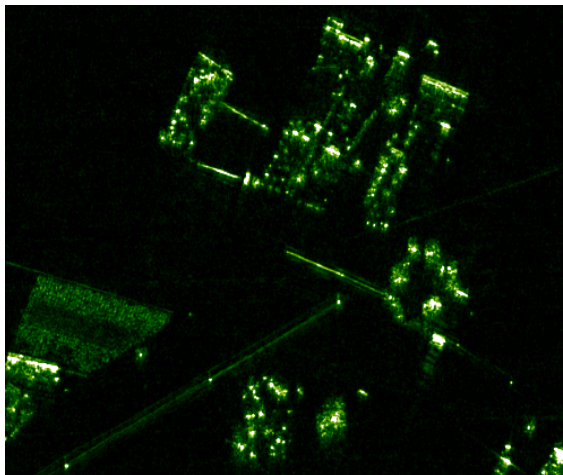


Lars M.H. Ulander

Radarsignalbehandling för SAR och GMTI - slutrapport 2003



LORA UHF-band SAR
219-420 MHz



Flygfoto

TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSINSTITUT

Sensorteknik

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R--1033--SE

December 2003

ISSN 1650-1942

Användarrapport

Lars M.H. Ulander

Radarsignalbehandling för SAR och GMTI - slutrapport 2003

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1033--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 4. Spaning och ledning	
	Månad, år December 2003	Projektnummer E3029
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 42 Spaningssensorer	
Författare/redaktör Lars M.H. Ulander	Projektledare Lars Ulander	
	Godkänd av Svante Ödman	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Lars Ulander	
Rapportens titel Radarsignalbehandling för SAR och GMTI - slutrapport 2003		
Sammanfattning (högst 200 ord) Forskningsprojektet ”Radarsignalbehandling för SAR och GMTI” har bedrivits på FOI under perioden 2001-2003. Rapporten sammanfattar de viktigaste framkomna forskningsresultaten. Motivet för projektet är att Försvarsmakten har en relativt begränsad förmåga att upptäcka och bekämpa markmål på stora avstånd. Ett ökande behov förutses i takt med att Sverige ökar sitt deltagande i internationella operationer. Projektets långsiktiga målsättning är att utveckla radar till en operativ teknik för spaning mot markmål baserad på flygburen SAR-teknik (”synthetic aperture radar”). Verksamheten under perioden har huvudsakligen varit inriktad mot utveckling och utvärdering av FOI:s radarsystem CARABAS och LORA som opererar på VHF- respektive VHF/UHF-banden. Speciellt har radarsystemens förmåga att upptäcka markmål dolda i vegetation utvecklats genom att introducera nya algoritmer för detektion av förändringar och rörelser hos mål. Utvärdering av förändringsdetektion på experimentella radardata visar på betydande fördelar avseende målupptäckt jämfört med mikrovågsradar, vare sig målen står dolda i vegetation eller finns i öppen terräng.		
Nyckelord Signalbehandling, markmål, SAR, GMTI, VHF, UHF, LORA, CARABAS		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 26 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--1033--SE	Report type User report
	Programme Areas 4. C4ISR	
	Month year December 2003	Project no. E3029
	General Research Areas 5. Commissioned Research	
	Subcategories 42 Surveillance Sensors	
Author/s (editor/s) Lars M.H. Ulander	Project manager Lars Ulander	
	Approved by Svante Ödman	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Lars Ulander	
Report title (In translation) Radar signal processing for SAR and GMTI - final report 2003		
Abstract (not more than 200 words) The research project "Radar signal processing for SAR and GMTI" has been conducted at FOI during the period 2001-2003. This report summarizes the most important research results. The project is motivated by the fact that the Swedish Armed Forces has a limited capability for detecting and engaging ground targets at long ranges. An increased demand of this capability is expected since Sweden is increasing its participation in international operations. The long-term objective of the project is to develop radar into an operational technology for surveillance of ground targets based on airborne SAR (synthetic aperture radar). The research in the project has mainly been focused on development and performance evaluation of FOI's radar systems CARABAS and LORA which operate in the VHF and VHF/UHF bands, respectively. In particular, new algorithms have been developed to detect target changes as well as moving targets. Evaluation of the change detection algorithms on real radar data shows a significant performance advantage for ground target detection compared to microwave SAR – both for targets deployed in foliage concealment and in open terrain.		
Keywords Signal processing, ground targets, SAR, GMTI, VHF, UHF, LORA, CARABAS		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 26 p.	
Price acc. to pricelist		

Förord

Denna rapport sammanfattar resultaten från forskningsprojektet "Radarsignalbehandling för SAR och GMTI". Projektet har bedrivits på FOI under perioden 2001-2003 med finansiering från Försvarmakten. Verksamheten har till största delen bedrivits på Institutionen för Radarsystem (f.d. Institutionen för Spaningsradar) och i nära samarbete med två andra försvarmaktsanknutna forskningsprojekt: "Systemstudier Ledningsradar" och "Bredbandsteknik för VHF/UHF-radar".

Författaren vill genom detta förord tacka alla projektdeltagare för deras engagemang och hängivna arbete, utan vilket denna rapport inte skulle kunnat skrivas.

Linköping, 2003-12-16

Lars Ulander

Innehållsförteckning

<u>1</u>	<u>BAKGRUND</u>	<u>1</u>
<u>2</u>	<u>CARABAS OCH LORA</u>	<u>2</u>
<u>3</u>	<u>FORSKNINGSRESULTAT</u>	<u>5</u>
3.1	SIGNALBEHANDLINGSALGORITMER	5
3.2	MÅLSIGNATURER	8
3.3	FÖRSTA SAR-BILDERNA MED LORA	9
3.4	UTVÄRDERING AV CARABAS I VIDSEL 2002	12
3.5	FRAMTIDA FORSKNINGSFRÅGOR	17
<u>4</u>	<u>SLUTSATSER</u>	<u>18</u>
	<u>REFERENSER</u>	<u>19</u>

1 BAKGRUND

Forskningsprojektet ”Radarsignalbehandling för SAR och GMTI” har bedrivits på FOI under perioden 2001-2003. Projektet har finansierats av Försvarmakten inom FoT-område 8, dvs. ”Sensorer över ytan och signaturanpassning”. Föreliggande rapport är slutrapport inom projektet och sammanfattar de viktigaste forskningsresultaten som framkommit.

Motivet för forskningsprojektet är att Försvarmakten idag har en relativt begränsad förmåga att upptäcka och bekämpa markmål. Ett ökande framtida behov av denna förmåga förutses i takt med att Sverige ökar sitt deltagande i internationella operationer. I framtiden kommer också förbättrade precisionsvapen att möjliggöra bekämpning på stora avstånd. Denna möjlighet kan dock endast realiseras under förutsättning att nya sensor- och ledningssystem utvecklas som kan skapa motsvarande situationsbilder.

Projektets långsiktiga målsättning är att utveckla flygburen radar till en operativ teknik för spaning mot markmål baserad på SAR-teknik (”synthetic aperture radar”). Med SAR kan man avbilda markmål med mycket hög upplösning på stora avstånd - oberoende av väder och belysningsförhållanden. Det speciella med SAR-tekniken är att upplösningen i radarbilderna i princip är oberoende av avståndet till målområdet.

Projektet har varit inriktat mot att utveckla radar på VHF- och UHF-banden¹, samt att undersöka prestanda avseende lågsignaturmål, dvs. mål som är svåra att detektera med mikrovågsradar. Exempel på det senare är dolda mål i vegetation och signaturanpassade mål.

Verksamheten har bedrivits i nära samarbete med två andra radarprojekt inom samma FoT-område: ”Systemstudier Ledningsradar” [1] samt ”Bredbandsteknik för VHF/UHF-radar” [2]. Genom samarbetet har forskningen kunnat bedrivas med både djup och bredd, vilket resulterat i frontlinjeforskning inom områden såsom system, algoritmer, och hårdvarurealisering. Forskningsresultaten har även rönt internationell uppmärksamhet vilket bl.a. manifesteras av flera framgångsrika bilaterala samarbeten, t.ex. med DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) i USA.

Forskning inom flygburen SAR på VHF-bandet har bedrivits på FOI sedan mitten på 80-talet. Verksamheten har resulterat i realisering av två flygburna försökssystem, CARABAS-I och CARABAS-II [3], vilka färdigställdes 1992 respektive 1996. Bägge systemen konstruerades för bandet 20-90 MHz och installerades på FMV:s provplattform TP86.

CARABAS unika egenskaper fås genom att utnyttja ovanligt låga elektromagnetiska frekvenser. De är 2-3 tiopotenser lägre än mikrovågsfrekvenser som traditionellt används för radar. Genom de låga frekvenserna fås betydande inträngning i vegetation och förmåga att upptäcka dolda mål [4].

Sedan 1999 har SAR-forskningen inriktats mot att även inkludera högre frekvenser på UHF-bandet. Syftet är att undersöka kompletterande tekniker till CARABAS med förmåga att detektera rörliga mål samt avbilda mål med betydligt högre upplösning. Som ett led i forskningsarbetet inleddes därför utvecklingen av en ny flygburen experimentradar kallad LORA (”LOw-frequency RADar”) för frekvensbandet 200-800 MHz [5][6]. Målsättningen var att färdigställa och utvärdera LORA under perioden 2001-2003.

