

NRSP-2
98-26

Jos Groot

**Grondwaarneming met
Synthetische Apertuur Radar**

**A.C. van den Broek
R.J. Dekker
A.J.E. Smith
J.S. Groot**



NRSP-2 98-26



BELEIDSCOMMISSIE REMOTE SENSING

Grondwaarneming met Synthetische Apertuur Radar

A.C. van den Broek

R.J. Dekker

A.J.E. Smith

J.S. Groot

TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium

NRSP-2 rapport 98-26

NRSP-2 project 3.1/AP-02

ISBN 90 54 11 260 3

Januari 1999

Dit rapport beschrijft een project dat is uitgevoerd in het kader van het Nationaal Remote Sensing Programma (NRSP-2) onder verantwoordelijkheid van de Beleidscommissie Remote Sensing (BCRS).

Korte samenvatting

Binnen het BCRS project "Air Surveillance" (3.1/AP-2) is de rol van SAR bij grondwaarneming ten behoeve van militaire inlichtingen bestudeerd.

Om deze studie mogelijk te maken is met PHARUS meegedaan aan een meetcampagne in Groot-Brittannië waarbij opnamen gemaakt zijn van een aantal militaire voertuigen. Naast de polarimetrische PHARUS opnamen met een gemiddelde resolutie van 3 meter is ook gebruik gemaakt van hogere resolutie (< 1 meter) SAR data afkomstig van andere systemen dan PHARUS.

Met behulp van deze data is detectie en herkenning van doelen met SAR onderzocht en ge-evalueerd. Tevens is het gebruik van SAR data voor het interpreteren van het terrein bestudeerd. Daarnaast is ook bekeken hoe een SAR operationeel ingezet kan worden en hoe de SAR sensor zich verhoudt tot andere beeldvormende sensoren zoals met name thermisch infrarood en moving target indication (MTI).

Concluderend kan gezegd worden dat SAR vooral een sterke operationele sensor is, die ingezet kan worden bij bewolking, mist en ook s' nachts.

Voor het detecteren van doelen is een resolutie van 2-3 meter voldoende. Om doelen te herkennen heeft men hogere resoluties nodig, in de orde van 0.5 meter. Hierbij blijft de herkenning beperkt tot de vorm en richting van bijvoorbeeld een voertuig omdat de herkenning van details niet zonder meer mogelijk is. Wanneer men een doel wil identificeren zal voldoende informatie vooraf aanwezig moeten zijn, dan wel achteraf ingewonnen moeten worden. In het laatste geval kan de informatie afkomstig van de SAR gebruikt worden om de inwinning te sturen.

Voor wide area surveillance waarbij terrein interpretatie belangrijk is, is een polarimetrische SAR een groot voordeel.

Een combinatie van SAR met een MTI sensor is bijzonder sterk voor bewaking (surveillance) omdat dan zowel stilstaande (SAR) als bewegende (MTI) doelen gedetecteerd kunnen worden.

Deze studie is uitgevoerd door het TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium. Het opnemen van data met PHARUS is gedaan in samenwerking met het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium. De organisatie van de meetcampagne is gedaan door de NATO werkgroep RSG 20 "Military Applications of Millimetre-wave Imaging", waarvan Nederland deel uitmaakt.

Samenvatting

Dit rapport geeft de resultaten weer van het BCRS project 3.1/AP-2 'Air surveillance'. De titel 'Air surveillance' staat hier in het kort voor: air-to-ground surveillance, oftewel waarnemingen van de grond met luchtgebonden sensoren. Surveillance betekent letterlijk bewaken, maar we zullen hier in dit rapport ook verkenning (reconnaissance) en doelopsporing (target acquisition) in beschouwing nemen. We richten ons hier op beeldvormende sensoren en dan vooral die sensoren waarbij nieuwe technieken nodig zijn, zoals TIR (thermisch infrarood) en in dit geval vooral SAR (synthetische apertuur radar). SAR is interessant omdat deze operationeel sterk is: bij bewolkte weersomstandigheden, rook, mist, smog en 's nachts kan altijd waargenomen worden. TIR sensoren zijn militair interessant omdat deze goed menselijke activiteiten en 'man-made' objecten, zoals voertuigen en gebouwen, kunnen waarnemen.

Achtergrond

Binnen de Nederlandse krijgsmacht wordt in toenemende mate gebruik gemaakt van moderne sensoren. Dit heeft enerzijds te maken met de verandering van de taak van de krijgsmacht waarin niet alleen voorbereid wordt op een optreden in een grootschalig conflict zoals in de koude oorlog, maar ook in crisis situaties. In de koude oorlog was de informatie voorziening vooral een aangelegenheid van de NATO als geheel, waarbij de informatie inwinning over perioden van jaren goed was voorbereid en toegespitst op deze ene situatie. Tegenwoordig kan de Nederlandse Krijgsmacht betrokken raken bij kleinere maar onvoorspelbaarder conflicten (bijvoorbeeld in Joegoslavië) waarbij men vaak verantwoordelijk is voor de eigen inlichtingenbehoefte, die vaak in een korte tijd ingewonnen moet worden.

Anderzijds maakt de technologische ontwikkeling van nieuwe sensoren, zoals beeldvormende, en andersoortige elektronische, maar ook akoestische, zowel in de lucht als op de grond, het mogelijk om deze sensoren in de nieuwe situaties te gebruiken. Daarbij komt de alsmaar toegenomen automatisering, die het gebruik van deze veel informatie aanleverende sensoren mogelijk maakt.

Praktische ontwikkelingen in dit verband die al binnen de Nederlandse krijgsmacht in gang zijn gezet zijn bijvoorbeeld:

1. De introductie van het 'Integrated Staff Information System (ISIS)' waarbij een netwerk van PC's, zowel in het veld als bij de staf, wordt opgezet waarmee over en weer informatie uitgewisseld wordt.
2. De aanschaf van een RPV's (remotely piloted vehicles), kleine vliegtuigen die een CCD en TIR camera aan boord hebben.

Deze ontwikkelingen moeten wel plaatsvinden binnen een krijgsmacht die relatief klein van omvang is en die te maken heeft met een krimpend budget. Dit betekent dat bovengenoemde ontwikkelingen alleen kunnen plaatsvinden als deze beperkt van omvang en goedkoop (low-cost) zijn.

Doelstelling

Omdat de Koninklijke Landmacht de behoefte aan een all-time and all-weather capability voor de RPV heeft geïdentificeerd is er interesse ontstaan om een SAR op een RPV te hebben. Omdat SAR binnen de KL nog een vrij nieuw terrein is, is het nodig verschillende voorstudies te verrichten. Het doel van deze studie kan gezien worden als een algemene voorstudie, waarin de mogelijke rol van SAR in het inlichtingen proces van de KL onderzocht wordt.

Omschrijving van de werkzaamheden

We geven hier een korte omschrijving van de onderwerpen die in dit rapport aan de orde komen. In eerste instantie geven we een kort overzicht van militaire inlichtingen en

introduceren we een aantal begrippen op dit terrein. Daarna geven we een introductie van het principe van de synthetische apertuur radar en radar polarimetrie. Om deze studie mogelijk te maken is met PHARUS deelgenomen aan een meetcampagne (MIMEX) in de UK en zijn polarimetrische opnamen gemaakt van een testgebied waarin militair interessante doelen waren opgesteld. We geven een beschrijving van deze campagne en de verkregen data. Naast de PHARUS data is ook gebruik gemaakt van bestaande hoge resolutie polarimetrische SAR data van militaire doelen uit een publieke data-base in de USA. Tevens is bestaande data gebruikt van een testgebied in Nederland ten behoeve van militaire cartografie.

Met deze data wordt vervolgens onderzoek gedaan naar terrein-interpretatie met SAR. Hierbij wordt aan de hand van PHARUS data van het testgebied in Nederland terrein classificatie bestudeerd. Vervolgens bestuderen we een tweetal stappen in het proces van doelopsporing, namelijk doeldetectie en doelherkenning. We maken hierbij gebruik van PHARUS data, maar ook van hoge resolutie SAR data. Aan de orde komt tevens de operationele inzet van SAR en hoe deze zich verhoudt tot andere sensoren, zoals de thermisch infrarode lijnscanner en de moving target indicator.

Resultaten

Het verzamelen van militaire inlichtingen is een cyclisch proces dat in een aantal categorieën onderscheiden kan worden. We onderscheiden hier inlichtingen afkomstig van beeldvormende sensoren (IMINT), elektronische signalen (SIGINT), akoestische sensoren (ACINT) en mensen (HUMINT). We onderscheiden drie niveau's van inlichtingen: detectie, herkenning en identificatie. De inlichtingen kunnen betrekking hebben op wide area surveillance (groot gebied) of doelopsporing. In het eerste geval gaat het vaak om het interpreteren van terrein en het vinden (detecteren) van doelen. In het tweede geval wil men de doelen kunnen herkennen en identificeren.

SAR is een all-time en weersonafhankelijk, actief, stand-off beeldvormend radar systeem met hoge resolutie vergeleken met andere radar systemen. Door gebruik te maken van de polarisatie van de straling kunnen meerkanaals data verkregen worden, die als een kleuren beeld gepresenteerd kunnen worden. Een dergelijk meerkanaals systeem heet polarimetrisch en geeft meer informatie dan een enkelkanaals systeem. Dit is vergelijkbaar met het verschil tussen een optisch zwart-wit beeld en een kleurenbeeld.

Met PHARUS, een Nederlands C-band polarimetrisch SAR systeem, is meegedaan aan een campagne waarbij militaire voertuigen in een testgebied zijn waargenomen. De opnamen zijn gemaakt met verschillende instellingen. Zo zijn bijvoorbeeld opnamen met verschillende azimut en inkijkhoeken gemaakt. Scherende inkijkhoeken (d.w.z. grote invalshoeken: long range) blijken beter te werken voor grondwaarneming dan steile inkijkhoeken (kleine invalshoeken, short range). De range resolutie is in het eerste geval duidelijk beter dan in het tweede geval. Verder is het contrast tussen doelen en de achtergrond en tussen natuurlijke objecten onderling beter. Dit is voor een deel het gevolg van schaduwvorming bij objecten met een zekere hoogte.

Terrein interpretatie met polarimetrische data kan gedaan worden met een RGB kleuren beeld waarbij de polarimetrische kanalen in de 3 kleuren kanalen worden afgebeeld of met een PWF gefilterd beeld waarin de speckle is geminimaliseerd. Het beste is echter om een (automatische) classificatie uit te voeren waarbij thematische kleuren landgebruik klassen weergeven. Het blijkt dat bij gebruik van de standaard polarimetrische classificator vooral de totale intensiteit (total power) in het beeld de meeste informatie levert om onderscheid te maken tussen klassen. De polarimetrische informatie die vervat is in de verhoudingen tussen de polarimetrische kanalen en in de polarimetrische correlatie coëfficiënten kan vooral onderscheid maken tussen kale bodems en begroeide oppervlakken en tussen double bounce verstrooiing vooral in stedelijke gebied en andere heldere radar verstrooiing.

Doeldetectie wordt gedaan met een combinatie van filteren en toepassen van een detector. Voor het filteren van polarimetrische data blijkt het PWF (polarimetric whitening filter) het beste resultaat te geven. Voor detectie blijken CFAR (constant false alarm rate) detectoren het best te presteren. Deze detectoren zijn gebaseerd op een statistische vergelijking tussen de respons van een doel en de lokale achtergrond. De beste van deze soort blijkt de order statistics CFAR detector te zijn waarbij de voorkeur uitgaat naar de z.g. "hollow stencil" variant omdat deze bij de berekening het snelst is.

Als de resolutie hoog genoeg is (bijvoorbeeld 30 cm) zullen doelen in het algemeen meerdere pixels in het beeld beslaan. Het is dan mogelijk om de grootte en richting waarin het object of voertuig staat te bepalen. Dit niveau van herkenning heet in Engels "shape and orientation recognition". Verdergaande herkenning naar het niveau van detailherkenning is moeilijker met SAR te bereiken, ook wanneer de resolutie verder opgevoerd zou worden gezien de aard van het radar verstrooiingsproces. Wel kan polarimetrische informatie bijdragen aan extra mogelijkheden om doelen onderling te onderscheiden, dan wel om de gedetecteerde doelen te onderscheiden in werkelijke doelen en z.g. false targets. De kenmerken waarmee een doel zich van clutter kan onderscheiden zijn op te delen in polarimetrische en geometrische kenmerken. Wat de polarimetrische kenmerken betreft is gekeken naar de amplitudes van het gereflecteerde radar signaal en naar het faseverschil van het HH en VV kanaal. Beide zijn sterk verschillend voor doelen en clutter en dus bruikbaar om doelen van clutter te onderscheiden. Wat de geometrische kenmerken betreft is gekeken naar het zogenaamde neighbour number. Dit is een maat voor de compactheid van een groep gedetecteerde pixels. Gevonden is dat voor doelen de neighbour number een waarde heeft die ongeveer twee maal zo groot is als die van clutter. Het neighbour number is dus ook een bruikbaar kenmerk om doelen van clutter te onderscheiden.

Gezien de conclusie dat in het algemeen "shape" and "orientation" herkenning het best haalbare resultaat is met SAR, kan doelopsporing, die uiteindelijk moet leiden tot identificatie, het best worden uitgevoerd met meerdere sensoren. De SAR wordt ingezet in het begin van de inlichtingencyclus zodat met de verkregen informatie andere sensoren of inlichtingen bronnen effectief kunnen worden ingezet. Als voorbeeld van beeldvormende sensoren valt te denken aan hoge resolutie optische/thermische infrarode, dan wel hyper spectrale sensoren. Een andere goede combinatie met name voor het detecteren van doelen is een SAR en een MTI radar, waarbij SAR stilstaande doelen en MTI bewegende doelen kan detecteren. Bovendien kan de SAR indirect de positie nauwkeurigheid van de bewegende doelen vergroten.

Conclusies

SAR is vooral een sterke operationele sensor die ingezet kan worden bij bewolking, mist en ook s'nachts. Voor wide area surveillance waarbij terrein interpretatie belangrijk is, is een polarimetrische SAR een groot voordeel. Voor het detecteren van doelen is een resolutie van 2-3 meter voldoende. Hierbij is polarimetrie een voordeel omdat op deze manier de speckle kan worden teruggebracht wat de detectie bevordert. Om doelen te herkennen heeft men hogere resoluties nodig. Minimaal beter dan 1 meter, maar bij voorkeur beter dan 0.5 meter. Veel betere resolutie dan ongeveer 25 cm is niet mogelijk vanwege de fysische beperkingen opgelegd door de golflengte. Het niveau van herkenning dat haalbaar is, is dat van herkenning van vorm, afmeting en richting ("shape and orientation recognition"). Het herkennen van details met SAR is in het algemeen moeilijk omdat door het verstrooiing proces details niet uniek worden afgebeeld. Wel kan onderscheid gemaakt worden tussen enkelvoudige en dubbelvlaks reflecties door gebruik te maken van polarimetrie. Deze extra informatie kan gebruikt worden om het doel te karakteriseren. In het algemeen wanneer men een doel wil identificeren zal voldoende informatie vooraf aanwezig moeten zijn, dan wel achteraf ingewonnen moeten worden. In het laatste geval kan de informatie afkomstig van de

SAR gebruikt worden om de inwinning te sturen. Men kan dan als aanvulling optische of thermische infrarode sensoren inzetten. Als dit niet mogelijk is vanwege de weersomstandigheden zal men andersoortige inlichtingenbronnen moeten inzetten, bijvoorbeeld inspectie op de grond (HUMINT). Een combinatie van SAR met een MTI sensor is bijzonder sterk voor bewaking (surveillance) omdat dan zowel stilstaande (SAR) als bewegende doelen (MTI) gedetecteerd kunnen worden.

Inhoudsopgave

1.	Inleiding	7
2.	Militaire inlichtingen	9
3.	Beeldvormende radar	12
3.1	Synthetische Apertuur Radar (SAR)	12
3.2	Polarimetrie	13
4.	Beschrijving gebruikte data	18
4.1	Data uit de MIMEX campagne	18
4.1.1	PHARUS data	22
4.1.2	RAMSES Onera SAR data	32
4.2	Data uit het MSTAR programma	33
4.3	Data van het Heerde testgebied	37
5.	Terrein-interpretatie met SAR	42
5.1	Terrein classificatie	42
6.	Doeldetectie met SAR	51
6.1	Preprocessing	51
6.2	Detectoren	59
7.	Doelherkenning met SAR	66
7.1	Herkenning met polarimetrische kenmerken	66
7.2	Herkenning met geometrische kenmerken	69
7.3	Herkenning met een combinatie van polarimetrische en geometrische kenmerken	74
8.	Operationeel gebruik van SAR	82
8.1	Zelfstandige inzet van SAR	82
8.2	Combinatie van SAR met optisch en thermisch infrarode sensoren	84
8.3	SAR en bewegingsdetectie	96
8.4	Maatregelen tegen SAR	98
9.	Conclusie	100
9.1	Samenvattende conclusies	100
9.2	Algemene conclusies	101
	Referenties	102

1. Inleiding

Dit rapport geeft de resultaten weer van het BCRS project 3.1/AP-2 'Air surveillance'. De titel 'Air surveillance' staat hier in het kort voor: air-to-ground surveillance, oftewel waarnemingen van de grond met luchtgebonden sensoren. Surveillance betekent letterlijk bewaken, maar we zullen hier in dit rapport ook verkenning (reconnaissance) en doelopsporing (target acquisition) in beschouwing nemen. We richten ons hier op beeldvormende sensoren en dan vooral die sensoren waarbij nieuwe technieken nodig zijn, zoals TIR (thermisch infrarood) en in dit geval vooral SAR (synthetische apertuur radar). SAR is interessant omdat deze operationeel sterk is: bij bewolkte weersomstandigheden, rook, mist, smog en 's nachts kan altijd waargenomen worden. TIR sensoren zijn militair interessant omdat deze goed menselijke activiteiten en 'man-made' objecten, zoals voertuigen en gebouwen, kunnen waarnemen.

Achtergrond

Binnen de Nederlandse krijgsmacht wordt in toenemende mate gebruik gemaakt van moderne sensoren. Dit heeft enerzijds te maken met de verandering van de taak van de krijgsmacht waarin niet alleen voorbereid wordt op een optreden in een grootschalig conflict zoals in de koude oorlog, maar ook in crisis situaties. In de koude oorlog was de informatie voorziening vooral een aangelegenheid van de NATO als geheel, waarbij de informatie inwinning over perioden van jaren goed was voorbereid en toegespitst op deze ene situatie. Tegenwoordig kan de Nederlandse Krijgsmacht betrokken raken bij kleinere maar onvoorspelbaarder conflicten (bijvoorbeeld in Joegoslavië) waarbij men vaak verantwoordelijk is voor de eigen inlichtingenbehoefte, die vaak in een korte tijd ingewonnen moet worden.

Anderzijds maakt de technologische ontwikkeling van nieuwe sensoren, zoals beeldvormende, en andersoortige elektronische, maar ook akoestische, zowel in de lucht als op de grond, het mogelijk om deze sensoren in de nieuwe situaties te gebruiken. Daarbij komt de alsmaar toegenomen automatisering, die het gebruik van deze veel informatie aanleverende sensoren mogelijk maakt.

Praktische ontwikkelingen in dit verband die al binnen de Nederlandse krijgsmacht in gang zijn gezet zijn bijvoorbeeld:

1. De introductie van het 'Integrated Staff Information System (ISIS)' waarbij een netwerk van PC's, zowel in het veld als bij de staf, wordt opgezet waarmee over en weer informatie uitgewisseld wordt.
2. De aanschaf van een RPV's (remotely piloted vehicles), kleine vliegtuigen die een CCD en TIR camera aan boord hebben.

Deze ontwikkelingen moeten wel plaatsvinden binnen een krijgsmacht die relatief klein van omvang is en die te maken heeft met een krimpend budget. Dit betekent dat bovengenoemde ontwikkelingen alleen kunnen plaatsvinden als deze beperkt van omvang en goedkoop (low-cost) zijn.

Doelstelling

Omdat de Koninklijke Landmacht de behoefte aan een all-time and all-weather capability voor de RPV heeft geïdentificeerd is er interesse ontstaan om een SAR op een RPV te hebben. Omdat SAR binnen de KL nog een vrij nieuw terrein is, is het nodig verschillende voorstudies te verrichten. Het doel van deze studie kan gezien worden als een algemene voorstudie, waarin de mogelijke rol van SAR in het inlichtingen proces van de KL onderzocht wordt.

Indeling van het rapport en omschrijving van de werkzaamheden

We geven hier een korte omschrijving van de onderwerpen die in dit rapport aan de orde komen

In eerste instantie geven we in hoofdstuk 2 een kort overzicht van militaire inlichtingen en introduceren we aantal begrippen op dit terrein.

Daarna geven we in hoofdstuk 3 een introductie in het principe van de synthetische apertuur radar en radar polarimetrie.

Om deze studie mogelijk te maken is met PHARUS deelgenomen aan een meetcampagne in de UK en zijn verschillende polarimetrische opnamen gemaakt van een testgebied waarin verschillende militair interessante doelen waren opgesteld.

In hoofdstuk 4 beschrijven we deze campagne en de verkregen data. Daarnaast was het nodig dat de PHARUS polarimetrische data verwerkt werd. Omdat dit een nieuwe activiteit was die nodig was binnen dit project wordt hiervan in dit hoofdstuk ook verslag gedaan. Naast de PHARUS data is ook gebruik gemaakt van bestaande hoge resolutie polarimetrische SAR data van militaire doelen. Deze wordt in paragraaf 2 van dat hoofdstuk beschreven. In paragraaf 3 van hoofdstuk 4 geven we tenslotte een overzicht van de overige data die voor dit project gebruikt is.

Vervolgens wordt in hoofdstuk 5 terrein-interpretatie met SAR besproken aan de hand van PHARUS data. Hier wordt een studie verricht naar voornamelijk terrein classificatie.

In hoofdstuk 6 wordt doeldetectie met SAR besproken, waar studie wordt verricht naar verschillende filters en detectie methoden voor SAR.

In hoofdstuk 7 wordt doelherkenning bekeken door gebruik te maken van hoge resolutie SAR data.

In hoofdstuk 8 wordt de operationele inzet van SAR bekeken en hoe deze zich verhoudt tot andere sensoren, zoals met name thermisch infrarood en MTI. Tenslotte geven we in hoofdstuk 9 onze conclusies weer.

2. Militaire inlichtingen

We geven hier een overzicht van het militaire inlichtingen proces binnen de Koninklijke Landmacht in globale termen [zie ook Landmachtstaf 1996].

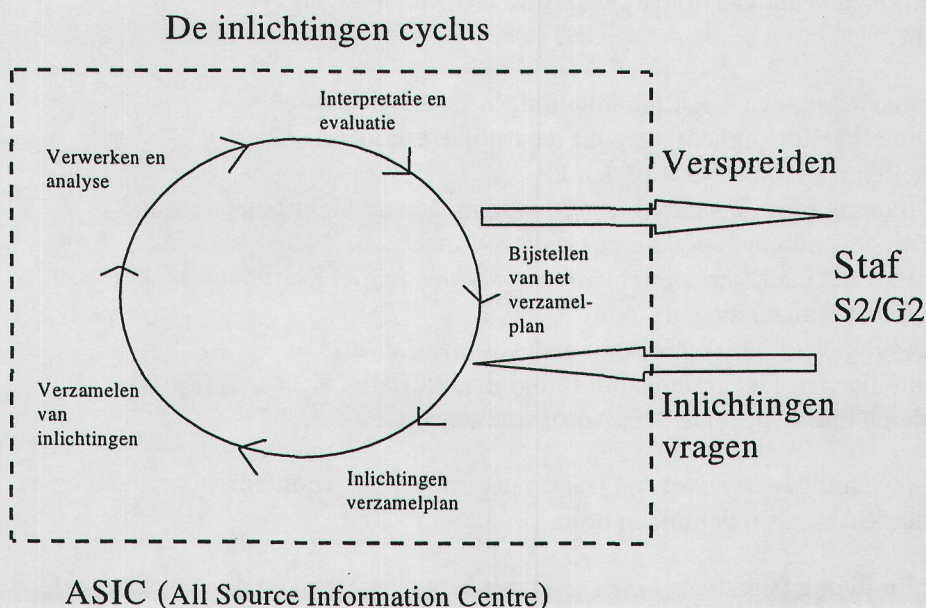
Binnen de Koninklijke Landmacht werkt men op verschillende niveaus. Zo kan men onderscheid kunnen maken tussen het Legerkorps, de divisie, brigades en bataljons, waarbij de volgorde is gerangschikt van hogere naar lagere eenheid. Zo bestaat een divisie bijvoorbeeld uit 4 brigades en een brigade weer uit 4 bataljons. De omvang van de Koninklijke Landmacht is beperkt tot één divisie die gezamenlijk met een Duitse divisie het Nederlands/Duits (NL/GE) Legerkorps vormt. In het algemeen kan gezegd worden dat hoe hoger het niveau hoe algemener (globaler) er gewerkt wordt.

De taken binnen een eenheid worden verdeeld over verschillende secties. Zo wordt er onderscheid gemaakt tussen de S1/S2/S3/S4, waarbij de sectie S1 zich bezighoudt met het personeel, de sectie S2 met de inlichtingen, S3 met de operaties en S4 met de logistiek. Op divisie niveau en hoger worden deze secties G1/G2/G3/G4 genoemd.

De taken voor deze secties worden gecompliceerder naar mate het niveau hoger wordt. Dit hangt tevens samen met het gebied waarvoor men verantwoordelijk is. Zo verschuiven de afmetingen van het gebied waar men de inlichtingen voor moet verzamelen van ruwweg 10, 40, 100 en 150 km voor respectievelijk het bataljon, brigade, divisie en legerkorps niveau.

In operationele situaties zullen door de commandant z.g. kernvragen (in Engels: Priority Intelligence Requirements oftewel PIRs) worden geformuleerd. Deze vragen moeten zo spoedig mogelijk beantwoord worden door de S2 staf. Op divisie niveau en hoger is het inlichtingen proces dermate gecompliceerd dat er ter ondersteuning van de S2/G2 een ASIC ('All Source Information Centre', soms ook kort 'Intelligence Cell') kan worden opgezet met een CCIRM (collection co-ordination and intelligence requirements management). Het concept ASIC moet door de KL overigens nog definitief vorm worden gegeven.

Het inlichtingen proces heeft een cyclisch karakter waarbij op basis van de kernvragen inlichtingen verzameld, ge-evalueerd, verspreid, en weer verder verzameld worden. Dit proces is in figuur 2.1 weergegeven in de inlichtingencyclus. Deze cyclus is een proces dat binnen het ASIC plaatsvindt, waarbij de inlichtingen-behoefte en verspreiding van de inlichtingen de verantwoordelijkheid blijft van de S2 staf.



Figuur 2.1: Inlichtingen cyclus en het ASIC.

Vaak ook wordt de cyclus breder gezien door de verspreiding naar en de inlichtingen-vragen van de G2/S2 in de cyclus op te nemen. De cyclus binnen het ASIC kan dan als subcyclus van deze grotere cyclus beschouwd worden.

Als het gaat om militaire inlichtingen dan zullen deze antwoord moeten geven op een drietal vragen: hoe is het **terrein** en het **weer** van invloed op het uitvoeren van de opdracht en hoe ziet de **dreiging** er uit. De aard van de dreiging hangt af van het **scenario**. Bij een **grootschalig** conflict, zoals die verwacht werd in de koude oorlog, zal de dreiging (vijand) van één kant komen. In een **crisis situatie**, zoals de vredesmissie in Bosnië, kan de dreiging van alle kanten komen door de verschillende partijen waar men tussenin zit.

Inlichtingen kunnen betrekking hebben op **verkenning** (reconnaissance) of **bewaking** (surveillance). In het eerste geval is men typisch de situatie in kaart aan het brengen. In het tweede geval let men vooral op wat er gebeurt of verandert (change detectie). De verkenning/bewaking kan betrekking hebben op een groot gebied. Men spreekt dan ook wel van **wide area surveillance**.

Onder militaire inlichtingen wordt ook **doelopsporing** verstaan waarbij het gaat om informatie omtrent doelen die men moet uitschakelen (door de artillerie) of moet inspecteren. Dit vereist in het algemeen detaillistische en precieze informatie, vaak betrekking hebbend op een beperkt gebied in tegenstelling tot wide area surveillance.

Men onderscheidt in deze context drie niveaus van informatie: **detectie**, **herkenning** en **identificatie**. In het algemeen gezegd heeft men in het eerste geval "doelen" gezien, in het tweede geval weet tot welke klasse of type het doel behoort (vrachtwagen, tank etc.) en in het laatste geval weet men het type, maar ook welke bedoeling de tegenpartij heeft met het doel. Wil men tot actie overgaan (bijvoorbeeld gebruik van de artillerie) dan zal het doel zeker geïdentificeerd moeten zijn.

Bij de informatie die men verkrijgt wil men ook graag weten of deze kwalitatief voldoende is. Deze karakterisering van de inlichtingen wordt o.a. gegeven door de termen actualiteit, nauwkeurigheid en volledigheid. Het zal duidelijk zijn dat in een dynamisch gebeuren als een conflict de actualiteit van groot belang is. Nauwkeurigheid en volledigheid hebben invloed op de conclusies die men kan trekken. Wanneer de inlichtingen onvoldoende volledig en nauwkeurig zijn (bijvoorbeeld herkenning terwijl identificatie vereist is) zal dit aanleiding geven tot het verder verzamelen van inlichtingen (d.w.z. de inlichtingen cyclus wordt wederom doorlopen).

Bij militaire inlichtingen kan men 4 soorten inlichtingen onderscheiden:

HUMINT (human intelligence), inlichtingen uit menselijke bronnen.

SIGINT (signal intelligence), onder te verdelen in

COMINT (communications intelligence), inlichtingen uit elektromagnetische communicatie-uitzendingen of communicatie systemen.

ELINT (electronic intelligence), inlichtingen afkomstig uit electromagnetische niet-communicatie-uitzendingen.

ACINT (acoustic intelligence), inlichtingen uit akoestische bronnen

IMINT (imagery intelligence), inlichtingen uit fotografische, radar, electro-optische, thermische infrarode en multi-spectrale beeldvormende sensoren.

In dit rapport zullen we ons beperken tot de laatste categorie en ons voornamelijk richten op beeldvormende radar (SAR) als inlichtingen bron.

In het geval van een militaire operatie zal men eerst inlichtingen gebruiken die al verzameld zijn. Dit proces heet **intelligence preparation of the battle field** in geval van een conflict waarin daadwerkelijk gevochten zal worden. Deze inlichtingen, de z.g. **basic intelligence**,

hebben bijvoorbeeld betrekking op het klimaat, de geografie, etnische eigenschappen van de bevolking etc. Daarnaast zal er behoefte bestaan aan actuele informatie die vaak niet direct voor handen is. Als men deze inlichtingen zelf moet verzamelen, omdat men die niet krijgt van het hogere echelon dan wel als het gebied onder de eigen inlichtingen verantwoordelijkheid valt, zal men gebruik moeten maken van bovengenoemde inlichtingen bronnen. In het geval men aangewezen is op 'IMINT' dan zal men moeten kiezen welke sensor men gaat inzetten. Een van de belangrijkste redenen om SAR te gebruiken in het inlichtingen proces is het sterk operationele karakter van dit sensor type.

We zetten deze **voordelen** hier nog eens op een rijtje.

1. Actieve sensor; levert ook 's nachts beelden.
2. Kijkt door bewolking, mist en rook heen.
3. Stand off te gebruiken.
4. Makkelijk groot gebied (grote zwade) te inspecteren.

Er zijn vergeleken met andere beeldvormende sensoren ook **nadelen**:

1. Beperkte mogelijkheden tot herkenning (voornamelijk "shape" and "orientation", zie hoofdstuk 7).
2. Complexe verwerking en interpretatie.
3. Valt op omdat de sensor straling uitzendt.

Voor doelopsporing is het noodzakelijk tot identificatie te komen en dus om details waar te nemen. Omdat het met SAR niet goed mogelijk is tot detail herkenning te komen (zie hoofdstuk 7) zal meestal een verdere inlichtingen behoefte ontstaan. Dit betekent dat de inlichtingen cyclus verder doorlopen zal moeten worden. De informatie echter die SAR heeft verschaft is in dit geval sturend (cueing): men weet nu beter waar men verder moet zoeken.

Doordat de SAR informatie levert op algemeen niveau (detectie en "shape" en "orientation" herkenning) past deze sensor in de militaire organisatie structuur beter bij de hogere eenheden zoals divisie en legerkorps, waar algemener gewerkt wordt dan bij de lagere eenheden. Daarnaast is een SAR sensor naar verhouding groot en de verwerking van de data complex, zodat er een relatief grote infrastructuur nodig is omdat deze sensor in te zetten. Dit kan alleen bij hogere eenheden.

3. Beeldvormende Radar

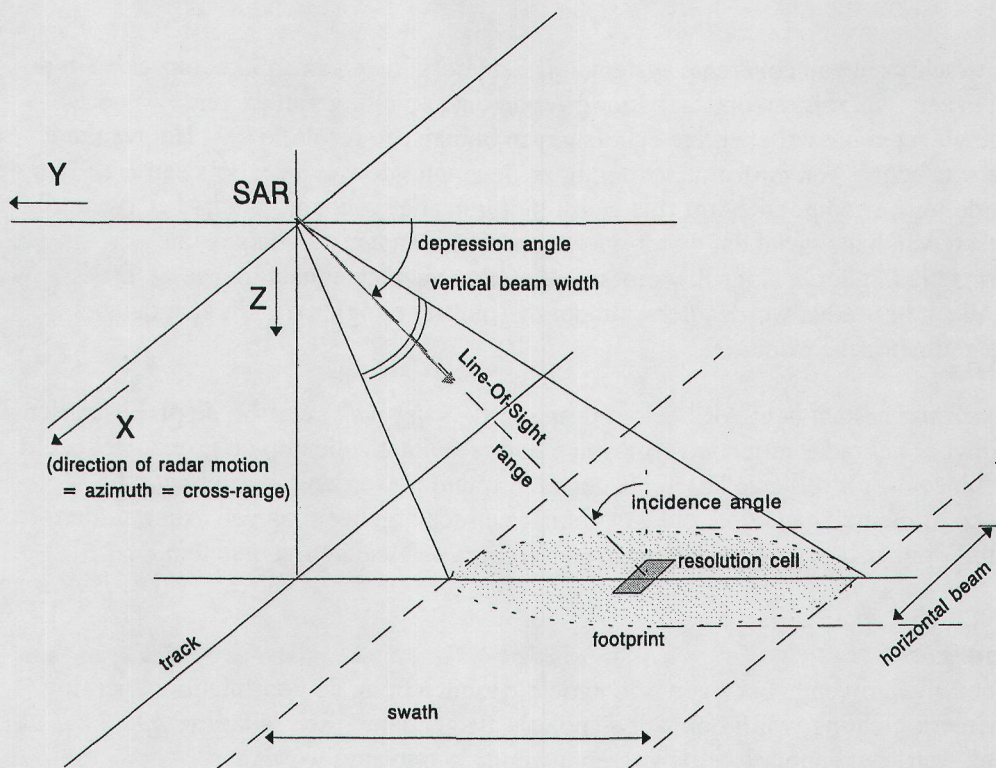
Er zijn verschillende beeldvormende radar systemen, zoals PPI (plan position indicator) gebruikt bij navigatie en SLAR (side looking airborne radar). Deze laatste heeft als nadeel dat een zeer lange antenne nodig is om hoge resolutie te verkrijgen zoals gewenst is bij militaire toepassingen. Daarom wordt tegenwoordig alleen SAR (synthetische apertuur radar) voor militaire toepassing beschouwd. Deze sensor heeft als voordeel een hoge resolutie terwijl de sensor relatief compact is.

3.1 Synthetische Apertuur Radar (SAR)

SAR is een radar op vliegend platform (vliegtuig of satelliet) die door zijwaarts radar straling uit te zenden een beeld opbouwt. SAR valt in de categorie van coherente radars, waarbij pulsen worden uitgezonden en waarbij tijdens de ontvangst van de echo zowel de amplitude (intensiteit) als de fase gemeten wordt.

De radar belicht door middel van de bundel een stuk van de grond zijwaarts van het platform. Door de beweging van het platform wordt een continue strook belicht die zwade (swath) genoemd wordt.

Na processen wordt de strook opgedeeld in resolutie cellen. In figuur 3.1 is er een afgebeeld. Het karakteristieke kenmerk van SAR is de hoge resolutie van de beelden. Het resultaat is een beeld bestaande uit pixels net zoals bij een digitale luchtfoto.



Figuur 3.1: SAR Geometrie.

Om hoge resolutie loodrecht op de richting van de beweging (range richting) te bereiken is een zeer kort durende puls nodig. In plaats van een zeer kort durende puls met een hoog piekvermogen uit te zenden wordt een langere gecodeerde puls met een lager piekvermogen uitgezonden. In de processing wordt de code zodanig vertaald dat men weer de originele korte puls terugkrijgt. Dit proces wordt range compressie genoemd.

Om hoge resolutie in de richting van de beweging (azimut richting) te bereiken is een zeer nauwe bundel vereist, hetgeen een zeer lange antenne apertuur (antenne opening) betekent. Het principe van SAR is het uitbreiden van de fysische korte apertuur naar een synthetische lange apertuur d.m.v. coherent optellen van de echo's, die gedurende een zekere tijd zijn ontvangen. In deze tijd is het platform over een zekere afstand verplaatst en deze afstand komt overeen met de lengte van de synthetische apertuur.

In het geval van PHARUS bijvoorbeeld is de echte antenne ongeveer 1 meter lang terwijl de synthetische apertuur wel enkele honderden meters kan bedragen. Mathematisch gezien is het coherent optellen van pulsen analoog aan de range compressie en wordt daarom ook azimut compressie genoemd.

Een karakteristiek kenmerk van SAR is dat de resolutie onafhankelijk is van de afstand tot het platform. Bij radars die niet gebruik maken van het synthetische apertuur principe (de z.g. SLAR) wordt de resolutie loodrecht op de bewegingsrichting (range) bepaald door de breedte van de antenne bundel en is daardoor recht evenredig met de hoekresolutie van die bundel. Het gevolg is dat de resolutie slechter wordt naarmate de afstand toeneemt. SAR maakt gebruik van het feit dat ook het belichte oppervlak van de bundel toeneemt naarmate de afstand toeneemt. Daardoor wordt een object langer beschenen door de bundel en kunnen meer pulsen coherent worden opgeteld, aldus compenserend voor de slechtere resolutie. Het resultaat is dat de resolutie exact gelijk blijft ook al neemt de afstand toe. Op deze manier kan SAR dus met hoge resolutie zeer ver weg kijken in tegenstelling tot optische fotografie. In praktijk echter wordt deze afstand beperkt door de hoeveelheid vermogen die kan worden uitgezonden.

Een andere verschijnsel van coherente systemen is het voorkomen van spikkel (speckle) in de beelden. Dit is een type ruis dat ontstaat door de coherente optelling van de vele verschillende objecten die willekeurige echo's geven binnen een resolutie cel. Het resultaat is dat de fase van echo's een uniforme verdeling en de amplitude van de echo's een z.g. Rayleigh verdeling vertoont. Dit soort ruis wordt multiplicatief genoemd omdat het evenredig is met de sterkte van het signaal dat wordt ontvangen. Dit is anders dan de gewone thermische ruis die minder belangrijk wordt als de sterkte van het signaal toeneemt. De spikkel kan alleen bestreden worden door middeling (multilooking), maar dit gaat dan ten koste van de geometrische resolutie.

Na SAR processing bestaat het SAR beeld uit een matrix van pixels, waarbij de pixelwaarden een maat zijn voor het radar reflectie vermogen van de resolutie cellen op de grond. Het beeld is dus eigenlijk een soort reflectie kaart. De gemeten waarden worden radar reflectie of verstrooiing coëfficiënten genoemd, die gewoonlijk worden afgebeeld op een grijswaarden schaal, waarbij donker lage en helder hoger verstrooiing coëfficiënten voorstellen.

3.2 Polarimetrie

Elektromagnetische golven hebben een oriëntatie die loodrecht op de voortplantingsrichting staat. De oriëntatie richting wordt ook wel de polarisatie genoemd. Een radar die zowel horizontaal als verticaal gepolariseerde golven uitzendt en ontvangt wordt een polarimetrische radar genoemd. Een dergelijke radar kan maximaal vier kanalen ontvangen: *HH*, *HV*, *VH* en *VV* (de eerste letter staat voor de ontvangst polarisatie, de tweede letter voor de zend polarisatie).

