Radaraardobservatie, de Gebruiker en het Overzicht.

Intreerede

9 juni 2000

Prof. Ir. P. Hoogeboom

TU Delft

Technische Universiteit Delft

Faculeit Informatietechnologie en Systemen

740327
3.5.8026
Red. 2000

Radaraardobservatie, de Gebruiker en het Overzicht

"Aan mijn ouders, die dit eigenlijk
hadden moeten meemaken"

Inaugurele Rede

Uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van
hoogleraar Radaraardobservatie
aan de faculteit Informatie Technologie en Systemen
van de Technische Universiteit Delft
op 9 juni 2000

door

Prof.ir P. Hoogeboom

omslag: PHARUS Synthetische Apertuur Radar opname van Delft

Hoogeboom
red_
2000

Copyright © 2000 by P. Hoogeboom

All rights reserved. No part of the material protected by this copyright notice may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission from the author or the Delft University of Technology

Gedrukt in de Universiteitsdrukkerij TU Delft.

Mijnheer de Rector Magnificus,
Leden van het College van Bestuur,
Collegae hoogleraren en andere leden van de universitaire gemeenschap,
Zeer gewaardeerde toehoorders,
Dames en Heren,

Inleiding

De mogelijkheden van de techniek die wij vandaag de dag kennen onder de naam Radar zijn ver uitgegroeid boven de oorspronkelijke betekenis van het acronym. De vijf letters van het woord Radar staan voor RAdio Detection And Ranging, oftewel detectie en afstand bepaling met behulp van elektromagnetische of "radio" golven. Daarmee worden duidelijk de twee basisfuncties aangegeven die wetenschappers wisten te bereiken al voor de tweede wereldoorlog. Al spoedig bleek radar een effectief hulpmiddel te zijn bij het vroegtijdig opsporen van vijandelijke vliegtuigen.
Het succes van Radar leeft kennelijk voort in de mens: wie herinnert zich niet Radar Love, de onsterfelijke hit van de Golden Earring? Ook wordt in het hedendaagse taalgebruik soms gesproken van "radar-ogen" om een soort super oog aan te geven dat in staat is om door allerlei materialen heen te kijken en met ongekende vergrotingsfactoren zaken waar te nemen op zeer grote afstanden. Zaken dus die voor het normale menselijke oog onopgemerkt blijven.
Het is in dit verband opmerkelijk te noemen dat van meet af aan juist altijd op het menselijk oog is vertrouwd voor het doorgeven van de radarinformatie aan de mens. Dat o.a. maakt het vakgebied moeilijk. De gebruiker dient zich steeds te realiseren dat het radarplaatje geen optisch beeld is en moet nog steeds zelf de vertaalslag maken.

Met de term Remote Sensing wordt in het algemeen het waarnemen op afstand aangegeven. Als de waarneming zich richt op het aardoppervlak, zoals bij de luchtfotografie, is meestal sprake van aardobservatie. Net als dat bij de term radar het geval is, dekt ook hier de vlag de lading niet meer. In de moderne aardobservatie worden de gegevens ook gebruikt om bijv. op land gedetailleerde object- en kaartgegevens te verzamelen of van het zeeoppervlak fysische parameters zoals windsnelheid en golfhoogte te bepalen. Daarmee is aan de aanvankelijk louter kwalitatieve waarneming toegevoegd de kwantitatieve, resultaatgerichte meettechniek.

Figuur 1: PHARUS (Phased Array Universal SAR) radarbeeld van de TU wijk, opgenomen vanaf 10 km afstand, op een hoogte van 4 km, met een resolutie van 4 meter. PHARUS is een experimentele phased array vliegtuig Synthetische Apertuur Radar, werkend op C-band (5.3 GHz, 5.6 cm golflengte).

Het vakgebied Radaraardobservatie omvat dan ook veel meer dan strikt genomen uit de naamgeving kan worden afgeleid. De introductie aan de hand van een modern radarbeeld is verhelderend en tegelijkertijd een dankbare taak. Dat laatste dan vooral omdat een beeld van een bekende omgeving uitnodigt tot het herkennen van objecten die we al uit eigen waarneming kennen. Dat onderdrukt in eerste instantie kritische vragen over het hoe en waarom. Zeker

als het eigen huis of een ander referentiepunt is gevonden, wordt de waarde van het beeld erkend. Pas in tweede instantie rijst de vraag welke kwantitatieve informatie uit het beeld kan worden afgeleid. Maar dan heb ik het plaatje al weer weggehaald. Hoewel dus de herkenning van een bekende omgeving een sterk verkoopargument is voor remote sensing, wordt de waarde pas echt duidelijk wanneer in een onbekende omgeving vitale infomatie kan worden afgeleid uit het beeld. Dit is het zogenaamde inverse probleem, dat een belangrijke rol speelt in het vakgebied van de aardobservatie. De waarde van een remote sensing produkt ontstaat pas op het moment dat het inverse probleem is opgelost. Hier staat het vakgebied echter in feite nog in de kinderschoenen, reden waarom betalende gebruikers voor remote sensing informatie nog schaars zijn.
Ondertussen zult u het beeld achter mij (zie figuur 1) hebben herkend. De TU wijk is in z'n volle omvang te zien, maar details in het beeld ontbreken. Niettemin zijn de grote lijnen zeer goed waar te nemen. De hoofdwegen (A-13, Kruithuisweg, Mekelweg), het Schiekanaal en de grote gebouwen, zoals het hoofdgebouw en de gebouwen langs de Mekelweg zijn alle te herkennen. In het originele beeld dat polarimetrisch in kleur is opgenomen, is de herkenbaarheid door deze extra informatie nog beter. Een dergelijk beeld is uitstekend geschikt voor algemene orientatie.

Het vakgebied

Radaraardobservatie past de radartechniek toe voor het waarnemen van het aardoppervlak. Daarmee wordt meteen duidelijk dat het hier om een multidisciplinair vakgebied gaat. Radartechniek en signaalverwerking spelen een belangrijke rol bij het tot stand brengen van de waarneming. Maar wat er waargenomen wordt en hoe dat het beste kan gebeuren vereist fysische kennis van het waarneemproces en kennis van het toepassingsgebied. Een aardobservatie systeem voor het meten vanuit de ruimte van windvelden op de oceanen kon alleen tot stand komen dankzij de samenwerking van o.a. radartechnici, signaalverwerkers, oceanografen en meteorologen.
Toepassingen van aardobservatie zijn te vinden op velerlei gebied. Tot het zojuist genoemde combinatiegebied van oceanografie en meteorologie, behoren ook golfverwachtingen, stromingsmetingen en de grootschalige oceaan circulaties. Op het terrein van landtoepassingen vindt men combinaties van radar met vakdisciplines op het gebied van landbouw, bosbouw, hydrologie, stedelijke bebouwing en ruimtelijke planning.

