

LARS M.H. ULANDER, JOHAN RASMUSSEN



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

Lars M.H. Ulander, Johan Rasmusson

Bistatisk SAR för urban miljö 2006-2008

Titel	Bistatisk SAR för urban miljö 2006-2008
Title	Bistatic SAR for urban environments 2006-2008
Rapportnr/Report no	FOI-R--2640--SE
Rapporttyp Report Type	Användarrapport User report
Sidor/Pages	26 p
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2008
ISSN	ISSN 1650-1942
Kund/Customer	FM
Forskningsområde Programme area	4. Sensorer och signaturanpassning 4. Sensors and Low Observables
Delområde Subcategory	42 Sensorer 42 Above Surface Surveillance, Target acquisition and Reconnaissance
Projektnr/Project no	E3067
Godkänd av/Approved by	Martin Rantzer
FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut	FOI, Swedish Defence Research Agency
Avdelningen för Informationssystem	Information Systems
Box 1165	P.O. Box 1165
581 11 Linköping	SE-581 11 Linköping

Sammanfattning

Forskningsprojektet "Bistatisk SAR för urban miljö" har bedrivits på FOI under perioden 2006-2008. Rapporten sammanfattar de viktigaste aktiviteterna och resultaten som framkommit. Bakgrunden till projektet är att Försvarsmakten alltjämt har en relativt begränsad förmåga att upptäcka, identifiera och lägesbestämma markmål. I framtiden förutses ett ökande behov av denna förmåga, speciellt med tanke på internationella insatser.

Projektets målsättning är att utveckla och värdera flygburen radar för att upptäcka och lägesbestämma dolda mål över stora områden i svåra miljöer, såsom urban miljö och skogsklädd terräng. SAR-teknik ("synthetic aperture radar") erbjuder denna förmåga mot öppna fordonsmål oberoende av väderlek och tid på dygnet. Tidigare forskningsprojekt på FOI har utvecklat nya radarsystem på VHF- och UHF-banden, CARABAS-II och LORA, som även klarar dolda mål men förutsätter flera överflygningar så att målen kan upptäckas med förändringsdetektion. I nuvarande projekt är målsättningen att utveckla denna förmåga fast utan förändringsdetektion. Projektet har studerat två fall:

- **Fjärrkartering av byggnaders interna struktur**, dvs golv, väggar, tak etc. Huvudproblemet är att åstadkomma tillräcklig penetration av byggnaden och sedan utnyttja mottagen signal för att rekonstruera den tredimensionella interiören. Studier av vågutbredning genom olika byggnadsmaterial visar att de svåraste materialen är metall och armerad betong. Resultaten visar dock på möjlig genomträngning av den senare genom att välja lämplig radarfrekvens inom bandet 300 MHz – 3 GHz. Problemet att avbilda den tredimensionella interiören återstår dock. SAR-teknik ger en god avbildning i två dimensioner men ger inte den önskvärda höjdinformationen. Tredimensionell (3D) SAR har därför studerats i projektet och resultaten är lovande men tekniken behöver utvecklas vidare.
- **Detektion av dolda mål i tät skog**. Tidigare forskning har visat att frekvensbandet 20-500 MHz är lämpligt för att både ge tillräcklig penetration genom vegetation och geometrisk upplösning. Utan förändringsdetektion är dock klottersignalen från skogen starkt begränsande för detektionsprestanda.

Bistatisk SAR, dvs med geometriskt separerade sändare och mottagare, föreslås som en metod för att minska klotternivån. Projektet har därför utvecklat nödvändig teknik för systemsynkronisering baserad på GPS-signaler. De första experimenten med bistatisk SAR har genomförts på VHF-bandet och resultaten visar att klotternivån minskar väsentligt genom lämpligt val av geometri.

Nyckelord: Radar, SAR, bistatisk, 3D, VHF-band, UHF-band, CARABAS, LORA, se-igenom, urban, byggnad, skog, vegetation, kartläggning, simuleringar

Summary

The research project "Bistatic SAR for urban environments" has been conducted at FOI during the period 2006-2008. This report summarises the most important activities and results. The motivation of the project is that the Swedish Armed Forces have a limited capability to find, identify and position ground targets. The need for such a capability is expected to increase in the future, in particular in support of international operations.

