

(19)



SUOMI - FINLAND

(FI)

PATENTTI- JA REKISTERIHALLITUS

PATENT- OCH REGISTERSTYRELSEN

FINNISH PATENT AND REGISTRATION OFFICE

(10) **FI 903969 A7**

(12) **JULKISEKSI TULLUT PATENTTIHAKEMUS
PATENTANSÖKAN SOM BLIVIT OFFENTLIG
PATENT APPLICATION MADE AVAILABLE TO THE
PUBLIC**

(21) Patentihakemus - Patentansökan - Patent application 903969

(51) Kansainvälinen patenttiluokitus - Internationell patentklassifikation -
International patent classification
G01R 33/32

(22) Tekemispäivä - Ingivningsdag - Filing date 10.08.1990

(23) Saapumispäivä - Ankomstdag - Reception date 10.08.1990

(41) Tullut julkiseksi - Blivit offentlig - Available to the public 12.02.1991

(43) Julkaisupäivä - Publiceringsdag - Publication date 13.06.2019

(32) (33) (31) Etuokeus - Prioritet - Priority

11.08.1989 US 392692

(71) Hakija - Sökande - Applicant

1 •General Electric Company, One River Road, Schenectady, NY 12345, AMERIKAN YHDYSVALLAT, (US)

(72) Keksijä - Uppfinnare - Inventor

1 •Stormont, Robert Steven, USA, AMERIKAN YHDYSVALLAT, (US)

2 •Noonan, Jeffrey Philip, USA, AMERIKAN YHDYSVALLAT, (US)

3 •Pelc, Norbert Joseph, USA, AMERIKAN YHDYSVALLAT, (US)

(74) Asiamies - Ombud - Agent

Kolster Oy Ab, Salmisaarenaukio 1, 00180 Helsinki

(54) Keksinnön nimitys - Uppfinningens benämning - Title of the invention

RF-syntetisaattori NMR-instrumenttia varten

RF-syntetisator för NMR-instrument

RF-syntetisaattori NMR-instrumenttia varten

Keksinnön alue on ydinmagneettiresonanssimenetelmät ja järjestelmät. Tarkemmin ottaen keksintö koskee RF-syntetisaattoria ja lähetintä RF-kiihdytyspulssien, joilla on tarkka taajuus ja vaihe, tuottamiseksi, ja vastaanotinta jolla tarkasti vastaanotetaan, demoduloidaan ja digitoidaan näin saatavat NMR-signaalit.

Jokainen ydin, jolla on magneettinen momentti, pyrkii kohdistamaan itsensä sen magneettikentän suuntaiseksi, jossa se sijaitsee. Tehdessään näin ydin kuitenkin värähtelee tämän suunnan ympärillä kulmataajuudella (Larmor-taajuus), joka riippuu magneettikentän voimakkuudesta ja kyseessä olevan ydinlajin ominaisuuksista (ytimen magnetogyrinen vakio γ). Ytimiä, joilla on tämä ominaisuus, nimitetään tässä "spineiksi".

Kun sellaiset aineet, kuten ihmiskudos, altistetaan yhtenäiselle magneettikentälle (polarisoiva kenttä B_0), spinien yksittäiset magneettimomentit kudoksessa pyrkivät suuntautumaan tämän polarisoivan kentän mukaan, mutta värähtelevät sen suhteen satunnaisella tavalla niille tyypillisellä Larmor-taajuudella. Polarisoivan kentän suuntaan syntyy netto magneettimomentti M_z , mutta satunnaisesti suuntautuneet magneettikomponentit kohtisuorassa, tai poikittaisessa, tasossa (x-y-taso) kumoavat toisensa. Jos kuitenkin aine tai kudos kohdistetaan magneettikentälle (herätekenttä B_1), joka on x-y-tasossa ja joka on lähellä Larmor-taajuutta, netto suunnattu momentti M_z voi olla pyörähtänyt, tai "kallistunut" x-y-tasoon, jolloin syntyy netto poikittainen magneettimomentti M_x , joka pyörii tai kiertää, x-y-tasossa Larmor-taajuudella. Kulma, johon netto magneettimomentti M_x on kallistunut ja siten netto poikittaisen magneettimomentin M_x suuruus, riippuu pääasiassa ajan pituudesta ja kohdistetun kiihdytyskentän B_1 suuruudesta ja sen taajuudesta.

Tämän ilmiön käytännön arvo on signaalissa, jonka herätetyt spinit lähettävät sen jälkeen kun kiihdytysignaali B_1 on päättynyt. Yksinkertaisissa järjestelmissä herätetyt ytimet indusoivat värähtelevän siniaaltosignaalin vastaanottavaan kelaan. Tämän signaalin taajuus on Larmor-taajuus ja sen alkuperäinen amplitudi A_0 määrätään poikittaisen magneettimomentin M_t suuruudesta. Emissiosignaalin amplitudi A vaimenee eksponentiaalisesti ajan t suhteen:

$$A = A_0 e^{-t/T_2^*}$$

Aikavakio $1/T_2^*$ riippuu magneettikentän homogeenisuudesta ja termistä T_2 , jota nimitetään "spin-spin-palautumisvakioksi", tai "poikittaiseksi palautumisvakioksi". Vakio T_2 on kääntäen verrannollinen eksponentiaalinopeuteen, jolla signaali vaimenee, johtuen ainakin osittain spinien suunnatun värähtelyn vaihepoikkeamasta kiihdytysignaalin B_1 poistamisen jälkeen täydellisen homogeenisessä kentässä.

Toista tärkeää tekijää, joka vaikuttaa NMR-signaalin amplitudiin A , nimitetään spin-ristikko vapautumisprosessiksi, jota kuvaa aikavakio T_1 . Tätä kutsutaan myös pitkittäiseksi vapautumisprosessiksi, koska se kuvaa netto magneettimomentin M palautumista tasapainoarvoonsa pitkin magneettisen polarisaation (z) akselia. T_1 -aikavakio on pidempi kuin T_2 , paljon pidempi useimmissa aineissa, joilla on lääketieteellistä mielenkiintoa. Jos netto magneettimomentille M ei anneta tarpeeksi aikaa palautua tasapainoarvoonsa, seuraavassa pulssisekvenssissä tuotetun NMR-signaalin amplitudi A on pienentynyt.

Esillä olevan keksinnön kannalta erityisen merkityksellisiä NMR-mittauksia kutsutaan "pulssi-NMR-mittauksiksi". Sellaiset NMR-mittaukset jaetaan RF-kiihdytyksen jaksoon ja signaaliemission ja vastaanoton jaksoon. Seläiset mittaukset suoritetaan syklisellä tavalla, jossa NMR-

mittausta toistetaan monta kertaa erilaisen datan kasaamiseksi kunkin jakson aikana tai saman mittauksen suorittamiseksi eri kohdista kohteessa. Tunnetaan lukuisia valmista-
 5 tavia herätetekniikoita, joissa käytetään yhtä tai useampaa RF-herätepulssia (B_1), joilla on vaihteleva voimakkuus, taajuussisältö, vaihe ja kesto. Sellaisilla RF kiihdytyspulssilla voi olla kapea taajuusspektri (selektiiviset herätepulssit), tai niillä voi olla leveä taajuusspektri (epäselektiiviset herätepulssit), jotka voivat
 10 tuottaa poikittaisen magnetoinnin M_t resonanssitaajuuksien alueella. Alalla aiemmin tunnetut menetelmät ovat täpötäynnä RF-herätetekniikoita, jotka on suunniteltu hyödyntämään määrättyä NMR-ilmötä ja jotka voittavat määrättyjä ongelmia NMR-mittausprosessissa.

15 Aivan äskettäin on kehitetty NMR-tekniikoita, jotka asettavat lisää tiukkoja vaatimuksia RF-lähettimille. Jotkin menetelmät, kuten vaihesekeitetut vakaan tilan sekvenssit vaativat, että perättäisten RF-herätepulssien vaiheiden tulee olla siirrettyjä ohjelmoiduilla määrillä, ja
 20 muut menetelmät, kuten nopeat väyläinversiopulssit vaativat, että RF-herätepulssien tulee olla vaihemoduloituja ennalta määrättyllä aaltomuodolla. Edelleen muut menetelmät, kuten monitasokuvaus, vaativat että perättäisten RF-herätepulssien kantoaaltotaajuus tulee olla muutettu ohjelmoidussa kuviossa, ja edelleen muut menetelmät, joissa
 25 käytetään vaihtuvan nopeuden herätepulsseja, vaativat että RF-herätepulssin tulee olla taajuusmoduloitu. Muut menetelmät, sellaiset kuin kuvan katselun poikkeamakenttä, vaativat että vastaanotetun NMR-signaalin demoduloimiseen käytetyn vertailusignaalin tajuus tulee olla taajuussiirretty suhteessa Larmor-taajuuteen, tai vaihesiirretty ohjelmoiduilla määrillä sekvenssistä toiseen. Kaikilla näillä menetelmillä on yhteinen vaatimus, että kantoaaltosignaalin, jota käytettiin tuottamaan RF-heräte, suhteellisel-
 30 sella vaiheella on johdonmukainen tai tunnettu vaiheriip-

35

puvuus vertailusignaaliin, jota käytettiin demoduloimaan vastaanotetut NMR-signaalit. Jos syntetisaattorin signaaleilla, joita käytettiin useissa sekvensseissä jotka muodostavat NMR-datajoukon, ei ole tätä vaiheen johdonmukaisuutta, datan laatu tulee olemaan heikentynyt. Aiemmin tunnetut syntetisaattorit eivät kykene tarjoamaan tätä monipuolisuutta pitäen samalla yllä vaiheen johdonmukaisuuden, tai kykenevät siihen vain hyvin hankalasti.

Esillä oleva keksintö koskee lähetin-vastaanotinta NMR-instrumenttia varten, joka muodostaa tarkasti RF-vertailusignaalit ja herätepulssit, joiden taajuutta tai vaihetta voidaan helposti muuttaa, ja joita voidaan amplitudi-, taajuus- tai vaihemoduloida menettämättä vaiheiden yhdenmukaisuutta. Tarkemmin ottaen keksintö sisältää digitaalisen syntetisaattorin, josa kantoaaltosignaali tuotetaan osoittamalla ja lukemalla sarja digitaalisia numeroita hakutaulukosta ja muuntamalla ne analogiseksi signaaliksi, osoituslaite sisältää ensimmäisen digitaalisen keruulaitteen, joka vastaanottaa tuloonsa digitaalisen kantoaaltotaajuusnumeron, joka määrää nopeuden, jolla ensimmäisen digitaalisen keruulaitteen lähtö vaihtuu, digitaalisen summaimen joka vastaanottaa yhteen tuloon ensimmäisen digitaalisen keruulaitteen lähtöarvon ja joka vastaanottaa toiseen tuloon digitaalisen vaihenumeron, digitaalisen summaimen lähdön ollessa kytketty hakutaulukkomuistiin osoittamaan siihen talletettuja digitaalisia numeroita. Toisessa keksinnön kohteessa toinen digitaalinen keruulaitte vastaanottaa tuloonsa digitaalisen taajuusnumeron, joka määrää nopeuden jolla toisen digitaalisen keruulaitteen lähtö vaihtuu, ja toisen summaimen, joka summaa aritmeettisesti digitaaliset numerot kahden digitaalisen keruulaitteen lähdöissä ja vie summan ensimmäiseen digitaaliseen summaimeen.

