

„Onderzeebootopsporing: Speld in optische hooiberg”

A.N. DE JONG

Ir. A.N. de Jong studeerde optica aan de TU Delft en kwam na de studie als KMR officier bij TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium. Hij heeft daar onderzoek gedaan naar Infrarood sensoren voor detectie van schepen en de camouflage daartegen. Hij is Nederlands vertegenwoordiger in NATO-studie-groepen, waar deze onderwerpen aan de orde komen. Hij is medeorganisator van internationale experimenten, waarbij nieuwe mogelijkheden op sensorgebied worden beproefd.

Het opsporen met optische middelen van onderzeebootuitsteeksels in een zee van schuimkoppen en zonneglijstering heeft op het oog iets weg van het zoeken naar de bekende speld in een hooiberg. Toch stellen moderne processing technieken ons in staat in de zee van beweging quasi-statische punten van contrast te volgen en valse doelen met behulp van multispectrale detectiemiddelen te discrimineren. Zelfs een klein periscoopuitsteeksel is niet veilig, terwijl volledig ondergedoken onderzeeboten waarneembare indirecte sporen achterlaten dan wel met actieve lasersystemen zijn waar te nemen.

Optische en infrarood detectiekenmerken De snuiverberg

Beperken we ons tot de klasse van onderzeeboten met dieselgeneratoren, dan is het eerste kenmerk voor detectie de snuiverberg, veroorzaakt door de uitlaatgassen tijdens het opladen van de batterijen. De snuiverberg is een wolk van schuim vermengd met hete gassen rondom de snuiver, waarvan vaste delen zich soms boven, soms onder water kunnen bevinden. Een eenvoudig geometrisch model is weergegeven in figuur 1, zijnde een bolsegment met hoogte h en diameter b . De temperatuur in de wolk loopt naar buiten toe snel terug van de uitlaatgastemperatuur T_u naar de luchttemperatuur T_l .

Voor een gemiddelde onderzeeboot zijn waarden voor h en b al snel 1 resp. 2 m en de temperatuur T_u ca. 200°C. Daarmee is globaal het infrarood contrast te berekenen; voor een lage sea state (<2) treedt daarbij contrastversterking op door reflectie van de koude hemel bij schuine waarnemingsrichting (bijvoorbeeld uit een UAV of

ORION). Snuiverbergen zijn daarmee gemakkelijk detecteerbaar tot afstanden van 15 km, zoals experimenten hebben aangetoond.

Het visuele contrast van de snuiverberg is eveneens positief, tenzij tegen de richting van de zon in wordt gekeken. Wegens geringere atmosferische transmissie in vergelijking tot het infrarood, is het bereik in de meeste gevallen kleiner. Als extra bonuskenmerk tengevolge van de snuiverberg ontstaat bij voortbeweging van de onderzeeboot een bellenspoor, dat aanleiding geeft tot extra detectiemogelijkheden: de opvallendheid van een recht stukje spoor is voor de mens (en de machine) groot.

Bij grotere sea state (>2) zal de snuiver af en toe boven water uitsteken, hetgeen tot gevolg heeft dat hete metaaldelen direct waarneembaar zijn (100°C en warmer). Hoewel het stralend oppervlak kleiner is, levert de hogere temperatuur een vergelijkbaar contrast op met het geval van figuur 1.

Periscopen

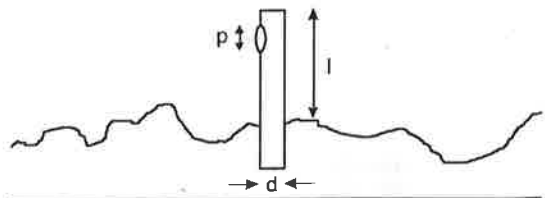
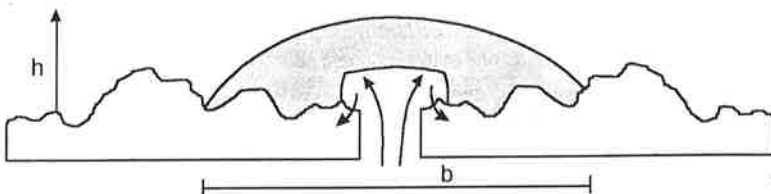
Voor het gemak kunnen we de optische en infrarood kenmerken van de periscopen en andere uitsteeksels (antennes) van onderzeeboten beschrijven aan de hand van een simpele koker met diameter d , uitstekend over een lengte l boven water en met aan één zijde een optisch venster met diameter p . De buitenkant zal meestal bedekt zijn met een waterfilm over een zwart behandeld oppervlak. In veel gevallen is de periscoop slechts kortstondig boven water. Waarden voor d , l en p zijn bijvoorbeeld 0,15 m, 1 m resp. 0,2 m.

