Die belangrikheid van die grootte en tydsduur van die polariserende magneetveld in die sensor van die protonmagnetometer

ABSTRACT

The importance of the magnitude and duration of the polarizing magnetic field in the sensor of the proton magnetometer

The most important factors affecting this free precession of protons in the earth's magnetic field are examined. It is shown that when designing a proton magnetometer sensor, the polarization time and the magnitude of the polarization field must be kept in mind.

1. INLEIDING

Die protonpresessie-magnetometer, of kortliks protonmagnetometer, behoort tot 'n groep instrumente bekend as resonansie-magnetometers. Martin Packard het tesame met Russell Varian die eerste praktiese magnetometer vir die noukeurige meting van die aarde se magneetveld, gebaseer op die vrye presessie van protone, in 1954 bekend gestel.[1] Hulle het in 1953 opgemerk dat nadat 'n relatief sterk magneetveld (10^{-2} Tesla in hulle geval) verwyder word van 'n monster water, 'n oudiofrekwensiesein geïnduseer word in 'n spoel om die watermonster.

Die werklike betekenis van hierdie nuwe verskynsel was dat die grootte van 'n magnetiese veld noukeurig en lineêr aan 'n meetbare frekwensie gekoppel is deur die invoering van 'n nuwe fisiese konstante, naamlik die giromagnetiese verhouding van die proton γ_p. Die volgende verwantskap geld:

$$\omega = \gamma_p H \tag{1}$$

Waar ω die hoeksnelheid van die presessie van die

magnetiese momentum $\bar{M}$ rondom die magnetiese veldvektor $\bar{H}$ is.
H is die grootte van die magnetiese veld.
$\gamma_p = 2{,}67513 \times 10^8 s^{-1}T^{-1}$.
Vir 'n aardveld van byvoorbeeld $3 \times 10^{-5}T$ is die presessiefrekwensie 1277Hz.

2. DIE BEGINSEL VAN DIE VRYE PRESESSIE VAN PROTONE

As gevolg van die magnetiese moment van die waterstofkern kan vloeistowwe magneties gepolariseer word deur 'n magnetiese veld in die vloeistof te skep. 'n Sterk polarisasieveld $\bar{H}_p$ (ongeveer $10^{-2}T$) word aangelê loodreg op die omgewingsveld $\bar{H}$, wat in hierdie geval die te mete magnetiese veld van die aarde is (ongeveer $3 \times 10^{-5}T$). Die grootte van $\bar{H}_p$ is heelwat groter as die grootte van $\bar{H}$ en die vloeistofmonster word gepolariseer met magnetiese moment $\bar{M}$ in die rigting van $\bar{H}_p + \bar{H} \approx \bar{H}_p$ en in grootte eweredig daaraan onder ewewigtoestande

$$\bar{M} = \chi \bar{H}_p, \qquad (2)$$

χ is die magnetiese gevoeligheid.

Die vestiging van polarisasie neem 'n tyd eweredig aan T_1, die spin-roosterontspanningstyd. Nadat polarisasie ingetree het, word die polarisasieveld vinnig verwyder en die magnetiese moment word gedwing om te presesseer rondom die omgewingsveld, omdat dit 'n draaimoment $\bar{M} \times \bar{H}$ ondervind. Die beweging word beheer deur die vergelyking

$$d\bar{M}/dt = (\bar{M} \times \bar{H})\gamma_p \qquad (3)$$

Die presessiebeweging rondom die omgewingsveld kom voor teen 'n frekwensie $f_s = \gamma_p H/2\pi$ en dit is hierdie frekwensie wat gemeet moet word om die grootte van $\bar{H}$ te bepaal.

In die praktyk lei die termiese bewegings en wisselwerking tussen kernmomente tot 'n afname in die netto magnetiese moment as gevolg van inkoherente presessie teen 'n tempo wat deur die spin-spinontspanningstyd T_2 bepaal word. Dus

$$\bar{M} \propto \text{eksp}(-t/T_2) \qquad (4)$$

waar T_2 tipies tussen 1 en 10 sekondes kan wees. 'n Meetbare presessiesein is dus slegs vir 'n beperkte tyd beskikbaar, afhangende van die spesifieke eienskappe van die vloeistofmonster.

