

Martin Blom, Magnus Herberthson, Tommy Jonsson, Mikael Lundberg,
Daniel Murdin, Mats Pettersson, Gunnar Stenström

Hårdvaruverifierande flygmätningar med LORA UHF

TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSINSTITUT

Sensorteknik

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R--1427--SE

December 2004

ISSN 1650-1942

Teknisk Rapport

Martin Blom, Magnus Herberthson, Tommy Jonsson, Mikael Lundberg,
Daniel Murdin, Mats Pettersson, Gunnar Stenström

Hårdvaruverifierande flygmätningar med LORA UHF

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1427--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 4. Ledning, informationsteknik och sensorer	
	Månad, år December 2004	Projektnummer E3067
	Delområde 42 Spaningssensorer	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Martin Blom Magnus Herberthson Tommy Jonsson Mikael Lundberg Daniel Murdin Mats Pettersson	Projektledare Johan Rasmusson	
	Godkänd av Björn Larsson	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Johan Rasmusson	
Rapportens titel Hårdvaruverifierande flygmätningar med LORA UHF		
Sammanfattning (högst 200 ord) Denna rapport sammanfattar de flygmätningar med LORA-systemet i UHF-mod som utfördes över Visingsö samt flygfältet Kvarn under våren 2004. LORA -systemet är en flygburen syntetisk apertur-radar som använder frekvenserna 20-90 MHz samt 230-800 MHz. Syftet med flygmätningarna var att verifiera systemet som helhet, dvs att alla komponenter, i olika konfigurationer, kunde samverka enligt specifikation. Av speciellt intresse var att prova funktionaliteten hos UHF-antennerna (230-800 MHz) samt vissa omkopplare för sänd- och mottagarelementen. Mätningarna visar att hårdvaran har fungerat i provade konfigurationer. Dock har vissa oönskade transientfenomen i kopplingen mellan mottagaromkopplaren och mottagaren noterats. Dessa har identifierats och håller på att åtgärdas. Systemets prestanda i termer av upplösning och signal till brus-förhållande har ej utvärderats i denna rapport.		
Nyckelord UHF-radar, hårdvara, flygmätning		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 21	
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--1427--SE	Report type Technical report
	Programme Areas 4. C4ISTAR	
	Month year December 2004	Project no. E3067
	Subcategories 42 Surveillance Sensors	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Martin Blom Magnus Herberthson Tommy Jonsson Mikael Lundberg Daniel Murdin Mats Pettersson	Project manager Johan Rasmusson	
	Approved by Björn Larsson	
	Sponsoring agency Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Johan Rasmusson	
Report title (In translation) Verification of LORA UHF hardware by flight measurements		
Abstract (not more than 200 words) This report summarizes flight measurements performed with the LORA system in UHF mode, which took place over Visingsö and Kvarn during the spring of 2004. The LORA system is an airborne synthetic aperture radar employing the frequencies 20-90 MHz and 230-800 MHz. The purpose of the measurements was to verify the system as a whole, i.e, to verify that all components, in different configurations, could cooperate according to specification. In particular, it was of interest to test the UHF antennas (230-800 MHz) and certain switches for transmitter and receiver elements. The measurements shows that the hardware has functioned in the choosen configurations. However, some unwanted transient fenomena between the receiver switch and the receiver hav been noticed. These fenomena have been identified and are being attented to. The performance of the system in terms of resolution and signal to noise ratio has not been evaluated in this report.		
Keywords UHF radar, hardware, flight measurement		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 21 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehåll

1	Syfte och bakgrund	5
2	LORA och CARABAS	6
3	Hårdvaran i LORA	7
4	Signalbehandlingen i LORA	8
5	Flygmätningar	9
6	Processerade bilder	11
6.1	Smalbandiga mätningar över Visingsö	11
6.2	Bredbandigare mätningar över Kvarn	17
7	Slutsatser	20

1 Syfte och bakgrund

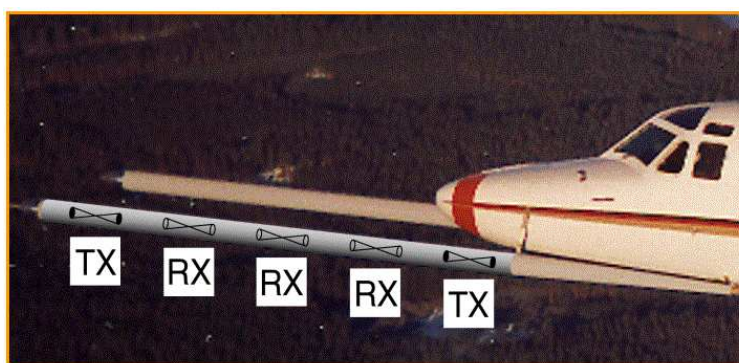
Denna rapport syftar till att sammanfatta och i viss mån utvärdera de flygningar med LORA-systemet som utfördes över Visingsö samt övningsfältet Kvarn under våren 2004. LORA (LOw frequency RAdar) är ett flygburet SAR-system (Syntetisk Apertur Radar) som finns närmare beskrivet i [1],[2]. En kort översikt ges också i avsnitt 2 eller till exempel [3].

Bakgrunden till flygningarna är att utvecklandet av LORA, som är en radar som agerar i frekvensområdet 230 MHz - 800 MHz, har krävt framtagande och nyutveckling av hårdvara för såväl sändning, mottagning som lagring av data. Likaså har nya antenner tagits fram. Inför de under hösten 2004 genomförda mätningarna/mätkampanjerna (LORAM, [4], SEMARK, [5]) fanns ett behov av att verifiera systemet som helhet, dvs att genomföra flygningar där fokus låg på att visa att alla komponenter kunde samverka enligt specifikationen. Sålunda var huvudsyftet att ta fram processerade radarbilder som därmed visade på systemets funktionalitet, snarare än att uppnå viss kvalitet på desamma.

Av speciellt intresse var att verifiera funktionaliteten hos 435-800 MHz-antennen, omkopplarna för sändande respektive mottagande antenner (TAS - transmit antenna switch, RAS - receive antenna switch; se avsnitt 3) samt att visa på förmågan att detektera ett rörligt mål.