Er zijn 5 kenmerken die een periscoop waarneembaar kunnen maken:

- een negatief contrast bij waarneming tegen de zon in.
- een positief thermisch contrast door reflectie van koude hemel door het omgevend zeeoppervlak.
- polarisatie van straling door de zijanten van de pijp.
- kattenoogeffect van de optische kijkers of camera's achter het venster (retroreflectie).
- schuimspoor bij het voortbewegen.

Door het geringe thermische contrast (ca. 5°C) en de beperkte omvang is de periscoop als een infrarood „low-observable” doel op te vatten, dat met moderne camera's maximaal tot 2 à 3 km te detecteren is wegens de beperkte resolutie. Visuele camera's komen tegen de

Onder: Figuur 1: Geometrisch model van snuiverberg.
Rechts: Figuur 2: Simpel model van periscoop.



zon in overdag verder, maar de grootste range wordt gehaald met de nieuwe laserscantechniek, die retroreflecties tot 10 km en meer gemakkelijk detecteerbaar maakt. Interessant is daarbij een tweede gebruik van de laser als verblinder of verzadiger van de sensor in de periscoop. De opsporingslaser tast met een frequentie van bijvoorbeeld 1 Hz het zeeoppervlak af. Een voordeel van deze techniek is het geringe aantal valse alarmen. Polarisation van visuele straling, toegepast in de visuele camera, stelt de waarnemer in staat om de vorm van het object te bepalen door alle beelden te bekijken verzameld tijdens het omwentelen van een polarisatiefilter.

Ondergedoken boten

Geheel ondergedoken onderzeeboten zijn moeilijk waarneembaar door hun geringe contrast. Hier is wat aan te doen door gepulste belichting via het wateroppervlak, hetgeen werkt mits de transmissie van het water toereikend is. Gekozen wordt veelal voor blauw-groene lasers, die hierbij tot enkele tientallen meters diepte kunnen doordringen. De snelheid waarmee een gebied wordt afgezocht is echter gering.

Meer kans biedt het waarnemen van zog tijdens het voortbewegen: enerzijds de beïnvloeding van het natuurlijke golfkarakter, anderzijds door het introduceren van temperatuurverschillen door gradiënten van de temperatuur als functie van de diepte (figuur 3).

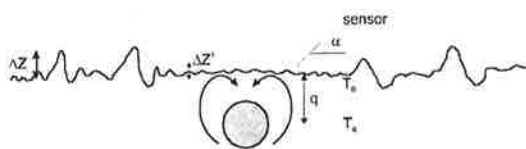
Optische (en infrarood) sensoren zijn zeer goed in staat om reflectieverschillen tengevolge van veranderende golfpatronen te detecteren, vooral bij schuine waarnemingshoek (kleine α) in een gunstig gekozen richting (tegenlicht) en „s nachts tegen een gereflecteerde onbewolkte koude hemel (-30°C). Een verandering in golfamplitude Δz in $\Delta z'$, resulterend in een gemiddelde reflectieverandering van 1%, resulteert in een temperatuurcontrast van 0,3°C, hetgeen ruim boven de detectiedrempel van een moderne camera ligt.

Water op een diepte q met een temperatuur T_a , dat door het voortbewegen van de boot naar het oppervlak stroomt, waar de temperatuur T_s is, creëert een temperatuurcontrast van soms meerdere graden, afhankelijk van de geografische locatie. Het spoor, evenals dat van het golfpatroon is breed en veelal lang en vanaf grote hoogte in een groot gebied te detecteren. Ervaringen op zogdetectiegebied zijn in de 60'er jaren al opgedaan met speciale camera's met 10 mK gevoeligheid in de Breguet Atlantic van de KM.

Storingen van de omgeving

Storingen aan het zeeoppervlak, die tot valse alarmen kunnen leiden ofwel verhoogde detectiedrempel dus lagere detectiekans, zijn schuimkoppen, zonglinsteringen en donkere golfvlekken. Daarnaast treden „niet-natuurlijke“ objecten als vogels, dolfijnen en „wrakhout“ op als bron van valse alarmen. Moderator is daarbij het weer met parameters als temperatuur, wind (sea state) en bewolking tezamen met de zonnestand (inclusief dag-/nacht-effect) en waarnemrichting.