The objective of the project is to develop and evaluate airborne radar with a capability to detect and position concealed targets over wide areas and in difficult environments, such as urban environments and forested areas. SAR ("synthetic aperture radar") enables this capability for vehicle targets in the open independently of weather conditions and daylight. Past research at FOI has developed novel radar systems operating in the VHF and UHF bands, CARABAS-II and LORA, which also have this capability for concealed targets but require several overpasses since the detections are obtained using change detection. The present project has the aim to develop similar capabilities but without change detection and has focused on two cases:

- **Remote mapping of the interior of buildings**, i.e. floors, walls, ceilings etc. The main problem is to obtain sufficient penetration and then generate the three-dimensional structure from the received signal. Studies of wave propagation through different building materials shows that the most difficult materials are metal and reinforced concrete. Results show, however, that it is feasible to penetrate the latter by choosing a suitable radar frequency in the band 300 MHz – 3 GHz. Conventional SAR provides imaging in two dimensions and the extension of the technique to three dimensions (3D SAR) has therefore been studied and shown to be promising but needs further improvement. The challenge of imaging in three dimensions remains.
- **Detection of concealed targets in dense forest**. Past research has shown that the frequency band 20-500 MHz is suitable for this applications and provides both adequate foliage penetration and spatial resolution. However, the forest clutter severely limits detection performance if change detection is not used.

Bistatic SAR, i.e. with geometrically separated transmitter and receiver, is proposed to reduce clutter levels. The project has therefore developed the required techniques for system synchronisation based on GPS signals. The first experiments with bistatic SAR have been conducted at VHF-band and the results show a significant clutter reduction by choosing suitable geometries.

Keywords: Radar, SAR, bistatic, 3D, VHF-band, UHF-band, CARABAS, LORA, see-through, urban, building, forest, foliage, vegetation, mapping, simulations

Innehållsförteckning

1	Inledning	6
1.1	Bakgrund.....	6
1.2	Flygburen SAR.....	6
1.3	Forskningsprojektet.....	6
2	Verksamhet och resultat 2006	8
2.1	Definition av inledande bistatiskt flygprov (Q1-06)	8
2.2	Små flygburna VHF-antennar (Q2-06).....	9
2.3	Elektromagnetiska beräkningar av radarsignaturen från metalliskt hus (Q3-06).....	9
2.4	Inledande bistatiskt flygprov (Q4-06)	10
3	Verksamhet och resultat 2007	12
3.1	Definition av bistatiska experiment (Q1-07).....	12
3.2	Koncept för avbildning av byggnaders interiörer med bistatisk radar (Q2-07).....	13
3.3	Synkronisering av bistatisk sändar-mottagare med GPS-stabiliserade oscillatorer (Q4-07).....	14
3.4	Resultat från bistatiska experiment på VHF-bandet 2007 (Q4-07).15	
4	Verksamhet och resultat 2008	18
4.1	Konferensbidrag EUSAR 2008 (Q1-08).....	18
4.2	Mono- och bistatiska SAR-simuleringar av ett tvåplanshus (Q2-08)	18
4.3	Värdering av SAR-avbildningar av byggnaders interiörer (Q3-08) .19	
5	Slutsatser	20
6	Referenser	21
7	Lista på publikationer	23
7.1	FOI rapporter.....	23
7.2	FOI memo	23
7.3	Tidskriftsartiklar (peer-review).....	23
7.4	Konferensbidrag.....	24

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Forskningsprojektet "Bistatisk SAR för urban miljö" har bedrivits på FOI under perioden 2006-2008. Johan Rasmusson var projektledare under 2006 och biträdande projektledare under 2007-2008. Lars Ulander var projektledare under 2007-2008. Projektet har finansierats av Forsvarsmakten (FM) inom samlingsbeställningen.

Bakgrunden till projektet är att FM har en relativt begränsad förmåga på markarenan att upptäcka, identifiera och lägesbestämma markmål. I framtiden förutses ett ökande behov av denna förmåga, speciellt med tanke på Sveriges växande engagemang i internationella insatser.

1.2 Flygburen SAR

FOI har under lång tid haft en internationellt framskjuten position inom forskningen avseende flygburen SAR ("synthetic aperture radar") på VHF- och UHF-banden.

Med SAR-teknik kan man skapa radarbilder av mål och bakgrund med hög upplösning. Bärarplattformar kan vara satellit, flygplan eller helikopter. Den geometriska upplösningen är fundamentalt begränsad av våglängden λ (ljushastighet dividerat med frekvens). Bästa möjliga upplösning är ca $\lambda/6$ men förutsätter att ett område avbildas över 360° . Ifall ett mindre vinkelintervall används, så försämras upplösningen proportionerligt.

Konventionella SAR-bilder är två-dimensionella avbildningar som skapas genom att bärarplattformen förflyttar sig utefter en rak flygbana för att svepa upp önskat vinkelintervall (max 180°). Tekniken fungerar i allmänhet mycket bra för att kartera mål och bakgrund oberoende av väderlek och dagsljus, men i områden med kraftig topografi kan radarskuggor och projektionseffekter bli begränsande. Vid måttlig topografi är dock dessa problem små och topografiska höjddata används för att ge en kartriktig presentation av resultaten.