Een apart disciplinegebied is dat van Defensie. Daarbij zijn onder andere bewegingsdetectie, hoge resolutie en classificatie en identificatie van objecten van belang, hetgeen o.a. de patroonherkenningstak van de signaalverwerking van groot belang maakt.

Van het scala aan aardobservatie instrumenten spreekt de Synthetische Apertuur Radar (SAR) wel bijzonder tot de verbeelding. Dit komt met name door de goede, bijna fotografische beeldkwaliteit die hiermee onder alle omstandigheden is te bereiken. Dit geschiedt door een slimme combinatie van de mogelijkheden van het radarsysteem en van de signaalverwerking. Het principe werd al aan het eind van de jaren veertig bedacht en korte tijd later aangetoond. De technische ontwikkelingen op diverse gebieden hebben pas veel later tot een bruikbare applicatie geleid. De huidige hoge beeldkwaliteit werd nog niet zo lang geleden mogelijk na de introductie van digitale en breedband technieken.
Een enigzins jaloerse jonge collega liet zich na geruime studie en een niet onverdienstelijke bijdrage in wat tegenwoordig de nieuwe economie van de digitale techniek zou heten, tijdens een congres ontvallen dat hij toch aan de wieg van het SAR principe heeft gestaan. Daarop heb ik hem gezegd dat hij gelet op z'n leeftijd niet in aanmerking kwam. Toen hij begon tegen te sputteren dat hij weliswaar jong was, maar een behoorlijke staat van dienst had, heb ik uitgelegd waar het werkelijk om ging: Je zou puur op grond van je leeftijd nog niet eens in aanmerking komen voor een gedeeld uitvindersschap van een principe, dat inmiddels al weer 50 jaar bestaat!

Laten we even stilstaan bij de werking van een SAR:

Om een beeld in 2 dimensies, zoals een foto, te realiseren moet het opnamesysteem in twee richtingen over een scheidend vermogen beschikken, zoals aangegeven in figuur 2. Dit gebeurt door een antenne een gerichte bundel te laten uitzenden die door de voortbeweging van het vliegtuig wordt verplaatst. Binnen deze bundel wordt door het uitzenden van korte pulsen de omgeving met de lichtsnelheid afgetast.
Reflecties van die omgeving worden door een ontvangantenne opgevangen. De tijd die verloopt tussen uitzenden en ontvangen is afhankelijk van de afstand waarop de reflecterende objecten zich bevinden. De korte puls is vooral van belang om nog onderscheid te kunnen maken tussen reflecties van ongeveer gelijke sterkte afkomstig van objecten die dicht bij elkaar liggen. Het elektronische weergave systeem zorgt ervoor dat de reflecties op de juiste positie langs een lijn worden afgebeeld.

Figuur 2: De scan configuratie voor een vliegtuigradar systeem in vooraanzicht en van boven gezien. Bij een SAR wordt de divergerende antennebundel elektronisch gecompenseerd door een afstandafhankelijke antenne apertuur toe te passen.

De antennes die voor het uitzenden en ontvangen worden gebruikt hebben een richtwerking, dat wil zeggen zij bestrijken een zekere ruimtehoek, die afhankelijk is van de afmeting van de antenne. Deze antenne afmeting wordt ook wel apertuur genoemd. Door de apertuur langer te maken wordt de ruimtehoek kleiner, en dus de resolutie beter. Maar op grotere afstanden van de antenne wordt de resolutie steeds slechter als gevolg van de toenemende doorsnede van de bundel. Een constante resolutie wordt bereikt door de apertuurlengte afhankelijk te maken van de waarneem afstand. Dit is echter niet praktisch uitvoerbaar voor een antenne, maar kan door signaalbewerking wel gesimuleerd worden.
Stel, de antenne beweegt langs een lijn en alle reflecties worden in een computergeheugen bewaard. De computer kan naderhand voor iedere meetafstand door combinatie van voldoende reflecties een apertuur van dusdanige afmeting realiseren, dat de beeldresolutie konstant is.
Dit principe wordt apertuursynthese genoemd. Het radarsysteem dat volgens dit principe werkt heet een Synthetische Apertuur Radar. Een beeld dat met een dergelijk systeem is gemaakt heeft dus de eigenschap dat de resolutie konstant is en onafhankelijk van de afstand. De mogelijkheid om op grote afstanden

zonder verlies van beeldscherpte te kunnen waarnemen maakt de SAR tot een uniek instrument. Bovendien is de radar in staat om door wolken heen en onafhankelijk van zonlicht, dus dag en nacht waar te nemen. Om deze redenen is radar uitermate geschikt voor aardobservatie vanuit de lucht en vanuit de ruimte.

Een radarbeeld zal in het algemeen als een zwart/wit foto gepresenteerd worden, maar de grijstinten hebben een heel andere betekenis dan wat men normalerwijs van een optische foto gewend is. De gebruiker moet in feite opnieuw leren kijken. Dit proces is vergelijkbaar met de wijze waarop wij in onze jeugd hebben leren omgaan met de betekenis van de beelden die onze ogen ons verschaffen: door het verkennen van de omgeving werd langzamerhand een begrip opgebouwd van hetgeen onze ogen ons laten zien. Maar, onze ogen herkennen kleur en dat voegt veel informatie toe. Omdat radar in een geheel ander golflengtegebied werkt dan het oog, is kleur niet van dezelfde betekenis, maar dat de toevoeging van betekenisvolle kleuren tot meer beeldinformatie leidt, is evident. Het verschil in golflengte tussen zichtbaar licht en radar is meer dan een factor 1000. De fysische processen die aan reflectie en verstrooiing ten grondslag liggen zijn geheel verschillend in dit golflengtegebied. Deze processen worden nog lang niet begrepen. De vertaling naar voor de gebruiker belangrijke gegevens is daarom dikwijls nog niet te maken, of om het in zijn of haar woorden te zeggen: "ik snap niet wat ik zie(t)". Er is nog veel onderzoek nodig op het gebied van stralingsinteractie en modelvorming, ik kom hier later nog op terug. Niettemin zijn er wel mogelijkheden om op zinvolle wijze kleur toe te voegen aan radarbeelden. Een veelbelovende techniek is polarimetrie.