Detectie van een object m.b.v. radar gebeurt d.m.v. een elektrisch veld dat door de radar wordt uitgezonden en na reflectie door het object weer bij de radar wordt terugontvangen. De uitgezonden straling bestaat uit een puls van enkele microseconden. Als voorbeeld; voor PHARUS wordt een puls met frequentie 5 GHz gedurende 13 microseconden uitgezonden. Beschouwd wordt eerst een radar zonder polarisatie van het elektrische veld. Bij dit soort radars gaat het alleen om de sterkte van het terugontvangen elektrische veld. Als we het

uitgezonden veld (puls) bij het verlaten van de radar E_t (index t slaat op transmit) noemen dan geldt:

$$E_t(t) = E e^{i\omega t} \quad (3.1)$$

In de bovenstaande vergelijking stelt E de amplitude voor van het uitgezonden veld en ωt de fase op het tijdstip van uitzenden t . Op tijdstip $t+\Delta t$ wordt het uitgezonden signaal bij de radar terugontvangen. Tussen het uitgezonden veld E_t en het terugontvangen veld E_r (index r slaat op receive) geldt het volgende verband:

$$E_r(t + \Delta t) = K_E e^{i\varphi} E_t(t) \quad (3.2)$$

waarin K_E een parameter is die o.a. afhangt van de afstand tussen radar en object R en φ de faseverschuiving is van het terugontvangen elektrische veld t.o.v. de fase ωt van het uitgezonden veld. Deze faseverschuiving is afhankelijk van de afstand R en van de golflengte van het elektrische veld. In de afstand R is ook inbegrepen de diepte die het radar signaal in een medium (object) doordringt. Deze doordringdiepte komt dus ook tot uiting in de faseverschuiving φ .

De meeste moderne radars zenden een gepolariseerd elektrisch veld uit. In tegenstelling tot vergelijking (3.1) is het uitgezonden veld nu geen scalar meer maar een vector, stel $\vec{E}_t$. Deze vector heeft een horizontaal en een verticaal gepolariseerde component en kan dus worden geschreven als:

$$\vec{E}_t(t) = \begin{pmatrix} E_h(t) \\ E_v(t) \end{pmatrix}_t = \begin{pmatrix} E_h \\ E_v \end{pmatrix}_t e^{i\omega t} \quad (3.3)$$

Zowel de horizontale component $(E_h(t))_t$ als de verticale component $(E_v(t))_t$ bestaat uit een puls van enkele microseconden die (vrijwel) simultaan door de radar worden uitgezonden.

Tussen het uitgezonden elektrische veld $\vec{E}_t(t)$ en het terugontvangen elektrische veld

$\vec{E}_r(t+\Delta t)$ geldt een soortgelijk verband als (3.2):

$$\vec{E}_r(t + \Delta t) = \begin{pmatrix} E_h(t + \Delta t) \\ E_v(t + \Delta t) \end{pmatrix}_r = K_E [S] \begin{pmatrix} E_h(t) \\ E_v(t) \end{pmatrix}_t \quad (3.4)$$

De matrix $[S]$:

$$[S] = \begin{pmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |S_{hh}| e^{i\varphi_{hh}} & |S_{hv}| e^{i\varphi_{hv}} \\ |S_{vh}| e^{i\varphi_{vh}} & |S_{vv}| e^{i\varphi_{vv}} \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

heet de scatter matrix. Deze matrix bestaat uit vier complexe getallen die elk met bijvoorbeeld een amplitude en fase zoals $|S_{hh}|$ en φ_{hh} kunnen worden aangegeven. Er geldt dat $S_{vh}=S_{hv}$, d.w.z de scatter matrix is symmetrisch (vanwege reciprociteit). De eenheid van de elementen van $[S]$ is meter. De elementen van de scatter matrix zijn een maat voor de reflectie eigenschappen van een object. Deze eigenschappen betreffen zowel de sterkte van de reflectie (amplitudes van de elementen van $[S]$) als de faseverandering van de uitgezonden pulsen (fasen van de elementen van $[S]$). M.b.t. de fasen moet worden opgemerkt dat we alleen geïnteresseerd zijn in de faseverschillen, bijvoorbeeld $\varphi_{hv}-\varphi_{hh}$ en $\varphi_{vv}-\varphi_{hh}$. De absolute fasen zijn niet van belang, immers zouden we de radar iets verplaatsen dan nemen alle fasen

met hetzelfde bedrag toe. Hierdoor bevat de matrix $[S]$ slechts 5 interessante getallen (3 amplitudes en twee faseverschillen) i.p.v. 8. In de praktijk worden de elementen van $[S]$ als volgt verkregen. De radar zendt een horizontaal gepolariseerde puls $(E_h(t))_t$ uit en registreert de horizontale en verticale echo's hiervan, $(E_h(t+\Delta t))_r$ resp. $(E_v(t+\Delta t))_r$. Dit geeft resp. S_{hh} en S_{vh} (éérste index slaat op ontvangst, tweede index op zenden). Onmiddellijk daarna zendt de radar een verticaal gepolariseerde puls $(E_v(t))_t$ uit en registreert opnieuw de horizontale en verticale echo's. Dit geeft respectievelijk S_{hv} en S_{vv} . Als voorbeeld, de amplitude $|S_{hv}|$ geeft de sterkte van de horizontale component in de reflectie van de verticaal uitgezonden puls. In de bijbehorende fase ϕ_{hv} is dus ook inbegrepen hoe diep de verticale puls het medium indringt voordat er een horizontale component wordt gereflecteerd. De meting van de matrix $[S]$ vormt voor een polarimetrische radar de feitelijke radar meting. Het meten van $[S]$ wordt polarimetrie genoemd.

Er moet worden opgemerkt dat zich in het gebied waar de radar bundel de grond raakt vele zogenaamde scatterers bevinden. Dit zijn objecten met een omvang vele malen kleiner dan de radar bundel. De reflecties van deze scatterers worden opgeteld tot één matrix $[S]$ die geldig is voor één resolutie element van het radar beeld (een resolutie element kan uit meerdere pixels bestaan). Omdat de reflectie eigenschappen van de scatterers sterk kunnen verschillen en de optelling van hun reflecties vectorieel is zal er een zekere mate van toeval in de reflectie van een resolutie element bestaan. Hierdoor kunnen de scatter matrices per resolutie element sterk verschillen. In het beeld komt dit tot uiting doordat verschillende resolutie elementen in een relatief klein gebied zowel een verschillende reflectie sterkte (sterkte gedefinieerd als root-sum-square van de drie amplitudes van $[S]$) als een verschillende kleur (kleur bepaald door de verhoudingen van de drie amplitudes) hebben. Dit verschijnsel is weer de in paragraaf 3.1 genoemde speckle.

Het vermogen dat na reflectie terug wordt ontvangen bij de radar is gedefinieerd als:

$$P_r(t + \Delta t) = \vec{E}_r^+(t + \Delta t) \cdot \vec{E}_r(t + \Delta t) = |\vec{E}_r(t + \Delta t)|^2 \quad (3.6)$$

waarin $\vec{E}_r^+$ de Hermitisch getransponeerde (complex geconjungeerde van de getransponeerde) is van de kolom vector $\vec{E}_r$. Het vermogen P_r kan ook worden geschreven in termen van de radar vergelijking:

$$P_r(t + \Delta t) = K_p \sigma P_t(t) \quad (3.7)$$

waarin K_p een parameter is die o.a. afhangt van de afstand R . De term σ is de radardoorsnede van het object (eenheid m^2). Dit is een denkbeeldig oppervlak dat een maat is voor de sterkte van de reflectie van een object. De radardoorsnede houdt niet direct verband met het fysieke oppervlak van het object zoals dat door de radar wordt belicht. Alleen in het geval dat de golflengte veel kleiner is dan het fysiek oppervlak zou dit wel gelden. Substitutie van (3.4) in (3.6) levert:

$$P_r(t + \Delta t) = K_p^2 \vec{E}_t^+(t) [S]^+ [S] \vec{E}_t(t) \quad (3.8)$$

waarin $[S]^+$ de Hermitisch getransponeerde is van $[S]$. In $[S]^+ [S]$ ontstaan o.a. de termen $S_{hh} S_{hh}^*$, $S_{hv} S_{hv}^*$, en $S_{vv} S_{vv}^*$. Vergelijken van (3.7) met (3.8) laat dan zien dat deze termen de radardoorsneden voorstellen behorend bij een combinatie van uitgezonden en ontvangen polarisatie. Hierdoor worden ze ook wel aangeduid met resp. σ_{hh} , σ_{hv} , en σ_{vv} . Als voorbeeld; σ_{hv} geeft aan hoe sterk de horizontale reflectie is van de verticaal uitgezonden puls.

Om twee redenen, die verderop genoemd worden, wordt er nooit gewerkt in termen van de scatter matrix $[S]$ maar altijd met de zogenaamde polarimetrische covariantie matrix $[C]$. De covariantie matrix heeft betrekking op een gebied van een aantal resolutie elementen en wordt berekend uit de elementen van $[S]$ volgens;

$$[C] = \begin{pmatrix} S_{hh} \\ S_{hv} \\ S_{vv} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{hh}^* & S_{hv}^* & S_{vv}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle S_{hh} S_{hh}^* \rangle & \langle S_{hh} S_{hv}^* \rangle & \langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle \\ \langle (S_{hh} S_{hv}^*)^* \rangle & \langle S_{hv} S_{hv}^* \rangle & \langle S_{hv} S_{vv}^* \rangle \\ \langle (S_{hh} S_{vv}^*)^* \rangle & \langle (S_{hv} S_{vv}^*)^* \rangle & \langle S_{vv} S_{vv}^* \rangle \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

waarin $\langle \rangle$ betekent dat er moet worden gemiddeld over het aantal resolutie elementen in het beschouwde gebied. Als het aantal resolutie elementen waarover gemiddeld groot genoeg is mogen de co-cross termen $\langle S_{hh} S_{hv}^* \rangle$ en $\langle S_{hv} S_{vv}^* \rangle$ alsmede hun complex geconjugeerde $\langle (S_{hh} S_{hv}^*)^* \rangle$ resp. $\langle (S_{hv} S_{vv}^*)^* \rangle$ nul worden gesteld in de matrix $[C]$. Dit is het geval voor de meeste gedistribueerde doelen. Een voorwaarde voor deze representatie is wel dat de data volledig gecalibreerd is [Dekker 1998].

Met invoering van de radar doorsneden σ_{hh} , σ_{hv} , en σ_{vv} , kan $[C]$ dan worden geschreven als:

$$[C] = \begin{pmatrix} \sigma_{hh} & 0 & \sigma_{hhvv} \exp[i(\varphi_{hh} - \varphi_{vv})] \\ 0 & \sigma_{hv} & 0 \\ \sigma_{hhvv} \exp[-i(\varphi_{hh} - \varphi_{vv})] & 0 & \sigma_{vv} \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

De term $\langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle = \sigma_{hhvv} \exp[-i(\varphi_{hh} - \varphi_{vv})]$ is de correlatie tussen de HH en VV signalen. De term $\varphi_{hh} - \varphi_{vv}$ is het gemiddeld faseverschil tussen deze signalen. Correlatie en faseverschil zijn beiden afhankelijk van de reflectie eigenschappen van het object en zijn alleen goed gedefinieerd als er over een groot aantal resolutie elementen is gemiddeld. Merk op dat de radardoorsneden σ en het faseverschil $\varphi_{hh} - \varphi_{vv}$ in (3.10) betrekking hebben op gemiddelden van een groep resolutie elementen. Ze zijn dus niet te relateren aan de scatter matrices (3.5) van de afzonderlijke resolutie elementen. Vaak wordt deze matrix ook geschreven als:

$$[C] = \sigma_{hh} \begin{pmatrix} 1 & 0 & \rho \sqrt{\gamma} \\ 0 & \varepsilon & 0 \\ \rho^* \sqrt{\gamma} & 0 & \gamma \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

Hierbij is σ_{hh} de HH radardoorsnede, ε de verhouding $\sigma_{hv} / \sigma_{hh}$, γ de verhouding $\sigma_{vv} / \sigma_{hh}$ en ρ de genormaliseerde correlatie van σ_{hh} en σ_{vv} .

De redenen om met $[C]$ te werken i.p.v. met $[S]$ zijn als volgt.

- Ten éérste willen we het effect van speckle reduceren d.m.v. middeling over resolutie elementen zoals in (3.9) aangegeven. Middelen van de scatter matrices zelf is uiteraard niet mogelijk omdat de elementen van $[S]$ per resolutie element sterk kunnen verschillen en zo tot nul kunnen middelen.
- Een tweede reden om de bewerking (3.9) uit te voeren is dat we zo een goed bepaald gemiddeld faseverschil $\varphi_{hh} - \varphi_{vv}$ krijgen. Dit geeft het verschil aan tussen de indringdiepte van de horizontale en verticale pulsen.

Alleen in geval dat het pixel een puntbron is, bv. een reflector of een klein militair doel ter grootte van een resolutie element, zijn de elementen van $[C]$ één op één gerelateerd aan de elementen van $[S]$. In zo'n geval vindt er in (3.9) namelijk geen middeling plaats over

resolutie elementen zodat de radardoorsneden en faseverschillen tussen de kanalen als karakteristiek kunnen worden gezien voor dat ene punt (er is dus ook geen sprake van speckle). Voor een puntbron zijn de co-cross termen in (3.9) niet gelijk aan nul.

4. Beschrijving gebruikte data

Om deze studie mogelijk te maken hebben we gebruik gemaakt van verschillende soorten SAR data. Centraal stond polarimetrische data van PHARUS, die door TNO-FEL en het NLR beheerd wordt. Deze sensor levert volledig polarimetrische SAR data bij 5.3 cm golflengte met een resolutie van ongeveer 3 bij 3 meter en een radiometrische resolutie van 5 looks. Er is met PHARUS deelgenomen aan de MIMEX campagne in de UK. We geven hier een beschrijving van de data, processing en het experiment.

Daarnaast hebben we gebruik gemaakt van polarimetrische hoge resolutie SAR data van een militair doel uit de MSTAR database. Verder beschrijven we SAR, thermisch infrarode en optische data afkomstig uit een database voor onderzoek naar militaire cartografie.

4.1 Data uit de MIMEX Campagne

In het kader van dit project (BCRS project 3.1/AP-02, "Air surveillance") is met PHARUS deelgenomen aan de MIMEX campagne. Deze campagne is georganiseerd door de NATO AC243 Panel 3/RSG 20. Deze "research study group" heeft als onderwerp: "military applications of millimeter-wave imaging". In deze werkgroep participeren de landen Nederland, Duitsland, Groot-Brittannië, Frankrijk, Canada en de Verenigde Staten. De vertegenwoordiging vanuit Nederland wordt door TNO-FEL verzorgd.

MIMEX staat voor "Military Imaging Experiment" met name in het millimeter golflengte gebied, maar er zijn ook diverse opnamen gemaakt met centimeter SAR systemen, waaronder PHARUS. Door mee te doen met PHARUS was het mogelijk om te participeren in een data-pool zodat ook studie verricht kon worden naar hogere resolutie SAR systemen, zoals de Franse ONERA SAR.

Tijdens het experiment (30 september t/m 25 oktober 1996) werden opnamen gemaakt van een oude munitie-opslagplaats en munitie fabriek nabij het plaatsje Swynnerton dat diende als testgebied. Als testobjecten werden aangemerkt: bunkers, begraven mijnen en militaire voertuigen die daar voor het experiment waren neergezet.

In dit rapport zullen we ons beperken tot detectie en herkenning van deze voertuigen.

De ground-truth is tijdens de campagne nauwkeurig vastgelegd [Bartlett 1997]. Tijdens de campagne zijn er in een terrein van ca. 250 m x 250 m vijf militaire voertuigen neergezet. Het terrein betrof bos afgewisseld door veel grote en kleine open plekken hoofdzakelijk begroeid met gras. Op dit terrein bevond zich ook een baan voor het werpen van handgranaten (grenade-range).

In figuur 4.1 wordt een kaart getoond van het gebied en is de plek waar de voertuigen staan aangegeven. Deze plek is uitvergroot weergegeven in figuur 4.2, waarbij in figuur 4.3 foto's van de voertuigen worden getoond.



Figuur 4.1: Kaart van Swynnerton.



Figuur 4.2: Uitvergroete kaart met de geplaatste voertuigen aangegeven.



GECKO



TLAR



ASTROSS



MTLB



ZSU 23-4

Figuur 4.3: Foto's van de geplaatste militaire voertuigen.

4.1.1 PHARUS data

De PHARUS opnamen werden gemaakt op 24 oktober 1996. Er werden met PHARUS opnamen gemaakt onder verschillende aspect hoeken en onder verschillende invalshoeken. Voor dit project waren 8 opnamen voorzien; 4 in een short range mode en 4 in een long range mode. In elke mode waren opnamen van het testgebied vanuit 4 verschillende windrichtingen gemaakt, dat wil zeggen vliegrichtingen 0, 90, 180 en 270 graden t.o.v. het noorden. Daarnaast werd een aantal test opnamen gemaakt m.b.t. tot een jamming (storen) van SAR en een spot light mode.

Beelden in de short range mode hebben relatief steile invalshoeken, typisch van 25 tot 55 graden, terwijl beelden in de long range mode invalshoeken van ongeveer 70 tot 80 graden hebben (zie tabel 4.1). De 'short range' en de 'long range' mode worden zo genoemd omdat steile invalshoeken doorgaans samengaan met waarnemen op korte afstand en scherende invalshoeken met waarnemen op lange afstand.

Tabel 4.1. Opname parameters

Data takes		short range	long range
vlieghoogte	meter	4500	3000
slant range (nabij)	meter	5000	9500
invalshoekbereik	graden	26-56	72-78
breedte zwade	km	4.4	4.7

De PHARUS sensor is een experimenteel systeem waarbij nog niet alle operationele en technische aspecten zijn uitgetest. Door operationele en technische problemen zijn slechts 2 opnamen in de long range mode bruikbaar voor deze studie. Naast deze 2 geslaagde opnamen voor de long range mode is er nog één opname, de z.g. calibratie opname voor de jamming (storen van de radar), gelukt. Aangezien de opname parameters voor dit beeld dezelfde zijn als voor de short range mode kan dit beeld gebruikt worden om de short range mode te evalueren. De vliegrichting was in dit geval echter ongeveer 45 graden t.o.v. het noorden. De opnamen in de short range mode en de opnamen m.b.t. de jamming zijn mislukt. De oorzaken zijn verkeerde instellingen van de SAR, met name de stand van de bundel. Omdat de opnamen gemaakt moesten worden zonder terugmelding van de instellingen en pas achteraf op de grond na processing duidelijk is hoe de beelden eruit zien kon tijdens het vliegen niet gecorrigeerd worden. Deze duidelijk ongewenste situatie is geëvalueerd en momenteel kan de stand van de bundel tijdens de vlucht automatisch ingesteld worden. De opnamen met betrekking tot de spotlight mode zijn weliswaar gemaakt, maar de bundel blijkt tijdens de opnamen niet voldoende op het testgebied gericht te zijn geweest, zodat na processing de opnamen niet tot het gewenste resultaat leidden. De oorzaak is hier gelegen in het feit dat het automatisch in de bundel houden van het testgebied nog niet geïmplementeerd was. Ook m.b.t. dit probleem zijn modificaties uitgevoerd in het besturingssysteem. Voor meer informatie omtrent jamming en spot light mode van SAR verwijzen wij naar [Otten et al. 1996].

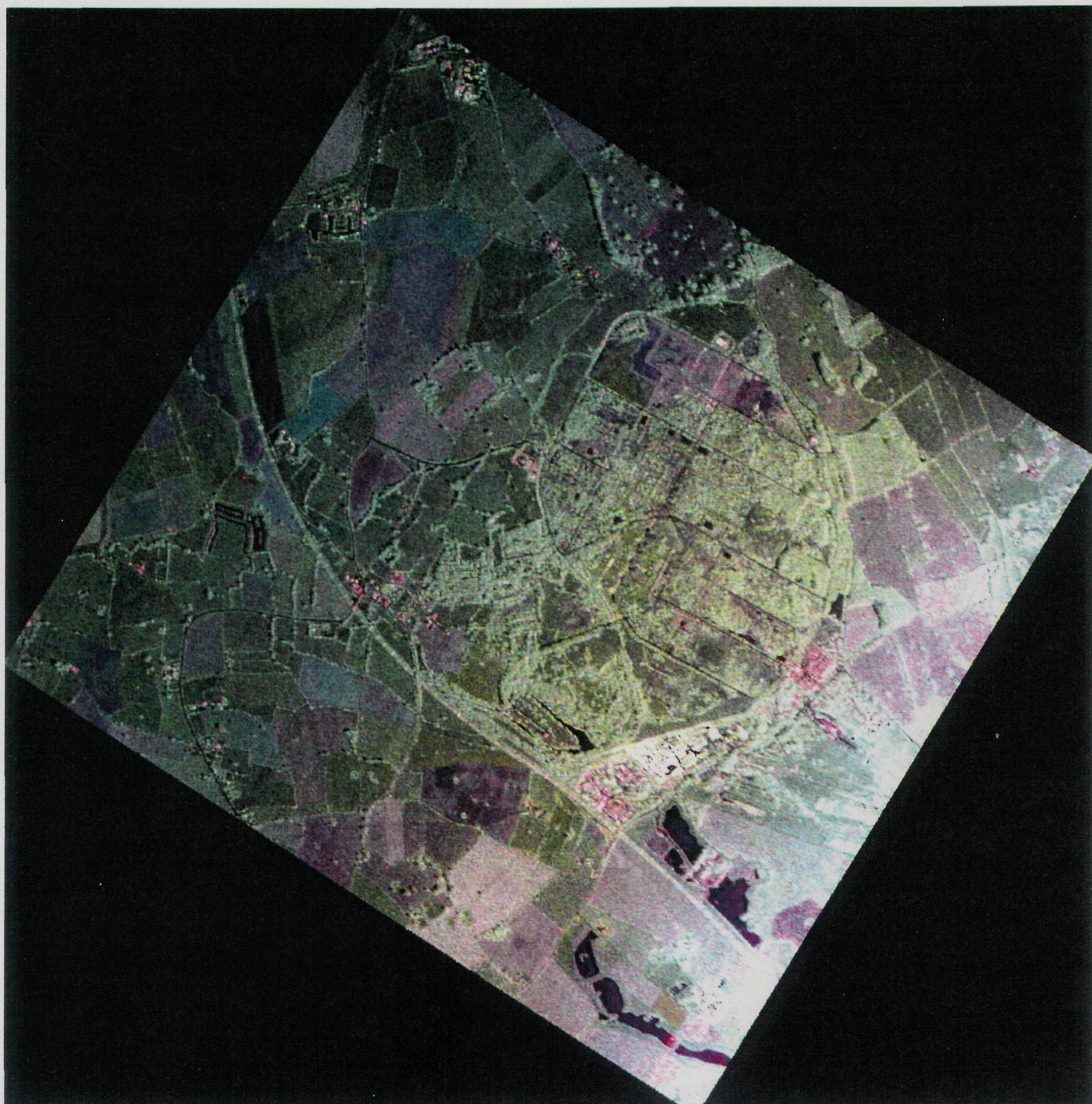
De resultaten van de opnamen zijn weergegeven in de figuren 4.4 t/m 4.6, waarin we de HH/HV/VV opnamen in de 3 kleuren kanalen tonen. In figuur 4.4 tonen we een long range beeld opgenomen met de vliegrichting van noord naar zuid (heading 180 graden). Dit beeld zullen we in het vervolg aanduiden met 180X. Het beeld beslaat vrijwel de gehele kaart getoond in figuur 4.1. In figuur 4.5 tonen we het long range beeld waarbij van oost naar west (heading 270 graden) gevlogen is. Dit beeld duiden we aan met 270X in het vervolg.



Figuur 4.4: Overview van opname 180X (RGB: HH/HV/VV).



Figuur 4.5: Overview van opname 270X (RGB: HH/HV/VV).



Figuur 4.6: Overview van opname 45X (RGB: HH/HV/VV).

In figuur 4.6 tonen we het short range beeld (vliegrichting 45 graden) dat aangeduid wordt als 45X. De short range mode geeft een beeld te zien dat minder resolutie heeft in range richting, omdat de invalshoeken klein zijn. De range resolutie kan daardoor wel een factor 2 keer zo slecht zijn als bij de long range mode. Bovendien blijkt dat ook het contrast in het beeld beduidend minder is dan van de long range beelden.

Voor het testen van de doelopsporingsmethoden die in de volgende hoofdstukken worden behandeld is daarom gekozen voor de twee PHARUS opnamen in de long range mode. De opnamen 180X en 270X (zie figuur 4.6 en 4.7) zijn gemaakt met verschillende aspect (belichtings) hoeken. Dit verklaart voor het grootste gedeelte de zichtbare verschillen. De opnamen zijn met een tussentijd van circa 10 minuten gemaakt.

Het eigenlijke testgebied uitgesneden uit de twee long range PHARUS opnamen en nu naar het noorden georiënteerd wordt getoond in figuur 4.7, terwijl in figuur 4.8 het gebied rondom de voertuigen is uitvergroot.

In de volgende hoofdstukken wordt bekeken of deze doelen gedetecteerd kunnen worden met behulp van algoritmen en of zij te onderscheiden zijn van andere objecten die geen doel zijn maar wel gedetecteerd worden (de zogenaamde false-alarm detecties). Door de resolutie van de PHARUS opnamen is het aantal pixels dat een doel beslaat klein. Dit betekent niet bij voorbaat dat PHARUS ongeschikt is voor het opsporen van doelen. Doeldetectie en herkenning zijn vaak een kwestie van het gebruiken van meerdere sensoren (sensor-fusie), waarbij sensoren elkaar ondersteunen [Nasr 1996]. Een voorbeeld hiervan is dat één sensor een doel detecteert (in dit geval PHARUS) en dit doorgeeft aan andere sensoren ter herkenning (cueing).

Data kwaliteit

PHARUS keek bij het gebied waarin de doelen zich bevinden ("area of interest", afgekort a.o.i.) zeer scherdend in (invalshoek circa 75°), wat de lange schaduwen veroorzaakt. Bij deze invalshoek is de minimaal te verwachten gamma -20 dB (HV) [Buiten en Clevers 1990], waaruit valt af te leiden dat de minimale signaal-ruis-verhouding rond de 11 dB ligt (zie tabel 4.2). Omdat de gamma van HH en VV gemiddeld circa 7 dB boven die van HV liggen, volgt dat de minimale signaal-ruis-verhouding van deze kanalen rond de 18 dB moet liggen. Schaduw bevat alleen thermische ruis en geen speckle (multiplicatieve ruis die het gevolg is van het coherente karakter van SAR data, normaal gesproken sterker dan thermische ruis). Hieruit bleek dat deze verhouding 10 dB slechter was (8 dB). Blijkbaar bevatten de schaduwen niet alleen thermische ruis. Uit een nadere analyse van de data bleek ten eerste dat de ruwe data was "vastgelopen". De versterkers van PHARUS worden zo ingesteld dat de ruis van de ontvangers net boven de kwantisatie-ruis van de AD-converters (ADC) uitkomt [Vermeulen 1996]. Voor de zekerheid was hier 10 dB extra bij opgeteld. Bij gebruik van de "most-significant" 8 bits van de data gaat daardoor niets verloren. De Gaussisch-vormige histogrammen van de I en Q kanalen waren echter zo breed (standaard deviaties van rond de 90) dat zij abrupt worden afgesneden bij ± 127 . Wat de gevolgen hiervan zijn is moeilijk na te gaan, maar dat het zorgt voor een slechter beeld is te zien in gebieden waar de reflecties hoger zijn (gebieden met bijvoorbeeld gebouwen). De achtergronden van deze reflecties worden daarbij sterk onderdrukt. In gebieden waar dit minder goed is te zien kan het echter nog steeds zo zijn dat de gevolgen van het vastlopen van de ruwe data, de oorspronkelijke signaal-ruis-verhouding overtreft. Ten tweede was er tijdens de opnamen geen tapering toegepast waardoor de zijlussen van de antenne niet zijn onderdrukt. Dit kan tot gevolg hebben dat de zijlussen van één doel doorspreken in een ander doel. Tot slot spreken ook de randen door en zijn de schaduwen mogelijk te kort (tot 50 m slant range), om een goede bepaling te doen van de signaal-ruis-verhouding.

Data verwerking (SAR processing)

De ruwe PHARUS data is verwerkt met de GSP (Generieke SAR Processor) [Otten et al. 1994], een ontwikkeling van TNO-FEL en ICT Automatisering. Vervolgens zijn de opnamen

gecalibreerd met zelf ontwikkelde software [Dekker en Groot 1998], gebaseerd op de POLCAL software van het Jet Propulsion Laboratory (USA) [van Zyl et al. 1990]. Tabel 4.2 geeft de parameters van beide opnamen weer, na de verschillende processing stappen.

De ruwe PHARUS data ondergaat twee correlatie slagen (azimut en range correlatie) voordat het een scherp beeld oplevert. Er is gekozen voor een maximale resolutie met weging: 1.0 m in azimut (along track) en 3.4 m in range (cross-track) richting. De oorspronkelijke pixel afmeting in range van de complexe ruwe PHARUS data bedroeg 3.0 m. Na de correlatie en calibratie is de data echter niet meer complex. Om voldoende samples te houden is de pixel afmeting van de complexe ruwe data (en de chirp) gehalveerd tot 1.5 m door interpolatie. Gekozen is voor de nearest-neighbour methode omdat deze de statistische eigenschappen (gemiddelde, standaard deviatie, autocorrelatie functie, etc.) het beste behoudt [Quegan 1990]. Na metingen bleek de range resolutie geen 3.4 m maar 5.0 m. De oorzaak hiervan bleek het gedeelte van de software dat zorgt voor de range-migratie correctie tijdens de azimut correlatie. Voor de azimut correlatie bleek de range resolutie tussen 3.0 m en 4.0 m te liggen. De pixel afmeting in azimut bleek ruim voldoende voor een azimut resolutie die 1.2 m bleek te bedragen.

Calibratie

De calibratie van de beelden houdt het volgende in:

- fase calibratie
- receiver-gain correctie
- symmetrisatie
- conversie naar covariantie matrix
- multi-looking (optioneel)
- cross-talk calibratie
- gain-imbalance calibratie
- absolute calibratie

Voor details wordt verwezen naar [Dekker en van den Broek 1998]. De eerste stap trekt de fases van de vier kanalen in de scattering matrix gelijk, zie vergelijking (3.5). De receiver-gain correctie compenseert voor de instelling van de versterkers die vooraf gaan aan de AD-converters van PHARUS. In de symmetrisatie worden de kanalen HV en VH gemiddeld, ter verbetering van de signaal-ruis-verhouding in het nieuwe HV kanaal. Multi-looking is optioneel en houdt in het middelen van een aantal samples in azimut zodat de speckle afneemt. Door multi-looking neemt ook de resolutie af en kan het data volume worden verkleind. In de volgende paragraaf wordt dieper ingegaan op multi-looking. De cross-talk calibratie zuivert de verzonden en ontvangen polarisaties van andere oriëntaties. Uitgezonden horizontaal gepolariseerde golven bijvoorbeeld, blijken ook een kleine verticale component te hebben. De gain-imbalance calibratie corrigeert voor gain verschillen tussen het horizontale en verticale pad binnen de radar, meestal veroorzaakt door verschillen in antenne-gain voor H en V. Bij PHARUS is de gain-imbalance erg groot en afhankelijk van de stand van de antenne-bundel (beam angle). Dit komt omdat een andere stand van de antenne-bundel resulteert in een ander antennepatroon [Vermeulen 1996] en dus een andere gain. De gain-imbalance van de hier besproken opnamen bedroeg -5.3 dB en -3.5 dB voor calibratie, corresponderend met beam angles van -4.5° en 12° . In de absolute calibratie wordt het ontvangen vermogen omgerekend naar gamma waarden [van den Broek 1993]. De absolute calibratie is niet uitgevoerd omdat het absolute niveau niet van belang is binnen de covariantie matrix gegeven door vergelijking (3.11).

Equivalent-number-of-looks

Ten behoeve van de presentatie van de data is gekozen voor een vierkante resolutie cel van ongeveer $3.4 \text{ m} \times 3.4 \text{ m}$ (dat de range resolutie 5.0 m bedroeg bleek later). Hierdoor was het mogelijk om iedere 10 samples in azimut te middelen en een reductie factor van 4 à 5 toe te

passen. Dit wordt ook wel multi-looking genoemd. Het equivalent-number-of-looks (ENL) is een maat voor de speckle reductie die hierbij optreedt, en wordt gedefinieerd als [Moreira 1991]:

$$\text{ENL} = \frac{\mu^2}{\sigma^2} \quad (4.1)$$

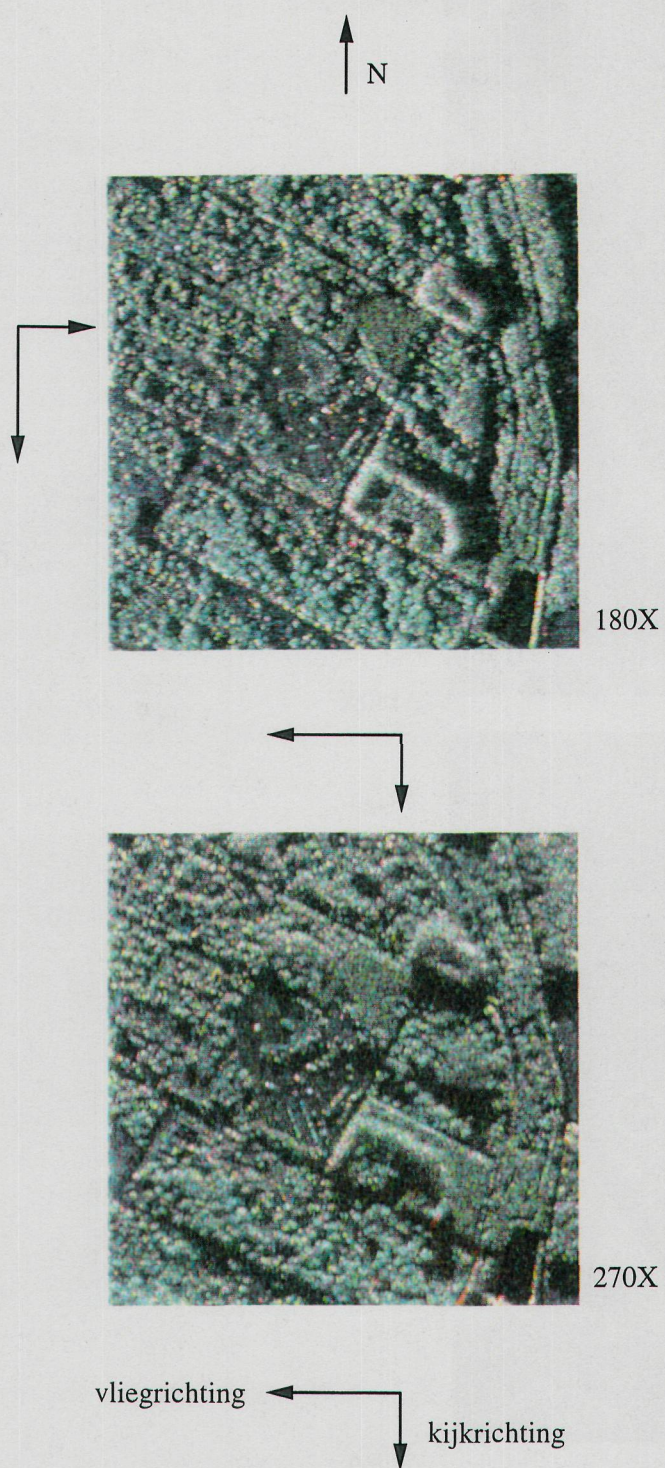
μ is het gemiddelde en σ de standaard deviatie. Hierbij geldt dat het gebied waarbinnen deze parameters worden bepaald, homogeen moet zijn en geen textuur mag bevatten. Of dit het geval is zal proefondervindelijk moeten worden vastgesteld, door het ENL te bepalen van meerdere ogenschijnlijk homogene gebieden (wat op het oog homogeen is hoeft nog niet zo te zijn). De meest waarschijnlijke ENL zal zich bevinden bij de maximale waarden. De waarde 2.8 in tabel 4.2 (na calibratie) is met deze methode bepaald. Het ENL kan ook worden berekend met behulp van de vergelijking [Moreira 1991]:

$$\text{ENL} = \frac{L}{1 + 2 \sum_{i=1}^{L-1} \frac{L-i}{L} \rho_{i+1,1}^2} \quad (4.2)$$

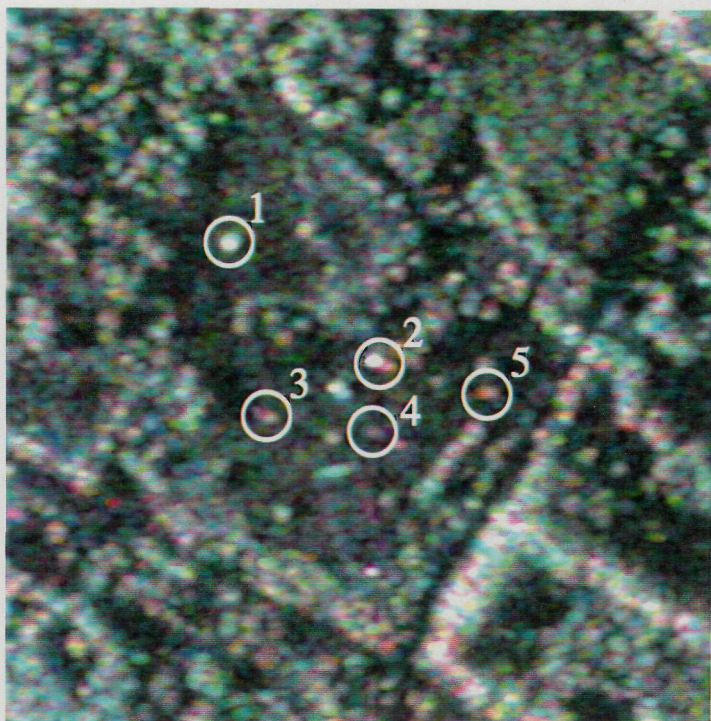
L is het aantal samples dat wordt gemiddeld (hier 10) en $\rho_{i+1,1}$ is de correlatie coefficient tussen sample $i+1$ en sample 1. De correlatie coëfficiënt kon worden afgeleid met behulp van [Ulaby 1986]:

$$\rho_{i+1,1} = \text{sinc}^2\left(\frac{i dx}{r_x}\right) \quad (4.3)$$

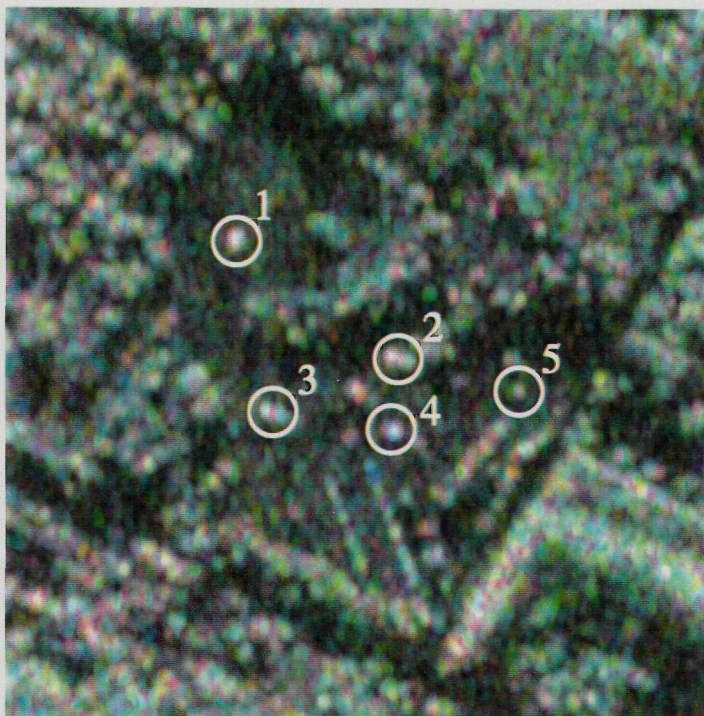
Hier is dx de pixel afstand in azimuth en r_x de azimuth resolutie. Bij de hier toegepaste multi-look methode is alleen de correlatie in azimuth richting van belang. Door de gegevens van tabel 4.2 in te vullen in vergelijking (4.2) en (4.3) volgen een ENL van 4.3 voor 180X en 4.8 voor 270X. De waarde bepaald met de methode van vergelijking (4.1) is echter significant lager; waarschijnlijk veroorzaakt door de slechtere signaal-ruis-verhouding ten gevolge van het vastlopen van de data en het niet toepassen van antenne tapering. Het is niet waarschijnlijk dat alle gebieden waarbinnen het ENL werd bepaald, minder homogeen waren dan verwacht. Door bij het middelen van samples gebruik te maken van weging, is het mogelijk om (met behoud van resolutie) het ENL te verhogen met ongeveer een factor 1.5 [Li 1983].