Keksinnön yleisenä kohteena on tuottaa NMR-instrumentille RF-signaali, jota voidaan ohjata tarkasti sekä

taajuuden että vaiheen osalta. Käyttämällä digitaalista keruulaitetta antamamaan osoitesyöttö talletettuun digitaaliseen kantoaaltosignaalin esitykseen hakutaulukossa, taajuus, jolla RF-kantoaaltosignaali tuotetaan, voidaan määrätä tarkasti digitaalisella kantoaaltotaajuusnumerolla. RF-kantoaaltosignaalin vaihetta voidaan muuttaa nopeasti ja tarkasti digitaalisella vaihenumerolla, joka vaihtelee osoitetta, joka syötetään hakutaulukkomuistiin, vastaavassa määrin. Samalla tavoin RF-kantoaaltosignaalin taajuus voidaan vaihtaa eri arvoihin, tai sitä voidaan moduloida tarkasti ajan suhteen vaihtelevilla digitaalisilla taajuusnumeroilla, joita syötetään toiseen digitaaliseen keruulaitteeseen, samalla kun ylläpidetään vaiheen johdonmukaisuus suhteessa alkuperäiseen taajuuteen ja vaiheeseen. Molempien digitaalisten keruulaitteiden lähtöarvot summataan yhteen digitaalisesti osoitetun muistipaikan määrittämiseksi hakutaulukkomuistissa, joka puolestaan määrää muodostetun RF-kantoaaltosignaalin taajuuden.

Toinen keksinnön yleinen kohde on vaihdella RF-kantoaaltosignaalin vaihetta tai taajuutta menettämättä vaiheen yhdenmukaisuutta. Kun vaihetta vaihdellaan soveltamalla digitaalista vaihenumeroa, RF-kantoaaltosignaalin alkuperäinen vaihe voidaan helposti palauttaa vaihtamalla yksinkertaisesti digitaalinen vaihenumero takaisin alkuperäiseen, muuttamattomaan arvoonsa. Samalla tavoin jos RF-kantoaaltosignaalin taajuutta muutetaan viemällä digitaalinen taajuusnumero toiseen keruulaitteeseen, alkuperäisen muuttamattoman RF-kantoaaltosignaalin vaihe ja taajuus palautetaan poistamalla digitaalinen taajuusnumero ja nollaamalla toisen digitaalisen keruulaitteen lähtö.

Toinen keksinnön kohde on muodostaa suuritaajuinen RF-kantoaaltosignaali digitaalisen ohjauksen alaisuudessa. Signaali, joka luetaan hakutaulukosta ja muunnetaan analogiseen muotoon, on taajuudella, joka on kohtuullisesti saavutettavissa käyttäen kehittyneimpiä kaupallisesti saa-

tavia komponentteja. Tämä digitaalisesti tuotettu kantoaaltosignaali siirretään sitten halutulle Larmor-taajuudelle sekoittamalla se suuritaajuisiin vertailusignaaleihin ja suodattamalla muut paitsi haluttu sivukaista.

5 Tarkempi keksinnön kohde on tuottaa lähetin-vastaanotin NMR-instrumenttia varten, jossa vaiheen yhdenmukaisuus säilyy RF-lähettimen ja RF-vastaanottimen välillä käyttämällä yhtä digitaalista syntetisaattoria. RF-kantoaaltosignaalit, jotka viedään sekä modulaattoriin RF-lähet-

10 tinossa ja demodulaattoriin RF-vastaanotto-osassa, ovat digitaalisen ohjauksen alaisia. Mikä tahansa vaihemuutos vastaanotetussa NMR-signaalissa tunnistetaan siten tarkasti.

Edellä olevat ja muut keksinnön kohteet ja edut

15 ilmenevät seuraavasta kuvauksesta. Kuvauksessa viitataan liitteenä oleviin piirroksiin, jotka muodostavat osan siitä, ja joissa esitetään havainnollistuksena keksinnön suositeltu toteutus. Sellainen toteutus ei välttämättä edusta keksinnön koko sovellutusaluetta, sen vuoksi kuitenkin

20 viitataan patenttivaatimukseen keksinnön sovellutusalueen tulkitsemiseksi.

Kuvio 1 on lohkokaavio NMR-järjestelmästä, jossa käytetään esillä olevaa keksintöä;

Kuvio 2 on sähköinen lohkokaavio lähetin-vastaan-

25 ottimesta, joka muodostaa osan kuvion 1 NMR-järjestelmästä;

Kuvio 3 on sähköinen lohkokaavio taajuussyntetisaattorista, vertailutaajuusgeneraattorista ja modulaattorista, jotka muodostavat osan kuvion 2 lähetin-vastaan-

otinta;

Kuvio 4 on sähköinen piirikaavio digitaalisesta syntetisaattorista, joka muodostaa osan kuvion 3 taajuus-

30 syntetisaattorista; ja

Kuviot 5a ja 5b ovat graafisia esityksiä kuvion 4 digitaalisten syntetisaattoreiden tuottamista signaaleis-

35 ta.

Tarkasteltaessa ensin kuviota 1, siinä on esitetty lohkokaaviomuodossa suositellun NMR-järjestelmän, joka sisältää esillä olevan keksinnön, tärkeimmät komponentit, ja jota General Electric Company myy tuotemerkillä "SIGNA".

5 Järjestelmän yleistä toimintaa ohjaa isäntätietokonejärjestelmä, jota on yleisesti merkitty tunnuksella 100, joka sisältää päätietokoneen 101 (sellainen kuin Data General MV4000). Tietokoneeseen liittyy liityntä 102, jonka kautta on kytketty useita tietokoneen oheislaitteita ja muita

10 NMR-järjestelmän osia. Tietokoneen oheislaitteisiin kuuluu magneettinauhalaite 104, jota voidaan käyttää päätietokoneen ohjaamana potilasdatan ja kuvien arkistoinniseksi nauhalle. Prosessoitu potilasdata voidaan tallettaa myös kuvien levymuistilaitteelle, joka on merkitty 110. Kuvaprosessorin 108 tehtävä on tuottaa vuorovaikutteinen kuvanäytön käsittely, kuten suurennus, kuvavertailu, harmaasävy-

15 säätö ja reaaliaikainen datanäyttö. Tietokonejärjestelmässä on laitteet, joilla tallennetaan raakadataa (so. ennen kuvien konstruointia) käyttämällä levydatamuistijärjestelmää, joka on merkitty 112. Operaattorin konsoli 116 on myös kytketty tietokoneeseen liitynnän 102 avulla, ja se antaa operattorille mahdollisuuden syöttää potilaan tutkimukseen liittyvää dataa kuin myös lisädataa, joka on tarpeen NMR-järjestelmän kunnollisen toiminnan, kuten kalibroinnin, pyyhkäisyjen aloituksen ja lopetuksen, kannalta. Operaattorin konsolia käytetään myös levyille tai magneettinauhalle talletettujen kuvien näyttöön.

20

25

Tietokonejärjestelmä 100 kontrolloi NMR-järjestelmää systeemiohjaimen 118 ja gradient-vahvistinjärjestelmän 128 avulla. Tietokone 100 kommunikoi järjestelmäohjaimen 118 kanssa kommunikointidatayhteyden 103 kautta tavalla, jonka alan ammattimiehet hyvin tuntevat. Järjestelmäohjain 118 sisältää useita alijärjestelmiä, kuten pulssiohjausmoduulin (PCM) 120, verkkoprosessorin 106, radiotaajuaisen

30

35 lähetin-vastaanottimen 122, tila- ja ohjausmoduulin (SCM)

124, ja teholähteet, joita yleisesti merkitään viitteellä 126, jotka ovat tarpeen komponenttien tehonsyötön kannalta. PCM 120 käyttää ohjaussignaaleja, jotka päätietokone 101 antaa, digitaalisten ajoitus- ja ohjaussignaalien muodostamiseen, kuten digitaaliset aaltomuotojen, jotka ohjaavat gradient-käämin herätettä, kuin myös RF-verhokäyrän aaltomuotojen, joita lähetin-vastaanottimessa 122 käytetään, RF-kiihdytyspulssien moduloimiseksi. Gradient-aaltomuodot viedään gradient-vahvistinjärjestelmään 128, joka yleisesti muodostuu G_x -, G_y - ja G_z -vahvistimista 130, 132 ja 134, vastaavasti. Kutakin vahvistinta 130, 132 ja 134 käytetään vastaavan gradient-käämin herätteen antamiseen rakennelmassa, jota on yleisesti merkitty 136, ja joka on osa magneettirakennelmaa 146. Syötettäessä gradient-käämeihin tehoa, ne muodostavat magneettikentän gradientit G_x , G_y ja G_z samassa suunnassa kuin pääasiallinen polarisoiva magneettikenttä, jossa gradientit on suunnattu keskinäisesti kohtisuoriin X-, Y- ja Z-akselin suuntiin kartesiolaisessa koordinaattijärjestelmässä. Tämä tarkoittaa, että jos päämagneetin (ei esitetty) muodostama magneettikenttä suuntautuu z-suuntaan ja sitä merkitään B_0 , ja kokonaismagneettikenttää z-suunnassa merkitään B_z , silloin $G_x = \partial B_z / \partial x$, $G_y = \partial B_z / \partial y$ ja $G_z = \partial B_z / \partial z$ ja magneettikenttä missä tahansa kohdassa saadaan $B(x, y, z) = B_0 + G_x X + G_y Y + G_z Z$.

Gradient-magneettikenttiä käytetään yhdessä radiotaajuuspulssien kanssa, jotka lähetin-vastaanotin 122, RF-tehovahvistin 123 ja RF-käämi 138 on muodostanut, spatiaalisen informaation koodaamiseksi NMR-signaaleihin, jotka lähtevät tutkittavalta potilaan alueelta. Pulssiohjausmoduulin 120 aaltomuotoja ja ohjaussignaaleja käytetään lähetin-vastaanotin-järjestelmässä 122 RF-kantoaalto-modulointiin ja moodin ohjaukseen. Lähetysmoodissa lähetin tuottaa radiotaajuisen aaltomuodon, joka on moduloitu ohjaussignaalien mukaisesti RF-tehovahvistimelle 123, joka

sitten syöttää energiaa käämilte 138, joka sijaitsee pää-
 magneettirakennelmassa 146. Potilaan herätteellä kiihdy-
 tettyjen ytimien säteilemät NMR-signaalit tunnistetaan
 samalla tai eri RF-kelalla kuin se, jota käytetään lähe-
 5 tyksessä ja joka vahvistetaan esivahvistimella 139. NMR-
 signaalit vahvistetaan, demoduloidaan, suodatetaan ja di-
 gitoidaan lähetin-vastaanottimen 122 vastaanotinosassa.
 Prosessoidut NMR-signaalit lähetetään verkkoprosessorille
 106 prosessoitaviksi erityisen yksisuuntaisen datayhteyden
 10 105 kautta.