1.3 Forskningsprojektet

I forskningsprojektet har vi arbetat med utveckling och värdering av SAR-tekniken med målsättningen att förbättra dess förmåga att upptäcka och lägesbestämma dolda objekt. Projektet har speciellt studerat flygburen bistatisk SAR, som är en teknik som från tidigare gjorda simuleringar visat sig vara lovande för att lösa ovanstående problem [1]. Vi har studerat två typfall där tidigare utvecklad SAR-teknik inte fungerar tillfredsställande.

I första typfallet är uppgiften att avbilda byggnader invändigt, dvs med byggnadens infrastruktur bestående av golv, väggar, tak, möbler etc. Detta är ett svårt avbildningsproblem att lösa med radar men av stort intresse för militära tillämpningar liksom för polis och räddningstjänst. En stor svårighet är att inverkan av byggnaden på vågutbredningen måste kompenseras vid databearbetningen. Ett annat problem är att byggnader är tredimensionella strukturer vilket kräver betydligt mer omfattande datainsamling än tvådimensionell avbildning. Forskningen på området har intensifierats under det senaste decenniet men står än så länge på en förhållandevis rudimentär nivå [2][3]. Ett närliggande problem, som dock projektet inte studerat, är upptäckt av människor inne i byggnader vilket är föremål för undersökningar i andra forskningsprojekt på FOI [4][5][6].

I andra typfallet är uppgiften att upptäcka och lägesbestämma mål dolda i skogsvegetation. Detta problem har studerats sedan 90-talet på FOI och resulterat i

framtagningen av två banbrytande radarsystem: CARABAS-II och LORA. CARABAS-II använder radarfrekvenser inom bandet 20-90 MHz [7] vilket medger upptäckt av fordon även i tät skog. Bäst detektionsprestanda fås genom utnyttjande av s.k. förändringsdetektion men förutsätter att fordonet förflyttar sig mellan olika SAR-registreringar [8][9]. Utan förändringsdetektion ökar antalet falsklarm per ytenhet med ca 100-1000 gånger pga starka radarekon från den omgivande skogen. LORA utvecklades ursprungligen med ca 10 ggr högre radarfrekvenser jämfört med CARABAS-II, dvs 200-800 MHz, för att ge bättre geometrisk upplösning [10]. Priset för de högre frekvenserna är dock ökad dämpning av radarvågen genom vegetation. LORA innehåller också en gruppantenn vilket ger förbättrade möjligheter att detektera rörliga mål. Jämförelser mellan CARABAS-II och LORA har visat att CARABAS-II ger bäst detektionsprestanda för större objekt (t.ex. terrängfordon) förutom vid flacka infall [11]. LORA, däremot, har bäst förmåga att upptäcka mindre objekt (t.ex. personer).

I följande avsnitt sammanfattas projektet i termer av sina milstolpar som levererats till FM under perioden 2006-2008. Därefter presenteras de viktigaste slutsatserna. Sist återfinns också en lista på publikationer som projektet producerat.