3. FAKTORE WAT DIE VRYE PRESESSIE VAN PROTONE BEÏNVLOED

Verskeie faktore beïnvloed die eienskappe van die basiese meganisme van presessie.

3.1 Ontspanningstydkonstantes

Sover dit die protonmagnetometer aangaan, kan die volgende gesê word: Die polarisasietyd word bepaal deur die spin-roosterontspanningstyd T_1 en die tempo waarteen die presessie wegsterf, deur die spin-spinontspanningstyd T_2 mits die veld homogeen is. In gewone vloeistowwe is T_1 en T_2 dikwels gelyk, alhoewel dit inherent afhanklik van molekulêre bewegings is. Dit is ongeveer 3 sekondes vir water, maar is 'n funksie van temperatuur.

3.2 Homogeniteit van die magnetiese veld $\bar{H}$

Daar is aangetoon dat die presessiesein eksponensieel met tydkonstante T_2 wegsterf. Dit geld egter net vir die geval waar die magnetiese veld $\bar{H}$ ruimtelik hoogs homogeen is. In die praktyk egter geld hierdie voorwaarde nie en tree 'n tydkonstante $T^*_2 < T_2$ op. Grivet en Malnar[2] gee die volgende verwantskap:

$$1/\gamma_p T^*_2 \cong \langle \delta H^2 \rangle \qquad (6)$$

waar $\langle \delta H^2 \rangle$ die effektiewe waarde van die ruimtelike variasie van die magnetiese veld in die volume van die vloeistofmonster is.

3.3 Grootte van die polarisasieveld $\bar{H}_p$

'n Beter sein/ruis-verhouding kan verkry word indien die grootte van die polarisasieveld vergroot word. Die verklaring hiervoor is dat die grootte van die magnetiese moment $\bar{M}$ direk eweredig aan die grootte van $\bar{H}_p$ (verg. 2) is. Met die verwydering van die polariserende veld is daar dus 'n groter $\bar{M}$ wat presesseer en 'n sein in die detektor induseer. In die praktyk is daar beperkinge op die grootte van die veld $\bar{H}_p$ en optimum omstandighede moet gevind word.

3.4 Rigting van die polarisasieveld $\bar{H}_p$

Vir maksimum presessie moet die polarisasie loodreg op die aardveld plaasvind. Indien die as van die polarisasie- en detektorspoel 'n hoek Θ maak met die veld wat gemeet moet word, is die amplitude van die presessiesein eweredig aan $\sin^2\Theta$. Die amplitude by $\Theta = 45°$ is dus die helfte van die waarde by $\Theta = 90°$. Om hierdie probleem op te los kan verskillende spoelkonfigurasies gebruik word, soos byvoorbeeld twee spoele loodreg op mekaar, of 'n toroïed.