PCM 120 ja SCM 124 ovat itsenäisiä alijärjestel-
 miä, jotka molemmat kommunikoivat päätietokoneen 101,
 oheisjärjestelmän, sellaisen kuin potilaan asemointijär-
 jestelmä 152, kanssa, kuin myös keskenään sarjamuotoisen
 15 datakommunikaatioyhteyden 103 avulla. PCM 120 ja SCM 124
 muodostuvat molemmat 16-bittisestä mikroprosessorista
 (sellainen kuin Intel 8086) päätietokoneen 101 komentojen
 prosessoimiseksi. SCM 124 sisältää laitteet, joilla saa-
 daan informaatiota koskien potilaskelkan asemaa ja liiku-
 20 teltavan potilaan asemointivalon viuhkakeilaa (ei esitet-
 ty). Päätietokone 101 käyttää tätä informaatiota kuvanäy-
 tön ja rekonstruktioparametrien modifioimiseksi. SCM 124
 aloittaa myös sellaiset toiminnot kuten potilaan siirto-
 ja asemointijärjestelmien käynnistykseen.

25 Gradient-kela-asetelma 136 ja RF lähetys- ja vas-
 taanottokelat 138 on asennettu magneetin, jota käytetään
 tuottamaan polarisoiva magneettikenttä, uraan. Magneetti
 muodostaa osan päämagneettiasetelmaa, joka sisältää poti-
 laan asemointijärjestelmän 148. Shim-teholähdettä 140 käy-
 30 tetään shim-kelojen, jotka liittyvät päämagneettiin, ener-
 gian syöttöön, ja joita käytetään korjaamaan epähomogeeni-
 suudet polarisoivassa magneettikentässä. Resisttiivisen
 magneetin tapauksessa käytetään päämagneetin teholähdettä
 142 magneetin jatkuvaan energian syöttöön. Superjohtavan
 35 magneetin tapauksessa pääteholähdettä 142 käytetään mag-

neetin tuottaman polarisoivan kentän saattamiseksi sopivalle voimakkuudelle, jonka jälkeen se kytketään pois. Kestomagneetin tapauksessa teholähdettä 142 ei tarvittaisi. Potilaan asemointijärjestelmä 148 toimii yhdessä potilaskelkan ja siirtojärjestelmän 150 ja potilaan asemointijärjestelmän 152 kanssa. Jotta minimoitaisiin ulkoisten lähteiden vuorovaikutus, NMR järjestelmäkomponentit, jotka sisältävät päämagneettiasetelman, gradient-kela-asetelman, ja RF lähetys- ja vastaanottokelat kuin myös potilaankäsittelylaitteet, on suljettu RF-suojattuun huoneeseen, jota on yleisesti merkitty 144.

Tarkasteltaessa erityisesti kuvioita 1 ja 2, lähetin-vastaanotin 122 sisältää komponentteja, jotka tuottavat RF herätekentän B_1 RF-tehovahvistimella 123 kelaan 138A, ja komponentit jotka vastaanottavat saatavan NMR-signaalin, joka on indusoitunut kelaan 138B. RF-kiihdytyskentän perus- tai kantoaltotaajuus tuotetaan taajuussyntetisoijan 200 ohjaamana, joka vastaanottaa joukon digitaalisia signaaleja (CF) kommunikointiyhteyden 103 kautta päätietokoneelta 101. Nämä digitaaliset signaalit osoittavat RF-kantoaltosignaalin, joka tuotetaan lähtöön 201, taajuuden ja vaiheen. Määrätty RF-kantoaalto viedään modulaattoriin 202 jossa se moduloidaan seurauksena signaalistä $R(t)$, joka vastaanotetaan yhteyden 103 kautta PCM 120:lta. Signaali $R(t)$ määrittelee tuotettavan RF-herätepulssin verhokäyrän ja myöskin kaistaleveyden. Se tuotetaan PCM 120:ssa lukemalla sekventiaalisesti ulos sarja tallennettuja digitaalisia arvoja, jotka edustavat haluttua verhokäyrää, kun RF-herätepulssi muodostetaan. Nämä tallennetut digitaaliset arvot tietokone 100 voi puolestaan vaihtaa, jotta tehtäisiin mahdolliseksi muodostaa mikä tahansa RF-pulssin verhokäyrä. RF-herätepulssin, joka lähtee linjasta 205, arvo vaimennetaan lähetysvaimenninpiirillä 206, joka vastaanottaa digitaalisen signaalin TA päätietokoneelta 101 kommunikointiyhteyden 103 kautta.

Vaimennetut RF-herätepulssit viedään tehovahvistimeen 123, joka ohjaa RF-lähetinkelaa 138A.

Tarkasteltaessa yhä kuvioita 1 ja 2, kohteen tuot-
tama NMR-signaali poimitaan vastaanottokelalla 138B ja
5 viedään vastaanottimen 207 tuloon. Vastaanotin 207 vahvis-
taa NMR-signaalin ja tätä vaimennetaan määrällä, jonka
digitaalinen vaimennussignaali (RA), joka on vastaanotettu
päättietokoneelta 101 yhteyden 103 kautta, määrää. Vastaan-
10 otin 207 ohjataan myös päälle ja pois signaalilla, joka
tulee linjan 211 kautta PCM 120:lta siten, että NMR-sig-
naali saadaan vain aikaväleillä jotka määrätty suoritet-
tava luenta tarvitsee.

Vastaanotettu NMR-signaali on tarkalleen tai suun-
nilleen Larmor-taajuudella, joka esillä olevan keksinnön
15 esimerkinomaisessa toteutuksessa on 63,86 MHz. Tämä kor-
keataajuinen signaali demoduloidaan kaksivaiheisessa pro-
sessissa demodulaattorissa 208, joka ensin sekoittaa NMR-
signaalin kantoaaltosignaaliin linjalla 201 ja sekoittaa
sitten näin saatavan erosignaalin 2,5 MHz vertailusignaa-
20 liin linjalla 204. Näin saadulla demoduloidulla NMR-sig-
naalilla linjalla 212 on maksimikaistaleveys 125 kHz ja
sen keskikohta on taajuudella 187,5 kHz. Demoduloitu NMR-
signaali viedään analogia/digitaali (A/D) -muuntimen 209
tuloon, joka ottaa näytteet ja digitoi analogisen signaa-
25 lin nopeudella 250 kHz. A/D-muuntimen 209 lähtö viedään
digitaaliseen neliölliseen tunnistimeen 210, joka tuottaa
32-bittisen samassa vaiheessa olevan (I) arvon ja 32-bit-
tisen 90° vaihesiirroksessa olevan (Q) arvon, joka vastaa
vastaanotettua digitaalista signaalia. Näin saatu virta
30 digitaalisia I- ja Q-arvoja vastaanotetusta NMR-signaa-
listä lähetetään väylän 105 kautta verkkoprosessorille
106, jossa niitä käytetään kuvan rekonstruointiin.

Vaiheiden yhdenmukaisuuden varmistamiseksi vas-
taanotetuissa NMR-signaaleissa, sekä modulaattori 202 lä-
35 hetinosassa että demodulaattori 208 vastaanotinosassa toi-

mivat yhteisillä signaaleilla. Tarkemmin ottaen kantoaal-
 tosignaalia taajuussyntetisaattorin 200 lähdössä 201 ja
 2,5 MHz vertailusignaalia vertailutaajuusgeneraattorin 203
 lähdössä 204 käytetään sekä modulointi- että demoduloin-
 5 tiprosessissa. Vaiheiden yhtäpitävyys siis säilyy ja demo-
 duloidun vastaanotetun NMR-signaalin vaihemuutokset osoit-
 tavat tarkasti kiihdytettyjen spinien tuottamia vaihe-
 muutoksia. 2,5 Mz vertailusignaali, kuten myös 5, 10 ja
 60 MHz vertailusignaalit, tuotetaan vertailutaajuusgene-
 10 raattorilla 203 yhteisestä 10 MHz kellosignaalista ja taa-
 juussyntetisaattori 200 käyttää jälkimmäisiä kolmea ver-
 tailusignaalia kantoaalto-signaalin tuottamiseen lähtöön
 201.

Lähetinvastaanottimen 122 lähetinosa on esitetty
 15 tarkemmin kuviossa 3. On useita vaatimuksia, jotka erot-
 tavat tämän RF-lähettimen tavanomaisista RF-lähettimistä.
 Ensinnäkin RF-lähetin toimii hyvin korkealla taajuudella
 (so. Larmor-taajuus), mutta se toimii hyvin kapealla taa-
 juusalueella. Sen taajuuden tulee olla hyvin tarkasti oh-
 20 jattu (± 1 Hz) ja sen taajuutta tulee pystyä moduloimaan
 aaltomuodolla ja se tulee voida kytkeä nopeasti eri taa-
 juudelle (± 300 kHz). Samalla tavoin RF-kantoaallon vaiheen
 tulee olla tarkasti ohjattu ($\pm \frac{1}{2}^\circ$) ja vaihetta tulee kyetä
 moduloimaan aaltomuodolla ja se tulee kyetä kytkemään no-
 25 peasti eri arvoon ($0 - 360^\circ$). Vaiheyhdenmukaisuuden tulee
 säilyä lähetettyjen ja vastaanotettujen RF-signaalien vä-
 lillä, jotta vaiheinformaatio ei häiriinny tai häviä. Ku-
 ten hyvin tunnetaan, vaihemuutoksia käytetään NMR-kuvan
 rekonstruointialgoritmeissa kohteiden fyysisen paikan mää-
 30 rittämiseksi rekonstruoidussa kuvassa. Vaiheinformaation
 hävikki ei sen vuoksi pelkästään aiheuta häiriötä kuvan
 intensiteettiin, vaan mieluummin se aiheuttaa kohteiden
 sijoittumisen virheellisesti kuvassa, mikä tekee kuvan
 käytännöllisesti katsoen hyödyttömäksi. NMR-kuvauksessa ja
 35 -spektroskopiassa käytetään signaalin keskiarvon ottoa

häiriöiden vaikutuksen vähentämiseen. Jos vaiheen yhdenmukaisuutta ei säilytetä, useat signaalit, joista otetaan keskiarvo, eivät ole koherentteja ja seuraa signaalihäviötä.

