



FI000124019B

(12) **PATENTTIJULKAISU**
PATENTSKRIFT

(10) **FI 124019 B**

(45) Patentti myönnetty - Patent beviljats

14.02.2014

(51) Kv.lk. - Int.kl.

A61B 5/055 (2006.01)

G01R 33/20 (2006.01)

(21) Patenttihakemus - Patentansökning

20105313

(22) Saapumispäivä - Ankomstdag

26.03.2010

(24) Tekemispäivä - Ingivningsdag

26.03.2010

(41) Tullut julkiseksi - Blivit offentlig

27.09.2011

SUOMI – FINLAND

(FI)

PATENTTI- JA REKISTERIHALLITUS
PATENT- OCH REGISTERSTYRELSEN

(73) Haltija - Innehavare

1 •ELEKTA AB (publ), Kungstensgatan 18, 103 93 STOCKHOLM, SVERIGE, (SE)

(72) Keksijä - Uppfinnare

1 •Simola, Juha, Helsinki, SUOMI - FINLAND, (FI)

2 •Taulu, Samu, Helsinki, SUOMI - FINLAND, (FI)

(74) Asiamies - Ombud

Papula Oy, Mechelininkatu 1 a, 00180 Helsinki

(54) Keksinnön nimitys - Uppfinningens benämning

Kelajärjestelmien suunnittelumenetelmä halutun geometrian omaavien magneettikenttien luomiseksi

Förfarande för konstruering av spolsystem för att bilda magnetfält av önskad geometri

(56) Viitejulkaisut - Anförda publikationer

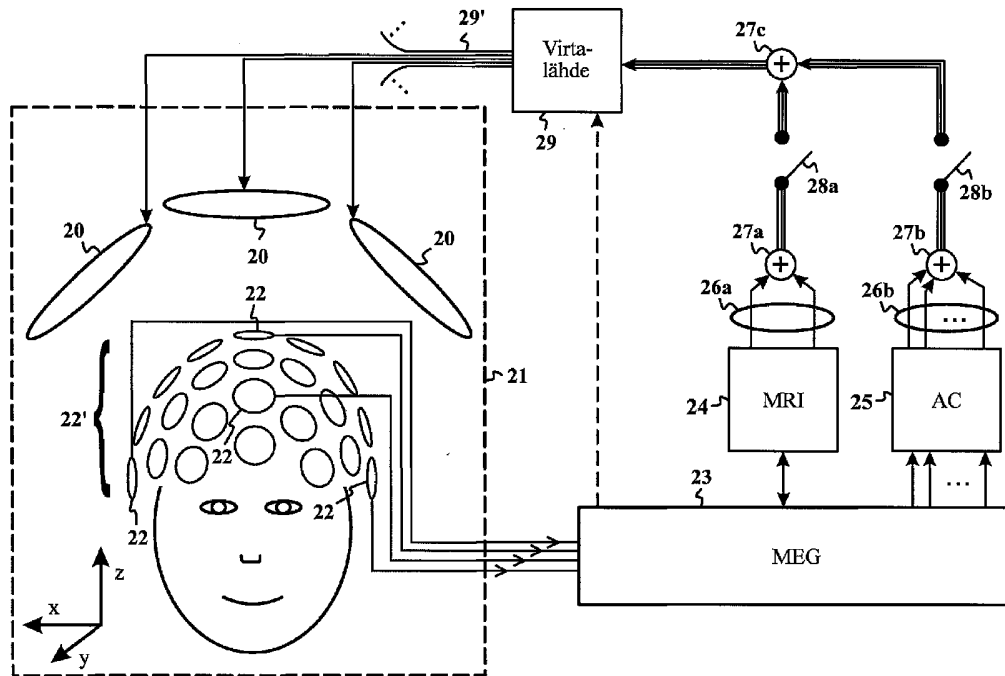
EP 1612576 A1,

Romeo, F. et al. "Magnet field profiling: analysis and correcting coil desing", Magnetic Resonance in Medicine, Maaliskuu 1984, Vol. 1, Issue 1, s. 44-65, Turner, R. "A target field approach to optimal coil design". Journal of Physics D: Applied Physics, Elokuu 1986, Vol. 19, No. 8, s. L147-L151, Poole, M. et al. "Minimax current density coil design". Journal of Physics D: Applied Physics, Maaliskuu 2010, Vol. 43, No. 9, 095001

(57) Tiivistelmä - Sammandrag

Esillä oleva keksintö esittelee menetelmän, laitteiston ja tietokoneohjelman magneettiresonanssikuvaus- tai magnetoenkefalografasovelluksia varten kelakokoonpanon (20) virtojen ohjaamiseksi ja näin ollen haluttujen magneettikenttien saavuttamiseksi tarkasti mittaustilavuudessa (21). Lähestymistapa on algebrallinen menetelmä, jossa luodaan kenttävektori kunkin kelan (20) testivirtoja koskien. Vektori- ja matriisialgebraa sovelletaan ja muodostetaan lineaarinen yhtälöryhmä. Kenttäkomponentit ja niiden derivaatat haluttuun kertalukuun saakka voidaan ottaa huomioon. Pääkomponenttianalyysiä tai riippumattomien komponenttien analyysiä voidaan soveltaa hallitsevien ulkoisten häiriökomponenttien määritykseen. Matriisin häiriöalttius tarkistamalla (33, 45) on mahdollista tutkia, onko mielekäs virtaratkaisu haluttuja magneettikenttiä koskien mahdollista saavuttaa. Ratkaistut virrat voidaan lopuksi asentaa kokoonpanon (20) keloja syöttävään virtalähdeyksikköön (29). Keksintöä voidaan soveltaa erilaisten häiriömuotojen aktiivisen kompensoinnin ominaisuutena MEG-sovelluksessa (25) tai kenttien ja gradienttien tarkkaan luomiseen MRI-sovelluksessa (24).

Föreliggande uppfinning beskriver ett förfarande, en anläggning och ett dataprogram för magnetresonansavbildnings- eller magnetoenkefalografitillämpningar för att reglera strömmen i en spolsammansättning (20) och för att sålunda exakt uppnå önskade magnetfält i mätvolymen (21). Tillvägagångssättet är ett algebraiskt förfarande, varvid en fältvektor genereras för respektive spoles (20) testströmmar. Vektor- och matrisalgebra tillämpas och en lineär serie av ekvationer bildas. Fältkomponenter och deras derivat ända upp till det önskade ordningstalet kan tas i beaktande. Analys av huvudkomponenten eller analys av oberoende komponenter kan tillämpas för att definiera de dominerande externa störmingskomponenterna. Genom att kontrollera matrisens villkorsvärde (33, 45) är det möjligt att undersöka, ifall det är möjligt att uppnå en rimlig lösning av strömmar för de önskade magnetfälten. De fastställda strömmarna kan slutligen inrättas i en strömkällsenhet (29) som matar spolarna i sammansättningen (20). Uppfinningen kan tillämpas som en aktiv kompensationssegenskap för olika störningsformer i en MEG-tillämpning (25) eller för att noggrant skapa fält eller gradienter i en MRI-tillämpning (24).



KELAJÄRJESTELMIEN SUUNNITTELUMENETELMÄ HALUTUN GEOMETRIAN OMAAVIEN MAGNEETTIKENTTIEN LUOMISEKSI

KEKSINNÖN ALA

5 Keksintö koskee magneettikuvantamistekniikoi-
ta ja erityisesti tietyn, geometrisesti tarkan muodon
omaavien magneettikenttien luomista suureen tilavuus-
teen avaruudessa.

10 KEKSINNÖN TAUSTA

Tarkan geometrian omaavia magneettikenttiä
tarvitaan lääketieteellisissä magneettikuvaussovelluk-
sissa, kuten magneettiresonanssikuvauksessa (magnetic
resonance imaging, MRI) ja magnetoenkefalografiassa
15 (magnetoencephalography, MEG). Hiljattain on ehdotettu
myös näiden kahden kuvaustekniikan yhdistämistä ("Mic-
rotesla MRI on the human brain combined with MEG", Va-
dim S. Zotev et al, Journ. Mag. Res. 194, s. 115-120,
2008).

20 MRI-menetelmässä ihmiskehon osa, jota tutki-
taan, altistetaan tasaiselle magneettikentälle ja ken-
tän gradientteille MRI-signaalin sisältämän spatiaali-
sen informaation dekodeamiseksi. Mittauskentän geo-
metria vaikuttaa olennaisesti signaalin laatuun ja tu-
loksena olevan MRI-kuvan geometriseen tarkkuuteen.
25 Ihanteellisessa mittauskentässä ei ole ensimmäistä
korkeampia kenttäderivaattoja.

MEG-menetelmässä pään ympärille sijoitetut
anturit rekisteröivät ihmisaivojen toiminnasta johtu-
vat hyvin heikot magneettiset signaalit. Yksi pääon-
30 gelmista tässä tekniikassa on mittauslaitteen suoja-
minen ympäristön magneettiselta häiriöltä, jonka voi-
makkuus saattaa ylittää mielenkiinnon kohteena olevat
signaalit 7.-8. kertaluvun verran. Tämä magneettinen
35 suojausongelma voidaan ratkaista aktiivisen kompen-

soinnin menetelmillä, jotka torjuvat häiriön käyttä-
mällä kelajärjestelmiä, jotka on räätälöity tuottamaan
vastakenttiä, jotka sopivat hyvin tarkasti häiriökent-
tien geometriaan (katso patenttihakemus
5 PCT/FI2005/000090).

Häiriökentät ovat tyypillisessä MEG-
rekisteröintiympäristössä suhteellisen yhtenäisiä ja
tasaisia. "Tasainen" tarkoittaa tässä sitä, että ken-
tät koostuvat spatiaalisesti samanlaisista kenttäkom-
10 ponenteista ja näiden komponenttien vain alhaisen ker-
taluvun spatiaalisista derivaatoista. Ensimmäistä ker-
talukua korkeammilla spatiaalisilla derivaatoilla on
esimerkiksi häiriössä hyvin pieni amplitudi. Tämä joh-
tuu siitä, että nämä kentät syntyvät lähteistä, jotka
15 ovat kymmenien metrien päässä rekisteröintilaitteesta,
ja tämän lisäksi MEG-laitteen sisältävä magneettisesti
suojattu huone (magnetically shielding room, MSR) ta-
soittaa niitä. Kenttien, joita käytetään torjumaan
näitä häiriökenttiä aktiivisen kompensoinnin järjeste-
20 lyssä, täytyy sen vuoksi myös olla tasaisia ja räätä-
löityjä sopimaan optimaalisesti häiriökentän geometri-
aan. Tämä mahdollistaa häiriön maksimaalisen kompen-
soinnin ihmisen pään suhteellisen suuressa tilavuudes-
sa.

25 Sekä MRI- että MEG-menetelmissä kelajärjes-
telmät täytyy sijoittaa suhteellisen lähelle mittauss-
laitetta. Tällä tavoin mittaus- ja vastakenttien luo-
miseen tarvittavat virrat pysyvät kohtuullisen pieninä.
Jos aktiiviseen kompensointiin käytetään sen lisäksi
30 takaisinkytkentäperiaatetta, kompensointikelojen täy-
tyy välttämättä olla MSR:n sisällä
(PCT/FI2005/000090). Kelojen asettaminen MSR:n ulko-
puolelle aiheuttaisi ylimääräisen viiveen ja johtaisi
epävakaaseen takaisinkytkentäsilmutaan.

35 Vaatimukset, että kenttien täytyy olla yhte-
näisiä tai tasaisia suuressa mittaustilavuudessa ja
että ne täytyy luoda tämän tilavuuden lähelle, vain 1-

2 metrin etäisyydelle, sijoitetuilla keloilla, ovat ristiriitaisia. Aivan lähellä olevien kelojen luomat kenttäprofiilit sisältävät välttämättä toisia ja korkeampia derivaattoja, ja kelat täytyy suunnitella huolellisesti tasaisten kenttien ja gradienttien tuottamiseksi esimerkiksi ihmisen pään suuruudessa tilavuudessa.

Eräs hyvin tunnettu perusesimerkki tällaisen kelansuunnitteluongelman ratkaisemiseksi ovat ns. Helmholtzin ja Maxwellin parit: Valitsemalla oikein kahden samankokoisen pyöreän koaksiaalisen kelan välinen etäisyys, keskelle kahden kelan väliin voidaan luoda aksiaalinen kenttä B_x , joka on tasainen neljänteen derivaattaan d^4B_x/dx^4 saakka. Tällä tavoin optimoitua kelakokoonpanoa kutsutaan Helmholtzin pariksi. Sen kentän ensimmäinen ei-nolladerivaatta on d^4B_x/dx^4 . Spatiaalisesti vakiona pysyvä aksiaalinen derivaatta dB_x/dx , joka on tasainen viidenteen derivaattaan saakka, luodaan Maxwellin pariksi kutsutulla kelajoukolla, jossa ensimmäinen suurempi pariton ei-nolladerivaatta dB_x/dx on d^5B_x/dx^5 . Tasaisten magneettikenttien luomiseksi kaikissa kolmessa spatiaalisessa suunnassa (B_x , B_y , B_z) ja niiden - makroskooppisessa tilavuudessa vakioina pysyvien - derivaattojen luomiseksi täytyy kuitenkin suunnitella kelakokoonpano, joka säätelee samanaikaisesti magneettikentät kolmessa ortogonaalisessa suunnassa, näiden komponenttien viisi riippumatonta ensimmäistä derivaattaa ja seitsemän riippumatonta toista derivaattaa jne. Tämä vaatimus formuloi eräänlaisen "yleistetyn Helmholtzin/Maxwellin kelansuunnitteluongelman". Tämän ongelman ratkaisemiseen tarvitaan ilmeisesti suurempi määrä riippumattomia keloja kuin Helmholtzin ja Maxwellin tapauksissa olevat kaksi kelloa.

