



(12) **PATENT**

(19) NO

(11) **324200**

(13) **B1**

NORGE

(51) Int Cl.

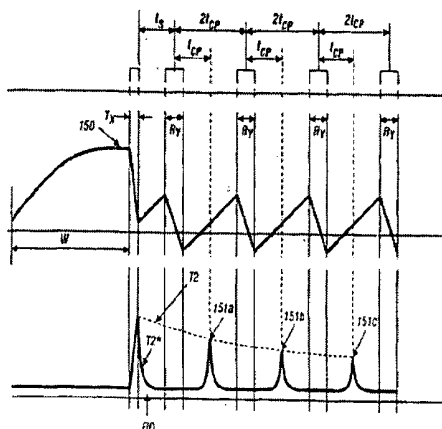
G01V 3/32 (2006.01)

Patentstyret

(21)	Søknadsnr	20002028	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr	
(22)	Inng.dag	2000.04.18	(85)	Videreføringsdag	
(24)	Løpedag	2000.04.18	(30)	Prioritet	1999.04.19, US, 130005
(41)	Alm.tilgj	2000.10.20			
(45)	Meddelt	2007.09.10			
(73)	Innehaver	Baker Hughes Inc, P O Box 4740, TX77210-4740 HOUSTON, US			
(72)	Oppfinner	Robert Andrew Slade, Grey Cottage, Mill Lane, OX294AX CASSINGTON, OXFORDSHIRE, GB Robert Hawkes, Derrymore House, 3 Old Rectory Lane, CB38BU DRY DAYTON, CAMBRIDGESHIRE, GB Alun Lucas, 19 Savile Way, Fowlmere ROYSTON, HARTFORDSHIRE, GB			
(74)	Fullmektig	Bryn Aarflot AS, Postboks 449 Sentrum, 0104 OSLO			

(54)	Benevnelse	Kjernemagnetiske resonansmålinger i brønnlogging som benytter en optimalisert refaseregulerende pulssekvens			
(56)	Anførte publikasjoner	D1 US 5680043 A1			
(57)	Sammendrag				

Et pulset NMR-redskap har et magnetarrangement som anvendes for å generere et statisk magnetfelt med hovedsakelig uniform feltstyrke innenfor et område av den formasjon som omgir borehullet. En høyfrekvensspole anvendes for å frembringe pulserende høyfrekvensfelt hovedsakelig vinkelrett på det statiske felt i det område som skal undersøkes. Kjernespinnene i formasjonen retter seg selv inn langs det utenfra påført statiske magnetfelt. Et pulserende høyfrekvensfelt påføres for å tippe spinnene inn i det tversgående plan, hvilket fører til en presesjon av spinnene. Tippepulsen etterfølges av en rekke refokuseringspulser og de resulterende rekker av pulsekkoer detekteres. Tidsstyringen og varigheten av høyfrekvenspulsene er forandret sammenlignet med vanlig CPMG for å oppnå størst mulig signalstyrke og nedsette høyfrekvens-effektforbruket til et minimum. En tilleggspuls for tvungen tilbakevending ved slutten av et ekkotog kan anvendes for å gjøre signaluttaket raskere og/eller frembringe et signal for å slette kunstig ringing.



OPPFINNELSENS BAKGRUNN

1. Oppfinnelsens område

Denne oppfinnelse går generelt ut på å bestemme geologiske egenskaper for underjordiske formasjoner ved bruk av kjernemagnetiske resonansmetoder (NMR) ved logging av borebrønner, særlig for å forbedre signalnivået og redusere effektforbruket ved å modifisere pulssekvens-tidsstyringen sammenlignet med tidligere kjent teknikk.

2. Bakgrunnen av kjent teknikk

Flere forskjellige teknikker anvendes for å bestemme nærvær og anslått mengde av hydrokarboner (olje og gass) i jordformasjoner. Disse metoder er beregnet på å fastlegge formasjonsparametere, som blant annet omfatter resistivitet, porøsitet og permeabilitet for de grunnformasjoner som omgir den borede brønn for å utvinne hydrokarboner. De redskaper som er utført for å frembringe den ønskede informasjon anvendes vanligvis for å logge borebrønnen. Meget av denne logging gjøres etter at borebrønnene er blitt utboret. I den senere tid er borebrønner blitt logget mens de utbores, og dette betegnes som måling-under-utboring (MWD) eller logging-under-utboring (LWD).

En teknikk som er utviklet i den senere tid utnytter loggeredskaper og fremgangsmåter som frembringer kjernemagnetisk resonans (NMR) med henblikk på blant annet å bestemme porøsitet, hydrokarbonmetning og permeabilitet for grunnformasjonene. NMR-loggeredskapene anvendes for å eksitere atomkjernene i de væsker som foreligger i de geologiske formasjoner som omgir borebrønnen, slik at visse parametere, slik som spinndensitet, longitudinal relaksasjonstid (vanligvis angitt med T_1 innenfor fagområdet) samt transversal relaksasjonstid (vanligvis betegnet med T_2) for de geologiske formasjoner kan måles. Ut i fra slike målinger fastlegges da porøsitet, permeabilitet og hydrokarbon-metning, hvilket gir verdifull informasjon om sammensetningen av de geologiske formasjoner og mengden av utvinnbare hydrokarboner.

NMR-redskapene frembringer et uniformt eller nesten uniformt statisk magnetfelt i et område av interesse som omgir borebrønnen. NMR er basert på det forhold at atomkjernen i mange elementer har et impulsmoment (spinn) og et

magnetisk moment. Kjernen har en karakteristisk Larmor-resonansfrekvens som har sammenheng med styrken av det magnetiske felt på vedkommende sted. Over tid vil kjernespinne rette seg selv inn langs et utenfra påført magnetisk felt. Denne likevektssituasjon kan forstyrres av en puls av et oscillerende magnetfelt, som kan tippe spinnene med resonansfrekvens innenfor båndbredden av det isolerende magnetfelt bort fra retningen av det statiske felt. Den vinkel θ som spinnene nøyaktig på resonans tippes over er gitt ved ligningen:

$$\theta = \gamma B_1 t_p \quad (1)$$

hvor γ er det gyromagnetiske forhold, B_1 er den effektive feltstyrke av det oscillerende felt og t_p er høyfrekvenspulsens varighet.

Etter tippingen vil spinnene presessere omkring statiske magnetfelt med en bestemt frekvens kjent som Larmor-frekvensen ω_0 , og som er gitt ved

$$\omega = \gamma B_0 \quad (2)$$

hvor B_0 er intensiteten av det statiske felt. Samtidig vender spinnene tilbake til likevektsretningen (hvilket vil si til samme retning som det statiske felt) i samsvar med en eksponensiell nedbrytningstid som er kjent som spinn-gitter-relaksasjonstiden eller T_1 . For hydrogenkjernen er $\gamma/2\pi = 4258 \text{ Hz/Gauss}$, slik at et statisk felt på 235 Gauss vil frembringe en presesjonsfrekvens på 1 MHz. T_1 for fluid i porer er totalt bestemt av de molekylære omgivelser og er typisk ti til ett tusen millisekunder i berggrunner.

Ved slutten av en $\theta = 90^\circ$ tippepuls vil spinnene ved resonans være rettet i en felles retning vinkelrett på det statiske felt og de vil presessere ved Larmor-frekvensen. På grunn av inhomogeniteter i det statiske felt som skriver seg fra redskapets formbegrensninger, uperfekt instrumentering eller mikroskopiske materialheterogeniteter, vil imidlertid hvert kjernespinn presessere i en noe forskjellig takt. Etter en lang tid sammenlignet med presesjonsperioden, men kortere enn T_1 ,

vil spinnene da ikke lenger presessere i fase. Denne defasing opptrer med en tidskonstant som vanligvis er betegnet med T_2^* , hvis den hovedsakelig skriver seg fra det statiske felts apparat-inhomogenitet, og som T_2 hvis den har sin årsak i materialeegenskapene.

5 Mottakerspolen er utført slik at en spenning blir indusert av depresesserende spinn. Bare den komponent av kjernemagnetiseringen som presesserer i det plan som forløper vinkelrett på det statiske felt avføles av spolen. Etter en 180° tippepuls (eller en "omvendingspuls"), vil spinnene ved resonans være rettet motsatt det statiske felt og "presesjonen" består da i en langsom tilbakevending langs
10 det statiske felts akse til likevektsretningen. Et signal vil således bli generert etter en 90° tippepuls, men ikke etter en 180° tippepuls i et hovedsakelig uniformt magnetfelt.

Skjønt det er blitt utviklet mange forskjellige fremgangsmåter for å måle T_1 , har man nå kommet frem til en enkelt kjent standardmetode, nemlig CPMG-sekvensen (Carr-Purcell-Meiboom-Gill) for måling av T_2 . I motsetning til NMR-magneter i laboratorier, vil brønnloggingsredskaper ha innhomogene magnetfelt på grunn av de vanskeligheter som foreligger ved anbringelse av magneter inne i et rørformet redskap og den iboende "innside-ut"-geometri. Maxwells divergens teorem angir at det ikke kan foreligge et område med høy homogenitet på utsiden
20 av redskapet. I typiske borebrønner er da $T_2^* \ll T_2$, og nedbrytningen ved fri induksjon blir da et mål på de apparat-induserte inhomogeniteter. For å måle den virkelige T_2 i slike situasjoner vil det være nødvendig å se bort fra virkningen av de apparat-innførte inhomogeniteter. For å oppnå dette blir en rekke pulser påført for gjentatte ganger å fokusere spinn-systemet på nytt, slik at virkningene av T_2^* utelukkes og det dannes en rekke spinnekkoe. Dempningen av ekkoamplituden er
25 da et sant mål på svekningen på grunn av materialeegenskaper. Videre kan det vises at forfallet faktisk er sammensatt av et antall forskjellige forfalls-komponenter som danner et T_2 -spektrum. Ekko-forfallsdata kan da behandles for å åpenbare dette spektrum, som har sammenheng med berggrunnens porestørrelsefordeling og andre parametere av interesse for den som analyserer brønnloggen.
30

En fremgangsmåte for å frembringe en rekke spinnekkoe beskriver seg fra Carr og Purcell. Pulssekvensen starter med en forsinkelse på flere T_1 for å gjøre det mulig for spinnene å rette seg inn langs aksene for det statiske magnetfelt. En

90° tippepuls påføres så for å dreie spinnene inn i tverrplanet, hvor de presesserer med en vinkelfrekvens som er bestemt av den magnetiske feltstyrke på stedet.

Dette spinn-system mister koherens med en tidskonstant T_2^* . Etter en kort tid t_{CP}

påføres en 180° tippepuls som fortsetter å dreie spinnene, slik at deres posisjon i

tverrplanet vendes om. De fortsetter å presessere, men nå vil deres faser konvergere inntil de et øyeblikk rettes inn etter en ytterligere tid t_{CP} etter 180°-puls.

Denne 180°-puls påføres på nytt etter en ytterligere tid t_{CP} og denne prosess gjentas mange ganger slik at det dannes en rekke spinnekkoe med innbyrdes mellomrom på $2 t_{CP}$.

Skjønt Carr-Purcell-sekvensen synes å gi en løsning når det gjelder å eliminere de apparat-innførte inhomogeniteter, ble det funnet av Meiboom og Gill at hvis varigheten av 180°-pulsene i Carr-Purcell-sekvensen bare var litt feilaktige, så ville fokuseringen bli ufullstendig, og tverrmagnetiseringen ville da stadig dreies ut av tverrplanet. Som en følge av dette ville betraktelige feil kunne opptre i T_2 -

bestemmelsen. Meiboom og Gill anga da en modifikasjon av Carr-Purcell-

pulssekvensen, slik at etter at spinnene er tippet 90° og fasespredningen begynner, så blir bæreren for 180°-pulsene faseforskjøvet med $\pi/2$ radianer i forhold til

bæreren av 90°-puls. Denne faseforandring bringer spinnene til å rotere om en akse vinkelrett både på akselen for det statiske magnetfelt og aksen for tippepul-

sen. Hvis faseforskyvningen mellom tippepulsene og refokuseringspulsene avviker litt fra $\pi/2$, så vil rotasjonsaksen ikke forløpe perfekt vinkelrett på det statiske felt

og høyfrekvensfeltet, men dette har en ubetydelig virkning. For en nærmere forklaring henvises leseren til en detaljert fremstilling av NMR-spinnekkoteknikken, slik som "NMR: a nuts and bolts approach", Fukushima og Roeder. Som et resul-

tat slettes alle feil som opptrer under en jevntalls-puls i CPMG-sekvensen av en motstående feil i oddetallspuls. CPMG-sekvensen er derfor tolerant overfor u-

perfekte spintippe-vinkler. Dette er særlig nyttig for et brønnloggingsredskap som har inhomogent og uperfekt statisk- og puls-oscillerende (HF) magnetisk felt vinkelrett på hverandre.

Forente staters patent nr. 5,023,551 som er meddelt til *Kleinberg* angir en NMR-pulssekvens for bruk i borehullomgivelser og som kombinerer en modifisert rask inversjonsgjenvinnings (FIR)-pulssekvens med en pulsrekke på mer enn ti og vanligvis flere hundre CPMG-pulser i samsvar med:

$$\left[W_i - 180_x - t_i - 90_x - (t_{cp} - 180_y - t_{cp} - \text{ekko})_j \right]_i \quad (3)$$

hvor $j = 1, 2, \dots, J$, og J er antall ekkoer som oppsamles i en enkel CPMG-sekvens, hvor $i = 1, 2, \dots, I$ og I er antall ventetidsperidoer som anvendes i pulssekvensen, hvor W_i er gjenvinningstiden før omvendingspulsene, og hvor t_i er gjenvinningstidene forut for en CPMG-sekvens, og hvor t_{cp} er Carr-Purcell-mellomrommet. Fasen av høyfrekvenspulsene 90 og 180 er angitt ved nedre indekser X og Y , hvor Y er faseforskjøvet med $\pi/2$ radianer i forhold til X . De nedre indekser henviser også hensiktsmessig til den akse som magnetiseringen roterer om under høyfrekvenspulsene i et lokalt kartesisk koordinatsystem sentrert på kjernene hvor det statiske magnetiske felt er rettet i Z -retningen og høyfrekvensfeltet er rettet i X -retningen. Denne sekvens kan anvendes for å måle både T_1 og T_2 , men den er meget tidskrevende og begrenser loggehastigheten. Hvis t_{cp} er innstilt til null og omvendingspulsene utelates, så degenererer sekvensen til standard CPMG for måling av bare T_2 .

Et antall andre tidligere oppfinnelser, slik som de som er angitt i US-patent 5,363,041 til *Sezginger*, US-patent 5,381,092 til *Freedman* og internasjonal søknad WO 97/34167 til *Prammer* anvender variasjoner av CPMG-pulssekvensen. Grunnleggende for alle disse oppfinnelser er bruk av en 180° refokuseringspuls.