¹ VHF-bandet: 30 - 300 MHz. UHF-bandet: 300 MHz - 1 GHz.

2 CARABAS OCH LORA

Utvecklingen av FOI:s nya flygburna radarsystem LORA har finansierats av tre lågfrekvensradarprojekt: ”Radarsignalbehandling för SAR och GMTI”, ”Bredbandsteknik för VHF/UHF-radar” samt ”Systemstudier Ledningsradar”. LORA-systemet uppvisar stora likheter med sina båda föregångare, CARABAS-I och CARABAS-II, som utvecklades av i stort sett samma projektgrupp. Avsikten med föreliggande avsnitt är att kort beskriva likheter och skillnader mellan LORA och CARABAS-II. CARABAS-I kommer inte att behandlas eftersom systemet inte använts sedan 1994.

Både CARABAS-II och LORA utnyttjar FMV:s provplattform TP86 Sabreliner. Figur 1 visar den flygande installationen med de två antennerörerna som sticker ut 5 meter framför flygplanets nos. Utifrån sett ser de två systemen identiska ut eftersom de använder likadana antennerör. Innehållet i rören är dock olika och detsamma gäller för den installerade radarelektroniken eftersom systemen opererar på olika frekvensband.



Figur 1. FMV:s provplattform TP86 används som bärare för både CARABAS-II och LORA. De två 5 m långa rören som sticker ut framför flygplanets nos innehåller respektive radarsystems antenner. I CARABAS innehåller rören två stycken identiska bredbandiga dipoler för 20-90 MHz. I LORA, däremot, innehåller vardera rör en gruppantenn bestående av fem stycken bredbandiga dipoler avstämde för 200-400 MHz respektive 400-800 MHz. CARABAS-II och LORA kan f.n. inte installeras samtidigt. (Foto: FMV VoVC, Pia Ericson)

Tabell 1 och Tabell 2 sammanfattar de viktigaste systemparametrarna för bägge systemen. Som framgår av tabellerna finns flera stora skillnader mellan systemen. För det första opererar CARABAS-II på ett lägre frekvensband (20-90 MHz) i förhållande till LORA (200-800 MHz). För det andra är antennsystemen olika: CARABAS-II har identiska bredbandiga dipoler integrerade i de två antennerörerna, emedan LORA har totalt tio stycken bredbandiga dipoler uppdelade med fem stycken för 200-400 MHz i ett rör och fem stycken för 400-800 MHz i det andra röret. De fem dipolerna sitter longitudinellt förskjutna inuti rören och har en reflektor bakom för att öka antenndirektiviteten. Figur 2 illustrerar placeringen av sändar- och mottagarelementen inuti rören.

Den kanske viktigaste skillnaden mellan LORA och CARABAS är att de är konstruerade för olika uppgifter. CARABAS har en unik förmåga avseende detektion av stillastående dolda mål. Speciellt gäller detta för mål som är stillastående under en överflygning och som sedan

förflyttat sig innan nästa överflygningstillfälle. Genom förändringsdetektion mellan bilderna kan målen upptäckas med mycket få falsklarm. Upplösningen i bilderna är dock måttlig (ca 2.5 m) vilket innebär att igenkänning eller identifiering inte är möjlig. Inte heller har CARABAS förmåga mot mål som rör sig under överflygningen. LORA, däremot, är konstruerad för att få unik förmåga även mot dolda rörliga mål. Detta möjliggörs genom en kortare integrationstid i kombination med en gruppantenn. Genom att kombinera signalerna från de enskilda antennelementen kan stillastående mål undertryckas och rörliga mål detekteras med GMTI-teknik ("ground moving target indication"). LORA har också moder för SAR med mycket hög upplösning (ca. 0.2 m) och för störningsundertryckning. För ytterligare detaljer kring LORA:s konstruktion hänvisas till [7].

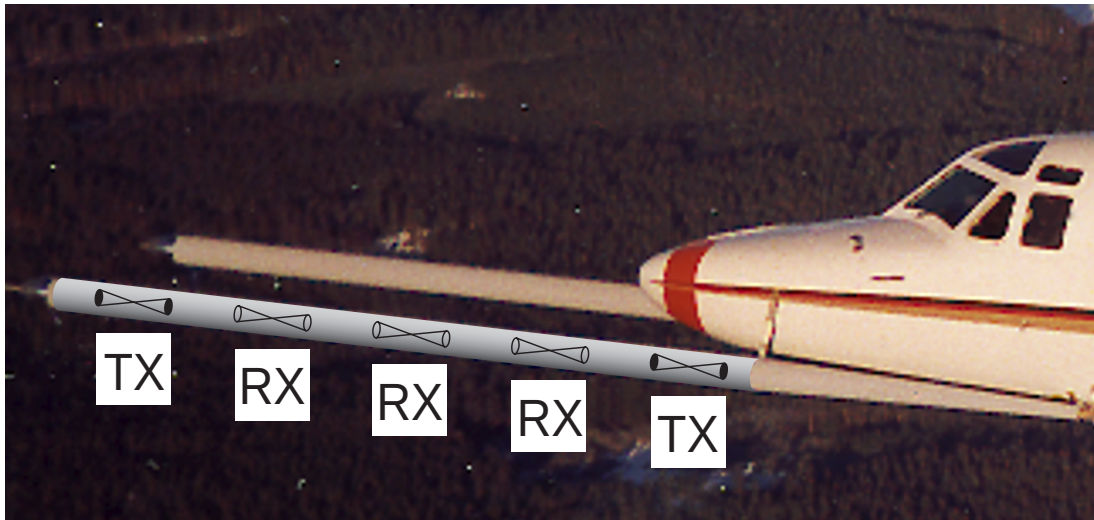
Konstruktionen av LORA är uppbyggd kring en 8-kanalig högdynamisk mottagare där varje kanal matas med oberoende lokaloscillatorssignaler (LO-signaler). På så vis kan de åtta kanalerna konfigureras på ett flexibelt sätt, d.v.s. den totala bandbredden på 8 x 10 MHz kan fördelas mellan en rumslig (antennkanaler) respektive en temporal (frekvenskanaler) del. Det ger optimalt utnyttjande avseende GMTI- respektive SAR-moder.

Tabell 1. Systemparametrar för FOI:s flygburna radarsystem CARABAS-II.

Parameter	
Radarmoder	SAR
Frekvensband	20-90 MHz
Mottagningsbandbredd	2 MHz x 2 kanaler
Antennsystem	2 bredbandsdipoler 20-90 MHz
Flyghöjd	3-10 km
Upplösning	2.5 m x 2.5 m
Yttäckningsförmåga	2 km ² /s
Räckvidd	20 km
Datatakt	14 bitar x 5 MHz x 2 kanaler = 0.14 Gbit/s

Tabell 2. Systemparametrar för FOI:s flygburna radarsystem LORA.

Parameter	
Radarmoder	SAR, GMTI, störundertryckning
Frekvensband	200-800 MHz
Mottagningsbandbredd	10 MHz x 8 kanaler
Antennsystem	A: 5 bredbandsdipoler 400-800 MHz B: 5 bredbandsdipoler 200-400 MHz
Flyghöjd	3-10 km
Upplösning	0.2 m x 0.2 m
Datatakt	12 bitar x 25.6 MHz x 8 kanaler = 2.5 Gbit/s

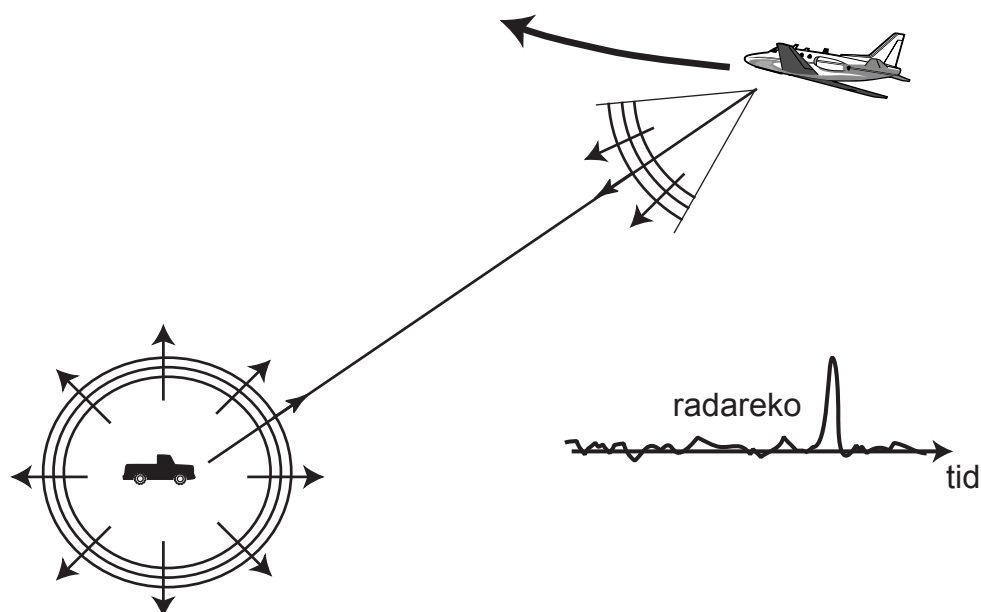


Figur 2. Gruppantennsystemet i LORA med 2 element för sändning (TX) och 3 för mottagning (RX) i varje antennerör. Systembandbredden är uppdelad på två antennerör med en oktav bandbredd i varje rör, 200-400 MHz i ena röret respektive 400-800 MHz i andra röret.