Figuur 4.7: De PHARUS opnamen van Swynnerton (UK) waarmee de doelopsporings-methoden worden getest ($R=HH$, $G=HV$, $B=VV$). In het midden bevindt zich het gebied waar de voertuigen (de doelen) zijn opgesteld.



180X



270X

- 1 = GECKO
- 2 = TLAR
- 3 = ASTROSS
- 4 = MTLB
- 5 = ZSU 23-4

Figuur 4.8: Uitvergroting (3×) van de PHARUS opnamen van figuur 4.7 waarin de voertuigen zijn aangegeven.

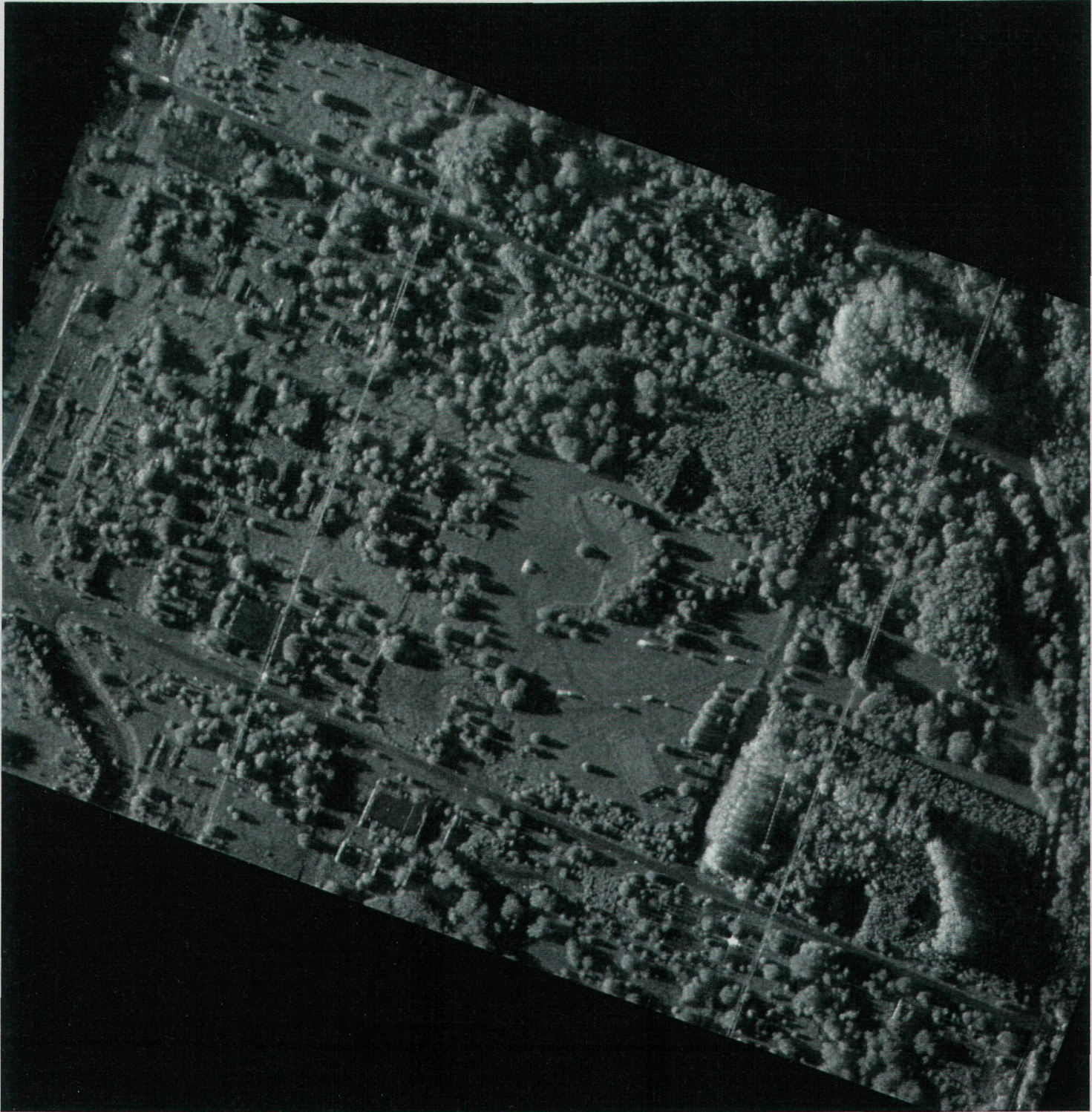
Tabel 4.2: De (kwaliteit) parameters van de PHARUS opnamen van Swynnerton (UK) na de verschillende processing stappen.

		<i>common</i>	<i>180X</i>	<i>270X</i>
date	d/m/y	24/10/1997		
time	GMT		12:56:36	12:45:54
track			180°	270°
beam angle			-4.5°	12.0°
altitude			3096 m	3052 m
projection		slant range		
slant range	a.o.i.		12190 m	11490 m
grazing angle	a.o.i.		14.7°	15.4°
signal-to-noise	$\gamma = -20$ dB		10.4 dB	11.6 dB
accuracy	ADC	8 bits		
deviation	HH		97.4	88.0
after processing				
pixel spacing	range	1.5 m		
	azimuth		0.31518 m	0.35770 m
resolution	range	5.0 m		
	azimuth	1.2 m		
ENL	HH	1		
$\varphi_{hh} - \varphi_{vv}$	a.o.i.	175°		
$\varphi_{hv} - \varphi_{vh}$	a.o.i.	135°		
cross-talk level		< -20 dB		
gain-imbalance			-5.3 dB	-3.5 dB
after calibration				
pixel spacing	range	1.5 m		
	azimuth		1.5759 m	1.4308 m
resolution	range	5.0 m		
	azimuth		3.1518 m	3.5770 m
ENL	HH	2.8		
$\varphi_{hh} - \varphi_{vv}$		< 10°		
cross-talk level		< -30 dB		
gain-imbalance		< 1.0 dB		

a.o.i.- area of interest

4.1.2 RAMSES Onera SAR data.

Door deel te nemen aan de MIMEX campagne met PHARUS was het mogelijk gebruik te maken van andere data die verzameld waren in de campagne. Met name interessant waren de hogere resolutie data, zoals van de Franse RAMSES Onera SAR die opnamen heeft gemaakt in de Ka-band (35 Ghz) met een invalshoek van 75 graden. Het systeem gebruikt maar een polarisatie (VV) en is dus niet polarimetrisch zoals PHARUS. De resolutie bedraagt 0.5 meter. Deze data worden in hoofdstuk 7 vergeleken met de PHARUS en de MIT data. Zie voor een afbeelding figuur 4.9 en verder hoofdstuk 7.



Figuur 4.9: Onera SAR beeld van het doelgebied binnen het Swynnerton complex.

4.2 Data uit het MSTAR programma

We geven hier een beschrijving van de hoge resolutie SAR data, die we gebruiken in hoofdstuk 7 waar we doelherkenning en polarimetrie zullen bestuderen. Deze data is afkomstig uit de publieke database van het MSTAR (Moving and Stationary Target Acquisition and Recognition) programma in de USA waarin de bruikbaarheid van SAR voor doellopsporing wordt onderzocht door verschillende instituten en laboratoria.

Beschikbare data

Door het Massachusetts Institute of Technology (MIT)/Lincoln Laboratory zijn vijf data sets met SAR beelden beschikbaar gesteld aan de gebruikers gemeenschap. Als onderdeel van het Warbreaker programma heeft Lincoln Laboratory deze data sets gebruikt om de end-to-end performance te testen van een doelherkenningsketen die door hun werd ontwikkeld voor het detecteren, discrimineren, en classificeren van mobiele doelen zoals rocket launchers en militaire voertuigen [Novak et al. 1993]. Twee van deze data sets bevatten single-look radar beelden van militaire voertuigen, waarschijnlijk een tank en een APC (Armoured Personnel Carrier), zie tabel 4.3. De andere drie data sets bevatten single-look beelden van natuurlijke clutter met een beperkt aantal man-made clutter discretes zoals huizen en kleine gebouwen. De clutter data bestaat uit opnamen van Stockbridge, New York [Novak et al. 1993; Kreithen et al. 1993], en kan worden gebruikt om te testen hoe goed een doelherkenningsketen doelen van clutter kan onderscheiden. Alle data is opgenomen met de Lincoln Laboratory airborne SAR en gegeven in slant range coördinaten [Novak et al. 1993]. Een Gulfstream G-1 vliegtuig is gebruikt als het platform voor de airborne SAR [Henry et al. 1992]. De vlieghoogte was ongeveer 3 km hetgeen met een depressie hoek van 24.5° resulteert in een slant range afstand van ongeveer 7 km. De resolutie van de gebruikte SAR is 0.23 m in slant range en 0.23 m in azimuth (vliegrichting) en de gebruikte frequentie is 35 GHz (K-band). Alle vijf data sets bevatten zowel de HH, HV, en VV componenten van de scatter matrix alsmede het PWF (Polarimetric Whitening Filter) beeld dat van deze componenten kan worden afgeleid. De data sets met militaire voertuigen bestaan uit een reeks van beelden waarin het voertuig steeds 1° is geroteerd ten opzichte van de azimuth richting. Voor iedere hoek zijn er dus vier beelden beschikbaar: de drie polarimetrische componenten en het PWF beeld.

Tabel 4.3: MIT/Lincoln Laboratory SAR data

<i>Data set</i>	<i>Beschrijving</i>	<i>Inhoud</i>
M77	Tank	HH, HV, VV, PWF
M83	APC	HH, HV, VV, PWF
M78	Clutter	HH, HV, VV, PWF
M90	Clutter	HH, HV, VV, PWF
M140	Clutter	HH, HV, VV, PWF

Test data set

Als test data zijn de beelden van de APC gebruikt. Deze keuze was volledig willekeurig en de beelden van de tank zijn even goed geschikt. Voor iedere component; HH, HV, VV, en PWF, bevat de geselecteerde data set 68 beelden van het doel (APC) in een achtergrond van natuurlijke clutter. Met oog op de volledige reeks van beelden is het doel dus over een totale azimuth hoek van 68° geroteerd. De azimuth hoek is hier gedefinieerd als de hoek tussen de vliegrichting en de langste zijde van het doel. Alle beelden hebben een afmeting van 128×128 pixels. Het doel heeft afmetingen van ongeveer 30 pixels in lengte en 18 pixels in breedte. Met een resolutie van 0.23×0.23 meter (pixel afmeting) komt dit overeen met 7 bij 4 meter. Figuur 4.10 geeft een voorbeeld van een PWF beeld van de APC in een omgeving van natuurlijke clutter. Omdat de vliegrichting evenwijdig is aan de onderkant van het beeld (onderkant beeld is near range, d.w.z. het dichtst bij de SAR), is de azimuth hoek in figuur

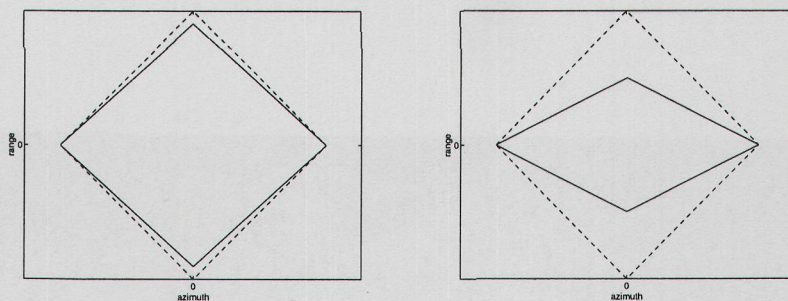
4.10 ongeveer 94° . In figuur 4.12 wordt in een mozaïek een overzicht gegeven van alle 68 beelden.



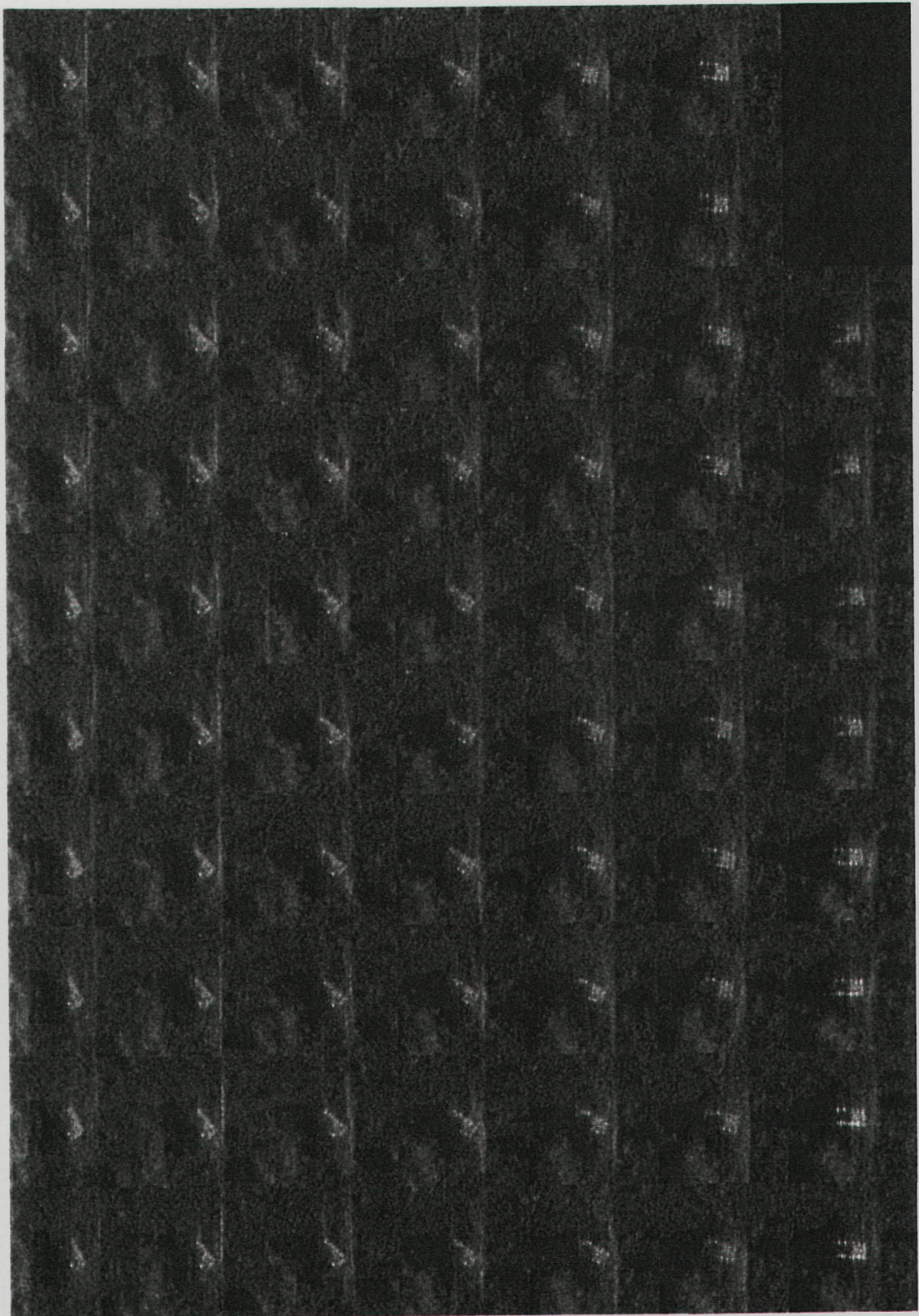
Figuur 4.10: Voorbeeld van een PWF beeld van een APC (slant range coördinaten).

Slant naar ground range conversie

Aangezien de beelden van de APC in slant range coördinaten zijn gegeven zal het doel een vervorming vertonen in de range richting. Deze vervorming is zodanig dat de afmeting van het doel in range richting wordt gecomprimeerd. Voor objecten met een afmeting van enkele kilometers zullen de vervormingen in near range groter zijn dan die in far range (het verste weg van de SAR). Een militair doel zoals gebruikt in dit rapport heeft karakteristieke afmetingen van een aantal meters zodat de vervormingen in near en far range vrijwel gelijk zijn. Om voor deze vervormingen te corrigeren zouden de beelden eigenlijk van slant naar ground range coördinaten geconverteerd moeten worden. Echter, voor een depressie hoek van minder dan 30° zijn de vervormingen zo klein dat een conversie naar ground range achterwege gelaten zou mogen worden. Om deze veronderstelling te verifiëren m.b.t. de test data is een simulatie experiment uitgevoerd waarin de optredende vervormingen van een vierkant met eenheidslengte zijn bekeken als het beeld van ground naar slant range coördinaten wordt geconverteerd. De resultaten zijn weergegeven in figuur 4.11. In de linker plot laat de onderbroken lijn zien hoe het vierkant (ground range) vervormt als de coördinaten naar slant range worden geconverteerd (ononderbroken lijn). In figuur 4.11 is een vlieghoogte van 3 km verondersteld met een depressie hoek van 24.5° hetgeen overeenkomt met de vlucht condities waaronder de test data is verkregen. Zoals te verwachten zijn de optredende vervormingen erg klein, in de orde van hooguit 5%. Met een karakteristieke lengte van het doel van 7 m komt deze vervorming overeen met slechts 0.35 m hetgeen van dezelfde orde grootte is als de 0.23 m resolutie van de SAR. Een conversie van slant naar ground range coördinaten mag daarom terecht achterwege gelaten worden. De rechter plot in figuur 4.11 laat ter illustratie de optredende vervormingen zien voor een depressie hoek van 60° (maximaal optredende vervorming is 2.31 m voor een karakteristieke lengte van 7 m). Voor dit soort grote hoeken zou een conversie wel noodzakelijk zijn geweest.



Figuur 4.11: Slant range vervormingen van een vierkant met eenheidslengte. Voor de vlucht configuratie van de airborne SAR is een hoogte van 3 km en een depressie hoek van 24.5° (links) en 60° (rechts) aangenomen.



Figuur 4.12: Overzicht van de 68 beelden (clips) van het APC als functie van azimut hoek.

4.3 Data van het Heerde testgebied

Naast de data verkregen boven Swynnerton en de hoge resolutie MSTAR data werd gebruik gemaakt van data opgenomen boven een testgebied bij de IJssel ten noorden van Deventer. Het testgebied is genoemd naar het topografische kaartblad 27 (Heerde), hoewel de eigenlijke plaats Heerde zich niet in het testgebied bevindt. Van dit gebied is een uitgebreide data-set opgenomen [van den Broek 1994] met verschillende sensoren in het optische, thermische infrarode en microgolf gebied om de rol van remote sensing ten behoeve van militaire cartografie te bestuderen [van den Broek et al. 1998]. Voor deze studie gebruiken we de hieronder toegelichte data uit de data-set.

PHARUS data Heerde

Deze opgenomen data van het testgebied heeft de IJssel als belangrijkste kenmerkend object. Het testgebied vertoont verschillende typen van landgebruik en is daarom geschikt om terrein-interpretatie met SAR te bestuderen. De gebruikte PHARUS data zijn volledig polarimetrisch en hebben een resolutie van 3 meter. De opnamen zijn gemaakt op 2 juni 1997 en er is gevlogen op een hoogte van 4500 meter met een swath width van 8 km. De invalshoeken variëren van 50 tot 70 graden. In figuur 4.13 laten we de opname zien met HH/HV/VV polarisatie afgebeeld in de rode, groene en blauwe kleuren kanalen. Eén van de meest kenmerkende objecten in het beeld is de plaats Olst naast de rivier de IJssel. Deze data zal met name gebruikt worden in hoofdstuk 5.

DRA data Heerde

Van het Heerde testgebied zijn in 1994 opnamen gemaakt met de polarimetrische C-band SAR van DRA. De resolutie (2 meter) is hoger dan bij PHARUS en laat daarom meer detail zien. We tonen in figuur 8.6 een single look polarimetrisch beeld (HH/HV/VV) in de rode, groene en blauwe kanalen, vergeleken met een PWF gefilterd beeld en het polarimetrische PHARUS beeld. De DRA data wordt in hoofdstuk 8 gebruikt bij de vergelijking van SAR met andere sensoren.

Electro-optische data

Voor de vergelijking van SAR met andere sensoren hebben we gebruik gemaakt van thermisch infrarode opnamen, electro-optische en fotografische opnamen, die aanwezig waren voor een deel van het Heerde gebied nabij het plaatsje Olst [van den Broek 1994]. De electro-optische opnamen waren afkomstig van de CAESAR pushbroom scanner. Er werd opgenomen op 22 september 1994 (om 15:00 uur) in 3 banden (nabij-infrarood, rood en groen). De resolutie bedroeg 1.5 meter, die tevens geresampled is tot 3 meter, zodat een directe vergelijking met PHARUS mogelijk is. We tonen in figuur 4.14 het polarimetrische PHARUS beeld op standaard wijze afgebeeld vergeleken met de 3 meter CAESAR data met de nabij infrarode, rode en groene banden afgebeeld in het rode, groene en blauwe kleuren kanaal.

Thermisch infrarode (TIR) data

De thermisch infrarode opnamen (8 -12 micron) zijn gemaakt met een thermische infrarode lijnscanner vanuit een helikopter [van den Broek 1994]. De opnamen vonden plaats tijdens een zonnige ochtend om 11:00, 28 september 1994, zodat de huizen en wegen warm waren geworden en helder afsteken tegen de achtergrond met vegetatie en water dat veel koeler is gebleven. De resolutie is geresampled tot 5 meter en wordt in figuur 4.14 vergeleken met de polarimetrische en electro-optische data.

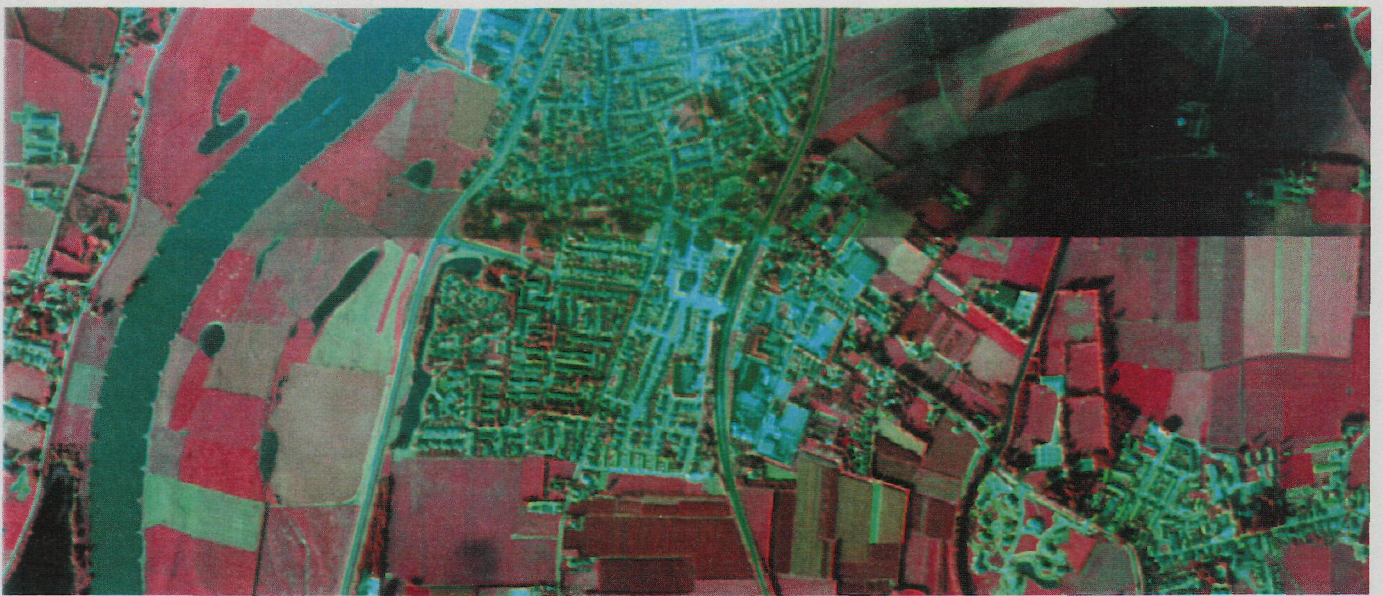
Fotografische data

In augustus 1994 zijn met een F16 fotoverkenner opnamen gemaakt boven Olst. Doordat laag gevlogen is (300 meter) zijn op deze opnamen meer details te zien. Deze fotografische opnamen zijn echter gemaakt met oblique viewing zodat perspectivische vertekening optreedt. In figuur 8.5 (hoofdstuk 8) wordt een van de gemaakte opnamen getoond. We tonen

hier (figuur 4.15) een opname die vergeleken wordt met PHARUS data. Gele lijnen in het PHARUS beeld geven aan welk gedeelte correspondeert met de foto.



Figuur 4.13: PHARUS beeld van het Heerde testgebied in de standaard RGB presentatie.



Figuur 4.14: PHARUS (top, RGB: HH/HV/VV), CAESAR (midden, RGB: nabij infrarood, rood, groen), TIR (onder).



SQ306 Orpheus image (oblique viewing)



PHARUS (RGB: HH/HV/VV)

Figuur 4.15: Polarimetrisch PHARUS beeld en SQ306 foto van Ols.

5. Terrein-interpretatie met SAR

Bij het verkennen en bewaken speelt de interpretatie van het terrein een belangrijke rol. Bij de interpretatie kan men het beeld in verband brengen met een topografische kaart (registratie) dan wel kijken welk type land zich bevindt in het beeld. Ook voor het opsporen van doelen is het belangrijk om de omgeving waarin de doelen zich kunnen bevinden goed in kaart te brengen. Een van de belangrijkste technieken om het terrein goed te interpreteren is classificatie van het beeld naar verschillende terrein typen. In dit hoofdstuk zullen we bestuderen hoe terrein classificatie met polarimetrische data gedaan kan worden.

5.1 Terrein classificatie

De terrein classificatie is toegepast op een gebied met een omvang van ongeveer 6 bij 8 km ten noorden van Deventer (Overijssel). Naar dit gebied zal worden verwezen als het Heerde gebied. Een opname van het Heerde gebied is gegeven in figuur 5.1. In het midden van het beeld is duidelijk een deel van de rivier de IJssel te zien. Het Heerde gebied bestaat voornamelijk uit landbouwgronden. Deze zijn ruwweg op te delen in gras (groen in de figuur) en kale bodem (paars). Hier en daar komt wat bosgebied voor (groen/witte kleur rechts van de IJssel) en ook wat stedelijk gebied (rode kleur rechtsboven in het beeld).

Voor de classificatie zijn er zeven klassen onderscheiden zoals weergegeven in tabel 5.1. Het stedelijk gebied is aangeduid met "stad". Wat landbouwgronden betreft zijn er twee klassen onderscheiden; gras en kale bodem. In figuur 5.1 zijn velden te zien die niet tot deze twee klassen behoren zoals de bruine velden (waarschijnlijk hoog gras) links in het midden en de rode velden (waarschijnlijk omgeploegde grond) rechts in het midden en onder in het midden. Voor dit kleine aantal afwijkende velden is echter besloten geen aparte klassen in te voeren. Merk op dat aangezien de SAR scherend inkijkt er aan de voorkant van het bos een sterke reflectie op zal treden als gevolg van lay-over. Hierdoor kleurt de voorkant van het bos wit zoals goed te zien is in figuur 5.1. Voor de voorkant van het bos is een aparte klasse "licht" ingevoerd. Als gevolg van de hoogte van de bomen is er aan de achterkant van het bos een schaduwzone ontstaan (zwart in figuur 5.1) waarvan geen radar signaal werd ontvangen. Voor de schaduwzones van bosgebieden is de klasse "schaduw" ingevoerd.

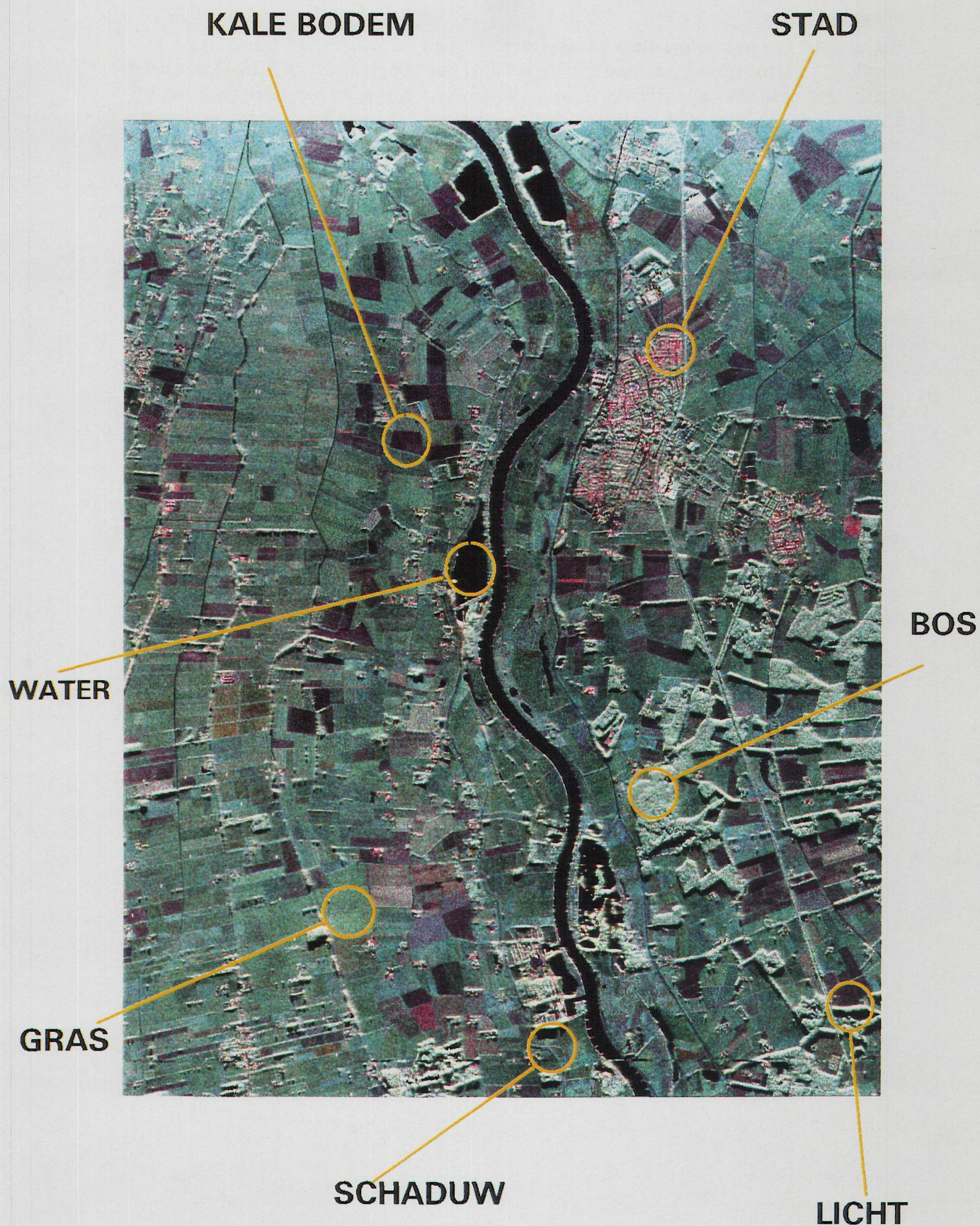
Voor de classificatie is gebruik gemaakt van de classifier beschreven in [Lee et al., 1994]. Volgens deze classifier wordt de discriminant $g_k(x)$ in pixel x met betrekking tot klasse k gegeven door de uitdrukking:

$$g_k(x) = -\ln|C_k| - \text{trace}(C_k^{-1}P(x)) \quad (5.1)$$

Hierin is $P(x)$ de polarimetrische covariantie matrix (zie paragraaf 3.2) van pixel x (gemeten grootheid met SAR) en is C_k de covariantie matrix van klasse k . Pixel x wordt toegekend aan die klasse met de grootste waarde van de discriminant (merk op dat bijv. -3 groter is dan -10). Om het effect van speckle te reduceren gebeurt de classificatie niet per pixel maar per pixel groep. Een groep bestaat uit 6 bij 6 pixels en heeft met een pixelgrootte van 1.4 meter een omvang van ongeveer 8.5 bij 8.5 meter. Er is dus geen sprake meer van een single-look meting maar van een multi-look meting van P . Wat de covariantie matrix C_k betreft, is deze voor iedere klasse bepaald uit een training gebied (zie figuur 5.1) dat karakteristiek wordt geacht voor die klasse.

Tabel 5.1: De 7 klassen van de Heerde land use classificatie.

Klasse	omschrijving	pseudo kleur
1	water	blauw
2	stad	rood
3	bos	groen
4	gras	geel
5	kale bodem	bruin
6	licht	(groen)
7	schaduw	grijs

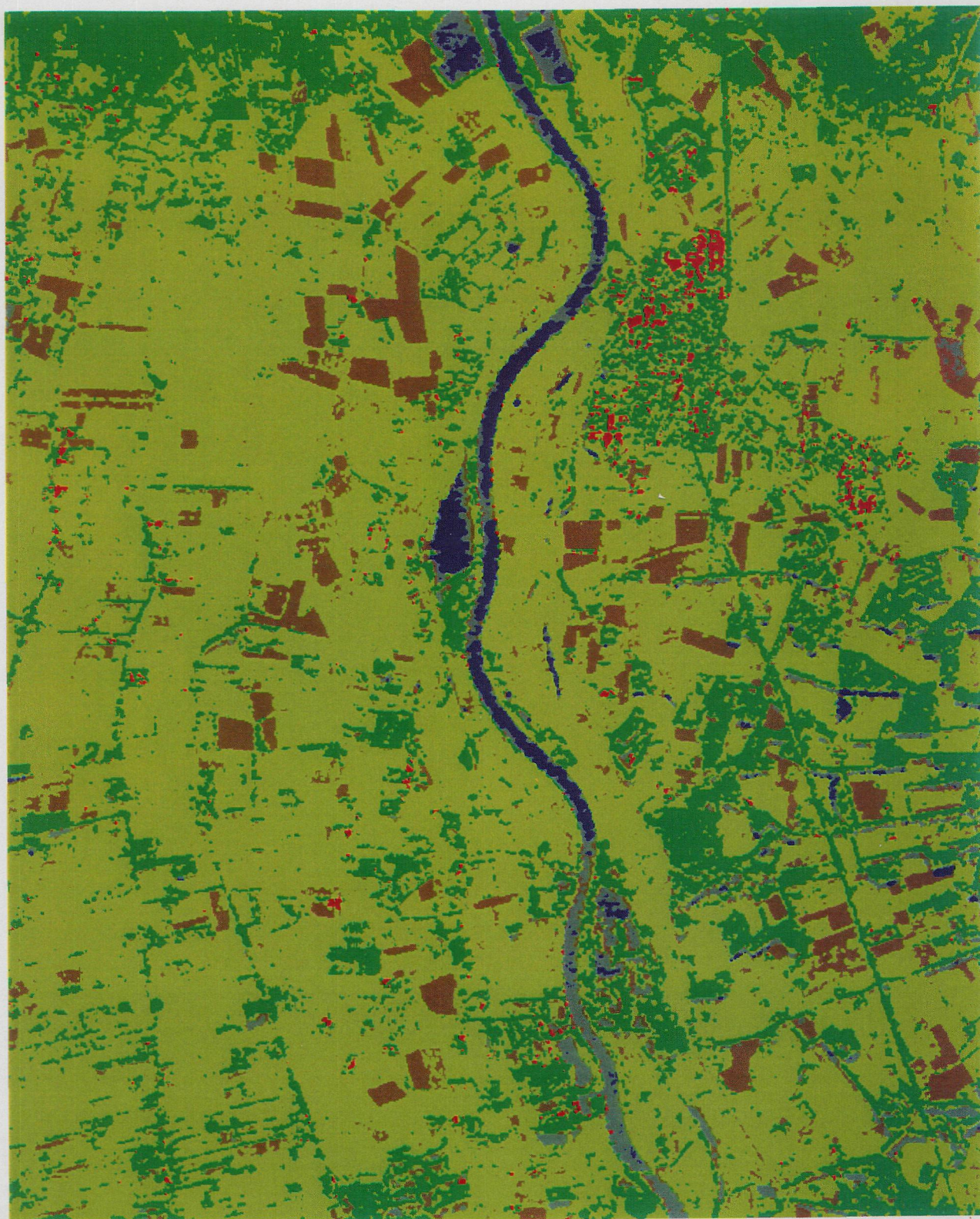


Figuur 5.1: Heerde testgebied zoals in figuur 4.12, waarbij de trainingsgebieden voor de klassen zijn aangegeven.

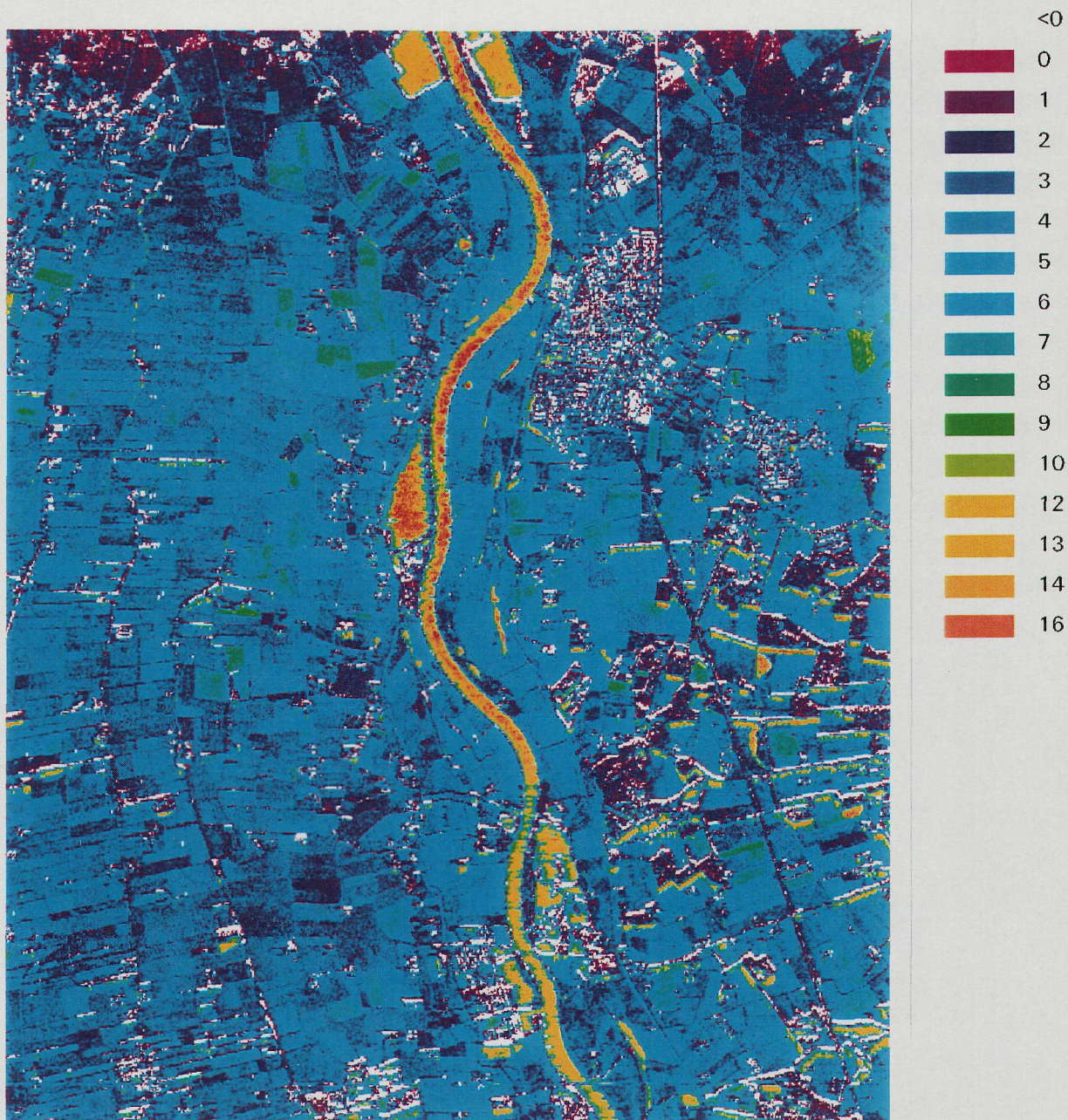
Resultaten

Het resultaat van de classificatie is weergegeven in figuur 5.2 waarbij aan iedere klasse de pseudo kleur is toegekend van tabel 5.1. Vergelijken van de figuren 5.1 en 5.2 laat zien dat de classificatie naar behoren werkt, d.w.z. dat de zeven klassen over het algemeen goed van elkaar te scheiden zijn. Merk op dat aan de bovenkant van het beeld grasland als bos wordt geclassificeerd. Dit wordt veroorzaakt door een onvolledige antenne bundel correctie waardoor de bovenkant van het beeld (near-range) een te hoge intensiteit krijgt (lichte zoom in figuur 5.1) en zo voor de classifier op bos gaat lijken. Merk ook op dat de randen van het water als “kale bodem” worden geclassificeerd. Dit komt doordat de radar reflecties van de oever de waterrand overstralen zodat deze laatste door de classifier voor kale bodem wordt aangezien.

