenter i de elektriske felt E_1 og E_2 , hvor de
30 oppoverrettede komponenter og dessuten de oppoverrettede komponenter i magnetfeltet H_1 og H_2 ikke vil inneholde nedoverrettede refleksjoner og refraksjonskomponenter forårsaket av sjøoverflaten. Etter dekomponering av det målte elektromagnetiske felt i oppoverrettede og nedoverrettede bølgefelt vil refleksjonene og refraksjonskomponentene fra overflaten måtte høre til den nedoverrettede del av feltene. Bølgefeltene i begge
35 retninger underlegges deretter invers fouriertransformasjon for å komme frem til romrepresentasjon, ved bruk av likning 4.

Bølgekomponentene i begge retninger, av H_1 og H_2 .

Likning 28 er lett å verifisere ved å summere U_1 og D_1 henholdsvis U_2 og D_2 ut fra likning 27. Bølgefeltene U_1 og D_1 tolkes som de oppover- henholdsvis nedoverrettede komponenter i magnetfeltkomponenten H_1 , mens bølgefeltene U_2 og D_2 tolkes som de oppoverrettede og nedoverrettede komponenter av magnetfeltkomponenten H_2 . Det innføres nå:

$$U^{(H_1)} = U_1 \quad ; \quad D^{(H_1)} = D_1 = H_1 - U^{(H_1)} \quad (29)$$

$$U^{(H_2)} = U_2 \quad ; \quad D^{(H_2)} = D_2 = H_2 - U^{(H_2)} \quad (30)$$

slik at

$$H_1 = U^{(H_1)} + D^{(H_1)} \quad ; \quad H_2 = U^{(H_2)} + D^{(H_2)} \quad (31)$$

Særlig er de oppoverrettede komponenter (se likningene 24 og 25) av interesse:

$$U^{(H_1)} = \frac{1}{2} \left[H_1 - \frac{c^2 \epsilon}{q} (p_1 p_2 E_1 - q_1^2 E_2) \right] \quad (32)$$

$$U^{(H_2)} = \frac{1}{2} \left[H_2 + \frac{c^2 \epsilon}{q} (p_1 p_2 E_2 - q_2^2 E_1) \right] \quad (33)$$

Likningene 32 og 33 er de mest generelle formler for den elektromagnetiske bølgefelt dekomponering av magnetfeltkomponentene til oppoverrettede bølger. Skjemaene krever at mottakerstasjonene må være fordelt over et areal på sjøbunnen, slik at det elektromagnetiske bølgefelt kan transformeres til det såkalte "langsomhetsdomene". Dekomponeringsskjemaene (32) og (33) vil være gyldige for et tredimensjonalt inhomogent område i grunnen.

Det spesielle tilfelle hvor: $p_2 = 0$

Når et elektromagnetisk eksperiment kjøres langs en enkelt profil vil de tilhørende elektromagnetiske data bare tilgjengelige langs en linje. Magnetfeltkomponentene H_1 og H_2 kan da på riktig måte dekomponeres i sine oppoverrettede og

nedoverrettede bølger dersom man antar at grunnen har dimensjonen 2,5 D (idet dette betyr at det ikke foreligger noen variasjoner i mediumparametrene for grunnen i tverrprofilretningen). Uten tap av generalitet kan man da orientere koordinatsystemet slik at det elektromagnetiske bølgefelt kommer til å bre seg utover i horisontalplanet x_1, x_3 , slik at $p_2 = 0$. Da kan man sette inn $q_2 = c^{-1}$, $q = q_1$, i likning (32) og får da:

$$U^{(H_1)} = \frac{1}{2} (H_1 + c^2 q_1 \epsilon E_2) \quad (34)$$

Likning (34) viser at man for å fjerne den nedoverrettede reflekterte og refraksjonsfrembrakte energi fra magnetfeltet H_1 må kombinere registreringen av denne større H_1 med en registrering av et skalert (filtret) elektrisk felt E_2 . Tilsvarende vil den oppoverrettede komponent av H_2 -feltet være:

$$U^{(H_2)} = \frac{1}{2} \left(H_2 - \frac{\epsilon}{q_1} E_1 \right) \quad (35)$$

Likningene (34) og (35) er strengt gyldige bare under antakelsen av 2,5 D for grunnen (jorden). For enkle profildata over en 3D grunnantakelse ved likningene (34) og (35) kan disse fremdeles brukes som tilnærmede løsningselementer for å dempe den nedoverrettede energi i magnetfeltkomponentene H_1 og H_2 .