2 LORA och CARABAS

LORA-systemet är en vidareutveckling av CARABAS-radarn (Coherent All Radio BAnd Sensning). Den senare finns i ett par varianter, varav den senaste, CARABAS-II, är jämförbar med LORA:s VHF-mod enligt tabellen nedan. Gemensamt för alla systemen, i alla moder, är att de utnyttjar FMV:s provflygplan TP86 Sabreliner försedd med de karaktäristiska antennerörren som sticker ut 5 meter framför flygplanet. Se figur 1.



Figur 1: LORA:s UHF-antennerna installerade på FMV:s provflygplan TP86 Sabreliner. TX indikerar antennelement för sändning, RX antennelement för mottagning.

Vidare används i alla situationer tekniken kring SAR - Syntetisk Apertur-Radar, eventuellt kompletterad med ytterligare signalbehandling beroende på tillämpning (till exempel störundertryckning, detektion av rörliga mål).

För en utförligare behandling av LORA-systemet hänvisas till [1], [2]; här nöjer vi oss med att sammanfatta relevanta systemparametrar i tabellen nedan. Nämnas bör också att flygplattformen utrustas med olika antenner beroende på om man vill använda VHF-moden eller UHF-moden. I det förra fallet används två identiska bredbandiga dipolantennerna, avpassade för området 20 - 90 MHz. I det senare fallet användes två olika antenner; en för området 230 - 435 MHz och en för området 435 - 800 MHz. Var och en av dessa antenner är till det yttre identisk med VHF-antennen, men innehåller istället 5 mindre dipolantennerna enligt figur 1. Detta möjliggör bland annat mer avancerad signalbehandling.

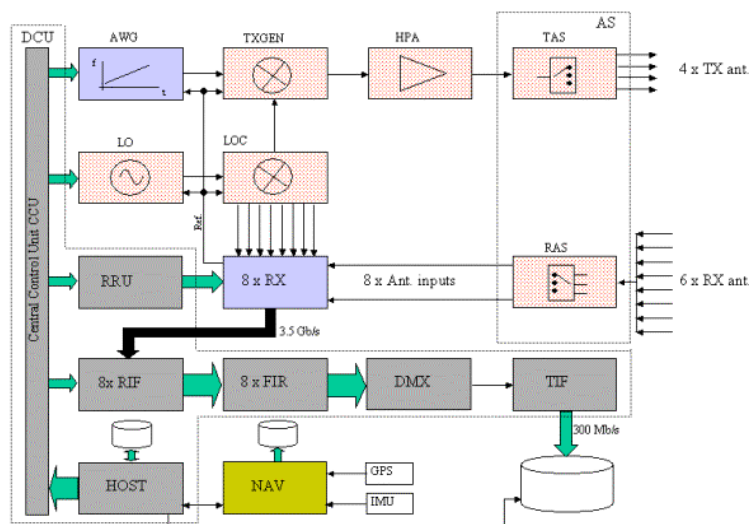
LORA:s grundmoder framgår av nedanstående tabell. MTI står för Moving Target Indication, AJ står för anti jamming.

- VHF SAR
 - Frekvensband: 20-90 MHz
 - Mottagningsbandbredd: 10 MHz x 8 kanaler
 - Antennsystem: 2 bredbandsdipoler 20-90 MHz

- Flyghöjd: 3-10 km
- Upplösning: 2.5 m x 2.5 m
- Yttäckningsförmåga: 2 km²/s
- Räckvidd: 20 km
- Dataakt: 12 bitar x 25.6 MHz x 8 kanaler = 2.5 Gbit/s
- UHF SAR/MTI/MTI AJ/Long range
 - Frekvensband: 230-800 MHz
 - Mottagningsbandbredd: 10 MHz x 8 kanaler
 - Antennsystem: en antenn med 5 bredbandsdipoler 200-400 MHz,
en antenn med 5 bredbandsdipoler 400-800 MHz
 - Flyghöjd: 3-10 km
 - Upplösning, teoretisk: 0.2 m x 0.2 m
 - Yttäckningsförmåga: ~ 0.5 km²/s
 - Räckvidd: ~ 15 km
 - Dataakt: 12 bitar x 25.6 MHz x 8 kanaler = 2.5 Gbit/s

3 Hårdvaran i LORA

Hårdvaran i LORA finns utförligare beskriven i till exempel [1], [6]; här ges endast en kort och schematisk framställning. De relevanta modulerna framgår schematiskt av figur 2, där vi för tytydning av alla förkortningar återigen hänvisar till [1], [6].



Figur 2: Skiss över hårdvaran i LORA

Funktionerna hos enheterna är kortfattat följande:

HOST Systemets värddator som sköter kommunikationen mellan omvärlden och DCU:n

DCU (Data Control Unit) Grundläggande styrenhet som övervakar och styr övriga moduler.

AWG (Arbitrary Waveform Generator) Genererar den puls som skall sändas ut.

LO Lokaloscillator som genererar en önskad (stegad) grundfrekvens.

LOC Skapar via signalen från LO:n de nio specifika frekvenser som sändare (en) och mottagare (åtta) behöver.

TXGEN Blandar upp pulsen till önskat frekvensband.

HPA Högeffektförstärkare som effektförstärker sändningspulsen.

TAS Omkopplare för sändantennerna. Fördelar sändningspulsen från effektslaget på en av de fyra sändantennerna.

RAS Omkopplare för mottagarantennerna. Skyddar mottagarna under sändning och fördelar mottagna signaler från önskade antenner till önskade mottagare.

RX Mottagare (Åtta stycken).

RRU Styr mottagarna

RIF, FIR, DMX, TIF

Dessa kort tar emot data från mottagarna, för vidare komprimering, filtrering och paketering. Data lagras sedan på disk.

NAV Navigeringsenhet som med hjälp av GPS-data samt ett tröghetsnavigeringssystem (IMU) håller reda på flygplanets och antennens position.

4 Signalbehandlingen i LORA

Signalbehandlingen i LORA kommer att beröras ytterst kortfattat. Återigen hänvisar vi till till exempel [2] och däri ingående referenser. Gemensamt för SAR-tekniker är att radarplattformen, i detta fall ett flygplan, belyser scenen från flera olika platser. I fallet att man flyger utefter en rät linje kommer att givet punktmål att ha en avståndsvariation till flygplanet som varierar som en hyperbel i tiden. Processering av SAR-data innebär att man transformerar/fokuserar dessa hyperblar till de ursprungliga punktmålen.