CPMG-pulssekvensen var utviklet for bruk i laboratorium og medisinske omgivelser hvor magnetene befinner seg utenfor undersøkelsesområdet og det er relativt lett å opprettholde en ensartet magnetfeltstyrke over det område som undersøkes. I et nedhulls NMR-system, vil magnetfeltet uunngåelig ha en betraktelig magnetfeltgradient sammenlignet med en laboroatoriumsmagnet. Dette er et direkte og uunngåelig resultat av dens "innside-ut"-natur, hvor undersøkelsesområdet befinner seg på utsiden av magnetene. For å gjøre NMR-signalet fra slikt ut-

styr størst mulig, er det nødvendig å samle opp signalet fra et så stort område som mulig. For å oppnå dette, gjøres magnetfeltets gradienter minst mulig over et romvolum fjernt fra redskapet. Det gjenværende magnetfelts innhomogenitet vil likevel være hundre til tusen ganger større enn ved en laboratoriumsmagnet. Derfor må høyfrekvenspulsens båndbredde være så stor som mulig for å kunne tippe kjerner med resonansbetingelser så langt som mulig fra resonansfrekvensen, slik at volumets grenser utvides i størst mulig grad.

For å oppnå en stor båndbredde, må høyfrekvenspulsene være så korte som mulig, samt i samsvar med den tilgjengelige høyfrekvens-toppeffekt, som vanligvis er noen få kilowatt, hvilket fører til det forhold at 90°-pulsene er kortere enn de 180° refokuseringspulser, og har vanligvis halvparten av disse pulsers varighet hvis pulsene tilnærmet har en kvadratisk omhylningskurve. 90°-pulsene vil følgelig ha dobbelt så stor båndbredde som 180°-pulsene. Som en følge av dette vil bare omkring halvparten av de kjerner som tipper av 90°-pulsene deretter bli refokusert av 180°-pulsene.

Beskrivelsen ovenfor er en overforenkling på grunn av den betraktelige inhomogenitet og ikke-ortogonalitet for det faktiske statiske felt og høyfrekvensfelt, men den fanger opp det vesentlige av problemet ved å bruke en CPMG-sekvens i et ikke-homogent feltsystem.

US 5,680,043 angir en fremgangsmåte for evaluaering av en grunnformasjon ved benyttelse av et NMR-verktøy omfattende det å frembringe et statisk magnetfelt i formasjonen, å frembringer en oscillerende magnetfelt i formasjonen i henhold til en pulssekvens som har en tidsbestemt parameter, å tilveiebringer en ikke-uniformt magnetfeltgradient; å varierer den tidsbestemte parameter til pulssekvensen, og å indikere en gassattributt for formasjonen basert på de mottatte signaler.

SAMMENFATNING AV OPPFINNELSEN

Foreliggende oppfinnelse gjelder en fremgangsmåte for å forbedre de NMR-signaler som mottas fra en formasjon som omgir et borehull. Ethvert pulset NMR-redskap hvor et magnetarrangement anvendes for å generere et statisk magnetfelt med en hovedsakelig uniform feltstyrke i et område av formasjonen

som omgir borehullet, og hvori en høyfrekvensantenne anvendes for å frembringe pulserende høyfrekvensfelter som forløper hovedsakelig vinkelrett på det statiske felt i undersøkelsesområdet kan da anvendes. Atomkjernespinnene i formasjonen retter seg selv inn langs det utenfra påtrykte statiske magnetfelt. Et pulserende høyfrekvensfelt påføres, og dette felt tipper spinnene ved resonans over den ønskede tippevinkel for å oppnå maksimalt signal, vanligvis 90°. En refokuseringspuls med en spinn-tippevinkel vesentlig mindre enn 180° påføres med bærerfase som er forskjøvet typisk $\pi/2$ radianer i forhold til 90° tippepulsen. Skjønt refokuseringspulsene fører til spinn-tippevinkler mindre enn 180° over det følsomme volum, vil deres høyfrekvens båndbredde ligge nærmere den båndbredde som gjelder for den opprinnelige 90°-puls. Flere av de kjerner som opprinnelig ble tippet 90° blir da refokuseret, hvilket fører til sterke ekkoer enn det som ellers ville bli oppnådd med en vanlig 90° refokuseringspuls. Den reduserte varighet av refokuseringspulsene reduserer også redskapets effektforbruk.

I et første aspekt tilveiebringer oppfinnelsen således en fremgangsmåte for å bestemme en parameter av interesse innenfor et volum av en jordformasjon ved hjelp av et borehullsredskap som føres inn i et borehull inne i formasjonen, idet fremgangsmåten omfatter:

(a) en magnetsammenstilling anvendes på borehullsredskapet for å frembringe et statisk magnetfelt med hovedsakelig uniform feltstyrke innenfor nevnte volum av formasjonen slik at kjernespin i nevnte volum innrettes parallelt med en retning av det statiske felt,

(b) et høyfrekvent (HF) magnetisk felt opprettes i nevnte volum av formasjonen, og slik at nevnte magnetiske høyfrekvensfelt har en retning hovedsakelig vinkelrett på retningen av det statiske felt idet høyfrekvensfeltet er kjennetegnet ved at det omfatter en pulssekvens:

$$W - T - t_s - R - (t_{cp} - \text{ekko} - t_{cp} - R)_j$$

hvor W er en venteperiode, T er en tippepuls for tipping av kjernespinnene over en vinkel som hovedsakelig er lik nitti grader for derved å frembringe presesjon av

spinnene, t_s er en ventetid, t_{CP} er Carr-Purcell-tiden, R er en refokuseringspuls på mindre enn 180° , og $j=1,2,\dots,J$, og J er antallet ekkoer som oppsamles innenfor en enkelt pulsssekvens,

(c) med en mottaksspole på borehullsredskapet måles signaler som indu-
5 duseres av det pulserende høyfrekvensfelt i formasjonen, og

(d) nevnte målte signaler behandles for å fastlegge parameteren av
interesse.

Det kan anvendes en 90° -puls med omvendt fase ved slutten av sekvensen
for å fremme gjenvinningen av den langsgående magnetisering ved å frembringe
10 innretting av spinn-systemet med det statiske felt på nytt, og derved muliggjøre
sletting av tippepulsens kunstige "svingning". NMR-ekkoene analyseres på vanlig
måte for å utlede formasjonens NMR-parametere.

Oppfinnelsen er angitt i de vedføyde patentkrav.

15 KORT BESKRIVELSE AV TEGNINGENE

For detaljert forståelse av foreliggende oppfinnelse skal det nå henvises til
den følgende detaljerte beskrivelse av den foretrukne utførelse, sett i sammen-
heng med de vedføyde tegninger, hvor tilsvarende elementer er gitt samme hen-
visningstegn, og hvorpå:

20 fig. 1A-1C er sideoppriss, delvis i snitt, av et eksempel på en boresammen-
stilling som omfatter et NMR-redskap,

fig. 2 (KJENT TEKNIKK) viser opprettelse av et toroidformet område med
homogent radiaalt magnetfelt vinkelrett på et par aksialt rettede magneter med like
motstående poler, samt påføring av et pulserende høyfrekvensfelt på
25 magnetiseringen,

fig. 3A-3C er grafiske fremstillinger av den optimaliserte pulsssekvens i hen-
hold til oppfinnelsen, og de resulterende opptegninger over tid for den langs-
gående magnetisering (M_z i fig. 3B) samt én komponent av tverrmagnetiseringen
(M_x i fig. 3C) og det målbare signal (fig. 3C),

fig. 4A (KJENT TEKNIKK) til 4D er dataopptegninger som viser en innbyrdes sammenligning av NMR-ekksignaler som anvender refokuseringspulser av forskjellig varighet i forhold til 90° tippepulsen, for å utlede eksperimentelle og simulerte data,

5 fig. 5A er en grafisk fremstilling av ekkoamplituden som en funksjon av forholdet mellom refokuseringspulsen og tippepulsens tippevinkel for den optimaliserte pulssøkvns sammenlignet med CPMG, både for eksperimentelle og simulerte data,

10 fig. 5B er en grafisk fremstilling som angir variasjonen av ekkoamplituden som en funksjon av høyfrekvenspulsens tidsforløpparameter κ (bare simulerte data),

fig. 5C og 5D viser anvendelse av den eventuelle sluttpuls for fremtvunget gjenvinning,

15 fig. 5E viser anvendelse av en puls for fremtvunget gjenvinning for reduksjon av kunstig tvinging,

fig. 6A er en dataopptegning som viser NMR-ekksignaler fra et redskap med kraftig forstyrrelse fra svingesignal fra tippepulsen, og

20 fig. 6B er en dataopptegning som viser NMR-ekksignaler fra et redskap hvor kraftig forstyrrelse fra tippepulsens svingesignal er blitt korrigert ved hjelp av en behandlingsmetode som vil bli beskrevet her.

DETALJERT BESKRIVELSE AV FORETRUKNE UTFØRELSE

Det skal henvises til fig. 1A-1C, hvor det er vist et eksempel på en boresammenstilling 100 ved ytterenden av en borestreng 102 eller kveilet rørledning.

25 Et redskap 104 for måling-under-utboring (MWD), tilhørende verktøy 112 (som inneholdes i et hus 114) for pulsert kjernemagnetisk resonans (NMR) og elektroniske kretser 124, samt en pulseffektenhet 118 er koplet etter hverandre i boresammenstillingen 100. Fleksible sub-enheter 120 anvendes f.eks. for sammenkopling av MWD-redskapet 104 og NMR-verktøyet 112 i boresammenstillingen 100.

30 MWD-redskapet 104 kan også omfatte en lydføler, et densitets-måleverktøy, samt et porøsitet-måleverktøy. En kommunikasjonssubb 116, som f.eks. anvender toveis telemetri, er også anordnet slik som vist i boresammenstillingen 100.

Denne boresammenstillingen 100 omfatter en borkrone 106, en bæreanordning 108 og en nedhulls slammotor 110. Borestrengen 102 omfatter f.eks. borerørseksjoner som er sammenkoplet ende-mot-ende eller en hovedsakelig kontinuerlig kveil. Borehullet inneholder vanligvis et borefluid 122 eller "slam" som drives gjennom borestrengen 102 og boresammenstillingen 100 på bunnen av borehullet, samt gjennom borkronen 106. En kanal 130 inne i borestrengen 102 og boresammenstilling 100 gjør det mulig for borefluidet 122 å strømme gjennom borestrengen 102 og boresammenstillingen 100. Borefluidet tjener også til smøring av borkronen 106 og for å føre skjærspen eller flak fra borehullet bort fra borkronen 106.

Kommunikasjonssubben 116, effektenheten 118, MWD-redskapet 104 og NMR-verktøyet 112 er alle koplet etter hverandre til borestrengen 102. Slike subbenheter og redskaper danner sammen en boresammenstilling 100 ved bunnen av borehullet mellom borestrengen 102 og borkronen 106. Stabilisatorer 126 anvendes for å stabilisere og sentrere boresammenstillingen og redskapene inne i borehullet. Huset 114, f.eks. et vektrør, er utført i en ikke-magnetisk legering.

Boresammenstillingen 100 utfører forskjellige målinger, innbefattet pulserende kjernemagnetisk resonans, mens borehullet utbores. Som vist i fig. 1B, er NMR-verktøyet rotasjonssymmetrisk om en lengdeakse 128 for boresammenstillingen 100. Dette er ikke ment å utgjøre noen begrensning, og fremgangsmåten i henhold til oppfinnelsen kan utføres ved hjelp av en hvilken som helst tidligere kjent anordning innrettet for å oppnå NMR-målinger under jordoverflaten. Skjønt en MWD-utførelse av foreliggende oppfinnelse er utvist, så kan likevel fremgangsmåten i henhold til foreliggende oppfinnelse også anvendes ved trådline-logging, logging under utboring og logging under tripping, ut i fra den betydning disse uttrykk har for fagkyndige på området.

Det pulsdrevne NMR-verktøy 112 omfatter minst to magneter 132 og 134 i innbyrdes avstand og som rommes i boresammenstillingen 100 og befinner seg inne i NMR-verktøyet 112 for å frembringe et magnetisk felt med et område av hovedsakelig uniform magnetisk intensitet i nærheten av borehullet. Disse minst to magneter 132 og 134 i innbyrdes avstand og som er vist i fig. 2 og har rørform samt er anordnet koaksialt inne i NMR-verktøyet 112 samt omgir kanalen 130. En høyfrekvent (HF) senderantenne eller spole 136 omgir også kanalen 130, og er

f.eks. plassert mellom de to magneter 132 og 134 i innbyrdes avstand. Høyfrekvensspolen 136 er forbundet med en passende høyfrekvenspuls-sender for å frembringe effekt ved valgte frekvenser, samt en prosessor 124 som bestemmer pulssekvensens tidsforløp. Høyfrekvensspolen 136 tilføres pulser og frembringer et høyfrekvensfelt vinkelrett på det statiske magnetfelt.

De minst to magneter 132 og 134 er f.eks. permanent magnetisert i aksialretningen, og er i en utførelse vendt i motsatte retninger, slik som vist i fig. 2. Som vist i fig. 2, er like magnetpoler, f.eks. nordpolene, for de to magneter 132 og 134 vendt mot hverandre for å frembringe et toroidformet område av homogent radialet magnetfelt 140 vinkelrett på paret av aksialt innrettede magneter 132 og 134. Den pulsdrevne høyfrekvensspole 136 frembringer det pulserende høyfrekvensfelt 142 som er vist ved stiplede linjer. Avstanden av det toroidformede området 140 av homogent radialet magnetfelt fra aksen for magneten 132 og 134 er avhengig av styrken av magnetene 132 og 134, samt avstanden mellom de like poler på magnetene 132 og 134. Berggrunnsporer (ikke vist) i jordformasjonen er fylt med fluid, vanligvis vann eller hydrokarbon. Hydrogen-kjernene i fluidet rettet inn i området av det homogene magnetfelt 140 som genereres av magnetene 132 og 134. Hydrogenkjernene "vippes" så bort fra det homogene magnetfelt 140 ved hjelp av det pulserende høyfrekvensfelt 142 som frembringes av høyfrekvensspolen 136. Ved avslutningen av det pulserende høyfrekvensfelt fra spolen 136, vil da hydrogenkjernene svinge eller presessere med høy frekvens omkring det homogene magnetfelt 140, slik at det induseres et NMR-signal i høyfrekvensspolen 136 inntil hydrogenkjernene faller tilbake til den opprinnelige retning langs det homogene magnetfelt 140. De induserte NMR-signaler sendes til jordoverflaten for behandling eller de kan behandles av en nedhullsprosessor (ikke vist).