Er zijn twee analyses uitgevoerd. Ten eerste is gekeken naar de waarden van de discriminant als een functie van positie (x en y coördinaten in het beeld). Deze analyse heeft tot doel om te kijken of in bepaalde pixels de waarde van de discriminant zo groot is dat het niet meer reëel is om dat pixel aan een van de klassen toe te kennen. Het pixel wordt dan als het ware in een klasse geforceerd. Om dit probleem te ondervangen zou er een aparte klasse “onbekend” kunnen worden gedefinieerd voor pixels met een discriminant boven een bepaalde waarde. Ten tweede is een covariantie analyse uitgevoerd. Hierbij worden de covariantie matrices C_k van alle klassen met elkaar vergeleken om te zien of er overeenkomsten zijn hetgeen tot verwarring van twee klassen kan leiden. Ook heeft een covariantie analyse tot doel om te zien wat voor invloed de verschillende componenten van P en C_k op de classificatie hebben.

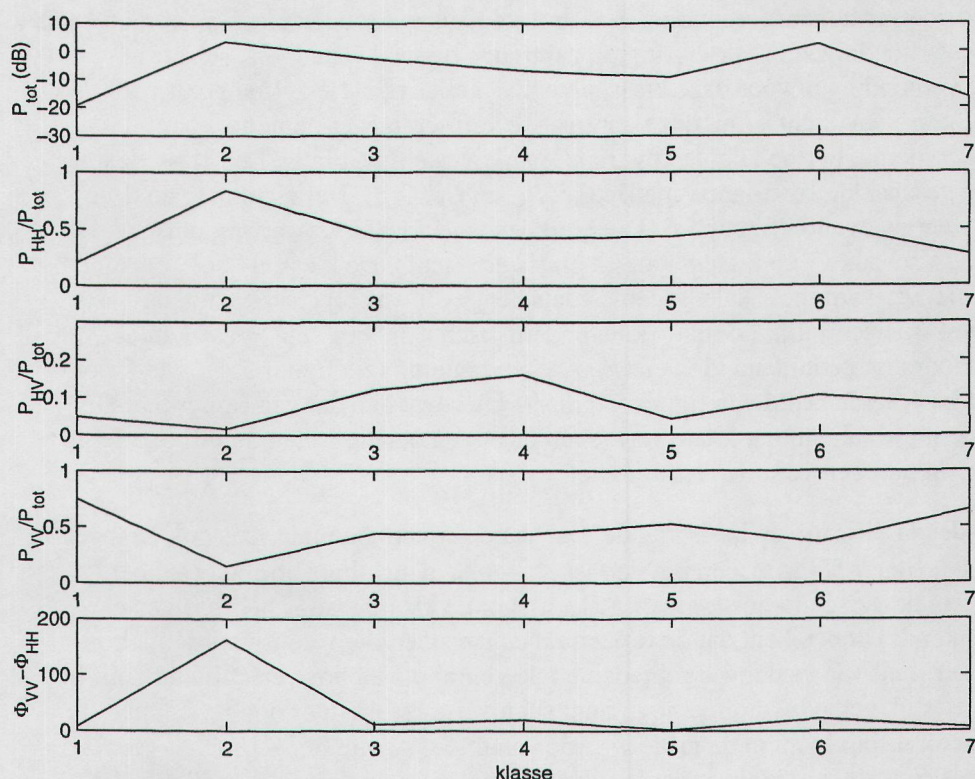


Figuur 5.2: Classificatie resultaat voor het Heerde gebied voor de klassen in tabel 5.1. Klasse 6 (licht) is hier afgebeeld als bos en dus groen gemaakt.



Figuur 5.3: Discriminant waarden weergeven over het beeld.

In figuur 5.3 is de discriminant waarde als functie van positie weergegeven. De discriminant in deze figuur heeft betrekking op de klasse die aan het pixel is toegekend (winnende klasse). Voor de verdeling van de discriminant waarden zijn de volgende statistieken gevonden: een gemiddelde van 5.4, een standaard afwijking van 4.7, een minimum van -2408.9, en een maximum van 16.7. Duidelijk zichtbaar in de figuur is dat de waarde van de discriminant sterk gecorreleerd is met de klasse. Bijvoorbeeld, een discriminant groter dan 12 treedt alleen op voor de klassen “water” en “schaduw”. Deze correlatie wordt veroorzaakt door de aard van de classifier, immers de polarimetrische covariantie P is nagenoeg gelijk voor iedere pixel van bijv. de klasse “water” hetgeen voor al deze pixels tot dezelfde waarde van de discriminant leidt. Bovenstaande statistiek laat zien dat afwijkend grote waarden van de discriminant alleen optreden voor negatieve waarden. Figuur 5.3 laat zien dat deze waarden behoren tot klasse 6. Het invoeren van een klasse “onbekend” is dus gelijk aan het hernoemen van de klasse “licht” zodat hiervan is afgezien.



Figuur 5.4: Resultaten covariantie analyse (zie ook tabel 5.1 voor de nummering van de klassen).

De resultaten van de covariantie analyse zijn weergegeven in figuur 5.4. Een pixel van een bepaalde klasse kan zich van andere klassen onderscheiden op basis van drie soorten informatie die aanwezig zijn in de polarimetrische covariantie matrix P van het pixel (zie ook paragraaf 3.2). De classificatie baseert zich dus op deze drie soorten informatie.

Ten eerste is er het totale vermogen P_{tot} van de meting P . Dit vermogen is gedefinieerd als de som van de vermogens in de HH , HV , en VV kanalen en komt in een SAR beeld tot uitdrukking als de intensiteit van de radar reflectie in een pixel. Het totale vermogen is voor iedere klasse in de eerste plot van figuur 1.4 weergegeven (verkregen uit de C_k).

Ten tweede zijn er de vermogensverhoudingen van de kanalen ten opzichte van het totale vermogen, d.w.z. P_{HH}/P_{tot} , P_{HV}/P_{tot} , en P_{VV}/P_{tot} . Deze verhoudingen zijn geplot in figuur 5.4 en geven de vermogensverhoudingen weer voor iedere klasse (verkregen uit de C_k).

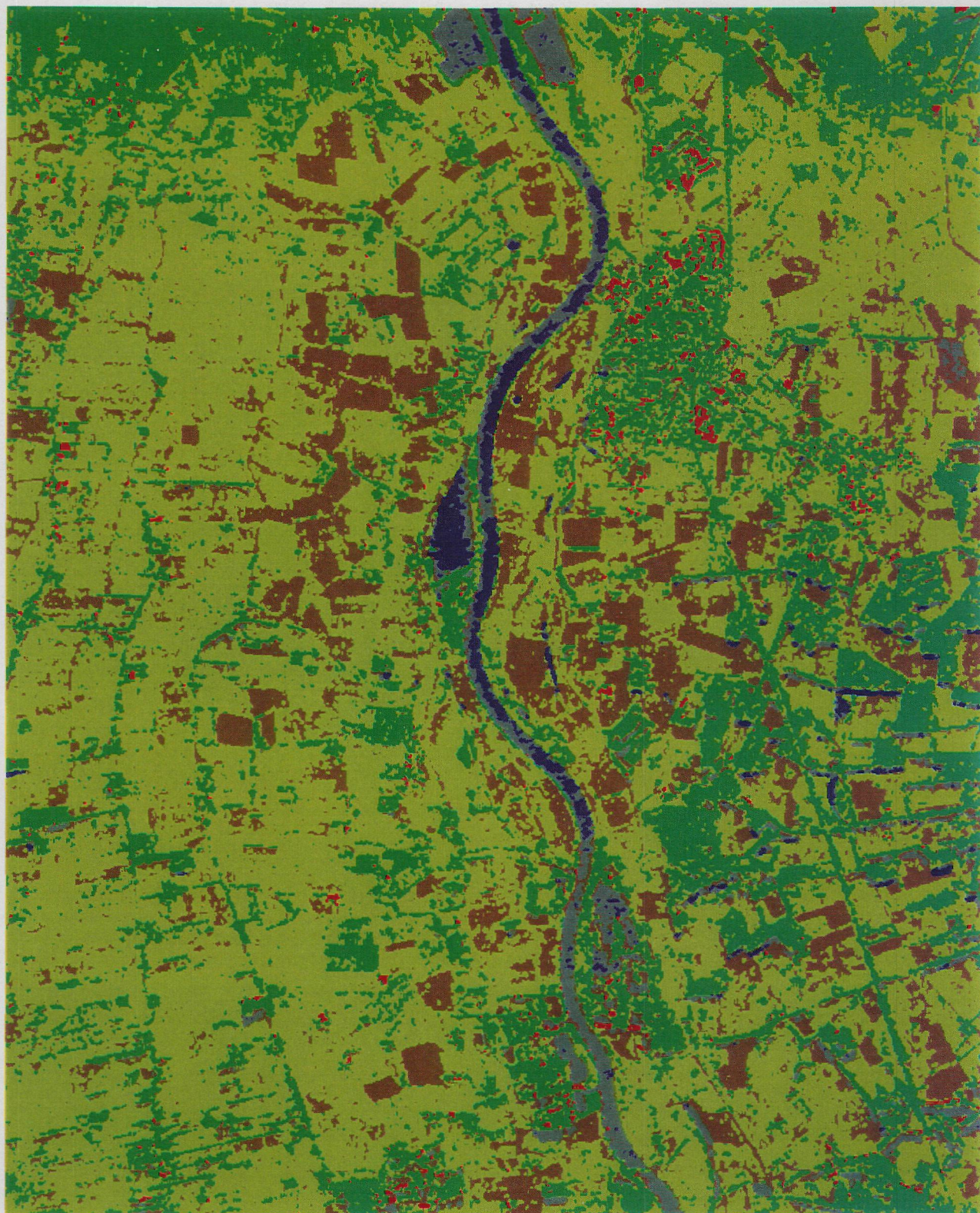
Ten derde is er de fase van het VV kanaal ten opzichte van het HH kanaal, $\Phi_{VV} - \Phi_{HH}$. Deze fasen zijn niet te zien in het SAR beeld maar uiteraard wel te bepalen met de C_k . De fasen zijn weergegeven in de vijfde plot van figuur 5.4.

Uit de plot voor P_{tot} blijkt duidelijk dat als we zouden classificeren op basis van alleen P_{tot} er verwarring zou ontstaan tussen de klassen “water” en “schaduw” (klassen 1 en 7) omdat ze vrijwel gelijke P_{tot} hebben. Hetzelfde geldt voor de klassen “stad” en “licht” (klassen 2 en 6). Ook zal er confusie ontstaan, zij het in mindere mate, tussen de klassen “bos”, “gras”, en “kale bodem” (klassen 3, 4, en 5). Om dit te controleren is er een classificatie uitgevoerd op basis van P_{tot} . Hiertoe is de polarimetrische covariante P van een 6 bij 6 pixel groep in de classificator (5.1) vervangen door het totale vermogen P_{tot} afgeleid uit P . Zo ook is de covariantie matrix C_k in de classificator vervangen door het totale vermogen $(P_k)_{tot}$. Merk op dat de term met de *trace* dan gewoon overgaat in $P_{tot}/(P_k)_{tot}$. Het resultaat van deze classificatie is weergegeven in figuur 5.5 met een zelfde aantal klassen en met dezelfde pseudo kleuren als in figuur 5.2. Als we figuren 5.2 en 5.5 met elkaar vergelijken zien we in geval van de classificatie op basis van P_{tot} inderdaad verwarring tussen “water” en “schaduw” (ook voor de Lee classificator), tussen “stad” en “licht” en in enige mate tussen “bos”, “gras”, en “kale bodem”.

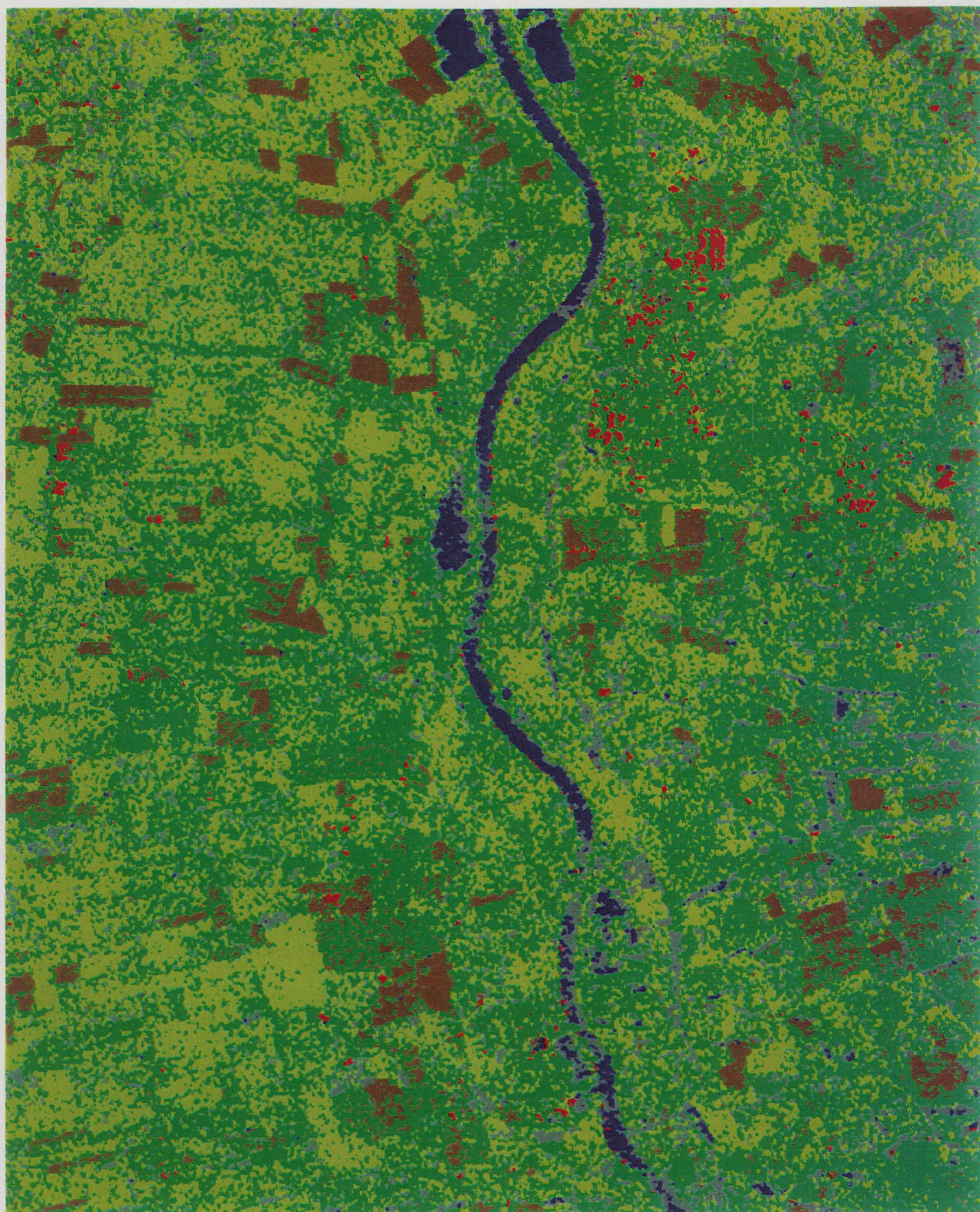
Uit de plots voor de vermogensverhoudingen zien we dat als we zouden classificeren op basis van alleen deze verhoudingen er verwarring op zal treden tussen “water” en “schaduw” omdat alle drie verhoudingen voor deze klassen vrijwel gelijk zijn. Hetzelfde geldt voor de klassen “bos”, “gras”, en “licht”. Om deze confusie te verifiëren is er opnieuw een classificatie uitgevoerd. Hiertoe zijn de covariantie matrices P en C_k in de Lee classificator vervangen door geschaalde covariantie matrices P/P_{tot} en $C_k/(C_k)_{tot}$. Het resultaat van deze classificatie is weergegeven in figuur 5.6. Duidelijk is te zien dat er verwarring ontstaat tussen “water” en “schaduw” en tussen “bos”, “gras”, en “licht”. De klassen “bos” en “gras” worden echter niet verward met “kale bodem” zoals het geval was bij classificatie op basis van P_{tot} . Dit komt waarschijnlijk doordat “kale bodem” zich van “bos” en “gras” kan onderscheiden door zijn beduidend kleinere P_{HV}/P_{tot} verhouding (zie figuur 5.4). Merk ook op dat het geclassificeerde beeld van figuur 5.6 meer ruis bevat dan dat van figuur 5.5. Dit duidt erop dat de informatie in het totale vermogen meer van belang is dan de informatie in de vermogensverhoudingen voor de classificatie.

Merk op dat in de classificatie op basis van de geschaalde covariantie matrices ook de fasen een rol spelen. Uit figuur 5.4 is te zien dat de fase $\Phi_{VV}-\Phi_{HH}$ nauwelijks bijdraagt tot het onderscheiden van de verschillende klassen. Alleen voor de klasse stad is het fase verschil beduidend afwijkend. Dit betekent dat de reflectie mechanismen die verantwoordelijk zijn voor de hoge intensiteit van stedelijke gebieden en de voorkant van bos verschillend zijn. In het geval van stedelijk gebied wordt de hoge intensiteit veroorzaakt door double-bounce effecten hetgeen tot uiting komt in de grote waarde van $\Phi_{VV}-\Phi_{HH}$ van bijna 180° . In geval van bosranden (klasse 6) is de fase klein zodat lay-over de meest waarschijnlijke verklaring is voor de hoge intensiteit van deze klasse.

Concluderend kunnen we zeggen dat de classificatie van de Heerde data set in zeven klassen goede resultaten geeft, d.w.z. dat de klassen over het algemeen goed van elkaar te onderscheiden zijn. Analyses waarin een classificatie is uitgevoerd op basis van het totale vermogen, op basis van vermogensverhoudingen, en op basis van fasen, tonen aan dat de classificatie zich baseert, in volgorde van belang, op het totale vermogen, op de vermogensverhoudingen, en op de fasen. Het totaal aan informatie zoals aanwezig in de polarimetrische covariantie geeft uiteraard de beste classificatie resultaten. Tussen de klassen “water” en “schaduw” bestaat aanzienlijke verwarring. Bovenstaande analyses hebben aangetoond dat deze klassen zich niet van elkaar onderscheiden op basis van het totale vermogen, noch op basis van de vermogensverhoudingen, noch op basis van de fasen. Aangezien dit alle informatie is die de polarimetrische covariantie ons biedt zal er altijd aanzienlijke verwarring tussen deze klassen bestaan. Een uitzondering vormt ruw water, zoals dit optreedt bij sterke wind, doordat dit een grotere terugverstrooiing heeft dan schaduw.



Figuur 5.5: Classificatie resultaat zoals in figuur 5.2, maar nu op basis van alleen het vermogen.



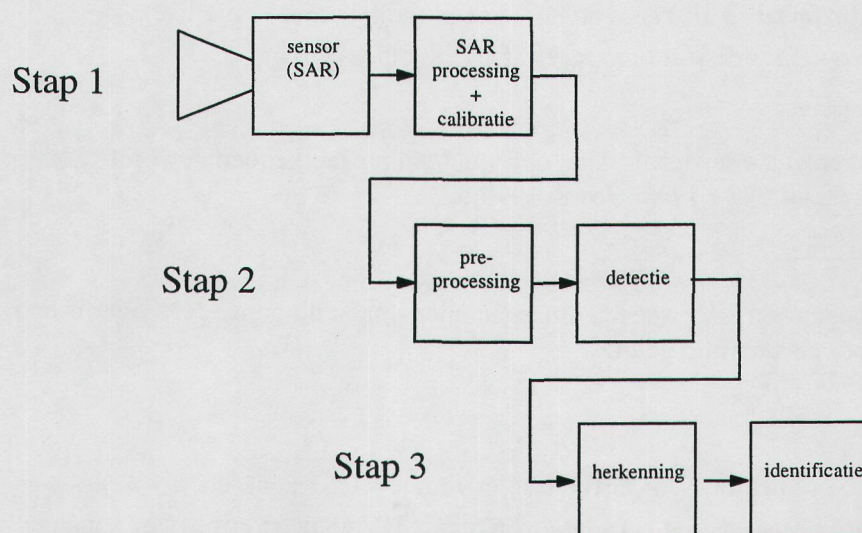
Figuur 5.6: Classificatie resultaat zoals in figuur 5.2, maar nu op basis van vermogens verhoudingen (genormaliseerde covariantie matrix).

6. Doeldetectie met SAR

Doelopsporing met SAR kan verdeeld worden in 3 stappen (zie figuur 6.1):

1. Data acquisitie and data processing.
2. Doeldetectie.
3. Doelherkenning, gevolg door identificatie (zie ook hoofdstuk 2).

In hoofdstuk 4 is de eerste stap, data acquisitie en processing van PHARUS beelden boven het testgebied Swynnerton behandeld. In dit hoofdstuk worden een aantal doeldetectie methoden (stap 2) besproken, terwijl in het volgende hoofdstuk doelherkenning (stap 3) aan de orde komt. In dit hoofdstuk worden een aantal doelopsporingsmethoden op de 'long range' PHARUS opnamen boven Swynnerton toegepast. Doeldetectie met SAR is een proces, dat ook in twee stappen onderverdeeld kan worden. Eerst wordt preprocessing met filters uitgevoerd om de invloed van speckle te verminderen. Daarna wordt een detector toegepast. We beschrijven eerst de methode en bespreken dan de resultaten die verkregen zijn nadat de methoden zijn toegepast op de SAR data.



Figuur 6.1. De verschillende stappen in proces voor doelopsporing met SAR.

6.1 Preprocessing

Detectie in SAR beelden heeft baat bij de reductie van speckle, omdat de standaarddeviatie van de achtergrond van een doel hierdoor afneemt. Binnen dit onderzoek is een literatuur studie gedaan naar polarimetrische en spatieel-polarimetrische filters. Het verslag hiervan is te vinden in [van Halsema, 1998]. Enkele veelbelovende methoden zijn geïmplementeerd en worden hieronder beschreven. Belangrijk bij filteren is dat de resolutie gelijk blijft zodat de reflecties van de doelen niet aangetast worden. Daarom zijn bijna alle spatiële methoden afgefallen. De hier beschreven filters zijn dan ook allemaal polarimetrische filters, op het wavelet-shrinkage filter na. Dit filter bleek zulke goede resultaten op te leveren [Guo, 1994] en was dermate onbekend, dat het is meegenomen in dit onderzoek. De filters zullen worden vergeleken aan de hand van de standard-deviation-to-mean ratio die veel gebruikt wordt in de bestudeerde literatuur. De standard-deviation-to-mean wordt gedefinieerd als [Novak, 1990]:

$$s/m = \frac{\sigma}{\mu} \quad (6.1)$$

Vergelijken we deze definitie met die van vergelijking (4.1) dan volgt dat de standard-deviation-to-mean gelijk is aan $1/\sqrt{ENL}$. Net als bij vergelijking (4.1) geldt ook hier dat het gebied waarbinnen de standaard deviatie en het gemiddelde worden bepaald, homogeen moet zijn en dus geen textuur mag bevatten. De standard-deviation-to-mean ratio, s/m ratio of

$\Delta(s/m)$ is het verschil tussen de in- en output standard-deviation-to-mean van een filter. Beiden (s/m en ratio) worden meestal uitgedrukt in dB's ($20\log(s/m)$). We geven hieronder een overzicht van de bestudeerde filters.

Dual Channel

Polarimetrische data is normaal gesproken driekanaals. Er zijn ook systemen te bedenken die twee kanalen bezitten. In [Nasr 1990] is onderzocht wat dit voor effect heeft op het detecteren van gedistribueerde doelen. Onderzocht is het gemiddelde:

$$y = \frac{|HH|^2 + |VV|^2}{2} \quad (6.2)$$

Voor de standard-deviation-to-mean ratio geldt:

$$\Delta(s/m) = \frac{\sqrt{1 + \gamma^2 + 2|\rho|^2\gamma}}{1 + \gamma} \quad (6.3)$$

Voor de definitie van de parameters γ en ρ wordt verwezen naar vergelijking 3.11. Het is gemakkelijk in te zien dat wanneer beide kanalen gelijk zijn ($\gamma = 1$) en niet gecorreleerd ($\rho = 0$), de s/m ratio maximaal -3 dB kan worden. In de praktijk komen dergelijke achtergronden zelden voor en is de s/m ratio meestal slechter dan -3 dB.

Total Power (TP)

Het gemiddelde vermogen van driekanaals data, ook wel total power genoemd, wordt doorgaans als volgt berekend [Nasr 1990, Novak 1990]:

$$y = \frac{|HH|^2 + 2|HV|^2 + |VV|^2}{4} \quad (6.4)$$

Hierbij wordt het vermogen van HV twee keer meegenomen omdat dit gemiddeld lager is dan dat van HH en VV. Voor de s/m ratio geldt:

$$\Delta(s/m) = \frac{\sqrt{1 + 4\varepsilon^2 + \gamma^2 + 2|\rho|^2\gamma}}{1 + 2\varepsilon + \gamma} \quad (6.5)$$

De maximale s/m ratio voor het total power filter volgt voor $\varepsilon = 0.5$, $\gamma = 1$ en $\rho = 0$, en bedraagt -4.77 dB. Hierbij mag er geen correlatie zijn tussen HV en de overige twee kanalen. In de praktijk is de s/m ratio bijna altijd slechter dan -4.77 dB.

Optimal Intensity Sum (OIS)

Het Optimal Intensity Sum filter is vergelijkbaar met de vorige twee filters. Het verschil is echter dat het een adaptief filter is en een optimaal gemiddelde of som van de vermogens berekent op basis van de covariantie matrix van de gemiddelde achtergrond. De filter vergelijking is als volgt [Novak 1990]:

$$y = \frac{|HH|^2 + \frac{1+|\rho|^2}{\varepsilon}|HV|^2 + \frac{1}{\gamma}|VV|^2}{3+|\rho|^2} \quad (6.6)$$

Dit filter kent twee varianten: (a) waarbij in een moving window rond ieder pixel de gemiddelde covariantie matrix van de achtergrond wordt berekend en (b) een snelle variant waarbij één gemiddelde covariantie matrix wordt gebruikt voor het hele beeld. Voor de s/m ratio van de (a) variant geldt:

$$\Delta(s/m) = \frac{\sqrt{3 + 4|\rho|^2 + |\rho|^4}}{\sqrt{9 + 6|\rho|^2 + |\rho|^4}} \quad (6.7)$$

Voor de (b) variant geldt deze vergelijking alleen als de gemiddelde covariantie matrix rondom een pixel gelijk is aan de globale covariantie matrix. De voorkeur gaat uit naar de (b) variant vanwege de snelheid en het feit dat de te detecteren doelen in één beeld vaak

eenzelfde achtergrond hebben. Is er geen correlatie tussen HH en VV ($\rho = 0$) dan is de s/m ratio -4.77 dB. Zijn ze volledig gecorreleerd ($\rho = 1$) dan is de s/m ratio -3 dB.

Polarimetric Whitening Filter (PWF)

Het Polarimetric Whitening Filter [Novak 1990, 1993] is het optimale polarimetrische filter. De essentie van dit filter is dat het de oorspronkelijke polarimetrische data met de lineaire basis $X=(HH, HV, VV)$ transformeert naar data met een basis waarin de drie kanalen niet gecorreleerd zijn. Het PWF beeld is het gemiddelde van deze kanalen. De filter vergelijking voor multi-look data wordt gegeven door [Liu 1995]:

$$y = \frac{\text{tr}(\Sigma_c^{-1} XX^H)}{3} \quad (6.8)$$

Hier is XX^H de sample covariantie matrix, Σ_c de gemiddelde covariantie matrix van de omgeving rond XX^H en $\text{tr}()$ de trace van een matrix. Het PWF filter kent dezelfde twee varianten als het OIS filter. Voor de s/m ratio van de (a) variant geldt:

$$\Delta(s/m) = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (-4.77 \text{ dB}) \quad (6.9)$$

Om dezelfde redenen als bij het OIS filter gaat de voorkeur hier ook uit naar de (b) variant. Het verschil in prestatie tussen beide varianten bleek minimaal [Novak 1993]. Vergelijking (6.9) geldt dus ook voor de (b) variant. Voor de covariantie matrix Σ_c kan het beste worden gekozen voor die van de achtergrond van de te detecteren doelen.

Dihedral Whitening Filter (DIWF)

Polarimetrische data kan ook getransformeerd worden naar data met de lineaire basis (HH-VV, HV, HH+VV). De eerste twee kanalen van deze basis behoren tot de dihedral-corner (even) reflecties, het laatste kanaal tot de vlakke plaat en trihedral-corner (oneven) reflecties [Freeman, 1992]. Hierbij slaat even en oneven op het aantal keren dat de radar golven worden weerkaatst. Dihedral- en trihedral-corner reflecties zijn kenmerkend voor man-made objecten als militaire voertuigen. Analooq aan het PWF filter wordt de optimale combinatie van de kanalen (HH-VV, HV) het Dihedral Whitening Filter. Het filter kan als volgt worden geschreven [Larson, 1995]:

$$y = \frac{\frac{1}{1+\gamma-2\sqrt{\gamma}\text{Re}(\rho)}|HH-VV|^2 + \frac{1}{\epsilon}|HV|^2}{2} \quad (6.10)$$

De s/m ratio van dit filter is niet bekend.

Trihedral Whitening Filter (TRIWF)

Analooq aan het DIWF is ook het Trihedral Whitening Filter uitgewerkt:

$$y = \frac{1}{1+\gamma+2\sqrt{\gamma}\text{Re}(\rho)}|HH+VV|^2 \quad (6.11)$$

De s/m ratio van dit filter is net als bij het DIWF niet bekend.

Wavelet Shrinkage filter

Het enige niet polarimetrische filter dat is geïmplementeerd is het Wavelet Shrinkage of VisuShrink filter [Donoho 1994, 1995]. Het filter is uitgewerkt ten behoeve van doel detectie en herkenning [Guo 1994]. Het Wavelet Shrinkage filter komt in essentie neer op "soft-thresholding" in het wavelet domein (zie figuur 6.2).

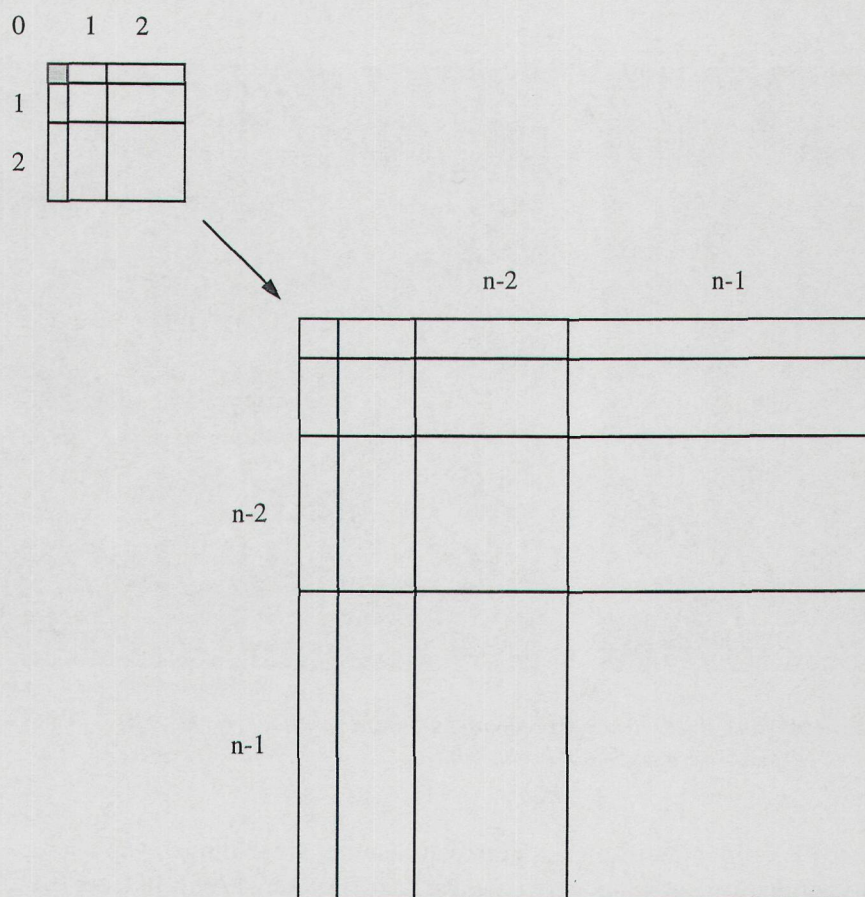


Figuur 6.2: Schematische weergave van het Wavelet Shrinkage filter.

Hierbij wordt de wavelet transformatie uitgevoerd op logaritmisch geschaalde data. Dit heeft het voordeel dat de speckle die van nature multiplicatief is, additief wordt. Nadeel hiervan is dat het gemiddelde na de inverse logaritme niet meer te reconstrueren is [Hoekman, 1991]. Voor detectie is dit geen probleem. Andere operaties zoals classificatie zouden hierdoor echter wel verkeerd kunnen gaan. Als wavelet transformatie werd gekozen voor de Daubechie's wavelet met vier coëfficiënten (D4) [Press, 1992]. Een wavelet transformatie is de inverse Fourier transformatie van een Fourier (frequentie) domein dat is ingedeeld in verschillende logaritmisch ingedeelde frequentie intervallen [Chui, 1992]. Zij bewerkstelligt een decompositie van de verschillende resolutie niveaus die in een beeld aanwezig zijn (zie figuur 6.3). Het hoogste niveau (n-1) bevat voornamelijk ruis en het laagste niveau (0) is de DC component; het gemiddelde. Alleen de hoogste niveaus (op zijn minst vijf) ondergaan soft-thresholding. De laagste niveaus (vanaf 0) blijven gelijk waardoor het gemiddelde van het beeld behouden blijft. Bij soft-thresholding worden waarden niet begrensd, zoals bij hard-thresholding (clipping), maar verlaagd met een bepaalde waarde:

$$w' = \begin{cases} \text{sign}(w)(|w| - t) & \text{if } |w| > t \\ 0 & \text{if } |w| \leq t \end{cases} \quad (6.12)$$

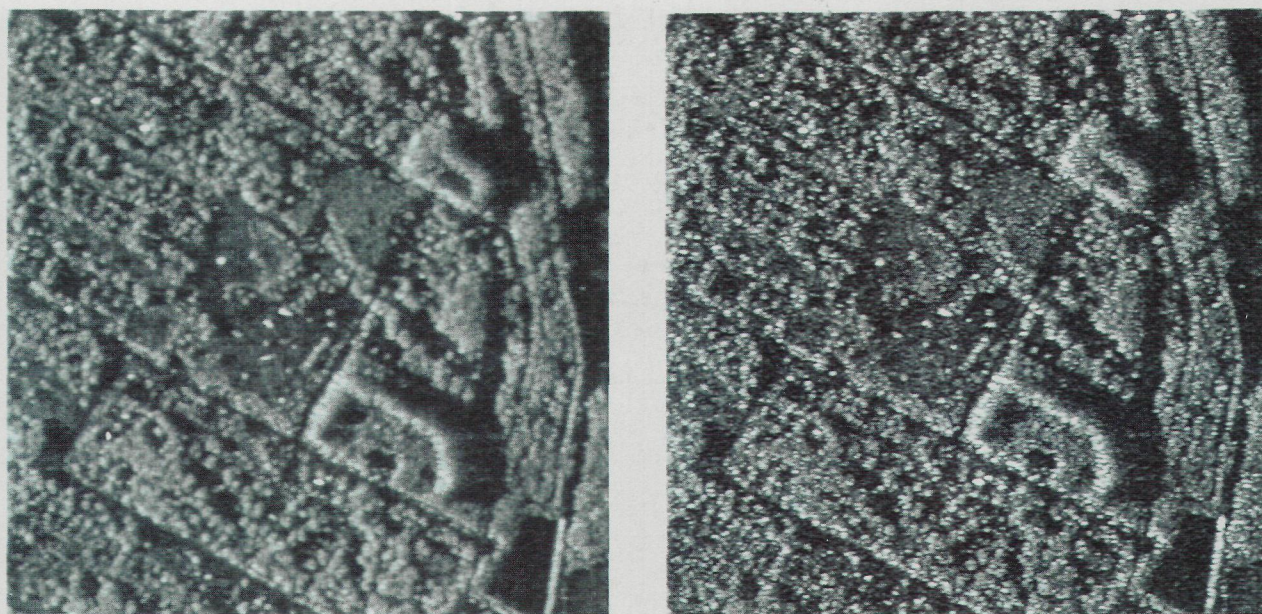
Hier is t de soft-threshold en w een sample van een van de hoogste niveaus in het wavelet domein. [Guo 1994] gaf aan dat de threshold t het beste kon liggen tussen de 1.5σ en 3σ omdat de doelen anders te veel werden aangetast. De standaarddeviatie werd bepaald in het hoogste niveau (n-1). De s/m ratio van dit filter laat zich moeilijk voorspellen. In de literatuur [Guo 1994] worden met de beschreven methode s/m ratios behaald van circa 0.5 (-6 dB) bovenop PWF gefilterde data.



Figuur 6.3: Het wavelet domein van een tweedimensionale wavelet transformatie.

Resultaten

Alle besproken filters behalve het dual channel en total power filter zijn adaptief. Het OIS en de whitening filters (PWF, DIWF en TRIWF) hebben de covariantie matrix van de achtergrond nodig als input. In beide PHARUS opnamen (zie hoofdstuk 4) is nagegaan wat de gemiddelde (20×20 pixels) achtergrond matrix was (tabel 6.1, kolom Σ_c). Uit de foto's gemaakt tijdens het experiment bleek de achtergrond gras te zijn. De s/m ratio's in dezelfde kolom zijn berekend met de formules (6.3), (6.5), (6.7) en (6.9) en de covariantie matrix. In tabel 6.1 zijn de covariantie matrices ook weergegeven van enkele homogene testgebieden die zijn gebruikt voor het bepalen van de s/m ratio's van de filters. Aan de covariantie matrices te zien zijn de velden waarschijnlijk verschillend, de exacte aard is echter niet bekend. Het Wavelet Shrinkage filter is ook adaptief en bepaalt zijn resultaat op basis van de standaard deviatie van de speckle. Het is geïmplementeerd als beschreven. De lengte van de D4 wavelet bedroeg 512×512 samples. Soft-thresholding werd toegepast op de hoogste vijf niveaus (4 t/m 8). De standaard deviatie werd bepaald op het hoogste niveau (8). Uitgewerkt zijn de filters met een soft-threshold van 2.5σ (W2.5S) en 5σ (W5S).



Figuur 6.4: PWF filter resultaat (links) vergeleken met een niet gefilterd resultaat (rechts, HH polarisatie) voor gebied met verplaatsbare doelen in beeld 180X.

Figuur 6.4 toont voor het PWF filter het resultaat. Voor een lijst met afbeeldingen van alle opnamen en resultaten voor de overige filters verwijzen we naar [Dekker, 1998]. In tabel 6.1 geven we voor alle filters s/m ratio's gemeten in de testgebieden. We zien dat de polarimetrische filters binnen een kleine marge voldoen aan de verwachtingen. Verschillen kunnen worden veroorzaakt doordat er toch enige textuur aanwezig is, of door de slechtere signaal-ruis-verhouding besproken in hoofdstuk 4. De verschillen blijven echter klein. Dit geldt niet voor het DIWF en het TRIWF. De Wavelet Shrinkage filters presteren minder dan die van [Guo, 1994]. Vermoed wordt dat de prestaties van deze filters afhangen van wat er aan speckle wordt aangeboden, ofwel, dat wanneer er minder ruis aanwezig is, er minder te filteren valt. In beide gevallen werd PWF data aangeboden, echter het PWF gaf hier betere resultaten dan bij [Guo, 1994]. Vergelijken we onze resultaten van beide wavelet filters met die van het PWF, dan zien we dat het 2.5σ filter een lichte verbetering geeft en dat het 5σ filter het beeld begint aan te tasten. De grens van 3σ lijkt daardoor bevestigd.