Polarimetrie

Polarisatieverschijnselen treden bij alle elektromagnetische golven op, en zijn dus zowel bij licht als bij radargolven bekend. Met polarisatie wordt hier bedoeld de stand die de elektrische veld vector van de elektromagnetische golf aanneemt: Staat deze verticaal, dan spreken we van verticaal (V) gepolariseerd. Bij een horizontale positie is het horizontaal (H) gepolariseerd. De zend- en ontvangantenne van een radar kunnen dezelfde of verschillende polarisaties benutten. De basiscombinaties zijn VV, HH, HV en VH. Op deze wijze zijn 4 afzonderlijke beelden op te nemen. Dit gebeurt bij een SAR in de praktijk quasi-simultaan, door afwisselend V en H gepolariseerde signalen uit te zenden en 2 ontvangkanalen, V en H gepolariseerd, toe te passen.

Figuur 3: De toepassing van polarimetrie bij een vliegtuig radar leidt tot een complete meting van de scattering matrix **S**, waardoor de 4 polarisatiecombinaties VV, HH, VH en HV, alsmede hun onderlinge faseverschillen worden bepaald. Daarmee ontstaat een complete beschrijving van het scattergedrag van het aangemeten object.

Het menselijk oog is niet gevoelig voor de polarisatietoestand van het licht, maar met hulpmiddelen als de polaroid zonnebril is het verschijnsel wel duidelijk te maken. Of denkt u aan de natuurkundeproeven met links- en rechtsdraaiend melkzuur. Maar dat voorbeeld is misschien minder gelukkig gekozen omdat de kreet "draaiend melkzuur" dankzij de commercie een bijzondere waarde kreeg, als ging het om een bijna mystiek verschijnsel. En die indruk wil ik vermijden. In de aardobservatie wordt extra informatie uit radarsignalen benut door polarimetrie toe te passen. Wat houdt dit in?

Terugkomend op de polaroid zonnebril: deze neemt de zonreflecties van het water weg, maar draait u de bril eens een kwart slag...
De objecten op het aardoppervlak reflecteren net als bij zichtbaar licht de radarstraling niet voor iedere polarisatie even sterk. Belangrijke informatie die uit polarimetrische metingen wordt verkregen betreft de aard van de reflectie, zie figuur 4: was het een enkelvoudige reflectie of was het een tweevoudige reflectie, of eigenlijk: was het aantal reflecties die de electromagnetische golf op zijn weg ondervond even of oneven? Daarmee ontstaat een duidelijk onderscheid tussen directe reflecties van een oppervlak (enkele reflecties, dus oneven) en reflecties van hoekstructuren (dubbele reflecties, dus even). Bijvoorbeeld bij een gebouw in een stad: de golf komt van bovenaf, reflecteert

op straat, vervolgens tegen de muur van het gebouw en terug naar de radar. Met polarimetrie is dus direct onderscheid te maken tussen de afbeelding van het dak van een gebouw en de reflectie van de muur ervan en de straat ervoor.

Figuur 4: In tegenstelling tot gladde oppervlakken geven ruwe oppervlakken behalve een voorwaartse reflectie ook terugverstrooiing ("single bounce"). Hoekstructuren geven dikwijls aanleiding tot een "double bounce" reflectie. Vegetatie kenmerkt zich door "volume scattering". Met polarimetrie is een goed onderscheid te maken tussen deze 3 verschillende reflectiemechanismen.

Andere belangrijke informatie uit polarimetrie betreft de diffuse reflectie: als er geen sprake is van een harde reflectie, maar van een verstrooiing door een volume (bijv. door de blaadjes van een boom) dan zullen de VH en HV kanalen (de zogenaamde kruispolarisaties) sterk in amplitude toenemen. Door de kruispolarisatie kanalen in een radarbeeld met een groene kleur weer te geven, ontstaat een natuurlijke indruk: De groene delen van het beeld bevatten dan inderdaad veel vegetatie.

Helaas is de interpretatie van polarimetrie nog niet geweldig ver gevorderd. Op dit moment is het onderscheiden van verschillende klassen van objecten en achtergronden al wel goed mogelijk. Ook kan nu al met eenvoudige wiskundige bewerkingen het contrast in de beelden tussen vooraf geselecteeerde doelen geoptimaliseerd worden. Een voorbeeld hiervan wordt getoond in figuur 5.
Het op een eenduidige wijze decomposities uitvoeren is echter nog niet mogelijk. Daarmee wordt bedoeld dat de eerder omschreven basisbegrippen

van oneven en even reflecties en van volumescattering veelal nog niet terugvertaald kunnen worden naar fysisch begrijpbare eigenschappen van het afgebeelde object. Het inverse probleem, waaraan op deze universiteit jaren geleden door Dr. J.R. Huynen al werd gewerkt, is dus nog niet opgelost, wat

Figuur 5: AIRSAR opname (courtesy Jet Propulsion Laboratory, Pasadena) van het Veluwe-meer, met zodanige polarisatie instellingen dat resp maximaal (boven) en minimaal (onder) contrast ontstaat tussen man-made objecten en de achtergronden. Let op de zichtbaarheid van zelfs kleine plezierjachten en betonningen in het Veluwemeer.

betekent dat voor de gebruiker geen pasklaar antwoord op zijn vragen uit de opgenomen beelden is af te leiden. Verder onderzoek zal moeten leiden tot de ontwikkeling van modellen en methoden die uiteindelijk de door de gebruiker gestelde vragen kunnen beantwoorden.

Interferometrie

Een aardobservatieprodukt waarbij het inverse probleem veel minder speelt, is de interferometrie. Waarmee ik overigens niet wil zeggen, dat op dit terrein alle vraagstukken zijn opgelost. De meest bekende interferometrische configuratie maakt gebruik van een tweede ontvangstantenne voor een soort stereo opname. Nu ontstaat een 3 dimensionaal beeld, waarbij de derde dimensie de terreinhoogte is. Dit is direkt interpreteerbare informatie die vooral in de cartografie zeer waardevol is gebleken. Dit is dan ook de reden dat interferometrie hoewel jonger dan polarimetrie zeer snel tot ontwikkeling en tot commerciële exploitatie is gekomen.

Figuur 6: Interferometrische SAR opname vanuit de ruimte van Nieuw Mexico, gemaakt met de SIR-C (Shuttle Imaging Radar) aan boord van de Space shuttle.

Een bijzonder fraai voorbeeld toont figuur 6, afkomstig van de spaceshuttle-missie die eerder dit jaar is uitgevoerd. Met een 60 meter lange mast is een tweede antenne aan de radar in de spaceshuttle bevestigd. Van vrijwel de gehele aarde zijn stereoparen opgenomen, die momenteel worden verwerkt tot een compleet en nauwkeurig 3-d model van onze aarde. Dit nieuwe model is

met ca 5 – 10 meter hoogtenauwkeurigheid veel nauwkeuriger dan de tot nu toe bestaande modellen.