5 Tarkasteltaessa erityisesti kuvioita 2 ja 3, taajuussyntetisoija 200 tuottaa RF-kantoaallon, jolla on haluttu taajuus ja vaihe. Tämä toteutetaan muodostamalla suhteellisen matalataajuinen signaali (0,91 - 1,9975 MHz) digitaalisessa syntetisaattorissa 220, joka kykenee ohjaamaan hyvin tarkasti taajuutta ja vaihetta, kuten alla tarkemmin kuvataan. Digitaalisen syntetisaattorin lähtösignaali sekoitetaan sitten 5 MHz vertailusiniaaltoon, joka tulee vertailtaajuusgeneraattorilta 203, sekoittimessa 221, ja alempi taajuuskaista suodatetaan kaistanpäästösuo-
10 timela 222. Sekoitin 221 on rengasdiodi-, kaksoisbalansoitu sekoitin, joka on kaupallisesti saatavissa valmistajalta Minicircuits Inc. mallina TFM-2, ja suodin 222 on kaistanpäästösuodin, joka on viritetty läpäisemään taajuudet 5,91 MHz - 6,9975 MHz.

20 6 - 7 MHz signaali, jonka suodin 222 tuottaa, sekoitetaan sitten 60 MHz vertailusiniaaltoon, jonka vertailutaajuusgeneraattori 203 myös tuottaa. Tämä tehdään sekoittimessa 223, joka on samanlainen kuin sekoitin 221, ja näin saatavan ylemmän sivukaistan kaistanpäästösuodin 224,
25 joka on viritetty läpäisemään 65,91 MHz - 66,9975 MHz, läpäisee. Näin saatu 66 MHz - 67 MHz siniaalto on RF-kantoaaltosignaali linjalla 201.

Tarkastelemalla edelleen kuvioita 2 ja 3, RF-kantoaaltosignaali linjalla 201 syötetään modulaattoriin 202, jossa se amplitudimoduloidaan aaltomuodolla, joka on saatu $R(t)$:stä, joka syötetään yhteyden 103 kautta 16-bittiselle digitaali/analogia-muuntimelle 225. $R(t)$:n 16-bittiset arvot vastaanotetaan pulssiohjausmoduulista 120 (kuvio 1) ja kelloitetaan D/A-muuntimeen 225 1 MHz kellosignaalin-
35 joka myös vastaanotetaan pulssiohjausmoduulista kellolin-

jan 226 kautta. Analoginen signaali $R(t)$, joka lähtee D/A-muuntimesta 225, voi olla esimerkiksi sini- tai kanttiaaltomuoto, joita käytetään yleisesti NMR-mittauksissa, ja sen kesto on tyypillisesti 0,5 - 10 millisekuntia.

5 Ennen sekoittamista RF-kanttaaaltoon linjalla 201, modulaatioverhokäyrä $R(t)$ sekoitetaan 2,5 MHz vertailusiniaaltoon, joka tulee vertailutaajuusgeneraattorilta 203, sekoittimessa 227. Näin saatava signaali sekoitetaan sitten RF-kanttaaltosignaaliin sekoittimessa 228, ja näin
10 saatava moduloitu RF-signaali suodatetaan kohdassa 229 muun paitsi alemman sivukaistan poistamiseksi. Suodin 229 on alipäästösuodin, joka on viritetty taajuuteen 66 MHz.

Tarkasteltaessa edelleen kuviota 3, tulisi olla ilmeistä, että kaikki lähetin-vastaanottimen 122 vertailusignaalit saadaan helposti yhdestä 10 MHz värähtelijästä,
15 joka sijaitsee vertailutaajuusgeneraattorissa 203. Digitaalinen syntetisoija 220 käyttää suoraan 10 MHz kelloa ja 5 MHz vertailusignaali tuotetaan kahdella jakavalla piirillä 241. 60 MHz vertailusignaali tuotetaan kahdella kertovalla ja kolmella kertovalla piirillä, jotka on kytketty sarjaan kuudella kertovan piirin tuottamiseksi, joka on merkitty 242. Ja lopulta 2,5 MHz vertailusignaali tuotetaan kahdella jakavalla piireillä, jotka yhdessä jakavat
20 10 MHz vertailusignaalin neljällä, kuten on osoitettu kohdassa 243.

Tarkasteltaessa erityisesti kuviota 4, digitaalisessa syntetisaattorissa 220 on useita tuloja linjoilta 103, jotka tekevät mahdolliseksi digitaalisten numeroiden syöttämisen analogisen siniaallon, joka lähetetään kohdassa 250 12-bittisellä digitaali/analogia-muuntimella 251,
30 taajuuden ja vaiheen ohjaamiseksi. Siniaalto tuotetaan 12-bittisten digitaalisten numeroiden, jotka on talletettu ohjelmoitavaan lukumuistiin 252, sekvenssistä, ja niitä osoitetaan 12-bittisellä numerolla, jonka pitopiiri 253
35 tuottaa. Kun pitopiiri 253 tuo progressiivisesti suurempia

osoitteita muistiin 252, peräkkäiset talletetut digitaaliset arvot luetaan ulos ja viedään D/A-muuntimen 251 tulloon. Sekventiaalisesti vakionopeudella osoitettuna muisti 252 "soittaa" yhden kokonaisen siniaallon jakson.

5 Siniaallon taajuus (ω_c) määrätään nopeudella, jolla muistiosoite kasvaa ja siniaallon vaihe ($\emptyset$) millä tahansa ajan hetkellä määrätään osoitteella, jonka pitopiiri 253 antaa, kuten seuraavalla kaavalla ilmaistaan:

$$10 \quad \emptyset = 360(\text{tuotu osoite})/4096 \quad (1)$$

Esimerkiksi, jos pitopiiri 253 sisältäisi sekventiaalisesti kaikki mahdolliset 12-bittiset numerot laskevassa järjestyksessä ja näitä kytkettäisiin 10 MHz nopeudella, D/A-muuntimen 251 lähtösignaali olisi siniaalto taajuudella $10/4096 = 0,00244$ MHz tai 2,44 kHz. Kuitenkin jos pitopiirin lähtö ottaisi arvot nollasta karkesti 4 095 saakka suuremmilla kuin yhden askeleilla, lähtösignaali kohdassa 250 olisi suhteellisesti korkeampi taajuus. Esimerkiksi jos arvot menisivät nollasta 4 092:een neljän askeleissa 10 MHz nopeudella, taajuus olisi 9,775 kHz. Sitten pitopiirin 253 arvoa muutetaan vakionopeudella (esim. 10 MHz), ja määrä jolla arvo muuttuu kellojaksoa kohden, määrää siniaallon taajuuden.

25 Digitaalinen syntetisaattori 220 tarjoaa joukon ominaisuuksia, jotka mahdollistavat tarkan taajuuden (ω) ja vaiheen ($\emptyset$) ohjauksen, mutta jotta sen toiminta ymmärrettäisiin paremmin, ensin selitetään hyvin yksinkertainen esimerkki, jossa tuotetaan vakio siniaalto vakio kantaaltotaajuudella. Sellaisessa tapauksessa 24-bittinen kantaaltonumero ladataan kantaaltopitopiirin 255 datayhteyden 103 kautta. Tämä kantaaltonumero edustaa perus- tai kantaaltoaajuutta (ω_0), jonka digitaalinen syntetisaattori tulee tuottamaan. Modulointuna yllä kuvatulla tavalla se

30

35 tulee tuottamaan RF-herätepulsseja ja demodulaatio refe-

renssisignaaleja. Digitaalisen syntetisaattorin perustaa-
juus ω_0 ilmoitetaan seuraavalla esityksellä.

$$\omega_0 = (\text{kantaaaltonumero}) (10 \text{ MHz}) / 2^{24} \quad (2)$$

5

Kantaaaltonumero viedään digitaalisen keruulait-
teen, joka on muodostettu digitaalisella summaimella 256
ja 24-bittisellä pitopiirillä 257, tuloon. Summaina, sel-
lainen kuin malli 74F283 joka on kaupallisesti saatavissa
10 valmistajana Fairchild Inc., ja pitopiiriä, sellainen kuin
malli 74AS874 joka on kaupallisesti saatavissa valmistaja-
na Texas Instruments Inc., käytetään suositellussa toteu-
tuksessa. Digitaalinen keruulaite toimii nopeudella 10 MHz
summaten kantaaaltonumeron itseensä ja viemällä kaksitois-
15 ta eniten merkitsevää bittiä summasta 12-bittisen summai-
men 258 tuloon. Summain 258 on puolestaan yhdistetty toi-
sen 12-bittisen summainen 259 yhteen tuloon, ja sen lähtö-
arvo tallennetaan 12-bittiseen pitopiiriin 253. Kuten alla
tullaan kuvaamaan, toista summainen 258 tuloa käytetään
20 muuttamaan muodostetun siniaallon taajuus, ja toista sum-
mainen 259 tuloa käytetään muuttamaan muodostetun siniaal-
lon vaihe. Molempien näiden toisten tulojen oletetaan ole-
van nolla tällä hetkellä. Tämän seurauksena digitaalisen
keruulaitteen 257 lähtöarvo viedään 12-bittiseen pitopii-
25 riin 253 ja sitä kasvatetaan tasaisesti arvoltaan nopeu-
della, jonka määrää kantaaaltonumeron suuruus pitopiirissä
255. Kun kantaaaltonumeroa summataan toistuvasti itseensä,
jossakin kohdassa tulos ylittää summainen 256 24-bittisen
sananleveyden. Kun tämä tapahtuu, "ylivuotobitti" hylätään
30 ja vain alemmat 24 bittiä säilytetään. Sen seurauksena
pitopiirissä 253 numeroiden nähdään kasvavan, saavuttavan
arvon 4096, ja pyörähtävän ympäri nolnaan. Tämä on juuri
niin kuin halutaan, koska hakutaulukko 252 sisältää tar-
kalleen yhden siniaallon jakson. Siniaalto siten "soite-
35 taan" muistista 252 halutulla kiinteällä taajuudella.

Muodostetun siniaallon vaihetta voidaan siirtää millä tahansa ajanhetkellä viemällä 12-bittinen numero toisen summaimen 259 "A"-tuloon. Vaiheen siirtämistä varten on käytettävissä kaksi laitetta, 16-bittinen vaihepitopiiri 260 joka vastaanottaa 16-bittisen vaihenumeron ($\emptyset$) linjalta 103, ja 16-bittinen vaihepitopiiri 261, joka vastaanottaa vaihesiirtonumeroiden sekvenssin ajan ($\emptyset$)t funktiona. Johtuen 16-bitin sanakoosta, vaihe $\emptyset$ (asteina) on verrannollinen pitopiirien 260 ja 261 arvoihin seuraavalla tavalla:

$$\emptyset = 360 \text{ (ARVO)}/65536$$

(1b)

Pitopiirien 260 ja 261 kaksitoista eniten merkitsevää lähtöä summataan yhteen 12-bittisellä summaimella 262 siten, että jompikumpi tai molemmat voidaan viedä toiseen summaimen 259 muodostetun siniaallon vaiheen muuttamiseksi. Esimerkiksi monikaikuisessa CPMG-pulssisekvenssissä 180° RF-kaikupulssien vaiheet siirretään 90° 90° RF-herätepulssien vaiheesta, jotka muodostavat poikittaisen magnetoinnin M_t . Tämä vaihesiirtymä toteutetaan helposti esillä olevan keksinnön mukaisella digitaalisella syntetisaattorilla lataamalla vaihenumero ($\emptyset$) pitopiiriin 260, joka välittömästi siirtää eteenpäin osoitetta, joka viedään sinihakutaulukkomuistiin 252. Kuten yllä olevalla yhtälöllä (1b) osoitetaan, 90° vaihesiirto toteutetaan vaihenumeron $\emptyset$ arvolla 16384. Vaihesiirto voidaan sitten poistaa seuraavan pulssisekvenssin suoritusta varten lataamalla nolla takaisin vaihepitopiiriin 260.