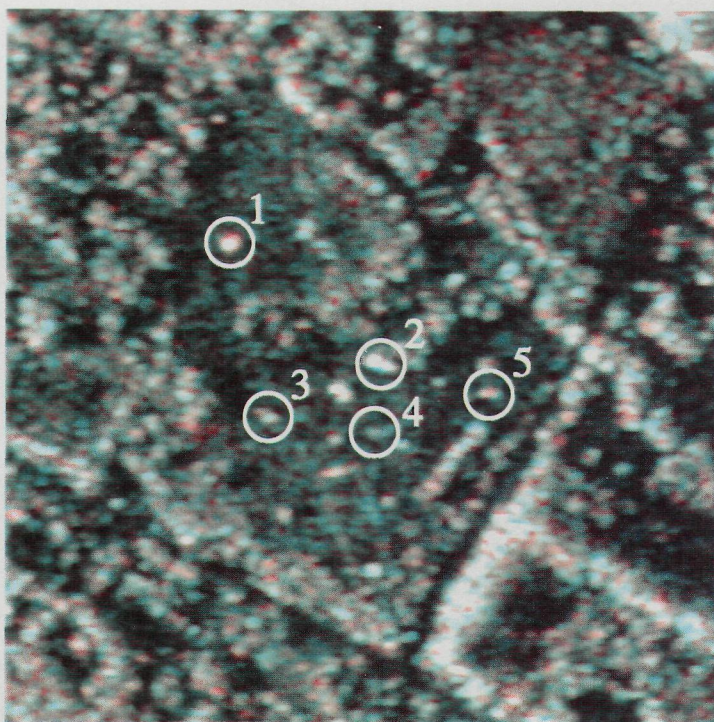
Uit tabel 6.1 blijkt dat het PWF filter het beste polarimetrische filter is. Total power en OIS zijn hiervoor een goed alternatief, mede door de eenvoud van deze filters. Het Wavelet Shrinkage filter geeft nog enige verbetering op het PWF. Of het Wavelet Shrinkage filter doelen aantast blijkt bij de detectie in paragraaf 6.2. Het DIWF presteert goed, vooral bij bomen. Het TRIWF blijkt helemaal niet te filteren. De combinatie DIWF/TRIWF kan worden gezien als een decompositie van dihedral (even) reflecties en vlakke plaat en trihedral (oneven) reflecties. Figuur 6.5 toont een compositie van beide beelden in complementaire kleuren. Een dergelijk beeld geeft een indicatie of reflecties meer even zijn dan oneven of omgekeerd. Wat opvalt is dat vooral in de PHARUS opname 270X er enkele voertuigen zijn met een uitgesproken aard (even/oneven). Tabel 6.2 laat tot slot zien wat de equivalent-number-of-looks zijn van de oorspronkelijke data en na toepassing van de verschillende filters. Wat opvalt is dat het aantal looks (ENL) van de kanalen HH, HV en VV niet gelijk is. Dit kan de resultaten van de diverse filters beïnvloeden.

Tabel 6.1: De covariantie matrices van de achtergrond Σ_c en de test gebieden, en de s/m ratio's van deze gebieden na de verschillende filters.

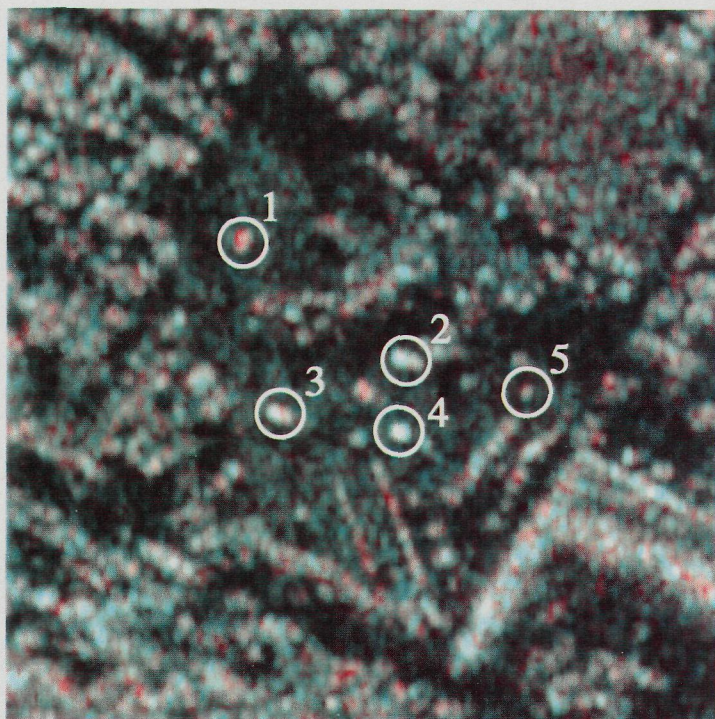
	Σ_c	180X veld	bos	270X veld	bos
ε	0.19	0.16	0.32	0.10	0.27
γ	1.00	1.64	0.93	0.92	0.86
$ \rho $	0.45	0.62	0.36	0.38	0.29
$\angle \rho$	0°	2.7°	26.1°	23.9°	28.3°
s/m to HH					
TRIWF		-0.11	1.38	0.72	1.13
DUAL	-2.21	-1.86	-1.39	-2.10	-1.46
DIWF		-2.77	-4.41	-2.22	-4.01
TP	-3.47	-2.84	-2.78	-2.86	-3.18
OIS	-4.25	-3.67	-3.82	-3.71	-4.04
PWF	-4.77	-4.77	-4.82	-4.23	-4.61
s/m to PWF					
W2.5S		-1.74	-1.16	-1.02	-1.51
W5S		-2.93	-1.83	-1.66	-2.82

Tabel 6.2: Het aantal looks van de test gebieden na de verschillende filters.

	180X veld	bos	270X veld	bos
HH	2.74	2.20	3.01	2.84
HV	1.72	2.49	2.50	3.43
VV	3.16	2.00	2.04	2.49
TRIWF	2.81	1.60	2.55	2.19
DUAL	4.21	3.02	4.88	3.97
DIWF	5.18	6.08	5.02	7.15
TP	5.26	4.17	5.81	5.90
OIS	6.37	5.29	7.07	7.19
PWF	8.20	6.66	7.97	8.20
PWF+W2.5S	12.24	8.69	10.07	11.61
PWF+W5S	16.11	10.15	11.67	15.69



180X



270X

- 1 = GECKO
- 2 = TLAR
- 3 = ASTROSS
- 4 = MTLB
- 5 = ZSU 23-4

Figuur 6.5: Composities van de DIWF beelden (rood) en TRIWF beelden (cyaan): twee decomposities van dihedral (even) reflecties en trihedral (oneven) reflecties.

6.2 Detectoren

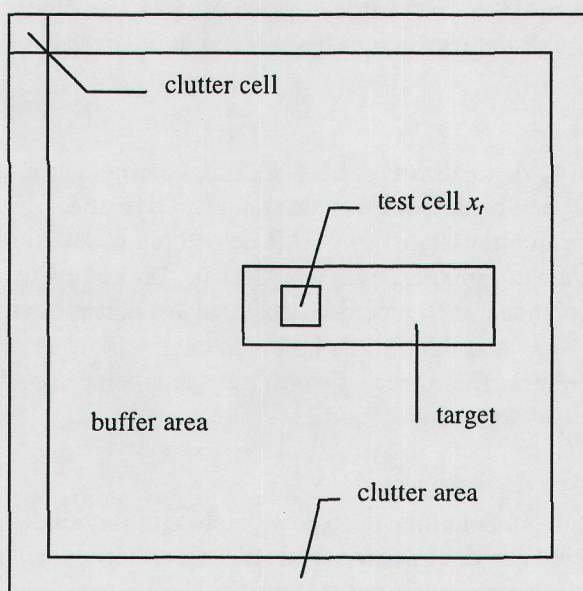
Na de pre-processing (speckle filtering) volgt de detectie van de samples (pixels) die tot een doel behoren. Verschillende detectoren zijn onderzocht.

Klassieke CFAR detector

Bij veel detectoren wordt de waarde van een sample vergeleken met het gemiddelde van de achtergrond clutter. Is het verschil groter dan een bepaalde drempel (threshold) dan wordt aangenomen dat het sample tot een doel behoort. Bij Constant False Alarm Rate (CFAR) detectoren is de threshold gesplitst in de standaard deviatie van de achtergrond en een constante [Goldstein, 1973]:

$$\frac{x_t - \mu_c}{\sigma_c} > K_{CFAR} \quad (6.13)$$

Hier is x_t het sample dat getest wordt, μ_c het gemiddelde van de achtergrond, σ_c de standaard deviatie van de achtergrond en K_{CFAR} de CFAR constante. Voor radar beelden wordt vaak het volgende masker (template) gebruikt [Novak, 1991, 1992]:



Figuur 6.5: CFAR template geometrie met doel.

De betrouwbaarheid van het gemiddelde μ_c en de standaard deviatie σ_c wordt bepaald door de omvang van de template (het aantal achtergrond samples). Hoe hoger het aantal samples des te lager het detectie verlies. De omvang van de template is afhankelijk van de omvang van de doelen, de omgeving en de pixelafmetingen. Wordt een template te klein ten opzichte van het doel, dan bevinden zich te veel doelpixels tussen de clutterpixels waardoor het gemiddelde en de standaard deviatie minder betrouwbaar zijn. Wordt een template te groot dan bestaat de mogelijkheid dat een doel niet meer wordt vergeleken met zijn directe achtergrond, maar met een andere, verder weg gelegen achtergrond. In bijvoorbeeld [Novak, 1991] is gekozen voor een template van 41×41 pixels (totaal 160) corresponderend met een afmeting van $12.5 \text{ m} \times 12.5 \text{ m}$ (pixelafmeting $0.30 \text{ m} \times 0.30 \text{ m}$) ten behoeve van het detecteren van stationaire militaire doelen. De CFAR constante is afhankelijk van de gewenste kans op een loos alarm (false-alarm) veroorzaakt door de ruis in het radar beeld. De relatie is:

$$P_{fa} = \int_{\sigma_x K_{CFAR}}^{\infty} P(x|I=1) dx \quad (6.14)$$

Hier is P_{fa} de kans op een false-alarm, x de intensiteit (het vermogen) van een sample, I de onderliggende intensiteit zonder speckle (het gemiddelde van x), en $P(x|I)$ de gamma

verdeling van x gegeven I [de Vries, 1995]. De relatie tussen de standaard deviatie σ_x en het gemiddelde van x wordt gegeven door vergelijking (4.1). Dit geldt zowel voor de oorspronkelijke kanalen HH, HV en VV, als voor de resultaten van de polarimetrische filters gegeven in paragraaf 6.1.

Uit vergelijking (6.13) blijkt dat de CFAR detector gebaat is bij een zo hoog mogelijke target-to-clutter ratio (t/c ratio: $x_t - \mu_c$) en een zo klein mogelijke standaard deviatie (σ_c). Anders gezegd; een CFAR detector werkt het best wanneer voor een doel geldt dat de t/c ratio gedeeld door de standaard deviatie (deflection ratio) maximaal is. De in paragraaf 4.1 beschreven filters als het PWF reduceren alleen de standaard deviatie van de achtergrond. Er bestaan ook filters die ontworpen zijn om de t/c ratio te vergroten [Novak, 1989, Verbout, 1992]. Het PWF levert echter een hogere deflection ratio op dan al deze filters [Novak, 1992, Verbout, 1992] en is eenvoudiger van opzet. Dit is ook de reden waarom deze filters niet zijn uitgewerkt in paragraaf 6.1.

Order-statistics CFAR detector

Bij order-statistics zijn de samples van een verdeling gerangschikt naar de grootte van de waarde [Rohling, 1983]. Zo is bijvoorbeeld x_{30} de waarde die zich op 30% van het totale aantal bevindt. Een order-statistics CFAR detector wordt beschreven door [Novak 1991]:

$$\frac{x_t - x_m}{x_p - x_q} > K_{CFAR} \quad (6.15)$$

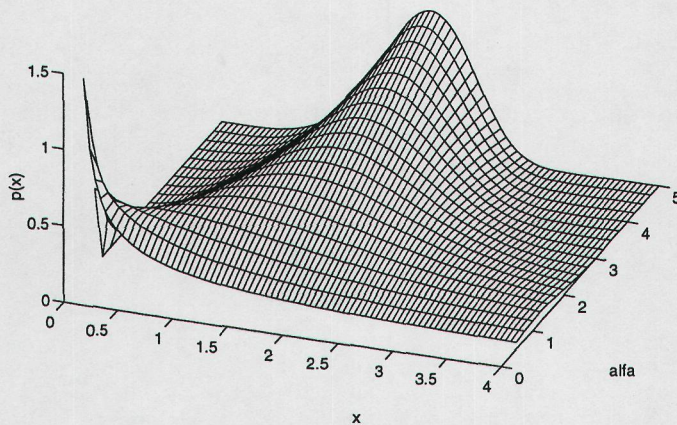
Hier is x_t het sample dat getest wordt, x_m de mediaan (een benadering voor het gemiddelde, ook wel aangegeven met x_{50}) en $x_p - x_q$ een benadering van de standaard deviatie (bijvoorbeeld $x_{60} - x_{40}$). Het voordeel van order-statistics CFAR detectoren is dat zij robuuster zijn wanneer zich doelpixels tussen de clutterpixels bevinden. Dit kan voorkomen wanneer de template noodgedwongen klein is of wanneer zich meerdere doelen naast elkaar bevinden. De order-statistics CFAR detector kent twee varianten: (a) de hollow-stencil variant waarbij de template er uit ziet als in figuur 6.6 en de buffer area niet wordt meegenomen en (b) de solid-stencil variant waarbij de buffer area wel wordt meegenomen.

Weibull detector

De pixel amplitudes van een homogeen gebied binnen een SAR beeld zijn Rayleigh verdeeld [Ulaby 1982]. Bevindt zich in dit gebied een doel waardoor het niet meer homogeen is, dan verandert die verdeling in een Weibull verdeling [Carlotto 1996]:

$$p(x) = \frac{\alpha}{m} \left(\frac{x}{m} \right)^{\alpha-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{m} \right)^{\alpha} \right] \quad (6.16)$$

Hierin is x de amplitude van een sample, m een schalings parameter en α de Weibull parameter. Opgemerkt dient te worden dat in (6.14) x de intensiteit (het vermogen) voorstelt, het kwadraat van de amplitude. De pixel intensiteiten zijn overigens *niet* Rayleigh verdeeld. Vergelijking (6.16) geldt uitsluitend voor 1-look beelden. De Rayleigh verdeling is die van (6.16) voor $\alpha = 2$. Figuur 6.7 toont de Weibull verdeling voor $m = 2$ en verschillende waarden van α .



Figuur 6.7: De Weibull verdeling voor $m = 2$ en verschillende waarden van α .

Figuur 6.7 laat zien dat wanneer $\alpha = 1$, de Weibull verdeling exponentieel is. Wat opvalt is dat naarmate α groter wordt, de verdeling symmetrischer wordt en het maximum verschuift naar m . Voor de mediaan geldt:

$$x_m = \ln^{\frac{1}{\alpha}}(2) m \quad (6.17)$$

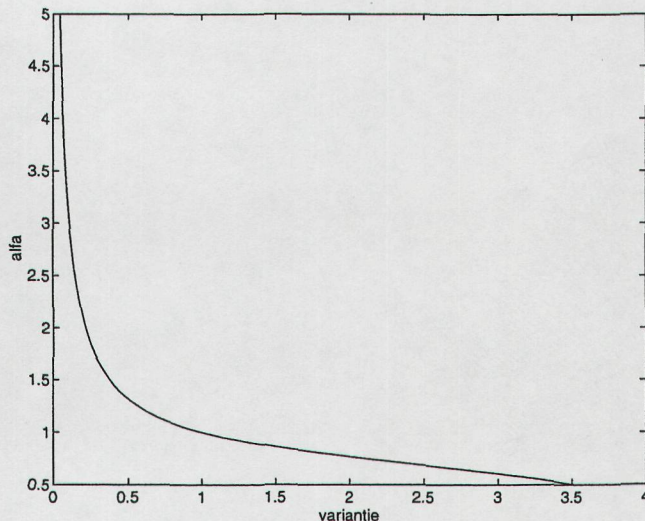
Het gemiddelde en de variantie (het kwadraat van de standaard deviatie) zijn moeilijker af te leiden. Tabel 6.3 toont de gemiddelden en varianties voor enkele waarden van α (analytische uitdrukkingen worden gegeven in [Levanon, 1988]).

Tabel 6.3: Het gemiddelde en de variantie van de Weibull verdeling voor enkele waarden van α .

α	gemiddelde	variantie
0.25	$24m$	$39744 m^2$
0.5	$2m$	$20 m^2$
1	m	m^2
2	$\frac{m}{2} \sqrt{\pi}$	$\left(1 - \frac{\pi}{4}\right) m^2$

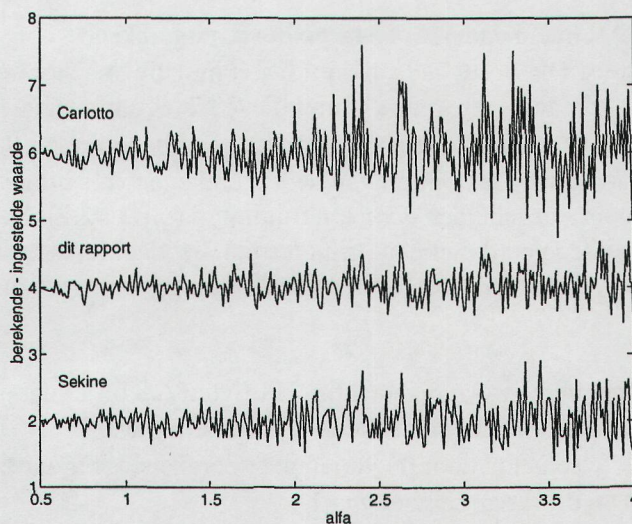
In [Carlotto, 1996] wordt voor een SAR beeld van 512×512 pixels α uitgerekend voor gebieden of subbeelden van 8×8 pixels. Dit wordt gedaan door het cumulatieve histogram van de subbeelden te vergelijken met vooraf uitgerekende cumulatieve histogrammen (voor $1 \leq \alpha \leq 4$, in 32 stappen). Het uitgerekende cumulatieve histogram dat het minste verschil van dat van het subbeeld geeft α . Het blijkt dat een histogram van de uitgerekende α 's bimodaal is (dat wil zeggen twee maxima vertoont), gescheiden door een minimum (bij $\alpha = 2.7$). Het deel rechts van het minimum wordt geassocieerd met natuurlijk terrein, het deel links hiervan met niet-natuurlijk (man-made) terrein. Bebouwde gebieden en een landingsbaan worden op deze manier gedetecteerd.

De bovenstaande manier van bepaling van α is wat omslachtig. Uit figuur 6.8 blijkt dat de variantie van de Weibull verdeling afneemt met toenemende α (de verdeling wordt "spitser"). Het is dus ook mogelijk α te schatten door de variantie te berekenen. Figuur 6.8 laat zien welk verband er is tussen α en de variantie voor $m = 1$.



Figuur 6.8: Het verband tussen α en de variantie van de Weibull verdeling.

De curve is berekend door numerieke integratie voor $\alpha = 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, \dots, 5.00$. Een moeilijkheid is dat er twee onbekende parameters zijn: α en m . Met behulp van vergelijking (6.17), het feit dat de variantie recht evenredig is met m^2 (tabel 6.3) en een eenvoudig iteratief algoritme zijn ze beide te bepalen. In [Carlotto, 1996] wordt dit probleem vermeden door onterecht aan te nemen dat m de mediaan is. Deze benadering is vooral voor kleine α onjuist (zie vergelijking 6.17). Een derde manier om α te berekenen wordt gegeven in [Sekine 1992]. Hierin wordt het probleem gereduceerd tot een kleinste kwadraten fit van een rechte lijn aan de pixelwaarden van een subbeeld. De drie methoden ("Sekine", "dit rapport" en "Carlotto") zijn met gesimuleerde Weibull verdeelde data getest. Figuur 6.9 toont de resultaten voor $m=10$ en $\alpha = 0.50, 0.51, 0.52, \dots, 4.00$. De drie curven zijn het verschil tussen de berekende en de ingestelde waarden (er is een offset van 2, 4 en 6 toegepast). Een maat voor de nauwkeurigheid van een methode is de som van de absolute verschillen uit de figuur. De genormeerde sommen zijn 1.2 (Sekine), 1.0 (dit rapport) en 2.1 (Carlotto). De methode voorgesteld in dit rapport is dus het nauwkeurigst. Bovendien is het de snelste methode: de genormeerde rekentijden zijn 5.3 (Sekine), 1.0 (dit rapport) en 14 (Carlotto).



Figuur 6.9: Vergelijking van de drie methoden om α te schatten.

Resultaten

Bij de implementatie van de CFAR detectoren is gekozen voor een template van 21×21 pixels, ongeveer $32 \text{ m} \times 32 \text{ m}$. Deze template bleek het beste compromis tussen de omvang van de doelen, de omgeving en de pixelafmeting. Aangenomen werd dat een totaal aantal pixels van 80 een voldoende betrouwbaar resultaat oplevert voor het gemiddelde en de standaard deviatie. Dit aantal geldt voor de hollow-stencil detectoren waaronder de klassieke CFAR detector. Een solid-stencil van 21×21 pixels bevat totaal 440 clutterpixels. Bij de order-statistics detectoren is nagegaan welke order-statistics de beste benaderingen gaven voor het gemiddelde en de standaard deviatie. Voor de hollow-stencil variant bleek het beste criterium:

$$\frac{x_t - x_{50}}{x_{85} - x_{15}} > K_{CFAR} \quad (6.18)$$

Voor de solid-stencil variant bleek dit:

$$\frac{x_t - x_{50}}{x_{80} - x_{20}} > K_{CFAR} \quad (6.19)$$

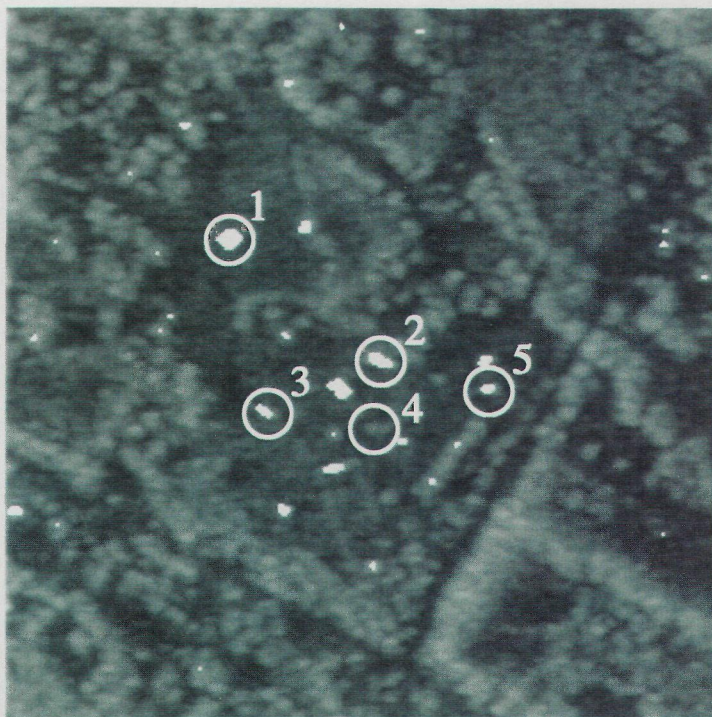
De afstand in de noemer van de solid-stencil variant is kleiner dan bij de hollow-stencil variant. Dit laat zich verklaren door het feit dat de clutterpixels van de solid-stencil variant meer doelpixels bevatten bij de aanwezigheid van een doel in het centrum. Voor alle CFAR detectoren is gekozen voor $K_{CFAR} = 9.5$ omdat deze visueel het beste overzicht gaf van de doelen. Met behulp van vergelijking 6.14 en de gamma intensiteit verdeling [de Vries, 1995] is uitgerekend wat de false-alarm kansen zijn voor verschillende number-of-looks:

Tabel 6.4: De kans op een false-alarm voor verschillende aantallen looks, $K_{CFAR} = 9.5$.

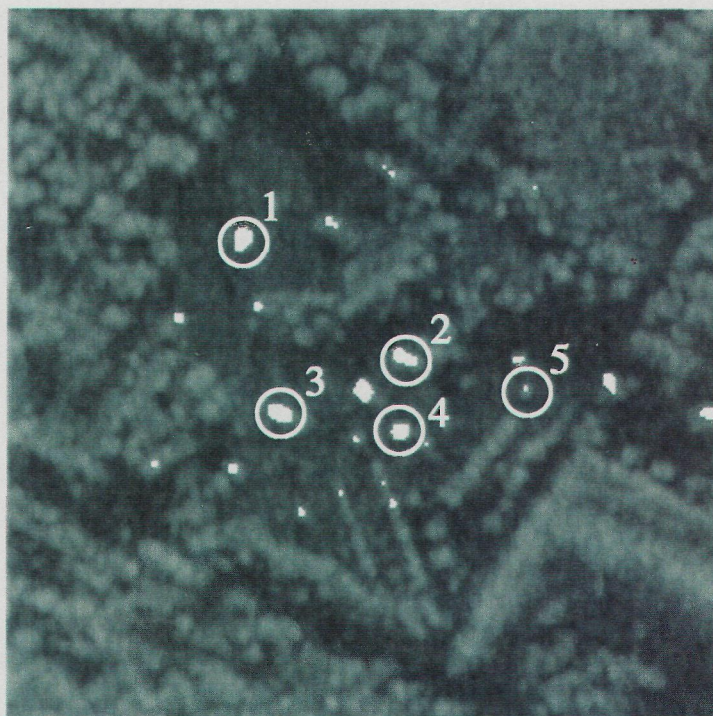
ENL	P_{fa}	percentage
3	10^{-6}	0.0001 %
8	10^{-8}	0.000001 %
20	10^{-10}	0.00000001 %

Opgemerkt dient te worden dat de waarden van tabel 6.4 zijn berekend op basis van de speckle. Het werkelijke aantal false-alarms is hoger omdat er ook objecten worden gedetecteerd waarin men niet is geïnteresseerd. Uit tabel 6.4 blijkt dat de kans op een false-alarm afneemt naarmate het aantal looks toeneemt. Vergelijken we deze resultaten met die uit tabel 6.2 dan zien we bijvoorbeeld dat het PWF de kans op een false-alarm ongeveer $100 \times$ verkleint.

Een uitgebreid overzicht van de resultaten van de klassieke CFAR detector (6.13) en de order-statistics detectoren (6.18) en (6.19), alle drie met $K_{CFAR} = 9.5$ en voor alle filters wordt gegeven in [Dekker, 1998]. Voor een indruk geven we hierbij een voorbeeld in figuur 6.10 voor de order-statistics detector met hollow-stencil variant. De gedetecteerde pixels zijn in wit afgebeeld op de originele maar donkerder gemaakte beelden. Het blijkt dat de kans op een false-alarm afneemt naarmate het aantal looks toeneemt. Vergelijken we beide hollow-stencil CFAR detectoren dan zien we dat de order-statistics detector minder false-alarms genereert dan de klassieke detector. De order-statistics detector is dan ook robuuster, maar de oorzaak kan ook liggen in de keuze van benadering van de standaard deviatie. Hierdoor kan de kans op een false-alarm voor deze detector lager zijn. Het verschil tussen beide order-statistics CFAR detectoren is klein. De solid-stencil variant lijkt iets beter te werken dan de hollow-stencil variant. Een oorzaak hiervan kan zijn het verschil in het aantal achtergrond samples (respectievelijk 440 en 80) en daarmee de betrouwbaarheid van het gemiddelde en de standaard deviatie. Een waarschijnlijker oorzaak is het verschil in afstand in de noemer van vergelijking (6.18) en (6.19) als benadering voor de standaard deviatie. Het sorteren van 440 pixels (order-statistics) duurt wel langer dan van 80 pixels. Op basis van de resultaten



180X



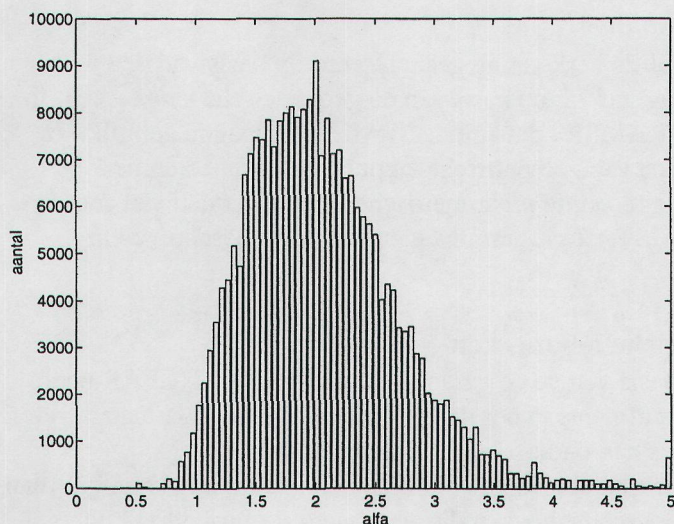
270X

- 1 = GECKO
- 2 = TLAR
- 3 = ASTROSS
- 4 = MTLB
- 5 = ZSU 23-4

Figuur 6.10: De resultaten van de hollow-stencil order-statistics CFAR detector op PWF data.

gaat de voorkeur uit naar de order-statistics detectoren. Het wavelet Shrinkage filter tast het beeld enigszins aan zodat een enkel doel niet meer gedetecteerd wordt. Het meest optimale filter voor detectie lijkt het PWF zijn. Het DIWF is een goede tweede maar geldt specifiek voor het dihedral beeld. Om na te gaan wat een CFAR detector precies detecteert is er ook op pixel niveau naar deze beelden gekeken. Figuur 6.10 toont een vergroting van het resultaat van de hollow-stencil order-statistics CFAR detector op de PWF beelden van de PHARUS opnamen 180X en 270X. In de eerste opname worden vier van de vijf doelen gedetecteerd, in de tweede alle vijf de doelen. Het aantal false-alarms in beide is ongeveer gelijk. De meeste ervan blijken te worden veroorzaakt door bomen. Op basis van figuur 6.10 kan niet direct worden bepaald welke objecten (een groep ogenschijnlijk bij elkaar horende pixels) een voertuig zijn en welke niet. De pixels zijn echter goed gegroepeerd en er kan een uitspraak worden gedaan over de afmeting en soms ook over de richting van een gedetecteerd object.

Voor de Weibull detector zijn de PHARUS opnamen opnieuw verwerkt, zonder multi-looking, omdat de Weibull verdeling alleen geldt voor 1-look data. De α -waarden werden bepaald in gebieden van 5×5 pixels, met behulp van de in dit rapport eerder beschreven optimale methode. Figuur 6.11 toont het histogram van α voor het HH-beeld van opname 180X. De verdeling lijkt een licht scheve normale verdeling, met het maximum bij $\alpha \approx 2$. Dit laatste betekent dat de pixelwaarden Rayleigh verdeeld zijn, zoals valt te verwachten voor een 1-look HH beeld. Er is geen sprake van een bimodale verdeling zoals in [Carlotto, 1996], waarschijnlijk doordat onze beelden maar zeer weinig doelen bevatten. Er werd geen enkel doel door de Weibull detector gedetecteerd. Er worden alleen maar false-alarms waargenomen. De Weibull detector is dus ongeschikt voor het detecteren van doelen in PHARUS data.



Figuur 6.11: Histogram van α van opname 180X HH.

7. Doelherkenning met SAR

Herkenning kan beschouwd worden als onderscheid kunnen maken tussen gedetecteerde doelen. Onderscheid maken is alleen mogelijk als voldoende informatie aanwezig is. Dit betekent in het algemeen dat doelen in het beeld uitgebreid moeten worden afgebeeld, d.w.z. dat meerdere pixels¹ in het beeld tot het doel behoren. Ook kan informatie verkregen worden door naar de polarimetrische covariantie matrix te kijken die bij het doel behoort. De eerste soort informatie is **geometrisch** en de tweede soort **radiometrisch** van aard. De eerste informatie heeft betrekking op vorm en afmeting van het doel, terwijl de tweede meer vergelijkbaar is met kleur in optische beelden. Wanneer zeer veel pixels tot het doel behoren is het mogelijk dat structuren van het doel kunnen worden onderscheiden, d.w.z. men ziet textuur. Herkenning doet men op basis van kenmerken (features). Vorm, kleur, afmeting, polarimetrische covariantie e.d. zijn bijvoorbeeld zulke kenmerken. We onderscheiden hier twee niveaus van herkenning [Johnson, 1958]:

1. vorm, omvang en richting ("shape" en "orientation")
2. detail

Uit het voorgaande zal duidelijk zijn dat voor het eerste herkenningsniveau het doel uitgebreid zal moeten zijn, terwijl voor het tweede herkenningsniveau textuur te zien moet zijn, d.w.z. het doel moet opgelost zijn in zeer veel pixels. Of men dan de gewenste details te zien krijgt hangt af van de manier van afbeelden, het aanzicht van het doel, en ook het golflengte domein waar de sensor in werkt (optisch, radar etc.). Naast onderscheid kunnen maken tussen doelen onderling heeft herkenning ook betrekking op onderscheid kunnen maken tussen doelen en false alarms. Deze false alarms zijn detecties die echter niet verband houden met een militair doel. M.b.v. de CFAR detector, beschreven in het vorige hoofdstuk, zijn in de Swynnerton PHARUS data naast militaire voertuigen ook bomen gedetecteerd. Op basis van de beelden in figuur 6.10 is een verzameling van bekende doelen en false-alarms bepaald (zie figuur 7.1).

In dit hoofdstuk wordt in paragraaf 7.1 de herkenning geanalyseerd op basis van de polarimetrische kenmerken en in paragraaf 7.2 op basis van de geometrische kenmerken. In deze paragrafen wordt PHARUS en RAMSES data uit de MIMEX campagne gebruikt. In paragraaf 7.3 wordt dit gedaan op basis van geometrische en polarimetrische kenmerken samen. Hiervoor wordt echter de hoge resolutie polarimetrische SAR opnamen van een APC (armoured personnel carrier) uit het MSTAR programma gebruikt zoals beschreven in paragraaf 4.3

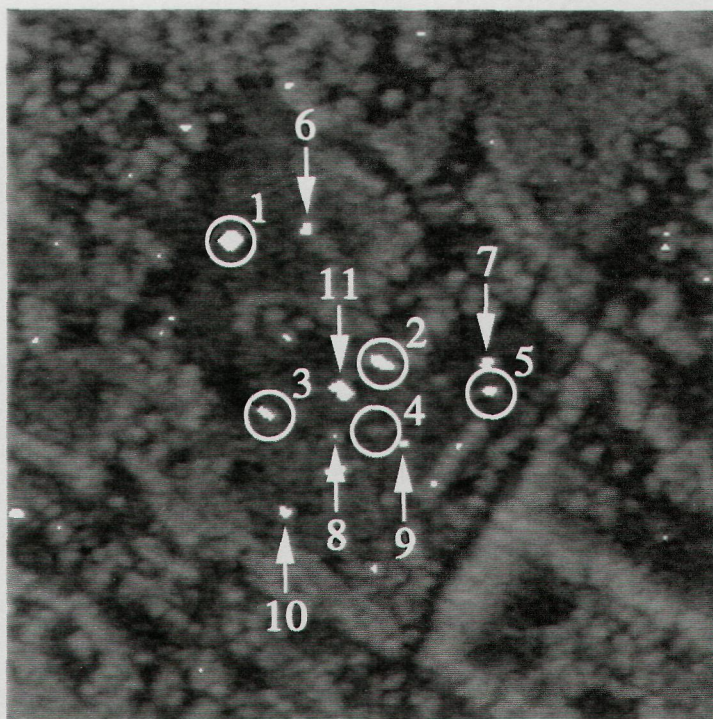
7.1 Herkenning met polarimetrische kenmerken

Een methode voor herkenning is op basis van de covariantie matrix. Het PWF CFAR beeld van figuur 6.10 wordt hierbij gebruikt als "cue" voor de gemiddelde covariantie matrix van een object. Op basis van deze matrices kan onderscheid worden gemaakt tussen dihedral/trihedral structuren en natuurlijke objecten. Voertuigen en andere kunstmatige (man-made) objecten bezitten vaak meerdere rechte hoeken die een dihedral of trihedral kunnen vormen. Tabel 7.1 toont de gemiddelde covariantie matrices van de objecten. Zij zijn verkregen door rond het ogenschijnlijke middelpunt van een object 3×3 covariantie matrices te middelen. Opvallend voor dihedrals en trihedrals is dat de HV component in ieder geval erg klein moet zijn ($\epsilon=0$). Uit tabel 7.1 blijkt dat dit ook nogal eens voorkomt bij bomen. Een ander kenmerk voor dihedrals en trihedrals is de fase van de correlatie coëfficiënt ρ . Voor een goed gekalibreerd beeld horen zij zeer uitgesproken te zijn. Uit tabel 7.1 blijkt dit ook weer bij bomen voor te komen. De uitgesprokenheid correspondeert overigens wel met de compositie van het DIWF en TRIWF in figuur 6.5. Vergelijking van vooral opname 270X in

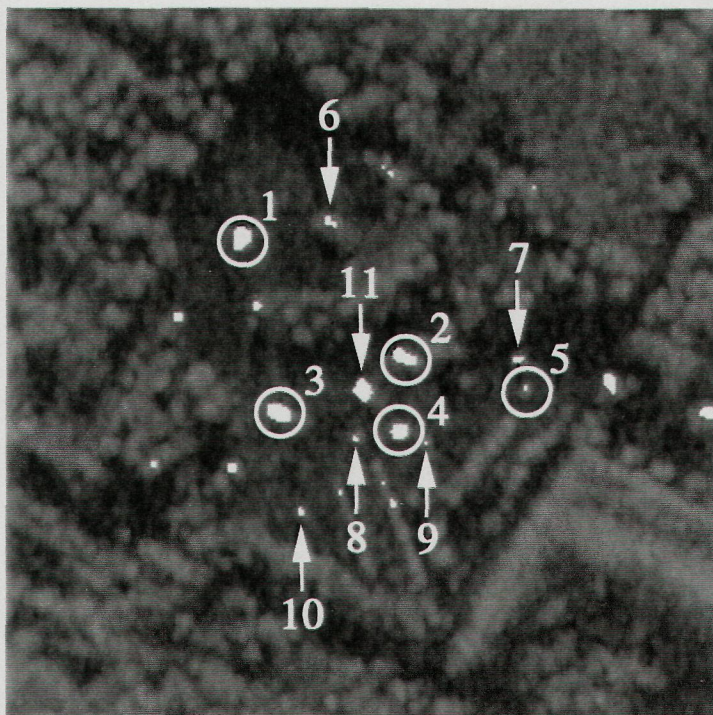
¹ Eigenlijk gaat het hier om de resolutie. We gaan er van uit dat de pixelafmeting en de resolutie ongeveer hetzelfde zijn.

figuur 6.5 en 7.1 laat duidelijk zien dat objecten 1, 6, en 11 (zie figuur 7.1) een dihedral reflectie geven (duidelijke rode kleur die correspondeert met DIWF). De resterende covariantie matrix parameters doen ook weinig verschil vermoeden tussen de voertuigen en bomen. Een oorzaak van het kleine verschil tussen de covariantie matrices kan zijn dat het aantal matrices dat wordt gemiddeld (3×3) niet voldoende is voor een betrouwbaar gemiddelde. Het verkrijgen van meer samples en een betere resolutie is echter niet mogelijk zonder de radar aan te passen.

Uit de twee behandelde voorbeelden blijkt in ieder geval dat classificatie van de doelen moeilijk is bij de huidige resolutie. Voor een discussie bij hogere resolutie verwijzen we naar volgende paragraaf van dit hoofdstuk, waarbij een APC (zie paragraaf 4.4) opgenomen bij hogere resolutie wordt bediscussieerd en verder naar [de Vries, 1998], waarbij een aantal andere voertuigen bij hogere resolutie zijn bestudeerd.



180X



270X

Figuur 7.1: De verzameling gedetecteerde objecten (bekende doelen en false-alarms) die is gebruikt voor het testen van enkele herkenningmethoden. De nummers corresponderen met tabel 7.1. Detectie is gedaan op basis van de hollow-stencil order-statistics CFAR detector en PWF data (zie ook figuur 6.10).

Tabel 7.1: De 3×3 gemiddelde covariantie matrices van de gedetecteerde objecten 1 t/m 11. Opgenomen zijn ook de matrices van een dihedraal ($\alpha = 0^\circ$) en een trihedraal [Freeman 1992].