Een andere minder bekende configuratie voor interferometrie is die waarbij de 2 antennes niet naast elkaar maar achter elkaar worden opgesteld. Nu ontstaat de mogelijkheid om snelheden te meten. Deze methode staat momenteel zeer in de belangstelling en wordt dikwijls aangeduid met de benaming grond-waarneming. Een belangrijke mogelijke toepassing is die van grensbewaking, bijvoorbeeld in vredes- en crisisbeheersings operaties. Met een grondwaar-neemsysteem is in het SAR beeld een overzicht te verkrijgen van het terrein en alle aanwezige infrastructuur en stilstaande voertuigen, terwijl het Moving Target Indicator (MTI) kanaal daar de bewegende voertuigen aan toevoegt. Deze laatste zijn in het normale SAR beeld niet zichtbaar.

Figuur 7: PHARUS SAR+MTI beeld, opgenomen van de snelweg A-12 ter hoogte van Zoetermeer.

Een voorbeeld van een simultaan gemeten SAR en MTI beeld, wederom opgenomen met de Nederlandse experimentele PHARUS (Phased Array Universal SAR) radar is weergegeven in figuur 7. De opname toont de snelweg A-12 nabij Zoetermeer. Een aantal voertuigen is met behulp van de MTI mode weergegeven in het radarbeeld. De door de radar gemeten snelheid is voor ieder

voertuig vermeld. Deze meting is dus geschied vanuit een vliegtuig op grote afstand in slechts enkele seconden voor alle voertuigen tegelijkertijd.
De maximum snelheid ter plekke is 120 km per uur. Een voor de hand liggende toepassing zou kunnen ontstaan, als de radar in staat zou zijn nummerborden uit te lezen. Voor de hardrijders onder u geldt de geruststelling dat dit met de huidige stand van de techniek niet mogelijk is en voorlopig ook niet waarschijnlijk lijkt.

Naar verwachting zal grondwaarneming nog voor het einde van deze decade op grote schaal worden toegepast door o.a. de NAVO in haar vredesoperaties. Voor de ontwikkeling van deze methode is een groot Europees project opgezet, dat SOSTAR heet. Dit is een afkorting voor Stand Off Surveillance and Target Acquisition Radar. De beperkingen van grondwaarneming worden opgelegd door diverse factoren. Ik noem:
- de beperkte doorlaatbaarheid van bomen en struiken voor de gebruikte radarstraling,
- de marginaal voldoende resolutie van de beschikbare radarsystemen, alsmede de complexiteit en omvang daarvan,
- de nog beperkte doelvolg mogelijkheden in de zogenaamde track-while-scan MTI mode en
- de beperkte classificatie en identificatiemogelijkheden.

Dit alles maakt dat er nog veel werk aan de winkel is. Het onderzoek zal zich zowel op radarsystemen en de componenten daarvan moeten richten als op de algoritmen voor de signaalverwerking. De gebruiker van het toekomstige systeem, dat thans nog ontwikkeld moet worden, zou liefst nu al de daaropvolgende, beter presterende generatie tot zijn beschikking hebben.

Dames en Heren,

Ik heb u een aantal voorbeelden van huidige toepassingen en ontwikkelingen op het vakgebied van radaraardobservatie laten zien. Maar het zal duidelijk zijn dat de ontwikkeling van toepassingen hand in hand gaat met de ontwikkeling van de radar systemen en de signaalverwerking. En daarbij speelt de algemene stand van ontwikkeling der techniek een belangrijke rol. Ik wil daarom eerst even kort terugblikken in de geschiedenis alvorens de huidige stand van zaken en de mogelijke toekomstige ontwikkelingen aan te geven. Met opzet kort, omdat Prof. Krul vanmorgen in het symposium over aardobservatie al een uitstekend overzicht heeft verzorgd.

Geschiedenis

In mijn inleiding heb ik u al gemeld dat de radar kort voor de tweede wereldoorlog is uitgevonden. Daarbij is gewezen op de toepassing van het op grote afstand vroegtijdig detecteren van vliegtuigen, d.w.z. ruim op tijd om tegenmaatregelen te kunnen nemen. Echter al spoedig werden ook andere toepassingen ontwikkeld. Technologische doorbraken maakten het magnetron mogelijk, de hoogvermogen oscillatorbuis die vandaag de dag vooral in het huishouden wordt toegepast. Deze buis die voldoende vermogen kon opwekken op hoge frequenties, maakte het mogelijk om met kleine ronddraaiende antennes de omgeving af te tasten. Dit principe vond z'n weg naar de huidige scheepsradar en havenradar systemen, maar werd ook toegepast in vliegtuigen om bij nacht en boven de wolken vliegend een beeld van de grond onder en rondom het vliegtuig te maken. Hoewel de resolutie zeer grof was, bleek dit toch een praktisch hulpmiddel bij de navigatie. Het gaf de gebruiker het gewenste overzicht. Hiermee was de eerste stap gezet op weg naar de radaraardobservatie.

Figuur 8: Q-band (8 mm) SLAR beeld van de Noordzee nabij Hoek van Holland, opgenomen in 1969. Met dit aan beide vliegtuigzijden simultaan opgenomen beeld werd de weergave van zeebodemtopografie met radar ontdekt door Dr. G.P. de Loor van het toenmalige Physisch Laboratorium RVO-TNO. De zandgolven zijn zichtbaar als donkere en lichte schuine strepen in het bovenste deel, die naar veel later bleek, overeenkomen met de onderwater duintoppen.

Niet veel later werd in een poging om de resolutie te verbeteren de draaiende antenne weer vervangen door een of twee vast aan het vliegtuig gemonteerde antennes. Deze antennes waren tamelijk lang en werden zijwaarts gericht. Het resultaat, de Side Looking Airborne Radar (SLAR) is in de daaropvolgende jaren verder ontwikkeld. Na de jaren 80 nam het gebruik door de opkomst van de SAR af, met uitzondering van de toepassingen die geen hoge resolutie vereisen. De SLAR beelden die werden vervaardigd waren van zeer goede kwaliteit. De beelden werden vastgelegd op fotogevoelige film, die soms direct in het vliegtuig ontwikkeld en weergegeven werd, zodat bijna real-time weergave mogelijk was. In het begin van het digitale tijdperk werd real-time verwerking op beeldschermen al vrij snel mogelijk, omdat het voordeel van SLAR is, dat er weinig rekenwerk voor de beeldvorming nodig is. In Nederland is er met dit type radar veel ervaring opgedaan voor diverse toepassingen, voornamelijk voor civiele remote sensing (zie figuur 8). Heden ten dage wordt door Rijkswaterstaat een SLAR operationeel ingezet voor kustbewaking en voor het opsporen van olievlekken op de Noordzee. Een ontwikkeling die een direct gevolg is geweest van het in Nederland verrichtte onderzoek.