Käytännön sovellusten kannalta tätä kelansuunnitteluongelmaa monimutkaistaa lisäksi magneettisten materiaalien läsnäolo kelojen läheisyydessä ja

MSR:n läsnäolo erityisesti MEG:ssä. Sen seinät sisältävät materiaalia, jolla on korkea magneettinen susceptibiliteetti ja joka magnetoituu keloissa olevan virran tuottamassa kentässä. Tämä johtaa huomattavaan sironneeseen kenttään, joka summautuu kelojen suoraan kenttään. MSR:n seinäelementtien susceptibiliteettiarvot ja elementtien välisten liitosten ominaisuudet vaihtelevat MSR:stä toiseen ja saattavat jopa muuttua ajan myötä. Kelakokoonpanon suunnittelu pelkän laskennan avulla vaatisi sen vuoksi huoneen rakenteen ja seinäelementtien magneettisten ominaisuuksien mittaus-
 10 ta ja karakterisointia niin yksityiskohtaisella tavalla, että se on käytännöllisesti katsoen mahdotonta.

15 KEKSINNÖN TAVOITE

Tämän keksinnön tavoitteena on esitellä menetelmä, jonka avulla voidaan suunnitella kelakokoonpano, joka kykenee tuottamaan yhtenäisiä ja tasaisia magneettikenttiä mihin tahansa haluttuun kertalukuun
 20 saakka myös siinä tapauksessa, että kelakokoonpanon välitön ympäristö sisältää magneettisia materiaaleja.

KEKSINNÖN YHTEENVETO

Esillä olevassa keksinnössä magneettikentän geometria säädetään valitsemalla oikein geometrisesti kiinteän kelakokoonpanon n_c :hen kelaan syötetyt n_c kpl virtoja, virtavektori $\mathbf{I}$. Kukin kokoonpanossa oleva kela on tunnettu kenttäkomponenteista ja niiden gradientteista, jotka se luo tietyssä pisteessä avaruudessa (origossa). Keksinnön pääkohta on se, että sisällyttämällä tähän karakterisointiin "kenttävektori" $\mathbf{B}_c$ kutakin kelaa ja myös kenttämuotoja (derivaattoja) koskien, jotka halutaan sulkea pois luoduista kentistä, on mahdollista formuloida yksinkertainen algebrallinen
 30 menetelmä virtavektorien $\mathbf{I}$ laskemiseksi, jotka tarvitaan 1) tuottamaan halutut kenttäkomponentit tai nii-

den derivaatat ja 2) pitämään ne derivaatat nollassa, joiden halutaan häviävän origossa. Kunkin kelan karakterisointiin tarvittavat kenttävektorit $\mathbf{B}_0$ voidaan laskea tai mitata. Viimeksi mainittu lähestymistapa on välttämätön magneettisia materiaaleja sisältävässä ympäristössä.

Täsmällisemmin kuvattuna esillä oleva keksintö esittelee kelakokoonpanojen suunnittelumenetelmän magneettikenttien luomiseksi, joilla on haluttuja geometrisiä muotoja määrätyn origon ympärillä. Menetelmä on tunnettu siitä, että se käsittää seuraavat vaiheet:

hajotetaan kenttä, jonka kussakin kelassa oleva testivirta on kerrallaan luonut origon ympärille, kentän haluttuihin ja ei-haluttuihin komponentteihin,

muodostetaan hajotettujen komponenttien perusteella lineaarinen yhtälöryhmä, joka tuottaa kentän saman hajotelman, joka on tuloksena kelakokoonpanon kelojen samanaikaisesta virroituksesta tuntemattomien virtojen joukolla, ja

määritetään niiden tuntemattomien virtojen joukko, jotka johtavat kenttien haluttuihin geometrisiin muotoihin, lineaarinen yhtälöryhmä ratkaisemalla.

Esillä olevan keksinnön eräässä suoritusmuodossa kunkin kelan kentän hajotelma lasketaan origon ympärillä kelakokoonpanon geometrian perusteella käyttäen yhtälöitä, jotka kuvaavat magneettikentän käyttäytymistä tyhjiössä.

Esillä olevan keksinnön eräässä suoritusmuodossa kunkin kelan kentän hajotelma saadaan mainitussa kelassa olevan testivirran origon ympärille aiheuttaman magneettikenttäjakauman mittauksen perusteella.

Esillä olevan keksinnön eräässä suoritusmuodossa halutut kenttäkomponentit ja ei-halutut kenttäkomponentit rakennetaan magneettikentän kolmesta ortogonaalisesta komponentista ja niiden riippumattomista karteesisista derivaatoista.

Esillä olevan keksinnön eräässä suoritussuodossa halutut kenttäkomponentit rakennetaan magneettikentän kolmesta ortogonaalisesta komponentista ja niiden viidestä riippumattomasta karteesisesta ensimmäisen kertaluvun derivaatasta ja ei-halutut kenttäkomponentit ovat seitsemän riippumattonta karteesisista toisen kertaluvun derivaattaa.

Esillä olevan keksinnön eräässä suoritussuodossa tuntematon virtavektori lasketaan matriisin Moore-Penrose-pseudoinverssin ja samanaikaisesti virroitettujen kelojen (origossa) summatun kenttävektorin tulon avulla, jossa mainittu matriisi käsittää kenttäkomponenttivektorit testivirralla viritetyille kullekin kelalle.

Esillä olevan keksinnön eräässä suoritussuodossa menetelmä käsittää lisäksi seuraavat vaiheet:

määritetään mainitun matriisin singulariteettiaste häiriöalttiuden (engl. condition number) avulla ja siinä tapauksessa, että mainitun matriisin häiriöalttius ilmaisee singulaarista tai olennaisesti singulaarista matriisia,

muunnetaan kelakokoonpanoa, ja kun mainitun matriisin uudelleenmääritetty häiriöalttius ilmaisee olennaisesti ei-singulaarista matriisia,

lasketaan tuntemattomien virtojen joukko.

Esillä olevan keksinnön eräässä suoritussuodossa halutut kenttäkomponentit käsittävät vähintään yhden hallitsevan ulkoisen häiriökomponentin tai yhden tai useita hallitsevien ulkoisten häiriökomponenttien lineaariyhdistelmiä, jotka on määritetty erillisen häiriömittauksen perusteella.

Esillä olevan keksinnön eräässä suoritussuodossa haluttuina kenttäkomponentteina käytetyt hallitsevat ulkoiset häiriökomponentit määritetään erillisen häiriömittauksen pääkomponenttianalyysin tai riippumattomien komponenttien analyysin perusteella.

Esillä olevan keksinnön eräässä suoritussuodossa hallitsevien ulkoisten häiriökomponenttien lineaariyhdistelmiä käytetään takaisinkytkentäkenttämutoina aktiivisen kompensoinnin järjestelmässä, jossa
 5 takaisinkytkentäkenttämoodot muodostavat lineaariyhdistelmät sekä antureiden sijainnit ja suuntaukset valitaan siten, että samanaikaisesti toimivien takaisinkytkentäsilrukoiden välinen kytkentä on minimoitu.

Esillä olevan keksinnön eräässä suoritussuodossa menetelmä käsittää lisäksi kytkennän magneettikenttiä sekä gradientteja luovan magneettiresonanssikuvauksen toiminnallisuuden ja ympäristön häiriön aktiivisen kompensoinnin suorittavan magnetoenkefalografialaitteen toiminnallisuuden välillä.

Esillä olevan keksinnön toisen näkökohdan mukaisesti keksinnöllinen ajatus käsittää myös magneettiresonanssikuvauksen tai magnetoenkefalografialaitteiston, jossa on kelakokoonpano magneettikenttien luomiseksi, joilla on haluttuja geometrisiä muotoja tietyn
 20 origon ympärillä, ja joka käsittää:

anturiryhmän, joka käsittää lukuisia antureita monikanavadataan mittaamiseksi, ja ohjausvälineet laitteiston ohjaamiseksi. Laitteisto on tunnettu siitä, että se käsittää lisäksi:

25 ohjausvälineet, joka on järjestetty hajottamaan kenttä, jonka kussakin kelassa oleva testivirta on kerrallaan luonut origon ympärille, kentän haluttuihin ja ei-haluttuihin komponentteihin,

ohjausvälineet, joka on järjestetty muodostamaan hajotettujen komponenttien perusteella lineaarinen yhtälöryhmä, joka tuottaa kentän saman hajotelman, joka on tuloksena kelakokoonpanon kelojen samanaikaisesta virroituksesta tuntemattomien virtojen joukolla, ja

35 ohjausvälineet, joka on järjestetty määrittämään niiden tuntemattomien virtojen joukko, jotka joh-

tavat kenttien haluttuihin geometrisiin muotoihin, lineaarinen yhtälöryhmä ratkaisemalla.

Esillä olevan keksinnön eräässä suoritussuodossa ohjausvälineet on järjestetty laskemaan kunkin
 5 kelan kentän hajotelma origon ympärillä kelakokoonpanon geometrian perusteella käyttäen yhtälöitä, jotka kuvaavat magneettikentän käyttäytymistä tyhjiössä.

Esillä olevan keksinnön eräässä suoritussuodossa ohjausvälineet on järjestetty saamaan kunkin
 10 lan kentän hajotelma mainituissa kelassa olevan testivirran origon ympärille aiheuttaman magneettikenttäjakautuksen mittauksen perusteella.

Esillä olevan keksinnön eräässä suoritussuodossa ohjausvälineet on järjestetty rakentamaan halutut
 15 kenttäkomponentit ja ei-halutut kenttäkomponentit magneettikentän kolmesta ortogonaalisesta komponentista ja niiden riippumattomuudesta karteesisista derivaattoista.

Esillä olevan keksinnön eräässä suoritussuodossa ohjausvälineet on järjestetty rakentamaan halutut
 20 kenttäkomponentit magneettikentän kolmesta ortogonaalisesta komponentista ja niiden viidestä riippumattomasta karteesisesta ensimmäisen kertaluvun derivaatasta ja ei-halutut kenttäkomponentit ovat seitsemän
 25 riippumatonta karteesista toisen kertaluvun derivaattoja.

Esillä olevan keksinnön eräässä suoritussuodossa ohjausvälineet on järjestetty laskemaan tuntematon
 virtavektori matriisin Moore-Penrose-pseudoinverssin ja samanaikaisesti virroitettujen
 30 kelojen (origossa) summatun kenttävektorin tulon avulla, jossa mainittu matriisi käsittää kenttäkomponenttivektorit testivirralla viritetyille kullekin kelalle.

Esillä olevan keksinnön eräässä suoritussuodossa laitteisto käsittää lisäksi:

ohjausvälineet, jotka on järjestetty määrittämään mainitun matriisin singulariteettiaste häiriö-

altttiuden avulla ja siinä tapauksessa, että mainitun matriisin häiriöaltttius osoittaa singulaarista tai olennaisesti singulaarista matriisia,

muuntovälineet on järjestetty muuntamaan ke-
 5 lakokoonpanoa, ja kun mainitun matriisin uudelleenmää-
 ritetty häiriöaltttius osoittaa olennaisesti ei-
 singulaarista matriisia,

ohjausvälineet on järjestetty laskemaan tun-
 temattomien virtojen joukko.

10 Esillä olevan keksinnön eräässä suoritustuo-
 dossa halutut kenttäkomponentit käsittävät vähintään
 yhden hallitsevan ulkoisen häiriökomponentin tai yhden
 tai useita hallitsevien ulkoisten häiriökomponenttien
 lineaariyhdistelmiä, jotka on määritetty erillisen
 15 häiriömittauksen perusteella.

Esillä olevan keksinnön eräässä suoritustuo-
 dossa ohjausvälineet on järjestetty määrittämään ha-
 luttuina kenttäkomponentteina käytetyt hallitsevat ul-
 koiset häiriökomponentit erillisen häiriömittauksen
 20 pääkomponenttianalyysin tai riippumattomien komponent-
 tien analyysin perusteella.