No.	object	180X				270X			
		ε	γ	$ \rho $	$\angle\rho$	ε	γ	$ \rho $	$\angle\rho$
-	dihedral	0	1	1	180°	0	1	1	180°
-	trihedral	0	1	1	0°	0	1	1	0°
1	GECKO	0.27	1.20	0.35	-114°	0.13	1.47	0.84	158°
2	TLAR	0.02	0.53	0.91	-27°	0.14	1.13	0.58	-7°
3	ASTROSS	0.04	0.54	0.68	-56°	0.12	1.77	0.61	66°
4	MTLB	0.09	1.31	0.65	-22°	0.26	5.59	0.72	-1°
5	ZSU 23-4	0.03	0.16	0.66	139°	0.16	0.65	0.76	90°
6	boom	0.23	0.49	0.71	-33°	0.67	1.90	0.52	129°
7	boom	0.22	1.24	0.72	-65°	0.20	0.81	0.64	-61°
8	boom	0.17	0.58	0.39	-17°	0.05	0.97	0.79	-56°
9	boom	0.04	0.33	0.69	31°	0.86	1.26	0.77	-3°
10	boom	0.34	1.41	0.35	-30°	0.07	0.79	0.80	-3°
11	platform	0.31	1.48	0.81	52°	0.09	0.34	0.74	-142°

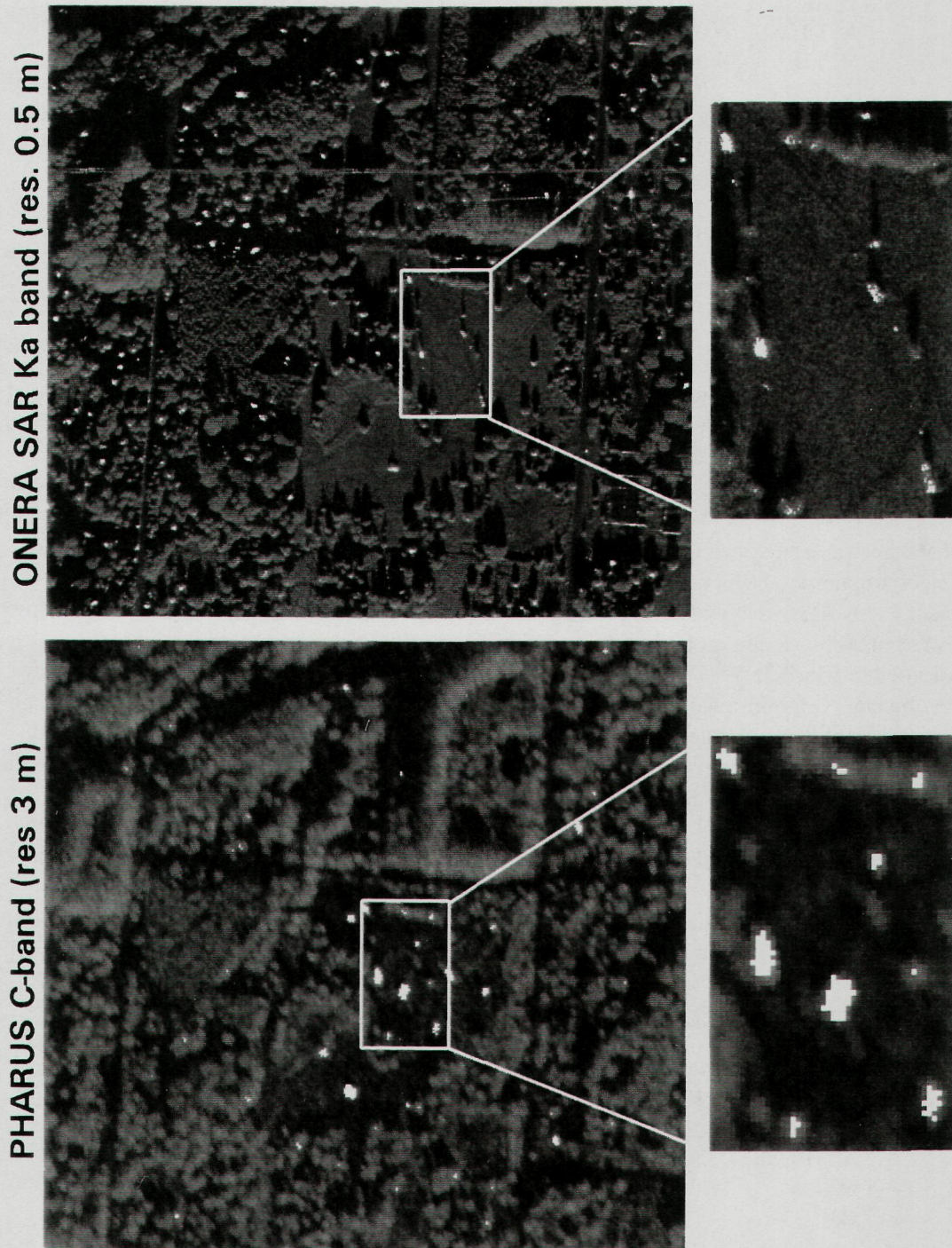
7.2 Herkenning met geometrische kenmerken

Wanneer doelen uitgebreid in het beeld verschijnen is vaak op het oog duidelijk welke pixels bij elkaar horen. Er kan dan een uitspraak worden gedaan over de afmetingen en soms ook de richting van de objecten. Zij zijn gegeven in tabel 7.2. De lengte is bepaald door het aantal pixels op te meten in de ogenschijnlijke oriëntatie richting. De oriëntatie is onderverdeeld in vier klassen: -45° , 0° , 45° en 90° . Er wordt dus geen onderscheid gemaakt tussen de voor- en achterkant van een voertuig. Is een waarde niet gegeven dan is het object niet gedetecteerd (object 4 opname 180X) of te klein om een richting te kunnen bepalen. De identiteit van object 6 t/m 10 is vastgesteld met behulp van de ground-truth data. Object 11 kwam hier niet in voor maar bleek een mobiel verhoogd platform voor het maken van opnamen met radiometers [Bartlett, 1997]. Wordt alleen de lengte in ogenschouw genomen dan kunnen we alle objecten van minimaal 7 m lang beschouwen als een voertuig. Dat dit ook mis kan gaan bewijst object 5 in opname 270X. De lengte van object 5 verschilt aanzienlijk tussen beide opnamen. De oorzaak hiervan is de aard van het voertuig en de belichtingsrichting (loodrecht op de vliegrichting) hiervan; enkele graden verschil kan al een volledig andere signatuur opleveren [de Vries 1998]. Een verschil in oriëntatie van een object tussen beide opnamen kan ook een criterium zijn om een object uit te sluiten van de verzameling voertuigen. Dit gaat echter wederom mis voor object 5 in opname 270X. Het is begrijpelijk dat met de minimale informatie die het CFAR beeld oplevert geen betrouwbare classificatie gedaan kan worden. Er is meer informatie nodig.

Tabel 7.2: De berekende lengtes en richtingen van de gedetecteerde objecten 1 t/m 11.

No.	object	180X		270X	
		lengte	oriëntatie	lengte	oriëntatie
1	GECKO	10 m	45°	12 m	45°
2	TLAR	12 m	-45°	12 m	-45°
3	ASTROSS	8 m	-45°	13 m	-45°
4	MTLB	-	-	8 m	90°
5	ZSU 23-4	7 m	90°	3 m	0°
6	boom	6 m	45°	6 m	-45°
7	boom	6 m	45°	6 m	90°
8	boom	2 m	-	4 m	-45°
9	boom	5 m	90°	2 m	-
10	boom	5 m	-45°	5 m	0°
11	platform	11 m	-45°	9 m	-45°

Wanneer hogere resolutie beelden beschikbaar zijn dan is er meer geometrische informatie aanwezig op grond waarvan we besluiten kunnen nemen omtrent bijvoorbeeld de omvang en oriëntatie, die nauwkeuriger zijn dan hierboven kon worden gedaan met de relatief lage resolutie PHARUS beelden. We vergelijken hier een CFAR beeld van PHARUS met een ONERA SAR beeld van hogere resolutie (0.5 meter) in figuur 7.2.



Figuur 7.2: CFAR beeld van PHARUS (180X) vergeleken met een CFAR beeld van de RAMSES Onera SAR. Merk op dat in het PHARUS beeld een duidelijke detectie aanwezig is die niet in het RAMSES beeld te zien is. Tijdens de opnamen met PHARUS was een extra doel neergezet, wat niet het geval was tijdens de opnamen met RAMSES.

Duidelijk is te zien dat in het RAMSES Onera beeld de afmetingen en oriëntatie van de doelen goed te bepalen zijn. Dit is in tegenstelling tot het PHARUS beeld waar eigenlijk alleen maar punt doelen te onderscheiden zijn. Dit wil zeggen dat we de doelen in het PHARUS beeld kunnen detecteren en in het Onera beeld kunnen herkennen op het niveau van "shape" en "orientation".

Van een doel dat uitgebreid is, d.w.z. een doel dat uit meerdere pixels bestaat, moet besloten worden, na detectie van potentiële doel-pixels welke pixels tot het doel behoren. Dit proces noemen we groeperen (**grouping**). In de vorige paragraaf werd dit op het oog gedaan. Als we een idee hebben van wat we zoeken, bijvoorbeeld een voertuig van een bepaalde vorm, dan kunnen we een **template** (masker) gebruiken. In deze paragraaf introduceren we een algoritme, waarin we een template gebruiken om het APC van de achtergrond te isoleren.

Template generatie

In deze paragraaf wordt het algoritme besproken dat is gebruikt om het APC doel uit de clutter te extraheren. Als resultaat geeft het algoritme voor ieder beeld van de test data een template met daarin de APC alsmede de oriëntatie van de APC in termen van de azimut hoek ten opzichte van de vliegrichting. De polarimetrische en geometrische eigenschappen van de APC worden bepaald uit de pixels in de template. Uit alle 68 PWF beelden (zie figuur 4.12) zijn zulke templates gegenereerd. Er is voor de PWF beelden gekozen omdat de speckle hierin minder is dan in de beelden van de drie polarisatie kanalen, HH, HV, en VV. Dit betekent dat de CFAR (Constant False Alarm Rate) detector in het template genererende algoritme makkelijker de pixels kan detecteren die van de APC afkomstig zijn. De verkregen oriëntatie van de templates wordt in paragraaf 7.3 gebruikt om equivalente templates te verkrijgen voor het HH, HV, en VV kanaal, d.w.z. templates met dezelfde oriëntatie als de template van de APC in het PWF beeld. De nauwkeurigheid waarmee het algoritme de oriëntatie van de APC kan bepalen is geschat op ongeveer 3° .

Templates in een doelherkenningsketen

De drie stadia van een doelherkenningsketen kunnen worden omschreven als: (i) detectie, (ii) discriminatie, en (iii) classificatie. In het eerste stadium worden de pixels geselecteerd die mogelijk met een doel corresponderen. Doorgaans gebeurt de detectie op basis van de radar amplitude (CFAR detectie). We zoeken dan naar sterke radar reflecties in het beeld die afkomstig zijn van door de mens vervaardigde (man-made) objecten inclusief man-made clutter zoals gebouwen en bruggen. In het eerste stadium vindt ook groepering plaats van pixels tot zogenaamde "regions of interest" die qua afmeting iets groter zijn dan de afmeting van het doel. Deze "regions of interest" worden uit het beeld geëxtraheerd en doorgegeven aan het tweede stadium van de herkenningsketen. In dit tweede stadium moeten de gebieden of interest die een mogelijk doel bevatten worden gediscrimineerd (onderscheiden) van gebieden die clutter bevatten. Deze discriminatie gebeurt op basis van zogenaamde kenmerken die karakteristiek zijn voor het doel. Hiertoe wordt er ten eerste naar het mogelijke doel gezocht met een template dat de vorm en de afmetingen van het doel heeft. Deze template wordt net zolang in de "region of interest" verschoven en geroteerd totdat hij samenvalt met het doel. Dit kan bijvoorbeeld worden beoordeeld doordat het aantal gedetecteerde pixels in de template maximaal is geworden. Ten tweede worden dan de kenmerken van het object in de template bepaald. Voorbeelden van kenmerken zijn de vorm van het doel of de standaard afwijking van bijvoorbeeld de PWF amplitude berekend als gemiddelde over de pixels in de template. Omdat man-made clutter eenvoudig te verwarren is met een doel zullen sommige templates met man-made clutter het discriminatie stadium passeren. Vandaar dat het derde stadium met als resultaat de classificatie van het object als bijvoorbeeld tank, armoured vehicle of personnel carrier, ook de mogelijkheid moet hebben om een template te verwerpen, bijvoorbeeld door het te classificeren als "niet gevaarlijk" in geval van militaire doelopsporing. Classificatie gebeurt door de template met daarin het

mogelijke doel te vergelijken met radar beelden van een aantal verschillende voertuigen. Voor ieder voertuig dient er dan een set van radar beelden beschikbaar te zijn waarin het voertuig steeds geroteerd is over een hoek van bijvoorbeeld 1° zoals de 68 beelden van onze test data set. Als de template overeenkomt met een van de beelden wordt aangenomen dat we met het desbetreffende voertuig te maken hebben.

Er wordt met nadruk op gewezen dat dit rapport *niet* tot doel heeft om een doelherkenningsketen op te zetten. Er zijn daarom belangrijke verschillen in de manier waarop templates worden gegenereerd in een herkenningsketen en de manier waarop dit is gebeurd in dit rapport. Ten eerste, in een herkenningsketen moeten de regions of interest worden geëxtraheerd uit de opname terwijl in ons geval deze regions reeds beschikbaar waren in de vorm van de 68 opnamen van de test data set (zie figuur 4.12). Ten tweede, om de oriëntatie van het doel te bepalen zal in het discriminatie stadium van een herkenningsketen eerst het middelpunt van de template moeten worden bepaald waarna de oriëntatie kan worden verkregen door de template om dit middelpunt te roteren. In ons geval hoefde het middelpunt van de template niet te worden opgezocht omdat dit vrijwel altijd samen viel met het middelpunt van het beeld zodat er alleen een rotatie om een bekend punt behoefde te worden uitgevoerd om de template uit het beeld te extraheren. Ten derde, in ons geval is de oriëntatie van het doel zoals bepaald uit de PWF beelden alleen gebruikt om equivalente templates te verkrijgen voor uit de HH, HV, en VV beelden. In geval van een herkenningsketen wordt de oriëntatie uiteraard bepaald om te zien of er mogelijk gevaar van een aanval dreigt.

Algoritme beschrijving

Het algoritme om de template met daarin de APC uit de beelden van de test data set te extraheren verloopt in drie stappen. Ten eerste wordt er van ieder PWF beeld een binair beeld gemaakt m.b.v. een CFAR detector. Dit gebeurt door de amplitude X_i van ieder pixel in het 128×128 PWF beeld te vergelijken met het gemiddelde μ_c en de standaard deviatie σ_c van de clutter aan de rand van een vierkant met afmetingen van 60 pixels, d.w.z. twee maal de grootste afmeting van de APC. Het gemiddelde en de standaard deviatie van de clutter worden dus bepaald uit 236 pixels op de rand zoals weergegeven in figuur 6.5. De afmeting van 60 pixels is zodanig groot gekozen dat er geen pixels van het doel in de bepaling van μ_c en σ_c worden meegenomen (pixels in de buffer area doen niet mee in bepaling van μ_c en σ_c). Voor de constante van de CFAR detector bleek een waarde van 4 ($K_{CFAR}=4$) goed te voldoen. Dit houdt dus in dat als een test pixel een amplitude heeft die vier maal groter is dan het gemiddelde van de clutter wordt aangenomen dat het pixel van een doel afkomstig is:

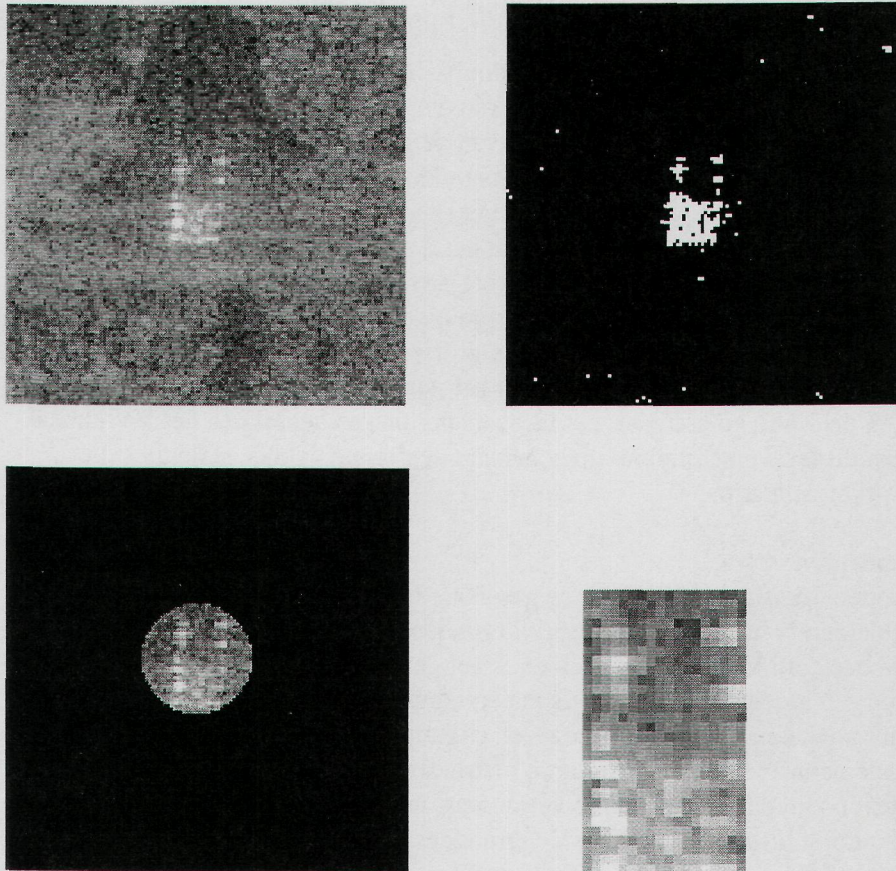
$$\frac{X_i - \mu_c}{\sigma_c} > K_{CFAR} \quad (7.1)$$

Voor $K_{CFAR} < 4$ wordt aangenomen dat het test pixel tot de clutter behoort en krijgt het een binaire waarde van 0. In figuur 7.3 (plot rechtsboven) is het binair gecodeerde beeld van een PWF beeld (linksboven) weergegeven waarin de pixels die als doel zijn geclassificeerd met wit zijn aangegeven. De APC kan eenvoudig worden herkend in het midden van het binaire beeld. In de tweede stap wordt er een cirkelvormig gebied om de APC in het PWF beeld geplaatst. Het middelpunt van deze cirkel valt samen met het middelpunt van het beeld en dus met het middelpunt van de APC. Het resultaat van de tweede stap is weergegeven linksonder in figuur 7.3 In de derde en laatste stap wordt een rechthoekige template (30 bij 18 pixels) waarvan de hoekpunten op de cirkel liggen geroteerd over een hoek van 180° met een stapgrootte van 2° . De waarde van deze stapgrootte is ongeveer gelijk aan de nauwkeurigheid waarmee het algoritme de oriëntatie van de template kan bepalen. De azimuth hoek waarvoor een maximaal aantal gedetecteerde pixels (binaire waarde 1) binnen de template vallen wordt verondersteld de oriëntatie van de template te geven. Het resultaat van deze laatste stap,

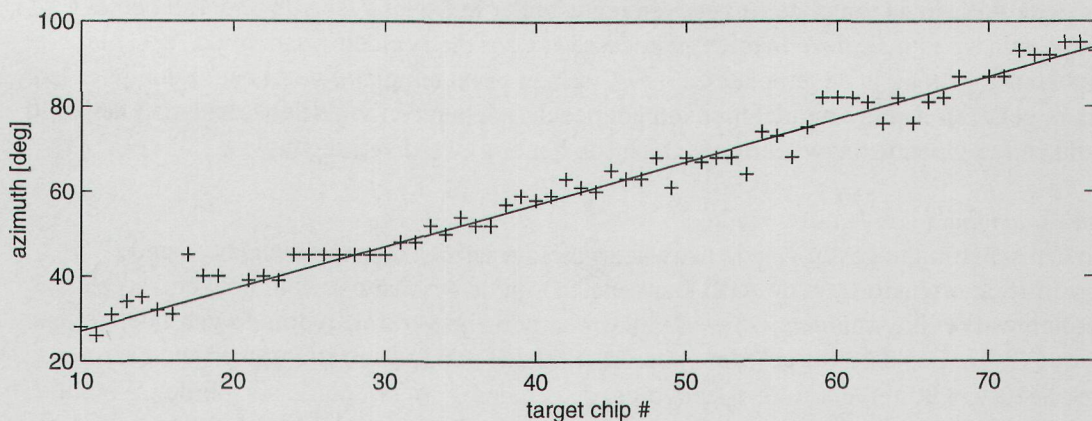
d.w.z. de APC in de template, is gegeven rechtsonder in figuur 7.3. Alle 68 PWF beelden van de test data set zijn op deze manier geprocessed. Voor die beelden waarvan de APC niet nauwkeurig genoeg in de template zat (APC scheef t.o.v. template) werd het middelpunt iets anders gekozen dan het middelpunt van het beeld. Stappen één t/m drie werden dan herhaald totdat een voldoende nauwkeurig resultaat (op het oog) werd verkregen.

Nauwkeurigheid van het algoritme

Om een schatting te geven van de nauwkeurigheid waarmee de template genererende algoritme de oriëntatie van de APC kan bepalen zijn de geschatte azimuth hoeken vergeleken met hun werkelijke waarden. De werkelijke waarden zijn verkregen door te veronderstellen dat de APC in beeld 63 (target clip onderste rij, derde van links in figuur 4.12) een azimuth hoek heeft van 90° en dat twee opeenvolgende beelden 1° in oriëntatie verschillen. Figuur 7.4 geeft het resultaat weer van de geschatte azimuth hoeken voorgesteld door de plus symbolen. De lijn in deze figuur geeft de werkelijke waarden weer zoals bovenstaand gedefinieerd. De verschillen tussen de geschatte waarden en de werkelijke waarden hebben een r.m.s. van 3.1° hetgeen als maat kan worden gehanteerd voor de nauwkeurigheid van het algoritme.



Figuur 7.3: Drie stadia van de template generatie. Weergegeven zijn: PWF beeld van APC (linksboven), (i) binair gecodeerd beeld na CFAR detectie (rechtsboven), (ii) cirkelvormig gebied met daarin APC (linksonder), en (iii) APC in template (rechtsonder).



Figuur 7.4: Geschatte azimuth hoeken (+ symbolen) en werkelijke azimuth hoeken (lijn). Verschillen tussen geschatte en werkelijke waarden hebben een r.m.s. van 3.1° .

7.3 Herkenning met een combinatie van geometrische en polarimetrische kenmerken

Over het algemeen zijn de kenmerken waarmee een doel zich van clutter kan onderscheiden te verdelen in twee groepen; polarimetrische kenmerken en geometrische kenmerken. Polarimetrische kenmerken kunnen worden afgeleid van de polarimetrische covariantie matrix van het doel terwijl geometrische kenmerken betrekking hebben op de vorm en uitgebreidheid van het doel. In deze paragraaf wordt gekeken welke polarimetrische en geometrische kenmerken kunnen worden gebruikt om het doel van de clutter te onderscheiden. Wat de geometrische kenmerken betreft is er een kental bedacht dat een maat vormt voor de dichtheid van de als doel geclassificeerde pixels in de template. Doorgaans bezitten doelen een mate van compactheid en dus een grotere dichtheid dan clutter. Wat polarimetrische kenmerken betreft is er gekeken naar het gereflecteerde vermogen van de drie polarisatie kanalen en de PWF, en ook naar het faseverschil tussen het HH en het VV kanaal. Een grote waarde van dit faseverschil duidt op zogenaamde double bounce reflecties die meestal van doelen afkomstig zijn.

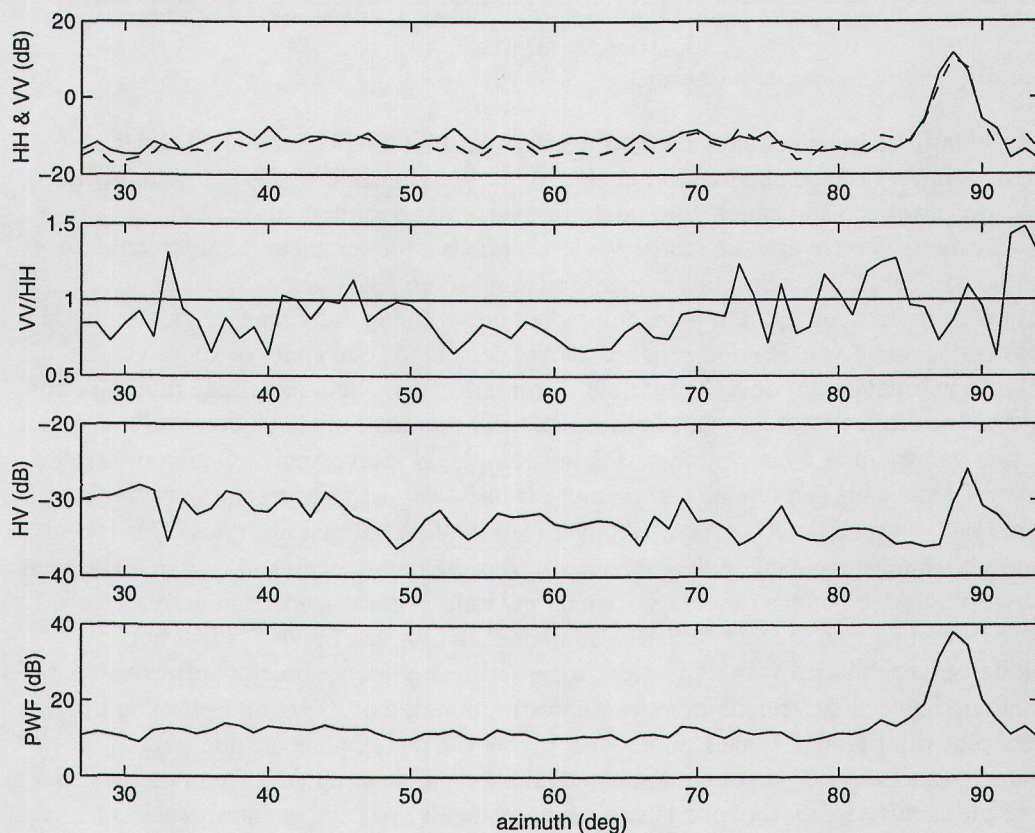
Polarimetrische kenmerken

Van de 68 PWF beelden (zie figuur 4.12) zijn de geschatte oriëntatie (azimut hoeken) en de locaties van het middelpunt van de template gebruikt om identieke templates te verkrijgen uit de HH, HV, and VV beelden. Voor alle 68 beelden is het gemiddeld gereflecteerde vermogen van de APC bepaald (gemiddeld over alle pixels in een template) zodat het vermogen als functie van de azimut hoek kan worden weergegeven (figuur 7.5). Het gemiddelde vermogen wordt bepaald door de polarimetrische covariantie matrices van de pixels in de template te middelen. Weergegeven zijn de gereflecteerde vermogens in de drie polarisatie kanalen HH, HV, en VV, de verhouding tussen de HH en VV vermogens, en het gereflecteerde vermogen van de PWF. Uit figuur 7.5 kan worden opgemaakt dat de vermogens in de drie kanalen en de PWF dezelfde signatuur vertonen als functie van azimut. Voor de meeste oriëntaties van de doelen is het PWF vermogen ongeveer 35 dB groter dan dat in het HH en VV kanaal en ongeveer 45 dB groter dan dat in het HV kanaal. Merk op, dat het PWF vermogen anders geschaald is dan de vermogens in de HH, VV en HV kanalen. De vermogens zijn dus alleen kwalitatief te vergelijken. Uit de plot met de verhouding VV/HH kan worden opgemaakt dat de HH en VV vermogens ongeveer even groot zijn.

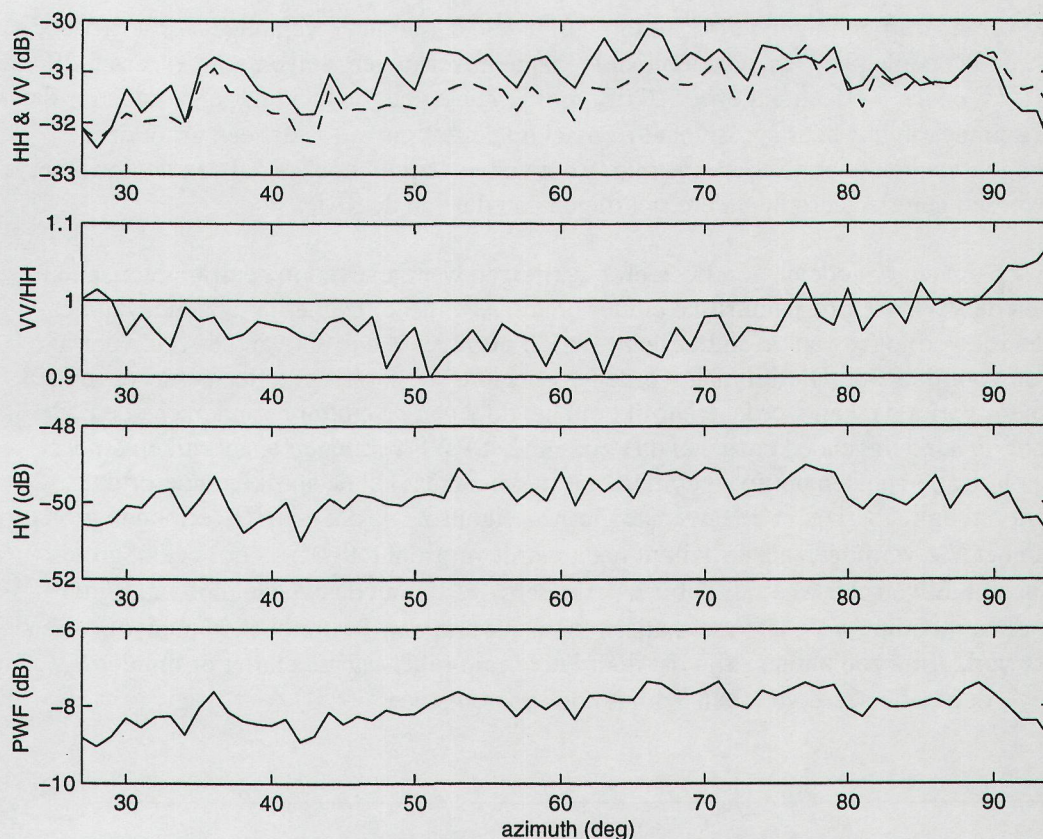
Ondanks dat het gereflecteerde vermogen in een pixel van de APC grote variaties vertoont bij veranderende azimut hoek laat figuur 7.5 zien dat het gemiddelde vermogen van de APC

bijna niet verandert. Een uitzondering hierop vormt een azimuth hoek van ongeveer 90° . Voor deze waarde laten alle plots een aanzienlijke toename in vermogen zien van ongeveer 25 dB voor HH, VV en de PWF en ongeveer 10 dB voor HV. De voor de hand liggende reden is dat voor een azimuth van 90° het radar signaal frontaal op de APC invalt zodat een groot deel wordt terugontvangen door de SAR antenne. Voor andere azimuth hoeken zal een deel van het signaal worden gereflecteerd in andere richtingen dan die van de SAR.

In figuur 7.6 is het gemiddelde gereflecteerde vermogen weergegeven in de drie polarisatie kanalen en de PWF voor de natuurlijke clutter om de APC heen. Duidelijk te zien is dat het gereflecteerde vermogen van de clutter ongeveer 20 dB lager is dan dat van de APC voor alle kanalen en voor de PWF. Hieruit mag worden geconcludeerd dat het gereflecteerde vermogen een kenmerk vormt dat kan worden gebruikt om het doel van de clutter te onderscheiden. De meest voor de hand liggende keuze zou dan zijn om het PWF vermogen te gebruiken omdat deze de polarisatie kanalen optimaal combineert in die zin dat het de speckle onderdrukt. Interessant om op te merken in de bovenste plot van figuur 7.6 is dat het HH vermogen groter wordt dan het VV vermogen als de azimuth hoek wordt vergroot tot 60° . Voor hoeken groter dan 60° neemt dit verschil weer af. Dit is ook duidelijk te zien in de tweede plot van figuur 7.6 waar de verhouding VV/HH systematisch kleiner wordt dan 1 voor hoeken nabij 60° . Een mogelijke verklaring zou kunnen zijn dat door het terrein reliëf van de clutter er minder VV dan HH wordt gereflecteerd voor een azimuth hoek van ongeveer 60° .



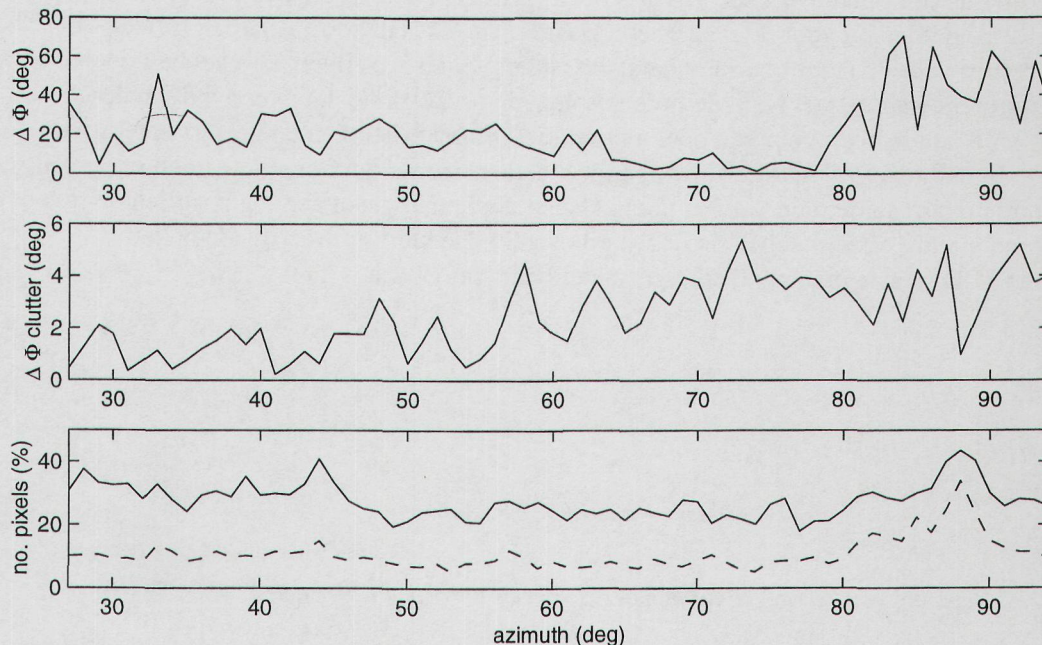
Figuur 7.5: Gemiddeld terugverstrooid vermogen van het APC voor HH, VV (onderbroken lijn in bovenste plot), HV en PWF, en de verhouding VV/HH als functie van de azimuth hoek.



Figuur 7.6: Als figuur 7.5 maar nu voor clutter.

Een andere polarimetrische kenmerk dat kan worden gebruikt om doelen van clutter te onderscheiden is het faseverschil tussen het HH en het VV kanaal. Evenals het gemiddelde gereflecteerde vermogen kan er een gemiddeld faseverschil voor het doel worden bepaald door de polarimetrische covariantie matrices van de pixels in de template te middelen. Een grote waarde van het faseverschil, bijvoorbeeld tussen 90° en 180° , laat zien dat er double bounce effecten in het spel zijn. Dit betekent dat het uitgezonden radar signaal gereflecteerd wordt door een element van de APC zodanig dat het eerst tegen een ander element van de APC aankomt voordat het bij de SAR antenne wordt terugontvangen. Het moge duidelijk zijn dat double bounce reflecties doorgaans het resultaat zijn van man-made objecten. De bovenste plot van figuur 7.7 laat voor de APC het gemiddeld faseverschil $\Delta\Phi$ zien tussen het HH en het VV kanaal als een functie van azimuth. Er blijkt dat het faseverschil het grootst is voor een azimuth van rond de 90° . Overeenkomstig het PWF vermogen van de APC betekent dit dat het radar signaal frontaal op de APC invalt. Voor azimuth hoeken anders dan 90° treden er uiteraard ook double bounce reflecties op maar het radar signaal wordt dan gereflecteerd naar andere richtingen dan die van de SAR. De middelste plot van figuur 7.7 laat het gemiddelde faseverschil zien voor de clutter. In clutter treden double bounce reflecties minder vaak op hetgeen de veel kleinere waarde van $\Delta\Phi$ verklaart. De ononderbroken lijn in de onderste plot van figuur 7.7 laat zien hoeveel pixels van de template als doel zijn geclassificeerd (als percentage van het totaal aantal pixels in de template). De onderbroken lijn in deze plot geeft aan hoeveel pixels van de template als doel zijn geclassificeerd en bovendien ook nog een faseverschil hadden groter dan 90° (ook als percentage van het totaal aantal pixels in een template). Duidelijk is dat beide percentages toenemen als de azimuth hoek in de buurt van de 90° komt. Voor deze azimuth hoeken neemt het PWF vermogen van de APC immers toe zodat pixels afkomstig van de APC makkelijker gedetecteerd kunnen worden. Tevens zal een groot deel van de double bounce reflecties in de richting van de SAR worden gereflecteerd. Opmerkelijk is echter dat het aantal gedetecteerde pixels met een faseverschil groter dan 90° veel sterker toeneemt dan het aantal gedetecteerde pixels zelf.

Voor een azimuth van 88° zijn beide percentages nagenoeg gelijk. Dit betekent dat de toename in gereflecteerd vermogen van de APC voor een azimuth van ongeveer 90° (figuur 7.5) wordt veroorzaakt door een relatief klein aantal pixels waarin het vermogen sterk is toegenomen. De toename van het faseverschil voor die azimuth waarden (bovenste plot van figuur 7.7) daarentegen wordt veroorzaakt door een relatief groot aantal pixels waarin het faseverschil matig is toegenomen.

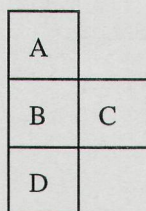


Figuur 7.7: Gemiddeld faseverschil van het HH en het VV kanaal voor de APC (boven), en voor de clutter (midden). De onderste plot laat het aantal gedetecteerde pixels zien (ononderbroken lijn) en het aantal gedetecteerde pixels met een faseverschil groter dan 90° (onderbroken lijn), beide als percentage van het totaal aantal pixels in de template.

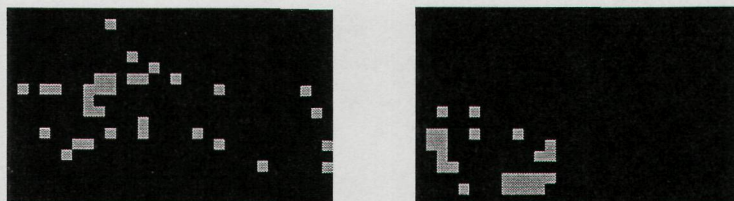
Geometrische kenmerken

Het geometrische kenmerk dat is bekeken om doelen van clutter te onderscheiden is een vereenvoudiging van de "fractal dimension" zoals beschreven in [Novak et al., 1993]. De fractal dimension is de verhouding tussen het aantal 1×1 pixel boxes en het aantal 2×2 pixel boxes dat nodig is om de gedetecteerde pixels in de template te bedekken. Voor doelen zullen de gedetecteerde pixels compact gegroepeerd zijn hetgeen in een grote waarde voor de fractal dimension resulteert (aantal 1×1 boxes komt in teller voor). In geval van clutter zullen de gedetecteerde pixels meer geïsoleerd zijn waardoor een veel lagere waarde voor de fractal dimension wordt gevonden, immers het aantal 2×2 boxes om de gedetecteerde pixels te bedekken zal nu ongeveer even groot zijn als het aantal 1×1 boxes. Evenals de fractal dimension is het geometrische kenmerk dat we hebben bedacht een maat voor de ruimtelijke verdeling van de gedetecteerde pixels binnen de template. Dit kenmerk, dat het "neighbour number" N zal worden genoemd, is echter veel eenvoudiger te berekenen dan de fractal dimension. Het neighbour number kan als volgt uit de PWF templates worden berekend. Van ieder gedetecteerde pixel in de template wordt het aantal burens geteld dat ook als doel is geïdentificeerd (maximaal 8 als alle burens van het test pixel als doel zijn gedetecteerd). Het totaal aantal gedetecteerde buur pixels gedeeld door het totaal aantal gedetecteerde pixels definieert het neighbour number N . Evenals de fractal dimension betekent een grote waarde van N dat de gedetecteerde pixels een compacte ruimtelijke verdeling hebben met weinig

tussenruimte. Dit mag karakteristiek worden verondersteld voor man-made objecten. Voor natuurlijke clutter zullen de gedetecteerde pixels meer geïsoleerd zijn hetgeen resulteert in een veel kleinere waarde van N . Als voorbeeld geeft figuur 7.8 weer hoe het neighbour number wordt berekend van een groep van vier gedetecteerde pixels met een bepaalde vorm. Test pixel A heeft 2 burenen namelijk B en C. Het aantal buur pixels van B, C, en D is respectievelijk 3, 3, en 2. Het neighbour number van het object in figuur 3.5 is dus $(2+3+3+2)/4=2.5$. Twee andere voorbeelden zijn gegeven in figuur 7.9. Deze figuur laat twee groepen clutter zien waarvan de pixels foutief als doel zijn geïdentificeerd door de CFAR detector en dus een binaire waarde van 1 hebben gekregen. Voor de linker plot is een waarde van $N=1.2$ gevonden en voor de rechter een waarde van 2.7. Dit soort waarden blijken typisch te zijn voor de neighbour numbers van clutter. Zoals we zullen zien hebben doelen een veel grotere waarde van N , in de orde grootte van 5. Merk op dat N een maximale waarde van 8 kan hebben voor een doel met relatief grote afmetingen en geen ruimte tussen de pixels. In dat geval zal ieder test pixel door 8 gedetecteerde buur pixels worden omgeven behalve de pixels aan de rand van het doel. Als het doel maar groot genoeg is zullen de pixels aan de rand weinig effect hebben op de waarde van N . De kleinste waarde die N kan aannemen is nul als de pixels volledig geïsoleerd zijn van elkaar.