3 FORSKNINGRESULTAT

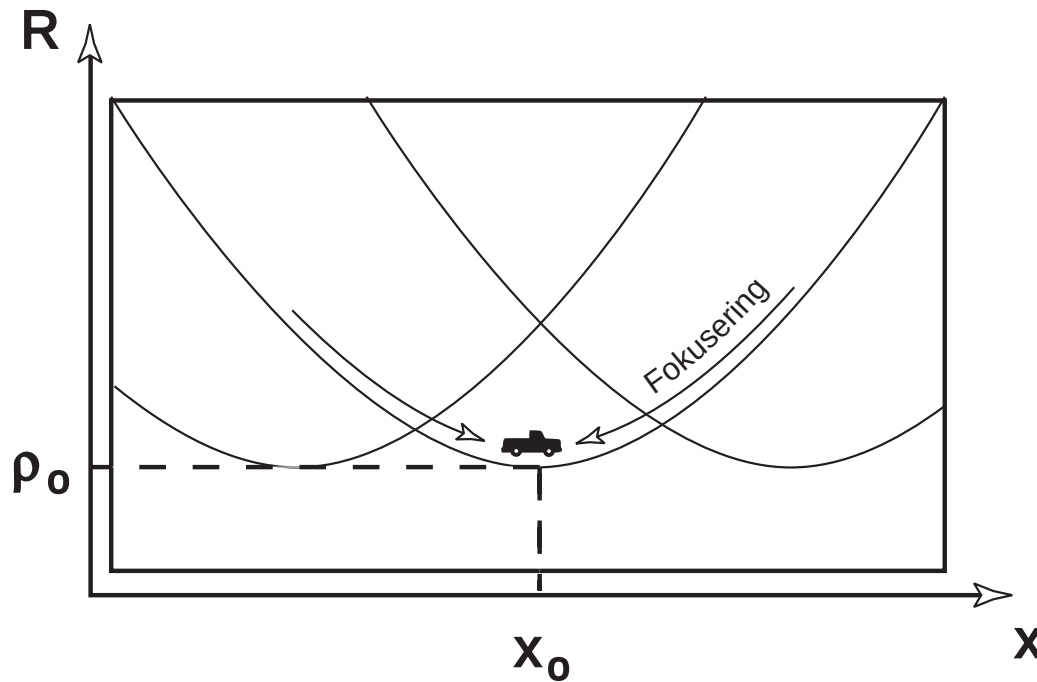
3.1 Signalbehandlingsalgoritmer

Principen för flygburen SAR bygger på relativrörelse mellan radarantenn och mål. Figur 3 illustrerar en flygradar med en antenn som sänder ut pulser och tar emot radarekot från ett stillastående mål. Tiden mellan sändning och mottagning är proportionell mot avståndet till målet. Tidsfördröjningen för ett visst mål varierar således när antennen förflyttar sig utefter flygbanan. Givet en rak flygbana kommer tidsfördröjningen (avståndet) att variera enligt en hyperbelkurva². Varje reflekterande objekt bidrar med en egen hyperbelkurva enligt illustrationen i Figur 4. I praktiken är dock flygbanor aldrig helt raka vilket ger störda hyperblar. I vissa fall flyger man också avsiktligt en krokig bana och då får avståndskurvorna en helt annan form.



Figur 3. Principen för flygburen radar. En puls skickas ut från flygplanets antenn och radarekot registreras från ett reflekterande objekt. Genom att ta emot radarekon från en skur av pulser utefter flygbanan och kombinera dessa kan en SAR-bild av det belysta markområdet genereras.

² Detta förutsätter att den s.k. "start-stopp-approximationen" gäller, dvs. att avståndet till målet är konstant under tidsfördröjningen mellan sändning och mottagning. I de flesta fall är detta en god approximation eftersom plattformen rör sig relativt målet med en hastighet som är mycket mindre än ljushastigheten. Om villkoren för approximationen inte är uppfyllda, måste korrekationer införas i signalbehandlingen.



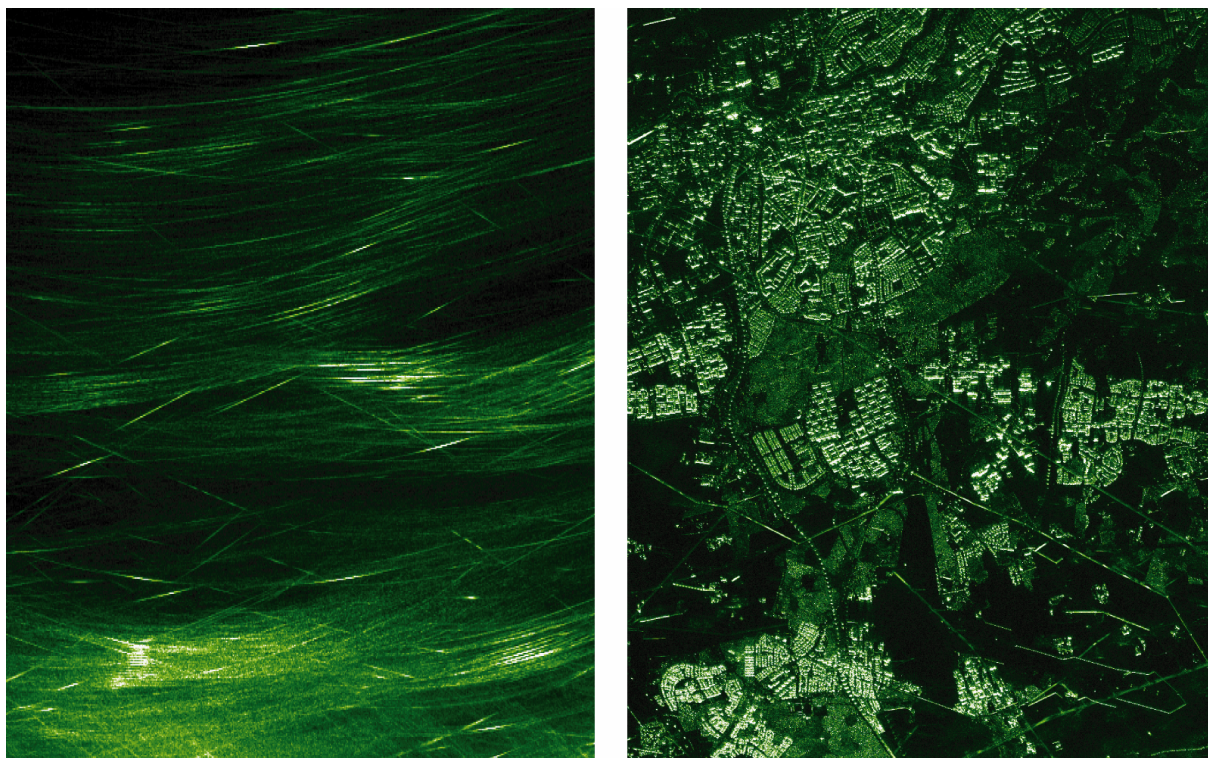
Figur 4. Radarekon från stillastående objekt bildar hyperbelkurvor i radardata förutsatt att flygplanet rör sig utefter en raktlinje x . I varje position x utsänds en puls och radarekordet registreras som funktion av fördröjningstid τ som omvandlas till avstånd $R=c\tau/2$, där c är ljushastigheten. Kortaste avståndet ρ_0 mellan antenn och objekt fås i tvärsiktningen när $x=x_0$. Radardata omvandlas till SAR-bild genom att transformera ("fokusera") hyperbelkurvorna till punkter.

Signalbehandlingen för att generera en SAR-bild från ekodata kallas SAR-processering. Den innebär att data utefter (störda) hyperbelkurvor transformeras (fokuseras) till punkter. Ett exempel på denna process visas i Figur 5. För att fokusera data måste antennens position utefter flygbanan vara känd och användas vid SAR-processeringen. I Figur 5 har positionen beräknats utifrån insamlade GPS-registreringar i flygplanet och på marken.

Ett viktigt krav i operativa system är att signalbehandlingen till SAR-bild sker i realtid eller nära realtid. Historiskt sett har därför signalbehandlingsalgoritmerna ofta formulerats som fälningsoperationer och implementerats i frekvensdomän genom att utnyttja snabb Fouriertransform (FFT). Nackdelen med dessa metoder är att de i princip förutsätter att antennloben är smal eller att flygbanan är rak. För SAR-system på mikrovågsbandet är antennloben oftast smal vilket innebär att frekvensdomänmetoder fungerar tillfredsställande. För radarsystem med bred antennlob, däremot, är algoritmer i tidsdomän att föredra. Detta är oftast fallet för flygburen SAR på låga frekvenser eftersom antennens längd är begränsad av plattformens storlek. Det gäller, t.ex., både CARABAS och LORA.