Esillä olevan keksinnön eräässä suoritustuo-
 dossa ohjausvälineet on järjestetty käyttämään hallit-
 sevien ulkoisten häiriökomponenttien lineaariyhdistel-
 25 miä takaisinkytkentäkenttämutoina aktiivisen kompen-
 soinnin järjestelmässä, jossa takaisinkytkentäkenttä-
 muodot muodostavat lineaariyhdistelmät sekä antureiden
 sijainnit ja suuntaukset valitaan siten, että samanai-
 kaisesti toimivien takaisinkytkentäsilrukoiden välinen
 30 kytkentä on minimoitu.

Esillä olevan keksinnön eräässä suoritustuo-
 dossa laitteisto käsittää lisäksi kytkentävälineet,
 jotta voidaan valita magneettiresonanssikuvauksen toi-
 minnallisuuden, joka on järjestetty luomaan magneetti-
 35 kenttiä sekä gradientteja, ja magnetoenkefalogra-
 fialaitteen toiminnallisuuden välillä, joka on järjes-

tetty suorittamaan ympäristön häiriön aktiivinen kompensointi.

Keksinnön kolmannen näkökohdan mukaisesti keksinnöllinen ajatus käsittää lisäksi tietokoneohjelman kelakokoonpanon avulla tapahtuvan magneettikenttien luomisen ohjaamiseksi, joilla kentillä on haluttuja geometrisiä muotoja tietyn origon ympärillä. Tietokoneohjelma on tunnettu siitä, että se käsittää koodia, joka on järjestetty suorittamaan seuraavat vaiheet tietojenkäsittelylaitteella ajettuna:

hajotetaan kenttä, jonka kussakin kelassa oleva testivirta on kerrallaan luonut origon ympärille, kentän haluttuihin ja ei-haluttuihin komponentteihin,

muodostetaan hajotettujen komponenttien perusteella lineaarinen yhtälöryhmä, joka tuottaa kentän saman hajotelman, joka on tuloksena kelakokoonpanon kelojen samanaikaisesta virroituksesta tuntemattomien virtojen joukolla, ja

määritetään niiden tuntemattomien virtojen joukko, jotka johtavat kenttien haluttuihin geometrisiin muotoihin, lineaarinen yhtälöryhmä ratkaisemalla.

Esillä olevan keksinnön etuina on, että esitellyn kelakokoonpanon suunnittelumenetelmän avulla voidaan tuottaa haluttuja ja tarkkoja magneettikenttiä kokoonpanon avulla, joka kykenee kompensoimaan tehokkaasti erilaisia aktiivisia häiriötilanteita suhteellisen suuressa tilavuudessa. Eräs muu etu on se, että tämä suunnittelumenetelmä toteutetaan pääosin matriisialgebran avulla ja sen vuoksi keksinnön soveltaminen voidaan suorittaa suoraviivaisella tavalla esimerkiksi MEG-laitteen olemassa olevassa ohjauslogiikassa tai prosessorissa. Eräs muu etu on se, että kompensoitava mittaustilavuus on suuri, ja lopuksi se, että menetelmää voidaan soveltaa jopa magneettisesti suojattujen huoneiden sisällä, jotka sisältävät tyypillisesti magneettisia materiaaleja, jotka ovat aiem-

min häirinneet merkittävästi aktiivisen kompensoinnin järjestelmiä.

PIIRUSTUSTEN LYHYT KUVAUS

5 Kuvio 1 tuo esiin erään esimerkin kentän luovien neliönmuotoisten kelojen kokoonpanosta mittaustilavuuden ympärillä,

kuvio 2 tuo esiin elektroniikkajärjestelyn erään suoritusmuodon, joka säätää virrat kelakokoonpanossa joko MRI-laitteen mittauskentän ja gradienttien tai MEG-laitteen ympäristön häiriön aktiivisen kompensoinnin aikaansaamiseksi,

kuvio 3 tuo esiin menetelmän erään suoritusmuodon MRI-sovellukseen tarkoitetun kelakokoonpanon suunnitteluprosessin vuokaaviona, ja

kuvio 4 tuo esiin menetelmän erään suoritusmuodon MEG:ssä tapahtuvaan aktiiviseen häiriönpoistoon tarkoitetun kelakokoonpanon suunnitteluprosessin vuokaaviona.

20

KEKSINNÖN YKSITYISKOHTAINEN KUVAUS

Esillä olevan keksinnön suoritusmuotoihin viitataan nyt yksityiskohtaisesti.

Esillä oleva keksintö formuloi menetelmän taustakappaleessa kuvatun "yleistetyn Helmholtzin/Maxwellin suunnitteluongelman" ratkaisemiseksi. Menetelmä voidaan laajentaa suoraviivaisella tavalla Helmholtzin ja Maxwellin suunnitteluongelmia pidemmälle, so. sellaisten kelakokoonpanojen suunnitteluun, jotka luovat magneettikenttiä, joilla on häviäviä derivaattoja mihin tahansa vaadittuun kertalukuun saakka. Derivaatat on yksinkertaisuuden vuoksi katkaistu toiseen kertalukuun jäljempänä olevissa esimerkeissä. Tilanteessa, jossa kelat on sijoitettu mittauskohteen lähelle ja jossa halutaan hyvin tasaisia ja homogeenisiä magneettikenttiä, saatettaisiin kuitenkin käyttää

myös toista kertalukua korkeamman kertaluvun derivaattoja. Laskelmiin mukaan otetut derivaattojen kertaluvut voidaan valita käytetyssä sovelluksessa esiintyvien tarkkuusvaatimusten mukaisesti. Huomioon otettujen
 5 derivaattojen suurempi määrä lisää tietenkin laskelmien monimutkaisuutta (vektorien ja matriisien dimensioita), mutta algebrallisten toimitusten pääperiaate pysyy samana.

Seuraavaksi kuvataan kolmea eri tilannetta,
 10 joissa menetelmää voidaan esimerkiksi soveltaa. Suunnittelutilanteet esitellään lisääntyvän monimutkaisuuden mukaisessa järjestyksessä.

Ensin kuvataan ensimmäistä tilannetta, jossa keksinnön mukaista menetelmää voidaan soveltaa.

15 Tässä yksinkertaisimmassa tapauksessa kelakoonpano on sijoitettu ympäristöön, joka ei sisällä magneettisia materiaaleja, ja tavoitteena on luoda kelakoonpanon sisällä olevassa tietyssä pisteessä (origossa) tiukasti tasaisia kenttiä kolmessa karteesisessa suunnassa (B_x , B_y , B_z) ja näiden kolmen komponentin vakiona pysyviä ensimmäisiä derivaattoja.
 20

Tilavuudessa, jossa ei ole magneettisia lähteitä (magneettisia materiaaleja tai sähkövirtoja) magneettikentän divergenssi ja roottori ovat nolla.
 25 Yhdeksästä mahdollisesta ensimmäisestä derivaatasta (dB_x/dx , dB_x/dy , dB_x/dz , dB_y/dx , dB_y/dy , dB_y/dz , dB_z/dx , dB_z/dy , dB_z/dz) vain viisi on sen vuoksi riippumatonta, esimerkiksi dB_x/dx , dB_x/dy , dB_x/dz , dB_y/dy ja dB_y/dz . Vastaavasti koskien lähteetöntä ja pyörteetöntä vektorikenttää kolmiulotteisessa avaruudessa 27:stä toisesta derivaatasta vain seitsemän on riippumatonta, esimerkiksi d^2B_x/dx^2 , $d^2B_x/dxdy$, $d^2B_x/dxdz$, $d^2B_y/dxdy$, d^2B_y/dy^2 , $d^2B_y/dydz$ ja $d^2B_z/dydz$.
 30

Määritetään n_c :n kelan joukko ja kussakin kelassa kulkevasta virrasta syntyvien kenttien kolme
 35 magneettikenttäkomponenttia, viisi ensimmäistä derivaattaa ja seitsemän toista derivaattaa lasketaan ori-

gossa. Ympäristössä, jossa ei ole magneettisia materiaaleja, tämä voidaan tehdä käyttämällä yksinkertaisia, hyvin tunnettuja matemaattisia lausekkeita. Tällä tavoin kullekin n_c kelasta saadaan kenttävektori, $\mathbf{B}_c$, sekä viisitoista komponenttia, jotka ovat $B_x, B_y, B_z, dB_x/dx, dB_x/dy, dB_x/dz, dB_y/dy, dB_y/dz, d^2B_x/dx^2, d^2B_x/dxdy, d^2B_x/dxdz, d^2B_y/dxdy, d^2B_x/dx^2, d^2B_y/dy^2, d^2B_y/dydz$ ja $d^2B_x/dydz$.

Näitä n_c kenttävektoria pystyvektoreina käyttäen muodostuu $[15 \times n_c]$ -matriisi $\mathbf{M}$. Jos n_c kelaa virroitetaan samanaikaisesti virroilla $I_1, I_2, \dots, I_{n_c}$, tuloksena oleva koko kokoonpanon kenttävektori origossa saadaan matriisiyhtälöllä

$$\mathbf{B} = \mathbf{M}\mathbf{I}, \quad (1)$$

jossa $\mathbf{I}$ on pystyvektori, jossa on komponentit $I_1, I_2 \dots I_{n_c}$, jotka ovat yksittäisissä keloissa olevat virrat. Minkä tahansa kenttävektorin $\mathbf{B}$ luomiseen tarvittu virtavektori saadaan näin ollen yhtälöstä

$$\mathbf{I} = \text{inv}(\mathbf{M})\mathbf{B}. \quad (2)$$

Tässä $\text{inv}(\mathbf{M})$ on $\mathbf{M}$:n inverssimatriisi, jos kelojen määrä on sama kuin komponenttien määrä kenttävektorissa $\mathbf{B}$, tässä esimerkissä 15. Jos kelojen määrä on pienempi tai suurempi kuin komponenttien määrä kenttävektorissa, niin $\text{inv}(\mathbf{M})$ on $\mathbf{M}$:n Moore-Penrose-pseudoinverssi.

Esimerkiksi virrat, jotka tarvitaan kokoonpanon keloissa yhden teslan tasaisen kentän luomiseen x-suunnassa, B_x , saadaan yhtälöstä (2) käyttämällä pystyvektoria $\mathbf{B} = [1, 0, 0, \dots, 0]$. Tuloksena olevan $\mathbf{I}$ -vektorin luoma kenttä on x-suunnassa, so. $B_y, B_z = 0$. Tämän lisäksi kaikki sen ensimmäisen ja toisen kertaluvun derivaatat ovat nolla origossa. Tulisi huomata, että kenttäderivaatat toiseen kertalukuun saakka hä-

viävät origossa vain, koska ne sisältyvät kunkin kelan malliin ($\mathbf{B}_c$ -vektori). Derivaattoja, jotka jäävät pois $\mathbf{B}_c$ -vektoreista, ei säädetä yhtälöiden (1) ja (2) määrittelemässä algoritmista.

- 5 Yhtälön (2) jälkeen ainoa jäljelle jäänyt suunnitteluongelma on se, että kelakokoonpanon kokonaisgeometria täytyy valita siten, ettei matriisi $\mathbf{M}$ ole singulaarinen ja että $\text{inv}(\mathbf{M})$ on näin ollen olemassa. Tämä ei ole vaikeaa, koska $\mathbf{M}$ on tiukasti singulaarinen vain hyvin symmetrisissä kokoonpanoissa. Käytännön näkökulmasta merkitystä on myös sillä, kuinka lähellä singulaarista $\mathbf{M}$ on. Jos $\mathbf{M}$ on lähellä singulaarista, joidenkin kenttäkomponenttien tai niiden derivaattojen luominen voi vaatia hyvin suuria virtoja joissakin keloissa. Matriisin $\mathbf{M}$ häiriöalttius, joka on sen mitta, kuinka lähellä singulaarista $\mathbf{M}$ on, on sen vuoksi myös kelakokoonpanon geometrinen suunnittelun laadun hyvä mitta. Siinä tapauksessa, että on olemassa esim. yhteen ainoaan tasoon tai muuten keskenään symmetrisiin paikkoihin sijoitettu kelakokoonpano, tapahtuu tavallisesti niin, että vähintään yhdellä tuloksesta olevista virroista kompensoivassa kelakokoonpanossa on oltava huomattavan korkea kertaluku, jotta se toimii oikein. Tämä ei ole toteuttamiskelpoista tai taloudellista. Hyvä mitta tällaisen käyttäytymisen osoittamiseksi on sen vuoksi häiriöalttius, joka tässä epätaloudellisessa tapauksessa olisi suuri (esim. yli 100). Häiriöalttiuden minimoimiseksi kelakokoonpano on sijoitettava uudelleen esim. vähemmän symmetrisellä tavalla, ja silloin saavutetaan optimaalinen kelakokoonpano, jossa suhteellisen pienillä virroilla on mahdollista toteuttaa hyvin toimiva järjestelmä tasaisen mittauskentän luomiseksi MRI:ssä tai tehokkaan aktiivisen kompensoinnin luomiseksi MEG:ssä.
- 35 Tapaukset, joissa kelojen määrä kokoonpanossa on 1) yhtä suuri, 2) suurempi tai 3) pienempi kuin

komponenttien määrä kenttävektorissa $\mathbf{B}$, eroavat periaatteessa toisistaan.

