

Magneetvelden in het militair maritieme domein

Hoe maak je een gebied vrij van landmijnen? Hoe kun je vanaf de zeebodem een overvarend schip detecteren? Kun je nog navigeren als het gps-systeem buiten werking is? En bestaan onzichtbaarheidsmantels echt? Het meten en slim gebruiken van magneetvelden geeft een antwoord op al deze vragen.

Magnetische signatuur

Veel militair materieel is gemaakt van ferromagnetisch staal. Het gedraagt zich daarom als een magneet en heeft een magnetisch veld om zich heen. Dit magnetisch veld wordt veroorzaakt door een hoop verschillende bijdragen. Ten eerste creëert het staal zelf een permanent magnetisch veld. Ten tweede ontstaat er een geïnduceerd magnetisch veld wanneer het materiaal wordt blootgesteld aan het aardmagneetveld. Daarnaast kan het bewegen van het object in het externe veld wervelstromen opwekken door het materiaal en die stromen wekken een magneetveld op. Ten slotte wordt een magnetisch veld gecreëerd door alle aanwezige elektrische apparatuur. Al deze bijdragen samen vormen het totale magnetisch veld van het object. We spreken ook wel van de verstoring van het aardmagneetveld of de magnetische signatuur van het object, zie figuur 1.

Detectie

Deze magnetische signatuur kan (op grote afstand) gedetecteerd worden met behulp van magnetometers. Die worden bijvoorbeeld gebruikt om geologische kaarten te maken en daarmee voorraden waardevolle metalen te vinden. Deze techniek wordt al heel lang gebruikt: Robert Thalen schreef inmiddels bijna 150 jaar geleden al het artikel *The Examination of Iron Ore*

Deposits by Magnetic Measurements. Binnen het militaire domein kun je aan verschillende toepassingen denken, zoals het zoeken naar landmijnen, het vinden van onontplofte explosieven of wapens, of juist zeemijnen die vijandelijke schepen kunnen detecteren. Voor al deze toepassingen is het nu al mogelijk om magnetometers te gebruiken. De technieken worden echter ook nog steeds verbeterd, vooral door de uitvinding van preciezere sensoren, slimmere data-analyse en de groei van beschikbare rekenkracht om deze analyses uit te voeren.

Het verkleinen van de magnetische signatuur

Het wordt daarmee ook duidelijk dat het vanuit een militair schip gezien belangrijk is om zelf niet gedetecteerd te worden door bijvoorbeeld een zeemijn. Hiervoor worden momenteel verschillende technieken gebruikt. Voor mijnenjagers is het van groot belang om zelf niet gedetecteerd te worden door zeemijnen en daarom wordt de scheepsconstructie vaak opgetrokken uit niet-magnetische materialen zoals glasvezel of polyester. Grotere marineschepen zijn meestal gemaakt van ferromagnetisch staal, dus de magnetische signatuur daarvan moet op een andere manier worden verkleind. Dit kan bijvoorbeeld door eens in de zoveel tijd de permanente component van het magneetveld op

te heffen. Dat gebeurt in zogenoemde demagnetisatiestations. Het schip wordt daar omwikkeld met enorme stroomkabels, waarna er zeer sterke magneetvelden worden aangelegd in verschillende richtingen. Hierdoor wordt de magnetische signatuur van het schip als het ware gereset. Het geïnduceerde veld dat na de demagnetisatie nog over is, kan actief weggeregeld worden met behulp van zogenoemde demagnetiseringsspoelen aan boord. Deze spoelen zijn aangelegd over de volle lengte, breedte en hoogte van het schip, en liggen in alle drie de richtingen. Met behulp van de positie en oriëntatie van het schip bepaalt het demagnetiseringssysteem wat het geïnduceerde magneetveld van het schip ongeveer zal zijn en de demagnetiseringsspoelen wekken vervolgens een tegengesteld veld op zodat de uiteindelijke verstoring van het aardmagneetveld minimaal is.

Magnetic mapping

Een toepassing die zowel militair als civiel zijn dienst kan bewijzen is het maken van magnetische kaarten (*magnetic mapping*) en magnetische navigatie. Een magnetische kaart geeft voor elk punt in een gebied de richting en sterkte van het magnetisch veld. Dit kan op allerlei niveaus: op tien kilometer hoogte, vlak boven de grond of binnen gebouwen. Op elk van deze niveaus spelen verschillende



Figuur 1. Een impressie van de magnetische signatuur van een schip. Afbeelding: TNO.

bronnen een rol. Op grote hoogte is vooral het aardmagnetisch veld opgewekt in de kern van de aarde te meten. Hoe dichterbij de aardkorst je komt, hoe meer te zien is van de afwijkingen die veroorzaakt worden door de aardkorst. Binnen gebouwen kan het magnetisch veld zeer sterk variëren per locatie.