Nackdelen med tidsdomänmetoden har varit den stora beräkningsbördan. Inom projektet har därför nya algoritmer utvecklats med syfte att snabba upp processeringen [8][9]. Uppsnabbningen med hjälp av de nya algoritmerna är drygt 2 tiopotenser vilket innebär att de är i paritet med frekvensdomänalgoritmer. Det innebär också att radardata från lågfrekventa SAR-system som CARABAS nu kan processeras till SAR-bilder i nära realtid med måttlig beräkningsbörda. Algoritmerna kan också komma att få betydelse i andra sammanhang, t.ex. i SAR-system på mikrovågsbandet med bred antennlob. En annan tillämpning där metoderna

kan få betydelse är inom hydroakustik där liknande metoder utprovats med framgång på SAS data ("synthetic aperture sonar").



Figur 5. Insamlat radarekoddata (vänster) utefter en flygbana transformeras till en SAR-bild (höger) med snabba signalbehandlingsalgoritmer. Data är insamlat med CARABAS-II över Linköpings stad. Varje kolumn i den vänstra bilden motsvarar ett rekonstruerat radareko från en position utefter flygbanan. I ekodata kan man endast skönja hyperbelformade kurvor från enstaka starka reflektorer.

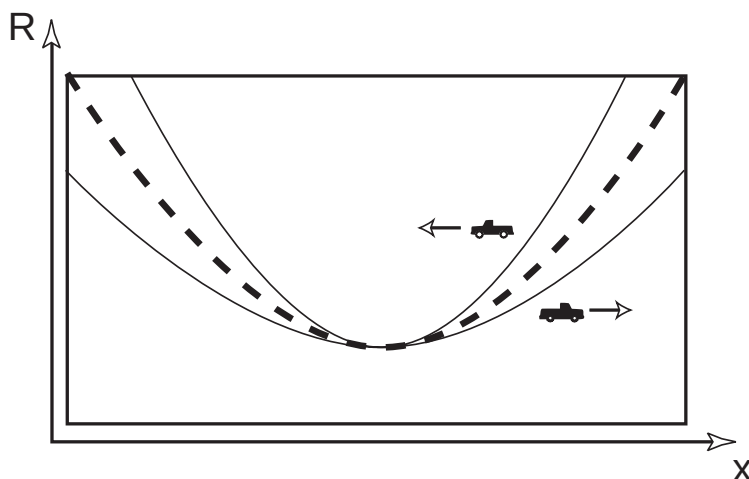
Ovanstående diskussion gäller endast stillastående markmål. Ett rörligt mål kommer i ett allmänt fall inte att följa en hyperbelkurva, ens för en rakbana. Ett viktigt undantag är dock när relativfarten mellan mål och radarantenn är konstant under insamlingen av radarekoddata. I detta fall kommer målet också att röra sig på en hyperbelkurva men med en krökning som beror av relativfarten - se Figur 6. Ett problem är att man inte känner relativfarten på förhand och att man därför måste skatta den från radardata. En lösning, som också är patenterad [8], är att processa data för flera olika relativfarter och sedan detektera den med maximalt signalbrus-förhållande.

I de flesta praktiska situationer är det inte möjligt att detektera det rörliga målet eftersom bakgrundsnivån från omgivande klotter är för hög. Innan detektion måste således bakgrundsklottret undertryckas. Det kan ske på olika sätt. Ett sätt är att ha en smal antennlob som begränsar Dopplerbreddningen p.g.a. plattformens rörelse. Ett annat sätt som även fungerar när antennloben är bred är att ha flera oberoende antennkanaler där bakgrundsklottret undertrycks genom signalutsläckning. Det senare är den metod som utnyttjas i LORA-systemets GMTI-mod [8][10]. Fördelen med denna lösning är att man dessutom får kontinuerlig yttäckning.

Efter detektion måste bäringen till målet bestämmas. Anledningen är att relativfarten inte entydigt bestämmer hastigheten hos målet, dvs. olika kombinationer av målhastigheter och bäringar ger upphov till samma relativfart mellan mål och radarantenn. Ett sätt att lösa detta

på är att bestämma bäringen genom att utnyttja separata antennelement och mäta fas- eller avståndsskillnader för målet.

Liknande GMTI-metoder har tidigare utvecklats för mikrovågsradar och finns i operativa system, t.ex. JointSTARS. Projektet har därför också delfinansierat en studie avseende SAR och GMTI på mikrovågsbandet [11].



Figur 6. Radarekon från rörliga objekt bildar hyperbelkurvor för en rak flygbana x . Jämfört med ett stillastående objekt (streckad hyperbel – se Figur 4) skiljer sig dock hyperbelns parametrar. Fokusering av rörliga mål måste därför göras adaptivt för olika relativfarter.

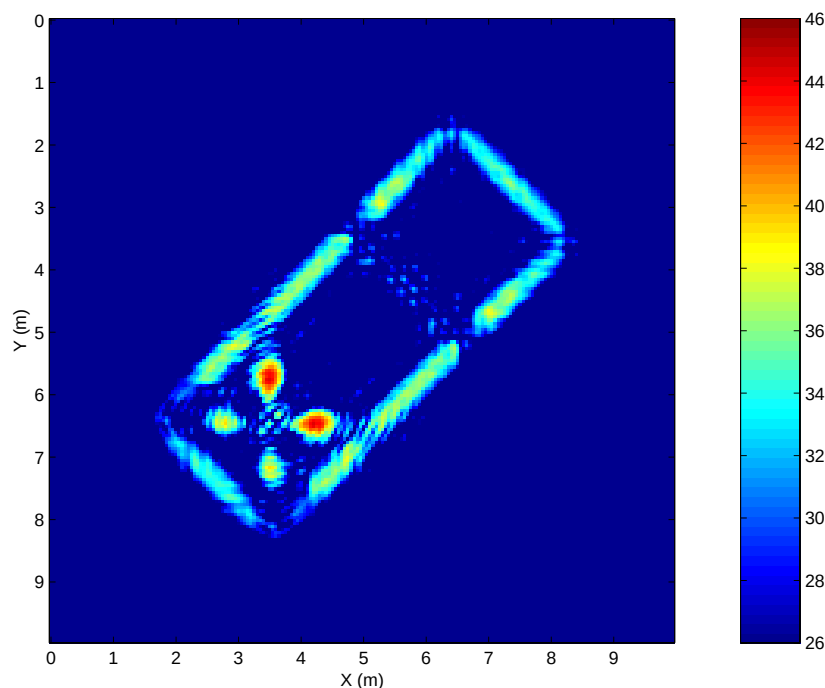
Ett tredje fall som behandlats i projektet är mål som är temporärt stillastående, dvs. som är stillastående medan radardata samlas in men sedan förflyttar sig. Man kan i dessa fall använda förändringsdetektion [4][12][13], s.k. *CD* ("Change Detection"), vilket är närbesläktat med GMTI. Man gör multipla överflygningar över samma område och analyserar bilderna med avseende på förändringar. Denna metod har framgångsrikt utvecklats av projektet och har visat sig vara en mycket robust detektionsmetod för data från CARABAS-systemet (20-90 MHz). Anledningen är att de låga frekvenserna är okänsliga för variationer på dm-skalan eller mindre, t.ex. löv, barr och grenar som vajar i vinden. Ytterligare ett skäl är att upplösningen är av våglängdsstorlek vilket gör bilderna mindre känsliga för variationer i betraktningvinkel. CD ger däremot betydligt sämre prestanda när den tillämpas på mikrovågsdata.

3.2 Målsignaturer

I projektet bedrivs också verksamhet inom elektromagnetisk beräkningsmetodik för målareaberäkningar [14][15]. Motivet har främst varit att kunna simulera SAR-bilder för realistiska objekt, t.ex. hjul- eller bandfordon, för olika val av radarsystemparametrar. Det är viktigt att undersöka hur frekvens, polarisation och infallsvinkel påverkar radarbilderna innan systemet realiserar.

Ett exempel på SAR-simulering visas i Figur 7. Den togs fram för att illustrera hur LORA-systemet (200-800 MHz) skulle avbilda en lastbil om fyra flygbanor åtskilda med 90° kombinerades [14]. Resultatet visar att lastbilens kontur syns tydligt och att dess dimensioner kan mätas med hög noggrannhet. Anledningen till att konturen framhävs är att

hörnreflektionen mellan mark och fordonets sida är kraftig och dominerar den elektromagnetiska spridningen.