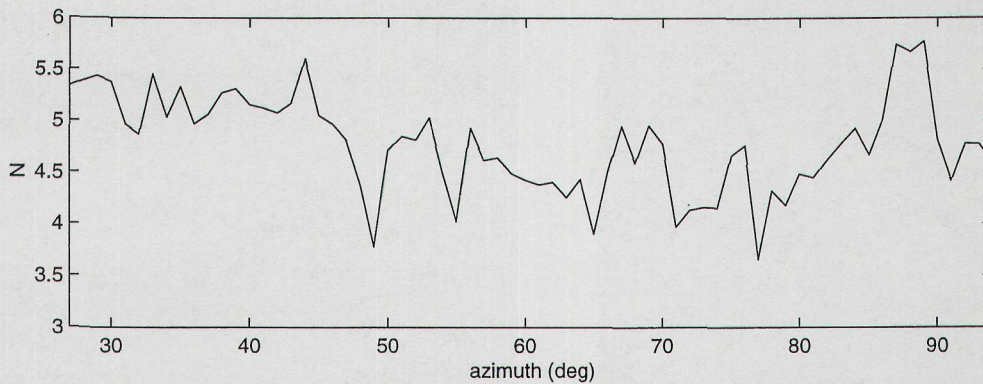


Figuur 7.8: Bepaling van het neighbour number N voor een groep van vier pixels; $N=2.5$



Figuur 7.9: Bepaling van het neighbour number voor twee groepen clutter. Voor de linker plot geldt $N=1.2$ en voor de rechter plot $N=2.7$.

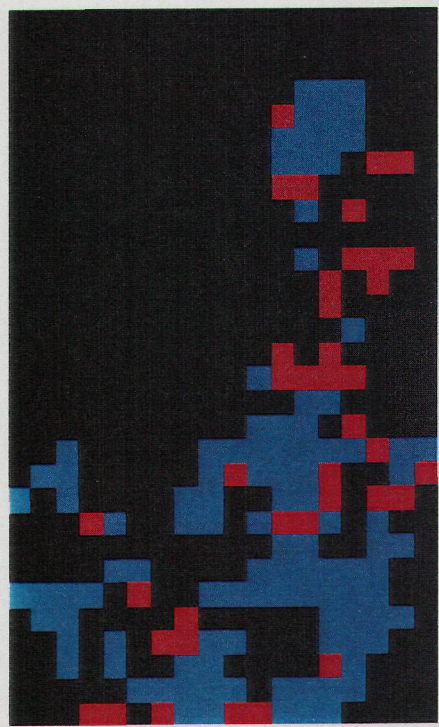
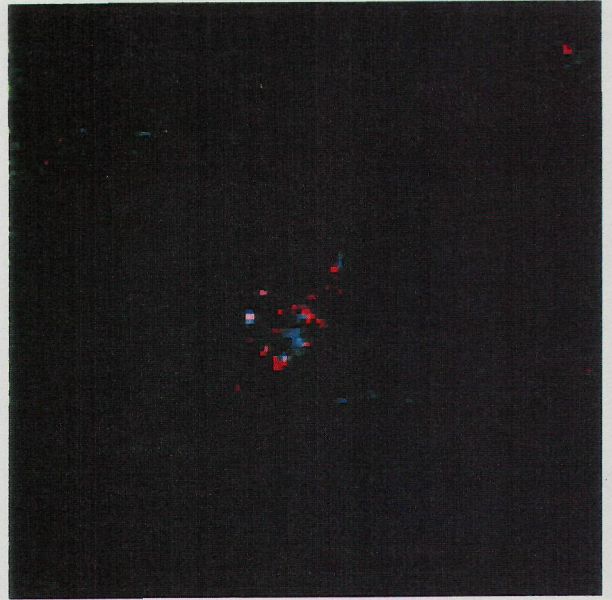
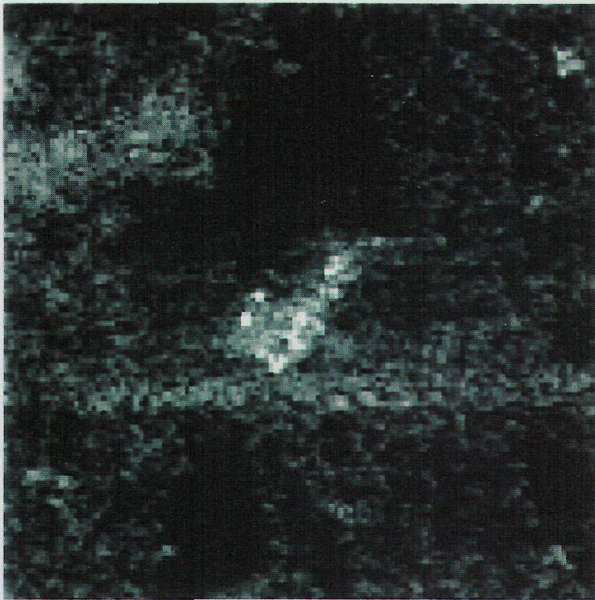
In figuur 7.10 is het neighbour number weergegeven voor alle 68 APC's van de test data set. Het neighbour number van de APC varieert tussen de 4 en 5.5. Voor een azimuth van ongeveer 90° worden de grootste waarden van N gevonden. Dit is uiteraard te verklaren doordat voor zulke azimuth hoeken het gemiddeld PWF vermogen van de APC sterk toeneemt waardoor de pixels van de APC makkelijker worden gedetecteerd (figuur 7.7). Dit is bevorderlijk voor de compactheid van de gedetecteerde pixels en daarmee voor het neighbour number. De gemiddelde waarde van het neighbour number van de APC is ongeveer 5. Omdat dit aanzienlijk hoger is dan de waarde van 2-3 die voor clutter wordt gevonden mag worden geconcludeerd dat het neighbour number een geschikt kenmerk is om doelen van clutter te onderscheiden.



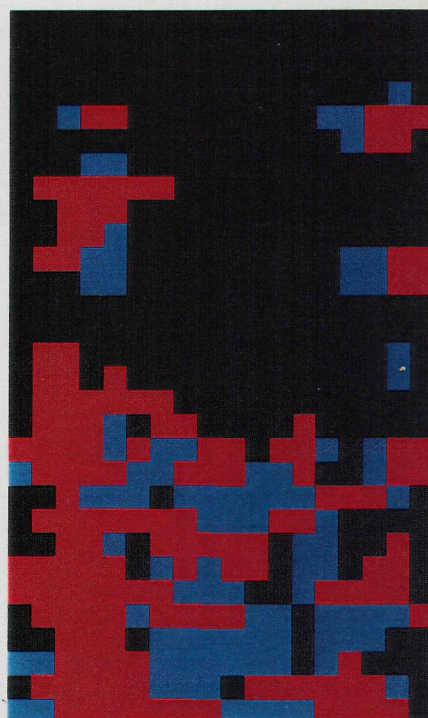
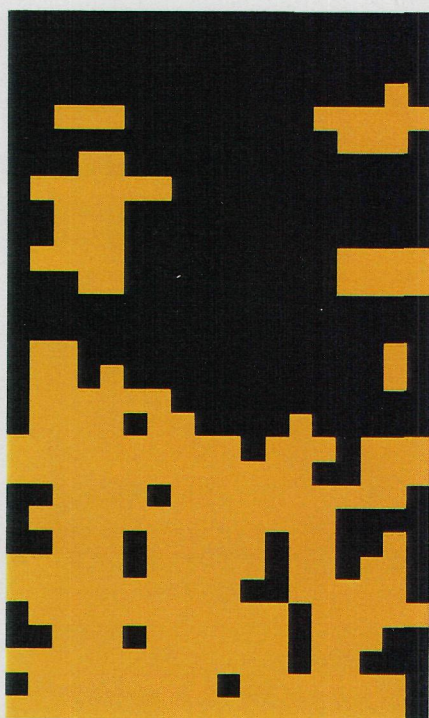
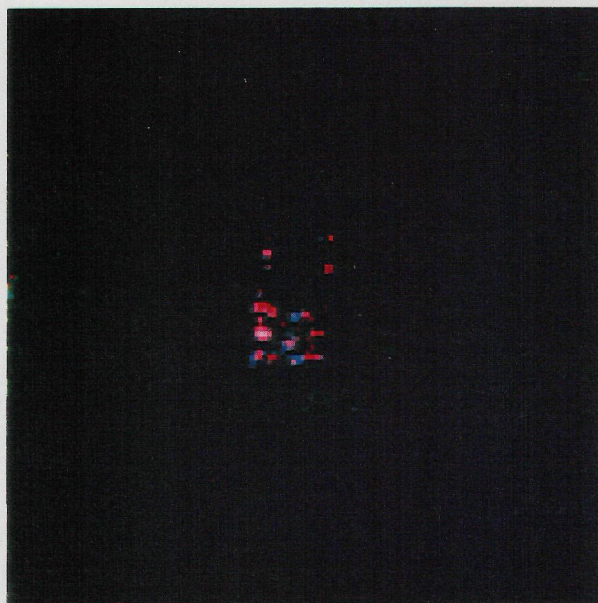
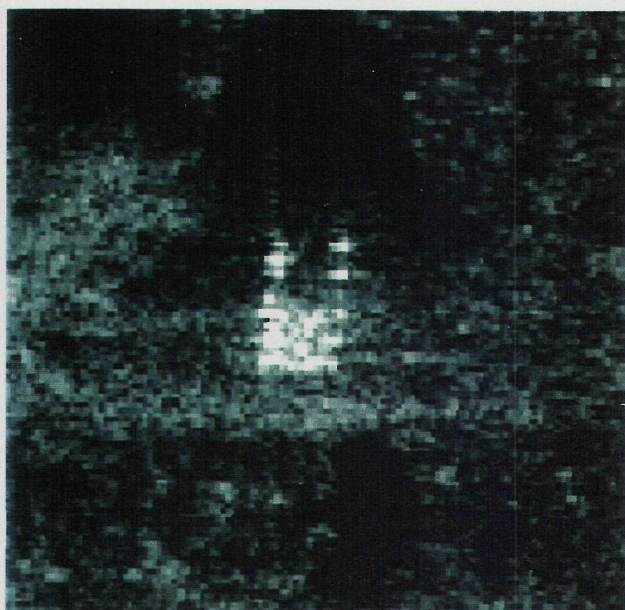
Figuur 7.10: Neighbour number van de APC als een functie van azimuth.

Combinatie van polarimetrische en geometrische kenmerken

In de vorige paragraaf werden naast geometrische kenmerken de polarimetrische kenmerken afgeleid voor het uitgebreide doel als geheel. Dit wil zeggen dat de analyses die zijn uitgevoerd m.b.t. de polarimetrische kenmerken betrekking hebben op de gemiddelde amplitude en het gemiddelde faseverschil van het doel en de clutter. Omdat het doel uitgebreid is kunnen nu ook polarimetrische kenmerken per pixel bekeken worden. Om te bekijken of er een verband bestaat tussen een grote waarde voor het gereflecteerde vermogen en een grote waarde voor het faseverschil is er in detail gekeken naar twee templates met een azimuth hoek van ongeveer 65 en 90 graden. Voor elk van deze templates geven figuur 7.11 en 7.12 het PWF beeld, een DIWF en een TRIPWF combinatie en in geel die pixels met een PWF vermogen groter dan 10 dB, en de pixels met vermogen groter dan 10 dB die een fase verschil hebben van meer dan 90 graden. De drempelwaarde van 10 dB komt overeen met de gemiddelde waarde van het gereflecteerde PWF vermogen (zie figuur 7.5). Het is interessant om op te merken dat voor de azimuth hoek van 90 graden er een U-vorm te zien is van zeer sterke reflecties (meer dan 10 dB). Het is aannemelijk dat de verschillende delen van de APC verschillende reflectie-mechanismen bezitten. De zeer sterke reflecties zijn waarschijnlijk het gevolg van double bounce reflecties, hetgeen bevestigd wordt doordat bij die pixels het fase verschil groter is dan 90 graden. De overige duidelijke reflecties zijn waarschijnlijk door toedoen van verstrooiing aan vlakke plaatdelen of door trihedral-achtige structuren gericht naar de radar. Deze zijn in het algemeen minder sterk dan de double bounce scattering. In het DIWF en TRIPWF beeld komt de double bounce scattering vooral naar voren in het DIWF beeld (rood) en de andere scattering in het TRIPWF beeld (cyaan).



Figuur 7.11: Azimut hoek 65 graden. PWF beeld (linksboven) en DIPWF/TRIWF combinatie beeld van APC (rechtsboven), pixels met PWF vermogen > 10 dB (linksonder), en pixels met HH/VV fase verschil > 90 in rood en < 90 in cyaan (rechtsonder).



Figuur 7.12: Azimut hoek 90 graden. PWF beeld (linksboven) en DIPWF/TRIWF combinatie beeld van APC (rechtsboven), pixels met PWF vermogen > 10 dB (linksonder), en pixels met HH/VV fase verschil > 90 in rood en < 90 in cyaan (rechtsonder).

8. Operationeel gebruik van SAR

In dit hoofdstuk zullen we een aantal manieren waarop een SAR gebruikt kan worden nader bestuderen. Daarnaast zullen we de combinatie met andere sensoren zoals optische en thermisch infrarode sensoren toelichten en ook de combinatie van moving target indication (MTI) en SAR. Tevens worden mogelijke maatregelen tegen SAR besproken.

8.1 Zelfstandige inzet van SAR

We bespreken hier twee gevallen waarvoor IMINT (imagery intelligence) inlichtingen kunnen worden ingewonnen, namelijk het bewaken van een relatief groot gebied (**wide area surveillance**) en doelopsporing (**target acquisition**).

Wide area surveillance

In dit geval moet een relatief groot gebied bewaakt worden. Dit betekent in het algemeen dat voor een bepaald tijdstip de toestand in het gebied bekend of onder controle is, maar dat men veranderingen wil kunnen waarnemen en volgen. Men wil dus veranderingen kunnen detecteren. In het Engels wordt dit **change detectie** genoemd. Bij het detecteren van veranderingen is het van belang dat men kan waarnemen op tijdstippen die men zelf kiest. Dat wil zeggen dat men idealiter niet afhankelijk wil zijn van de omstandigheden, zoals bijvoorbeeld het weer. Een SAR is daar typisch geschikt voor omdat het een actieve weersonafhankelijke sensor is. Daar komt bij dat gemakkelijk een groot gebied in een keer kan waargenomen worden. Voor detecties van bijvoorbeeld voertuigen zijn resoluties van 1-2 meter voldoende. In dat geval kunnen zwade breedtes van 5-10 km gehaald worden. Twee beelden op verschillende tijdstippen kunnen vergeleken worden waardoor veranderingen kunnen worden waargenomen. Voorwaarde is wel dat beide beelden op dezelfde manier en vanuit dezelfde positie zijn opgenomen. We geven hier (figuur 8.1) een voorbeeld waarbij de Bernhard kazerne met PHARUS is waargenomen op twee opeenvolgende dagen vanuit dezelfde track. Een beeld wordt afgebeeld in bijvoorbeeld het rode kanaal en de andere in het kanaal met de complementaire kleur (magenta in dit geval). Waar geen verandering heeft plaatsgevonden is het beeld grijs en waar wel is het beeld rood en magenta. De kleur geeft dan aan of er een object bij gekomen of weggehaald is. Duidelijk zijn veranderingen te zien op het kazerne terrein doordat voertuigen verplaatst zijn. Dit geldt ook voor het station van Amersfoort, waar treinen vertrokken en aangekomen zijn.

Doelopsporing

Bij doelopsporing moeten doelen gevonden en uiteindelijk geïdentificeerd worden. Vaak zullen dit militaire voertuigen zijn. Uit de voorgaande hoofdstukken is gebleken dat met SAR "shape" en "orientation" herkenning te bereiken valt indien de resolutie hoog genoeg is. In het algemeen zal dit betekenen dat de SAR in een spot light mode gebruikt zal worden. In de spot light mode wordt de bundel van de SAR zodanig bewogen dat een gebied langere tijd beschenen wordt dan in de normale SAR mode. Op deze manier wordt meer informatie ingezameld over het gebied, die in de processing gebruikt kan worden om de resolutie in azimuth richting te verhogen. Dit kan gebruikt worden om het speckle niveau te verlagen. Beide hebben een gunstig effect op de detectie en de herkenning. Tevens kan extra informatie verkregen worden wanneer het doel zeer lang in de bundel wordt gehouden omdat het doel dan onder verschillende aspect hoeken wordt gezien. De verkregen informatie kan dan leiden tot "shape" en "orientation" herkenning. Voor doelopsporing is identificatie vaak vereist. Dit is alleen mogelijk wanneer voldoende vooraf informatie aanwezig is zodat door interpretatie van de SAR beelden identificatie valt af te leiden. Men weet bijvoorbeeld vooraf welke voertuigen men moet zoeken van welke grootte. "Shape" en "orientation" herkenning kan dan tot identificatie leiden. Is dit niet het geval dan zal de inlichtingen cyclus nog een keer doorlopen moeten worden en andere middelen worden ingezet die verdere informatie kunnen verschaffen. De SAR kan in dit geval informatie verschaffen om die inlichtingen bronnen



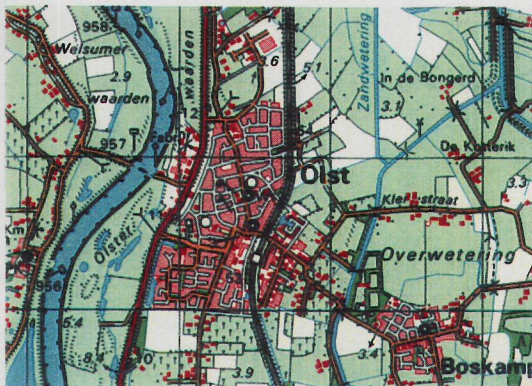
Figuur 8.1: "Change detectie" beeld van de Bernhard kazerne bij Amersfoort. Zie verder tekst.

beter aan te sturen (cueing). Dit zijn dan middelen die specifiek geschikt zijn voor herkenning en identificatie. Dit kunnen bijvoorbeeld SIGINT en HUMINT middelen zijn die men na inzet van de SAR meer gericht kan aansturen. Ook kunnen IMINT bronnen worden ingezet, zoals hoge resolutie optische en TIR camera's die echter een kleiner zichtveld hebben dan de SAR. Te denken valt ook aan hyper spectral imaging (HSI) waarbij de spectrale signatuur van doelen kan worden waargenomen. Dit soort informatie is zeer specifiek en kan tot identificatie leiden en ook informatie geven over eventuele camouflage.

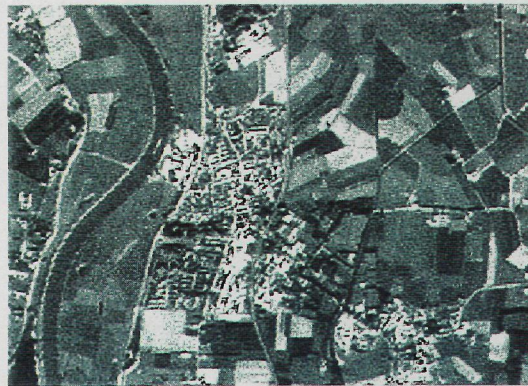
8.2 Combinatie van SAR met optisch en thermisch infrarode sensoren

Air-to-ground surveillance (luchtverkenning) kan worden uitgevoerd met verschillende sensoren. Speciale aandacht gaat hier uit naar Synthetische Apertuur Radar (SAR) en Thermisch Infrarood (TIR). SAR is een relatief nieuwe sensor met een groot potentieel en hoge inzetbaarheid, terwijl TIR altijd al militair interessant is geweest, omdat deze sensor gevoelig is voor warmte bronnen, zoals motoren van voertuigen. Daarnaast zijn er de optisch beeldvormende sensoren zoals foto- en electro-optische camera's. Deze hebben vooral het voordeel dat ze zeer hoge resolutie beelden kunnen genereren.

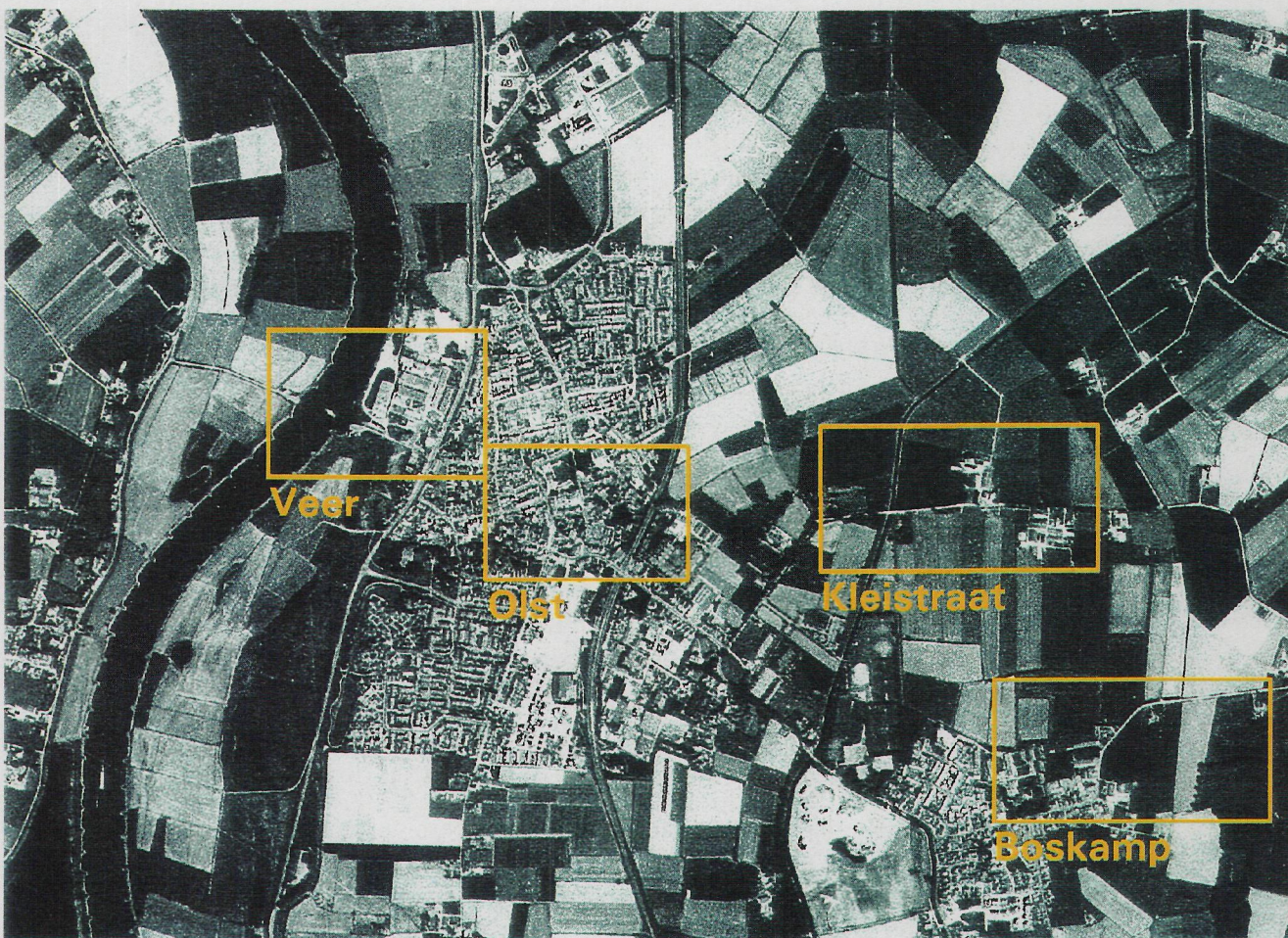
Binnen dit hoofdstuk wordt een vergelijking gemaakt van SAR met TIR. De SAR data is afkomstig van het PHARUS systeem (Phased Array Universal SAR). De TIR opnamen zijn gemaakt met een thermische infrarode lijnscanner vanuit een helikopter (zie paragraaf 4.3). De vergelijking van beide sensoren richt zich op opnamen van Olst (Gelderland) en omgeving. Dit gebied maakt deel uit van een groter aandachtsgebied dat ook wel het Heerde gebied wordt genoemd [van den Broek 1994]. De objecten die worden bekeken zijn in te delen in drie categorieën: puntdoelen (doelen die slechts één enkel punt beslaan), samengestelde doelen (doelen die uit meerdere puntdoelen bestaan) en gedistribueerde doelen (vlakken of velden). In de volgende paragraaf zal duidelijk worden over wat voor soort doelen dit gaat. De gebieden die worden geanalyseerd zijn in figuur 8.2 aangeven in een Russische (spionage) satelliet (KVR) opname van 19 mei 1992. Ter vergelijking worden een SPOT opname van 13 oktober 1992 (Franse satelliet) en kaartmateriaal getoond.



MAP 1:50000



SPOT PAN 1:50000



KVR 1:20000

Figuur 8.2: KVR beeld met daarop aangegeven de gebieden die met verschillende sensoren zijn bestudeerd. Ter vergelijking wordt van hetzelfde gebied een topografische kaart en SPOT-PAN beeld getoond.

Sensoren en beeldeigenschappen

We geven hier in tabel 8.1 nog eens de eigenschappen van de verschillende sensoren en de beelden die we in de figuren 8.3 t/m 8.6 laten zien.

Tabel 8.1 Sensor parameters

sensor	golflengte	presentatie	resolutie	datum, tijd
PHARUS	5.7 cm	RGB	3.4 m	2 juni 1997
		PWF EVEN/ODD		
TIR	8-12 μ m		5 m	28 september 1994, 11:00
CAESAR	550 nm	RGB	1.5 m	22 september 1994, 15:00
	670 nm		3 m	
	870 nm			
SQ 306	optisch		0.2-0.5 m	augustus 1994
KVR	optisch		2 m	19 mei 1992
SPOT	optisch		10 m	13 oktober 1992

Hieronder lichten we de verschillende presentatie technieken toe voor de meerkanaalssystemen PHARUS en CAESAR.

PHARUS is een polarimetrisch systeem: het verstuurt en ontvangt verschillende polarisaties. Hierdoor ontstaan er drie onafhankelijke radar beelden die alle drie verschillende informatie kunnen opleveren over de belichte objecten. De resolutie van PHARUS data is nominaal 3.4 meter. Er wordt gebruik gemaakt van de C-band (golflengte 5.7 cm). De PHARUS opname is gemaakt op 2 juni 1997. Omdat de opnamen polarimetrisch zijn kunnen de data op verschillende manieren worden gepresenteerd.

- **RGB:** Deze presentatie geeft de drie polarimetrische kanalen van een polarimetrische SAR weer in de basiskleuren Rood (HH), Groen (HV) en Blauw (VV). Doordat de intensiteit van deze drie kleur kanalen varieert kan iedere kleur worden gevormd. Zo geeft bijvoorbeeld paars (rood + blauw) aan dat een object vooral HH en VV reflecteert.
- **PWF:** Deze presentatie (Polarimetric Whitening Filter) is een combinatie van de drie polarimetrische kanalen tot een beeld waarin de speckle ruis maximaal is onderdrukt. Hierdoor wordt het beeld rustiger en makkelijker interpreteerbaar. Voor details wordt verwezen naar het hoofdstuk over doeldetectie (hoofdstuk 6).
- **EVEN/ODD:** Dit is een kleuren combinatie van twee scattermechanismen die bij radar reflecties kunnen optreden, namelijk even in rood en oneven (odd) in cyaan. Even en oneven slaat hierbij op het aantal keren dat een radar golf reflecteert tegen een oppervlak voordat het door de radar ontvangen wordt. Zo treedt een even aantal (2) reflecties op aan dihedral structuren en een oneven aantal (1 of 3) reflecties aan vlakke platen en trihedral structuren (zie ook figuur 6.5). Hierbij reflecteren dihedral en trihedral-achtige structuren doorgaans meer dan een vlakke plaat. Voor details wordt verwezen naar de DIWF en TRIWF presentaties (Dihedral en Trihedral Whitening Filters) in het hoofdstuk over doeldetectie.

CAESAR is een optische/nabij infrarode multispectrale pushbroom scanner die opneemt in de banden met centrale golflengten van 550, 670 en 870 nm. Deze drie kunnen dan in de drie kleuren kanalen rood, groen en blauw worden afgebeeld. Er ontstaat dan een zo genaamd false colour beeld, dat rood is als er veel nabij infrarood gereflecteerd wordt. Dit is het geval bij bladgroen, zodat vegetatie rood wordt in het beeld. Objecten zoals man-made en water worden groen-blauw.

Analyse gebieden

We vergelijken hier de opnamen van de verschillende sensoren voor de verschillende testgebieden, zoals in figuur 8.2.

Kleistraat (puntoelen)

Kleistraat is een buurtschap dat bestaat uit enkele grotere boerderijen (figuur 8.3). De meest opvallende objecten binnen dit gebied zijn een brug over een wetting en de (ronde) silo's bij de boerderijen. Deze objecten zijn zeer goed te zien in de CAESAR en KVR opnamen. Wat daarbij in de CAESAR opname ook nog opvalt zijn de kleine vlekjes rondom de eerste boerderij. Dit is vee.

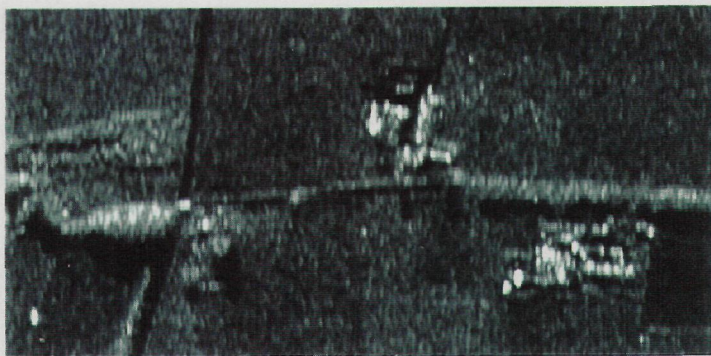
In het PHARUS beeld veroorzaakt de brug een sterke puntvormige reflectie. Uit het RGB beeld blijkt dat dit vooral door HH en VV komt. Uit het even/odd beeld blijkt dat het scattermechanisme vooral even is en dat de brug dus een dihedral-achtige structuur moet bevatten. In het TIR beeld valt de brug niet echt op; de resolutie is net iets te laag en de temperatuur van de brug wijkt blijkbaar niet sterk af van de achtergrond, ook in vergelijking met het 870 nm kanaal (nabij infrarood) in de CAESAR opname (blauw).

De silo's zijn in alle opnamen duidelijk te herkennen als ronde objecten, behalve in de PHARUS opname, hierin worden zij afgebeeld als puntoelen. Uit het even/odd beeld blijkt dat het scattermechanisme vooral even is, ondanks dat aan een rond of cilindervormig object niet direct dihedral-achtige structuren worden verwacht. Daarbij ligt het centrum van de reflectie aan de achterkant van de silo's. Uit de TIR opname blijkt dat de silo's duidelijk warmer zijn dan de achtergrond en dus makkelijk te detecteren zijn.

Links onder in het PHARUS beeld bevindt zich een puntoel dat in geen enkele andere opname te zien is. Mogelijk is het een nieuw object dat alleen in de PHARUS opname is te zien (de PHARUS opname is als laatste gemaakt, bijna 3 jaar na de laatste andere opname). Het kan ook een mobiel object zijn zoals een voertuig. Uit het even/odd beeld blijkt dat het scattermechanisme vooral oneven is en dus een trihedral-achtige of vlakke structuur moet bevatten.



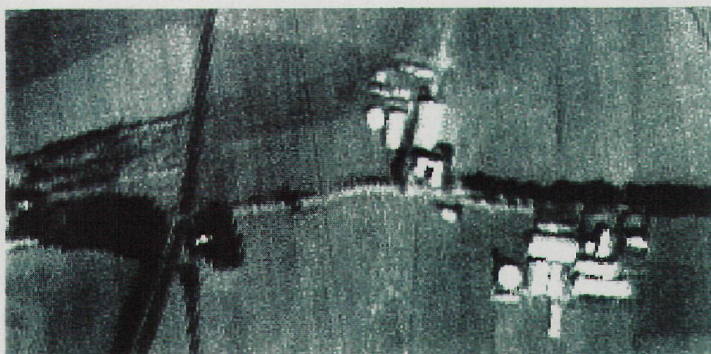
PHARUS HH,HV,VV



PHARUS PWF



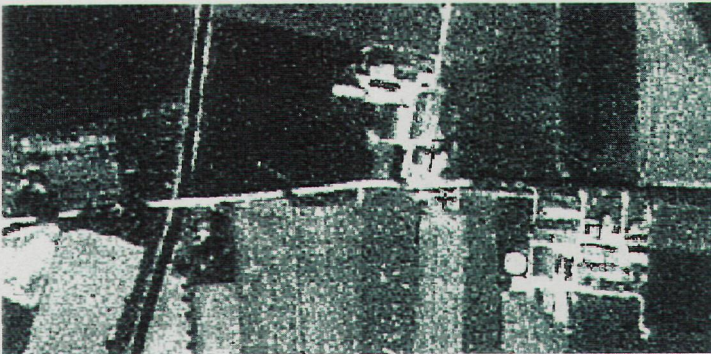
PHARUS EVEN,ODD



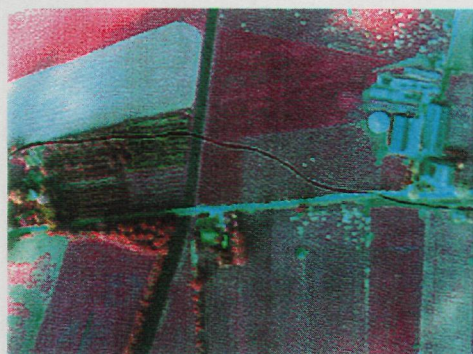
TIR



CAESAR 3 m



KVR



CAESAR 1.5 m

Figuur 8.3: De diverse sensorbeelden voor gebied Kleistraat (zie figuur 8.2).

Boskamp (samengestelde en gedistribueerde doelen)

Boskamp is een kleine woonkern vlakbij Olst, te midden van een gemengd agrarisch gebied (figuur 8.4). Te zien zijn een deel van een woonwijk, weiden, landbouwgrond en bomen. Wat opvalt is dat het gewas in de CAESAR opname (bruin) een schaduw werpt waardoor wordt verondersteld dat het een hoog gewas is, bijvoorbeeld maïs. Wat ook opvalt is het verschil in richting van de schaduw van enkele langere bomen tussen TIR en CAESAR. Dit wordt veroorzaakt door een verschil in de stand van de zon 's ochtend rond 11.00 uur (TIR) en 's middags (CAESAR). De oriëntatie van beide opnamen is noord. De kwaliteit van de KVR opname blijft duidelijk achter bij de CAESAR opname.

De huizenrijen zijn in de PHARUS opnamen zichtbaar als smalle streepjes, smaller dan in de TIR of CAESAR opname. Uit het even/odd beeld blijkt dat het scattermechanisme vooral oneven is maar ook zwak, en dus waarschijnlijk afkomstig is van een vlak. Verwacht wordt dat dit de schuine daken zijn van de huizen die hier (bijna) loodrecht staan op de kijkrichting van de radar. In TIR zijn de daken breder omdat beide kanten van de warmere schuine daken te zien zijn. In de CAESAR en KVR opnamen is te zien dat de zuidzijde van de schuine daken lichter is dan de noordzijde omdat deze beter worden belicht door de zon.

PHARUS en TIR geven een verschillend beeld van de gedistribueerde doelen (weiden en akkers). Dit geldt ook voor CAESAR en KVR. De belangrijkste oorzaak hiervan is dat de opnamen in verschillende groeiseizoenen zijn gemaakt en dat er verschillende gewassen kunnen groeien in verschillende jaren.



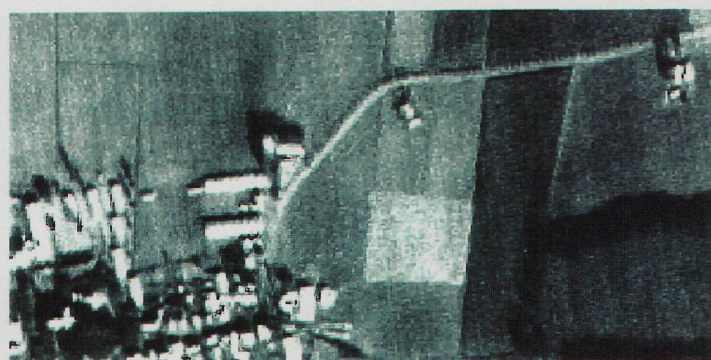
PHARUS HH,HV,VV



PHARUS PWF



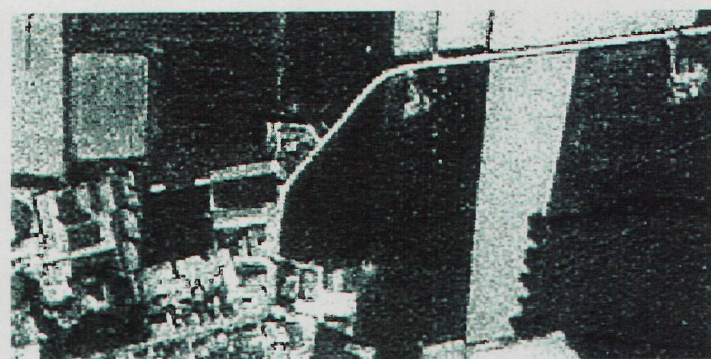
PHARUS EVEN,ODD



TIR



CAESAR 3 m



KVR

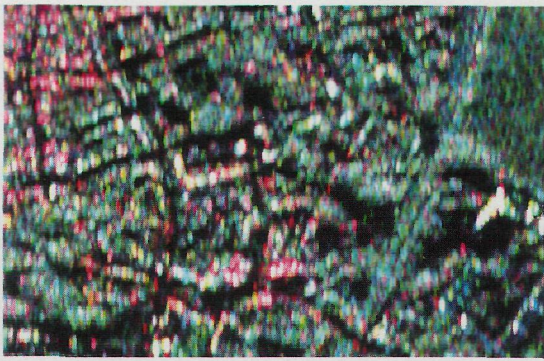
Figuur 8.4: De diverse sensorbeelden voor gebied Boskamp (zie figuur 8.2).

Olst (puntdoelen en samengestelde doelen)

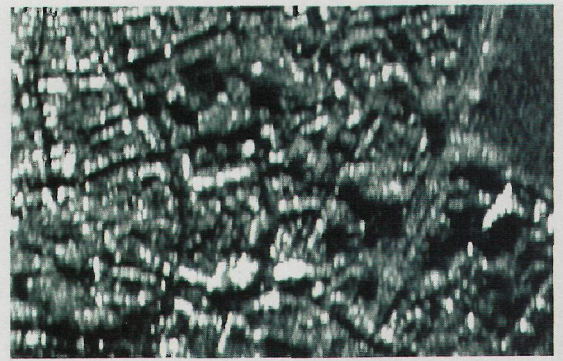
Deze uitsnede (figuur 8.5) bevat verschillende soorten bebouwing in en rond het centrum van Olst. De luchtfoto van SQ 306 geeft een duidelijk beeld van het centrum. Opvallende objecten zijn de watertoren (rechts boven) en het gemeentehuis (links daarvan) omgeven door bomen. Het CAESAR beeld toont een groter gedeelte van Olst. De omgeving van het gemeentehuis is ook hier goed te zien. Onderin het CAESAR beeld is ook een grotere kerk te zien met daaromheen een plein. Opvallend in het CAESAR beeld zijn de lange schaduwen van de besproken objecten. Het KVR beeld is minder duidelijk.