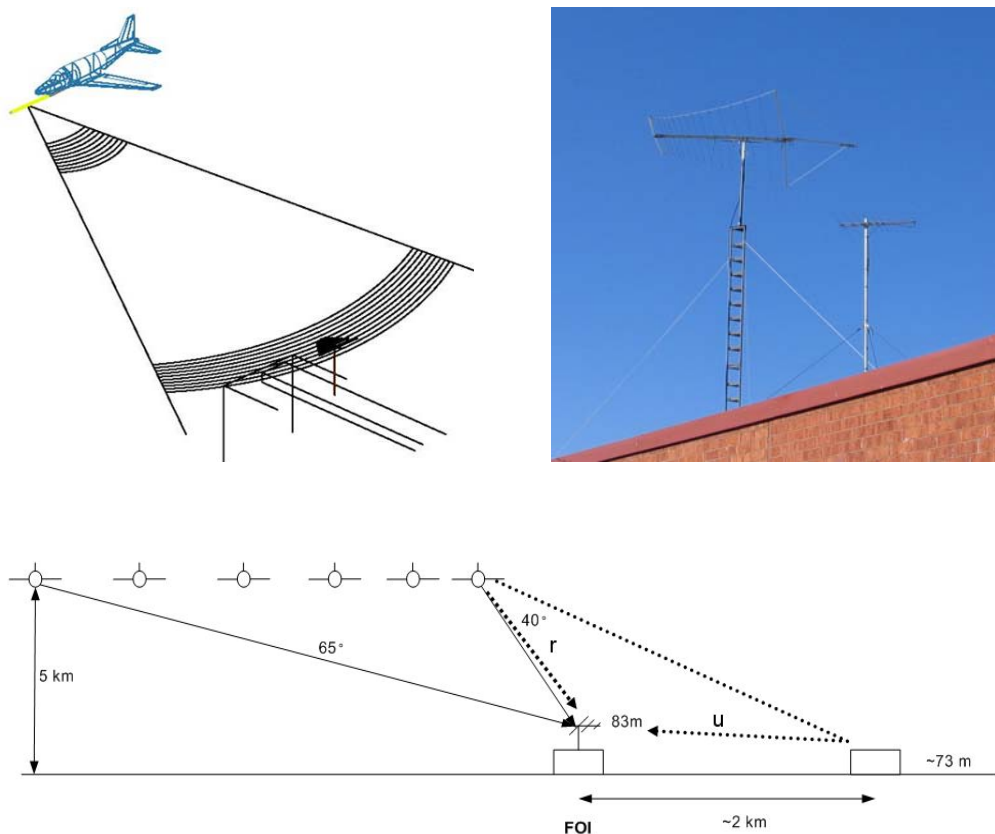
2 Verksamhet och resultat 2006

2.1 Definition av inledande bistatiskt flygprov (Q1-06)

Under våren 2006 definierades ett förslag för att utföra ett första bistatiskt SAR-experiment på VHF-bandet med rörlig sändare i flygplan och stillastående mottagare placerad nära marken [12].

Följande slutsatser och erfarenheter drogs från studien:

- Frekvensbandet väljs till 28-73 MHz. CARABAS-II används som sändare i FMV:s provflygplan TP86 Sabreliner och LORA i VHF-mod som mottagare med antenn placerad på FOI:s tak i Linköping, se Figur 1.
- Hårdvara och mjukvara behöver kompletteras, bl.a. synkronisering av sändare och mottagare via GPS-signaler.
- Jämförelser bör göras mellan experimentellt insamlade monostatiska och bistatiska SAR-bilder. Förfinade simuleringsverktyg bör utvecklas på sikt.



Figur 1. Mätgeometrier vid inledande bistatiska experiment med flygburen sändare och markbunden mottagare, där r representerar den utsända radarsignalen som registreras direkt av mottagarantennen och u den återspridda signalen från det belysta området. Fotot visar den log-periodiska mottagarantennen på FOI:s tak i Linköping.

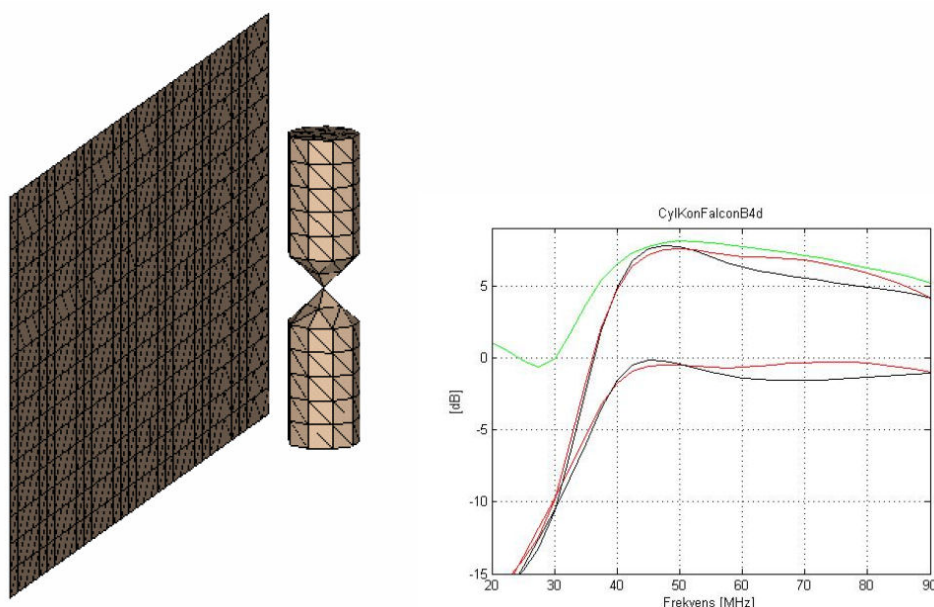
2.2 Små flygburna VHF-antenn (Q2-06)

Elektromagnetiska (EM) beräkningar på VHF-bandet (20-90 MHz) av flygburna antenner genomfördes för att studera möjligheten att krympa antennstorleken [13]. Två flygplanstyper valdes som exempel, Dassault Falcon 20 och Mitsubishi MU-2.

Antennerna gjordes relativt små, ca 1/5 av maximal våglängd, för att kunna placeras på mindre flygande plattformar såsom UAV:er. Inverkan av olika placering på de två flygplansmodellerna studerades för olika typer av dipolantenn, bl.a. tunna, tjocka och bikoniska dipolantenn.