RF-kantoaaltosignaalin vaiheen siirtämisen lisäksi digitaalinen syntetisaattori 220 ylläpitää vaiheiden yhdenmukaisuuden läpi vaihesiirtojen sarjan. Tämä on kuvattu kuviossa 5a, jossa tuotetaan kolme erilaista RF-kantoaaltosignaalia, jotka on esitetty kiinteillä viivoilla 263, 264 ja 266, peräkkäisten aikajaksojen aikana, ja sitten

signaalit 264 ja 266 toistetaan. Kolmella RF-kantoaalto-signaalilla 263, 264 ja 266 on sama taajuus, mutta ne on vaihesiirretty lataamalla erilaiset vaihenumerot $\emptyset_1$, $\emptyset_2$ ja $\emptyset_3$ vaihepitopiiriin 260. Vaihekoherenssi on esitetty katko-
 5 viivoilla, jotka paljastavat, että esimerkiksi kun vaihenumero $\emptyset_2$ ladataan pitopiiriin 260 tai ladataan uudelleen myöhempänä ajankohtana, saatava RF-kantoaaltosignaali 264 jatkuu samassa vaiheessa kuin se olisi ollut muodostettu jatkuvasti.

10 Muodostetun siniaallon vaihe voidaan vaihemoduloida aaltomuodolla $\emptyset(t)$, jonka pulssiohjausmoduuli 120 kirjoittaa vaihepitopiiriin 261 1 MHz nopeudella RF-herätepulssien muodostuksen aikana. Pulssiohjausmoduulin 120 16-bittiset numerot ladataan 16-bittiseen pitopiiriin 265,
 15 joka kytkeytyy linjoihin 103, ja nämä numerot ladataan puolestaan vaihepitopiiriin 261. Pitopiiri 265 sallii pulssiohjausmoduulin 120 nopeudella 1 MHz asynkronisesti tuottamien numeroiden synkronisen lataamisen vaihepitopiiriin 261. Tämä vaihemodulaatio on hyödyllinen suoritettaessa "mutkikkaita" herätepulsseja, sellaisia kuin hyperboliset sekanttipulssit, joita käytetään invertoimaan pitkittäinen magnetoituminen.

Pitäisi olla ilmeistä, että esillä oleva keksintö tekee mahdolliseksi ohjata tarkasti RF-herätepulssien vaihetta monien erilaisten NMR-mittausten suorittamiseksi.
 25 RF-herätepulssien vaihetta voidaan siirtää tarkasti pulssista toiseen, ja RF-kantoaallon vaihetta voidaan siirtää, pyyhkäistä tai muulla tavoin moduloida RF-herätepulssin tuottamisen aikana.

30 Vaikka lähdön 250 taajuutta voidaan muuttaa alkaen arvosta ω_0 käyttämällä sopivaa vaiheaaltomuotoa $\emptyset(t)$, suurempi käytön helppous ja joustavuus saadaan aikaan käyttämällä toista digitaalista keruulaitetta. Tarkasteltaessa edelleen kuviota 4, vaikkakin keski- tai perustaajuus ω_0 .
 35 määrätään kantaaltonumerolla pitopiirissä 255 ja siihen

liittyvässä digitaalisessa keruulaitteessa 269 joka ohjaa ensimmäisen summaimen 258 A-tuloa, tätä taajuutta voidaan muuttaa toisen digitaalisen keruulaitteen 270, joka ohjaa summaimen 258 B-tuloa, lähtöarvolla. Tämä tarkoittaa, että

5 RF-kantoaallon taajuus määrätään nopeuden summalla, jolla ensimmäinen digitaalinen keruulaite askeltaa tallennetun siniaallon osoitusta, lisättynä nopeudella, jolla toinen digitaalinen keruulaite askeltaa osoitussekvenssiä. Toinen digitaalinen keruulaite 270 on samanlainen kuin keruulaite

10 269 ja se sisältää 24-bittisen summaimen 271 ja 24-bittisen pitopiirin 272.

Perustaajuutta (ω_0) voidaan lisätä kiinteällä määrällä, kuten 24-bittinen taajuusnumero määrää, joka on ladattu pitopiirin 273 linjalta 103. Pitopiiri 273 kytkeytyy

15 summaimen 274 A-tuloihin, ja summaimen 274 lähtö on kytketty toisen digitaalisen keruulaitteen 270 tuloon ajoituspitopiirin 275 kautta. Taajuusnumeron arvo kasvattaa kanta-aaltotaajuutta (ω_c) määrällä ω seuraavan esityksen mukaisesti:

20

$$\begin{aligned}\omega_c &= \omega_0 + \omega \\ \omega &= (\text{taajuusnumero}) (10 \text{ MHz})/2^{24}\end{aligned}\quad (3)$$

Sen vuoksi tulisi olla ilmeistä, että perättäisten

25 RF-herätepulssien taajuus voidaan helposti vaihtaa mihin tahansa arvoon digitaalisen syntetisaattorin 220 toimintalueella, lataamalla eri numero pitopiiriin 273. Vähemmän ilmeinen, ja hyvin tärkeä NMR-kokeiden kannalta, on seikka että kun RF-kantoaalto vaihdetaan takaisin keskitaajuudelle lataamalla nolla taajuuspitopiiriin 273 ja nollaamalla toinen keruulaite 270 ohjauslinjan 282 kautta, järjestelmä "muistaa" keskitaajuussignaalin vaiheen, ja alkuperäinen siniaalto tuotetaan ikään kuin sitä ei olisi koskaan kytetty pois. Tämä on havainnollistettu kuviossa 5b, jossa

30

35 kiinteät viivat 280 ja 281 ilmaisevat digitaalisen synte-

tisaattorin 220 lähtöarvon kahdella taajuudella ($\omega_1 = \omega_0$ ja $\omega_2 = \omega_0 + \quad$) erillisten aikajaksojen aikana. Katkoviivat havainnollistavat, että vaiheen yhdenmukaisuus säilyy esimerkiksi aaltomuodon muodostettujen segmenttien
 5 280a ja 280b välillä taajuudella ω_1 .

Joitakin syntetisaattorin ominaisuuksia ja sen joustavuus voidaan ymmärtää paremmin tarkastelemalla seuraavaa sovellutusta NMR-kuvaukseen. Oletetaan, että halutaan suorittaa kaksi lomittaista viipaletta, yksi kaikukuvauksko-
 10 vausko- Nimitettäköön kahta viipaletta A ja B. Oletetaan edelleen, että viipaleen B kuvan keskikohtaa halutaan siirtää 5 cm niin kutsutussa taajuuskoodatussa suunnassa. Tietokone 100 esilaskee aaltomuodon $R_{90}(t)$ siten, että kun R_{90} käytetään amplitudimoduloimaan 90° pulssi viipalevalinta-gradientin esiintyessä, viipale halutulla viipalepak-
 15 suudella herätetään. Esilaskettuja ovat myöskin arvot $\omega_{A,90}$ ja $\omega_{B,90}$, jotka on valittu siten, että valinta-gradientin esiintyessä 90° pulssille, NMR-herätyksien sopivassa viipalekohdassa seuraisi viipaleelle A ja viipaleelle B, vastaavasti. Tapa jolla tämä tehdään, tunnetaan hyvin alalla. Lasketaan toinen aaltomuoto $R_{180}(t)$, jota käytetään amplitudimoduloimaan 180° pulssit niiden valinta-gradientin esiintyessä. Samalla tavoin lasketaan siirtymätaajuu-
 20 $\omega_{A,180}$ ja $\omega_{B,180}$ 180° pulsseille. Kantoaaltopitopiiri 255 ladataan siten, että aiemmin kuvatus modulaation jälkeen (modulaattorit 221, 223 ja 228) tuotettaisiin RF-kantoaalto järjestelmän Larmor-taajuudella kohdassa 205.

Viipaleen A herättämiseksi $\omega_{A,90}$ ladataan pitopiiriin 273 ja pitopiiri 272 nollataan. Spin-kaiun tuottamiseksi viipaleelle A, $\omega_{A,180}$ ladataan pitopiiriin 273 ja pitopiiri 272 nollataan. Jotta viipaleesta A vastaanotettu signaali demoduloitaisiin kunnollisesti, $\omega_{A,r}$ ladataan pitopiiriin 273 ja pitopiiri 272 nollataan. $\omega_{A,r}$ valitaan siten, että se sijoittaa kuvan signaalispektrin keskuksen vastaanottimen kaistaleveyden keskikohtaan. Kuvion 2 vastaan-
 30
 35

ottimelle, joka kuvattiin aiemmin, $\omega_{A,r}$ vastaa 187,5 kHz. Huomaa, että johtuen toisen keruulaitteen käytöstä kaikissa taajuussiirtymissä ja pitopiirin 272 nollauksesta, kaikki syntetisaattorin signaalit ovat vaiheriippuvaisia ensimmäisestä keruulaitteesta. Siten millä tahansa myöhemmällä ajanhetkellä yllä oleva sekvenssi voidaan toistaa ja saatava signaali tulee olemaan vaiheeltaan yhdenmukainen ensimmäisen sekvenssin signaalin kanssa.

Viipaleen B tutkimiseksi yllä olevat askeleet toistetaan, paitsi että $\omega_{B,90}$ ja $\omega_{B,180}$ käytetään 90° ja 180° pulssien aikana. Viipaleen B signaalin vastaanottoa varten arvo $\omega_{B,r}$ ladataan pitopiiriin 273 ja pitopiiri 272 nollataan. $\omega_{B,r}$ valitaan siten, että luku-gradientin esiintyessä kuva-alkion paikka vastaten haluttua kuvan keskikohtaa sijoitetaan keskelle vastaanottimen kaistaleveyttä. Esimerkiksi luku-gradientin voimakkuudella 1,0 gaussia/cm yhden cm siirtymä vastaa 4,258 kHz. Siten 5 cm siirtymä toteutettaisiin arvolla $\omega_{B,r} = 187,5 + (4,258)(5) = 208,79$ kHz.

Alan ammattimiehille on selvää, että RF-herätepulssit, jotka ovat ekvivalentteja yllä muodostettujen kanssa, voitaisiin tuottaa tavanomaisella yhden sivukaistan modulaattorilla. Sellainen modulaattori vaatisi kuitenkin 2 aaltomuotoa, kuten $R_{90}(t)$, jokaiselle viipaleelle, ja 2 aaltomuotoa, kuten $R_{180}(t)$ jokaiselle viipaleelle. Jos tulee kuvata suuri määrä viipaleita, muistivaatimukset voivat olla huomattavat. Edelleen yhden sivukaistan modulaattorin lähtösignaali heikkenee, jos neliöllinen säätö ei ole täydellinen ja/tai johtuen kantoaallon vuotamisesta. Esillä olevalla lähestymistavalla on ainakin kaikki yhden sivukaistan modulaattorin joustavuus ilman sen haittoja.