Spesialtilfelle: $p_1 = p_2 = 0$

Spesialtilfellet med vertikalt utbretteelektromagnetiske plane bølger med $p_1 = p_2 = 0$, slik at $q_1 = q_2 = q = c^{-1}$ gir ved innsetting i likningene (32) og (33):

$$U^{(H_1)} = \frac{1}{2} (H_1 + c \epsilon E_2) \quad (36)$$

$$U^{(H_2)} = \frac{1}{2} (H_2 - c \epsilon E_1) \quad (37)$$

Selv om likningene (36) og (37) bare strengt er gyldige for en vertikal plan bølgeutledning, brukt som en dekomponeringsfremgangsmåte for magnetfeltkomponentene kan de gi en brukbar tilnærmelse for bølgefeltdekomponeringen, også for plane bølger som brer seg ut i en annen retning enn den rent vertikale, så vel som for de komplette magnetfelter H_1 og H_2 . Merk at siden skaleringsfaktoren som brukes for de elektriske komponenter (feltkomponentene) ikke er avhengig av "langsomheten", kan likningene (36) og (37) implementeres i romdoménet. I dette spesielle tilfelle vil de data som registreres for magnetfeltene H_1 eller H_2 i hver mottakerstasjon kunne behandles uavhengig av hverandre.

De oppoverrettede og nedoverrettede komponenter av E_1 og E_2

Ved riktig skalering av de oppoverrettede og nedoverrettede bølger U_1 , $U_2 D_1$ og D_2 kan de tilsvarende komponenter av de elektriske felt E_1 og E_2 finnes. Skaleringen må velges slik at likningene 38 og 39 nedenfor tilfredsstilles:

$$5 \quad (38)$$

$$E_1 = U^{(E_1)} + D^{(E_1)} \quad (39)$$

$$E_2 = U^{(E_2)} + D^{(E_2)}$$

med

$$U^{(E_1)} = U_1^{(E_1)} + U_2^{(E_1)} \quad (40)$$

$$10 \quad D^{(E_1)} = D_1^{(E_1)} + D_2^{(E_1)} \quad (41)$$

$$U^{(E_2)} = U_1^{(E_2)} + U_2^{(E_2)} \quad (42)$$

$$D^{(E_2)} = D_1^{(E_2)} + D_2^{(E_2)} \quad (43)$$

innføres nå:

$$U_1^{(E_1)} = \frac{p_1 p_2}{\epsilon q} U_1 \quad ; \quad U_2^{(E_1)} = -\frac{q_1^2}{\epsilon q} U_2 \quad ; \quad D_1^{(E_1)} = -\frac{p_1 p_2}{\epsilon q} D_1 \quad ; \quad D_2^{(E_1)} = \frac{q_1^2}{\epsilon q} D_2 \quad (44)$$

finnes at likning (38) tilfredsstilles, og at likningen nedenfor gjelder.

$$U^{(E_1)} = U_1^{(E_1)} + U_2^{(E_1)} = \frac{1}{2} \left[E_1 + \frac{1}{\epsilon q} (p_1 p_2 H_1 - q_1^2 H_2) \right] \quad (45)$$

20

Innføres nå:

$$U_1^{(E_2)} = \frac{q_2^2}{\epsilon q} U_1 \quad ; \quad U_2^{(E_2)} = -\frac{p_1 p_2}{\epsilon q} U_2 \quad ; \quad D_1^{(E_2)} = -\frac{q_2^2}{\epsilon q} D_1 \quad ; \quad D_2^{(E_2)} = \frac{p_1 p_2}{\epsilon q} D_2 \quad (46)$$

finnes at også likning (39) tilfredsstilles, og at likningen nedenfor også gjør det.

$$U^{(E_2)} = U_1^{(E_2)} + U_2^{(E_2)} = \frac{1}{2} \left[E_2 - \frac{1}{\epsilon q} (p_1 p_2 H_2 - q_2^2 H_1) \right] \quad (47)$$

5 Likningene (45) og (47) er de mest generelle formler for dekomponering av det elektromagnetiske bølgefelt til oppoverrettede bølger. Skjemaene krever også her at mottakerstasjonene er fordelt over et areal med en viss størrelse på sjøbunnen, slik at det elektromagnetiske bølgefelt kan transformeres til det samme "langsomhetsdomene" som for magnetfeltene. Dekomponeringsskjemaene (45) og (47) vil også være gyldige for en
10 tredimensjonal inhomogen grunn.