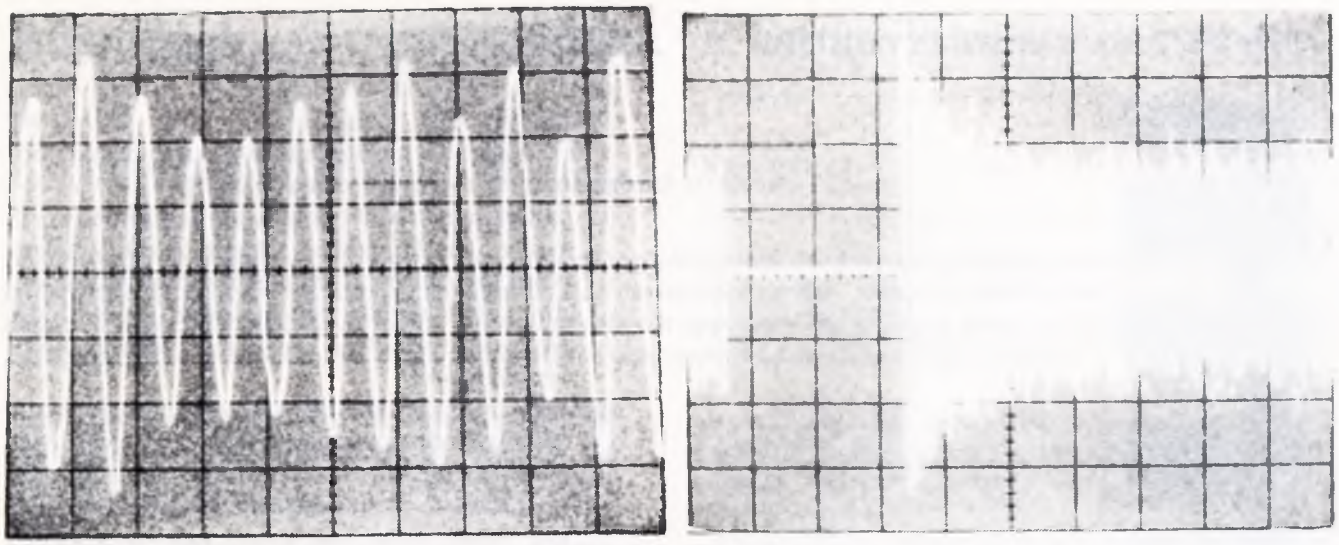
3.5 Polarisasietyd T_p

Daar is reeds aangetoon dat die tyd van polarisasie bepaal word deur die tydkonstante T_1 van die tempo waarteen polarisasie gevestig kan word. Vir elke tipe vloeistof wat in die detektor gebruik word, sal daar dus 'n optimum tyd wees. Indien T_1 relatief klein is, sal polarisasie vinnig plaasvind, maar dan moet onthou word dat T_2 gewoonlik ook klein is en die presessiesein sal dus vinnig wegsterf.

Gevolglik is dit moeilik om die frekwensie van die presessiesein in die beperkte tyd waarin dit voorkom, noukeurig te bepaal.

4. EKSPERIMENTELE WAARNEMINGS

Die invloed van die polarisasietyd T_p en polarisasiestroom I_p (wat $\bar{H}_p$ bepaal) is eksperimenteel bepaal. Vir hierdie doel is gebruik gemaak van die Chemtron-model G3-detektor en -versterker. Die detektor het die volgende eienskappe:



FIGUUR 1: 'n Tipiese presessiesein soos op 'n ossilloskoop waargeneem. Die vertikale skaal is 0,5V/divisie en die horisontale skaal 1s/divisie vir (a) en 1ms/divisie vir (b).

Induktansie L_d	= 114mH
Weerstand R_d	= 49Ω
Polarisasiespanning V_p	= 24V
Polarisasiestroom I_p	= 0,5A
Polarisasietyd T_p	= 2,8s
Detektorvloeistof	= parafien

Die spoel bestaan uit twee identiese, silindriese gedeeltes parallel langs mekaar wat serie-opponerend gekoppel is, sodat geïnduseerde spannings as gevolg van eksterne bronne mekaar sal ophef, maar die presessieseine sal sommeer.

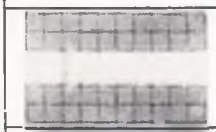
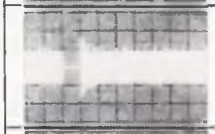
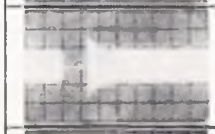
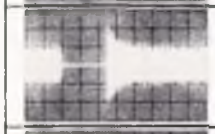
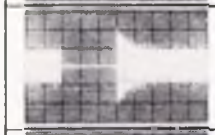
Figuur 1(a) en (b) toon 'n tipiese presessiesein in die aarde se magneetveld soos gemeet op die uitgang van die versterker. Geen doelbewuste poging is aangewend om die ruis te verminder nie, want vir die doel van hierdie eksperiment is slegs die maksimum kruin-tot-kruin-waardes van die presessiesein gemeet. Figuur 1(b) toon die ossillatoriese gedrag van die presessiesein met 'n frekwensie f_s van ongeveer 1200 Hz. Hierdie frekwensie verteenwoordig 'n magnetiese veld van ongeveer 28000nT. In figuur 1(a) kan duidelik waargeneem word hoe die amplitude van die presessiesein eksponensieel afneem vanaf sy maksimum waarde net nadat die polariserende veld verwyder is. Omdat die presessiesein gewoonlik slegs enkele μV groot is en ongeveer 'n faktor 10^6 versterk moet word voordat dit verder geprosesseer kan word, kan ingesien word dat ongewensde seine (ruis of steurings) 'n groot probleem is by die ontwerp van 'n protonmagnetometer.