Schuimkoppen vinden we op de toppen der golven met afmetingen van decimeters tot hectometers, levensduren van seconden tot minuten, bewegend met snelheden tot vele m/sec. In het visueel zijn ze diffuse reflectoren, in het infrarood zwarte stralers met watertempera-



Figuur 3: Indirecte contrasten bij ondergedoken boten.



Figuur 4: Foto van zeeclutter met glinsteringen en schuimkoppen.

tuur. De contrasten zijn dus hoog (tot 100% contrast en 5 K temperatuurcontrast).

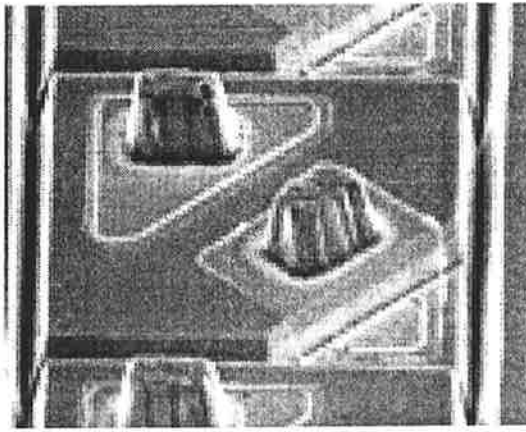
Zonneglinsteringen zijn er massaal in de capillaire golven, zij het van geringe sterkte en leidend tot een gemiddeld helder oppervlak, gelijk aan het geval van reflectie van heldere wolken. Sterke glinstering treedt op bij golven met minder kromming. Zonneglinsteringen zijn van korte duur en ze springen van de ene naar een andere plek. Daarom is bij opnamen met een grote beeldherhalingsfrequentie de glinstering eenvoudig temporeel weg te filteren.

Bij donkere golfvlekken kijken we recht in de golven, resulterend in lage reflectie, weinig helderheid maar hoog temperatuurcontrast. Figuur 4 toont een voorbeeld van hevige zeeclutter.

Op het water drijvende vogels vormen een probleem wegens hun statische karakter, evenals wrakhout (hout,



Figuur 5: Foto van Noorse dome onder de Lockheed P-3C ORION van de Koninklijke marine.



Figuur 6: Voorbeeld van sandwich-structuur infrarood arrays van Raytheon-SBRC.

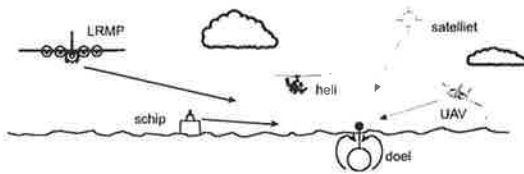
drums, boeien en dergelijke). Dolfijnen, walvissen en dergelijke verplaatsen zich echter zodanig en verdwijnen regelmatig dat ze eerder te onderscheiden zijn, mede door hun afmetingen.

Toch is het temporele effect (af en toe zien) in ernstige mate van invloed op de detectiekans bij horizontaal waarnemen: bij hogere sea state is de kans dat uitsteeksel boven de golven uitkomen al na enkele km minder dan 10%. Een voordeel is dat je zelf eveneens minder gemakkelijk waarneembaar bent.

Platforms

Hoewel schepen in hoge mate belang hebben bij het onderkennen van een dreiging, zijn ze niet het ideale platform om onderzeeboten op te sporen door de beperkte horizon en het scherend waarnemen, waardoor het grootste deel van het zeeoppervlak aan het oog wordt

Figuur 7: Sensoren voor diverse platforms; LRMP = long range maritime patrol; UAV = unmanned aerial vehicle.



Tabel 1: Sensoren versus detectiekenmerk en platform
P = periscoop, S = snuiverberg, Z = zog, D = dag, N = nacht.

Sensor	Spectrale band (μm)	Platform	Dag/nacht	Detectiekenmerk(en)	Range (km)	Pupil diameter (m)	Beeldelementen (μm)
TV	0,4-0,7/0,7-1,7	UAV	D	P+S+Z	4/10/30	0,05	>30
TV	0,4-0,7/0,7-1,7	schip	D	P+S	1/3	0,05	>30
TV	0,4-0,7/0,7-1,7	LRMP	D	P+S+Z	5/15/30	0,10	>30
TV	0,4-1,0	satell.	D	S+Z	500	0,50	2
IR	3-5/8-12	UAV	D+N	P+S+Z	2/10/30	0,10	200
IR	3-5/8-12	schip	D+N	P+S	1/3	0,15	80
IR	3-5/8-12	LRMP	D+N	P+S+Z	4/20/50	0,15	80
IR	3-5/8-12	satell.	D+N	S+Z	500	1,00	5
laserscan	0,8/1,06/1,53	LRMP	D+N	P	20	0,20	50
lasergate	1,06	heli	D+N	body	0,05	0,10	1000i

onttrokken. Allerlei technieken zijn bedacht om de waarnemingshorizon te verleggen, gebruik makend van ballonnen, onbemande verkenningsvliegtuigjes (UAV's) en heli-copters in oplopende mate van „payload“ en met het schip als thuisbasis.