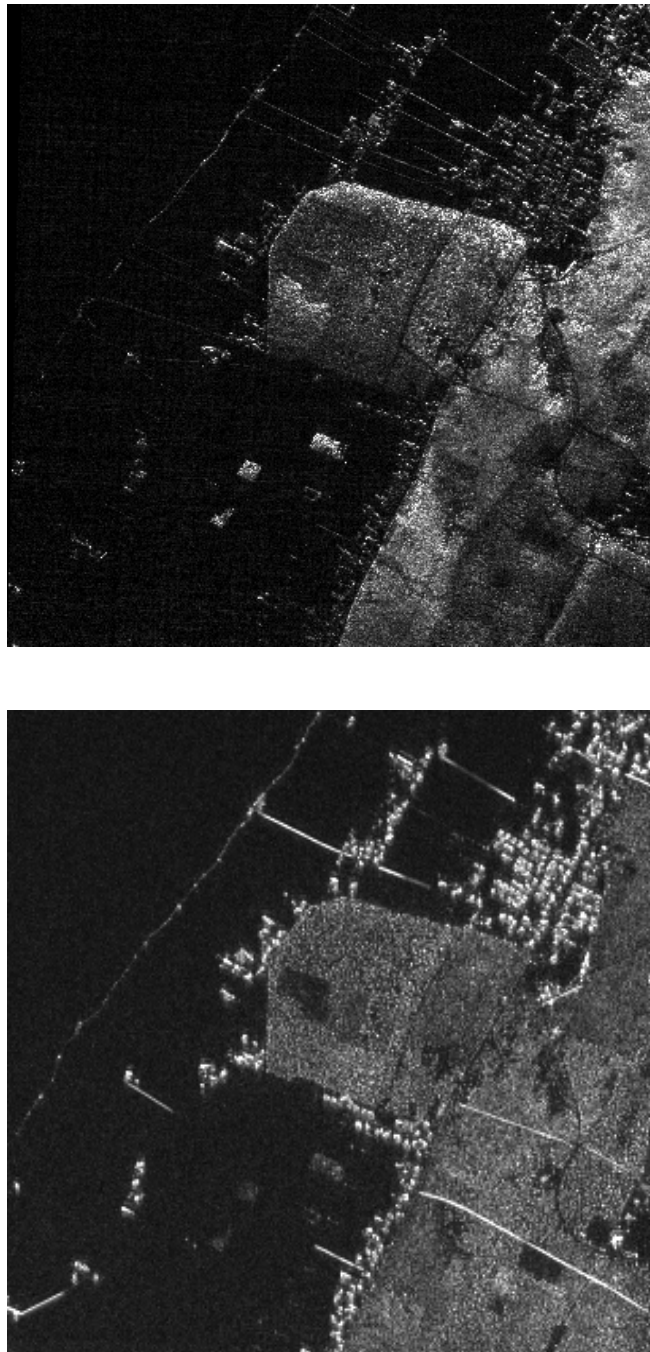


Figur 7. Simulerad LORA SAR-bild av terrängbil TGB 311A med aperturvinkel 360° [14]. De vertikala sidorna på lastbilen bildar tillsammans med den omgivande marken en tvåsidig hörnreflektor som effektivt reflekterar radarsignalen i bakåtriktningen. Lastbilens kontur avbildas tydligt och kan mättsättas. På den fria bakre delen av flaket syns vidare fyra tydliga punktformiga objekt som härstammar från en tresidig hörnreflektor som bildas av flaket och dess sidor. Lastbilens hytt pekar diagonalt uppåt till höger i bilden.

3.3 Första SAR-bilderna med LORA

Under projektets andra år (oktober 2002) genomfördes de två första flygburna mätningarna med LORA-systemet. Målsättningen med försöken var att både SAR- och GMTI-data skulle samlas in men i den efterföljande analysen visade det sig att endast SAR-data var användbart. GMTI-data kunde inte utvärderas p.g.a. problem med radarelektroniken. Nästa GMTI-försök med LORA är inplanerat till våren 2004.

Ytterligare en inskränkning i de första försöken med LORA var att endast en antenn och därmed endast halva frekvensbandet var tillgängligt. Det innebär att de första SAR-bilderna med LORA använde frekvenser mellan 219 och 420 MHz, dvs. en bandbredd av drygt 200 MHz vilket medger en högsta upplösning av 0.7 m. Exempelbilder från de första LORA-försöken [16] över Visingsö visas i Figur 8 och Figur 9 tillsammans med CARABAS-bilder från februari 2000. Upplösningen hos LORA-systemet uppmättes till det förväntade värdet på 0.7 m vilket är 16 gånger bättre än för CARABAS-II omräknat i ytenheter. Effekten av den förbättrade upplösningen syns tydligt i Figur 9. Man kan också notera att klotternivån över skogen i Figur 8 uppvisar större variabilitet i LORA jämfört med CARABAS, medan byggnader och kraftledningar syns mindre tydligt i LORA.



Figur 8. Jämförelse mellan LORA 219-420 MHz (övre) och CARABAS-II 22-82 MHz (nedre) SAR-bild över mellersta delen av Visingsö. Mörka områden är antingen Vättern (övre vänstra hörnet) eller öppen terräng. Gråa områden är skogstäckta ytor. CARABAS-II avbildar tydligt kraftledningar (ljusa linjestrukturer) och byggnader (ljusa punktstrukturer). LORA-bilden avbildar skogen med större intensitetsvariationer jämfört med CARABAS-bilden. Kraftledningar och byggnader uppvisar reducerad kontrast i LORA-bilden jämfört med CARABAS-bilden. Strandkanten mot Vättern är synlig i bägge bilderna. Bildstorleken är 2.5 km x 2.5 km.



Figur 9. Jämförelse mellan LORA SAR-bild 219-420 MHz (övre), flygfoto (mitten) och CARABAS-II SAR-bild 22-82 MHz (nedre) över norra delen av Visingsö. Flygfotot visar ett flertal byggnader och träddungar. I CARABAS-bilden syns enbart de största strukturerna inklusive två kraftledningar som löper diagonalt över bilden. LORA-bilden har betydligt bättre upplösning (0.7 m) och mindre objekt syns därmed tydligare. Notera speciellt det ojämna markområdet nere till vänster i flygfotot som syns i LORA-bilden men är mörkt i CARABAS-bilden p.g.a. den större våglängden relativt ytans skrovlighet. Bildstorleken är 0.4 km x 0.4 km.

3.4 Utvärdering av CARABAS i Vidsel 2002

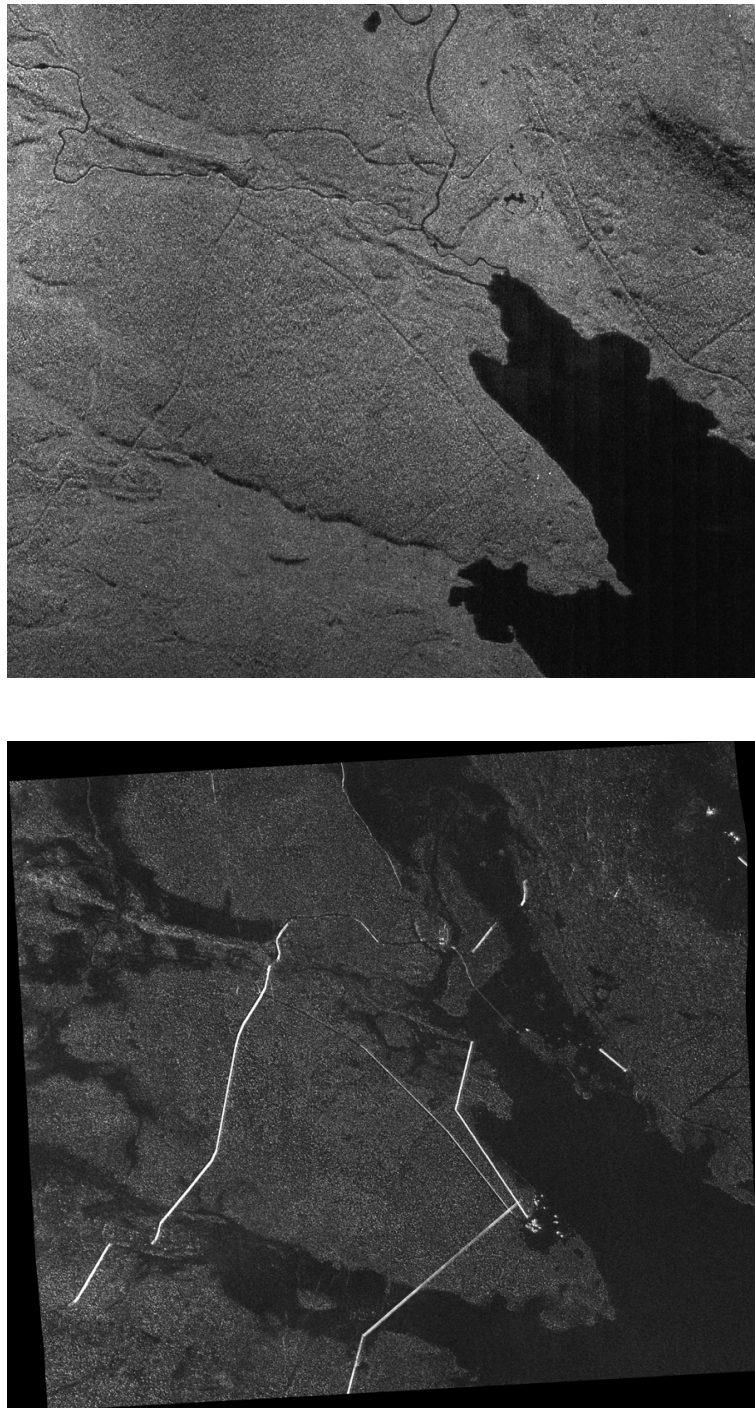
Under perioden 30 maj till 12 juni 2002 genomfördes omfattande prov och försök med CARABAS-II över RFN Vidsel i norra Sverige. Syftet var att samla in CARABAS-data för att utvärdera tekniken under olika förhållanden och mot jämförande sensortekniker. Under en del av perioden hade FMV ombesörjt att hyra in en obemannad flygfarkost (UAV, "Unmanned Aerial Vehicle") Eagle 1. Den var under försöket utrustad med mikrovågsradar (SAR och GMTI), en TV-kamera och en infraröd sensor. Eagle-systemet opererades från flygplatsen i Kiruna där en markstation var lokaliserad. Under tre dagar flögs Eagle över RFN Vidsel för att spana mot samma målspele som CARABAS. Utvärdering av insamlad data har dokumenterats i två rapporter [17] [18].