Andre konfigurasjoner av magnetene kan også anvendes. US-patent 4,710,713 som er meddelt til *Strikman* angir et magnetarrangement hvor det statiske magnetfelt frembringes av sylinderformede magneter som har nordpoler og sydpoler på sine krumme magnetoverflater, hvilke resulterer i et statisk felt med tilnærmet dipolform. Dette *Strikman*-patent utnytter en antenne i rektangulær sløyfe til å frembringe et høyfrekvensfelt av lignende dipolform men dreiet 90° i

forhold til det statiske felt, slik at ortogonalitet opprettholdes mellom det statiske felt og høyfrekvensfeltet. Andre variasjoner vil være kjent for fagkyndige på området, og alle disse kan anvendes i forbindelse med foreliggende oppfinnelse.

Det skal nå henvises til fig. 3A hvor det er angitt en optimalisert pulsssekvens i henhold til en utførelse av foreliggende oppfinnelse:

$$W - T_x - t_s - R_y - (t_{cp} - \text{ekko} - t_{cp} - R_y)_j \quad (4)$$

er vist i grafisk form. Nedre indekser X og Y angir høyfrekvenspulsens faser og effektive rotasjonsakse i et lokalt koordinatsystem som er sentrert på kjernen og med det statiske magnetfelt orientert langs Z-aksen og høyfrekvens-magnetfeltet orientert tilnærmet langs X-aksen, hvor fasen Y er forskjøvet med typisk $\pi/2$ radianer i forhold til X. Nedre indeks j angir indeks for ekkoet og refokuseringspulsene i sekvensen. Ved begynnelsen av enhver sekvens og etter avventing over en tidsperiode W, befinner spinnsystemet seg med hovedsakelig null tverrmagnetisering samt en positiv langsgående magnetisering (M_z) som er lik eller mindre enn den fullstendige likevektsmagnetisering, slik som vist ved verdien 150 i fig. 3B. Den takt hvormed kjernespinnet innretter seg langs den lokale akse (Z) for det statiske felt under W styres av spinngitterets relaksasjonstid (T_1). Ved å justere venteperioden W kan det utledes informasjon angående T_1 , slik som forklart av *Kleinberg* og andre.

Det skal nå henvises til fig. 3A-3C, hvor det er angitt at en tippepuls av varighet T og fase X ved slutten av tidsperioden W påføres formasjonen, slik at spinnene i eller nær resonanstilstand bringes til å tippe inn i tverrplanet (XY) for måling, hvor de ved nedbrytning frembringer et fritt induksjonssignal (FID) i målespolen som befinner seg i borehullsverktøyet. Det signal som induseres i mottakerpolen av M_x -komponenten ved tverrmagnetisering er vist i fig. 3C. På grunn av at borehullsredskapets dødtid er av størrelsesorden femti mikrosekunder, som er lengre enn nedbrytningstiden for den frie induksjon, kan FID vanligvis ikke observeres. Hvis ventetiden W er flere ganger lengre enn den lengste T_1 for formasjonsfluidet, så vil den optimale tippepuls være en puls som fører til en spinn-tippevinkel på 90° for spinn i resonans. Hvis W er kortere, slik at en fullstendig

relaksasjon til likevekt ikke har funnet sted, så vil den optimale spinn-tippevinkel være mindre enn 90° , hvilket vil kreve en kortere puls. Dette er den velkjente Ernst-effekt (Ernst R.R, Anderson W.A. Rev. Sci. Instrum. 37(1) 93 1966).

En viss tid t_s etter T-pulsen, blir en refokuseringspuls R påført med fase Y (bærerfase forskjøvet vanligvis $\pi/2$ i forhold til X) og slik som vist i fig. 3A, hvorefter ytterligere refokuseringspulser påføres hver $2 t_{CP}$ i samsvar med sekvensen i henhold til ligning (4). Varigheten av R er slik at spinn-tippevinkelen for samtlige kjerner med resonansverdi innenfor båndbredden av refokuseringspulsen er vesentlig mindre enn 180° . Dette er i motsetning til tidligere kjente metoder hvor varigheten av R er slik at den spinn-tippevinkel som tilsvarer refokuseringspulsen er 180° . Disse refokuseringspulser tjener til å reversere faseforandringen av spinn-systemet i tverrplanet og derved generere målbare ekkos, angitt ved indeks j, med tidsintervaller på $2t_{CP}$ etter hver refokuseringspuls, slik som angitt i fig. 3C. Ekkoenes størrelse avtar over en tidsperiode. Forfallstakten er bestemt ved spinn/spinn-relaksasjonsparameteren eller T2. Parameteren T2 er av stor interesse for den som analyserer loggen, da den inneholder informasjon med hensyn til porestørrelsefordelingen og andre parametere av interesse. Ved å påføre mange refokuseringspulser, vil tallrike ekko-topppunkter 151a, 151b,...være tilgjengelig for å frembringe en forfallskurve som angir T2.

For å gjøre signalet fra de tippede kjerner størst mulig, blir høyfrekvenspulsene alltid sendt ut med maksimal effekt, vanligvis noen få kilowatt, hvilket i et nedhulls NMR-verktøy fører til den tilstand at 90° -pulsen typisk har en varighet som er halvparten av varigheten av 180° -refokuseringspuls som anvendes i CPMG (under den antakelse at pulsene har hovedsakelig kvadratformet omhylningskurve). 90° -pulsen har følgelig dobbelt så stor båndbredde som 180° -pulsen, og som en følge av dette vil bare omkring halvparten av de kjerner som tippes av 90° -pulsen etterpå bli refokusert av en 180° -puls. Denne reduksjon i antall kjerner som blir refokusert er noe som ikke er tatt i betraktning ved den tidligere kjente teknikk. Denne virkning opptrer bare når gradienter foreligger i det magnetiske felt, slik det er tilfelle for alle nedhulls NMR-redskaper. All den tidligere kjente teknikk som er registrert tar sikte på å frembringe variasjoner i den grunnleggende CPMG-sekvens

med det formål å redusere feilene, samtidig som refokuseringspulsen opprettholdes på 180° .

Det skal nå henvises til fig. 4A og 4B, hvor fremstillingens ordinat er ekkoamplituden, mens tiden er avsatt langs abscissen. De data som er angitt i fig. 4A ble oppnådd ved bruk av CPMG-sekvensen (kjent teknikk) med redskapen ned-
5 senket i en tank med vann, for simulering av et borehull med 100% porøsitet. De viste data i fig. 4B ble oppnådd ved bruk av den pulssekvens som er angitt ved ligning (4) med en refokuseringspuls R på mindre enn 180° . For å utlede disse data ble det anvendt et NMR-spektrometersystem for å demodulere det mottatte
10 signal i fasekvadratur (reelle- og imaginære komponenter) ved bruk av et kontinuerlig bæreølge-referansesignal som er lik Larmor-frekvensen for kjernene i midten av det følsomme volum, og et slikt system er i vanlig bruk og vil være kjent av fagkyndige på området. Ved bruk av spektrometeret ble data tatt opp i tidsvinduer på 0,5 ms som omgir ekkoet, og det demodulerte signal ble digitalisert og regi-
15 strert ved mellomrom på $12\mu\text{s}$. Disse data ble så fasekorrigert i samsvar med vanlige fremgangsmåter, på en slik måte at all ekkoinformasjon ble overført til den reelle kanal. Fig. 4A og 4B viser sammenkjedningen av data i den reelle kanal ut i fra de første 8 vinduer registrert ved denne fremgangsmåte, og som klart fremviser ekkoene. Tallene langs abscissen er datapunkt-anvisninger.

20 Før oppsamlingen av data ble T-pulsen innstilt nøyaktig til 90° ved å variere pulslengden, samt ved bruk av en refokuseringspuls på omtrent 90° samt en CPMG-sekvens med ventetid W på 10 sekunder, hvilket er mer enn fem ganger T_1 for måleprøven (kranvann, $T_1 \sim 2\text{s}$, $T_2 \sim 1\text{s}$) for å sikre fullstendig relaksasjon, hvorpå den maksimale ekkoamplitude ettersøkes. Etter å ha innstilt T-pulsen, ble
25 pulslengden R av refokuseringspulsen variert og ekkotog utledet i fasevekslende par (vil bli omtalt nedenfor under henvisning til tabell 1) og middelveiden ble tatt over flere målinger for å forbedre signal/støy-forholdet. Den ekkosignalamplitude som er vist i fig. 4B tilsvarende den som maksimalt ble oppnådd når R-pulslengden tilsvarte omtrent 126° dreining. Toppamplituden 162 i fig. 4B er typisk 25-30%
30 større enn de tilsvarende toppamplituder 152 for CPMG-sekvensen i fig. 4A, (fig. 4A og 4B har samme ordinatskala).

Fig. 4C og 4D viser simuleringsdata for samme redskapsutførelse utledet fra en tredimensjonal spinn-dynamisk numerisk modell for føleren, på samme ordinatskala som i fig. 4A og 4B. Som i fig. 4A og 4B, er tiden angitt langs abscissen og signalamplituden langs ordinaten. Toppamplituden 182 med den optimaliserte pulssekvens er typisk 25-30% større enn toppamplituden 172 for den simu-

5 lerte CPMG-sekvens. Denne spinn-dynamiske modell er beskrevet i *Hancorn*. Det optimale forhold mellom varighetene av henholdsvis refokuseringspulsen og tippepulsen er her angitt ved λ . Ved CPMG er $\lambda = 2$, men i henhold til foreliggende oppfinnelse er $\lambda < 2$. Den optimale λ -verdi er avhengig av formen av

10 magnetfeltet og høyfrekvensfeltet, men er lik 1,4 for den følerutførelse som er anvendt ved disse prøver.

Den første ekko i alle de sekvenser som er vist i fig. 4A-4C er svekket på grunn av den velkjente "simulerte ekkovirkning". Dette finner sted i ethvert pulserende NMR-forsøk som utføres i et inhomogent magnetfelt, og det første ekko bør

15 da ignoreres.

Det skal nå henvises til fig. 5A, som er en opptegning opprettet ut i fra data som tas fra det tredje ekko i flere sekvenser, slik som de som er vist fig. 4A-D, og er inntegnet på ordinataksen for forskjellige λ -forhold (langs abscissen). Det viser effekten på ekkoamplituden fra forandring av refokuserings-pulsvinkelen for sek-

20 venser med forskjellig puls-tidsstyring. Kurvene 222A og 222 ble oppnådd ut i fra henholdsvis eksperimentelle målinger og simuleringsresultater ved bruk av den spinn-dynamiske modell for det eksempelangitte loggeverktøy ved bruk av standard CPMG-sekvenspulstidsstyring, men ved varierende refokuserings-pulslengde og således også λ . Kurvene 222C og 222D ble utledet fra henholdsvis forsøk og

25 simulering for samme verktøy, under anvendelse av det optimaliserte sekvenstidsforløp i henhold til ligning (4) og med varierende refokuserings-pulslengde og således også λ . Kurvene 222A og 222B ble utledet med varigheten t_S lik t_{CP} slik som fastlagt ved CPMG-standardsekvensen. I motsetning til dette ble kurvene 222C og 222D utledet med varigheten t_S lik t_{CP} minus halvparten av tippepulsens varighet

30 (hvilket vil si $t_S = t_{CP} - T/2$). Kurvene 222E viser det forventede resultat når refokuserings-pulsvinkelen for en pulssekvens med standard CPMG-tidsstyring ($t_S = t_{CP}$) kjøres i et homogent magnetfelt for sammenligning.

Fremdeles under henvisning til fig. 5A, fremviser kurvene 222A og 222B sammenlignet med 222E et hovedsakelig flatt forløp mellom $\lambda = 1,4$ og $\lambda = 2$, med en flat topp ved $\lambda = 1,7$, slik det vil fremgå fra de simulerte data (kurve 222B), som da er fri for tilfeldig støy og resulterende målefeil iboende i de eksperimentelle data. Dette innebærer at et godt signalnivå vil kunne oppnås ved bruk av refokuseringspulser i området mellom 126° og 180° , med maksimalt signal oppnådd fra en 153° puls ($\lambda = 1,7$). En 126° refokuseringspuls foretrekkes imidlertid i praksis fordi den kortere puls fører til en vesentlig effektbesparelse. Kurvene 222C og 222D, som utnytter det modifiserte tidsforløp som er beskrevet her, oppviser en tilnærmet flat kurve fra $\lambda = 2$ og helt ned til $\lambda = 1$. De simulerte data (kurve 222D) oppviser en klar topp i ekkoamplituden ved $\lambda = 1,4$, og som tilsvarer en refokuserende pulsspinn-tippevinkel på 126° . Kurvene 222C og 222D oppviser begge øket signalamplitude sammenlignet med standard CPMG-tidsstyring (222A og 222B) selv ved $\lambda = 2$, skjønt graden av forbedring er mindre ved de eksperimentelle data. Formen av den simulerte og den eksperimentelle kurve er meget lik i alle tilfeller. Sammenhengen mellom ekkoamplitude, refokuserende pulsvinkel og pulstidsstyring kan vises å avhenge sterkt av magnetfeltgradientene for vedkommende redskap, og er klart helt forskjellig fra det som forventes fra et system med homogene magnetfelt (kurve 222E). Det redskap som anvendes som eksempel i disse studier hadde et statisk magnetfelt optimalisert med henblikk på minst mulig radial feltgradient. Et loggeredskap med en betydelig radial feltgradient, slik som i henhold til *Strikman*, ville da oppvise kurver av en annen form, og spesielt vil den grad av signalforbedring som er vist for $1,5 < \lambda < 2$ ved bruk av sekvenser med standard CPMG-tidsstyring ($t_S = t_{CP}$) være øket sammenlignet med det utførelseseksempel som er brukt her. Avhengig av redskapsutførelsen og det resulterende magnetfelt samt redskapets høyfrekvensfeltgradienter og den nøyaktige pulssevens-tidsstyring, vil refokuserings-pulsvinkler helt ned til 100° ($\lambda \sim 1,1$) og så store som 170° ($\lambda \sim 1,9$) kunne gi optimale resultater.

En implikasjon av resultatene i fig. 5A er at en vinning i signalnivå kan oppnås ved å redusere varigheten av refokuseringspulsen slik at den fører til en tippevinkel som er mindre enn 180° . Denne virkning vil ikke opptre ved et redskap med homogent statisk magnetfelt og frekvensfelt som står vinkelrett på hverandre. Re-

duksjonen av refokuseringspulsens varighet fører videre til en tilsvarende reduksjon av høyfrekvens-arbeidssyklusen samt en vesentlig effektivbesparelse, som vil være av stor verdi ved nedhulls-logging eller i et MWD-redskap.

En ytterligere følge av resultatene i fig. 5A er at en ytterligere meget vesentlig økning i ekkoamplituden kan oppnås ved å forkorte t_S -perioden i forhold til t_{CP} . Ved klassisk CPMG gjelder følgende sammenheng:

$$t_S = t_{CP} \quad (5)$$

Det skal nå henvises til fig. 3A-C for klargjøring av den nøyaktige definisjon av t_{CP} og t_S , idet t_{CP} i alles hittil beskrevne sekvenser er halve tiden fra ekkotopp til ekkotopp og også halve tiden fra midten av én refokuseringspuls til midten av den neste puls. Ved standard CPMG er tiden fra slutten av tippepuls til midten av den første refokuseringspuls også lik den samme tidsperiode t_{CP} , mens i den nye sekvens som er beskrevet her og definert i ligning (4), den ekvivalente venteperiode t_S fra slutten av tippepuls T til midten av den første refokuseringspuls R, ikke vil være lik t_{CP} .