Zoals reeds eerder aangegeven kan het SAR principe gebruikt worden om het nadeel van de met de afstand verslechterende resolutie te overkomen. Het SAR principe stamt van de beginjaren vijftig. De coherente, dus fasesynchrone opwekking, verwerking en opslag van hoogfrequente signalen was in die tijd erg hoog gegrepen en vertoonde dientengevolge ook vele onvolkomenheden. Ook de verwerking tot radarbeelden was geen eenvoudige opgave. Dit alles gebeurde langs optische weg met coherente data opslag op fotogevoelige film en optische apertuursynthese met lenzenstelsels. De opkomst van digitale data opslag en –verwerking in de jaren '60 en '70 en de verfijning daarvan in de jaren '80 en '90 hebben geleid tot het huidige hoge kwaliteitsniveau van de beelden. De gedegen aanpak van de signaalverwerking, waarbij ieder bekend effect gecorrigeerd wordt en desondanks snelle soms zelfs real-time gegevens-verwerking mogelijk is, heeft in hoge mate bijgedragen aan het thans bereikte kwaliteitsniveau.

Huidige situatie

De ontwikkelingsfase waarin de radaraardobservatie thans is beland wordt grotendeels gekenmerkt door toenemende complexiteit en ook flexibiliteit van het radar systeem. De digitale aansturing en de digitale gegevensverwerking bepalen in belangrijke mate de mogelijkheden van hedendaagse systemen.

Merkwaardig genoeg is daarbij langzamerhand een situatie bereikt waarin de vernieuwingen in de radarsystemen niet altijd tot voor de gebruiker duidelijke prestatieverbeteringen leiden. Wel zal naar verwachting de prijs van radarsystemen kunnen dalen door de steeds verder oprukkende integratie door de toepassing van o.a. microgolf geïntegreerde circuits. Deze ontwikkelingen worden vooral gedreven vanuit de telecommunicatie. Dit is een vakgebied met een veel grotere omvang en een veel groter marktbelang. Door gebruik te maken van de daar optredende trends kan toch geprofiteerd worden van de nieuwste technologische ontwikkelingen.

Een voorbeeld van een modern radarsysteem, dat gebruik maakt van MMIC's in de aktieve phased array antenne, is de Nederlandse PHARUS SAR. Dit experimentele systeem voor onderzoekdoeleinden is al weer 5 jaar geleden tot stand gekomen door intensieve samenwerking van het Fysisch en Elektronisch Laboratorium TNO (TNO-FEL), het Nationaal Lucht- en Ruimtevaart laboratorium (NLR) en de Technische Universiteit Delft (TUD). Het is in figuur 9 te zien onder de Cessna Citation van de TUD en het NLR. Als inzet is de phased array antenne en een Transmit/Receive (T/R) module weergegeven.

Figuur 9: Het Nederlandse PHARUS C-band polarimetrische phased array SAR systeem.

In dit systeem zijn destijds de nieuwste ideeën over SAR verwerkt, zoals polarimetrie en phased array antenne technologie voor MTI toepassingen. Alvorens het te bouwen is een SAR testbed gebouwd, teneinde de benodigde kennis en ervaring op te doen voor de realisatie van een zo complex systeem. De ideeën hiervoor zijn al in 1985 – 1986 ontwikkeld en gepubliceerd in een rapport dat werd geschreven voor de Beleids Commissie Remote Sensing (BCRS).
Echter in de afgelopen jaren zijn de techniek en het onderzoek niet stil blijven staan. Het wordt derhalve tijd voor een stap naar de volgende generatie SAR in Nederland. Immers indien het onderzoek niet gebruik kan maken van de modernste inzichten en ontwikkelingen, zal het achterop raken. Dat zou jammer zijn van de voorsprong en van het aanzien dat met het PHARUS programma is opgebouwd.

Toekomst

Belangrijke ingredienten voor toekomstige radarsystemen worden aangeleverd door de technologische ontwikkelingen. Daarbij valt te denken aan miniaturisatie van componenten, verder oprukkende digitalisering in de radar, waarmee zij bedoeld dat de omzetting van het analoge radarsignaal in digitale, voor computerverwerking geschikte informatie in het radarsysteem steeds dichter bij de antenne komt te liggen. Miniaturisatie kan leiden tot kleine goedkope, volledig geïntegreerde SAR systemen, zo ongeveer als een moderne digitale videocamera, ik noem dat wel de "handheld SAR camcorder". Dergelijke ontwikkelingen zijn van belang voor allerlei toepassingen in het low-cost segment van de markt en voor toepassing op kleine, onbemande vliegtuigjes.

De toepassing van microgolf geïntegreerde schakelingen noodzaakt tot een zekere standaardisatie in radarsystemen, bijvoorbeeld bij de T/R modules. Door uit te gaan van een basisbouwsteen voor radar antennestelsels onstaat een schaalbare antenne technologie, een nog verder te ontwikkelen ontwerp-methode waarbij systemen van verschillende afmetingen en voor verschillende toepassingen gebaseerd kunnen worden op dezelfde bouwstenen.
Daarmee komen prijsverlagingen opnieuw in zicht. Voor dé gebruiker is dit zeer belangrijk, omdat vele ontluikende toepassingen op dit moment in de kiem gesmoord worden vanwege de te hoge kosten van radarsystemen.

Onderzoek

Het onderzoek dat in het kader van de nieuwe leerstoel zal worden verricht dient aan te sluiten op de hiervoor gesignaleerde trends. De inzet van beschikbare en nog te ontwikkelen flexibele, programmeerbare radar systemen is hierbij noodzakelijk. Het ligt niet in de bedoeling om binnen het bestek van de leerstoel complete systemen voor SAR, MTI en andere technieken te ontwikkelen, maar wel is het zinvol om bij het vernieuwende onderzoek naar onderdelen van zulke systemen gebruik te maken van de sterktegebieden van het International Research Centre for Telecommunications-transmission and Radar (IRCTR) op het gebied van radar.
Met name Frequency Modulated Continuous Wave (FM-CW) systemen lijken daarbij veelbelovende kandidaten te zijn. Door hun eenvoud zijn FM-CW systemen in principe goedkoop te realiseren, maar de toepassing als vliegtuig radar is nog nauwelijks onderzocht. Met het oog op de gewenste miniaturisatie en verhoging van resolutie in toekomstige SAR systemen is onderzoek naar de toepassing van het FM-CW principe van groot belang. Daarbij is niet alleen het systeemontwerp aan de orde, maar dient ook aandacht geschonken te worden aan de signaalverwerking, die principieel anders verloopt bij dit type radarsystemen.