De historiskt sett snabbaste metoderna har arbetat i frekvensdomänen, och där utnyttjat snabb fouriertransform och dess släktingar. Fördelen har varit den överkomliga processeringstiden, medan nackdelen har varit att dessa snabba metoder har krävt att flygbanan verkligen varit rak. I praktiken går det inte att flyga på en perfekt linje, och man har då fått en degradering av bildkvaliten.

Konkurrerande metoder, som arbetar direkt i tidsdomänen har möjlighet att kompensera för krokiga flygbanor, men den mest direkta metoden, global bakåtprojektion, är för närvarande för processeringskrävande. Det har emellertid utvecklats snabba direkta tidsdomänmetoder, lokal bakåtprojektion [7],[8] och faktoriserad bakåtprojektion [9]. De bilder som redovisas nedan är framställda med faktoriserad bakåtprojektion. De utvecklade metoder som finns för att detektera rörliga mål [10], MTI (Moving Target Indication), har ej applicerats. Att man ändå i vissa fall kan urskilja ett rörligt mål, se till exempel figur 4, beror här på att aperturlängden valts kort.

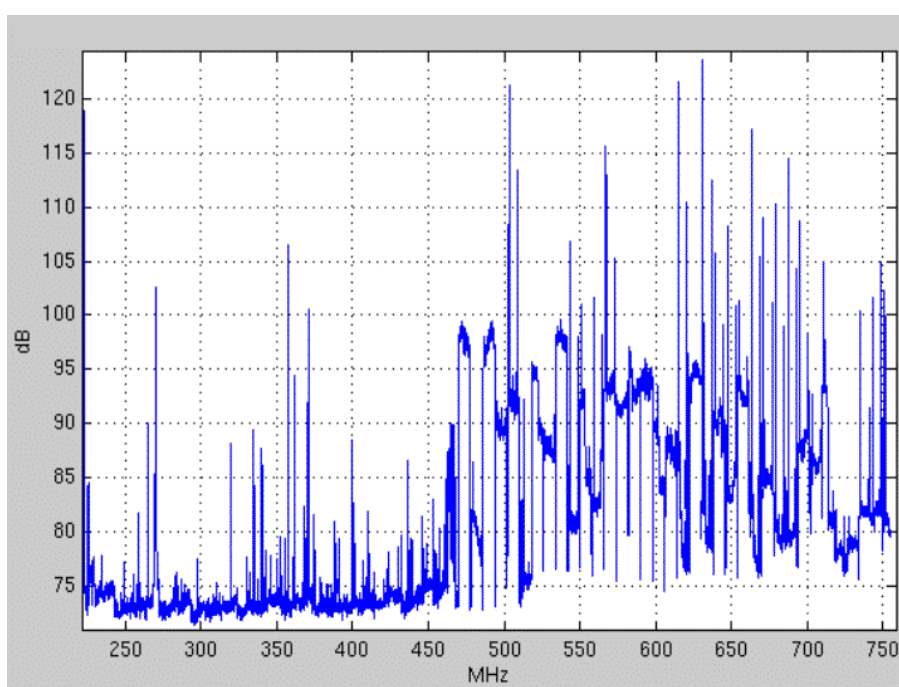
5 Flygmätningar

Flygningarna som redovisas i denna rapport har skett över dels övningsområdet Kvarn, ca 40 km nordväst Linköping, dels över Visingsö.

Som tidigare nämnts har syftet med dessa mätningar varit att bekräfta funktionaliteten hos systemet, snarare än dess prestanda. De prestandapåverkande parametrar som ändå har varierats för att ge möjlighet till någon form av jämförelse är framför allt signalform, aperturlängd, bandbredd och valt centerfrekvens. I övrigt har mer hårvarunära konfigurationer såsom skift mellan antennelement, ur- och ikopplade filter, olika kanalkombinationer etc. provats och varierats.

- Signalformen styrs till stor del av avståndet mellan sändaren och den intressanta scenen samt önskad bandbredd. I de här redovisade mätningarna har sändsignalens längd varit typiskt $10\ \mu s$.
- LORA-systemet ger möjlighet till en momentan bandbredd om 80 MHz; i det fallet används alla åtta mottagarna samtidigt. I ett enklare fall med endast en mottagare aktiv blir sålunda den användbara bandbredden 10 MHz. Denna bandbredd har använts i bilderna i avsnitt (6.1). Fördelen med att använda en mindre bandbredd är tvåfalt. Dels blir signalbehandlingen lättare och dels har man lättare att hitta relativt ostörda frekvenser. Nackdelen är främst lägre upplösning samt sämre signal till brus-förhållande.
- En kort aperturlängd ger enklare processering men sämre prestanda. Speciellt kan man vid processering med kort apertur lyckas fokusera rörliga mål genom den vanliga processeringen; priset är en felmätning. Detta illustreras bland annat i figur 4.

- Val av centerfrekvens (inom 230-800 MHz) styr bland annat kraven på kännedom om flygplattformens läge, eftersom detta krav är relaterat till våglängden. I de här aktuella situationerna var dock aperturlängden förhållandevis kort, och skillnaden i frekvens ej avgörande. Vidare varierar markens reflektivitet inom frekvensbandet, men inte på ett sätt som påverkar situationen i detta fallet. Mer intressant är att radiomiljön varierar ganska kraftigt inom bandet 200 MHz - 800 MHz, dvs förekomsten av störare som måste hanteras varierar kraftigt med frekvensen. Detta illustreras i figur 3.