Tapaus 1) on yksinkertainen. Tässä kelojen määrä (käytettävissä oleva "vapausasteiden määrä") on sama kuin säädettävien suureiden määrä (kolme kenttäkomponenttia ja niiden 5+7 riippumatonta derivaattaa origossa). Tässä tapauksessa $\mathbf{M}$ on 15x15-neliömatriisi ja yhtälöllä (2) on ainutkertainen ratkaisu. Virtavektori $\mathbf{I}$, joka tarvitaan esimerkiksi tasaisen kentän luomiseen z -suunnassa, B_z , saadaan yhtälöstä (2) käyttämällä pystyvektoria $\mathbf{B} = [0, 0, 1, 0, \dots, 0]$. Tuloksena oleva kenttä on tarkasti (numeerisella tarkkuudella) z -akselia pitkin, ja sen kaikki derivaatat toisiin derivaattoihin saakka häviävät origossa.

Tapauksessa 2) yhtälön (1) määrittelemä järjestelmä on alimääritetty. Kelojen määrä on suurempi kuin säädettävien suureiden määrä. Tässä tapauksessa yhtälöllä (1) on rajallinen määrä ratkaisuja $\mathbf{I}$. Moore-Penrose-pseudoinverssin tuottama ratkaisu on se, jolla on pienin euklidinen normi, so. vektorin $\mathbf{I}$ pienin pituus. Tässä tapauksessa voidaan valita myös muu optimaalinen ratkaisu $\mathbf{I}$: lyhin vektori $\mathbf{I}$ niiden ratkaisujen joukosta, joissa on ei-nollavirtoja vain 15:ssä n_c kelasta. Tämä on eräs tapa saada selville, mitkä n_c kelasta ovat vähiten hyödyllisiä tasaisten kenttien ja vakiona pysyvien ensimmäisten derivaattojen luomiseksi ja voitaisiin mahdollisesti jättää pois kokoonpanosta. Tämä viimeksi mainittu ratkaisu vaatii tavallisesti suurempia enimmäisvirtoja kuin Moore-Penrose-pseudoinverssiratkaisu.

Ylimääritetyssä tapauksessa 3) yhtälölle (1) ei ole olemassa tarkkaa ratkaisua $\mathbf{I}$. Tässä käytettävissä oleva vapausasteiden määrä (kelojen määrä) on pienempi kuin säädettävien suureiden määrä. Tässä tapauksessa Moore-Penrose-pseudoinverssi tuottaa vektorin $\mathbf{I}$, joka on optimaalinen siinä mielessä, että se minimoi poikkeaman $\mathbf{I}-\mathbf{MB}$ euklidisen normin. Tämä virta-

vektori **I** on pienimmän neliösumman ratkaisu ylimääritettyyn ongelmaan.

Komponenttien määrää vektorissa **B** ja kaikissa **B_c**:issä voidaan lisätä toista kertalukua korkeampien derivaatan kertalukujen sisällyttämiseksi. Tämä saattaa olla tarpeen, jos tasaisia kenttiä ja tarkkoja ensimmäisiä gradientteja tarvitaan suhteellisen suuressa tilavuudessa, kuten MRI-sovelluksessa. Tai tämä saattaa olla tarpeen aktiivisessa suojaussovelluksessa, jos häiriö sisältää komponentteja, joilla on monimutkainen geometria, so. korkeampia derivaattoja. Jotta tässä tapauksessa saavutetaan tyydyttävä tulos, kelojen määrää kokoonpanossa täytyy myös lisätä.

Seuraavaksi kuvataan toista tilannetta, jossa keksinnön mukaista menetelmää voidaan soveltaa.

Todellisuudessa kelakokoonpano asennetaan rakennusympäristöön, jossa on magneettisia materiaaleja ja rakenteita. Erityisesti MEG:n tapauksessa magneettisesti suojattu huone korkean permeabiliteetin omaavine seinineen on melko lähellä keloja, mikä johtaa huomattavaan sironneeseen kenttään. Näiden materiaalien geometria ja magneettiset ominaisuudet ovat tavallisesti monimutkaisia ja mahdottomia karakterisoida yksityiskohtaisesti. **B_c**-vektorien saaminen kutakin kelaan koskien laskemalla saattaa sen vuoksi olla epätarkkaa tai mahdotonta. Tässä tapauksessa kelojen kokoonpano täytyy valmistaa ja asentaa ensin ja sen jälkeen kenttävektorit **B_c** täytyy mitata yksi kerrallaan syöttämällä virtaa kuhunkin kokoonpanossa olevaan kelaan. Esimerkiksi MEG:n tapauksessa - ja laitteissa, joissa MEG ja MRI mahdollisesti yhdistyvät samassa instrumentissa - kentän ja sen derivaattojen mittaus on suoraviivaista, koska MEG-laite itse sisältää määrältään lukuisten magneettiantureiden ryhmän. MEG-anturiryhmän vasteen, signaalivektorin, perusteella kuhunkin kelaan syötettyyn virtaherätteeseen johdetaan helposti **B_c**:tä varten tarvittut kenttäkomponentit ja

niiden derivaatat. Jos MEG-anturiryhmää ei ole käytettävissä, kentän ja sen derivaattojen mittaus voidaan suorittaa jollakin muulla tarkasti kalibroidulla anturiryhmällä tai yhdellä anturilla, jota voidaan liikuttaa tarkasti origon ympärillä.

Sen jälkeen, kun $\mathbf{B}_c$ -vektorit on määritetty kutakin kelaa koskien mittaamalla, toimintosarjaa $\mathbf{B}$:n eri komponentteja vastaavien $\mathbf{I}$ -vektorien saamiseksi sovelletaan tarkalleen siten kuin edellä mainitussa ensimmäisessä tilanteessa.

Seuraavaksi kuvataan kolmatta tilannetta, jossa keksinnön mukaista menetelmää voidaan soveltaa.

Tämä kolmas tapaus koskee esillä olevan menetelmän MEG-sovellusta. MRI-sovelluksessa tavoitteena on käyttää keloja tasaisten kenttäkomponenttien ja vakiona pysyvien gradienttien (ensimmäisten derivaattojen) saamiseen mittaustilavuudessa, kun taas MEG-sovelluksessa tavoitteena on kyetä torjumaan mahdollisimman tarkasti ympäristön magneettinen häiriö. Tämä ei välttämättä tapahdu optimaalisesti vain tasaiset kentät ja spatiaalisesti vakiona pysyvät ensimmäiset derivaatat poistamalla, koska MSR:n sisällä olevat hallitsevat häiriökenttämuodot saattavat sisältää korkeampia derivaattoja. Optimaalisen poiston saavuttamiseksi täytyy sen vuoksi määrittää virtajakaumat $\mathbf{I}$, jotka toistavat tarkasti senhetkiset hallitsevat häiriökenttäkuviot, mutta sulkevat pois ei-halutut korkeampien derivaattojen kenttämuodot.

Senhetkiset hallitsevat häiriökuviot voidaan määrittää rekisteröimällä häiriösignaali MEG-järjestelmän avulla (ei kohdetta kypärän sisällä) ja suorittamalla MEG-monikanavasignaalille esimerkiksi pääkomponenttianalyysi (principal component analysis, PCA). Eräs muu suoritustyyppi on riippumattomien komponenttien analyysin (independent component analysis, ICA) suorittaminen MEG-monikanavasignaalille. Tämän jälkeen esillä olevaa menetelmää voidaan soveltaa si-

ten, että $\mathbf{B}_c$ -vektorien ensimmäiset n_p komponenttia ovat kelasignaalin projektiot aiemmin rekisteröidyn häiriön n_p hallitsevaa pääkomponenttia pitkin. Jotta saadaan estettyä ei-toivottujen korkeampien derivaattojen ilmeneminen poistokentissä, loput $\mathbf{B}_c$ -vektoreissa olevista komponenteista valitaan näiden korkeampien derivaattojen joukosta.

Kolmannessa tilanteessa sovelletaan periaatteessa tarkalleen samaa toimintosarjaa kuin toisessa tilanteessa. $\mathbf{B}_c$ -vektoreissa muutama ensimmäinen komponentti (B_x , B_y , B_z , ...) vain korvataan senhetkisen mitatun häiriön hallitsevilla PCA-komponenteilla.

MEG:ssä tapahtuvan aktiivisen kompensoinnin sovelluksessa häiriöpoisto toimii takaisinkytkentäjärjestelmänä. MEG-kypärän eri puolilla olevia magnetometrianatureita käytetään nollailmaisimina takaisinkytkentäsillemukoissa, jotka säätävät virrat kompensoivassa kelakokoonpanossa (PCT/FI2005/000090). Useat tällaiset takaisinkytkentäsillemukat toimivat rinnan ympäristön häiriön n_p hallitsevan PCA-komponentin kompensoimiseksi. Tällaisen rinnakkaisten takaisinkytkentäsillemukoiden järjestelmän vakaan toiminnan kannalta on edullista kytkeä sillemukat maksimaalisesti erilleen toisistaan. Yhden sillemukan ohjaaman kelayhdistelmän pitäisi luoda minimaalinen signaali muiden sillemukoiden nollailmaisimissa. Tämä estää vastavaikutuksia kiertämästä eri säätösillemukoissa ja tekee koko säätöjärjestelmästä sen vuoksi nopeamman ja vakaan laajemmalla kaistanleveydellä.

Tämä säätöjärjestelmän ortogonalisointi on rakennettu edellä mainituissa ensimmäisessä ja toisessa tilanteessa. Tämä johtuu siitä, että näissä tilanteissa säädetyt kenttämoodot ovat ortogonaalisia karteesisia komponentteja; on luonnollista valita nollailmaisinanturi B_x -takaisinkytkentäsillemukalle tiukasti x -suunnassa siten, ettei se havaitse B_y - ja B_z -komponentteja jne.

Näin ei kuitenkaan ole automaattisesti, jos kolmatta tilannetta käytetään häiriön maksimaalisen kompensoinnin saavuttamiseen. Hallitsevat n_p PCA-komponenttia eivät ole "puhtaita" avaruudessa tarkasti
 5 ortogonaalisia magneettikenttäkomponentteja. Vaikka niistä kolme ensimmäistä ovat lähes tasaisia kenttiä ja määrittelevät "päähäiriösuunnat" kolmessa ulottuvuudessa, nämä suunnat ovat usein kiertyneet mittauslaitteen ja kelakokoonpanon pääsuuntiin nähden. Tässä
 10 tapauksessa rinnakkaiset takaisinkytkentäsilmut voidaan kytkeä optimaalisesti erilleen sekoittamalla häiriön n_p hallitsevaa PCA-komponenttia oikean lineaarisen transformaation avulla näiden PCA-komponenttien määrittelemässä signaalin aliavaruudessa. Optimaalinen
 15 lineaarinen transformatio rakennetaan siten, että se kiertää PCA-komponenttien määrittelemää koordinaatistoa laitteen pääakseleita pitkin ja sekoittaa häiriökenttämoodot siten, ettei minkään takaisinkytkentäsilmut nollailmaisista havaitse muihin säätösilmutkoihin
 20 liittyviä vastakenttiä.

Matemaattisen formalismin rakentamiseksi merkittäköön $[n_{ch} \times n_p]$ ja $[n_{ch} \times n_c]$ -dimensioiset PCA- ja kelasignaalin aliavaruudet ensin vastaavasti matriiseilla **P** ja **C**. Tässä n_{ch} on mittauskanavien määrä.
 25 Merkittäköön myös kaikista kanavista saadut mittausarvot sisältävä senhetkinen signaalivektori **f**:llä. Tehdävänä on nyt tuottaa **f**:lle vastasignaali mahdollisimman tarkasti kelasignaalien **C** joukko huomioon ottaen.