Kuvan keskustan siirtäminen lukusuunnassa voidaan toteuttaa aiemmin tunnetuissa järjestelmissä käyttämällä kahta tavanomaista syntetisaattoria. Kuitenkin vaiheiden

yhdenmukaisuuden takaamiseksi NMR-instrumentti pitäisi liipaista yhtenäisessä vaihe-erossa kahden syntetisaattorin lähtöjen kesken, kuten on neuvottu US-patentissa 4 593 247, joka on myönnetty samalle hakijalle kuin esillä olevan keksinnön hakija.

Kuvion 4 syntetisaattori sallii myös kuvan siirtämisen niin kutsutussa vaihekoodatussa suunnassa. Tämä tehdään lataamalla erilainen vaihesiirtymäarvo pitopiiriin 260 signaalin vastaanoton aikana jokaisella kuvalla. Kuten hyvin tunnetaan, kuvan siirtäminen vastaa lineaarista vaihesiirtymää NMR-raakadatatassa. Tämä vaihesiirtymä voidaan syöttää dataan vaihesiirtämällä signaalia, jota käytettiin NMR-signaalin demodulointiin. Kuvan siirtämiseksi vaihekoodatussa suunnassa kukin kuva yhdistää vaihesiirron, joka on verrannollinen kuvanumeroon (tai vaihekoodausamplitudiin) ja myös verrannollinen kuvan siirtymään kuvaalkioiden. Vaihesiirtymä 180° kuvaa kohden vastaa spatiaalista siirtymää $\frac{1}{2}$ kuvan kentässä. Pienempi spatiaalinen siirtymä toteutetaan suhteellisesti pienemmällä vaihesiirtymällä kuvaa kohden. Esimerkiksi kuvakentän kymmenesosan siirtymä toteutetaan siirtämällä vastaanottimen vertailusignaalia $(1/10)(180)/(\frac{1}{2}) = 36^\circ$ kuvaa kohden. Kuva, jossa ei ole vaihekoodausta, ei käyttäisi vaihesiirtymää. Pienimmän positiivisen vaihekoodauksen kuva vastaanotettaisiin 36° vaihesiirtymällä, joka ladataan pitopiiriin 260. Seuraavaksi positiivisin kuva saataisiin vastaanottimen vaihesiirtymällä 72° , ja niin edelleen. Negatiivisen vaihekoodauksen kuvat vastaanotetaan negatiivisilla vaihesiirtymillä. Negatiiviset kuvasiirtymät (so. siirtymät vastakkaiseen suuntaan) toteutetaan negatiivisilla vaihesiirtymillä kuvaa kohden.

Esillä olevan keksinnön joustavuus on myös hyödyllinen tekniikassa, jota nimitetään sekoitetuksi vakaatilan kuvaukseksi. Tässä nopeassa kuvaustekniikassa herätepulssit kohdistetaan toistoajoilla, jotka ovat lyhyitä

verrattuna aikoihin T_1 ja T_2 . Kuvakontrastiin voidaan vaikuttaa jättämällä sallimatta poikittaisen magnetoinnin saavuttaa vakaan tilan tasapaino. Tämä voidaan tehdä vaihtelemalla herätepulssien vaihetta, kuten on kuvattu artikkelissa Crawley, Wood, ja Hankelman, Mag. Res. Med., Vol. 8, s. 248, 1988. Esillä oleva syntetisaattori helposti toteuttaa tämän. Jos herätepulssin vaihetta muutetaan, tuossa kuvassa vastaanotettu signaali muuttuu myös samalla määrällä. Esillä olevassa keksinnössä tämä signaalin epätoivottu vaihesiirtymä voidaan poistaa siirtämällä syntetisaattorin vaihetta signaalin vastaanoton aikana samalla määrällä kuin herätepulssin vaihetta muutettiin.

Sen lisäksi, että se sallii eri taajuuksien tuottamisen, digitaalinen syntetisaattori RF-kantoaaltosignaalin taajuusmoduloinnin aaltomuodolla $\omega(t)$, joka tuotetaan pulssiohjausmoduulilla 120. Tämä aaltomuoto $\omega(t)$ toistetaan RF-herätepulssin muodostuksen aikana lataamalla sarja 16-bittisiä taajuusnumeroita pitopiiriin 265 aina 1 MHz nopeudella, ja liipaisemalla ne 16-bittiseen pitopiiriin 285. Pitopiirin 285 lähtö ohjaa summaimen 274 B-tuloja siten, että taajuusmoduloivan aaltomuodon $\omega(t)$ arvo summataan kiinteän taajuuden arvoon (ω) kantaaltotaajuuden muuttamiseksi verrannollisesti seuraavalla tavalla:

$$\omega_c = \omega_o + \omega + \omega(t) \quad (4)$$

Vaihekoherenttisuus ylläpidetään tietysti koko ajan, siten että kun taajuusmoduloiva aaltomuoto päättyy, RF-kantoaallon taajuus ja vaihe palautuu niin kuin taajuusmodulaatiota ei olisi koskaan käytetty.

Tämä syntetisaattorin ominaisuus on hyödyllinen menetelmässä, jota kutsutaan vaihtuvan nopeuden herättämiseksi. Tässä tekniikassa, jota on kuvannut Conolly, Nishimura, Macovski ja Glover artikkelissa J. Mag. Res., Vol. 78, s.440, 1988, modifioitu RF-pulssi toistetaan ajan suh-

teen vaihtelevan magneettikentän gradientin esiintyessä. Tämän tekniikan edut sisältävät alhaisemmat tehovaatimukset ja/tai parannetut viipaleprofiilit. Kuitenkin viipaleiden herättäminen pois gradient-kelan keskikohdasta tavanomaisilla syntetisaattoreilla on mutkikasta johtuen seikasta, että resonanssitaajuus halutussa viipalekohdassa on ajan suhteen vaihteleva ajan suhteen vaihtelevan kenttä-gradientin esiintyessä. Esillä oleva keksintö tekee sellaista tekniikoiden toteuttamisen paljon yksinkertaisemmaksi johtuen kyvystä ohjata tarkasti pulssin taajuussiiirtymää herätteen aikana. Esillä olevalla syntetisaattorilla aaltomuoto $\omega(t)$ ladataan sarjana numeroita pitopii-riin 265, jossa $\omega(t)$ annetaan seuraavasti:

$$\omega(t) = G(t) Z_0$$

jossa:

Z_0 on viipalesiirtymä;

γ on spinien magnetogyriin vakio; ja

$G(t)$ on ajan suhteen vaihteleva magneettikentän gradientti.

Alan ammattimiehille tulisi olla selvää, että monia muunnelmia voidaan tehdä yllä kuvatun keksinnön suositellusta toteutuksesta, poikkeamatta keksinnön hengestä. Sen vuoksi viitataan seuraaviin patenttivaatimuksiin, jotka määrittävät keksinnön sovellutusalueen.

Patenttivaatimukset:

1. Taajuussyntetisaattori NMR-instrumenttia varten, joka sisältää:

5 hakutaulukko-muistilaitteen, jonka perättäisiin osoitettaviin muistipaikkoihin talletetaan digitaalinen esitys kantoaaltosignaalista;

10 digitaali-analogia-muunninlaitteen, joka on kytketty vastaanottamaan digitaalinen esitys kantoaaltosignaalista, joka luetaan hakutaulukko-muistilaitteelta, ja muuntamaan se analogiseksi kantoaaltosignaalksi;

15 digitaalisen summaimen, jossa on lähtö, joka tuottaa digitaalisen numeron, joka on aritmeettinen summa digitaalisista numeroista, jotka tuodaan sen ensimmäiseen ja toiseen tuloon, digitaalisen summaimen lähdön ollessa kytketty hakutaulukko-muistilaitteelle sen muistipaikkojen osoittamiseksi;

20 vaihepitopiirin digitaalisen vaihenumeron tallentamista varten ja digitaalisen vaihenumeron viemiseksi yhteen digitaalisen summaimen tuloista; ja

25 digitaalisen keruulaitteen, jolla summataan jatkuvasti digitaalisia kantoaaltonumeroja, jotka tuodaan sen tuloon, ja muodostetaan kerätty digitaalinen numero sen lähtöön, digitaalisen keruulaitteen lähdön ollessa kytketty toiseen digitaalisen summaimen tuloista;

30 t u n n e t t u siitä, että hakutaulukko-muistilaitteeseen vietyjä osoitteita kasvatetaan nopeudella, jonka digitaalinen kantoaaltonumero määrää, jolloin tuotetaan digitaali/analogia-muuntimen lähtöön analoginen kantoaaltosignaali, jonka taajuus määrätään digitaalisella kantoaaltotaajuusnumerolla, ja jossa analogisen kantoaaltosignaalin vaihe määrätään digitaalisella vaihenumerolla.

35 2. Patenttivaatimuksen 1 mukainen taajuussyntetisaattori, t u n n e t t u siitä, että se edelleen sisältää:

toisen digitaalisen summaimen, jonka lähtö on kyt-
 ketty mainittuun yhteen digitaalisen summaimen tuloista,
 ja joka tuottaa digitaalisen numeron, joka on aritmeetti-
 nen summa digitaalisesta vaihenumerosta, joka tuodaan yh-
 teen sen tuloista, ja digitaalisesta vaihemodulaationume-
 5 rosta, joka tuodaan toiseen sen tuloista; ja

vaihemodulointilaitteen, jolla tuotetaan sekvenssi
 digitaalisia vaihemodulaationumeroita ja viedään ne toisen
 digitaalisen summaimen toiseen tuloon analogisen kantoaal-
 10 tosignaalin muodostamisen aikana, siten että analoginen
 kantoaaltosignaali moduloidaan samassa vaiheessa ajan
 funktiona.

3. Patenttivaatimuksen 1 mukainen taajuussynteti-
 saattori, t u n n e t t u siitä, että RF-kantoaaltosig-
 15 naali sekoitetaan yhteen tai useampaan RF-vertailusignaaliin
 sen taajuuden kasvattamiseksi NMR-instrumentin Lar-
 mor-taajuudelle.