Zowel het PHARUS als het TIR beeld tonen minder detail dan SQ 306 en CAESAR. Daarentegen is het contrast tussen gebouwen en achtergrond in het TIR beeld groot door een verschil in temperatuur. Dit maakt het voor TIR makkelijker gebouwen te detecteren. Uit het PHARUS beeld blijkt dat een aantal gebouwen zeer hoge reflecties geeft. Deze reflecties zijn soms zo hoog dat in het even/odd beeld niet meer duidelijk is wat het scattermechanisme is. Een voorbeeld hiervan is de kerk onderin het beeld. De reflectie van de watertoren ligt boven de plaats waar hij staat. Dit komt omdat de bovenkant van de toren (die de reflectie veroorzaakt) zich dichterbij de radar bevindt dan de voet (layover). Uit het even/odd beeld blijkt dat het scattermechanisme van de bovenkant van de toren vooral oneven is en dus een vlakke of trihedral-achtige structuur moet bevatten.

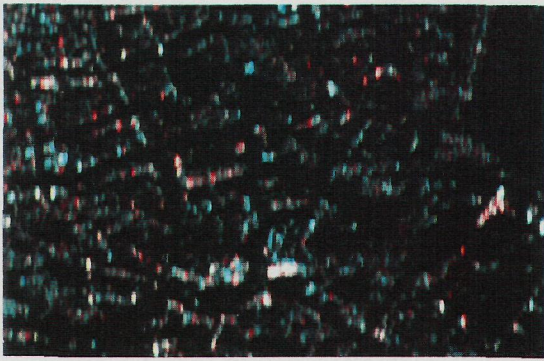
Uit dit gebied blijkt ook dat er voor een goede presentatie van bebouwde (stedelijke) gebieden een hoge mate van detail nodig is. PHARUS en TIR schieten hierin nog tekort. Ook blijkt dat meerdere presentaties van PHARUS (SAR) data nodig zijn voor een beter begrip van de objecten (RGB voor het bepalen van de verhouding tussen de polarimetrische kanalen, PWF voor een zo duidelijk mogelijk beeld met zo min mogelijk speckle ruis en even/odd voor het bepalen van de aard van het scattermechanisme). Het is echter goed mogelijk dat de waarde van PHARUS en TIR toeneemt naarmate de resolutie beter wordt. Figuur 8.6 geeft aan waar dit heen kan gaan wanneer de resolutie van een polarimetrische SAR 2 m is. Opgemerkt dient te worden dat het speckle ruis niveau in dit beeld hoger is dan bij PHARUS.



PHARUS HH,HV,VV



PHARUS PWF



PHARUS EVEN,ODD



TIR

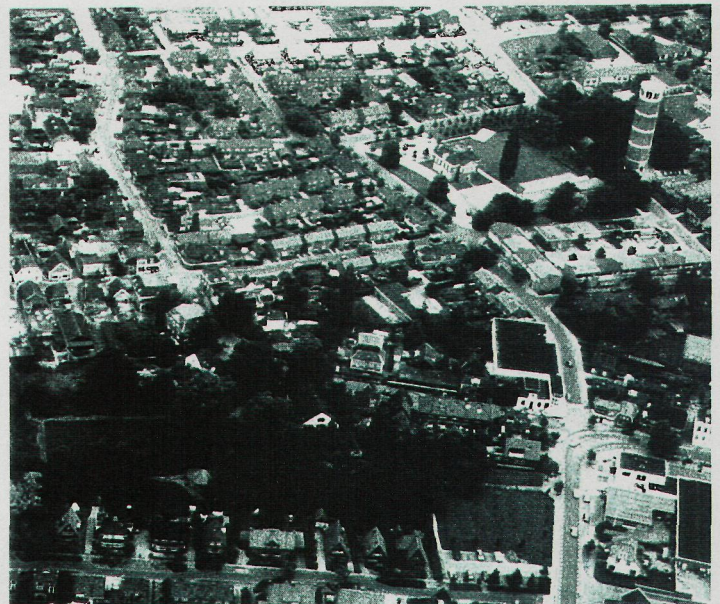


CAESAR 1.5 m

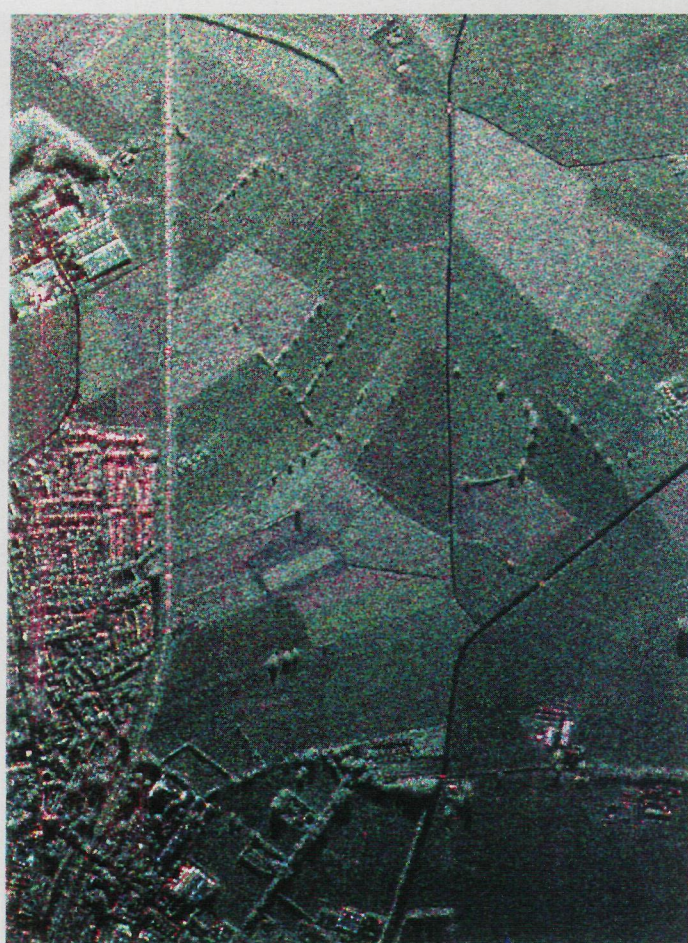


KVR

AERIAL PHOTOGRAPH



Figuur 8.5: De diverse sensorbeelden voor gebied Olst (zie figuur 8.2).



Figuur 8.6: Vergelijking tussen het polarimetrische beeld (PWF, links en RGB, rechts) voor PHARUS (boven, 3.5 meter resolutie) en het polarimetrische beeld van de DRA SAR (onder, 2 meter resolutie).

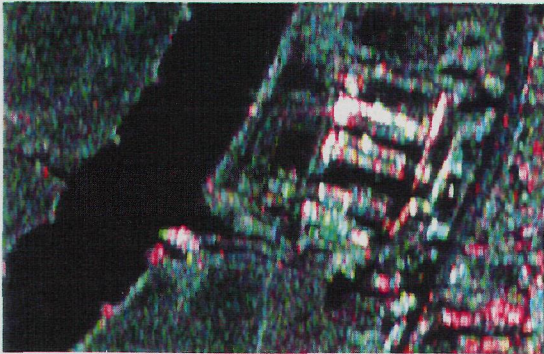
Veer over IJssel (puntdoelen en samengestelde doelen)

Deze uitsnede (figuur 8.7) bevat het veer over de IJssel bij Olst en een gedeelte van een industrie terrein. Het CAESAR beeld toont de pont aan de zijde van Olst. De route naar de kade en een parkeerterrein met enkele auto's is duidelijk te zien. Verder varen er in dit beeld toevallig twee vrachtschepen door de IJssel. In het KVR beeld vaart de pont halverwege Olst en de overkant. Ook hier is het parkeerterrein goed te zien.

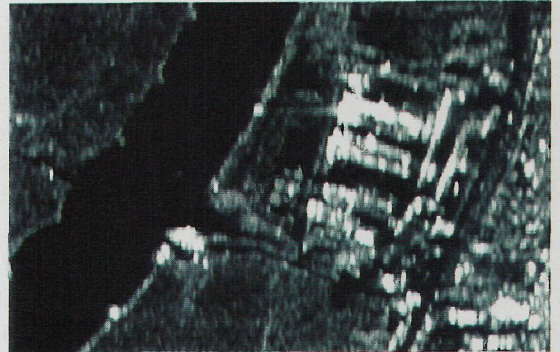
In het PHARUS beeld ligt de pont weer aan de zijde van Olst. De pont geeft meerdere reflecties en heeft dus meerdere scattercentra. Uit het even/odd beeld blijkt dat de scattermechanismen van deze centra verschillen; sommigen zijn even, andere oneven. De reflecties kunnen veroorzaakt worden door de pont zelf en door auto's op het dek. Het is dus goed mogelijk dat een later tijdstip (wanneer de pont leeg is of andere auto's bevat) een ander scattering patroon geeft. In het TIR beeld vaart de pont weer halverwege. Wat in dit beeld opvalt zijn drie lichte puntjes op de linker kade. Waarschijnlijk zijn dit auto's die staan te wachten om overgevoerd te worden.

De parkeerplaats is in het PHARUS beeld gedeeltelijk bezet met auto's. Normaal gesproken reflecteert een glad oppervlak als asfalt zeer weinig radar straling en zal er in het beeld donker uit zien. Wordt dit oppervlak verstoord door bijvoorbeeld geparkeerde auto's dan geeft dit een hogere reflectie. Dit is ook wat we zien in het PHARUS beeld: het bovenste gedeelte van de parkeerplaats is donker, het onderste gedeelte waar auto's staan niet. Ditzelfde beeld zien we in de TIR opname alleen is het mechanisme hier anders. Doordat auto's doorgaans warmer zijn dan asfalt, zijn de gedeeltes waar auto's staan lichter. De resolutie van de hier besproken sensoren is echter te laag om te kunnen verifiëren of dit ook werkelijk auto's zijn.

Wat verder nog opvalt in het PHARUS beeld is dat de bakens langs de IJssel sterk reflecteren en dus goed zichtbaar zijn. In geen enkele ander opname zijn deze bakens goed te zien.



PHARUS HH,HV,VV



PHARUS PWF



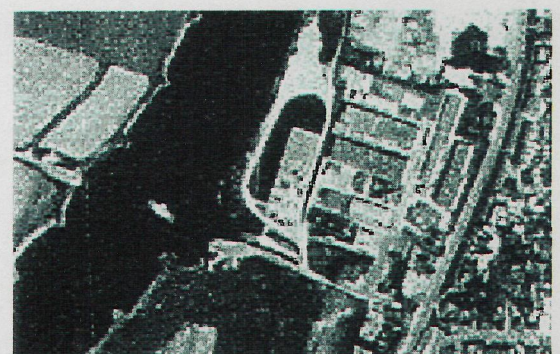
PHARUS EVEN,ODD



TIR



CAESAR 1.5 m



KVR

Figuur 8.7: De diverse sensorbeelden voor gebied IJssel bij veerpont (zie figuur 8.2).

8.3 SAR en bewegingsdetectie

SAR kan doelen detecteren, maar echter alleen goed als ze stilstaan. Zodra ze bewegen zullen ze niet worden afgebeeld of zijn ze verplaatst in het beeld. Dit heeft te maken met het principe van de synthetische apertuur. Om bewegende doelen te detecteren kan een MTI (moving target indicator) radar gebruik worden. Deze maakt gebruik van het feit dat door beweging de teruggestrooide straling in frequentie verschoven is. Snelheden die met een MTI radar gemeten kunnen worden liggen in de praktijk van enkele tot wel 200 kilometer per uur.

Omdat een MTI radar niet gebruik kan maken van het SAR principe zal de geometrische resolutie afhangen van de breedte van de bundel. Om een hoge geometrische resolutie te verkrijgen zal men een lange antenne nodig hebben, omdat de hoekresolutie van de bundel omgekeerd evenredig is met de afmetingen van de antenne. Dit is juist tegengesteld aan een SAR die een kleine (korte) antenne nodig heeft om een brede bundel te krijgen om op die manier zoveel mogelijk coherent te kunnen optellen (zie hoofdstuk 2).

In meerdere opzichten zijn SAR en MTI complementair. De SAR detecteert stilstaande doelen en heeft een hoge geometrische resolutie, terwijl de MTI bewegende doelen detecteert maar een relatief lage geometrische resolutie heeft. Wanneer zowel een SAR als een MTI op een platform aanwezig zijn vormen ze dan ook een krachtige combinatie waarbij zowel stilstaande en bewegende doelen gedetecteerd kunnen worden. De lage geometrische resolutie van de MTI kan dan gecompenseerd worden door de MTI detecties af te beelden op het onderliggende SAR beeld. Vaak kan dan besloten worden waar het bewegende doel zich bevindt, bijvoorbeeld vanwege een nabijgelegen weg of brug die zichtbaar is in het SAR beeld.

Deze combinatie is geïmplementeerd in een AGS (allied ground surveillance) kandidaat systeem als Joint-STARS. We geven hier (figuur 8.8) een voorbeeld met PHARUS die alleen hogere snelheden (km/h) laat zien voor de snelweg A12 nabij Zoetermeer. Omdat de snelheden duidelijk verband houden met de snelweg kunnen de posities van de bewegende doelen vrij exact worden weergegeven, alsmede hun snelheden.



Figuur 8.8: Combinatie SAR en MTI voor A12 bij Zoetermeer.

8.4 Maatregelen tegen SAR

Omdat SAR een actieve sensor is kan deze gemakkelijk worden opgemerkt. Het is ook mogelijk de ontvanger van de SAR te storen door straling in de richting van de SAR te sturen. Dit kan op een aantal manieren gebeuren en wordt in het Engels jamming genoemd. Bijvoorbeeld door een zogenaamde transponder die na ontvangst van door de SAR uitgezonden pulsen, eigen pulsen terug stuurt naar de SAR. Aangezien deze pulsen meer vermogen bevatten dan de teruggestrooide straling zal na de processing het beeld door de transponder gestoord zijn.

De meest simpele manier om te storen is een ruis puls te generen zodat in het beeld alleen ruis te zien zal zijn. Meer geavanceerde technieken maken gebruik van de ontvangen puls en sturen een vervormde variant terug zodat het beeld vervormd wordt, zonder dat meteen duidelijk is dat het beeld gestoord is. Dit noemen we smart jamming.

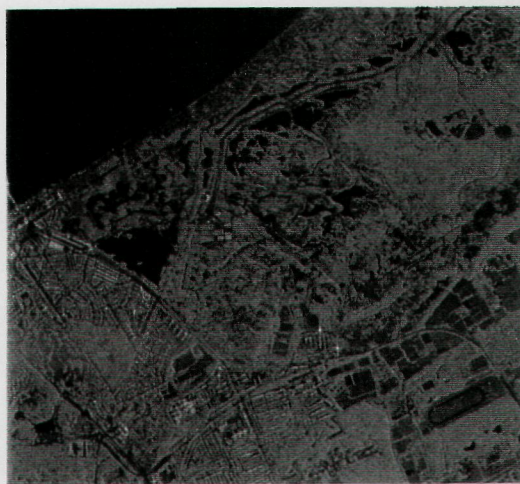
Het is belangrijk om te onderkennen dat nooit het hele beeld gestoord zal worden. Slechts wanneer de jammer in de bundel valt zal het beeld gestoord worden. Dit betekent dat ten hoogste een strook loodrecht op de bewegingsrichting ter breedte van de synthetische apertuur gestoord zal worden.

De jammer zal gepolariseerde straling ontvangen en uitzenden. Als de jammer slechts gebruik maakt van één polarisatie zullen met polarimetrische systemen altijd ongestoorde beelden te construeren zijn. In die zin zijn polarimetrische SAR systemen minder gevoelig voor jamming. Als de jamming transponder zelf polarimetrisch is (d.w.z. twee polarisatie richtingen kan storen) dan is dit voordeel verdwenen.

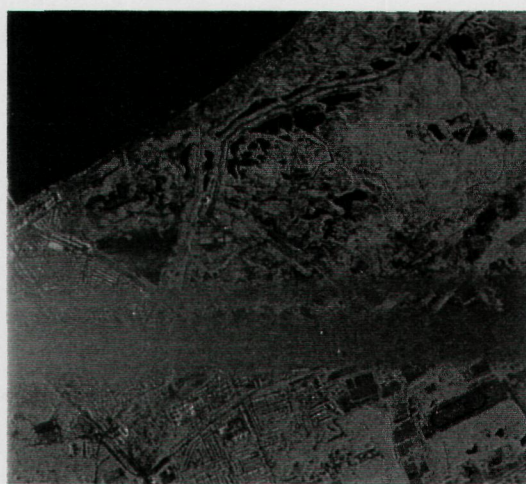
We laten hier een voorbeeld zien (figuur 8.9) van een gewone ruis jamming met één polarisatie tijdens een testvlucht van PHARUS. Merk op dat slechts een strook gestoord is en dat slechts twee beelden met polarisatie combinaties VV en VH gestoord zijn omdat de jamming transponder horizontaal (V) gepolariseerd was.



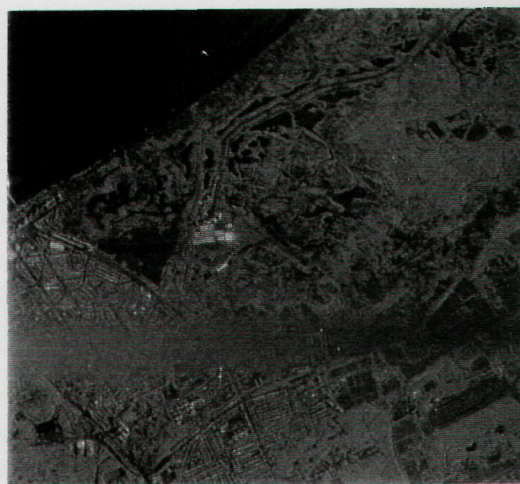
a) HH channel



b) HV channel



c) VH channel



d) VV channel

Figuur 8.9: Beeld van SAR jamming in de verticale polarisatie van een gebied ten noorden van Den Haag.

9. Conclusie

We geven hier eerst de conclusies per hoofdstuk weer en combineren deze in de algemene conclusies.

9.1 Samenvattende conclusies

Hoofdstuk 2. Het verzamelen van militaire inlichtingen is een cyclisch proces dat in een aantal categorieën onderscheiden kan worden. We onderscheiden hier inlichtingen afkomstig van beeldvormende sensoren (IMINT), elektronische signalen (SIGINT), akoestische sensoren (ACINT) en mensen (HUMINT). We onderscheiden drie niveau's van inlichtingen: detectie, herkenning en identificatie. De inlichtingen kunnen betrekking hebben op wide area surveillance (groot gebied) of doelopsporing. In het eerste geval gaat het vaak om het interpreteren van terrein en het vinden (detecteren) van doelen. In het tweede geval wil men de doelen kunnen herkennen en identificeren.

Hoofdstuk 3. SAR is een all-time en weersonafhankelijk, actief, stand-off beeldvormend radar systeem met hoge resolutie vergeleken met andere radar systemen. Door gebruik te maken van de polarisatie van de straling kunnen meerkanaals data verkregen worden, die als een kleuren beeld gepresenteerd kunnen worden. Een dergelijk meerkanaals systeem heet polarimetrisch en geeft meer informatie dan een enkelkanaals systeem. Dit is vergelijkbaar met het verschil tussen een optisch zwart-wit beeld en een kleurenbeeld.

Hoofdstuk 4. Met PHARUS, een Nederlands C-band polarimetrisch SAR systeem, is meegedaan aan een campagne waarbij militaire voertuigen in een testgebied zijn waargenomen. De opnamen zijn gemaakt met verschillende instellingen. Zo zijn bijvoorbeeld opnamen met verschillende azimuth en inkijkhoeken gemaakt. Scherende inkijkhoeken (d.w.z. grote invalshoeken: long range) blijken beter te werken voor grondwaarneming dan steile inkijkhoeken (kleine invalshoeken, short range). De range resolutie is in het eerste geval duidelijk beter dan in het tweede geval. Verder is het contrast tussen doelen en de achtergrond en tussen natuurlijke objecten onderling beter. Dit is voor een deel het gevolg van schaduwvorming bij objecten met een zekere hoogte.

Hoofdstuk 5. Terrein interpretatie met polarimetrische data kan gedaan worden met een RGB kleuren beeld waarbij de polarimetrische kanalen in de 3 kleuren kanalen worden afgebeeld of met een PWF gefilterd beeld waarin de speckle is geminimaliseerd. Het beste is echter om een (automatische) classificatie uit te voeren waarbij thematische kleuren landgebruik klassen weergeven. Het blijkt dat bij gebruik van de standaard polarimetrische classificator vooral de totale intensiteit (total power) in het beeld de meeste informatie levert om onderscheid te maken tussen klassen. De polarimetrische informatie die vervat is in de verhoudingen tussen de polarimetrische kanalen en in de polarimetrische correlatie coëfficiënten kan vooral onderscheid maken tussen kale bodems en begroeide oppervlakken en tussen double bounce verstrooiing vooral in stedelijke gebied en andere heldere radar verstrooiing.

Hoofdstuk 6. Doeldetectie wordt gedaan met een combinatie van filteren en toepassen van een detector. Voor het filteren van polarimetrische data blijkt het PWF (polarimetric whitening filter) het beste resultaat te geven. Voor detectie blijken CFAR detectoren het best te presteren. De beste van deze soort blijkt de order statistics CFAR detector te zijn waarbij de voorkeur uitgaat naar de z.g. "hollow stencil" variant omdat deze bij de berekening het snelst is.

Hoofdstuk 7. Als de resolutie hoog genoeg is (bijvoorbeeld 30 cm) zullen doelen in het algemeen meerdere pixels in het beeld beslaan. Het is dan mogelijk om de grootte en richting

waarin het object of voertuig staat te bepalen. Dit niveau van herkenning heet in Engels "shape and orientation recognition". Verdergaande herkenning naar het niveau van detailherkenning is moeilijker met SAR te bereiken, ook wanneer de resolutie verder opgevoerd zou worden gezien de aard van het radar verstrooiingsproces. Wel kan polarimetrische informatie bijdragen aan extra mogelijkheden om doelen onderling te onderscheiden, dan wel om de gedetecteerde doelen te onderscheiden in werkelijke doelen en z.g. false targets. De kenmerken waarmee een doel zich van clutter kan onderscheiden zijn op te delen in polarimetrische en geometrische kenmerken. Wat de polarimetrische kenmerken betreft is gekeken naar de amplitudes van het gereflecteerde radar signaal en naar het faseverschil van het HH en VV kanaal. Beide zijn sterk verschillend voor doelen en clutter en dus bruikbaar om doelen van clutter te onderscheiden. Wat de geometrische kenmerken betreft is gekeken naar het zogenaamde neighbour number. Dit is een maat voor de compactheid van een groep gedetecteerde pixels. Gevonden is dat voor doelen de neighbour number een waarde heeft die ongeveer twee maal zo groot is als die van clutter. Het neighbour number is dus ook een bruikbaar kenmerk om doelen van clutter te onderscheiden.

Hoofdstuk 8. Gezien de conclusie dat in het algemeen "shape" and "orientation" herkenning het best haalbare resultaat is met SAR, kan doelopsporing, die uiteindelijk moet leiden tot identificatie, het best worden uitgevoerd met meerdere sensoren. De SAR wordt ingezet in het begin van de inlichtingencyclus zodat met de verkregen informatie andere sensoren of inlichtingen bronnen effectief kunnen worden ingezet. Als voorbeeld van beeldvormende sensoren valt te denken aan hoge resolutie optische/thermische infrarode, dan wel hyper spectrale sensors. Een andere goede combinatie met name voor het detecteren van doelen is een SAR en een MTI radar, waarbij SAR stilstaande doelen en MTI bewegende doelen kan detecteren. Bovendien kan de SAR indirect de positie nauwkeurigheid van de bewegende doelen vergroten.

9.2 Algemene conclusies

SAR is vooral een sterke operationele sensor die ingezet kan worden bij bewolking, mist en ook s'nachts. Voor wide area surveillance waarbij terrein interpretatie belangrijk is, is een polarimetrische SAR een groot voordeel. Voor het detecteren van doelen is een resolutie van 2-3 meter voldoende. Hierbij is polarimetrie een voordeel omdat op deze manier de speckle kan worden teruggebracht wat de detectie bevordert.

Om doelen te herkennen heeft men hogere resoluties nodig. Minimaal beter dan 1 meter, maar bij voorkeur beter dan 0.5 meter. Veel betere resolutie dan ongeveer 25 cm is niet mogelijk vanwege de fysische beperkingen opgelegd door de golflengte. Het niveau van herkenning dat haalbaar is, is dat van herkenning van vorm, afmeting en richting ("shape and orientation recognition"). Het herkennen van details met SAR is in het algemeen moeilijk omdat door het verstrooiing proces details niet uniek worden afgebeeld. Wel kan onderscheid gemaakt worden tussen enkelvoudige en dubbelvlaks reflecties door gebruik te maken van polarimetrie. Deze extra informatie kan gebruikt worden om het doel te karakteriseren. In het algemeen wanneer men een doel wil identificeren zal voldoende informatie vooraf aanwezig moeten zijn, dan wel achteraf ingewonnen moeten worden. In het laatste geval kan de informatie afkomstig van de SAR gebruikt worden om de inwinning te sturen. Men kan dan als aanvulling optische of thermische infrarode sensoren inzetten. Als dit niet mogelijk is vanwege de weersomstandigheden zal men andersoortige inlichtingenbronnen moeten inzetten, bijvoorbeeld inspectie op de grond (HUMINT).

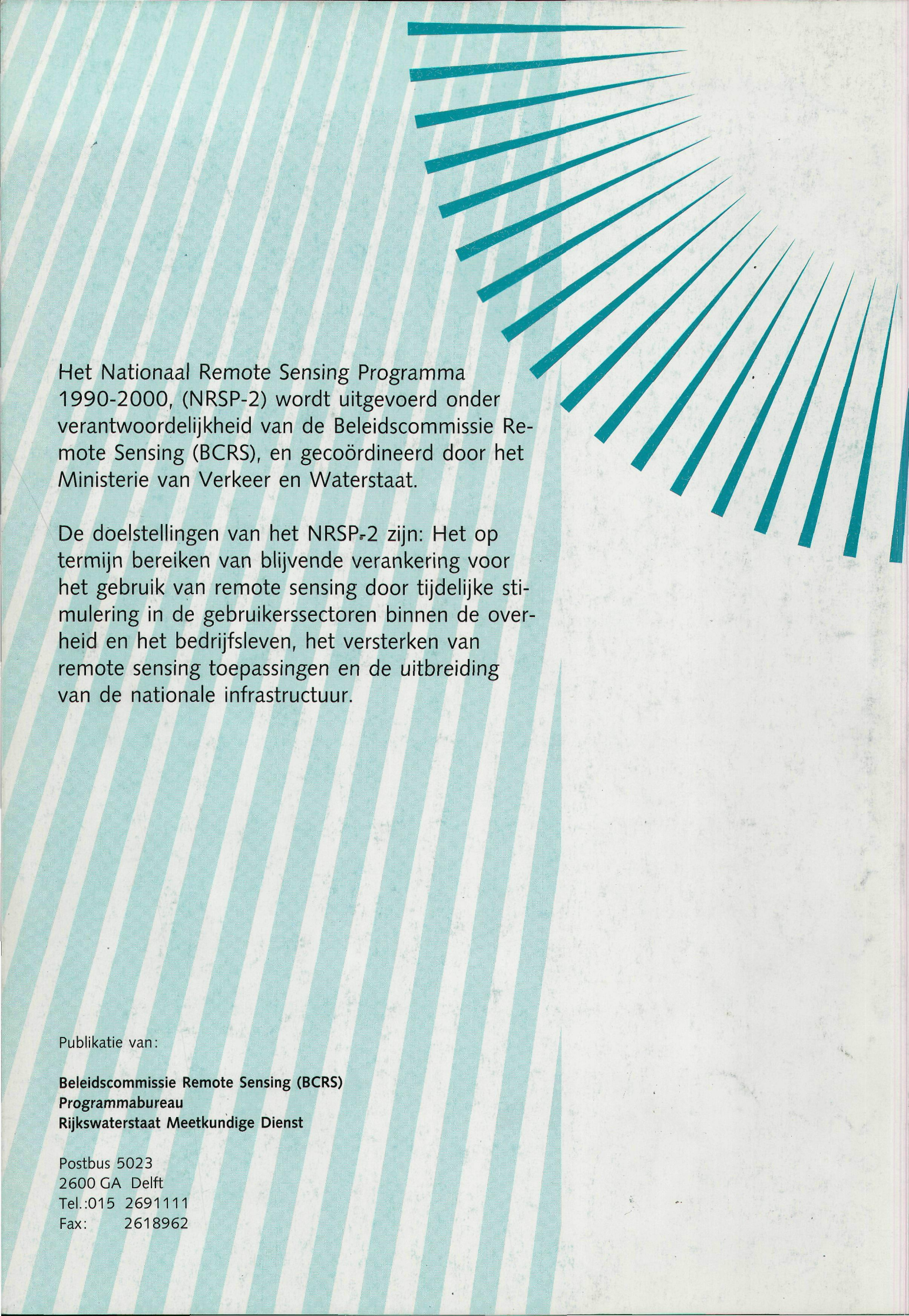
Een combinatie van SAR met een MTI sensor is bijzonder sterk voor bewaking (surveillance) omdat dan zowel stilstaande (SAR) als bewegende doelen (MTI) gedetecteerd kunnen worden.

Referenties

1. Bartlett, L.H., and Saunders, T.H., 1997, "Swynnerton Ground Truth Data", NATO Panel 3 RSG-20 MIMEX Trials Report, DRA/LS/LS2/WP97004, November 1997, Defence Evaluation and Research Agency, Farnborough, United Kingdom.
2. Broek, A.C. van den, and, Groot, J.S., 1993, "Intercalibration of Satellite and Airborne SAR: A Comparative Study of ERS-1 AND AIRSAR/PHARS SAR Data", *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 3, August 1993, pp. 209-217.
3. Broek, A.C. van den, "Data-acquisitie ten behoeve van GIS", TNO rapport, FEL-94-A286, TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium, Den Haag, Nederland.
4. Broek, A.C., van den, Persie, M., van, Noorbergen, H.H.S., Rijckenberg, G.J., "Geographical Information Extraction with Remote Sensing", TNO rapport, FEL-98-A077, TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium, Den Haag, Nederland.
5. Buiten, H.J., en Clevers, J.G.P.W. (redactie), 1990, *Remote Sensing, theorie en toepassingen van landobservatie (Dynamiek, inrichting en beheer van landelijke gebieden, deel 2)*, Uitgeverij Pudoc, Wageningen, Nederland.
6. Carlotto, M.J., 1996, "Detecting man-made features in SAR imagery", *Proceedings of IGARSS '96, 27-31 May 1996, Lincoln, Nebraska*, pp. 34-36.
7. Chui, C.K. (editor), 1992, *Wavelets: A Tutorial in Theory and Applications*, Academic Press, San Diego, CA.
8. Dekker, R.J., Groot, J.S. 1998, "Doelopsparing met PHARUS", TNO rapport FEL-98-A045, juni 1998, TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium, Den Haag, Nederland.
9. Dekker, R.J., 1997-1, "Tussenrapportage PHARUS calibratie activiteiten", interne rapportage, 12 mei 1997, TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium, Den Haag, Nederland.
10. Dekker, R.J., 1997-2, "Tussenrapportage PHARUS calibratie activiteiten (2)", interne rapportage, 10 juli 1997, TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium, Den Haag, Nederland.
11. Dekker, R.J., and Broek, A.C. van den, 1998, "Calibration of Polarimetric PHARUS Data", *CEOS SAR Workshop, 3-6 February 1998, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands*.
12. Donoho, D.L., and Johnstone, I.M., 1994, "Ideal spatial adaption by wavelet shrinkage", *Biometrika*, Vol. 81, No. 3, pp. 425-455.
13. Donoho, D.L., 1995, "De-Noising by Soft-Thresholding", *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 41, No. 3, May 1995, pp. 613-627.
14. Duda, R.O., Hart, P.E., *Pattern classification and scene analysis*, John Wiley & Sons, 1973.
15. Freeman, A., 1992, "Polarization Effects and Multipolarization SAR", In *Fundamentals and Special Problems of Synthetic Aperture Radar (SAR)*, AGARD- LS-182, August 1992, NATO Advisory Group for Aerospace Research and Development, Neuilly-Sur-Seine, France, ref. 5, pp. 1-13.
16. Goldstein, G.B., 1973, "False-Alarm Regulation in Log-Normal and Weibull Clutter", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 9, No. 1, January 1973, pp. 84-92.
17. Groot, J.S, Introduction to radar polarimetry, report FEL-91-B122, TNO Physics and Electronics Laboratory, April 1991.
18. Guo, H., Odegard, J.E., Lang, M., Gopinath, R.A., Selesnick, I.W., and Burrus, C.S., 1994, "Wavelet based speckle reduction with application to SAR based ATD/R", *Proceedings of ICIP '94, Los Alamitos, California*, pp. 75-79.
19. Halsema, D. van, Dekker, R.J., Groeneveld, A.W., Groot, J.S., en Otten, M.P.G., 1998, "SAR voor surveillance en reconnaissance", TNO rapport FEL-97-A318, TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium, Den Haag, Nederland.
20. Henry, J.C., T.J. Murphy, and K.M. Carusone, *The Lincoln Laboratory Millimeter-Wave Synthetic Aperture Radar (SAR) Imaging System*, SPIE Vol. 1630, 1992.

21. Hoekman, D.H., 1991, "Speckle Ensemble Statistics of Logarithmically Scaled Data", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 29, No. 1, January 1991, pp. 180-182.
22. Hoogeboom, P., Greidanus, H., Koomen, P.J., and Pouwels, H., 1994, "PHARUS: An Autonomous Airborne SAR Capability", *Symposium on Satellite and Airborne Synthetic Aperture Radar*, 28 November 1994, Jakarta, Indonesia.
23. Johnson, J., "Analysis of Image forming systems", Proc. Of the Image Intensifier Symposium, US Army Engineer Research and Development Laboratory, pp 249-273, October 1958.
24. Kreithen, D.E., S.D. Halversen, and G.J. Owirka, Discriminating Targets from Clutter, *The Lincoln Laboratory Journal*, Volume 6, Number 1, 1993.
25. Landmachtstaf, Directie beleid en Planning, Landmacht Doctrine Publicaties deel 1 (Militaire Doctrine), 1996.
26. Larson, V., and Novak, L., 1995, "Polarimetric subspace target detector for SAR data based on the Huynen dihedral model", *Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery II*, 19-21 April 1995, SPIE, Vol. 2487, pp. 235-250.
27. Lee, J.S., M.R. Grunes, en R. Kwok, Classification of multi-look polarimetric SAR imagery based on complex Wishart distribution, *Int. J. RS.*, vol 15, no. 11, pp. 2299-2311, 1994.
28. Levanon, N., 1988, *Radar Principles*, John Wiley & Sons, New York, pp. 33-34.
29. Li, F.K., Croft, C., and Held, D.N., 1983, "Comparison of Several Techniques to Obtain Multiple-Look SAR Imagery", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 21, No. 3, July 1983, pp. 370-375.
30. Liu, G., Huang, S.J., Torre, A., and Rubertone, F., 1995, "Optimal Speckle Reduction in Multi-look Polarimetric SAR Image", *Proceedings of IGARSS '95*, 10-14 July 1995, Firenze, Italy, pp. 664-666.
31. Moreira, A., 1991, "Improved Multilook Techniques Applied to SAR and SCANSAR Imagery", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 29, No. 4, July 1991, pp. 529-534.
32. Nasr, J.M., and Fernin, Ph., 1990, "A comparison of the detection performances obtained with a fully polarized SAR and a dual polarized SAR (HH, VV)", *Proceedings of IGARSS '90*, 20-24 May 1990, Washington D.C., pp. 317-320.
33. Nasr, H., 1996, *Course on Automatic Target Detection and Recognition*, 2-4 December 1996, Inter-Disciplinary Scientific Solutions Ltd., London, United Kingdom.
34. Novak, L.M., Sechtin, M.B., and Cardullo, M.J., 1989, "Studies of Target Detection Algorithms That Use Polarimetric Radar Data", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 25, No. 2, March 1989, pp. 150-165.
35. Novak, L.M., and Burl, M.C., 1990, "Optimal Speckle Reduction in Polarimetric SAR imagery", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 26, No. 2, March 1990, pp. 293-305.
36. Novak, L.M., and Hesse, S.R., 1991, "On the Performance of Order-Statistics CFAR Detectors", *IEEE Conference Record of the 25th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Vol. 2, 1991, pp. 835-840.
37. Novak, L.M., 1992, "Target Detection Studies Using Fully Polarimetric Data Collected by the Lincoln Laboratory MMW SAR", *IEE International Conference on Radar*, 12-13 October 1992, Brighton, UK, pp. 167-170.
38. Novak, L.M., Burl, M.C., and Irving, W.W., 1993, "Optimal Polarimetric Processing for Enhanced Target Detection", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 29, No. 1, January 1993, pp. 234-243.
39. Novak, M.N., G.J. Owirka, and C.M. Netishen, Performance of a High-Resolution Polarimetric SAR Automated Target Recognition System, *The Lincoln Laboratory Journal*, Volume 6, Number 1, 1993.

40. Otten, M.P.G., Groot, J.S, and Wouters, H.C., 1994, "Development of a Generic SAR Processor in The Netherlands", *Proceedings of IGARSS '94, 8-12 August 1994, Pasadena, California*, pp. 903-905.
41. Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., and Flannery, B.P., 1992, *Numerical Recipes in C (Second Edition)*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
42. Quegan, S., 1990, "Interpolation and Sampling in SAR images", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 28, No. 4, July 1990, pp. 641-646.
43. Rohling, H., 1983, "Radar CFAR Thresholding in Clutter and Multiple Target Situations", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 19, No. 4, July 1983, pp. 608-621.
44. Sekine, M., 1992, "Weibull Distribution in Radar Polarimetry", In *Direct and Inverse Methods in Radar Polarimetry, Part I*, Boerner, W.M., et. al. (editors), Kluwer Academic Publishers.
45. Ulaby, F.T., Moore, R.K., and Fung, A.K., 1982, *Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Volume II: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
46. Ulaby, F.T., Kouyate, F., Brisco, B., and Williams, T.H.L., 1986, "Textural Information in SAR Images", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 24, No. 2, March 1986, pp. 235-245.
47. Verbout, S.M., Netishen, C.M., and Novak, L.M., 1992, "Polarimetric Techniques for Enhancing SAR Imagery", *SPIE Vol. 1630, Synthetic Aperture Radar, 20-21 January 1992, Los Angeles, California*, pp. 141-173.
48. Vermeulen, B.C.B, en Otten, M.P.G., 1996, "PHARUS Far Field Measurements", TNO rapport FEL-A96-C292, december 1996, TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium, Den Haag, Nederland.
49. Vries, F.P.Ph. de, Dekker, R.J., and Willems, F.J., 1995, "Project PROSAR: report on satellite SAR processing activities in 1993 and 1994", TNO rapport FEL-94-A176, oktober 1995, TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium, Den Haag, Nederland.
50. Vries, F.P.Ph. de, 1998, "Detection and recognition of tactical targets in SAR imagery", TNO rapport FEL-97-A274, TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium, Den Haag, Nederland.
51. Zebker, H.A., and Zyl, J.J. van, 1991, "Imaging Radar Polarimetry: A Review", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 79, No. 11, November 1991, pp. 1583-1606.
52. Zyl, J.J. van, Burnette, C.F., Zebker, H.A., Freeman, A, and Holt, J., 1990, "Polcal user's manual (POLCAL version 2.0)", JPL D-7715, August 1990, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California.



Het Nationaal Remote Sensing Programma
1990-2000, (NRSP-2) wordt uitgevoerd onder
verantwoordelijkheid van de Beleidscommissie Re-
mote Sensing (BCRS), en gecoördineerd door het
Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

De doelstellingen van het NRSP-2 zijn: Het op
termijn bereiken van blijvende verankering voor
het gebruik van remote sensing door tijdelijke sti-
mulering in de gebruikerssectoren binnen de over-
heid en het bedrijfsleven, het versterken van
remote sensing toepassingen en de uitbreiding
van de nationale infrastructuur.

Publikatie van:

Beleidscommissie Remote Sensing (BCRS)
Programmabureau
Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst

Postbus 5023
2600 GA Delft
Tel.: 015 2691111
Fax: 2618962