Figur 3: Radiomiljön vid Kvarn uppmätt i en ren lyssningsmod

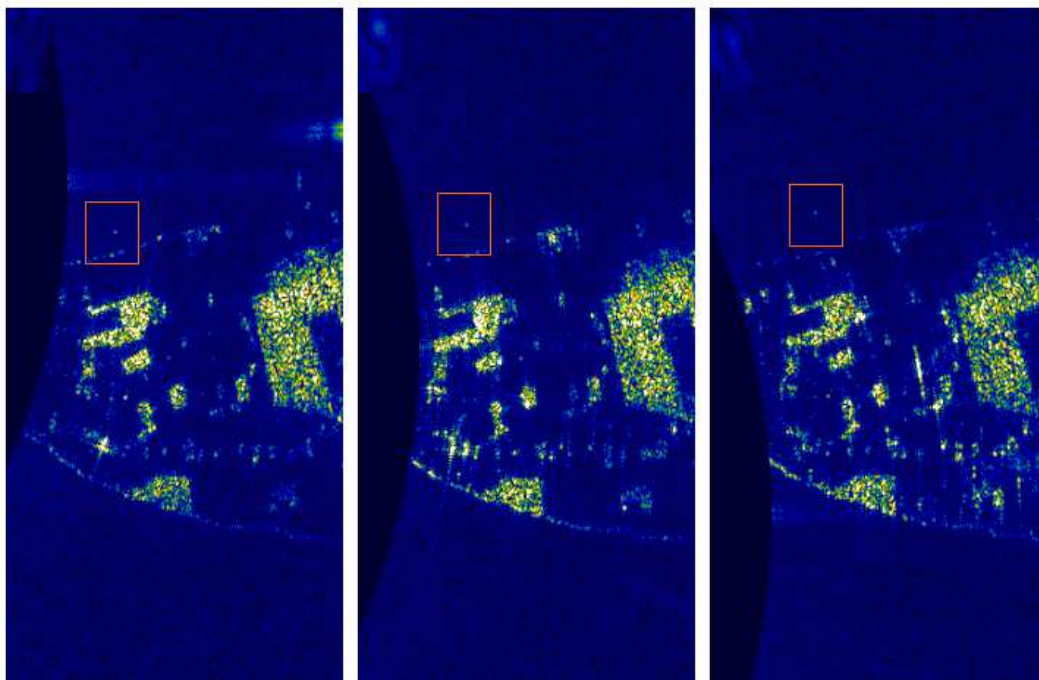
Noterbart är skillnaden mellan den lägre delen och högre delen av bandet. För frekvenserna $\sim 460 - 750$ MHz består de dominerande störkällorna av TV-sändare.

6 Processerade bilder

6.1 Smalbandiga mätningar över Visingsö

Dessa mätningar använde frekvenserna 308-318 MHz, dvs en bandbredd om 10 MHz, med undantag för bilden i figur 8 som nyttjade frekvenserna 628-638 MHz. Som nämnts ovan är syftet med dessa bilder inte att påvisa eller verifiera speciella prestanda, utan bilderna visar på systemets funktionalitet, det vill säga att alla hårdvarukomponenter förmår samverka enligt specifikation. Av den anledningen anges inte upplösning, signal till brus-förhållande etc.

För varje bild nedan anges kortfattat relevant hårdvarukonfiguration, dvs på vilket sätt ny hårdvara har kopplats in/testats.



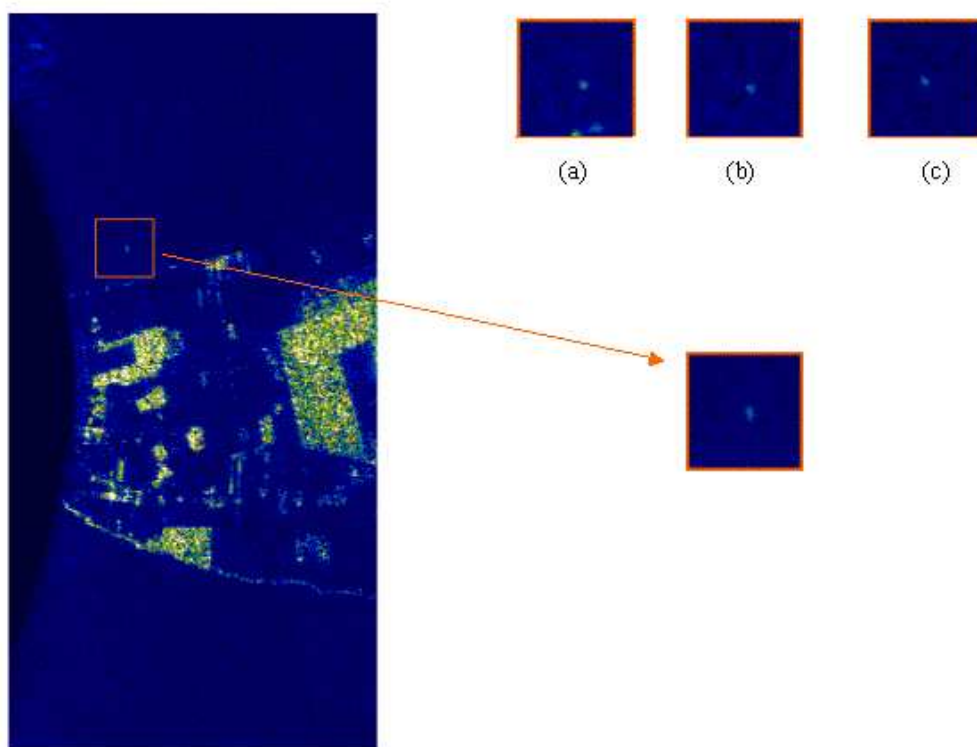
Figur 4: Detektion av rörligt mål. Bilderna illustrerar hur rörliga mål blir fokuserade om aperturlängden är kort, men att de blir fellokaliserade med ett fel som beror på val av processerad datamängd. De röda kvadraterna innehåller bilden av en lastbil som till synes befinner sig i vattnet. Felmätningen är en effekt av dess rörelse. Använda frekvenser är 308-318 MHz. Bildernas storlek är ca 2 km x 4 km.

Bilderna i figur 4 har processerats med hjälp av data från en och samma apertur, med olika data från olika delar av flygbanan. Aperturlängden har varit kort: 130 m. Det innebär att rörliga mål (med måttlig hastighet) blir fokuserade genom den vanliga processeringskedjan. De blir dock fellokaliserade. Fellokaliseringen beror på vilken datamängd utefter aperturen man

väljer att processera.