Figuur 2 toon die verwantskap tussen die polarisasietyd T_p en kruin-tot-kruin-waarde V_{k-k} van die maksimum amplitude van die presessiesein aan. Figuur 3 gee die verwantskap tussen die polarisasiestroom I_p en V_{k-k}. Die resultate van figure 2 en 3 word grafies voorgestel in figuur 4(a) en (b).

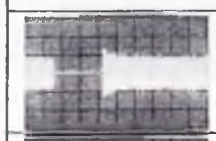
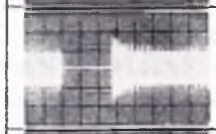
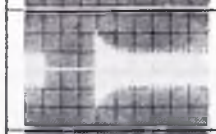
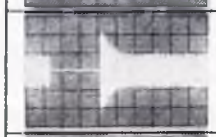
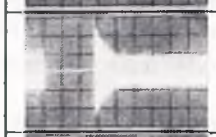
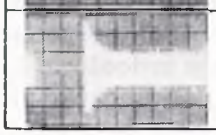
5. BESPREKING VAN DIE RESULTATE

Die grafiek van polarisasietyd T_p teen V_{k-k} in figuur 4(a) toon duidelik 'n eksponensiële karakter. Soos verwag kan word, sal die grootte van die magnetiese moment $\bar{M}$ sy eindwaarde eksponensieel bereik met tydkonstante T_1. Die grootte van $\bar{M}$ sal die grootte van die presessiesein bepaal. Hierdie invloed van T_p is by die ontwerpwaarde van die polarisasieveld vir die betrokke sensor bepaal.

Vir die ander geval in figuur 4(b) is die polarisasietyd T_p op sy ontwerpwaarde konstant gehou en is die polarisasiestroom I_p gevarieer. Die resultate toon 'n lineêre verwantskap tussen I_p (en

VOORBEELD VAN PRESESSIESEIN	POLARISASIETYD T_p (s)	AMPLITUDE V_{k-k} (V)
	0,35	2,6
	0,95	3,2
	1,40	3,4
	2,45	4,0
	3,00	4,2
	4,05	4,2

FIGUUR 2: Die verwantskap tussen die polarisasietyd en die maksimum kruin-tot-kruin-waarde van die presessiesein vir 'n polarisasiestroom van 0,5A. Die vertikale skaal van die ossilloskoop was 1v/divisie en die horisontale skaal 1s/divisie.

Voorbeelde van presessiesein	Polarisasiestroom I_p (A)	Amplitude V_{k-k} (V)
	0,25	2,6
	0,40	3,3
	0,50	4,0
	0,60	4,3
	0,75	5,0*
	0,85	5,6*

* Deur ekstrapolasie

FIGUUR 3: Die verwantskap tussen die polarisasiestroom en die maksimum kruin-tot-kruin-waarde van die presessiesein vir 'n polarisasietyd van 2,8s. Die vertikale skaal van die ossiloskoop was 1v/divisie en die horisontale skaal 1s/divisie.