Matemaattisesti tämä voidaan formuloida
 30

$$\mathbf{f} \approx -\mathbf{C}\mathbf{K}\mathbf{f}_0, \quad (3)$$

jossa **K** on yksinkertaisimmassa tapauksessa $[n_c \times n_c]$ -dimensioinen yksikkömatriisi siten, että kelasignaaleja käytetään ilman minkäänlaista sekoitusta,
 35 ja $[n_c \times 1]$ -dimensioinen vektori **f**₀ sisältää nollailmaisista saatua takaisinkytkentäinformaatiota. **K** ei

kuitenkaan voi aikaansaada optimaalista kompensointitulosta yksikkömatriisina. Tämä voidaan nähdä helposti ilmaisemalla signaalivektori $\mathbf{f}$ ensin hallitsevan häiriön yhdistelmänä muodossa $\mathbf{f} = \mathbf{P}\mathbf{x}$ ja poistamalla nol-

5 lailmaisimien osuus $\mathbf{f}$:stä ja $\mathbf{P}$:stä muodossa $\mathbf{f}_0 = \mathbf{P}_0\mathbf{x}$ siten, että

$$\mathbf{x} = \text{pinv}(\mathbf{P}_0) * \mathbf{f}_0 \quad (4)$$

10 Tässä $\text{pinv}(\mathbf{P}_0)$ merkitsee $\mathbf{P}_0$:n pseudoinverssiä. Asettamalla $\mathbf{f} = \mathbf{P}\mathbf{x}$ ja ratkaisemalla $\mathbf{K}$ siten, että (3) on tosi mahdollisimman tarkasti, saadaan

$$\mathbf{K} = -\text{pinv}(\mathbf{C}) * \mathbf{P} * \text{pinv}(\mathbf{P}_0) \quad (5)$$

15 Tämä on kelan optimaalinen sekoitusmatriisi. Viimeisenä vaiheena voidaan poistaa nollailmaisimien välinen ylikuuluminen matriisia $\mathbf{K}$ kiertämällä. Ensin asetetaan $\mathbf{C}_2 = \mathbf{C}\mathbf{K}$. Kiertäminen $\mathbf{K}_{\text{orth}} = \mathbf{K}\mathbf{R}$ suoritetaan

20 siten, että kierretyssä joukossa $\mathbf{C}_3 = \mathbf{C}_2\mathbf{R} = \mathbf{C}\mathbf{K}\mathbf{R}$ nollailmaisimet ovat ortogonaalisia, so. $\mathbf{C}_{20}\mathbf{R} = \mathbf{I}$ on $n_z \times n_z$ -dimensioinen yksikkömatriisi, jossa n_z on nollailmaisimien määrä ja $\mathbf{C}_{20}$ sisältää vain nollailmaisimien osuuden. Näin ollen saadaan $\mathbf{R} = \text{pinv}(\mathbf{C}_{20})$, ja kiertynyt

25 sekoitusmatriisi on

$$\mathbf{K}_{\text{orth}} = \mathbf{K} * \text{pinv}(\mathbf{C}_{20}) \quad (6)$$

30 Esillä olevan keksinnön menetelmän erästä suoritussuoritusmuotoa hyväksi käyttämällä yhtä ja samaa kela-

kokoonpanoa voidaan käyttää MRI:n kentän ja gradientin luontiin ja MEG:n aktiiviseen häiriönpoistoon yhdistetyssä MEG-/MRI-instrumentissa. Näissä tapauksissa ja keksinnön yhdessä suoritussuoritusmuodossa magneettiresonans-

35 sikuvausmittauskenttiä säättävä MRI-elektroniikka voi toimia isäntälaitteena. Siinä tapauksessa MEG-laitte voi toimia MRI-elektroniikan orjalaitteena, jol-

lolin MEG-laite on magneettiresonanssisignaalin mittausinstrumentti.

5 Samaa kelajärjestelmää voidaan käyttää myös eri mittauspaikoissa (origoissa) kelakokoonpanon sisällä, kuten istuma- ja selinmakuumittausasennossa MEG:ssä. Kunkin kokoonpanossa olevan kelan vektorit $\mathbf{B}_c$ on vain määritettävä erikseen kunkin mittauspaikan osalta joko laskemalla tai mittaamalla. Sama koskee ympäristön häiriökentän PCA-analyysiä kolmannessa tilanteessa. Tämän jälkeen kunkin mittauspaikan virta-
10 kaumat $\mathbf{I}$ saadaan yhtälöstä (2). Koska $\mathbf{B}_c$ -vektorit ja näin ollen $\mathbf{M}$ -matriisit ovat erilaisia kahdessa mittausasennossa, tuloksena olevat $\mathbf{I}$ -vektorit ovat myös erilaisia. Ei ole kuitenkaan tarvetta käyttää erilaisia kelakokoonpanoja tai liikuttaa tai vaihtaa kelakokoonpanoa geometrisesti yhdestä mittausasennosta toiseen vaihdettaessa. Mittauslaitteen mahdollinen uudelleensijoittelu kelakokoonpanoon nähden vaatii myös vain uuden $\mathbf{M}$ -matriisin määrittämisen ja sen jälkeen uusien virtavektorien $\mathbf{I}$ laskemisen yhtälöä (2) käyttäen.
20

Nyt viitataan lisäesimerkkeihin, joita on havainnollistettu oheisissa piirustuksissa.

Kuvio 1 esittää yhtä mahdollista neliönmuotoisten kentän luovien kelojen kokoonpanoa mittaustilavuuden ympärillä esillä olevan keksinnön eräässä suoritusmuodossa. 24 kpl keloja 10 on järjestetty kolmen kelan ryhmiin kuhunkin suorakulmaisen kehyksen 11 kahdeksasta kulmasta. Kussakin kulmassa ovat kolme kelaa 10 ovat keskenään ortogonaalisia. Jos mittaus-
25 laite on asetettu magneettisesti suojattuun huoneeseen, kehys 11 voi olla huoneen sisäseinä. Origin kaksi mahdollista paikkaa, mittaustilavuuden keskikohdat, on osoitettu numerolla 12.
30

Kuvio 2 esittää elektroniikkajärjestelyä, joka säätää virrat kelakokoonpanossa 20 joko mittauskentän ja gradienttien aikaansaamiseksi MRI-laitetta koskien tai MEG-laitteen ympäristöhäiriön aktiivisen kom-
35

pensoinnin aikaansaamiseksi esillä olevan keksinnön eräässä suoritusmuodossa. Mittaustilavuus (esim. MSR) on esitetty numerolla 21, jolloin potilas on sijoitettu mittausantureiden 22 läheisyyteen. Järjestelmän
 5 asettaminen alkaa kokoonpanon kelojen 20 kenttävektorien $\mathbf{B}_c$ määrittelyksellä sen ympäristössä. Tiedonkeruu-elektroniikka 23 käskää virtalähteen 29, jossa on n_c lähtöä 29', syöttää virtaa kokoonpanossa oleviin ke-loihin 20 yhteen kerrallaan. Magnetometrikanavaryhmä
 10 22' rekisteröi tuloksena olevat kelasignaalit, ja ne tallennetaan keruujärjestelmään 23.

MRI-toiminnon 24 asettamiseksi nämä kelasignaalit hajotetaan karteesisisiin kenttäkomponentteihin ja niiden derivaattoihin, jotka ovat $\mathbf{B}_c$ -vektorien kom-
 15 ponentit MRI-sovellusta koskien. Tämän jälkeen näistä $\mathbf{B}_c$ -vektoreista muodostetaan $\mathbf{M}$ -matriisi ja virtavekto-rit $\mathbf{I}_{MRI}$ määritetään $\mathbf{M}$:n inverssi ottamalla. Kukin näistä $\mathbf{I}_{MRI}$ -vektoreista, kun ne syötetään syötteenä virtalähteeseen 29, johtaa puhtaaseen karteesiseen
 20 mittauskenttään tai puhtaaseen gradienttikenttään. Nä-mä vektorit tallennetaan MRI-ohjausyksikköön 24. MRI-toiminnassa tämä yksikkö säättää MRI-sekvenssin ajoituksen ja rekisteröintikenttägeometriat lähettämällä -sekä tasaisen kentän että gradientin - oikeat $\mathbf{I}_{MRI}$ -
 25 vektorit yhteyden 26a välityksellä n_c -kanavan virta-lähteeseen 29.

Jos käytetään aktiivista häiriönkompensointi-toimintoa edellä mainittua toista tilannetta noudatta-en, näitä $\mathbf{I}_{MRI}$ -virtavektoreita voidaan silloin käyttää
 30 myös aktiiviseen kompensointiin. Jos kuitenkin sovel-letaan kolmatta tilannetta, häiriön PCA-analyysistä saatua informaatiota täytyy käyttää $\mathbf{B}_c$ -vektorien mää-rittelyyn. Rekisteröidyt kelasignaalit hajotetaan nyt koordinaatistossa, joka koostuu häiriön ensimmäisistä
 35 n_p PCA-komponentista ja sitten B-kenttäkomponenttien korkeammista derivaatoista (katso myös kuvio 4). Tämä johtaa hieman erilaisiin $\mathbf{B}_c$ -vektoreihin ja $\mathbf{M}$ -

matriisiin kuin MRI-tapauksessa ja virtavektoreihin $\mathbf{I}_{AC}$, jotka eroavat vektoreista $\mathbf{I}_{MRI}$. Kun aktiivinen kompensointi 25 on toiminnassa, näistä $\mathbf{I}_{AC}$ -vektoreista n_p ensimmäistä vektoria kerrotaan kompensoinnin takaisin-
5 kytkentäsilmutukoiden nollailmaisimina käytetyistä antureista 22 vastaanotetuilla virhesignaaleilla ja siirretään sitten yhteyden 26b välityksellä summainten 27b ja 27c ja kytkimen 28b kautta virtalähteeseen 29. Yhteyksissä 26a-b olevilla kahdella kytkimellä 28a-b
10 voidaan valita MRI- 24 ja MEG-toiminnon (aktiivisen kompensoinnin) 25 välillä. MRI-toimintatilassa summainsyksikkö 27a summaa kaksi vektoria $\mathbf{I}_{MRI}$, jotka vastaavat MRI-mittauskenttää ja valittua gradienttia. Tätä vastoin MEG-toimintatilassa summainsyksikkö 27b summaa aktiivisen kompensoinnin aikana $\mathbf{I}_{AC}$ -vektorit (n_p
15 virhesignaaleilla painotettuina) n_c -komponenttivirtavektorin muodostamiseksi, joka torjua vallitsevia häiriökomponentteja (sen n_p PCA-komponenttia). Nämä molemmat signaalit syötetään virtalähteeseen 29 summainsyksikön 27c kautta valitun toimintatilan ollessa kytkettynä päälle (28a tai 28b).
20 Kuten aiemmin tuotiin esiin MRI-mittauksia koskien, yhdessä suoritusmuodossa MRI-elektroniikka 24 voi toimia isäntälaitteena MEG-mittauslaitteelle 23, joka
25 voidaan asettaa orjalaitteeksi, joka toimii magneettiresonanssisignaalien mittausinstrumenttina. Tämä on ilmaistu kuviossa 2 kahden yksikön 23, 24 välisenä kaksisuuntaisena nuolena.

Kuvio 3 esittää keksinnön mukaisen menetelmän
30 erästä suoritusmuotoa MRI-sovellukseen tarkoitettun kelakokoonpanon suunnitteluprosessin vuokaaviona. Tämä kaavio on eräänlainen yhteenveto edeltävissä kappaleissa jo käsitellyistä vaiheista. Toimintasarjan ensimmäisessä vaiheessa kunkin kokoonpanossa olevan kelan tuottama magneettikenttä lasketaan tai mitataan origossa 30. Tämän jälkeen kaikille kokoonpanossa oleville keloille määritetään kenttävektori $\mathbf{B}_c$ (pystyvek-

tori, joka käsittää elementit $B_x, B_y, B_z, dB_x/dx, \dots$)
 31. Sen jälkeen ollaan valmiita rakentamaan matriisi $\mathbf{M}$
 32 kaikkien kelojen kenttävektoreista. Tämän jälkeen
 voidaan määrittää $\mathbf{M}:\mathbf{n}$ häiriöalttius 33, joka kertoo,
 5 kuinka lähellä singulaarista matriisi $\mathbf{M}$ itse asiassa
 on. Jos häiriöalttius on suurempi kuin sata (tai mikä
 tahansa muu haluttu kynnyksarvo), kelakokoonpanoa täy-
 tyy muuntaa 34. Tilanteesta riippuen tämä tarkoittaa
 yksittäisten kelojen uudelleensijoittelua tai uudel-
 10 leensuuntausta tai kelojen määrän vähentämistä tai li-
 säämistä kokoonpanossa. Siinä tapauksessa on aloitet-
 tava toimintosarjan alusta ja laskettava tai mitattava
 jälleen muunnetun kokoonpanon kunkin kelan kentät 30.

Kun häiriöalttiuden tulokseksi tulee alle sa-
 15 ta, voidaan päättää, että kelakokoonpano on toteutta-
 miskelpoinen, ja virtavektorit $\mathbf{I}_{\text{MRI}}$ voidaan laskea 35
 yhtälön (2) mukaisesti. Lopuksi viimeisessä vaiheessa
 36 $\mathbf{I}_{\text{MRI}}$ -vektorit, jotka vastaavat mittauskenttiä ja
 gradientteja, voidaan asentaa MRI-yksikköön.