De reeds aangeduide schaalbare antennetechnologie en miniaturisering zijn onderwerpen voor onderzoek, dat sterk verband houdt met technologie onderzoek en systeemontwikkeling. De kennis van Monolithic Microwave Integrated Circuits (MMIC) ontwerp en ontwikkeling bij TNO en bij de TUD komen hier goed van pas en dienen in de activiteiten van de leerstoel te worden betrokken, evenals de samenwerking met andere universiteiten en Delft Institute for Micro Electronics and Submicron technology (DIMES). Ontwerpen voor nieuwe SAR systemen zullen steeds meer gebruik maken van dergelijke geïntegreerde bouwstenen.
Een element dat nog veel aandacht dient te krijgen is de efficiency van de MMIC's. Het zendvermogen moet bij radarsystemen dikwijls hoger zijn dan in de meeste communicatie toepassingen wordt vereist en dat stelt hoge eisen aan de efficiency van de schakelingen. Immers de stroomopname en warmte afgifte moeten tot een minimum beperkt blijven. De thans nog noodzakelijke vloeistofkoeling moet het liefst verdwijnen.

Goed op de toepassing afgestemde bouwstenen die nu nog fl 40.000,- per stuk kosten zullen in de toekomst in prijs dalen tot minder dan fl 1000,-. In die situatie zijn zeer kosteneffectieve hoogwaardige radar systemen te bouwen.

Deze zullen de gevestigde techniek van een mechanisch beweegbare antenne en een centrale elektronenbuis voor de vermogensopwekking doen verdwijnen.

Ontwikkelingen op het gebied van de telecommunicatie zijn in principe bepalend voor de mogelijkheden, gelet op de enorme marktomvang daarvan. Een goed voorbeeld hiervan is te vinden in figuur 10. De reeds ontworpen onderdelen van de hier getoonde, voor communicatiedoeleinden bedoelde Ka-band T/R module zijn herbruikbaar voor bijvoorbeeld een miniatuur vliegtuig radarsysteem. Hiermee kan een kleine, compacte mm-golflengte SAR-MTI radar voor een Unmanned Air Vehicle (UAV) ontwikkeld worden. Dit zou goed aansluiten bij de behoeften van Defensie, waar de Landmacht over een kleine UAV, de Sperwer beschikt.

Figuur 10: Onderdelen van een Ka-band T/R module voor communicatie doeleinden. Verscheidene functies zijn reeds ontworpen in MMIC technologie. Deze kunnen worden hergebruikt voor radartoepassingen.

Figuur 11: Dijkafschuiving, hier getoond in 1997 bij Heukelum, kan nauwkeurig in omvang bepaald worden, indien de daarvoor geschikte multipass interferometrie methode verder wordt ontwikkeld.

Een derde element dat zeker niet onvermeld mag blijven in een visie op het onderzoekprogramma voor de toekomst is de toepassingskant van het vakgebied. Polarimetrie en interferometrie zijn reeds uitgbreid aan de orde gekomen en daarbij is duidelijk gemaakt dat voor polarimetrie nieuwe impulsen voor modelvorming en signaalbewerking ten behoeve van de aanpak van het inverse probleem van belang zijn. In het geval van interferometrie is nog zeer veel werk vereist om tot goed gedefinieerde resultaten te komen. De opnamemogelijkheden met twee antennes en multipass waarneming zijn talrijk en behoeven verdere exploratie om tot de gewenste produkten te komen op het gebied van bodemdaling en detectie van veranderingen. De reeds bestaande samenwerking tussen TNO en DEOS (Delft institute for Earth-Oriented Space research) mag hier niet onvermeld blijven. Modelvorming rondom extreem hoge resolutie afbeeldingen van objecten (bedoeld wordt resoluties van decimeters of centimeters) is noodzakelijk om tot betere classificatie en identificatiemogelijkheden met radar te komen. Dit is in tegenstelling tot detectie een gebied waar radar nog niet goed scoort.

Een gek kan meer vragen stellen dan tien wijzen kunnen beantwoorden. En hoewel de gebruiker niet gek is en dikwijls eenvoudige vragen stelt, kan de beantwoording daarvan toch zeer complex zijn. Een radarsysteem, hoe goed ook, heeft slechts een beperkt aantal parameters die het kan meten en om daarmee allerlei vragen te kunnen beantwoorden blijft een moeilijke zaak. Dikwijls dienen daarom extra metingen te hulp geroepen worden, bijvoorbeeld in een ander frequentiegebied, of onder een andere invalshoek, op een ander

tijdstip of met een andere antenneconfiguratie. Om deze reden is het van belang om voor het onderzoek over een flexibel configureerbaar, modern radarsysteem te beschikken, dat modulair van opbouw is. Voor de leerstoel en voor het SAR onderzoek in Nederland dient de realisatie van een radar testbed daarom hoge prioriteit te krijgen.

Vandaag heb ik u vooral meegenomen door de wereld van de beeldvormende waarneming. Vele mogelijkheden op het gebied van niet beeldvormende en van grondgebonden radar systemen voor aardobservatie bleven onbesproken, maar worden vandaag de dag wel onderzocht en experimenteel of operationeel toegepast. Daarover vertel ik u graag een andere keer. Ze behoren wel tot het aandachts- en interessegebied van de leerstoel.

Nieuwe initiatieven dienen zich aan en zullen niet ongemerkt aan de leerstoel voorbij gaan. Een nieuwe ontwikkeling in het radaronderzoek in Nederland betreft het "Nederland Radarland" initiatief, waaraan bijgedragen zal worden door Defensie, Signaal, TNO-FEL en IRCTR. Dit krijgt zeker aandacht.