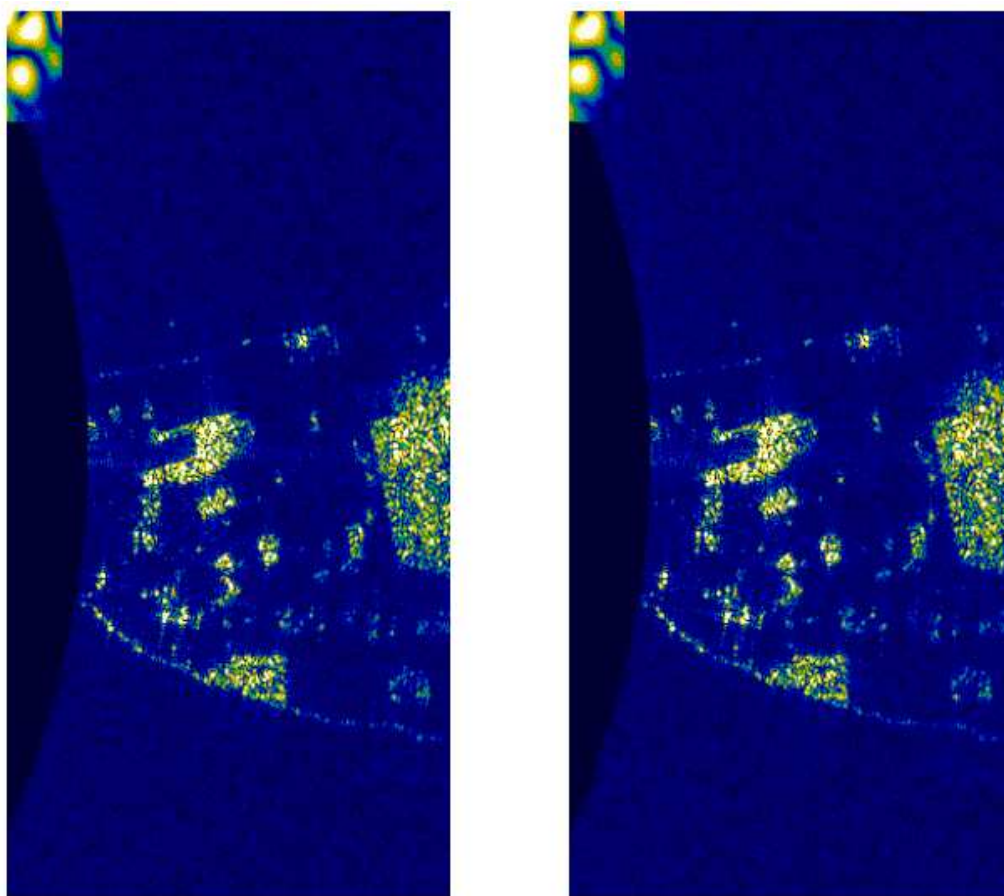
För bilderna ovan gäller att under belysningen från radarn körde en lastbil föresdd med en hörnreflektor på flaket med jämn hastighet. Genom att välja tre olika (korta) delaperturer återskapas lastbilen på tre olika ställen, nämligen i de små röda kvadraterna ovan. Lastbilen befinner sig skenbart i vattnet, men det är alltså en effekt av dess rörelse.

Hårdvarumässigt är detta en enkel situation med samma sändare och samma mottagare under hela mätningen.



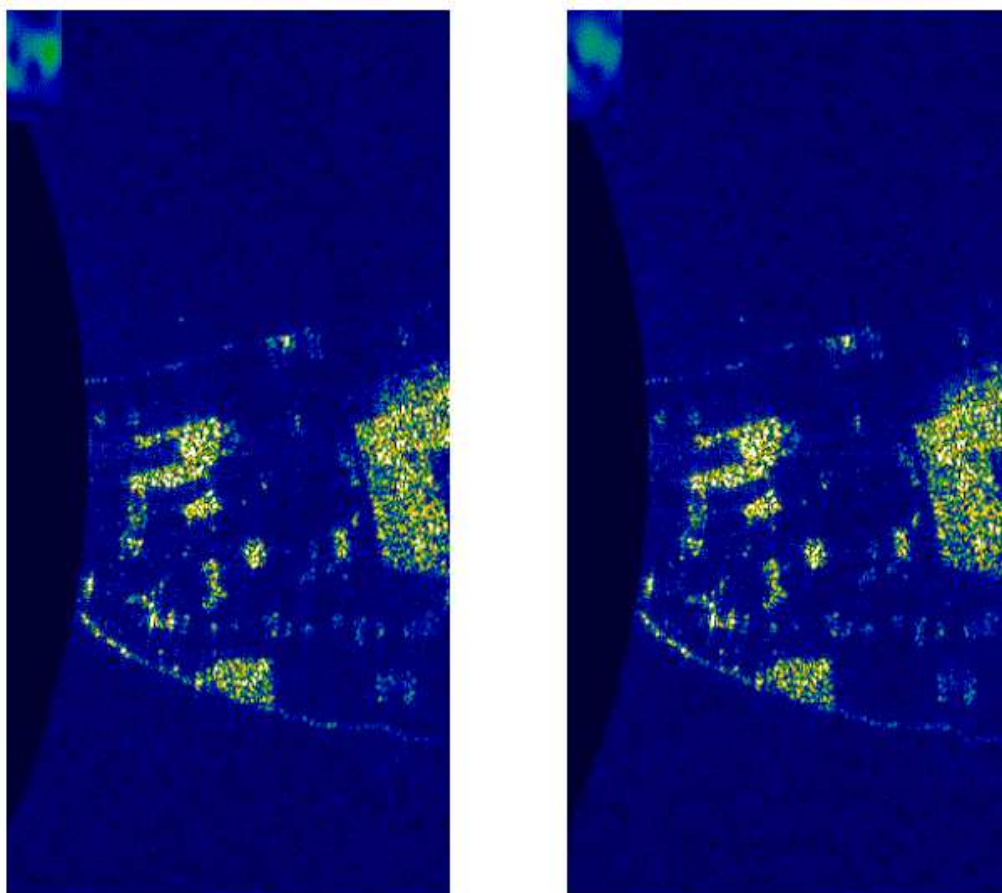
Figur 5: Bilden illustrerar hur en längre apertur jämfört med bilderna a,b och c från figur 4 ger en defokusering av det rörliga målet. Bildens till vänster storlek är ca 2 km x 4 km.

Bilden i figur 5 är framställd under samma förutsättningar som bilderna i figur 4. Skillnaden är att de korta aperturerna (130 m) är ersatta med en längre apertur om 600m. Härvid belyses fenomenet att rörliga mål defokuserar. Överst till höger i bilden ses de tre kvadratiska utsnitten från figur 4, där lastbilen är fokuserad tack vare den korta aperturen. Under visas ett utsnitt från bilden till vänster. Lastbilen är nu tydligt defokuserad.