20 Kuvio 4 esittää erästä esimerkkiä erääseen
 muuhun sovellukseen, MEG:ssä tapahtuvaan aktiiviseen
 häiriönpoistoon, tarkoitetun kelakokoonpanon suunnit-
 teluprosessin vuokaaviona. Aluksi mittauksilavuuteen,
 esim. MSR:n sisälle, asetetaan kompensointikelojen ko-
 25 koonpano 40. Sen jälkeen voidaan mitata taustahäiriö
 41 ilman läsnä olevaa kohdetta ja hajottaa tämä häi-
 ritsevä kenttä komponentteihin $B_1, B_2, \dots, B_{n_p}$ (n_p tar-
 koittaa häiriön hallitsevien PCA-komponenttien mää-
 rää). Tämän jälkeen voidaan mitata kustakin kelasta
 30 peräisin olevat magneettikentät origossa 42. Sen jäl-
 keen voidaan määrittää kenttävektorit $\mathbf{B}_c$ ($B_1, B_2, \dots,$
 $B_{n_p}, d^2B_x/dx^2, \dots$)^T kaikille keloille 43. Kun $\mathbf{B}_c$:t on
 saatu, voidaan rakentaa matriisi $\mathbf{M}$ 44. Samoin kuin ku-
 vion 3 suoritusmuodossa voidaan tarkistaa matriisin $\mathbf{M}$
 35 häiriöalttius 45, so. voidaan tarkistaa, onko matriisi
 $\mathbf{M}$ singulaarinen, lähellä singulaarista vai etäällä
 singulaarisesta. Kelojen kokoonpanoa on muunnettava 46

ja taustahäiriö on mitattava uudelleen, kunnes saavutetaan matriisi **M**, joka voidaan invertoida (häiriöalttius pienempi kuin 100 tai mikä tahansa muu haluttu kynnysarvo). Siinä tapauksessa voidaan laskea virta-
5 vektorit $\mathbf{I}_{AC}$ 47 yhtälöä (2) käyttämällä. Lopuksi vektorit $\mathbf{I}_{AC}$ voidaan asentaa MEG-laitteen aktiiviseen kompensointiyksikköön 48.

Esiteltä menetelmä voidaan toteuttaa tietokoneohjelmalla, joka voi ohjata tietojenkäsittelylaitteen toimeenpanemaan soveltuvat menetelmävaiheet. Tie-
10 tokoneohjelma voidaan tallentaa prosessorin tai muun ohjausvälineen käytettävissä olevalle muistivälineelle.

Alan ammattilaiselle on ilmeistä, että tekniikan kehittyessä keksinnön perusajatus voidaan toteuttaa eri tavoin. Keksintöä ja sen suoritusmuotoja ei näin ollen ole rajoitettu edellä kuvattuihin esimerkkeihin; sen sijaan ne voivat vaihdella patenttivaatimusten puitteissa.

20

PATENTTIVAATIMUKSET

1. Kelakokoonpanojen (10,20) suunnittelumene-
telmä magneettikenttien luomiseksi, joilla on haluttu-
ja geometrisiä muotoja tietyn origon (12) ympärillä,
5 tunnettu siitä, että menetelmä käsittää seuraavat vai-
heet:

hajotetaan (41) kenttä, jonka kussakin kelassa
(10,20) oleva testivirta (29') on luonut kerrallaan
origon ympärille, kentän haluttuihin ja ei-haluttuihin
10 komponentteihin,

muodostetaan (43,44) hajotettujen komponenttien
perusteella lineaarinen yhtälöryhmä, joka tuottaa ken-
tän saman hajotelman, joka on tuloksena kelakokoonpa-
non (10,20) kelojen samanaikaisesta virroituksesta
15 tuntemattomien virtojen joukolla, ja

määritetään (47) niiden tuntemattomien virtojen
joukko, joka johtaa kenttien haluttuihin geometrisiin
muotoihin, lineaarinen yhtälöryhmä ratkaisemalla.

2. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä,
20 tunnettu siitä, että kunkin kelan (10,20) kentän hajo-
telma lasketaan origon (12) ympärillä kelakokoonpanon
geometrian perusteella käyttäen yhtälöitä, jotka ku-
vaavat magneettikentän käyttäytymistä tyhjiössä.

3. Jonkin patenttivaatimuksista 1-2 mukainen
25 menetelmä, tunnettu siitä, että kunkin kelan (10,20)
kentän hajotelma saadaan mainitussa kelassa olevan
testivirran origon ympärille aiheuttaman magneetti-
kenttäjakauman mittauksen (42) perusteella.

4. Jonkin patenttivaatimuksista 1-3 mukainen
30 menetelmä, tunnettu siitä, että halutut kenttäkom-
ponentit ja ei-halutut kenttäkomponentit rakennetaan
magneettikentän kolmesta ortogonaalisesta komponentis-
ta ja niiden riippumattomista karteesisista derivaa-
toista.

35 5. Jonkin patenttivaatimuksista 1-3 mukainen
menetelmä, tunnettu siitä, että halutut kenttäkom-
ponentit rakennetaan magneettikentän kolmesta ortogo-

naalisesta komponentista ja niiden viidestä riippumattomasta karteesisesta ensimmäisen kertaluvun derivaatasta ja ei-halutut kenttäkomponentit ovat seitsemän riippumattonta karteesisista toisen kertaluvun derivaattaa.

6. Jonkin patenttivaatimuksista 1-5 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että tuntematon virtavektori lasketaan matriisin Moore-Penrose-pseudoinverssin ja samanaikaisesti virroitettujen kelojen origossa summatun kenttävektorin tulon avulla, jossa mainittu matriisi käsittää kenttäkomponenttivektorit testivirralla viritetyille kullekin kelalle (10,20).

7. Patenttivaatimuksen 6 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että menetelmä käsittää lisäksi seuraavat vaiheet:

määritetään (45) mainitun matriisin singulariteettiaste häiriöalttiuden avulla ja siinä tapauksessa, että mainitun matriisin häiriöalttius ylittää halutun kynnyksarvon ja siten ilmaisee singulaarista tai olennaisesti singulaarista matriisia,

muunnetaan (46) kelakokoonpanoa, ja kun mainitun matriisin uudelleenmääritetty häiriöalttius on alle halutun kynnyksarvon ja siten ilmaisee ei-singulaarista matriisia,

lasketaan (47) tuntemattomien virtojen joukko.

8. Patenttivaatimuksen 3 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että halutut kenttäkomponentit käsitävät vähintään yhden hallitsevan ulkoisen häiriökomponentin tai yhden tai useita hallitsevien ulkoisten häiriökomponenttien lineaariyhdistelmiä, jotka on määritetty erillisen häiriömittauksen (41) perusteella.

9. Patenttivaatimuksen 8 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että haluttuina kenttäkomponentteina käytetyt hallitsevat ulkoiset häiriökomponentit määritetään erillisen häiriömittauksen pääkomponenttianaalyysin tai riippumattomien komponenttien analyysin perusteella.

10. Patenttivaatimuksen 8 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että hallitsevien ulkoisten häiriökomponenttien lineaariyhdistelmiä käytetään takaisinkytkentäkenttämutoina aktiivisen kompensoinnin järjestelmässä, jossa takaisinkytkentäkenttämudot muodostavat lineaariyhdistelmät sekä antureiden (22) sijainnit ja suuntaukset valitaan siten, että samanaikaisesti toimivien takaisinkytkentäsilrukoiden välinen kytkentä on minimoitu.

10 11. Jonkin patenttivaatimuksista 1-10 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että menetelmä käsittää lisäksi kytkennän (28a, 28b) magneettikenttiä sekä gradientteja luovan magneettiresonanssikuvauksen (24) toiminnallisuuden ja ympäristön häiriön aktiivisen
15 kompensoinnin suorittavan magnetoenkefalografialaitteen toiminnallisuuden (25) välillä.

12. Magneettiresonanssikuvauksen tai magnetoenkefalografialaitteisto, jossa on kelakokoonpano (20) magneettikenttien luomiseksi, joilla on haluttuja geometrisiä mutoja tietyn origon ympärillä, ja joka käsittää:

anturiryhmän (22'), joka käsittää joukon antureita (22) monikanavadataan mittaamiseksi, ja

ohjausvälineet (23) laitteiston ohjaamiseksi,
25 tunnettu siitä, että laitteisto käsittää lisäksi:

ohjausvälineet (23), joka on järjestetty hajottamaan kenttä, jonka kussakin kelassa (20) oleva testivirta (29') on kerrallaan luonut origon ympärille,
30 kentän haluttuihin ja ei-haluttuihin komponentteihin,

ohjausvälineet (23), joka on järjestetty muodostamaan hajotettujen komponenttien perusteella lineaarinen yhtälöryhmä, joka tuottaa kentän saman hajotelman, joka on tuloksena kelakokoonpanon kelojen (20) samanaikaisesta virroituksesta tuntemattomien virtojen joukolla, ja

ohjausvälineet (23), joka on järjestetty määrittämään niiden tuntemattomien virtojen joukko, jotka johtavat kenttien haluttuihin geometrisiin muotoihin, lineaarinen yhtälöryhmä ratkaisemalla.

5 13. Patenttivaatimuksen 12 mukainen laitteisto, tunnettu siitä, että ohjausvälineet (23) on järjestetty laskemaan kunkin kelan (20) kentän hajotelma origon ympärillä kelakokoonpanon (20) geometrian perusteella käyttäen yhtälöitä, jotka kuvaavat magneettikentän käyttäytymistä tyhjiössä.

10 14. Jonkin patenttivaatimuksista 12-13 mukainen laitteisto, tunnettu siitä, että ohjausvälineet (23) on järjestetty saamaan kunkin kelan (20) kentän hajotelma mainitussa kelassa (20) olevan testivirran (29') origon ympärille aiheuttaman magneettikenttäjakauman mittauksen perusteella.

15 15. Jonkin patenttivaatimuksista 12-14 mukainen laitteisto, tunnettu siitä, että ohjausvälineet (23) on järjestetty rakentamaan halutut kenttäkomponentit ja ei-halutut kenttäkomponentit magneettikentän kolmesta ortogonaalisesta komponentista ja niiden riippumattomista karteesisista derivaatoista.

20 16. Jonkin patenttivaatimuksista 12-14 mukainen laitteisto, tunnettu siitä, että ohjausvälineet (23) on järjestetty rakentamaan halutut kenttäkomponentit magneettikentän kolmesta ortogonaalisesta komponentista ja niiden viidestä riippumattomasta karteesisesta ensimmäisen kertaluvun derivaatasta ja ei-halutut kenttäkomponentit ovat seitsemän riippumatonta karteesisista toisen kertaluvun derivaattaa.

25 17. Jonkin patenttivaatimuksista 12-16 mukainen laitteisto, tunnettu siitä, että ohjausvälineet (23) on järjestetty laskemaan tuntematon virtavektori matriisin Moore-Penrose-pseudoinverssin ja samanaikaisesti virroitettujen kelojen (20) origossa summatun kenttävektorin tulon avulla, jossa mainittu matriisi

käsittää kenttäkomponenttivektorit testivirralla (29') viritetyille kullekin kelalle (20).

18. Patenttivaatimuksen 17 mukainen laitteisto, tunnettu siitä, että laitteisto käsittää lisäksi:

5 ohjausvälineet (23), joka on järjestetty määrittämään mainitun matriisin singulariteettiaste häiriöalttiuden avulla ja siinä tapauksessa, että mainitun matriisin häiriöalttius ylittää halutun kynnsarvon ja siten ilmaisee singulaarista tai olennaisesti singulaarista matriisia,

10 muuntovälineet on järjestetty muuntamaan kelakoonpanoa (20), ja kun mainitun matriisin uudelleenmääritetty häiriöalttius on alle halutun kynnsarvon ja siten ilmaisee ei-singulaarista matriisia,

15 ohjausvälineet (23) on järjestetty laskemaan tuntemattomien virtojen joukko.

19. Patenttivaatimuksen 14 mukainen laitteisto, tunnettu siitä, että halutut kenttäkomponentit käsittävät vähintään yhden hallitsevan ulkoisen häiriökomponentin tai yhden tai useita hallitsevien ulkoisten häiriökomponenttien lineaariyhdistelmiä, jotka on määritetty erillisen häiriömittauksen perusteella.

20. Patenttivaatimuksen 19 mukainen laitteisto, tunnettu siitä, että ohjausvälineet (23) on järjestetty määrittämään haluttuina kenttäkomponentteina käytetyt hallitsevat ulkoiset häiriökomponentit erillisen häiriömittauksen pääkomponenttianalyysin tai riippumattomien komponenttien analyysin perusteella.

21. Patenttivaatimuksen 19 mukainen laitteisto, tunnettu siitä, että ohjausvälineet (23) on järjestetty käyttämään hallitsevien ulkoisten häiriökomponenttien lineaariyhdistelmiä takaisinkytkentämuotoina aktiivisen kompensoinnin järjestelmässä (25, 29, 20), jossa takaisinkytkentämuodot muodostavat lineaariyhdistelmät sekä antureiden (22) sijainnit ja suuntaukset valitaan siten, että samanaikaisesti

toimivien takaisinkytkentäsilistikoiden välinen kytkentä on minimoitu.

22. Jonkin patenttivaatimuksista 12-21 mukainen laitteisto, tunnettu siitä, että laitteisto käsittää lisäksi kytkentävälineet (28a, 28b), jotta voidaan valita magneettiresonanssikuvauksen toiminnallisuuden (24), joka on järjestetty luomaan magneettikenttiä sekä gradientteja, ja magnetoenkefalografialaitteen toiminnallisuuden (25), joka on järjestetty suorittamaan ympäristön häiriön aktiivinen kompensointi, välillä.