Onderwijs

Het verzorgen van onderwijs op het gebied van de radaraardobservatie is voor mij een hobby geworden. Vele malen reeds heb ik bijgedragen aan cursussen van allerlei aard, waarbij het geven van overzicht en inzicht op het gebied van radaraardobservatie centraal stond. Om onderwijs te geven aan Delftse studenten die meer nog dan mijn eerdere cursisten gemotiveerd en leergierig zijn, is voor mij iets om naar uit te kijken.
Een hogerejaarscollege zal met ingang van het nieuwe studiejaar verzorgd worden. In dat college zal in de eerste plaats een breed overzicht geboden worden van het vakgebied, waarna de student in individuele opdrachten uitgenodigd wordt zich te verdiepen in bepaalde aspecten ervan. Deze aanpak helpt mee aan de vorming van een juiste, kritische basishouding ten aanzien van nieuwe stof. De zelfwerkzaamheid is ook in de latere carrière van groot belang. Kijk maar naar de steeds verder toenemende individualisering van de maatschappij en de tendens om resultaten in korte tijd te moeten behalen. Resultaten die dienen te worden gebaseerd op de beschikbare informatie via internet en traditionele informatiebronnen.
Tevens wordt met de gevolgde aanpak voor het college de ontwikkeling van een andere eigenschap benadrukt, namelijk het geven van een presentatie; een noodzakelijke eigenschap voor de succesvolle ingenieur in de beroepspraktijk.

Verder zou ik tot de studenten willen zeggen: aarzel niet om eens te komen praten als interdisciplinaire en/of internationale samenwerking je aanstaan en als je interesse hebt in de combinatie van lucht- en ruimtevaart, fysica, radartechniek en signaalbewerking.

Samenwerking TUD – TNO-FEL

De leerstoel is tot stand gekomen door een nauwe samenwerking van TUD, in het bijzonder het IRCTR en TNO-FEL. De directie van TNO-FEL heeft zitting in de adviesraad van het IRCTR. Beide partijen verrichten vooraanstaand onderzoek op radargebied, maar het zijn geen concurrenten. Terwijl de TUD zich vooral op fundamenteel onderzoekterrein begeeft en daarbij risicovolle projecten niet uit de weg gaat, richt TNO zich meer op het toegepaste onderzoek, waarbij nieuwe ontwikkelingen gereed gemaakt worden voor toepassing in de maatschappij. TNO ondersteunt daarbij het bedrijfsleven en de industrie. Zodoende ontstaat er een keten van fundamenteel onderzoek via applicatie onderzoek naar toepassing en productie, waarin beide partijen hun eigen rol kunnen spelen. Enkele voorbeelden van deze samenwerking zijn:
- het reeds eerder genoemde PHARUS project,
- het onderzoek op het gebied van landmijnendetectie met behulp van grondradar,
- onderzoek aan de polarimetrische radarverstrooiing van het zeeoppervlak, waarbij overigens ook Signaal betrokken is,
- ontwerp en ontwikkeling van MMIC's, waarbij binnen de TU ook DIMES een rol speelt en
- het interferometrie onderzoek, waarbij wordt samengewerkt met Geodesie, Lucht- en Ruimtevaart en DEOS.

Het aanhalen van de banden tussen TNO-FEL en de TUD middels deze leerstoel zal bevorderend werken op de gewenste kennisoverdacht en samenwerking.

Dankwoord

Ik ben aan het einde gekomen van mijn betoog, maar alvorens af te sluiten, wil ik een aantal instellingen en personen bedanken voor hun bijdrage aan hetgeen ik vandaag heb mogen bereiken. Daarbij is het niet mogelijk om volledig te zijn, de pedel zou het me niet toestaan vanwege de tijd. Maar bij de ontwikkeling van een complex vakgebied komt zeer veel kijken. Dat wil en kan

je niet alleen doen. Gelukkig kreeg ik veel hulp. Allereerst en altijd vanuit TNO. De organisatie waarvan ik dacht toen ik er bijna 25 jaar geleden begon, dat ik er hooguit 3 – 5 jaar zou willen werken. Maar de ontplooiingsmogelijkheden die steeds werden geboden, gekoppeld aan opdrachten en vragen vanuit de praktijk, bleken onweerstaanbaar.
Samen met TNO boden Defensie, de BeleidsCommissie Remote Sensing en het Nationaal Instituut voor Vliegtuigbouw en Ruimtevaart mij de mogelijkheid om een programma op het gebied van radaraardobservatie uit te voeren, waar ook in het buitenland goede sier mee gemaakt kon worden. Daarvoor ben ik hen bijzonder erkentelijk.

Waarde Professor Krul, beste Leo,
jij stond aan de wieg van het PHARUS SAR programma, dat we toen nog "coherente radar" noemden. Maar bovendien heb je mij opgeleid in de microgolftechniek, niet in de laatste plaats door me de mogelijkheid te bieden als student assistent het vakgebied meer dan gemiddeld te verkennen. Je tentamens werden in ieder geval door mij gevreesd, maar het had resultaat en dat telt. Ik wil je bedanken voor onze lange samenwerking en al hetgeen je me hebt geleerd.

Waarde Doctor De Loor, beste Paul,
Jij was mede verantwoordelijk voor het Remote Sensing onderzoek in Nederland, dat in het buitenland bewonderenswaardig als de "Dutch School" bekend stond. Jij hebt me veel geleerd van de fysica van de radarwaarneming en bracht me als voorvechter van de multidisciplinaire aanpak van het remote sensing onderzoek in kontakt met vele andere disciplines en personen. Daardoor kreeg ik inzicht in de gebruikers en hun wensen, en begon ik het vakgebied te overzien.
Het zal je goed doen dat ik na een aantal jaren management ervaring te hebben opgebouwd (iets wat ik leuk vond maar waar jij niets van moest hebben) nu toch weer terugkeer naar het onderzoek en het onderwijs. Bedankt voor alles wat je hebt gedaan.

Waarde Eberwijn, beste Kees,
jouw strategisch inzicht en je doorzettingsvermogen hebben geen steentje bijgedragen maar eerder een hele fundering gebouwd. Daarop staan de poten van mijn leerstoel nu uitermate stevig. Ik bedank je voor al je inzet bij het bereiken van mijn hoogleraarspositie.

Waarde Vogel, beste Jan,
wij kennen elkaar al sinds onze studietijd en als directeur van het FEL bied je mij nu de mogelijkheid om vanuit TNO een leerstoel aan de TU Delft te bezetten. Daarvoor op zich ben ik je al dankbaar, maar ik weet zeker dat jouw inzet en je kennis van de universiteit van enorme waarde zijn geweest bij de daadwerkelijke totstandkoming van de leerstoel en dat is me nog veel meer waard. Ik wil je graag bedanken voor je kundige inzet.

Waarde Professor Ligthart, beste Leo,
ook jij hebt een enorme rol gespeeld bij de totstandkoming van de leerstoel en ik denk dat het zonder jou niet was gelukt. Maar jouw bemoeienis met mijn ontwikkeling gaat veel verder terug, want je was ooit mijn baas toen ik student assistent was en bovendien mijn afstudeermentor. Ook jou ben ik derhalve veel dank verschuldigd. Ik kijk bijzonder uit naar de komende periode waarin we opnieuw veel zullen samenwerken. Ik heb daar alle vertrouwen in, gelet op de vrijheid en zelfstandigheid die ik in het verleden bij jou heb kunnen genieten.