Spesialtilfellet $p_2 = 0$

Når et elektromagnetisk eksperiment kjøres langs en enkelt profil vil de tilhørende elektromagnetiske data bare tilgjengelige langs en linje. Magnetfeltkomponentene H_1 og H_2 kan da på riktig måte dekomponeres i sine oppoverrettede og
15 nedoverrettede bølger dersom man antar at grunnen har dimensjonen 2,5 D (idet dette betyr at det ikke foreligger noen variasjoner i mediumparametrene for grunnen i tverrprofilretningen). Uten tap av generalitet kan man da orientere koordinatsystemet slik at det elektromagnetiske bølgefelt kommer til å bre seg utover i horisontalplanet x_1, x_3 , slik at $p_2 = 0$. Da kan man sette inn $q_2 = c^{-1}$, $q = q_1$, i likning (45) og vil få:

20

$$U^{(E_1)} = \frac{1}{2} \left(E_1 - \frac{q_1}{\epsilon} H_2 \right) \quad (48)$$

Likning (48) viser at man for å fjerne den nedoverrettede reflekterte og refraksjonsgenererte energi fra det elektriske felt E_1 er nødvendig å kombinere
25 registreringen av dette felt med et skalert (filtrert) magnetfelt H_2 . Tilsvarende vil den oppoverrettede komponent av feltet E_2 være:

$$U^{(E_2)} = \frac{1}{2} \left(E_2 + \frac{1}{c^2 \epsilon q_1} H_1 \right) \quad (49)$$

Likningene (48) og (49) er imidlertid bare strengt gyldige når man antar at grunnen har tredimensjonaliteten 2,5 D. For enkle profildata over en full 3D representasjon, kan fremdeles likningene (48) og (49) brukes som en tilnærmet måte å dempe den nedoverrettede energi på, for de elektriske feltkomponenter E_1 og E_2 .

5 Spesialtilfelle: $p_1 = p_2 = 0$

Spesialtilfellet med vertikalt utbretteelektromagnetiske plane bølger med $p_1 = p_2 = 0$, slik at $q_1 = q_2 = q = c^{-1}$ gir ved innsetting i likningene (45) og (47):

$$U^{(E_1)} = \frac{1}{2} \left(E_1 - \frac{1}{c\epsilon} H_2 \right) \quad (50)$$

$$U^{(E_2)} = \frac{1}{2} \left(E_2 + \frac{1}{c\epsilon} H_1 \right) \quad (51)$$

Selv om likningene (50) og (51) bare strengt er gyldige for en vertikal plan bølgeutledelse, brukt som en dekomponeringsfremgangsmåte for magnetfeltkomponentene kan de gi en brukbar tilnærmelse for bølgefeltdekomponeringen, også for plane bølger som brer seg ut i en annen retning enn den rent vertikale, så vel som for de komplette elektriske felter E_1 og E_2 . Merk at siden skaleringsfaktoren som brukes for de elektriske komponenter (feltkomponentene) ikke er avhengig av "langsomheten", kan likningen (50) implementeres i romdoménet. I dette spesielle tilfelle vil de data som registreres for elektriske feltene E_1 eller E_2 i hver mottakerstasjon kunne behandles uavhengig av hverandre.

Tillegg A

- A: Systemmatrise
- B: bølgevektor som inneholder elektromagnetiske felt
- 5 ω : bølgevektor som inneholder oppoverrettede og nedoverrettede bølger
- L: egenvektormatrisen for A
- B: magnetisk flukstetthet
- H: magnetfelt $H = (H_1, H_2, H_3)$
- D: elektrisk forskyvningsfelt
- 10 E: elektrisk felt $E = (E_1, E_2, E_3)$
- J: strømtetthet
- $X = (x_1, x_2, x_3)$: Kartesiske koordinater
- $U^{(E1)}$: oppoverrettet komponent av E_1 ; $E_1 = U^{(E1)} + D^{(E1)}$
- $D^{(E1)}$: nedoverrettet komponent av E_1
- 15 $U^{(E2)}$: oppoverrettet komponent av E_2 ; $E_2 = U^{(E2)} + D^{(E2)}$
- $D^{(E2)}$: nedoverrettet komponent av E_2
- $U^{(H1)}$: oppoverrettet komponent av H_1 ; $H_1 = U^{(H1)} + D^{(H1)}$
- $D^{(H1)}$: nedoverrettet komponent av H_1
- $U^{(H2)}$: oppoverrettet komponent av H_2 ; $H_2 = U^{(H2)} + D^{(H2)}$
- 20 $D^{(H2)}$: nedoverrettet komponent av H_2
- c: bølgeutbredelseshastighet; $c = (\mu\epsilon)^{-1/2}$
- k: bølgenummer; $k = \omega/c$
- k_1 : horisontalt bølgenummer konjugert til x_1
- k_2 : horisontalt bølgenummer konjugert til x_2
- 25 p_1 : horisontal langsomhet $p_1 = k_1/\omega$