Den største ekkoamplitude oppnås når t_S -perioden reduseres med en andel κ av tippepulsens varighet T. Når det gjelder parameteren λ , vil den optimale verdi av κ også avhenge av formen av magnetfeltet og høyfrekvensfeltet, men meget typisk nær en halv. Kurven 230 i fig. 5B viser virkningen på den tredje ekkoamplitude ved bruk av optimalisert pulssekvens i henhold til ligning (4) og ved variasjon av κ , med λ konstant på 1,6. For det utførelseseksempel på føler som er brukt i disse studier, samt med denne λ -verdi, er den optimale κ 0,6, som da gir en meget verdifull 50% økning i signalet sammenlignet med samme sekvens med standard CPMG-tidsstyring ($\kappa = 0$).

Sammenhengen mellom t_S og t_{CP} er da i henhold til foreliggende oppfinnelse:

$$t_S = t_{CP} - \kappa T \quad (6)$$

Sekvensen i henhold til ligning (4), og med optimaliserte tidsparametere λ og κ , betegnes da her som den optimaliserte omfasings-pulssekvens.

Et annet aspekt ved den optimaliserte omfasings-pulssekvens (ORPS) er justeringen av tippepulsenes og refokuseringspulsenes faser i en rekke pulssekvenser. *Sezginger* (US-patent nr. 5,363,041) omtaler bruk av en slik teknikk hvor fasene for påfølgende tippepulser avviker med π radianer. Ved en slik fremgangsmåte vil den andre, fjerde, etc. 90° tippepulser ha en fase som er forskjøvet med π radianer i forhold til fasen for den første, tredje, femte, etc. tippepulser. Når vedkommende data derpå behandles ved subtrahering av CPMG-ekkotog i fasevekslende par (PAP) og resultatene adderes for å forbedre signal/støy-forholdet, vil denne teknikk oppheve basislinjens forskyvningsfeil og kunstige svingninger fra refokuseringspulsene. "Ringing" er et uttrykk som anvendes på uønsket signal som skriver seg fra gjenvinningen av høyfrekvensantennen fra høyfrekvenspulsen med høy effekt. Denne kan nedsettes til et minimum med hensiktsmessig redskapskonstruksjon, men kan aldri helt elimineres og er ofte vesentlig større enn NMR-ekkosignalet. For korrekt drift av redskapet er det ikke nødvendig at dette signal fjernes ved det fase-syklings-skjema som er beskrevet her. Ett fasesyklings-skjema som anvendes i henhold til foreliggende oppfinnelse er sammenfattet i tabell 1.

Tabell 1

Sekvens-ID	Tippe-puls	Alle refokuseringspulser
A	0	$\pi/2$
B	π	$\pi/2$
C	$\pi/2$	0
D	$-\pi/2$	0

For å vise effektiviteten ved denne metode når det gjelder å fjerne uønsket ringings-signal fra refokuseringspulsen samtidig som NMR-signalet bibeholdes, defineres følgende symboler: la α representere NMR-ekkosignalet, β representere ringings-signalet fra den innledende tippepuls, δ representere ringingssignalet fra

refokuseringspulsene, og σ representere den stokastiske støy. Som tidligere beskrevet, må alle data opprettes i fasekvadratur og utgjør derfor en vektorkvantitet med en tilordnet fasevinkel, som her er angitt ved verdien i parentes. Fasevinklene for NMR-ekko-signalene og ringings-signalene er alle låst til fasene for høyfrekvenspulsene innenfor deres tilhørende pulssekvenser, og således til fasen for demodulasjons-bæresignalet som anvendes i spektrometeret.

De data som er utledet under de fire sekvenser i fasesyklingsskjemaet er angitt i tabell 1 nedenfor:

$$A = \alpha(0) + \beta(0) + \delta(\pi/2) + \sigma \quad (7a)$$

$$B = \alpha(\pi) + \beta(\pi) + \delta(\pi/2) + \sigma \quad (7b)$$

$$C = \alpha(\pi/2) + \beta(\pi/2) + \delta(0) + \sigma \quad (7c)$$

$$D = \alpha(-\pi/2) + \beta(-\pi/2) + \delta(0) + \sigma \quad (7d)$$

Hvis det første par av ekko-togdata subtraheres fra hverandre og dette gjentas for det andre par, og de resulterende data derpå adderes, idet det erkjennes at den stokastiske støy σ ikke har noen fasekoherens og derfor akkumuleres som kvadratrotten av summen av kvadratene av bidragene fra hvert datavindu, så blir resultatet:

$$(A - B) + (C - D) = 4\alpha(0) + 4\beta(0) + 2\sigma \quad (8)$$

Det bør bemerkes at de andre PAP-data (C-D) må faseforskyves med $\pi/2$ før de adderes til de første PAP, (A-B). Dette kan lett oppnås matematisk etter datauttaket, men oppnås mer vanlig ved den hensiktsmessige metode som går ut på å forskyve demodulasjonssignalets fase under datauttaket. For å klargjøre fremgangsmåten i henhold til oppfinnelsen, vil det antas at alle data er blitt tatt ut i samme fase, samt at PAP-data derpå er faseforskjøvet etter behov før addisjonen. Dette fire-syklus-skjema fjerner derfor refokuseringspulsens ringing δ , men tippepulsens ringing β forblir og kan inneholde forstyrrende tidlige ekkoer i sekvenser med kort mellomrom mellom ekkoene. Det vil da være åpenbart at det andre

par i fasevekslende sekvenser, nemlig C og D, ikke er nødvendig for sletting av ringing og basislinje-feil, slik at en dobbelt syklus eller skjema med et enkelt PAP er tilstrekkelig:

$$(A - B) = 2 \alpha(0) + 2\beta(0) + \sqrt{2}\sigma \quad (9)$$

På lignende måte er det mulig å la fasene for påfølgende tippepulser være de samme fra sekvens til sekvens og invertere fasen for alle refokuseringspulser, slik som vist i tabell 2:

Tabell 2

Sekvens-ID	Tippe-puls	Alle refokuseringspulser
A	0	$\pi/2$
B	0	$-\pi/2$
C	$\pi/2$	0
D	$\pi/2$	π

Ekkotog-data blir da ganske enkelt addert for å oppheve basislinjefeil i svar med:

$$(A + B + C + D) = 4 \alpha(0) + 4\beta(0) + 2\sigma \quad (10)$$

hvilket gir samme resultat som ligning (8).

Denne fremgangsmåte er litt mindre egnet enn det skjema som er vist i tabell 1 og angitt i ligning (8), da den går ut i fra at den kunstige ringning er nøyaktig lik og motsatt rettet for de forskjellig vekslede faser av de refokuserende pulsfaser. Skjønt dette generelt er tilfelle er det bedre å la refokuseringspulsene være i samme fase innenfor en PAP og invertere tippepulsene, som da har lavere høyfrekvensenergi og vanligvis mindre ringesignal.

En utførelse av oppfinnelsen anvender en ytterligere invers tippepuls (hvilket vil si en puls med samme spinn-tippevinkel som den opprinnelige tippepuls, men som er faseforskjøvet med π radianer) ved slutten av pulssekvensen, og i samsvar med ligningen:

$$W' = T_x - t_s - R_y - \left(t_{cp} - \text{ekko} - t_{cp} - R_y \right)_i - t_{cp} - T_{-x} \quad (11)$$

Den T_{-x} -puls som er vist som 260, opptrer samtidig som dannelsen av slutt-ekkoet, slik som vist i fig. 5C. Indeksen -X angir at fasen for sluttpulsen er vendt om, eller forskjøvet med π radianer, i forhold til fasen for den innledende tippepuls T_x og virker derfor omkring -X-aksen. Virkningen av den endelige puls er å dreie de kjernespinns som befinner seg i utformingsprosessen av ekkoet bort fra det tversgående (XY)-plan og tilbake til hovedsakelig samme retning som magnetfeltet langs Z-aksen, slik som angitt i fig. 5D. Spinnene ville naturligvis vende tilbake til innretting med det statiske felt med tidskonstanten T_1 , men den ytterligere T_{-x} -puls frembringer en raskere "tvungen tilbakevending". Av denne grunn kan T_{-x} -pulsen ved slutten av sekvensen betegnes som en tvungen tilbakevending eller en drevet likevektspuls.

I én utførelse av oppfinnelsen anvendes pulsen for tvungen tilbakevending for å redusere tilbakevendingsperioden W' , slik at uttaket av NMR-data derved blir raskere og flere ekko-tog samles opp i løpet av én og samme tidsperiode. I fig. 5D bør den innledende venteperiode W ved begynnelsen av målingen være større enn fem T_1 -perioder for å sikre at den langsgående magnetisering M_z blir fullstendig gjenvunnet. Etter en enkelt sekvens med en avsluttende puls for tvunget tilbakevending, blir venteperioden for å oppnå 100% tilbakevending redusert til W' som er mindre enn W . Påfølgende sekvenser vil da også kunne utnytte den kortere venteperiode. Ved slutten av denne reduserte ventetid blir da en annen tippepuls 261 påført og fulgt av et sett refokuseringspulser, hvorav bare én, nemlig 262, er vist. De ytterligere ekkotog som derved oppsamles, kan gjøres til gjenstand for middelverdibestemmelse for å forbedre signal/støy-forholdet. Denne fremgangsmåte gir en særlig fordeldaktig signalforbedring når den anvendes på en sekvens

hvor venteperioden med hensikt er gjort kortere enn fem ganger den lengste T1, slik at bare delvis gjenvinning av de lange T1-komponenter finner sted (f.eks. ved en sekvens som er beregnet på å bare måle det ikke reduserbare bulkvolum-signal fra en formasjon).

5 I en annen utførelse av oppfinnelsen forandres ikke tilbakevendingsperioden og den naturlige tilbakevending av spinnsystemet fremmes ytterligere ved det tidspunkt den neste pulssekvens påføres. Dette fører også til et forbedret signal hvis W-perioden er mindre enn fem T1-perioder. Ved begge metoder blir ikke alle spinnene "oppfanget" av pulsen for tvunget tilbakevending slik at tilbakevendingen
10 ikke blir fullstendig og en viss gjenvinnings-venting er alltid nødvendig før pulsingen igangsettes på nytt.

Drevet likevekt er blitt benyttet i NMR-avbildning for å forbedre eksperiment-gjentakelsestidene og derved øke signal/støy-forholdet, i henhold til *Becker et al.* Pulsen for tvungen tilbakevending er imidlertid ikke blitt brukt for å
15 slette den kunstige ringing, slik som beskrevet nedenfor.

Det vil være åpenbart ut i fra betraktning av ligningene (8) og (10) at disse vanlig anvendte fasesyklings-skjemaer, slik som de som er angitt i tabeller 1 og 2 ovenfor, ikke vil fjerne ringings-signalet fra den innledende tippepuls, da dette ringings-signal alltid vil være i fase med tippepulsen. Hvis ringingen vedvarer len-
20 gre tid enn $2 t_{cp}$ så kan den ødelegge det første og eventuelt senere ekkoer. Det er ønskelig å redusere t_{cp} i størst mulig grad, vanligvis til 0,3 ms, for å oppnå god datakvalitet og dette kan føre til at det første eller de to første ekkoer ødelegges av ringings-signalet fra tippepulsen, hvilket gjør at disse må vrakes. Den NMR-signalkomponent som skriver seg fra leirebasert fluid i formasjons-berggrunner
25 har en T2 som vanligvis bare er noen få millisekunder, slik at disse ekkoer er nyttige hvis redskapet pålitelig skal registrere det leirebaserte fluids signal. Det vil nå bli beskrevet en modifikasjon av pulssekvensen som gjør det mulig å fjerne tippepulsens uønskede ringesignal, og således gjøre det mulig å bibeholde de første få ekkoer og bruke disse for å beregne bidraget fra leirebasert fluid. Denne pulssek-
30 vens kan gjentas med middelverdiberegning av ekkoene for å forbedre signal/støy-forholdet.

Etter den siste T_x -puls i sekvensen påføres ingen flere høyfrekvenspulser, slik at spinnsystemet vil tape koherens innenfor tidskonstanten T_2^* . Hvis imidlertid redskapets spektrometer fortsetter å samle opp data med $2 t_{cp}$ -tidsmellomrom med begynnelse et passende tidsintervall etter sluttpulsen, slik som vist i fig. 5E, 5 hvilket innebærer en sekvens med bare to klartstilte ekkoer, så vil de uttatte data 266 inneholde ringings-signalet fra den kombinerte virkning av pulsen for tvungen tilbakevending og den endelige refokuseringspuls pluss stokastisk støy, men intet NMR-signal, da spinnsystemet har mistet koherens. Data fra vinduene 263 i fig. 5E kan senere kombineres med ekkotog-data fra vinduene 264 for å fjerne T_x - 10 tippepulsens ringingssignal 265 fra de første få ekkoer. Dette kan da etterfølges av ytterligere par av sekvenser, samt sykling gjennom de tilgjengelige faser for å fjerne alle basislinje-forstyrrelser, etter behov.