Navigatie

Een voorbeeld van een magnetische kaart is te vinden in figuur 2. Hierin is een kaart met grove resolutie van het Nederlands gebied weergegeven. Boven land is vrij weinig variatie te zien, maar we zien wel lokale variaties boven de Waddenzee (afkomstig van de Zuidwalvulkaan) en boven de Noordzee. Merk op dat een magnetische kaart lijkt op een hoogtekartaat. Zou zo'n kaart gebruikt kunnen worden voor navigatie? Voor navigatie wordt tegenwoordig vooral GNSS (*global navigation satellite system*) zoals Galileo of gps gebruikt. Deze systemen hebben echter niet overal op aarde dekking (onder water of ondergronds kunnen deze bijvoorbeeld niet gebruikt worden) en kunnen kwetsbaar zijn voor verstoringen. Een van de mogelijkheden om toch te kunnen navigeren is het gebruik van magnetische kaarten en een gevoelige magnetometer. Dit heeft momenteel de meeste kans van slagen in combinatie met andere vormen van navigatie, in het bijzonder *inertial navigation systems* (INS) [2]. De combinatie van magnetische navigatie en INS wordt ook

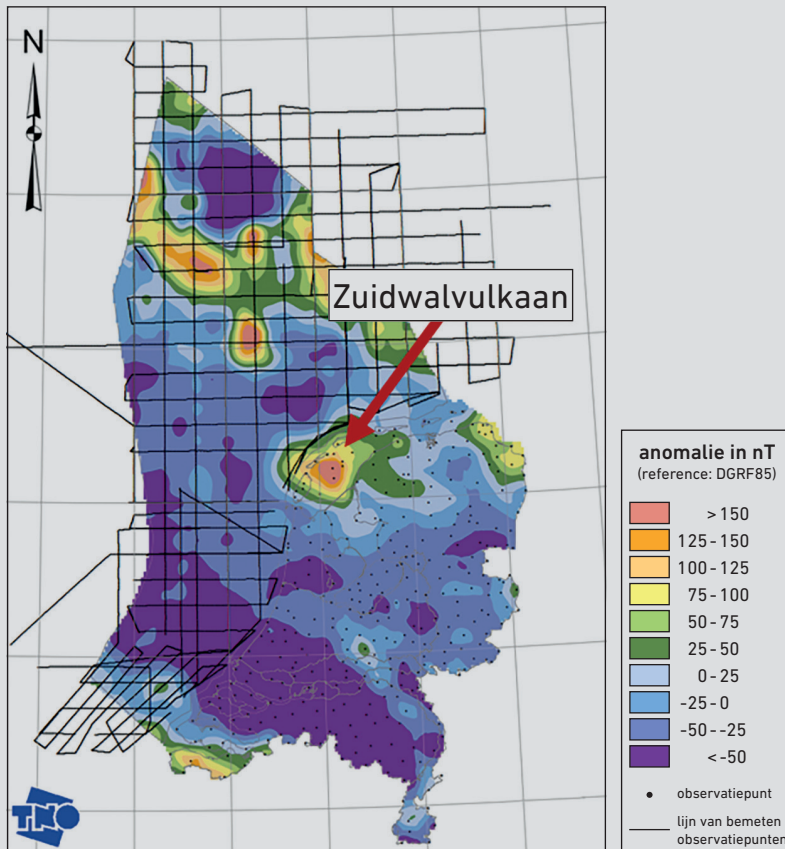
wel *magnetic-aided INS* (MAINS) genoemd. Een van de belangrijke beloftes bij het gebruik van magnetische kaarten is dat deze slechts op geologische schaal variëren en dus constant in tijd te veronderstellen zijn. Daarnaast heeft MAINS geen last van *spoofing*, omdat het praktisch onhaalbaar is om het magnetisch veld op afstand sterk genoeg te beïnvloeden. Het INS gebruikt metingen van de versnelling en rotatie afkomstig van een *inertial measurement unit* (IMU). Door de versnellingsmetingen over tijd te integreren, volgt een schatting van de verandering in positie en snelheid. Als de beginlocatie en -snelheid op tijdstip t_0 bekend is, volgt hieruit een schatting van de positie en snelheid als functie van tijd. Een bekend probleem met deze vorm van positiebepaling is *drift*: na verloop van tijd kan de positieschatting er steeds verder naast komen te zitten. Dit wordt ook wel *dead reckoning* genoemd [3]. Om te kunnen corrigeren voor drift kunnen magneetsensoren worden gebruikt. In MAINS wordt het gemeten veld van deze sensoren vergeleken met een magnetische kaart die van tevoren is gemaakt en vervolgens wordt de positieschatting van het INS hierop aangepast. Op basis van het verschil tussen de meting en de verwachte waarde verkregen uit de kaart, kan een correctie worden berekend op de positiebepaling die rekening houdt met de meetonzekerheden in de kaart, het INS, de sensor en omgevingsruis. De ontwikkeling van MAINS gaat in volle