4. Taajuussyntetisaattori NMR-instrumenttia var-
 ten, joka sisältää:

20 hakutaulukko-muistilaitteen, johon talletetaan
 peräkkäisiin osoitettaviin muistipaikkoihin digitaalinen
 esitys kantoaaltosignaalista;

digitaali/analogia-muunninlaitteen, joka on kyt-
 ketty vastaanottamaan digitaalinen esitys kantoaaltosig-
 25 naalista, joka luetaan hakutaulukkomuistilaitteelta, ja
 muunnetaan se analogiseksi kantoaaltosignaaliiksi;

digitaalisen summauslaitteen, jossa on lähtö joka
 tuottaa aritmeettisen summan digitaalisista numeroista,
 jotka tuodaan sen ensimmäiseen ja toiseen tuloon, digitaai-
 30 lisen summauslaitteen lähdön ollessa kytketty hakutauluk-
 ko-muistilaitteelle sen muistipaikkojen osoittamiseksi;

ensimmäisen digitaalisen keruulaitteen, jolla jat-
 kuvasti summataan digitaalista kantoaaltotaajuusnumeroa,
 joka tuodaan sen tuloon, ja muodostetaan kerätty digitaai-
 35 linen numero sen lähtöön, digitaalisen keruulaitteen läh-

dön ollessa kytketty yhteen digitaalisen summauslaitteen tuloista; ja

toisen digitaalisen keruulaitteen, jolla jatkuvas-
ti summataan digitaalista taajuusnumeroa, joka tuodaan sen
5 tuloon, ja muodostaa kerätyn digitaalisen numeron sen läh-
töön, toisen digitaalisen keruulaitteen lähdön ollessa
kytketty toiseen digitaalisen summauslaitteen tuloista;

t u n n e t t u siitä, että hakutaulukko-muisti-
laitteeseen vietyjä osoitteita kasvatetaan nopeudella,
10 jonka määrää mainitun digitaalisen kantoaaltotaajuusnume-
ron ja digitaalisen taajuusnumeron summa, jolloin tuote-
taan analoginen kantoaaltosignaali digitaali/analogia-
muuntimen lähtöön, jonka taajuus määrätään digitaalisen
kantoaaltotaajuusnumeron ja digitaalisen taajuusnumeron
15 summalla.

5. Patenttivaatimuksen 4 mukainen taajuussynteti-
saattori, t u n n e t t u siitä, että kantoaaltosignaali
sekoitetaan yhteen tai useampaan RF-vertailusignaaliin sen
taajuuden kasvattamiseksi NMR-instrumentin Larmor-taajuu-
20 delle.

6. Patenttivaatimuksen 4 mukainen taajuussynteti-
saattori, t u n n e t t u siitä, että se edelleen sisäl-
tää:

toisen digitaalisen summainen, jonka lähtö on kyt-
25 ketty toisen digitaalisen keruulaitteen tuloon, ja joka
tuottaa digitaalisen numeron, joka on aritmeettinen summa
digitaalisesta taajuusnumerosta, joka tuodaan yhteen sen
tuloista, ja digitaalisesta taajuusmodulaationumerosta,
joka tuodaan toiseen sen tuloista; ja

30 taajuusmodulointilaitteen, jolla tuotetaan sek-
venssi digitaalisia taajuusmodulaationumeroita ja viedään
ne toisen digitaalisen summainen toiseen tuloon muodostet-
taessa analogista kantoaaltosignaalia, siten että analogi-
nen kantoaaltosignaali moduloidaan taajuudeltaan ajan
35 funktiona.

10000000

00000000

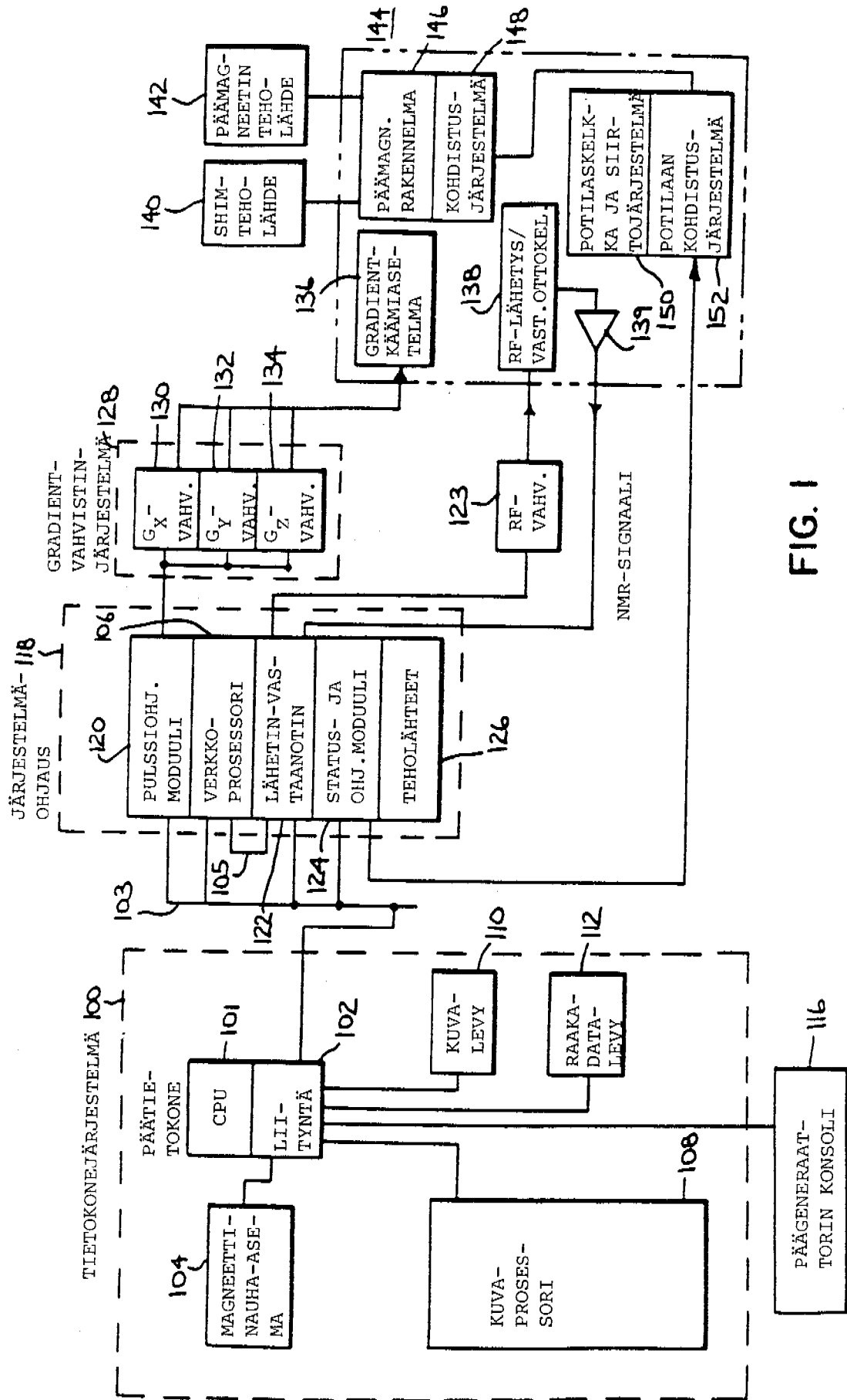


FIG. 1

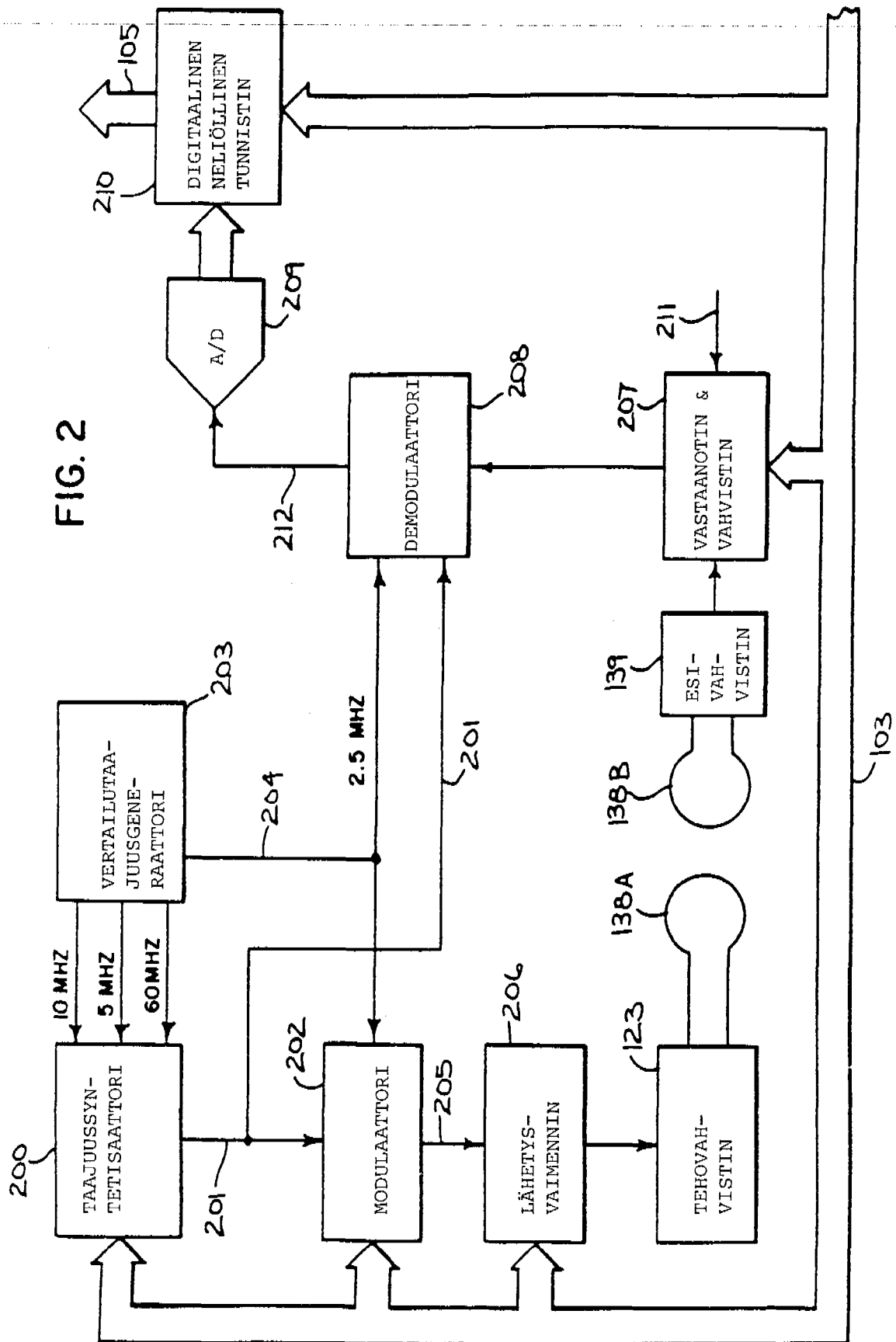
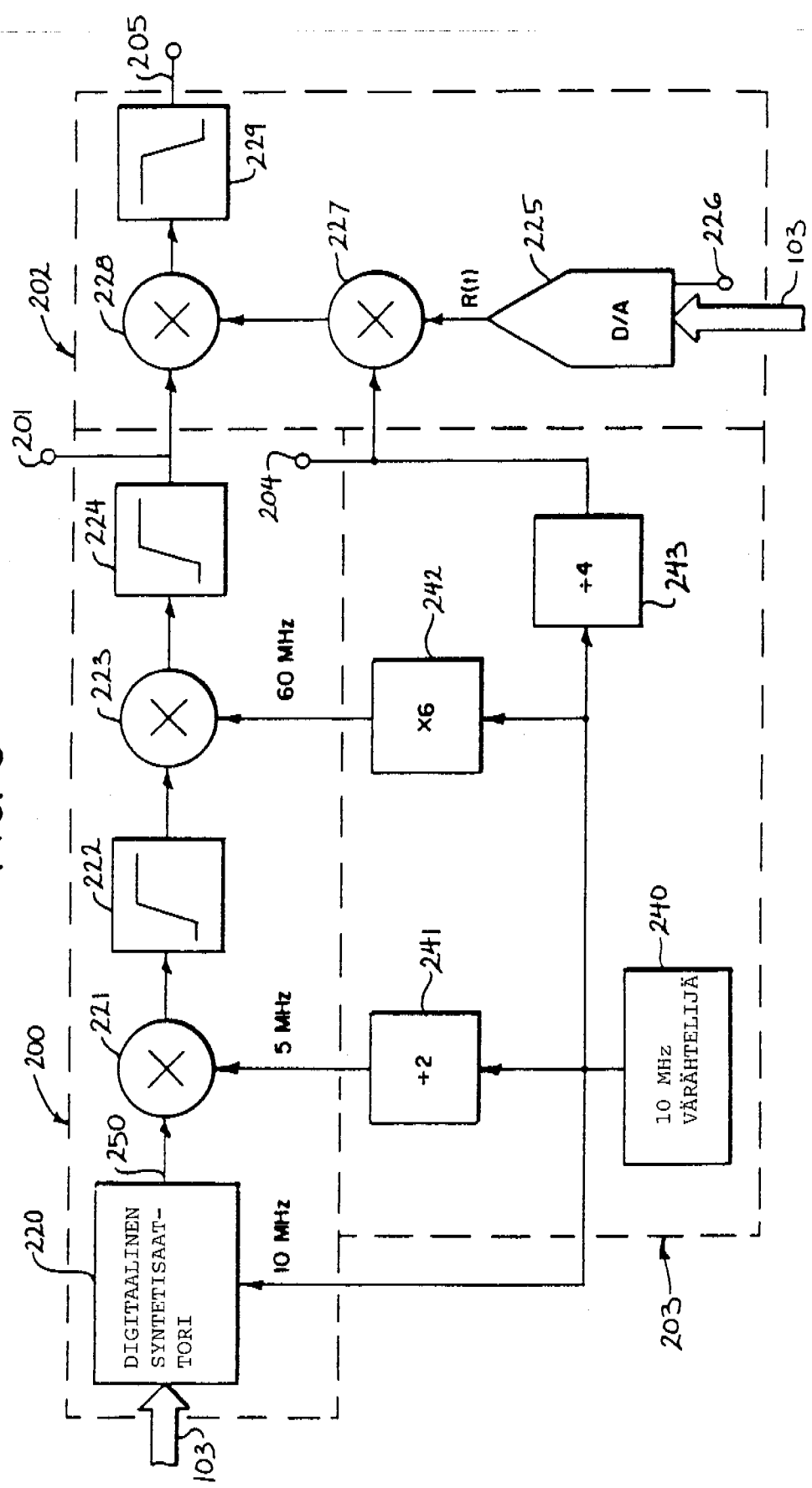