Et typisk fasesyklingsskjema for å utføre denne fremgangsmåte er i vist i tabell 3:

Tabell 3

Sekvens-ID	Innledende tippepuls	Alle refokuseringspulser	Tvungen tilbakevendingspuls
A	0	$\pi/2$	π
B	π	$\pi/2$	0
C	$\pi/2$	0	$-\pi/2$
D	$-\pi/2$	0	$\pi/2$

Ved bruk av de betegnelser som tidligere er fastlagt, og ved å definere en ytterligere parameter β' for å representere ringings-signalet fra den avsluttende 20 puls for tvungen tilbakevending, blir ekkodata som tilsvarer gjentatte vinduer 264 i fig. 5E oppnådd fra pulssekvensene A til D i tabell 3 og tilsvarer da ligningene (7a) til (7d). På lignende måte tilsvarer de data som utledes etter sluttpulsen for tvingen tilbakevending, de gjentatte vinduer 263 i fig. 5E og kan betegnes ved A' til D', samt er da lik:

$$A' = \delta(\pi/2) + \beta'(\pi) + \sigma \quad (12a)$$

$$B' = \delta(\pi/2) + \beta'(0) + \sigma \quad (12b)$$

$$C' = \delta(0) + \beta'(\pi/2) + \sigma \quad (12c)$$

$$D' = \delta(0) + \beta'(\pi/2) + \sigma \quad (12d)$$

Det er viktig å være klar over at i et velkonstruert redskap er ringingen fra en høyfrekvenspuls meget gjentakbar, slik at tippepuls-ringingen b' hovedsakelig er lik i form og amplitude med ringingen b' fra pulsen for tvungen tilbakevending, da den skriver seg fra en høyfrekvenspuls med samme intensitet og varighet, men alltid er omvendt i fase på grunn av faseanvendingen av pulsen for tvungen tilbakevending i forhold til fasen av tippepulsene i enhver sekvens. Av dette følger da:

$$\beta(0) = -\beta'(\pi) \quad (13)$$

og

$$\beta(-\pi/2) = -\beta'(\pi/2) \quad (14)$$

NMR-signalet kan gjenvinnes uten noen vesentlig ringings-forstyrrelse enten fra tippepulsene eller refokuseringspulsene, nemlig ved å kombinere data fra den enkeltstående PAP som dannes av sekvensene A og B på en ekko for ekko-basis i samsvar med:

$$(A + A') - (B + B') \quad (15)$$

Ved bruk av ligningene (13) og (14) kan det beregnes at ligning (15) reduseres til:

$$(A + A') - (B + B') = 2\alpha(0) + 2\sigma \quad (16)$$

Bare de ekkoer som er nedbrutt ved ringing fra den innledende tippepuls behøver behandling på denne måte, og de gjenværende behandles da på den vanlige måte, nemlig i samsvar med ligning (9), og da det ikke forekommer noe β -ringesignal fra tippepulsene i disse senere ekkoer, kan ligning (9) reduseres til:

$$A - B = 2\alpha(0) + \sqrt{2}\sigma \quad (17)$$

Den eneste ulempe ved denne fremgangsmåte er at signal/støyforholdet reduseres med en faktor på $1/(\sqrt{2})$ for de ekkoe som behandles for å fjerne tippepulsens ringing, nemlig på grunn av at stokastisk støy tillegges uten signal, slik det vil fremgå av forholdet mellom resultatene fra henholdsvis ligning (17) og ligning (16).

Det resulterende lille tap i signal/støy-forholdet i ekkoe fra en sekvens behandlet for å fjerne tippepulsens ringing, kan tas med i beregningen under påfølgende signalbehandling for å utlede formasjonens NMR-egenskaper.

Den dobbelte syklus i henhold til fasesyklingsskjemaet fra ligningene (16) og (17), som bare utnytter de to første linjer i tabell 3, kan utvides til et skjema med fire sykler, eller to PAP, hvor de fleste ekkoe i en sekvens behandles i samsvar med ligning (8), som da reduseres til:

$$(A - B) + (C - D) = 4\alpha(0) + 2\sigma \quad (18)$$

mens de som er gjenstand for nedbrytning fra tippepulsens ringingssignal behandles i samsvar med:

$$\{(A + A') - (B + B')\} + \{C + C'\} - \{D + D'\} = 4\alpha(0) + 2\sqrt{2}\sigma \quad (19)$$

I begge tilfeller må fasen av den andre PAP forskyves med $\pi/2$ før addering, slik som tidligere angitt.

Det vil være klart ut i fra en sammenligning mellom ligningene (8) og (19) at den forbedrede fremgangsmåte for signalbehandling som er beskrevet her, hvor data tas opp innenfor vinduer etter en sluttimpuls for tvungen tilbakevending samt anvendes ved behandling av de vanlige ekkodata, fullstendig fjerner det uønskede ringingssignal β fra tippepulsen.

Fig. 6A viser forsøksdata for en åtte-ekkos NMR-måling fra et redskapsutførelseseksempel med et stort ringings-signal. Dette datasett ble behandlet i samsvar med den angitte metode i ligning (18), og skjønt ringingssignalet fra re-

kuseringspulsene er blitt fjernet med hell, foreligger det fremdeles kraftig forvrengning av ekkoene på grunn av den gjenværende ringing fra tippepulsene. Denne sekvens ble påført med en sluttpuls for tvungen tilbakevending, samt ringings-signaldata utledet i venteperioden med de mellomrom som er beskrevet. Fig. 6B
5 viser virkningen av viderebehandling av vedkommende data i samsvar med den angitte fremgangsmåte i ligning (19). Forvrengningen på grunn av ringesignalet fra tippepulsene er da redusert i betraktelig grad.

På samme måte som fasesyklingsskjemaet i tabell 1, anvendt i sammenheng med den angitte databehandlingsmetode i ligning (8), frembringer samme
10 resultat som fasesyklingsskjemaet i tabell 2 anvendt i sammenheng med databehandlingsmetoden i henhold til ligning (10), vil det være klart at det foreligger alternative metoder til fasesyklingsskjemaet i tabell 3 brukt i sammenheng med databehandlingsmetoden i henhold til ligning (19), som vil frembringe lignende resultater. Det er tilsiktet at de eksempler som er gitt faktisk anskueliggjør alle disse alter-
15 native fremgangsmåter som gjelder behandling av data som er tatt opp etter en sluttpuls for tvungen tilbakevending.

En annen utførelse i henhold til oppfinnelsen bruker pulsen for tvungen tilbakevending sammen med en vanlig CPMG-sekvens, hvilket vil si, én hvor refokuseringspulsene er på 90° (hvilket vil si $\lambda = 2$) og $t_s = t_{cp}$ (hvilket vil si $\kappa = 1$).

20 Skjønt den forutgående beskrivelse er rettet på de foretrukne utførelser av oppfinnelsen, vil forskjellige modifikasjoner være åpenbare for fagkyndige på området. Det er imidlertid ment at alle variasjoner som ligger innenfor omfanget og begrepsrammen for de etterfølgende patentkrav skal omfattes av beskrivelsen ovenfor.

PATENTKRAV

1. Fremgangsmåte for å bestemme en parameter av interesse innenfor et volum av en jordformasjon ved hjelp av et borehullsredskap som føres inn i et borehull inne i formasjonen, idet fremgangsmåten omfatter:

(a) en magnetsammenstilling anvendes på borehullsredskapet for å frembringe et statisk magnetfelt med hovedsakelig uniform feltstyrke innenfor nevnte volum av formasjonen slik at kjernespinnet i nevnte volum innrettes parallelt med en retning av det statiske felt,

(b) et høyfrekvent (HF) magnetisk felt opprettes i nevnte volum av formasjonen, og slik at nevnte magnetiske høyfrekvensfelt har en retning hovedsakelig vinkelrett på retningen av det statiske felt idet høyfrekvensfeltet er karakterisert ved at det omfatter en pulssekvens:

$$W - T - t_s - R - (t_{cp} - \text{ekko} - t_{cp} - R)_j$$

hvor W er en venteperiode, T er en tippepuls for tipping av kjernespinnene over en vinkel som hovedsakelig er lik nitti grader for derved å frembringe presesjon av spinnene, t_s er en ventetid, t_{cp} er Carr-Purcell-tiden, R er en refokuseringspuls på mindre enn 180° , og $j=1,2,\dots,J$, og J er antallet ekkoer som oppsamles innenfor en enkelt pulssekvens,

(c) med en mottaksspole på borehullsredskapet måles signaler som induseres av det pulserende høyfrekvensfelt i formasjonen, og

(d) nevnte målte signaler behandles for å fastlegge parameteren av interesse.

2. Fremgangsmåte som angitt i krav 1,

karakterisert ved at bærerfasen for hovedsakelig alle nevnte refokuseringspulser i nevnte pulssekvens forskyves med $\pi/2$ i forhold til tippepulsens fase.

3. Fremgangsmåte som angitt i krav 2,
karakterisert ved at forholdet mellom tippevinkelen for en refokuseringspuls og tippepulsens tippevinkel er en faktor som har en verdi mindre enn 2,0.

5 4. Fremgangsmåte som angitt i krav 3,
karakterisert ved at nevnte faktor ligger mellom 1,1 og 1,9.

5. Fremgangsmåte som angitt i krav 3,
karakterisert ved at nevnte faktor er fastlagt ved (i) forsøksmålinger
10 ved bruk av redskapet og/eller (ii) en numerisk simulering av en redskapsrespons.

6. Fremgangsmåte som angitt i krav 2,
karakterisert ved at nevnte ventetid t_s settes i sammenheng med Carr-Purcell-tiden t_{cp} og en varighet T av tippepulsene ved en sammenheng av formen
15 $t_s = t_{cp} - \kappa T$.

7. Fremgangsmåte som angitt i krav 6,
karakterisert ved at κ bestemmes ved (i) forsøksmålinger med redskapet, og/eller (ii) en numerisk simulering av en redskapsrespons.

20

8. Fremgangsmåte som angitt i krav 7,
karakterisert ved at κ har en verdi mellom 0,2 og 1,0.

9. Fremgangsmåte som angitt i krav 2,
25 karakterisert ved at fremgangsmåten videre omfatter gjentakelse av trinnene (b) og (c) i krav 1 i det minste én gang, hvor tippepulsene T i den første pulsssekvens faseforskyves med 0 radianer, og tippepulsene i den annen sekvens faseforskyves med π radianer i forhold til fasen av et kontinuerlig Larmor-frekvenssignal, og hvor de målte resultater i gjentatte trinn (c) subtraheres fra resultater målt i trinn (c) for å frembringe en første korrigert måling.
30

10. Fremgangsmåte som angitt i krav 9,
karakterisert ved at fremgangsmåten videre omfatter gjentakelse av
trinnene (b) og (c) i krav 1, og hvor i en tredje pulssekvens nevnte tippepuls fase-
forskyves med $\pi/2$, og i en fjerde pulssekvens nevnte tippepuls faseforskyves med
5 $-\pi/2$ i forhold til nevnte Larmor-frekvenssignal i kontinuerlig bølge, og hvor måle-
resultater i trinn (c) i den fjerde pulssekvens subtraheres fra måleresultater i
trinn (c) i tredje pulssekvens og resultatet adderes til den første korrigerte måling
for å frembringe en andre korrigert måling.

10 11. Fremgangsmåte som angitt i krav 2,
karakterisert ved at nevnte pulssekvens ved sin sluttende omfatter en
tilleggpuls T' for tvungen tilbakevending ved et tidspunkt tilsvarende en tid for et
ekko, idet nevnte tilleggpuls gis en faseforskyvning på π radianer i forhold til
tippepulsens fase, slik at nevnte tilleggpuls får en tendens til å rette inn nevnte
15 kjernespinnet på nytt parallelt med retningen av det statiske felt.

12. Fremgangsmåte som angitt i krav 11,
karakterisert ved at fremgangsmåten videre omfatter gjentakelse av
trinnene (b) og (c) i krav 1 i det minste én gang, og hvor ventetiden for den andre
20 og eventuelt påfølgende pulssekvenser er mindre enn ventetiden for den første
pulssekvens.

13. Fremgangsmåte som angitt i krav 11,
karakterisert ved at nevnte målte signaler i mottakeren omfatter en
25 kunstig ringing, idet fremgangsmåten videre omfatter at det måles et tilleggssignal
som induseres i nevnte mottakerspole av nevnte puls for tvungen tilbakevending,
og nevnte tilleggssignal anvendes for å redusere nevnte kunstige ringing.

14. Fremgangsmåte som angitt i krav 13,
30 karakterisert ved at målingen av nevnte tilleggssignal videre omfatter
at målingen utføres innenfor tidsvinduer, hvor det første vindu sentreres på $t_s + t_{cp}$
etter pulsen for tvungen tilbakevending og påfølgende vinduer tidsinnstilles med
innbyrdes mellomrom på $2 t_{cp}$.

15. Fremgangsmåte som angitt i krav 14,

karakterisert ved at fremgangsmåten videre omfatter gjentakelse av trinnene (b) og (c) i krav 1, og hvor nevnte tippepuls i en første pulssekvens faseforskyves med 0 radianer, og nevnte tippepuls i en andre pulssekvens faseforskyves med π radianer, i forhold til et Larmor-frekvenssignal i kontinuerlig bølge, og hvor de måleresultater som måles i trinn (c) og gjentas i trinn (c) subtraheres fra hverandre for å frembringe et første korrigert måleresultat.

16. Fremgangsmåte som angitt i krav 15,

karakterisert ved at fremgangsmåten videre omfatter gjentakelse av trinnene (b) og (c) og hvori en tredje pulssekvens nevnte tippepuls faseforskyves med $\pi/2$, og i en fjerde pulssekvens nevnte tippepuls faseforskyves med $-\pi/2$, i forhold til nevnte Larmor-frekvenssignal i kontinuerlig bølge, og hvor de måleresultater som måles i trinn (c) og gjentas i trinn (c) subtraheres fra hverandre og resultatet adderes til det første korrigerende måleresultat for å frembringe et andre korrigert måleresultat.

17. Fremgangsmåte som angitt i krav 1,

karakterisert ved at bærerfasen for hovedsakelig alle nevnte refokuseringspulser faseforskyves mellom $\pi/4$ og $3\pi/4$ radianer i forhold til tippepulsen.