23. Tietokoneohjelma kelakokoonpanon (10,20) avulla tapahtuvan magneettikenttien luomisen ohjaamiseksi, joilla kentillä on haluttuja geometrisiä muotoja tietyn origon (12) ympärillä, tunnettu siitä, että tietokoneohjelma käsittää koodia, joka on järjestetty suorittamaan seuraavat vaiheet tietojenkäsittelylaitteella toimeenpantuna:

hajotetaan (41) kenttä, jonka kussakin kelassa (10,20) oleva testivirta (29') on kerrallaan luonut origon (12) ympärille, kentän haluttuihin ja ei-haluttuihin komponentteihin,

muodostetaan (43,44) hajotettujen komponenttien perusteella lineaarinen yhtälöryhmä, joka tuottaa kentän saman hajotelman, joka on tuloksena kelakokoonpanon kelojen (10,20) samanaikaisesta virroituksesta tuntemattomien virtojen joukolla, ja

määritetään (47) niiden tuntemattomien virtojen joukko, jotka johtavat kenttien haluttuihin geometrisiin muotoihin, lineaarinen yhtälöryhmä ratkaisemalla.

PATENTKRAV

1. Förfarande för att planera spolsammansättningar (10,20) för att generera magnetfält, som har önskade geometriska former omkring en given origo (12), kännetecknat av att förfarandet innefattar följande skeden:

att upplösa (41) ett fält, som genererats en gång av en testström (29') i varje spole (10,20) omkring origo (12), i önskade och icke-önskade komponenter av fältet,

att på basis av de upplösta komponenterna bilda (43,44) en lineär ekvationsgrupp, som genererar samma upplösning av fältet, som är resultat av en samtidig strömföring av spolsammansättnings spolar (10,20) med en grupp okända strömmar, och

att definiera (47) en grupp av okända strömmar, som leder till fältens önskade geometriska former, genom att lösa den lineära ekvationsgruppen.

2. Förfarande enligt patentkrav 1, kännetecknat av att fältupplösningen i varje spole (10,20) räknas omkring origo (12) på basis av spolsammansättnings geometri genom att använda ekvationer, vilka beskriver magnetfältets beteende i ett vakuum.

3. Förfarande enligt något av patentkraven 1-2, kännetecknat av att fältupplösningen i varje spole (10,20) åstadkommas på basis av mätning (42) av magnetfältsfördelningen förorsakad av testströmmen omkring origo i nämnda spole.

4. Förfarande enligt något av patentkraven 1-3, kännetecknat av att önskade fältkomponenter och icke-önskade fältkomponenter konstrueras av magnetfältets tre ortogonala komponenter och deras oberoende kartesiska derivator.

5. Förfarande enligt något av patentkraven 1-3, kännetecknat av att önskade fältkomponenter konstrueras av magnetfältets tre ortogonala komponenter och deras fem oberoende kartesiska derivator av första

ordningen och de icke-önskade fältkomponenterna består av sju oberoende kartesiska derivator av andra ordningen.

6. Förfarande enligt något av patentkraven 1-5, kännetecknat av att en okänd strömvektor räknas med hjälp av Moore-Penrose-pseudoinversen av en matris och med produkten av fältvektorn som summerats i de samtidigt strömförda spolarnas origo, varvid nämnda matris innefattar fältkomponentvektorer för varje spole (10,20) som exciterats med testström.

7. Förfarande enligt patentkrav 6, kännetecknat av att förfarandet dessutom innefattar följande skeden:

att definiera (45) singularitetsgraden för nämnda matris med hjälp av störningsbenägenheten och ifall störningsbenägenheten hos nämnda matris överstiger ett önskat tröskelvärde och sålunda detekterar en singular eller väsentligt singular matris,

att omvandla (46) spolsammansättningen, och när den omdefinierade störningsbenägenheten hos nämnda matris understiger ett önskat tröskelvärde och sålunda detekterar en icke-singular matris,

att räkna (47) gruppen av okända strömmar.

8. Förfarande enligt patentkrav 3, kännetecknat av att önskade fältkomponenter innefattar åtminstone en dominerande extern störningskomponent eller lineärkombinationer av en eller flera dominerande externa störningskomponenter, vilka är definierade på basis av en separat störningsmätning (41).

9. Förfarande enligt patentkrav 8, kännetecknat av att de dominerande externa störningskomponenterna som används som önskade fältkomponenter definieras på basis av en huvudkomponentanalys av en separat störningsmätning eller av en analys av de oberoende komponenterna.

10. Förfarande enligt patentkrav 8, kännetecknat av att lineärkombinationer av de dominerande

externa störningskomponenterna används som återkopplingsfältformer i ett system av aktiv kompensering, i vilket återkopplingsfältformerna bildar lineärkombinationer samt sensorernas (22) positioner och riktningar väljs så att kopplingen mellan de samtidigt fungerande återkopplingsfältsslingorna minimerats.

11. Förfarande enligt något av patentkraven 1-10, kännetecknat av att förfarandet dessutom innefattar en koppling (28a, 28b) mellan funktionaliteten av en magnetresonansfotografering (24) som genererar magnetfält samt gradienter och funktionaliteten av en magnetoenkefalografianordning (25) som utför en aktiv kompensering av en störning i omgivningen.

12. Magnetresonansfotograferings- eller magnetoenkefalografianläggning, innefattande en spolsammansättning (20) för att generera magnetfält, som har önskade geometriska former omkring en given origo, och som innefattar:

en sensorgrupp (22'), som innefattar en grupp sensorer (22) för att mäta flerkanaldata, och styrmedel (23) för att styra anläggningen, kännetecknad av att anläggningen dessutom innefattar:

styrmedel (23), anordnade att upplösa ett fält, som genererats en gång av en testström (29') i varje spole (20) omkring origo, i önskade och icke-önskade komponenter av fältet,

styrmedel (23), som anordnats att på basis av de upplösta komponenterna bilda en lineär ekvationsgrupp, som genererar samma upplösning av fältet, som är resultat av en samtidig strömföring av spolsammansättningens spolar (20) med en grupp okända strömmar, och

styrmedel (23), som anordnats att definiera en grupp okända strömmar, som leder till fältens önskade geometriska former, genom att lösa den lineära ekvationsgruppen.

13. Anläggning enligt patentkrav 12, kännetecknad av att styrmedlen (23) är anordnade att räkna fältupplösningen i varje spole (20) omkring origo på basis av spolsammansättnings (20) geometri genom att använda ekvationer, vilka beskriver magnetfältets beteende i ett vakuum.

14. Anläggning enligt något av patentkraven 12-13, kännetecknad av att styrmedlen (23) är anordnade att åstadkomma fältupplösningen i varje spole (20) på basis av mätning av magnetfältsuppdelningen omkring origo förorsakad av testströmmen (29') i nämnda spole (20).

15. Anläggning enligt något av patentkraven 12-14, kännetecknad av att styrmedlen (23) är anordnade att konstruera önskade fältkomponenter och icke-önskade fältkomponenter av magnetfältets tre ortogonala komponenter och deras oberoende kartesiska derivator.

16. Anläggning enligt något av patentkraven 12-14, kännetecknad av att styrmedlen (23) är anordnade att konstruera önskade fältkomponenter av magnetfältets tre ortogonala komponenter och deras fem oberoende kartesiska derivator av första ordningen och de icke-önskade fältkomponenterna består av sju oberoende kartesiska derivator av andra ordningen.

17. Anläggning enligt något av patentkraven 12-16, kännetecknad av att styrmedlen (23) är anordnade att räkna en okänd strömvektor med hjälp av Moore-Penrose-pseudoinversen av en matris och med produkten av fältvektorn som summerats i de samtidigt strömförda spolarnas (20) origo, varvid nämnda matris innefattar fältkomponentvektorer för varje spole (20) som exciterats med testström (29').

18. Anläggning enligt patentkrav 17, kännetecknad av att anläggningen dessutom innefattar:

styrmedel (23), anordnade att definiera singularitetsgraden för nämnda matris med hjälp av stör-

ningsbenägenheten och ifall störningsbenägenheten hos nämnda matris överstiger ett önskat tröskelvärde och sålunda detekterar en singular eller väsentligt singular matris,

omvandlingsmedel är anordnade att omvandla spolsammansättningen (20), och när den omdefinierade störningsbenägenheten hos nämnda matris understiger ett önskat tröskelvärde och sålunda detekterar en icke-singular matris,

styrmedlen (23) är anordnade att räkna gruppen av okända strömmar.

19. Anläggning enligt patentkrav 14, kännetecknad av att de önskade fältkomponenterna innefattar åtminstone en dominerande extern störningskomponent eller lineärkombinationer av en eller flera dominerande externa störningskomponenter, vilka är definierade på basis av en separat störningsmätning.

20. Anläggning enligt patentkrav 19, kännetecknad av att styrmedlen (23) är anordnade att definiera de dominerande externa störningskomponenterna som används som önskade fältkomponenter på basis av en huvudkomponentanalys av en separat störningsmätning eller av en analys av oberoende komponenter.

21. Anläggning enligt patentkrav 19, kännetecknad av att styrmedlen (23) är anordnade att använda lineärkombinationer av dominerande externa störningskomponenter som återkopplingsfältformer i ett system (25, 29, 20) av aktiv kompensering, i vilket återkopplingsfältformerna bildar lineärkombinationer samt sensorernas (22) positioner och riktningar väljs så att kopplingen mellan de samtidigt fungerande återkopplingsslingorna minimerats.

22. Anläggning enligt något av patentkraven 12-21, kännetecknad av att anläggningen dessutom innefattar kopplingsmedel (28a, 28b) så att man kan välja mellan funktionalitet (24) av magnetresonansfotograferingen, som är anordnad att generera magnetfält samt

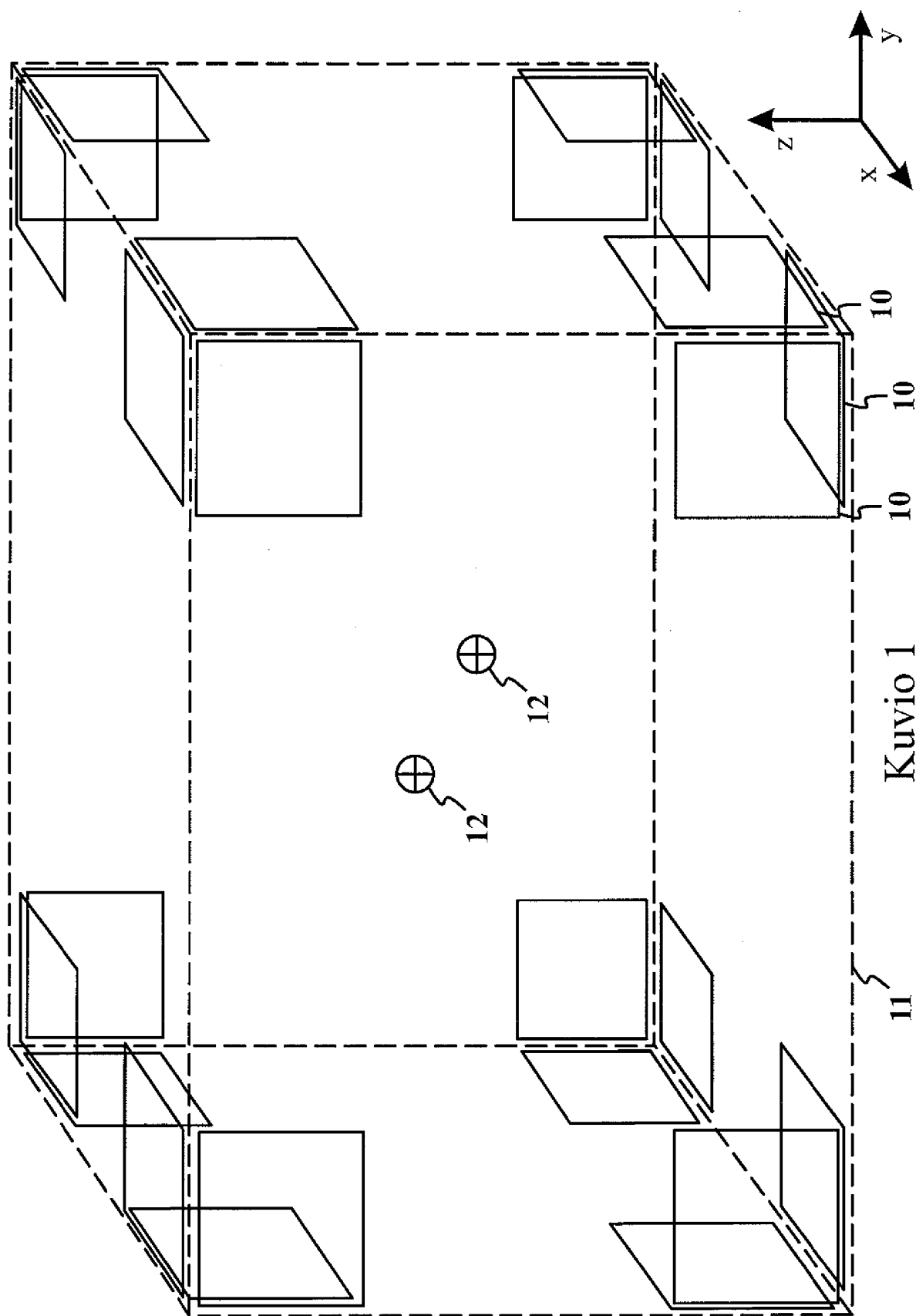
gradienter, och funktionaliteten (25) av magnetoenkefalografianordningen, som är anordnad att utföra en aktiv kompensering av en störning i omgivningen.