Exempelbilder från de optiska sensorerna visas i Figur 10. Under två av tre flygningar skymdes sikten av moln så till den grad att spaning med optiska sensorer inte var möjlig. Under den tredje flygningen var dock vädret betydligt bättre och marken kunde avbildas med hög upplösning.



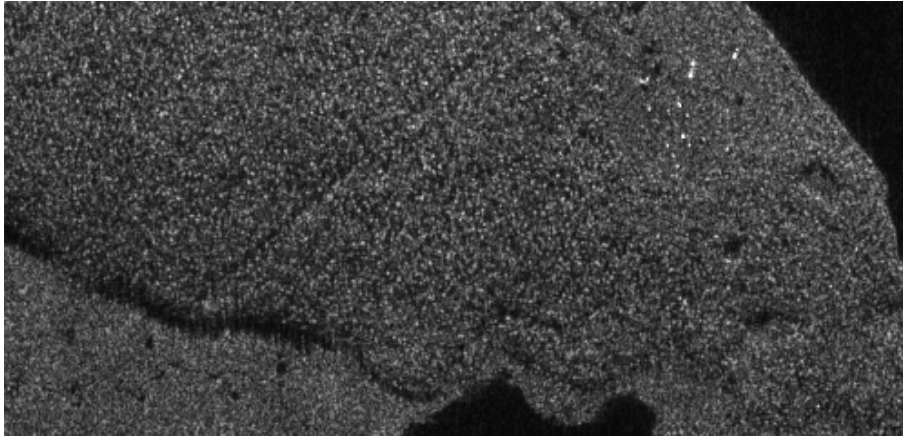
Figur 10. Moln på 6 km flyghöjd förhindrade markspaning med de optiska sensorerna på Eagle UAV under två av tre flygtillfällen. Exempel på IR- (vänster) och TV-bild (höger) under molniga förhållanden.

Exempel på SAR-bilder från Eagle och CARABAS-II visas i Figur 11. Man ser tydligt effekten av de olika våglängdsbanden. Eagle-systemet opererar på Ku-bandet med en våglängd kring 2 cm, emedan CARABAS utnyttjar våglängder mellan 3 och 15 m.

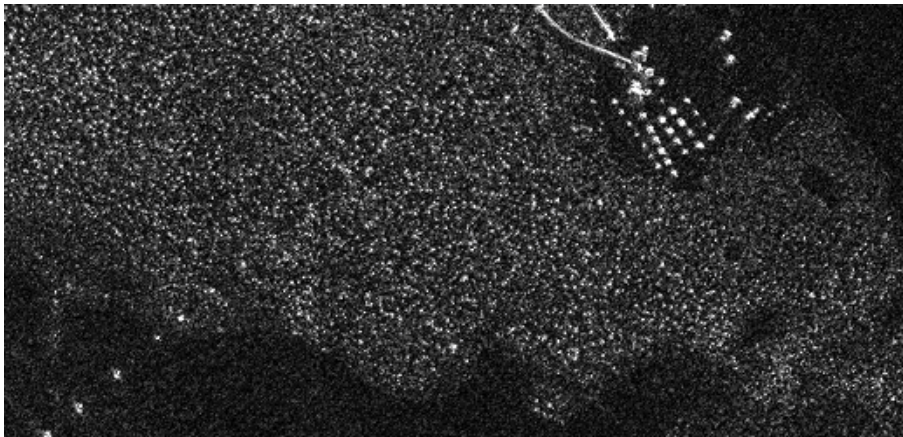


Figur 11. Jämförelsebilder över Nausta by inom RFN Vidsel från K_u -band SAR på Eagle UAV (övre) och CARABAS-II 20-86 MHz (nedre). Upplösningen i bilderna är 3 m och bildstorleken är 6.1 km x 5.4 km. Notera skillnaden i kontrast mellan bilderna. I CARABAS-bilden syns tydligt såväl öppna markområden som sjön Naustajaure (mörka områden) liksom kraftledningar (ljusa linjer).

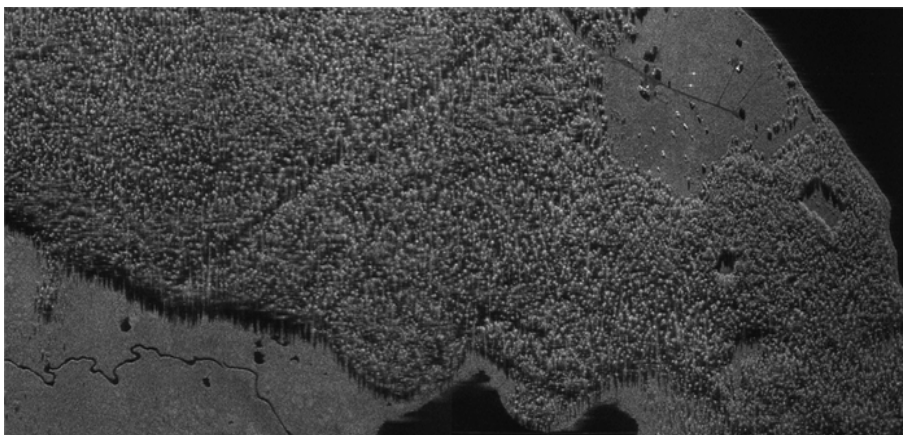
Exempel på detaljförstoringar visas i Figur 12 till Figur 14 över ett målspele i öppen terräng. Resultaten visar att CARABAS-bilden har en betydligt högre kontrast mellan mål och bakgrund vid motsvarande upplösning. Mikrovågsbilden möjliggör endast robust detektion när upplösningen är under ca 0.5 m vilket dock endast kan fås genom att minska det avsökta området. Resultaten visar således tydligt att CARABAS har en större avsökningskapacitet med bibehållande av detektionsprestanda.



Figur 12. Uppförstorad del av K_u -band SAR-bild i Figur 11. Tio lastbilar är utplacerade på det öppna gärdet i övre högra hörnet. På samma gärde finns också några byggnader och två stycken radarreflektorer (de två ljusaste punkterna). Upplösningen i bilden är 3 m.

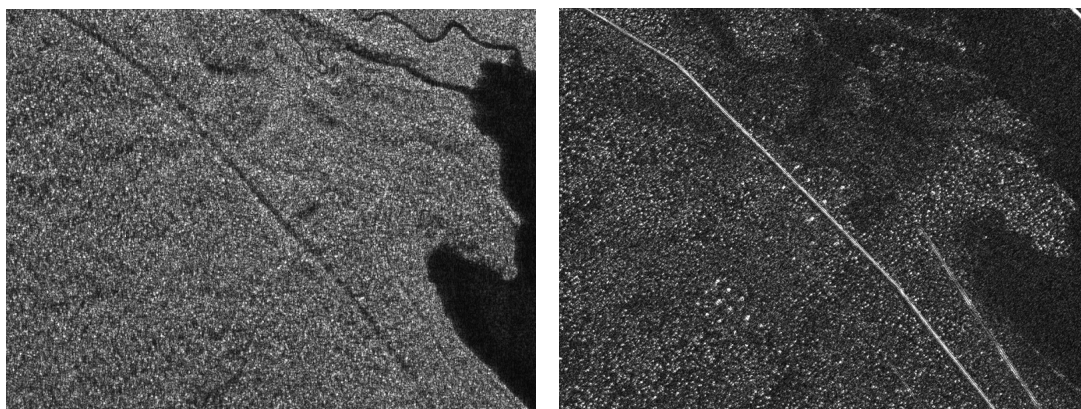


Figur 13. CARABAS-II 20-86 MHz SAR-bild ur Figur 11 över samma område som i Figur 12. Tjugofem lastbilar är utplacerade vilka alla är lätta att upptäcka genom högre kontrast mot bakgrunden. Även byggnaderna syns tydligt och storleken på lastbilar kan uppskattas. Upplösningen i bilden är 3 m.



Figur 14. K_u -band SAR-bild av samma område som i Figur 12 fast avbildad med 0.5 m upplösning. De tio lastbilarna syns nu tydligt på öppna gärdet, likaså husen och vägen.