Slutsatser som drogs från studien var:

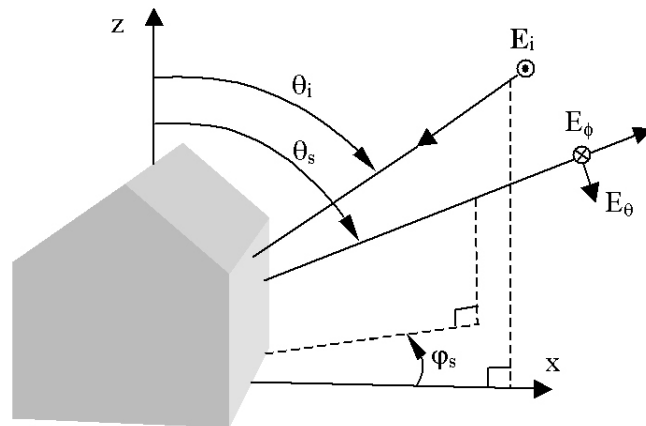
- Med rimliga antaganden om storlek, anpassning och verkningsgrad kan användbara antenner tas fram ned till ca 35 MHz.
- Antennen bör placeras symmetriskt framför och bakom vingen.
- Antennen bör placeras så långt bort från vingens undersida som möjligt, och minst 1 m ifrån för en lägsta frekvens vid 35 MHz, vilket illustreras i Figur 2.



Figur 2. Simulering av cylindrisk dipolantenn (längd = 2.3 m; radie = 0.265 m) symmetriskt placerad under ett metallplan (motsvarande en förenklad flygplansvinge hos Falcon 20) med separationen 1 m mellan cylinderytan och metallplanet. Den gröna kurvan visar antennvinst i riktningen vinkelrätt mot metallplanet mellan 20-90 MHz. De övre röda och svarta kurvorna visar realiserad antennvinst med (röd) respektive utan (svart) anpassningsnät. De undre röda och svarta kurvorna visar antennens motsvarande transmissionsfunktion.

2.3 Elektromagnetiska beräkningar av radarsignaturen från metalliskt hus (Q3-06)

År 2006 gjordes EM-beräkningar på VHF-bandet (20 - 90 MHz) för ett enkelt metalliskt hus utan inre strukturer. En jämförelse mellan två olika beräkningsmetoder genomfördes, fysikalisk optik (utnyttjande det kommersiella programmet SPECRAY) samt FDTD ("Finite Difference Time Domain") för vilken programkod utvecklats vid FOI [14].



Figur 3. Definition av geometri, infallsvinklar och spridningsvinklar vid EM-beräkningar för en metallisk husmodell med längden 15 m, bredden 9 m och höjden 7.5 m.

Två olika spridningsfall (med olika värden på θ_s) studerades med horisontell polarisation vid sändning och mottagning och med en fix riktning på den infallande EM-strålningen, se Figur 3. Ett helt metalliskt hus placerades på en homogen dielektrisk halvrymd som representerar marken.

Baserat på dessa resultat drogs slutsatsen att både SPECRAY och FDTD kan användas för EM-beräkningar av byggnader för bandet 20-90 MHz. SPECRAY bör dock väljas vid högre frekvenser och större geometrier där minnesåtgång och beräkningstider tenderar att bli alltför stora med FDTD-metoden.

2.4 Inledande bistatiskt flygprov (Q4-06)

Resultaten från de inledande bistatiska experimenten våren 2006 rapporterades hösten 2006 [15]. Experimenten utfördes på VHF-bandet med en flygburen rörlig sändare (CARABAS-II) installerad i FMV:s provflygplan, TP86 Sabreliner, samt en markbaserad mottagare (LORA i VHF-mod) med antennen på FOI:s tak.

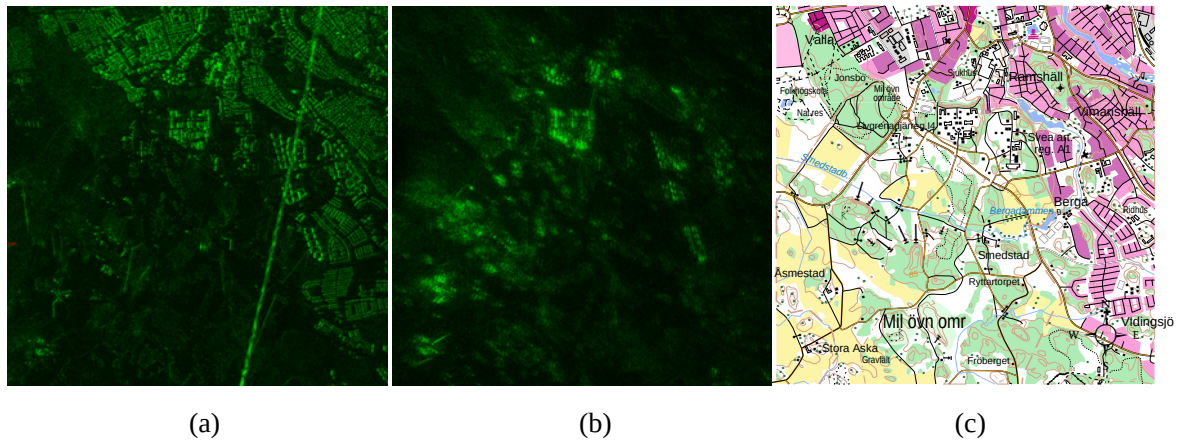
Följande slutsatser drogs från analys av data från det inledande bistatiska experimentet:

- Resultaten visade att den använda synkroniseringsmetoden för sändare och mottagare, utnyttjande varsin GPS-mottagare för stabilisering av respektive 10 MHz-klocka, fungerade.
- Bistatiska SAR-bilder kunde framställas med en modifierad projektionsmetod i signalbehandlingen.

Resultaten gav följande viktiga lärdomar inför kommande bistatiska försök:

- Val av geometri. Kvalitén av de bistatiska SAR-bilderna begränsades bl.a. av att mottagaren var nära marken vilket resulterade i nära horisontell återspridning och tydliga effekter av skuggning och utsläckning (reflektionsinterferens). Vid förnyade försök bör brantare geometrier väljas.
- Betydelsefulla kunskaper erhöles om systemprestanda och signalnivåer.
- Insikter om behovet av ytterligare anpassning av experimentell utrustning, såväl hårdvara som mjukvara för att erhålla bistatiska data av högre kvalitet.

I Figur 4 visas exempel på bearbetade data från experimentet.



Figur 4. (a) Monostatisk SAR-bild framställd från radardata som registrerades av CARABAS-II ombord i flygplanet, (b) bistatisk SAR-bild framställd från data som samtidigt togs emot av den markbaserade LORA-utrustningen, och (c) kartbild över det avbildade området i sydvästra Linköping. Karta: © Lantmäteriverket Gävle 2001. Medgivande L2002/308.