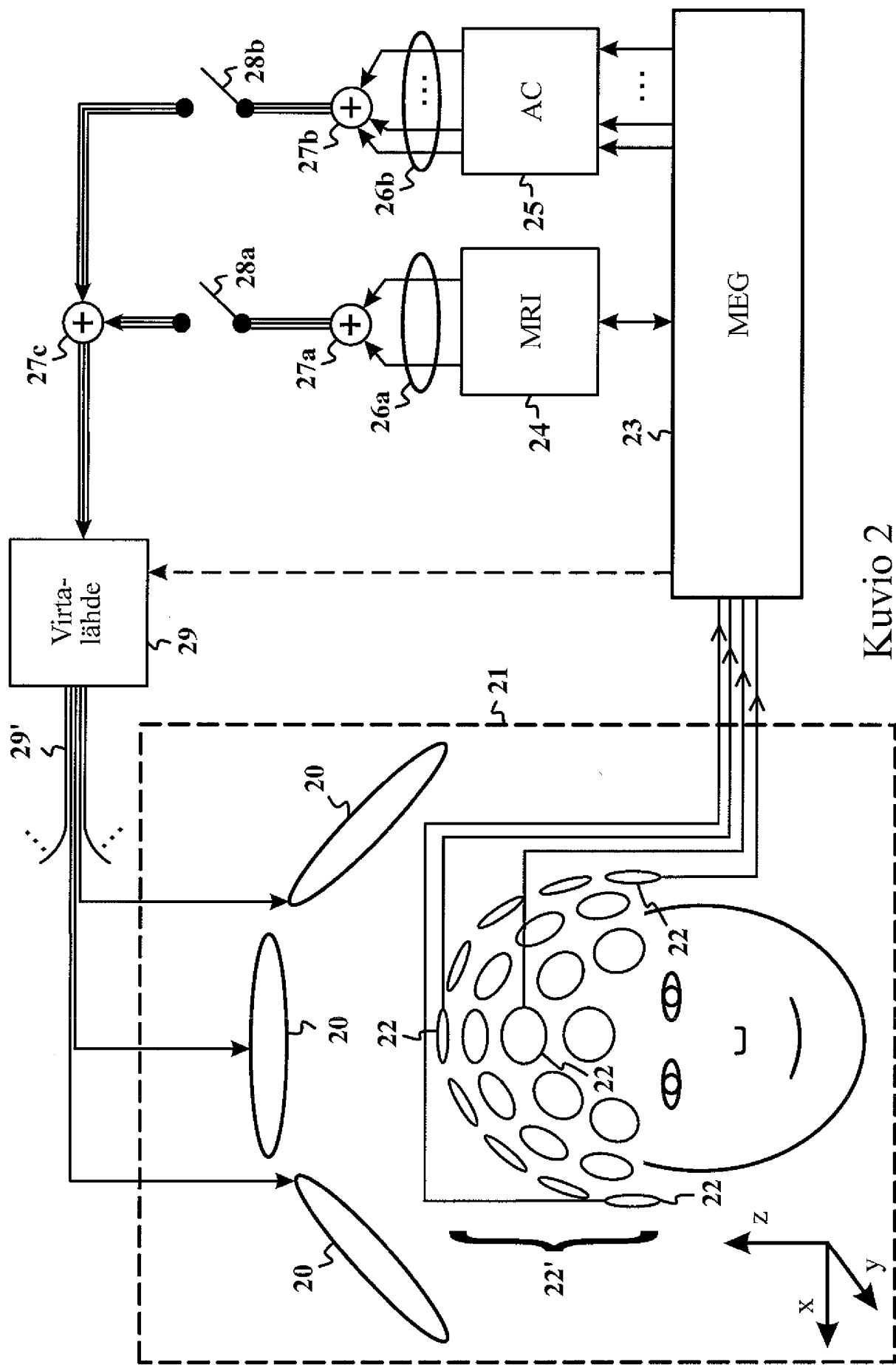
23. Dataprogram för att styra genereringen av magnetfält som sker med hjälp av en spolsammansättning (10,20), vilka fält har önskade geometriska former omkring en given origo (12), kännetecknat av att dataprogrammet innefattar kod, som är anordnad att exekvera följande skeden som verkställs med en dataprocessor:

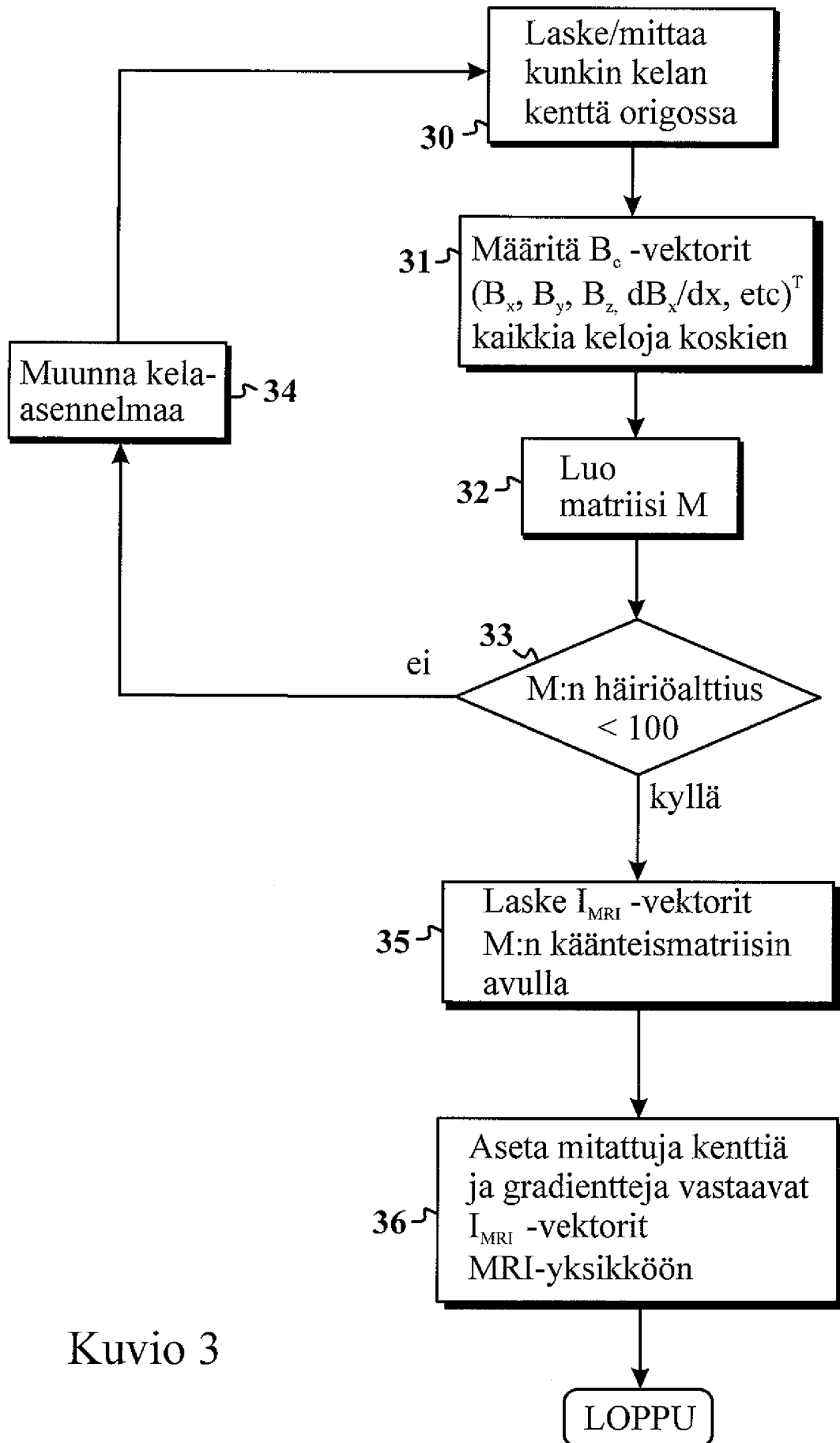
att upplösa (41) ett fält, som genererats en gång av en testström (29') i varje spole (10,20) omkring origo (12), i önskade och icke-önskade komponenter i fältet,

att bilda (43,44) en lineär ekvationsgrupp på basis av de upplösta komponenterna, som genererar samma upplösning av fältet, som är resultat av en samtidig strömföring av spolsammansättnings spolar (10,20) med gruppen av okända strömmar, och

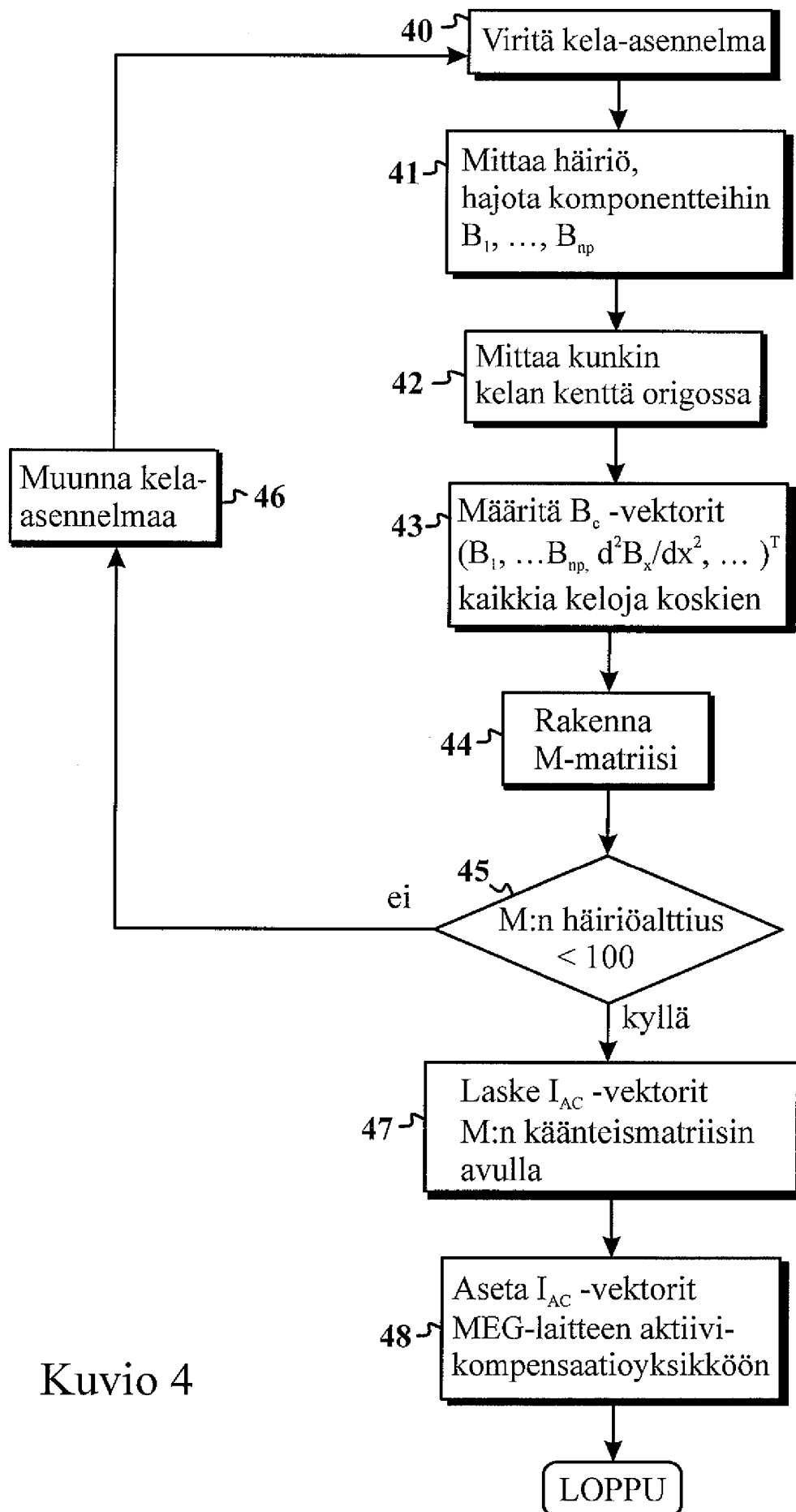
att definiera (47) en grupp av okända strömmar, vilka leder till fältens önskade geometriska former, genom att lösa den lineära ekvationsgruppen.







Kuvio 3



Kuvio 4