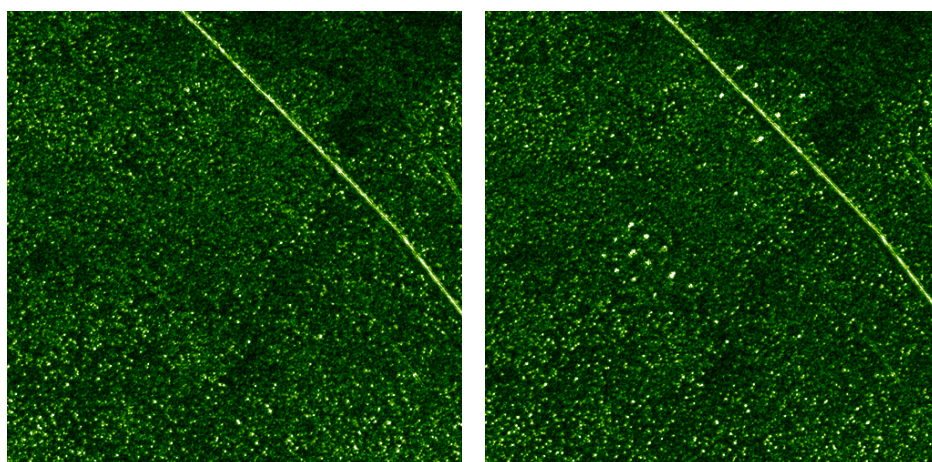
Ytterligare ett jämförande exempel mellan Eagle och CARABAS-II visas i Figur 15 fast nu med mål dolda i skog. Resultaten visar tydligt på oförmågan hos mikrovågsradar att upptäcka de dolda målen. Anledningen är dels den högre dämpningen genom skogen men också den högre klotternivån i Eagle-bilden.



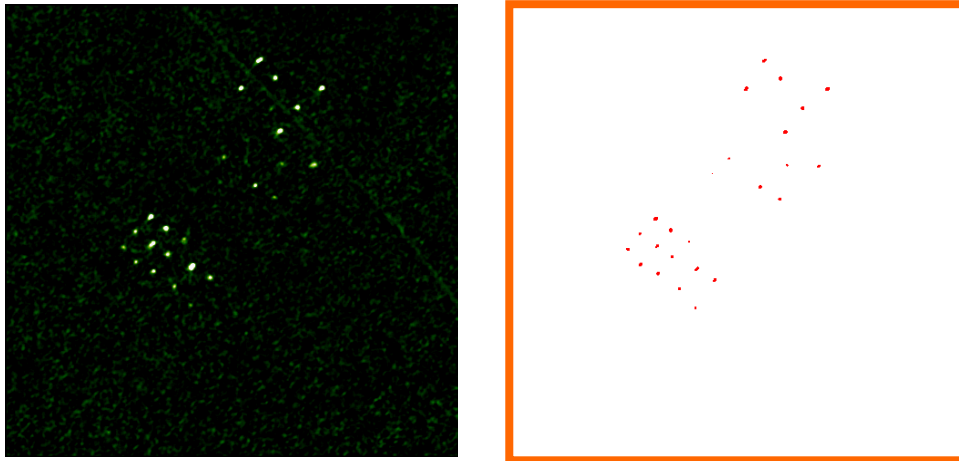
Figur 15. Jämförelse mellan K_u -band SAR på Eagle UAV (vänster) och CARABAS-II 20-86 MHz (höger). Upplösningen i bilderna är 3 m. Tjugofem lastbilar finns utplacerade och är dolda i gles skog. Inga lastbilar syns i K_u -band SAR-bilden medan alla syns i CARABAS-bilden. Automatisk detektion av lastbilarna med förändringsdetektion illustreras i Figur 17.

I Figur 16 och Figur 17 visas ett exempel på förändringsdetektion med CARABAS-II. Två bilder, den ena med mål och den andra utan mål, kombineras och förändringar detekteras automatiskt.

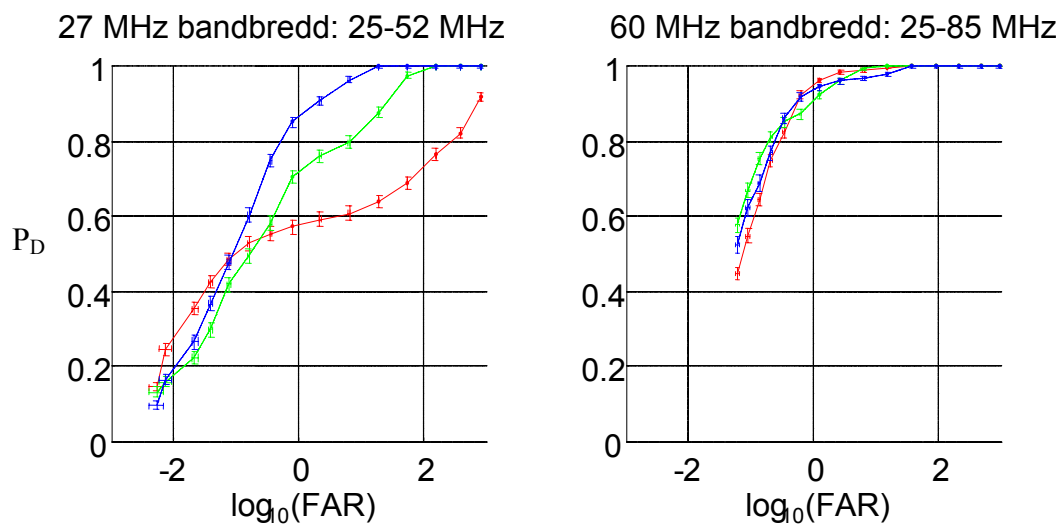
Figur 18 visar resultaten från en omfattande prestandaanalys av 23 bildpar, dvs. 46 bilder från lika många flyglöpor. Kurvorna visar att lastbilar av tre storlekar kan detekteras med en hög sannolikhet och få falsklarm (ca 0.4 falskmål/km² vid 90% sannolikhet för detektion). Resultaten visar också att de mindre lastbilarna detekteras betydligt sämre när den övre gränsfrekvensen ändras från 85 MHz till 52 MHz. De större lastbilarna detekteras dock med likvärdiga prestanda. Resultaten visar tydligt att den fulla bandbredden är viktig för detektion av mindre måltyper. För mer detaljer om resultaten hänvisas till analysrapporten [18].



Figur 16. Skogsområde avbildat med CARABAS-II utan lastbilar den 3 juni 2002 (vänster) och med tjugofem lastbilar på plats den 7 juni 2002. Upplösningen är 3 m och bildstorleken är 0.5 km x 0.5 km. En kraftledning löper diagonalt över området utefter en väg. Enskilda ljusa punkter i bilderna utöver fordonen motsvarar enskilda träd.



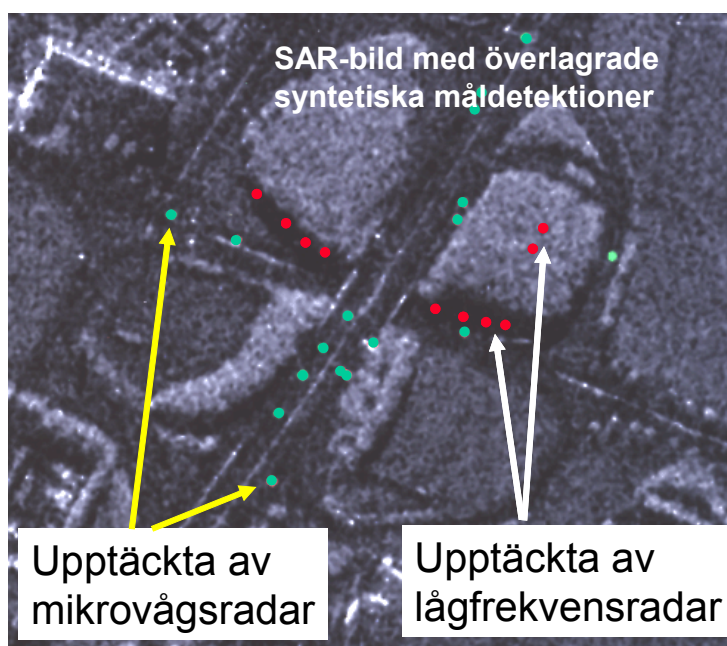
Figur 17. Resultat av förändringsanalys baserat på bildparet i Figur 16. Förändringsbilden före (vänster) och efter tröskling (höger). Alla tjugofem lastbilarna detekterades utan falsklarm.



Figur 18. Resultat från utvärdering av detektionsprestanda för CARABAS-II med tre storlekar av lastbilar (liten: TGB11 – röd kurva, mellan: TGB30 - grön kurva, och mellanstor: TGB40 - blå kurva). Infallsvinkeln var 58° och 23 bildpar med bildstorlek 5 km x 5 km har utvärderats dvs. totalt ca. 600 km². Resultaten ges i form av s.k. ROC-kurvor ("Receiver-Operator-Characteristic") med sannolikhet för upptäckt (vertikal axel) mot antalet falsklarm per km² (horisontell axel). Den senare ges i logaritmisk enhet, dvs. FAR = 0 motsvarar 1 falsklarm/km². Notera att full bandbredd krävs för att även upptäcka de minsta lastbilarna med goda prestanda.

3.5 Framtida forskningsfrågor

Många kunskapsluckor och olösta forskningsfrågor finns alltså inom forskningsområdet lågfrekvensradar [19]. En viktig fråga att besvara med LORA är vilka reella prestanda som kan fås med GMTI-moden, dvs. för detektion av rörliga mål. Figur 19 visar inriktningen på det försök som planeras med LORA under 2004, dvs. detektion av dolda rörliga mål. För att utvärdera tekniken i förhållande till mikrovågsradar kommer samtidiga flygningar att genomföras över ett gemensamt målspele. Olika förhållanden kommer att studeras och hur de påverkar detektionsprestanda.