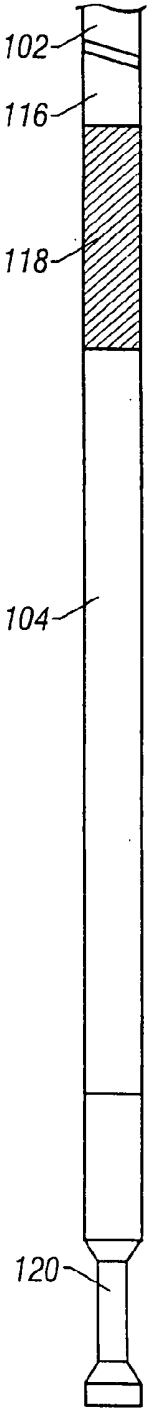


FIG. 1A

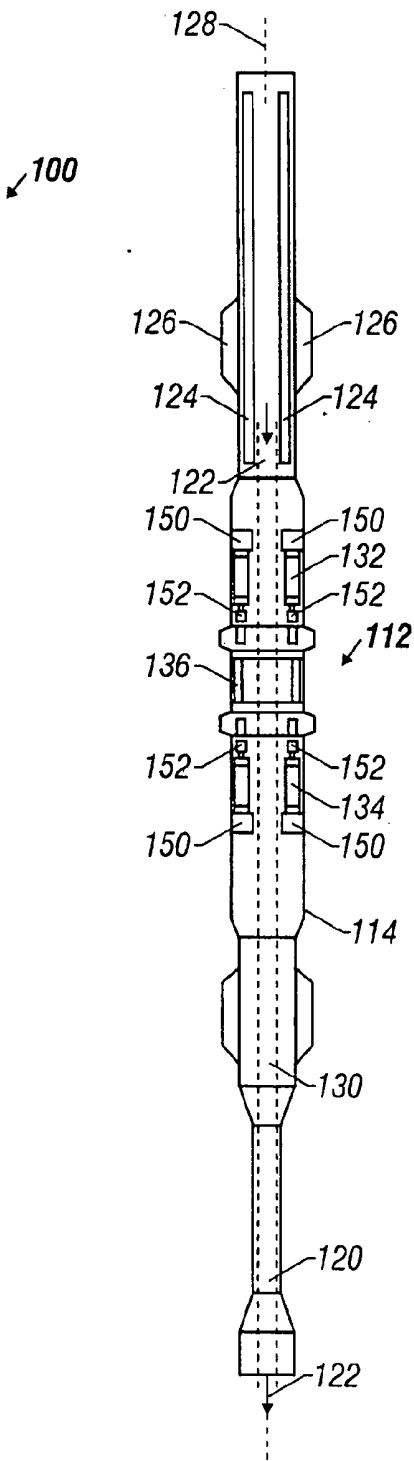


FIG. 1B

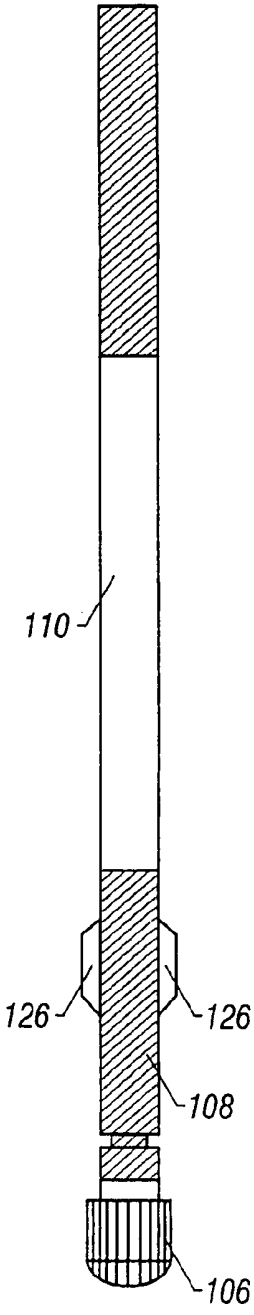
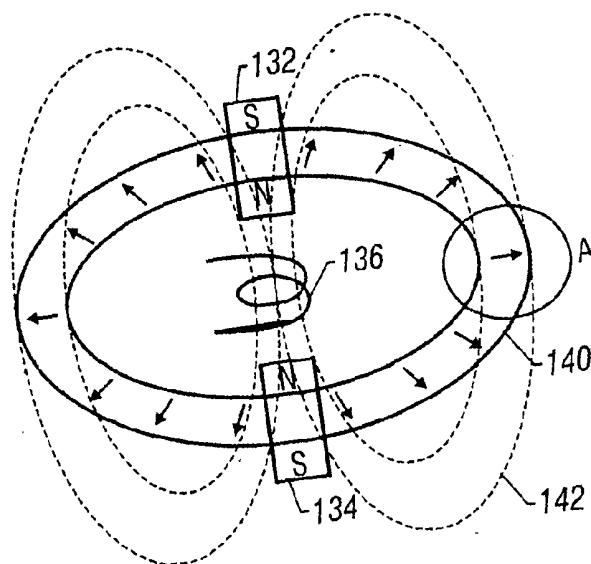
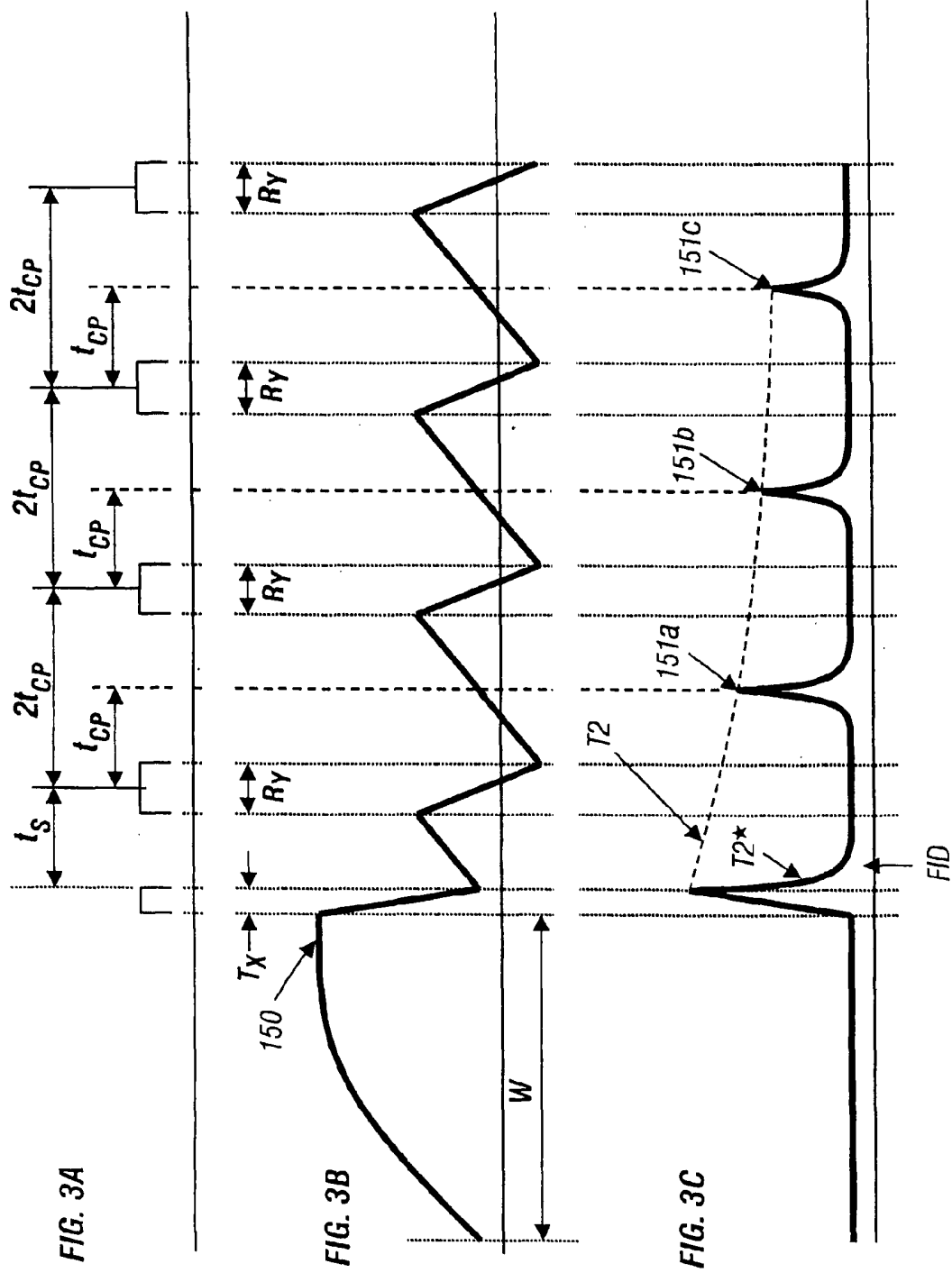


FIG. 1C

2/13



3/13



4/13

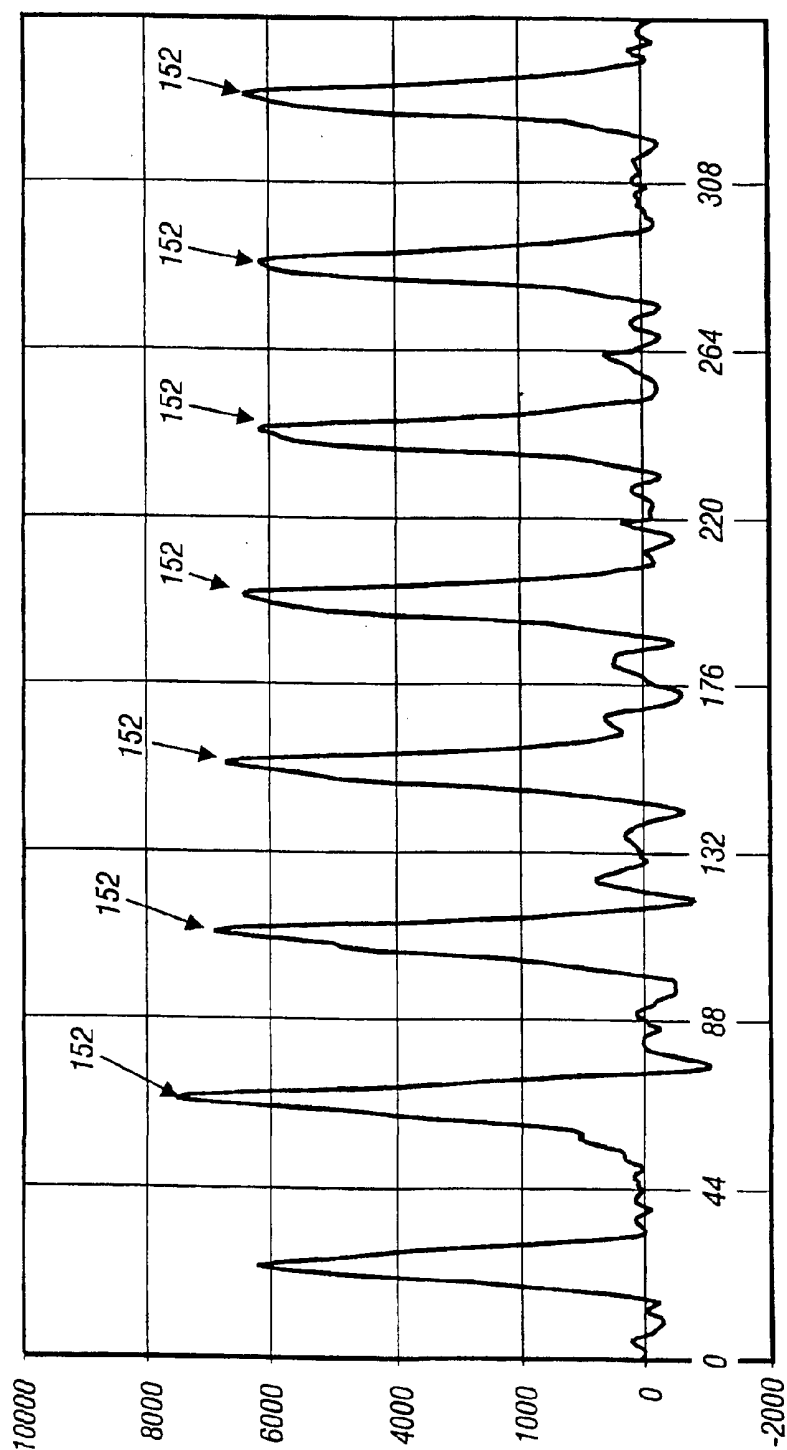


FIG. 4A
(Kjent teknikk)