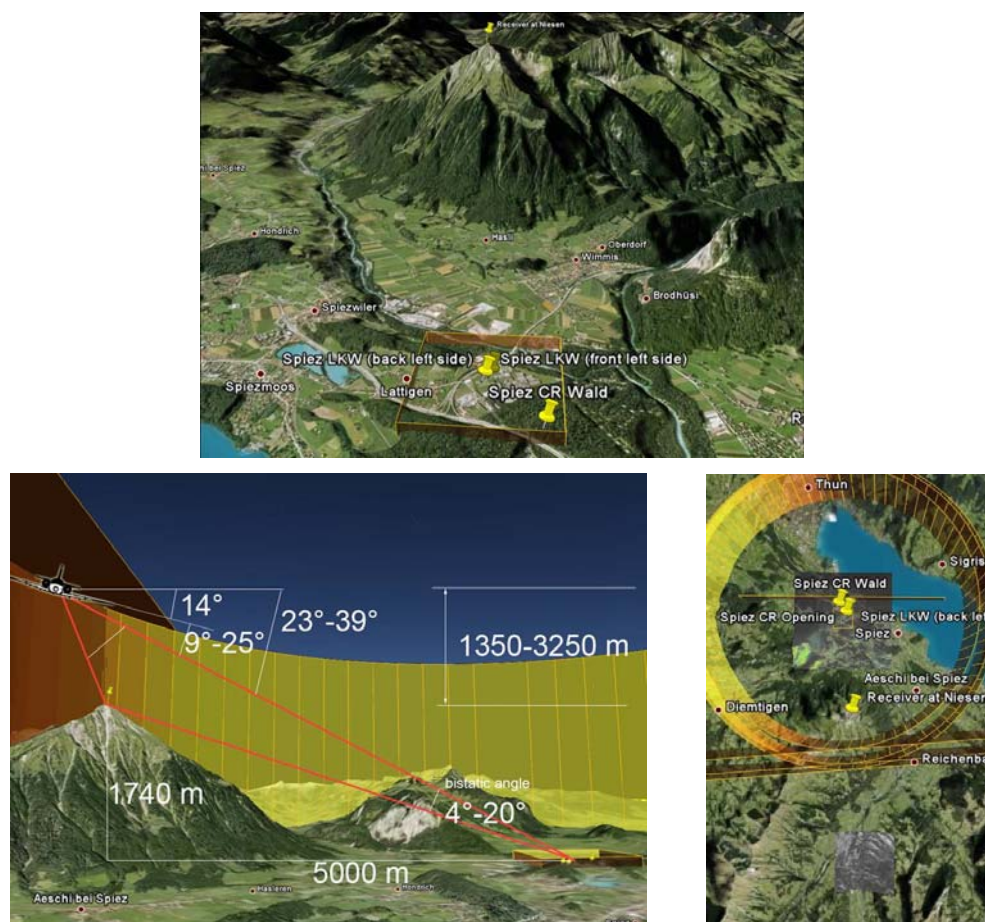
3 Verksamhet och resultat 2007

3.1 Definition av bistatiska experiment (Q1-07)

Efter de inledande experimenten definierades den första bistatiska mätkampanjen på VHF-bandet [16]. Även UHF-mätningar planeras i samarbete med DGA och ONERA i Frankrike under bilateralt projektavtal 2007-2010. Flera förbättringar planerades i förhållande till de inledande experimenten 2006:

- Undersök möjligheten att förbättra signalkvaliteten i den mottagna direktsignalen genom att introducera en extra antenn riktad mot sändaren.
- Referensobjekt (fordon, radarreflektor) utplaceras för prestandaberäkningar.
- Placera den markfasta antennen på ett högt berg så att infallsvinkeln inte överstiger 70° , d.v.s. minst 20° från horisonten.
- Val av målområde med både urban miljö och skogsterräng.

Svårigheten att hitta ett lämpligt område i Sverige som uppfyllde de två sista kraven löstes när armasuisse i Schweiz visade sig intresserade att delfinansiera mätkampanjen. Schweiz har tidigare intresserat sig för VHF/UHF-band SAR och FOI genomförde 2003 ett monostatiskt mätuppdrag med CARABAS-II åt armasuisse. I Figur 5 återges några detaljer kring avbildningsgeometrier ur planeringsunderlaget för det bistatiska SAR-experimentet på VHF-bandet som genomfördes under hösten 2007.

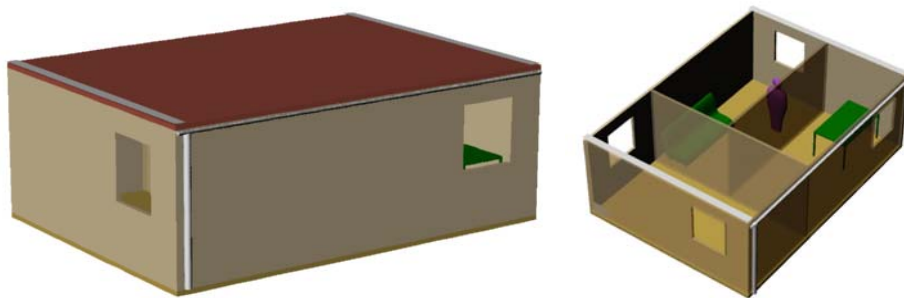


Figur 5. Målområdet i Berner Oberland, Schweiz. Mottagaren (LORA) placerades på berget Niesen 1740 m över målområdet strax väster om Spiez. Den flygburna sändaren (CARABAS-II) flögs utefter tre olika rakbanor och tre olika cirkelbanor för att undersöka klotternivåns beroende av den bistatiska geometrin. Illustration: Arnold Barmettler, University of Zurich.

3.2 Koncept för avbildning av byggnaders interiörer med bistatisk radar (Q2-07)

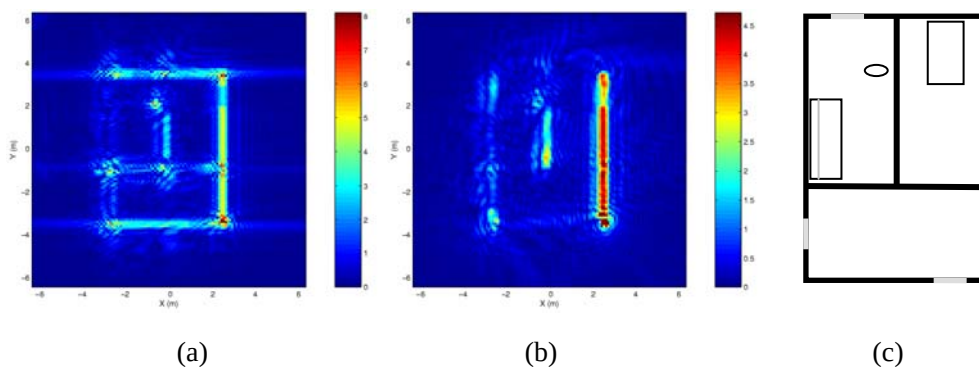
2007 gjordes nya EM-beräkningar med FDTD på övre delen av VHF-bandet och nedre delen av UHF-bandet (200 - 700 MHz) för ett icke-metalliskt enplanshus med inre och yttre struktur bestående av flera material med olika permittivitet. Mono- och bistatiska SAR-bilder simulerades därefter för att värdera möjligheten att rekonstruera byggnadsstrukturerna utgående från dessa två avbildningsprinciper [17].