Figur 19. Utvärdering av LORA-systemets prestanda för detektion av rörliga mål kunde inte genomföras inom föreliggande projekt p.g.a. problem med radarelektroniken. Under 2004 kommer nya flygförsök att genomföras tillsammans med mikrovågsradar för att utvärdera både högupplösande SAR och GMTI.

En annan viktig fråga att adressera för framtiden är hur man utvecklar SAR-tekniken så att den blir mindre sårbar i en skarp konflikt, dvs. hur man minskar hotet som plattformen utsätts för när man aktivt sänder radarpulser. Ett möjligt sätt är att utveckla bi- eller multistatiska SAR- och GMTI-system, dvs. där sändare och mottagare är separerade. På så vis kan sändaren distanseras från målområdet medan den "tysta" mottagaren ligger relativt nära. Man får samtidigt andra systemvinster, t.ex. uppdateringstakten som ökar genom att integrationstiden minskar och att mottagarantennerna får en mindre fysisk storlek. Anledningen till det sistnämnda är att radiobrus dominerar vilket gör att radarräckvidden är oberoende av antennförluster på mottagningssidan. Ett speciellt intressant koncept för marklägesbildningen i framtiden är att utnyttja en stor sändarantenn installerad i en stor farkost, t.ex. höghöjds-UAV, i kombination med en stor mängd passiva radarsystem med små antenner integrerade på små farkoster, t.ex. liten UAV.

4 SLUTSATSER

Forskningsprojektet ”Radarsignalbehandling för SAR och GMTI” har framgångsrikt bedrivits under perioden 2001-2003. De flesta av projektets målsättningar har uppfyllts, t.ex. utveckling av SAR- och GMTI-algoritmer för FOI:s nya försökssystem LORA. Projektet har också delfinansierat utvecklingen av LORA-systemet och de första flygningarna genomfördes under 2002. Högupplösta SAR-bilder har framställts med LORA och utvärderats. Tyvärr kunde inte GMTI-bilder genereras p.g.a. problem med radarelektroniken och nya försök planeras därför under 2004 tillsammans med mikrovågsradar. Under 2004 påbörjas också forskning som syftar till att utveckla ett bistatiskt radarsystem för experimentella demonstrationer.

Det internationella samarbetet och de vetenskapliga resultaten visar att det svenska forskningsprogrammet för VHF/UHF-radar alltså är världsledande avseende detektion av dolda mål.

Förutom den forskning som bedrivits åt Försvarsmakten har forskningsverksamheten också genererat flera civila forskningsprojekt. Speciellt skall omnämnas forskningen kring skogstillämpningar som bedrivits i samarbete med Chalmers Tekniska Högskola, Sveriges Lantbruksuniversitet, Holmen Skog AB och Dianthus. Exempel på resultat återfinns i form av flera vetenskapliga publikationer [20][21][22][23][24].

REFERENSER

- [1] M. Herberthson, "Systemstudier Ledningsradar – slutrapport 2003", FOI-R--1040--SE, 2003.
- [2] B. Larsson, "Bredbandsteknik för VHF/UHF-radar – slutrapport 2003", FOI-R--1088--SE, 2003.
- [3] H. Hellsten, L.M.H. Ulander, A. Gustavsson, and B. Larsson, "Development of VHF CARABAS-II SAR," in Proc. Radar Sensor Technology, held in Orlando, FL, 8-9 April 1996, SPIE vol. 2747, pp. 48-60, 1996.
- [4] L.M.H. Ulander, P.-O. Frörlind, A. Gustavsson, H. Hellsten, and B. Larsson, "Detection of Concealed Ground Targets in CARABAS SAR Images using Change Detection," in Proc. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery VI, held in Orlando, FL, 5-9 April 1999, SPIE vol. 3721, pp. 243-252, 1999.
- [5] L.M.H. Ulander and H. Hellsten, "Low-frequency Ultra-Wideband Array-Antenna SAR for Stationary and Moving Target Imaging", in Proc. Radar Sensor Technology IV, held in Orlando, FL, 5-9 April 1999, SPIE vol. 3704, pp. 149-158, 1999.
- [6] H. Hellsten and L.M.H. Ulander, "Airborne Array Aperture UWB UHF Radar – Motivation and System Considerations", IEEE AES Systems Magazine, pp. 35-45, May 2000.
- [7] B. Larsson, T. Jonsson, G. Stenström, och L. Ulander, "Konstruktionsrapport LORA", FOI-R--0565--SE, 2002.
- [8] H. Hellsten and L. Ulander, Ett SAR-radarsystem (A SAR radar system), Patent- och Registreringsverket, Stockholm, Patent application submitted 1998-12-18, Swedish patent no. 9804417-5 (publication 511 952), Date: 1999-12-20, PCT patent PCT/SE99/02424, Date: June 18, 2001, US patent 6,441,772 B1, Date of Patent: Aug 27, 2002.
- [9] L.M.H. Ulander, H. Hellsten, and G. Stenström, "Synthetic-Aperture Radar Processing Using Fast Factorised Back-Projection," IEEE Trans. Aerospace and Electronics Systems, vol. 39, no. 32, pp. 760-776, 2003.
- [10] M. Petersson, H. Hellsten, and L. Ulander, Synthetic Aperture Radar System Capable of Detecting Moving Targets, US patent 6,518,914 B1, Date of Patent: Feb 11, 2003
- [11] J. Kjellgren, "SAR/GMTI – detektering av rörliga markmål", FOI-R--0973--SE, 2003.
- [12] L. Ulander, Sätt att framställa en tredimensionell bild av ett markområde med hjälp av en SAR-radar (Method to generate a three-dimensional image of a ground area using a SAR radar), Patent- och Registreringsverket, Stockholm, Patent application submitted 1997-06-18, Swedish patent no. 9702331-1 (publication 507 919), Date: 1998-07-27, PCT patent PCT/SE98/01147, Date: Dec 20, 1999, US patent 6,384,766 B1, Date of Patent: May 7, 2002.
- [13] L. Ulander, Sätt att med SAR-radar detektera object som förändrar sig med tiden (Method of detecting objects that change with time by means of a SAR radar), Patent- och Registreringsverket, Stockholm, Patent application submitted 1999-02-26, Swedish patent no. 9900692-6 (publication 512 532), Date: 2000-03-27, PCT patent PCT/SE00/00231, Date: Aug 24, 2001, US patent 6,466,156 B1, Date of Patent: Oct 15, 2002.

- [14] T. Martin and L. Ulander, "VHF/UHF Synthetic Aperture Radar Image Simulations of a Vehicle using FDTD", FOA-R--00-01765-408--SE, 2000.
- [15] T. Martin and L.M.H. Ulander, "Bistatic SAR Pilot Study: Simulations using FDTD", FOI-R--0839--SE, 2003.
- [16] L. Ulander, M. Blom, B. Flood, P. Follo, P.-O. Frölind, A. Gustavsson, T. Jonsson, B. Larsson, D. Murdin, M. Pettersson, U. Rääf, and G. Stenström, "The VHF/UHF-band LORA SAR and GMTI system", in Proc. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery X, held in Orlando, FL, 21-23 April 2003, SPIE vol. 5095, pp. 206-215, 2003.
- [17] L.M.H. Ulander, A. Gustavsson, M. Karlsson, and M. Lundberg, "Sensorutvärdering från försök i Vidsele 2002 med Eagle 1 och CARABAS-II", FOI-R--0611--SE, 2002.
- [18] L.M.H. Ulander, B. Flood, P. Follo, P.-O. Frölind, A. Gustavsson, T. Jonsson, B. Larsson, M. Lundberg, W. Pierson, and G. Stenström, "Flight Campaign Vidsele 2002. CARABAS-II Change Detection Analysis", FOI-R--1001--SE, 2003.
- [19] L.M.H. Ulander, "Fortsatt forskningsverksamhet inom UHF/VHF-radar", FOI-R--0485--SE, 2002.
- [20] P. Melon, J.M. Martinez, T. Le Toan, L.M.H. Ulander, and A. Beaudoin, "On the Retrieval of Forest Stem Volume from VHF SAR Data: Observation and Modelling", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 39, no.11, pp. 2364-2372, 2001.
- [21] A.T. Manninen, and L.M.H. Ulander, "Forestry Parameter Retrieval From Texture in CARABAS VHF-band SAR images", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 39, no.12, pp. 2622-2633, 2001.
- [22] P.-O. Frölind and L.M.H. Ulander, "Digital Elevation Map Generation using VHF-band SAR in Forested Areas", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 40, no. 8, pp. 1769-1776, 2002.
- [23] J.E.S. Fransson, F. Walter, K. Blennow, A. Gustavsson, and L.M.H. Ulander, "Detection of Storm Damaged Forested Areas using Airborne CARABAS-II VHF SAR Image Data", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 40, no. 10, pp. 2170-2175, 2002.
- [24] X. Luo, L.M.H. Ulander, J. Askne, G. Smith, and P.-O. Frölind, "RFI Suppression in Ultra-wideband SAR Systems using LMS filters in Frequency Domain", Electronics Letters, vol. 37, no. 4, pp. 241-243, 2001.