5/13

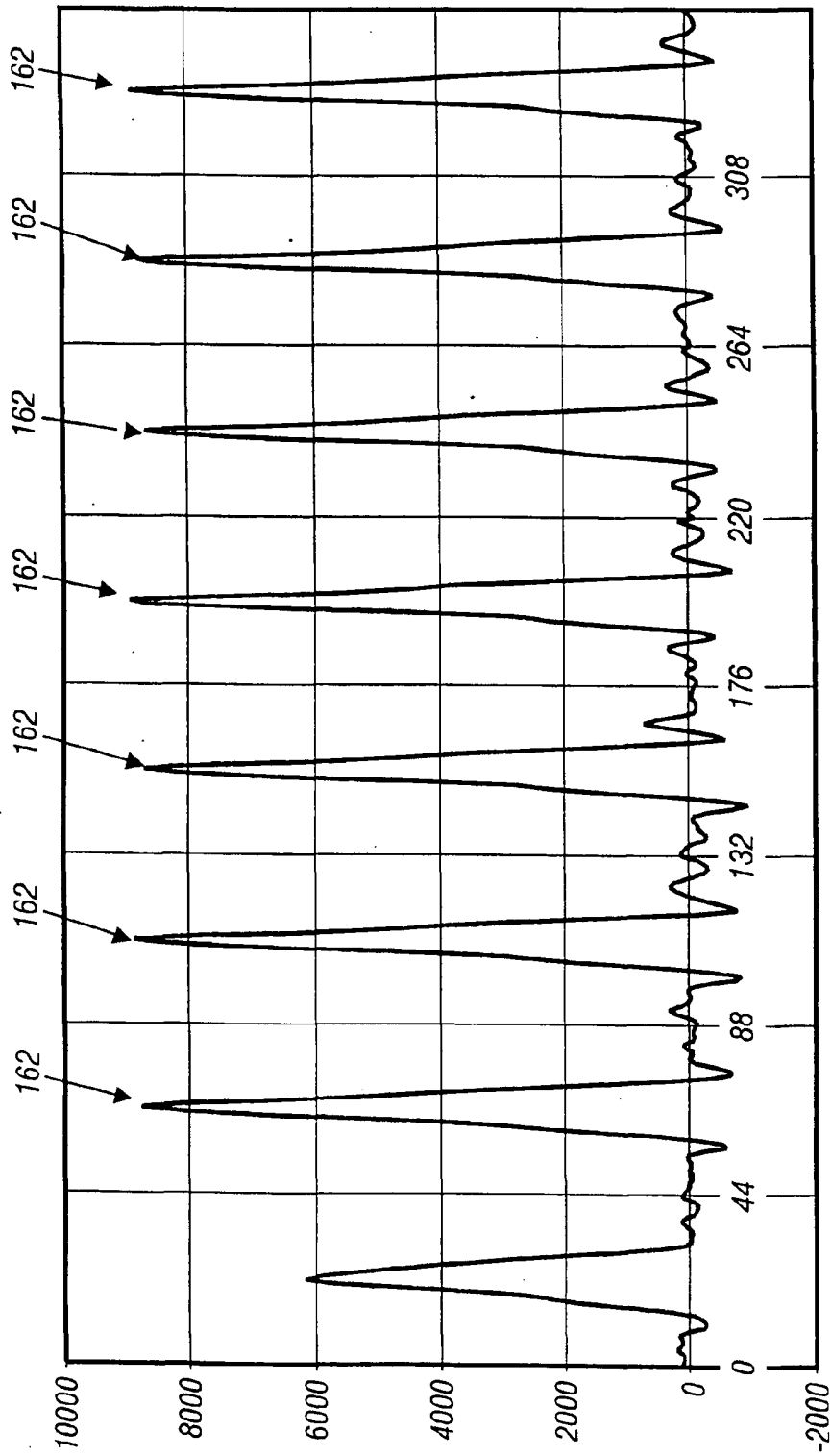


FIG. 4B

6/13

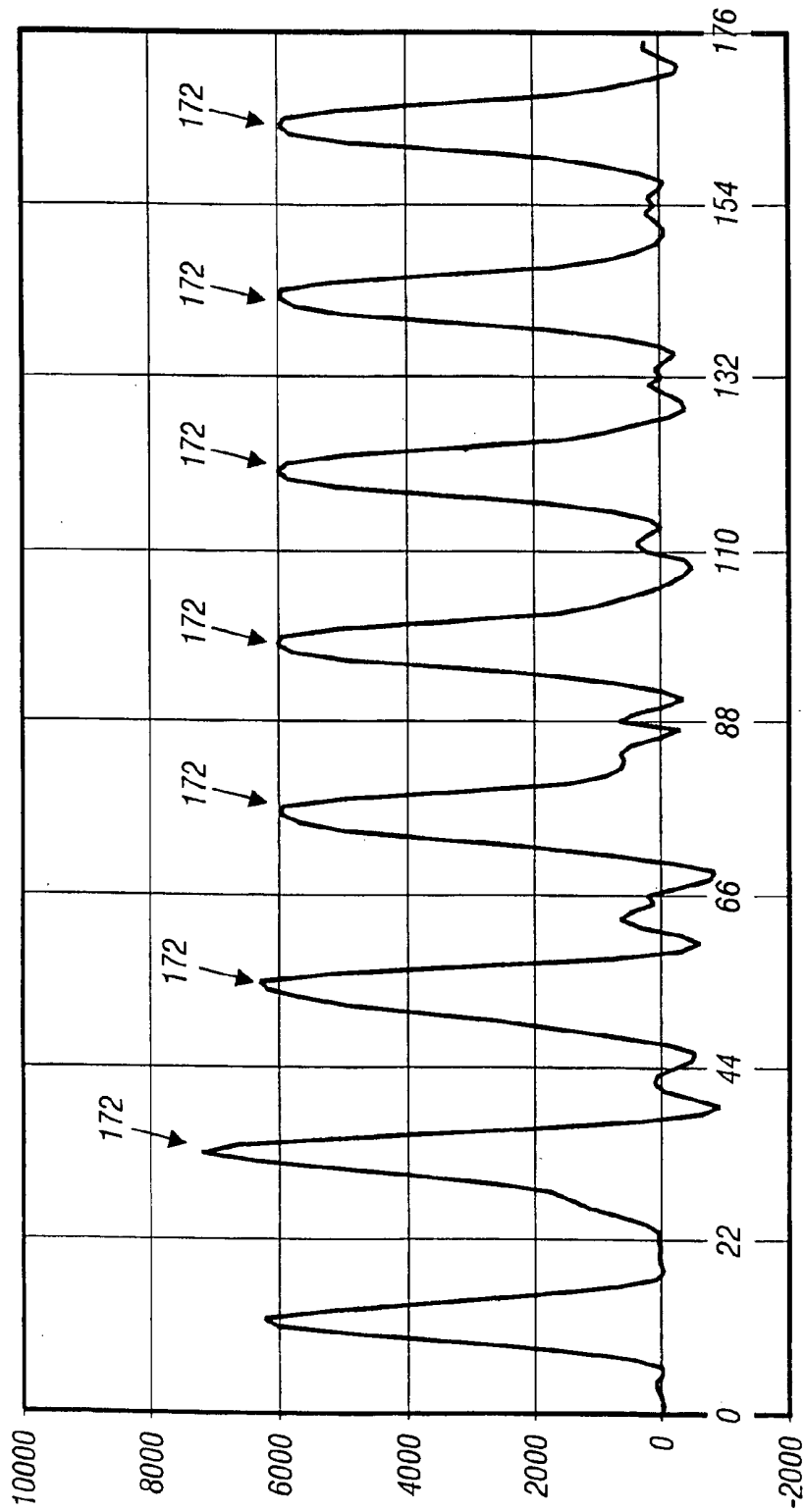


FIG. 4C

7/13

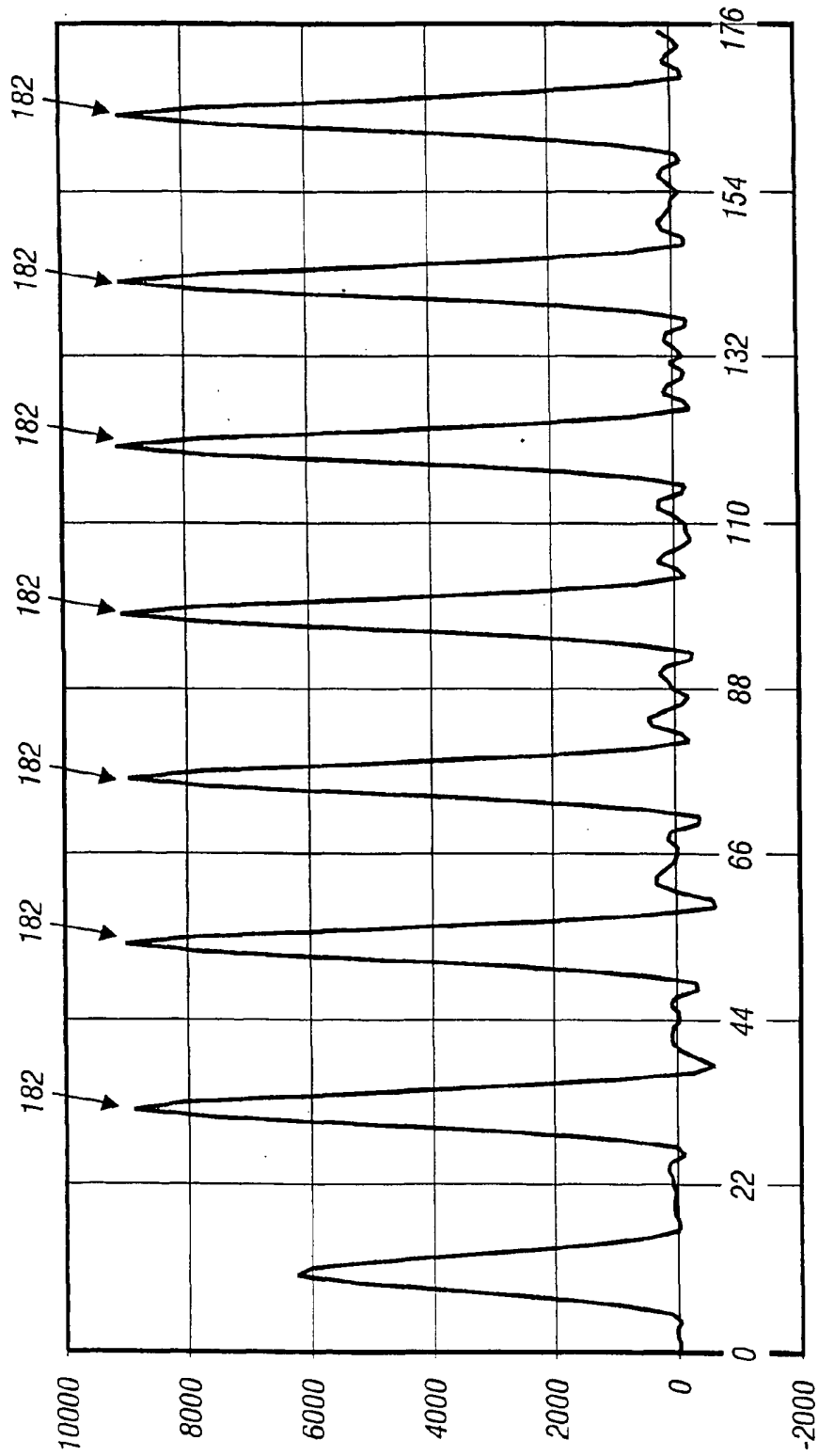


FIG. 4D

8/13

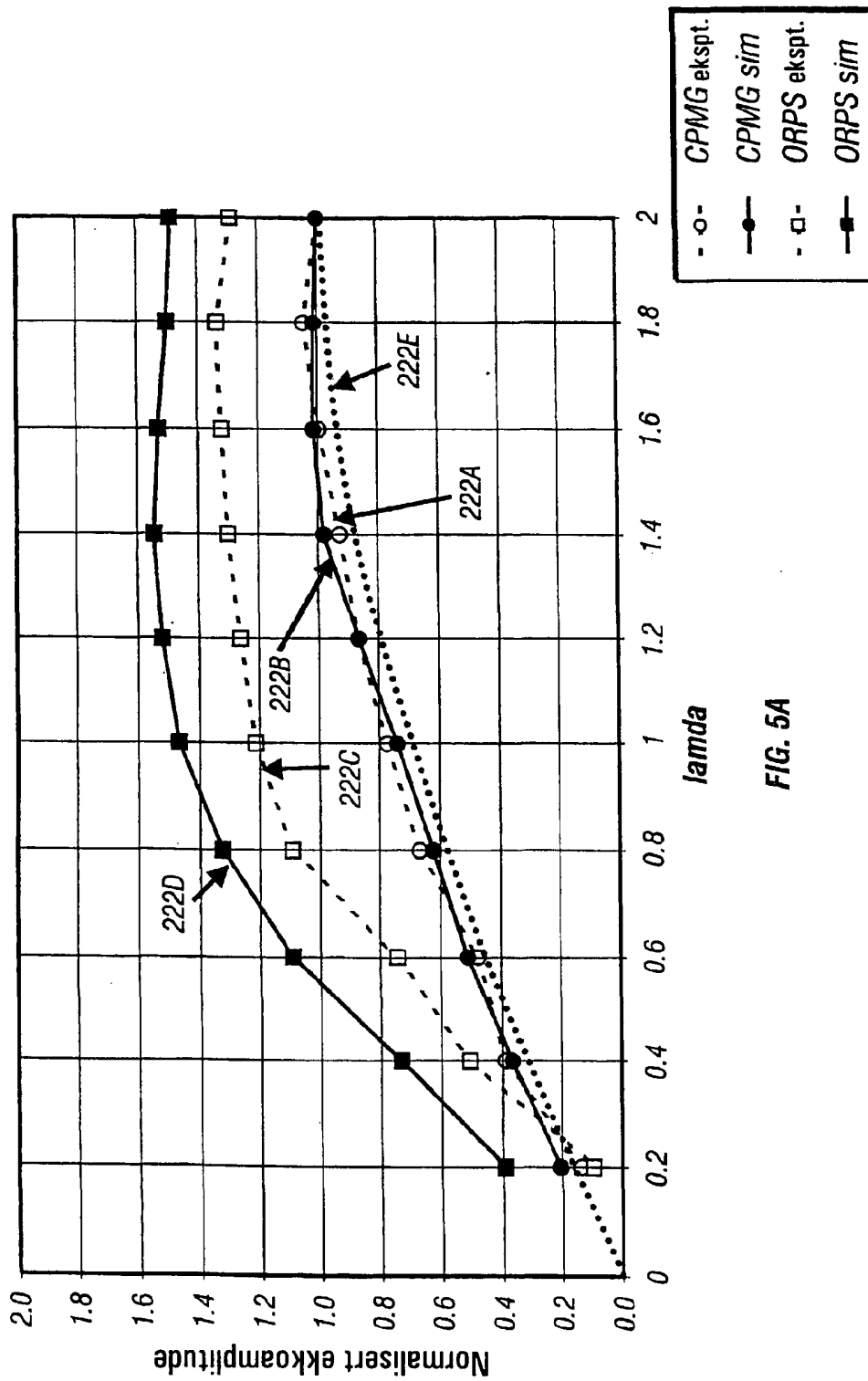


FIG. 5A

9/13