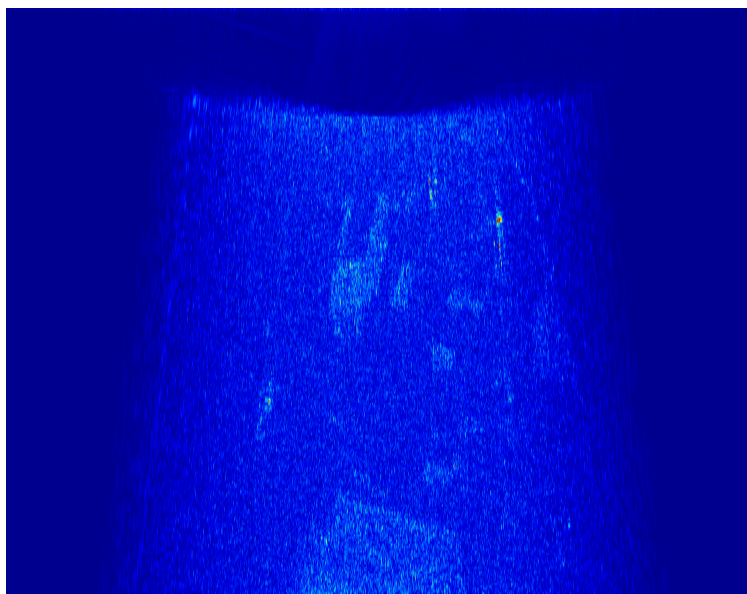
Figur 6: Bilder från två olika antennelement. Frekvenser: 308 - 318 MHz. Bildernas storlek är ca 2 km x 4 km.

Bilderna i figur 6 är, med följande ändring, återigen framställda under samma förutsättningar som bilderna i figur 4. Vid sändning växlar man mellan de två olika sändarelementen i en och samma antenn. Bilden till vänster har sedan framställts med data från det främre antennelementet medan bilden till höger använder det bakre antennelementet. Bägge elementen levererar data på önskat sätt.



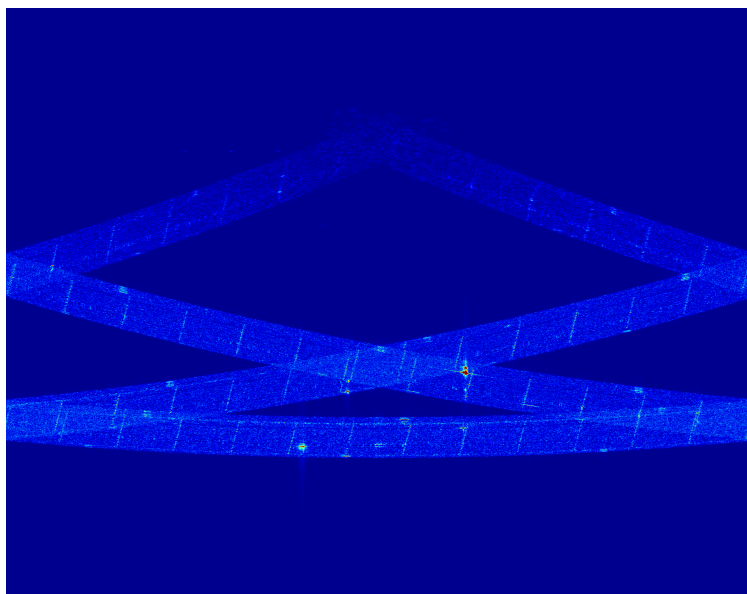
Figur 7: Bilder från två olika antennelement, inkopplat FIR-filter. Frekvenser: 308 - 318 MHz. Bildernas storlek är ca 2 km x 4 km.

Bilderna i figur 7 är, med följande ändring, återigen framställda under samma förutsättningar som bilderna i figur 4. Vid sändning växlar man, som i figur 6 mellan de två olika sändarelementen i en och samma antenn. Man har också valt att koppla in FIR-filtret. Bilden till vänster har sedan framställts med data från det främre antennelementet medan bilden till höger använder det bakre antennelementet. Bägge elementen levererar åter data på önskat sätt.



Figur 8: Bild framställd med data från mätningar i frekvensintervallet 628 - 638 MHz. Bildens storlek är ca 4 km x 2 km.

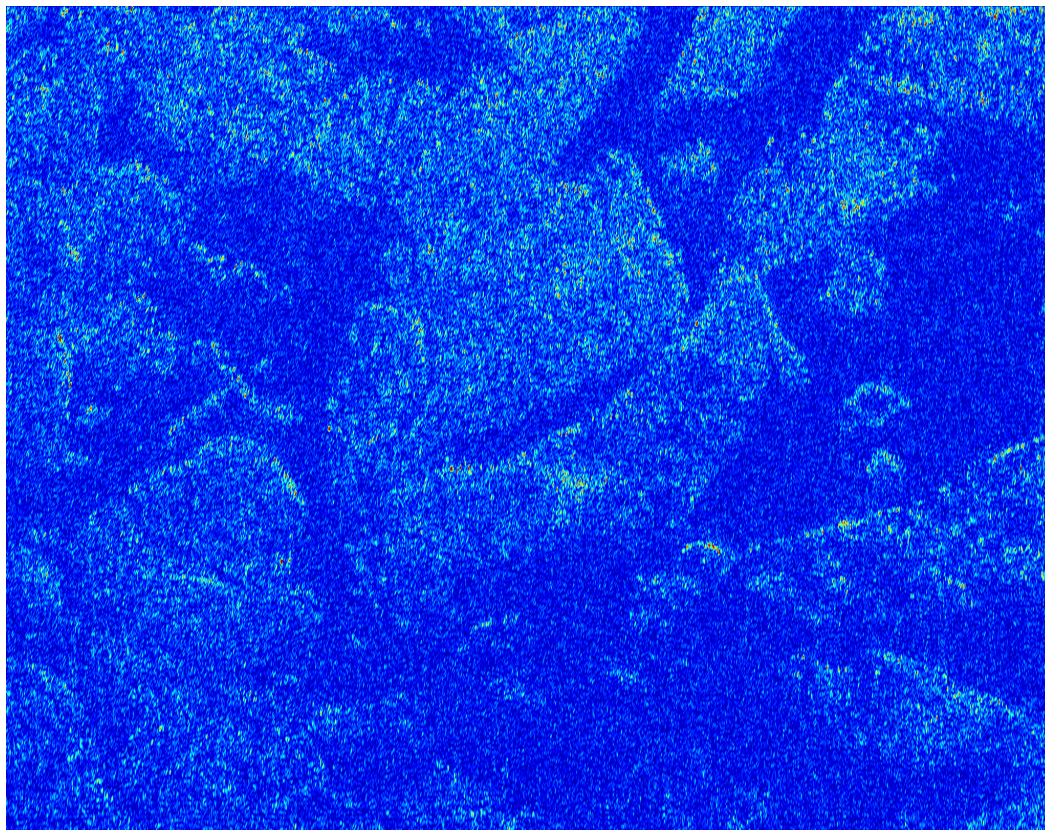
Bilden i figur 8 är framställd under samma förutsättningar som 5 med den skillnaden att använt frekvensband denna gång var 628 - 638 MHz. Förutom en annan radiomiljö, se figur 3, innebär det också byte av typ av antenn. Denna bild blir med, valda processparametrar, oundvikligen av låg kvalitet, vilket framgår i figur 9. Där visas spektralinnehållet hos data i figur 8; speciellt framgår att processeringsdata var undersamlade.