Alternatieve platforms zijn het patrouillevliegtuig en de satelliet, elk met hun operationele aspecten. Uitgebreide experimenten hebben plaatsgevonden met de ORION van de Koninklijke marine om de haalbaarheid van snuiverdetectie aan te tonen.

In figuur 5 is de installatie van een geleende dome onder de neus te zien, waarbij een prototype camera van Nederlands fabriek is toegepast.

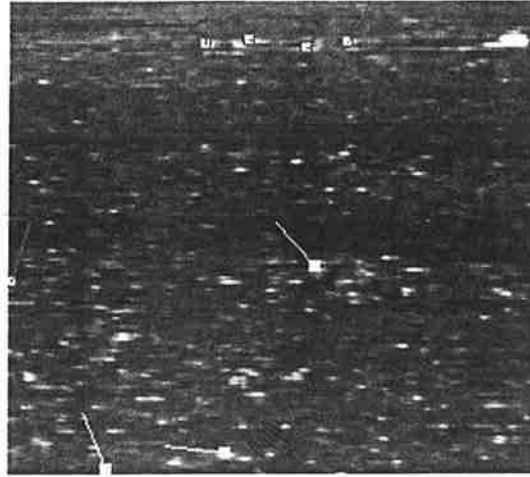
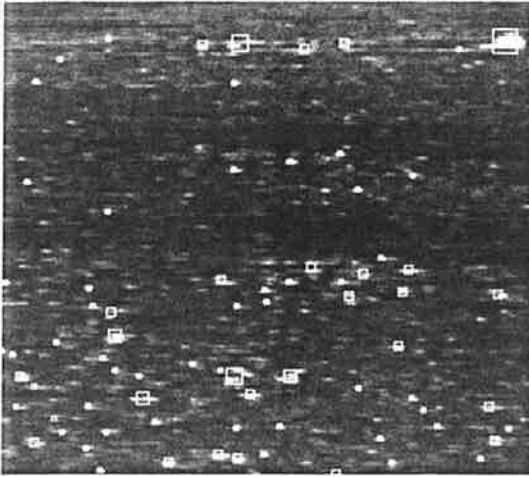
Van de ORION wordt geëist dat een gebied van bijvoorbeeld 100×100 km binnen 4 uur verkend kan worden, waarbij elke snuiverberg gedetecteerd moet worden. Vanuit satellieten heeft men het voordeel dat men dit bepaalde gebied sneller en met hogere frequentie kan verkennen, zodat zelfs als de snuiver slechts enkele minuten aanstaat, detectie plaatsvindt. Eisen zijn hierbij wel dat er geen bewolking is en dat het gezichtsveld van de camera te richten is.

UAV's zijn aantrekkelijke, goedkope alternatieven, met als voordeel dat de informatie sneller op het schip is dan vanuit de satelliet of de ORION. Het totale mee te nemen gewicht van het sensorkpakket is beperkt, zeker van de micro UAV's, die thans in ontwikkeling zijn. Wanneer echter alleen optische sensoren gebruikt worden en de data via een optische link overgezonden worden, kan de payload minder dan 0,5 kg bedragen. De snelheid van dit soort platforms is laag, maar de kosten eveneens, zodat men meerdere UAV's tegelijk kan gebruiken.

Helicopters hebben het voordeel van grotere payload, waardoor de meest geavanceerde sensoren gebruikt kunnen worden met grotere detectiekans en range.