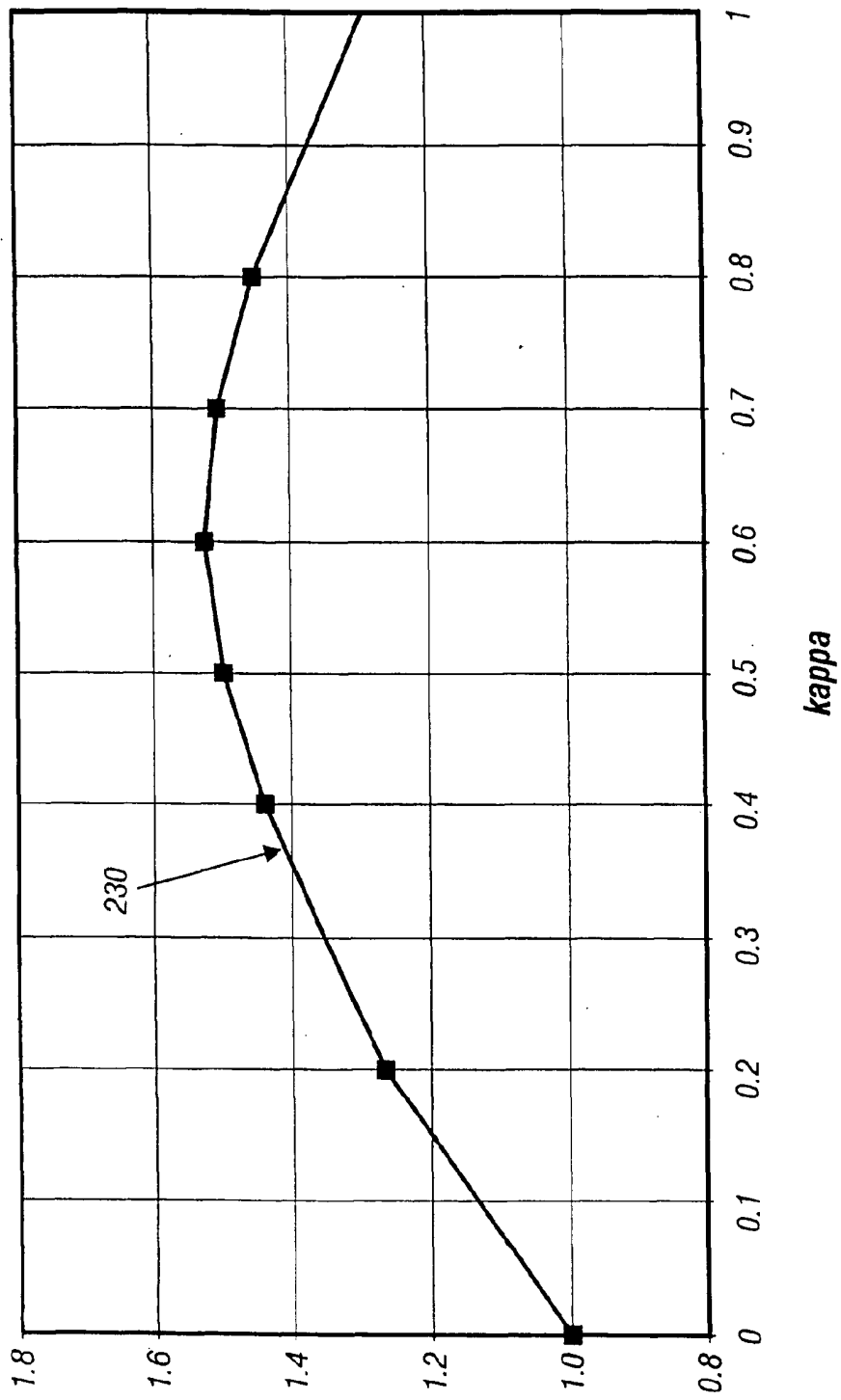


FIG. 5B

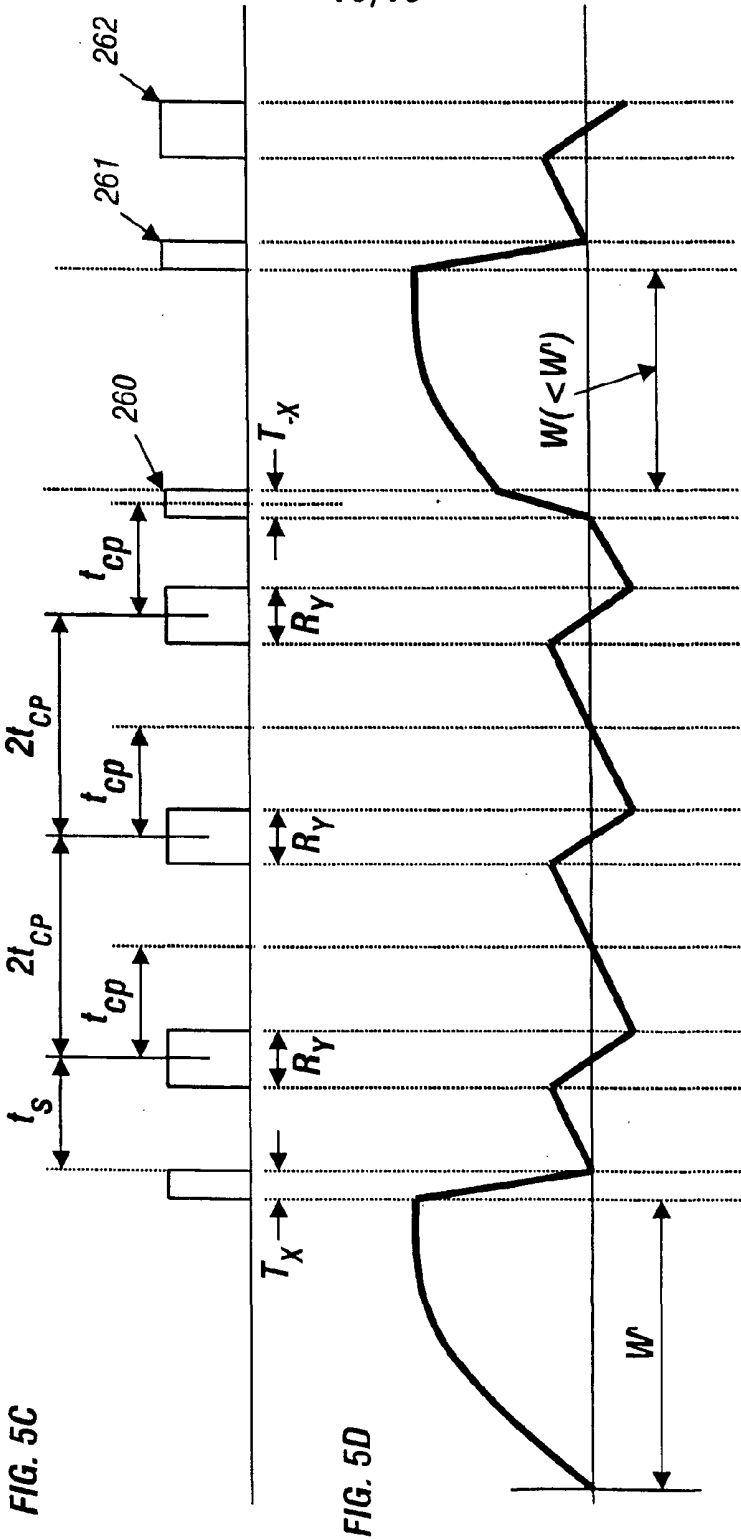
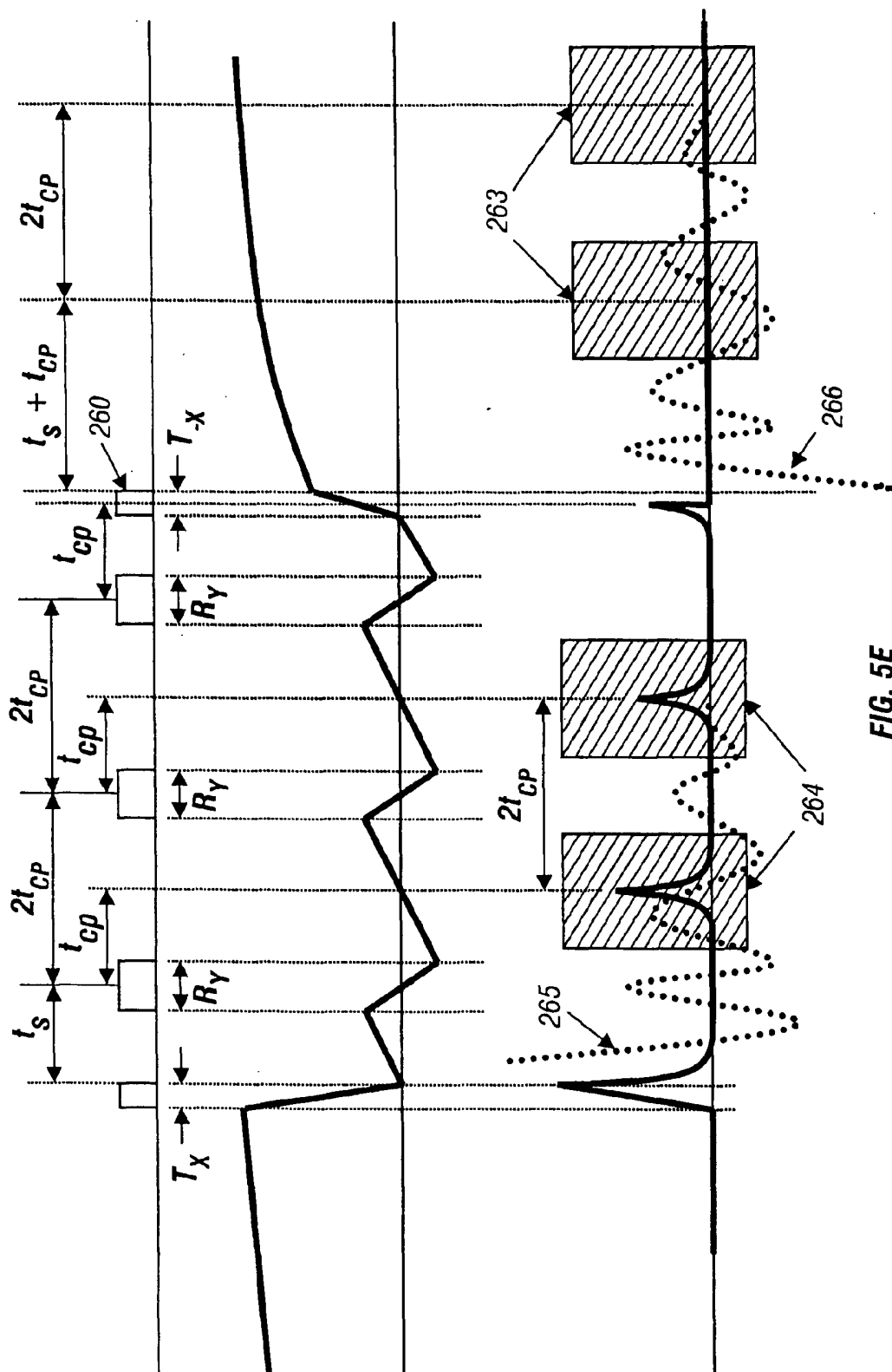


FIG. 5C

FIG. 5D

11/13



12/13

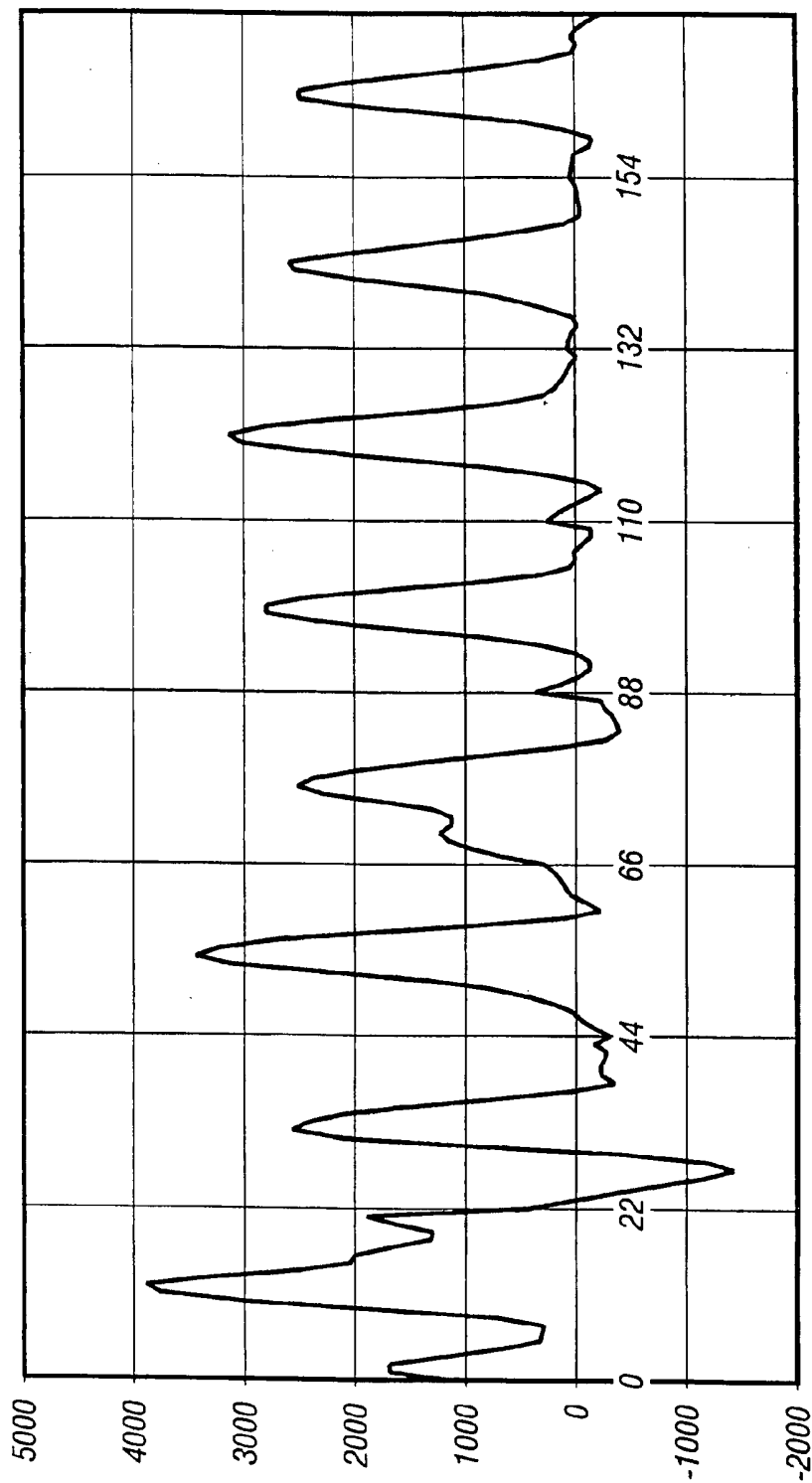


FIG. 6A

13/13

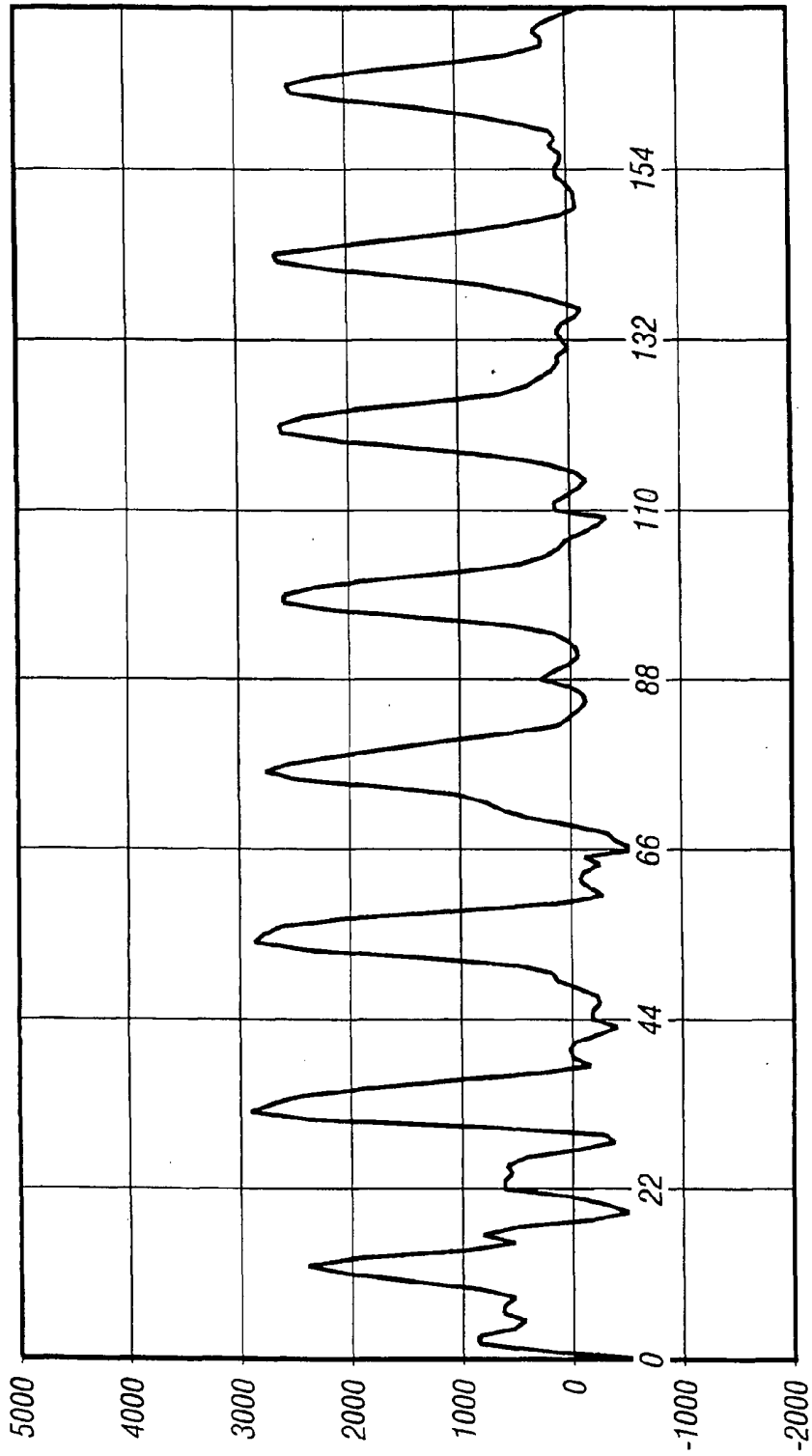


FIG. 6B