- p_2 : horisontal langsomhet $p_2 = k_2/\omega$
- p : $p^2 = p_1^2 + p_2^2$
- q : vertikal langsomhet; $q = \sqrt{c^{-2} - p_1^2 - p_2^2}$
- q_1 : $q_1^2 = c^{-2} - p_1^2$
- 5 q_2 : $q_2^2 = c^{-2} - p_2^2$
- z : $z = x_3$
- ρ_v : volumelektrisk ladningstetthet
- ρ : resistivitet; dens inverse verdi er konduktivitet eller ledningsevne
- ϵ : permittivitet
- 10 ϵ : kompleks permeabilitet
- μ : magnetisk permeabilitet
- σ : elektrisk konduktivitet, dens inverse er resistivitet eller motstand
- λ : egenvektor
- ω : vinkelfrekvens
- 15 ∂_t : den tidsderivate $\partial_t = \frac{\partial}{\partial t}$
- ∂_1 : den derivate i en første retning i rommet (planet); $\partial_1 = \frac{\partial}{\partial x_1}$
- ∂_2 : den derivate i en andre retning i rommet (planet); $\partial_2 = \frac{\partial}{\partial x_2}$
- ∂_3 : den derivate i dybderetningen (x_3 eller z); $\partial_3 = \frac{\partial}{\partial x_3}$

P a t e n t k r a v

5 1 Fremgangsmåte for å bestemme naturen hos strata under sjøbunnen, omfattende påtrykk av et elektromagnetisk (EM)-bølgefelt på strata og registre en EM-bølgefelt-respons,

karakterisert ved behandling av den registrerte bølgefeltrespons ved å dekomponere den til oppoverrettede og nedoverrettede bølgefeltkomponenter og utføre analyse av den
10 oppoverrettede bølgekomponent for således å utlede naturen av strata.

2 Fremgangsmåte ifølge krav 1,
karakterisert ved at EM-bølgefeltet påtrykkes ved hjelp av en sender som er anordnet ved eller på sjøbunnen.

15 3 Fremgangsmåte ifølge krav 1 eller 2,
karakterisert ved at EM-bølgefeltet sendes ut ved en frekvens mellom 0,01 og 20 Hz.

4 Fremgangsmåte ifølge ett av de foregående krav,
20 **karakterisert ved** at EM-bølgefeltet sendes ut ved en bølgelengde mellom 1S og 50S, idet S er tykkelsen av den overliggende grunn over de strata som undersøkes.

5 5 Fremgangsmåte ifølge ett av de foregående krav,
karakterisert ved at senderen omfatter en dipolantenne.

25 6 Fremgangsmåte ifølge ett av de foregående krav,
karakterisert ved at bølgefeltresponsen registreres ved hjelp av en mottaker anordnet ved eller på sjøbunnen.

30 7 Fremgangsmåte ifølge ett av de foregående krav,
karakterisert ved at mottakeren omfatter en dipolantenne.

8 Fremgangsmåte ifølge ett av kravene 1-6,
karakterisert ved at mottaker omfatter et detektorpar som omfatter midler for å
35 registrere EM-bølgefeltet og midler for å detektere et magnetfelt.

9 Fremgangsmåte ifølge krav 8,
karakterisert ved at detektorparet er anordnet i en enkelt enhet.

10 Fremgangsmåte ifølge krav 8 eller 9,
karakterisert ved at data fra ett av detektorparene brukes til å dekomponere det felt
5 som detekteres av det andre av detektorparene.

11 Fremgangsmåte ifølge ett av de foregående krav,
karakterisert ved at bølgefeltet detekteres ved hjelp av flere mottakere som er anordnet
over et areal på sjøbunnen.

10 12 Fremgangsmåte ifølge krav 11,
karakterisert ved at mottakerne er anordnet på line.

13 Fremgangsmåte ifølge krav 11 eller 12,
15 **karakterisert ved** at data fra en gruppe mottakere brukes til å dekomponere bølgefeltet.

14 Fremgangsmåte ifølge krav 11 eller 12,
karakterisert ved at data fra hver enkelt mottaker brukes uavhengig til å dekomponere
bølgefeltet.

20 15 Fremgangsmåte ifølge ett av kravene 6-14,
karakterisert ved at den ene eller hver enkelt mottaker forflyttes til en annen posisjon
mens senderen holdes stasjonær, hvoretter EM-bølgefeltet påtrykkes, detekteres og
analyseres.

25 16 Fremgangsmåte ifølge ett av de foregående krav,
karakterisert ved at bølgefeltet dekomponeres ved å gå ut fra antakelsen 2,5D, det vil
si at det ikke foreligger noen variasjon i mediumparametrene i tverrprofilretningen.

30 17 Fremgangsmåte ifølge ett av de foregående krav,
karakterisert ved at oppløsningen og analysen utføres ut fra antakelsen av vertikalt
utbredte plane bølger.