Sensoren

Optische en infrarood sensoren hebben in de afgelopen decennia een enorme ontwikkeling meegemaakt. Videocamera's met meer dan $1/2$ miljoen beeldpunten,



Figuur 8: Resultaat van valsalarmereductie-algoritmen.

beeldstabilisatie, geautomatiseerd en met digitale beeldregistratie zijn massa-artikelen geworden. Infrarood camera's zijn voorzien van 2-dimensionale arrays en bolometrische arrays zijn ontwikkeld, die geen koeling meer behoeven. Lasers zijn ontwikkeld met verstembare golflengten over het gehele spectrum, gepompt met halfgeleiderlasers met hoge efficiëncy. Multispectrale optieken zijn gerealiseerd die simultane opnamen in meerdere spectrale banden mogelijk maken, waarbij de beeldelementen stuk voor stuk op elkaar passen, hetgeen beeldfusie op pixelniveau mogelijk maakt. Bovendien zijn sandwich arrays gebouwd (zie figuur 6), waarbij in 2 lagen boven elkaar verschillende infrarood banden worden gedetecteerd.

Het is van belang om onderscheid te maken in sensoren voor de verschillende platforms vanwege het verschil in range (en gewicht). In figuur 7 worden de verschillende opties toegelicht aan de hand van een schets. Rekening houdend met de verschillende detectiekenmerken kunnen we de volgende tabel 1 opmaken met kandidaat-sensoren en hun prestaties, uitgaande van de huidige stand van de technologie. Opgemerkt wordt daarbij dat niet alle in de USA verkrijgbare sensoren voor Europeanen beschikbaar zijn.

De tabel geeft een globaal overzicht van de haalbare ranges voor goede weersomstandigheden. Zicht en wind hebben sterke invloed op de atmosferische propagatie en aantal valse alarmen. Bij de satellietsensor is afwezigheid van wolken aangenomen. De laserscanner kan uiteraard ook op het schip geplaatst worden, maar door het golfocclusieprobleem is dit voorbeeld weggelaten. De ranges gelden voor het geval dat optimale processing is toegepast.

Processing

Signaalverwerking is de sleutel om het valsalarmprobleem op te lossen. Het vormt ook de kern van het onderzoek op TNO-FEL. Zonder te veel in details te gaan worden hier de hoofdlijnen der processing opgesomd:

- een contrast- en cluttervoorspeller maakt gebruik van de weergegevens en de aanzichthoek/kijkrichting om de sterkte van het doelcontrast en de valse alarmen te voorspellen
- aan de hand hiervan worden optimale pre-filters gekozen met spectrale bandkeuze, spatiële filtering en tangentiële snelheidvoorspelling

- drempling der signalen kan worden gedaan voor delen van het beeld van verschillende grootten; dit levert een aantal alarmen op
- elk der alarmen wordt enige tijd (bijvoorbeeld 20 frames) gevolgd om de sterktevariaties en eventuele dwarsverplaatsingen te meten en te correleren met voorspelde contrasten
- multiple track-filtering wordt toegepast op alle overgebleven alarmen; op de meest hardnekkige wordt de laserscanner gericht ter bepaling van afstand en retro-return
- aan het eind bevindt zich in veel gevallen een operator, die kan adviseren om een bepaalde manoeuvre te maken om het hardnekkige alarm onder een andere hoek te bekijken en om het gedetecteerde object nader te identificeren.

Een voorbeeld van het resultaat van signaalverwerking voor kleine oppervlakte-doelen is te zien in figuur 8. Op de linker opname ($3-5 \mu\text{m}$) zijn naast de doelen boven in het beeld (drums van $0,4 \times 0,4 \text{ m}$) ook een dwarsuit vliegende vogel, een rubberboot en allerlei „sunglints“ en whitecaps te zien, die alarmen veroorzaken. Op de rechter opname zijn de snel bewegende en kortdurende alarmen door de processing geëlimineerd. De opnamen zijn gemaakt bij Nettuno in juli 1998 vanaf 17 m boven zee-niveau. De afstand tot de doelen bedroeg 1 km.

Conclusie

Optische en infrarood sensoren bieden uitstekende mogelijkheden om onderzeeboten op te sporen. Onderzoek, uitgevoerd door TNO-FEL in opdracht van de Koninklijke Marine, heeft ervaring en kennis opgeleverd omtrent het doelcontrast en op welke wijze het valsalarmprobleem moet worden aangepakt. Sensorpakketten zijn op de markt verschenen waarmee de onderzeeboot, delen ervan of indirecte effecten op operationeel interessante afstanden gedetecteerd kunnen worden.

Literatuur

1. R.E. Walker, *Marine Light Field Statistics*, Wiley & sons, 1994.
2. B. Kinsman, *Wind waves, their generation and propagation on the ocean surface*, Prentice Hall, Inc., 1965.
3. *The Infrared and Electro Optics Handbook*, SPIE Optical Engineering Press, 1993.
4. A.N. de Jong, *Multispectrale sensoren voor surface surveillance op zee*, TNO rapport FEL-97-A030.