Figur 9: Spektral innehåll (absolutbelopp) hos data i figur 8. Processeringsdata i figur 8 var undersamplat i flygledd, horisontell ledd. Detta syns i spektral innehåll genom invikning i horisontell ledd.

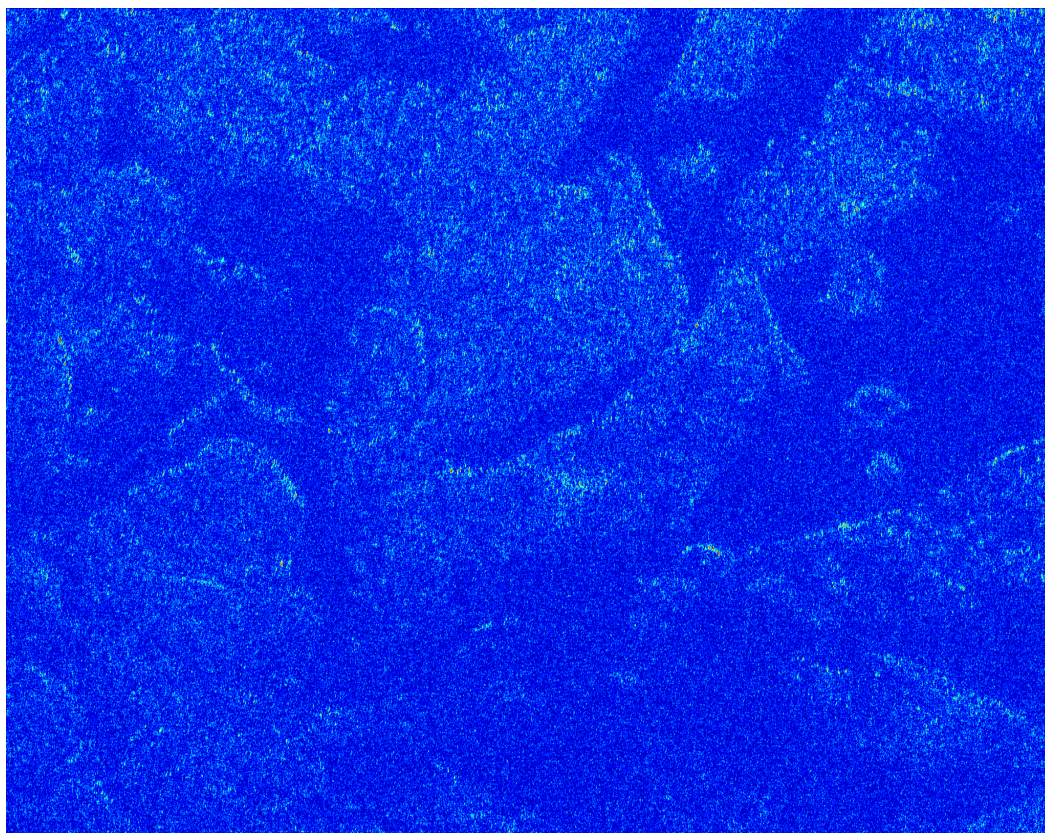
6.2 Bredbandigare mätningar över Kvarn

I detta avsnitt redovisas några bilder där mätningarna har utförts med större bandbredd än i avsnitt (6.1). Likaså har andra frekvenser utnyttjats vilket förutom andra antennkaraktistika framför allt visar sig i ändrad radiomiljö.



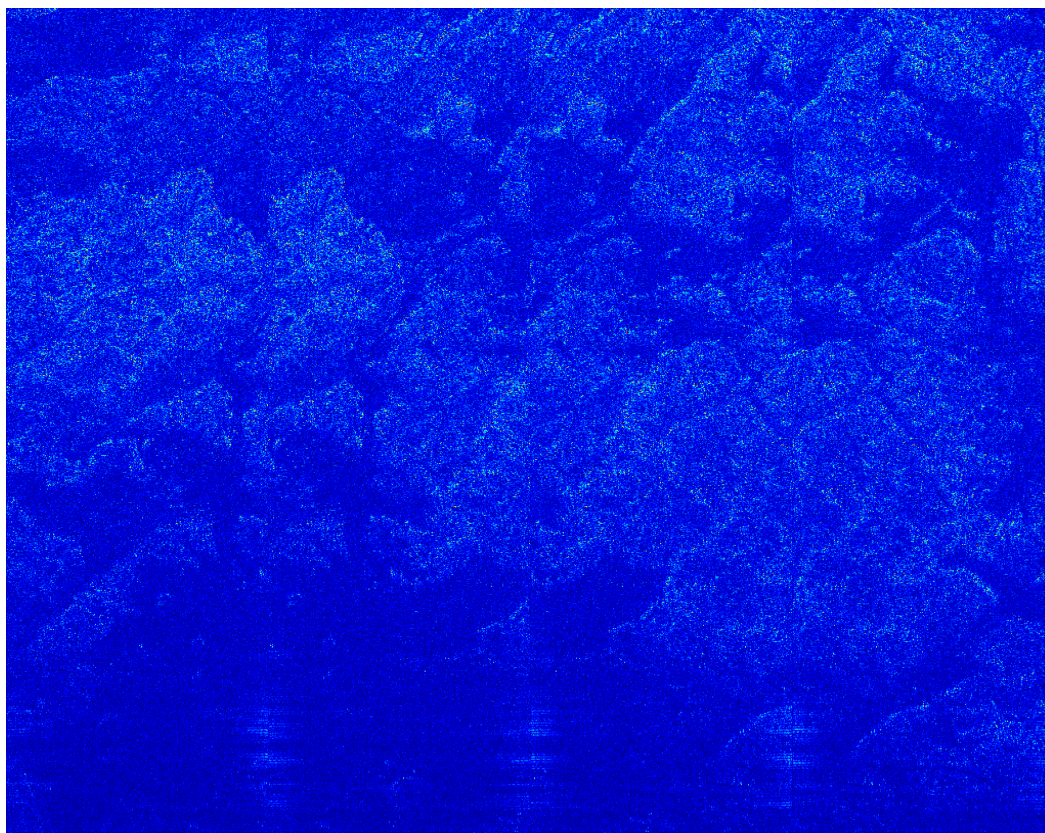
Figur 10: Bild över Kvarn, baserad på mätningar med frekvenser 432 - 462 MHz. Bildens storlek är ca 2 km x 2 km.