FIG. 3



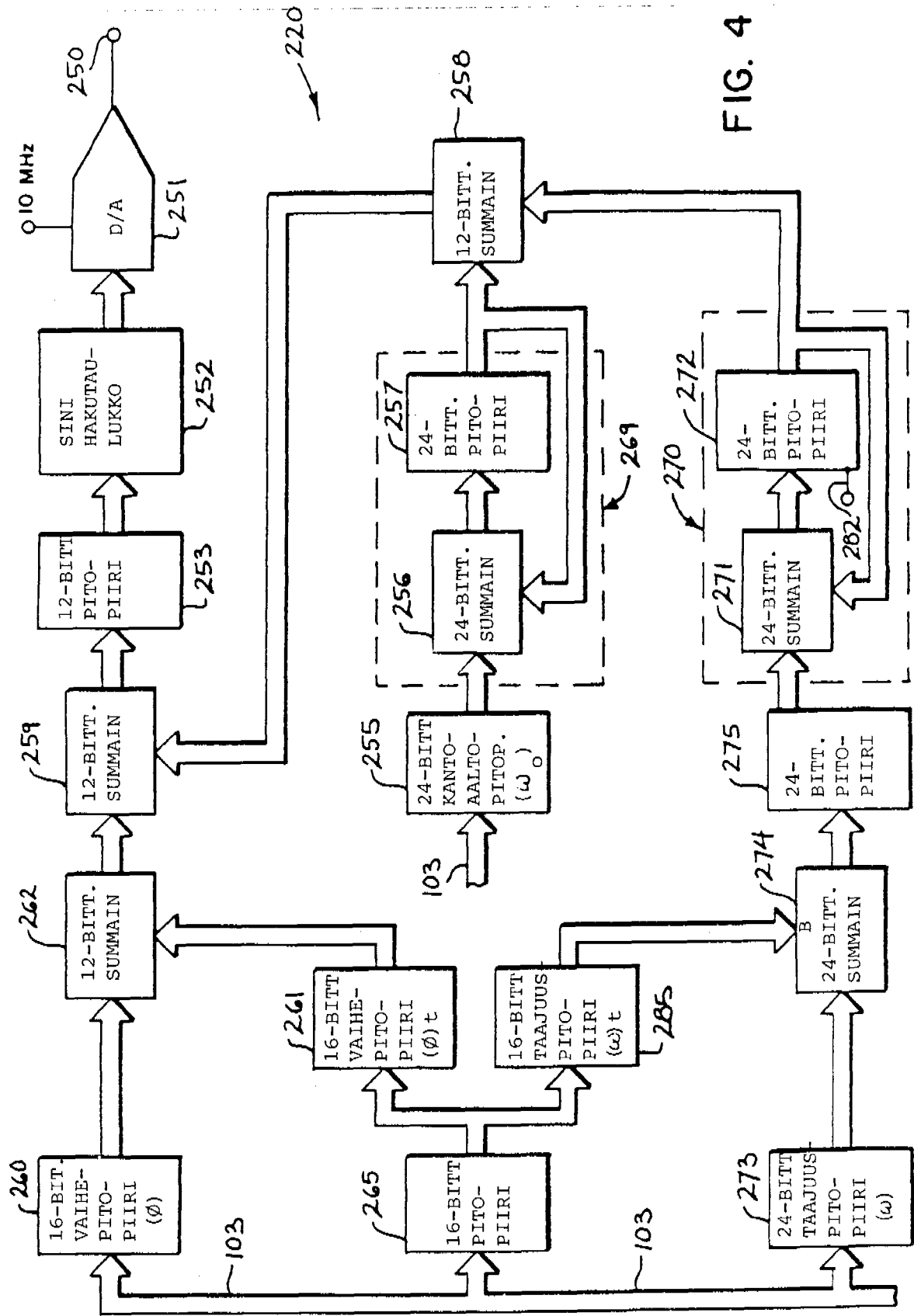


FIG. 4

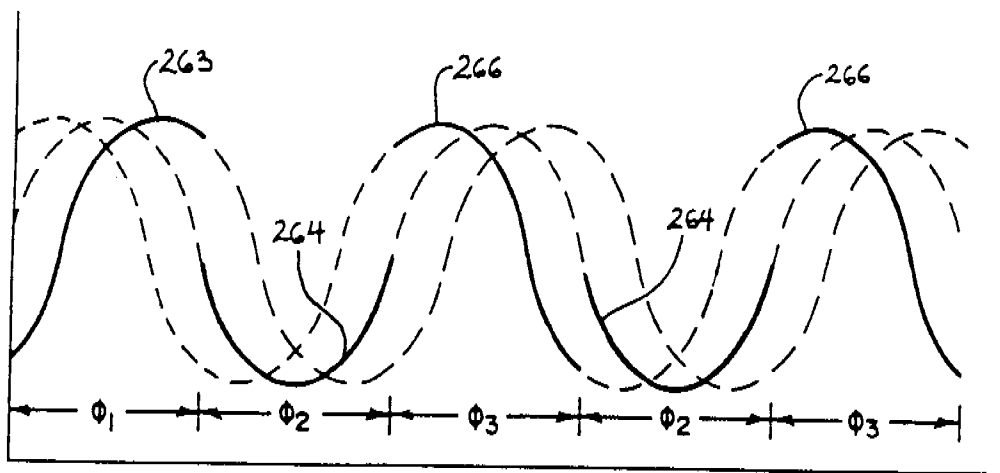


FIG. 5A

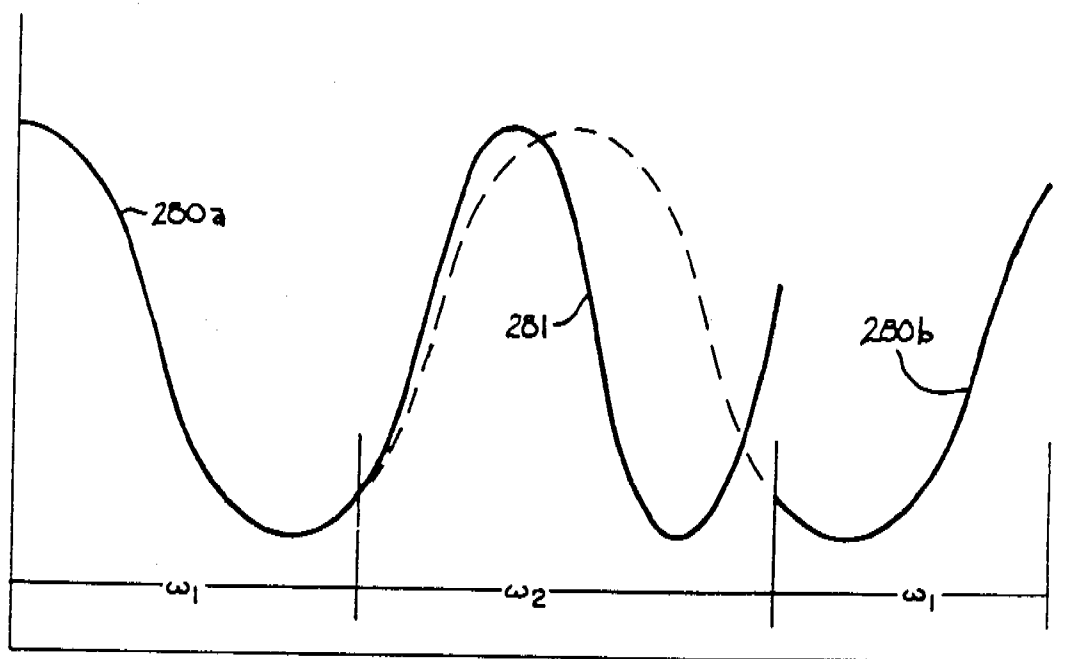


FIG. 5B