Waarde Van Es, beste Henk,
ik was jouw vaste plaatsvervanger als divisiehoofd Waarnemingssystemen. Jij maakte mij groepsleider van de grote groep "Radar Concepten en Signaalverwerking" en ontnam me de functie ook weer. Daar ben ik je dankbaar voor, want ik zie nu wel in, wat jij al eerder voorzag, namelijk dat deze functie niet is te combineren met het parttime hoogleraarschap aan de TU Delft.

Beste leden van de groep "Radar Concepten en Signaalverwerking",
dankzij jullie inzet en kennis op het vakgebied is vandaag iets bereikt waar we met z'n allen heel trots op mogen zijn. De samenwerking die ontstaat met de TU zal meer kennis brengen en nieuwe mogelijkheden voor toepassingsonderzoek. Jullie inzet daarbij blijft onontbeerlijk. Ik bedank allen voor de geleverde bijdragen aan het onderzoekprogramma.

Geacht College van Bestuur,
Het opstarten van een nieuwe leerstoel in een tijd die zich voor de universiteit kenmerkt door bezuiniging en teruglopende studenten aantallen in de opleiding Elektrotechniek getuigt van moed en visie. Ik dank u hartelijk voor het in mij gestelde vertrouwen en aanvaard gaarne de opdracht voor de leerstoel radaraardobservatie.

Lieve Victorine en Michiel,
dat ik een bezige bij ben, wisten jullie al langer, maar de afgelopen tijd was het wel heel erg. Ik denk echt dat dat wel weer beter wordt, ook al zullen jullie nu glimlachen om die uitspraak.
Victorine, jij bent vandaag voor de tweede keer officieel in de aula. De eerste keer was toen wij trouwden op mijn afstudeerdag. In de tussentijd hebben we veel meegemaakt en heb jij heel veel voor me gedaan en betekend. Als vrouw word je daar privé wel eens voor bedankt, maar nooit officieel. Dat doe ik dan bij deze. Het valt me vreemd en jou waarschijnlijk ook. Jij blijft me gelukkig altijd als Peter zien, jouw P.P.tje, zoals ik al jaren heet. En nu ik vandaag een toga draag, betekent dat volgens jou Pinguin Peter.
Michiel, het zij je vergeven dat je Informatietechnologie studeert aan een concurrerende universiteit. Mijn vader vond ook niet dat ik in zijn voetsporen moest treden. En ik ben blij met je studierichting, want als veeleisende vader op IT gebied kan ik gelukkig altijd bij jou terecht "als 'tie het niet doet". Bedankt daarvoor.

Lieve familie en vrienden,
Het doet me goed dat jullie er zijn. Jullie betekenen heel veel voor me en dat wil ik vooral zo houden, ondanks de drukte van de afgelopen tijd. En hoewel sommigen van jullie misschien wat vreemd tegen mijn outfit aankijken, kan ik verzekeren dat er niets verandert en ook dat ik mijn toga thuis niet draag.

Slot

Ik heb getracht u in kort bestek een overzicht te geven van mijn vakgebied, de Radaraardobservatie. U bent de gebruiker en bepaalt uiteindelijk de toekomst van dat vak, ik kan slechts de opties aandragen en ontwikkelen. Ik spreek de wens uit, dat deze leerstoel helpt uw overzicht van de wereld te vergroten.

Ik heb gezegd.

Referenties

Boerner, W. M. et al., 1992, *Direct and Inverse Methods in Radar Polarimetry,* NATO ASI Series, Kluwer Academic Services.

Broek, A.C. van den, P. Hoogeboom and M. van Persie, 1998, "Multi-sensor remote sensing for military cartography", in *Proc. IGARSS*, Seatlle, USA.

Greidanus, H., C. Calkoen, I. Hennings, R. Romeiser, J. Vogelzang, G.J. Wensink, 1997, "Intercomparison and validation of bathymetry radar imaging models", in *Proc. IGARSS '97*, 3-8 August 1997, Singapore, Vol. III, p. 1320-1322.

Groot, J.S., 1991, *Introduction to Radar Polarimetry,* TNO, FEL-91-B122.

Hoogeboom, P., D. van Halsema, E. Herpfer, F. Martin, P. Fournet, D. Perthuis, 2000, "SOSTAR-X, a high performance Radar Demonstrator for Airborne Ground Surveillance", in *Proc. EUSAR 2000*, 23-25 May 2000, Munich, Germany, in the press.

Huynen, J.R., 1970, *Phenomenological Theory of Radar Targets*, Ph.D. Thesis Technical University Delft.

Koomen, P.J., M.P.G. Otten, H. Pouwels, P. Snoeij en B.C.B. Vermeulen, 1996, *PHARUS Executive Report*, BCRS 96-28, Delft.

Krul, L., P. Hoogeboom, G.P. de Loor e.a., 1986, *Voorstudie Coherente Radar*, BCRS rapport 86-03, BCRS, Delft.

Loor, G.P. de, 1981, "The observation of tidal patterns, currents and bathymetry with SLAR imagery over the sea", *IEEE J. Oceanic Engineering,* OE6, pp. 124-129.

Melief, H.W., H. Greidanus, P. van Genderen, P. Hoogeboom, 2000: "Low grazing angle sea clutter modeled by ray tracing and physical optics", in *Proc. NATO-RTO-SET Symposium "Low grazing angle clutter: Its characterization, measurement and application"*, 25-27 April 2000, Laurel, MD, USA, in the press.

Oliver, C. and S. Quegan, 1998, *Understanding Synthetic Aperture Radar Images,* Artech House.

Otten, M.P.G., 1998, "Review of SAR processing techniques", in *Proc. 28th European Microwave Conference*, Oct. 1998, Amsterdam, p. 43-50.

Rijckenberg, G.J., A.J.E. Smith, A.C. van den Broek, H. Greidanus, R.J. Dekker, J. Kogels, M.P.G. Otten, H. Landa, G.H.F.M. Hesselmans, O. Pietersen, H.W.G. Booltink, D.H. Hoekman, M.A.M. Vissers, 1998, *The PHARUS familiarization programme*, NRSP report 98-18, ISBN 90 5411 258 1

Ulaby, F.T., R.K. Moore and A.K. Fung, 1986, *Microwave Remote Sensing Active and Passive, Volume I – III,* Addison-Wesley Publishing Company.