Bilden i figur 10 har framställts efter mätningar på frekvenserna 432 - 462 MHz. En avgörande skillnad mot tidigare är att man nu får väga ihop data från flera mottagarkanaler. Eftersom varje mottagarkanal är på 10 MHz har det sålunda krävts data från tre kanaler. Aperturlängden har varit 2000 m.



Figur 11: Bild över Kvarn, baserad på mätningar med frekvenser 432 - 510 MHz. Bildens storlek är ca 2 km x 2 km.

Bilden i figur 11 har framställts efter mätningar på frekvenserna 432 - 510 MHz. Skillnaden mot bilden i figur 10 är att bandbredden, 80 MHz, kräver data från åtta mottagarkanaler. Det påverkar naturligtvis också radiomiljön. Aperturlängden har varit 2000 m.



Figur 12: Bild över Kvarn, baserad på mätningar med frekvenser 223 - 433 MHz. Bildens storlek är ca 2 km x 2 km.

En bredbandig bild, figur 12, från mätningar på frekvenserna 223 - 433 MHz. Bandbredden, 210 MHz, gör att data från 21 kanaler har vägts ihop. Aperturlängden var 5000 m.

Generellt sett kan man vänta sig att bilder framställda med större bandbredd skall uppvisa högre kvalitet än bilder med mindre bandbredd. Att så inte är fallet för bilderna 10, 11 och 12 beror för det första på att data för bild 12 är skilt från data för bilderna 10 och 11. Det innebär, förutom olika radiomiljöer och i viss mån olika återspridningar från marken, att olika antenner har utnyttjats. Vidare innebär användandet av fler kanaler att större krav ställs på kännedom om radarsystemets karaktäristik.

7 Slutsatser

Bilderna i denna rapport visar på funktionaliteten hos LORA-hårdvaran. En mängd komponenter har provats i olika kombinationer, det vill säga mätningarna har skett via olika antenner, sändelement, mottagarelement, i- och urkopplade filter, en eller flera kanaler etc.

Huvudsyftet har varit att påvisa kompatibilitet under så många olika förhållanden som möjligt, och det har uppnåtts. En viss försiktighet vid utprovandet av antennomkopplaren för sändelementen (TAS) har iakttagits på så sätt att man sänt med förhållandvis låg effekt. Detta gör att signal till brus-förhållandet kan förbättras genom att uteffekten ökas. Vidare har vissa oönskade transientfenomen noterats i kopplingen mellan mottagaromkopplaren och mottagaren själv. Detta innebär att ickeoptimala kalibreringsfiler har använts. Mindre vikt har lagts vid bildernas kvalitet i termer av upplösning eller signal till brus-förhållande, och dessa storheter har ej heller redovisats. De kommer att utvärderas vid processeringen av LORA-mätningarna under hösten 2004, inför vilka de i denna rapport redovisade mätningarna kan sägas vara en generalrepetition.

Referenser

- [1] Larsson, B., *Radarsystemteknik för bredbandsradar – slutrapport 2003*, FOI användarrapport FOI-R-1088-SE, 2003
- [2] Ulander, L., *Radarsignalbehandling för SAR och GMTI – slutrapport 2003*, FOI användarrapport FOI-R-1033-SE, 2003
- [3] Ulander, L., Blom M., Flood B., Follo P., Fröind P.-O., Gustacsson A., Jonsson T., Larsson B., Murdin D., Pettersson M., Rääf U., Stenström G., *The VHF/UHF-band LORA SAR and GMTI system*, in Proc. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery X, i Orlando, FL, 21-23 april 2003, SPIE vol. 5095, pp. 206-215, 2003.
- [4] Ulander, L., Dreuillet, P., *LORAM 2004 Experiment Plan* FOI teknisk rapport FOI-R-1260-SE, 2004
- [5] Svensson, L., Elmqvist, M., Chevalier, T., *SEMARK Fältförsök 2004. Genomförda försök vecka 37-38*. FOI Memo 1009, 2004
- [6] Larsson B., Stenström G., Jonsson T. *Konstruktionsrapport LORA*, FOI teknisk rapport FOI-R-0565-SE, 2002
- [7] Hellsten H., Herberthson M., Seger O., *Real time SAR processing of low frequency ultra wide band radar data*. Publ. in: EUSAR 2. European conf. on synthetic aperture radar. Berlin, VDE-Verlag, p. 489-492. Friedrichshafen, May 25-27, 1998
- [8] Seger O., Herberthson M., *Implementation of the local backprojection algorithm on a multicomputer*. FOI vetenskaplig rapport FOA-R-99-01255-408-SE, 1999
- [9] Ulander L., Hellsten H., Stenström G. *Synthetic-Aperture Radar Processing Using Fast Factorised Back-Projection* IEEE Trans. Aerospace and Electronics Systems, vol. 39, no. 32, pp. 760-776, 2003
- [10] Pettersson M., *Detection of Moving Targets in Wideband SAR* IEEE Trans. Aerospace and Electronics Systems, vol. 40, no. 3, pp. 780-796, 2004