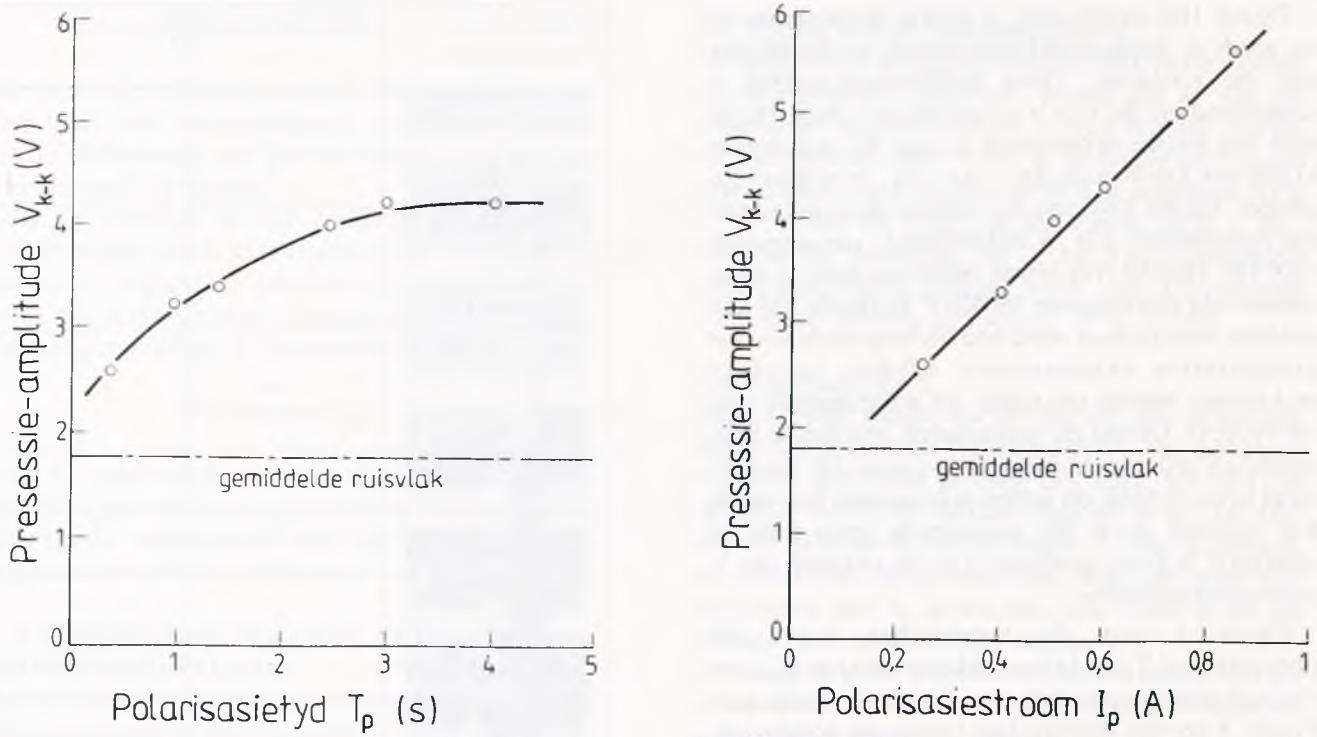
gevolglik die polarisasieveld) en die grootte van die presessiesein. Dit is 'n logiese resultaat, omdat die grootte van $\bar{M}$ direk eweredig aan die grootte van die polarisasieveld $\bar{H}_p$ (verg. 2) is.

Die volgende gevolgtrekkings kan uit die bostaande waarnemings gemaak word:

(i) 'n Optimum tyd vir polarisasie kan gekies word. Indien hierdie gekose waarde oorskry word, word min gewen in terme van die amplitude van die geïnduseerde presessiesein, terwyl die frekwensie waarteen die lesings geneem word, verlaag word.

(ii) Die amplitude (en sein/ruis-verhouding) van die geïnduseerde presessiesein toon 'n lineêre verwantskap met die grootte van die polarisasieveld. 'n Gewensde presessieseinamplitude kan dus verkry word deur die keuse van 'n geskikte polarisasiestroom. Die beperking wat hier intree, is egter die beskikbare energie vir polarisasie.

Normaalweg word die protonmagnetometer vir geofisiese opnames gebruik, in welke geval die instrument draagbaar moet wees en daar dus 'n beperking op die energiebron sal wees. Die beoogde aanwending en gepaardgaande omstandighede sal dus die ontwerpstrategie bepaal.



FIGUUR 4: Grafieke van die maksimum kruin-tot-kruin-waarde V_{k-k} van die presessiesein teen (a) polarisasietyd en (b) polarisasiestroom.

G. P. HANCKE
Departement Elektriese Ingenieurswese, Universiteit van Pretoria, Pretoria, 0002

Ontvang 18 Maart 1988; aanvaar 8 Augustus 1988

LITERATUURVERWYSINGS

1. Packard, M. & Varian, R. (1954). Free nuclear induction in the earth's magnetic field, *Phys. Rev.*, 93, 941.
2. Grivet, P.A. & Malnar, L. (1967). Measurement of weak magnetic fields by magnetic resonance, *Advan. Electron. Electron Phys.*, 23, 39-151.