Stefan de Gijssel is onderzoeker bij de unit Defence, safety and security van TNO. Hij studeerde natuurkunde en wiskunde in Delft. stefan.degijssel@tno.nl



Aad Vijn is onderzoeker bij de unit Defence, safety and security van TNO en docent aan de TU Delft. Hij promoveerde in Delft. aad.vijn@tno.nl



Figuur 2. Een magnetische kaart van (de territoriale wateren van) Nederland. Onder andere de Zuidwalvulkaan in de Waddenzee is goed te zien [1].

vaart en is in experimentele omstandigheden reeds gedemonstreerd. Het is dan ook te verwachten dat deze technologie in de komende tien jaar voldoende doorontwikkeld is om in gebruik genomen te kunnen worden.

Toekomst

Onzichtbaarheidsmantel

Een even futuristische als spectaculaire techniek is de magnetische onzichtbaarheidsmantel. In het ontwerp van een magnetische onzichtbaarheidsmantel wordt gebruikgemaakt van het zogeheten Meissner-effect, ook bekend in het concept van magnetische levitatie. Wanneer een supergeleidend materiaal wordt afgekoeld tot beneden zijn kritische temperatuur (typisch zijn deze kritische temperaturen in de orde van enkele tot tientallen kelvin),

zal deze het magnetisch veld volledig afstoten. Een bijkomstigheid is dat een gesloten oppervlak in supergeleidende toestand ook het magnetische veld in het omsloten volume niet naar buiten laat ontsnappen. Een tweelaagsconcept van een supergeleidende laag en een zorgvuldig gekozen ferromagnetische laag leidt tot de onzichtbaarheidsmantel: buiten de mantel is de verstoring geminimaliseerd en (sterke) magneetvelden kunnen de mantel niet ontsnappen. Deze onzichtbaarheidsmantel is momenteel alleen nog in experimentele vorm gedemonstreerd. Cryogene condities zijn een uitdaging en zullen dat blijven. De ontwikkeling van supergeleiders bij hoge temperatuur staat echter niet stil. Op termijn is het mogelijk dat materialen bij hoge temperaturen al in de gewenste toestand geraken, wat de praktische

implementeerbaarheid van de mantel zal vergroten.

Toekomstige quantumsensoren
Magnetische navigatie, en ook de andere toepassingen van magneetsensoren, worden steeds beter. Verdere ontwikkeling van magnetometers die gebruikmaken van quantumeffecten, te weten quantum optically pumped-magnetometers (OPM's) en diamond NV center-magnetometers, maken de metingen van het magnetisch veld namelijk steeds nauwkeuriger [4]. OPM's maken gebruik van het Zeeman-effect, en werken door de spins van gasatomen in dezelfde staat te brengen met een laser (pumping). De spin van de atomen hangt vervolgens direct af van de sterkte van het magneetveld ter hoogte van de gasatomen. Deze spin kunnen we meten en daaruit kan de sterkte van het magneetveld worden afgeleid [5]. Diamond NV centers zijn eigenlijk bewust veroorzaakte defecten in het rooster van een diamant en bestaan uit een stikstofatoom (nitrogen) en daar vlakbij een lege plek (vacancy) in het rooster. Door met een groene laser op de elektronen rond het NV center te schijnen, zenden ze rood licht uit waarvan de precieze golflengtes afhangen van het lokale magneetveld [6]. Met de diamond NV centers kan niet alleen de sterkte van het magneetveld maar ook de richting bepaald worden, wat een groot voordeel is voor verschillende toepassingen. De ontwikkeling van deze steeds preciezere sensoren is nog steeds in volle gang. Daarmee ligt de weg open om de huidige toepassingen nog verder te verbeteren en kunnen nieuwe toepassingen mogelijk worden.

REFERENTIES

- 1 www.nlog.nl/en/gravity-and-magnetic-field.
- 2 https://en.wikipedia.org/wiki/Inertial_navigation_system.
- 3 https://en.wikipedia.org/wiki/Dead_reckoning.
- 4 www.advancednavigation.com/tech-articles/the-future-of-inertial-navigation-is-classical-quantum-sensor-fusion.
- 5 T.M. Tierney et al., Optically pumped magnetometers: From quantum origins to multi-channel magnetoencephalography, *NeuroImage* **199**, 598 - 608 (2019)
- 6 <https://magnetometry.rp.quantumtinkerer.tudelft.nl>.