Vid EM-beräkningarna studerades två olika modeller med tre rum, med respektive utan detaljer som möbler, person, elledningar och stuprör. Modellen av enplanshuset visas i Figur 6.



Figur 6. CAD-modell av ett enplanshus med metalliska stuprör och takrännor. Invändiga detaljerna som möbler och en person syns också. Modellen användes för EM-beräkningar med FDTD inom bandet 200-700 MHz. Storleken på huset är 5 m x 7 m x 2.5 m.

En simulerad monostatisk respektive bistatisk SAR-bild visas i Figur 7.



Figur 7. (a) Monostatisk, (b) bistatisk SAR-bild baserad på EM-beräkningar av enplanshusmodell med FDTD. Till höger (c) visas layout av huset med fönster, möbler samt en person.

Några viktiga slutsatser som drogs från dessa simuleringar:

- Penetrationen genom väggarna är tillräcklig på dessa radarfrekvenser för att avbilda även inre strukturer i byggnaden. Upplösningen i bilderna är någon dm.
- De olika monostatiska och bistatiska SAR-bilderna ger kompletterande information och synliggör skilda detaljer, t.ex. innerväggar, bakväggar, hörn och fönster.

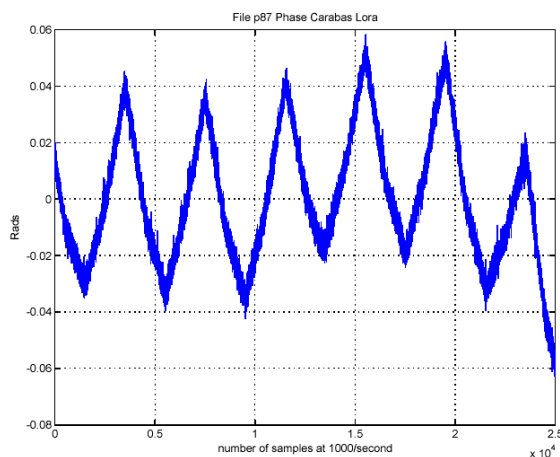
3.3 Synkronisering av bistatisk sändar-mottagare med GPS-stabiliserade oscillatorer (Q4-07)

Den största tekniska utmaningen med att utveckla ett bistatiskt SAR-system är att synkronisera de två ingående radarsystemen. Ordet synkronisering ska här tolkas i vid mening, d.v.s. de ingående radarsystemen måste ha en gemensam uppfattning om både rummet och tiden. I praktiken innebär det att sändare och mottagare måste belysa och observera samma volym i rummet vid samma tidpunkt. Det betyder vidare att sändare och mottagare måste vara inställda på samma frekvensband.

I våra bistatiska experiment har vi förenklat synkroniseringen till att endast gälla tid och frekvens eftersom antennerna är bredlobiga, och både polarisation och målområde är fastställda på förhand. Tekniskt sett skiljer man på synkronisering respektive syntonisering för att särskilja olika fall, d.v.s. synkronisering avser start eller stop vid en viss tidpunkt medan syntonisering avser att arbeta i samma takt. Det senare begreppet är alltså avgörande för koherensen mellan radarsystem vilket är en förutsättning för koherent signalbehandling och därmed optimala systemprestanda.

I projektet har vi valt att utveckla ett system för syntonisering som utnyttjar GPS-signaler [18]. Metoden ger i och för sig ingen absolut tid men detta kan åstadkommas genom att räkna ut tid och position från insamlad GPS-data. Detta kan ske i icke-realtid eftersom den exakta tiden endast behövs för den efterföljande signalbehandlingen. Under mätningarna synkroniseras systemen genom att de styrs med exakt samma styrsignaler som upprepas i takt med 1-PPS GPS-signalen.

Mätningar på elektroniken som styr systemklockan visar att fasfelen inte direkt kan avfärdas som försumbara. Störst inverkan torde felen få för de högsta frekvenserna dvs UHF-bandet. Ett exempel på resultat visas i Figur 8 där ett periodiskt fasfel observeras med 4.6° från topp-till-topp. Resultatet torde dock vara tillräckligt bra på VHF-bandet där de första bistatiska proven görs. Inför proven på UHF-bandet bör dock denna elektronik vidareutvecklas.



Figur 8. Mätningar av fasdrift mellan två GPS-stabiliserade oscillatorer. RMS-värdet är 1.3° och topp-till-topp 4.6° .

3.4 Resultat från bistatiska experiment på VHF-bandet 2007 (Q4-07)

Den första bistatiska mätkampanjen genomfördes i Schweiz under två veckor i september 2007 enligt uppsatt plan [16]. Metodiken och resultaten från den mätkampanjen beskrivs utförligt i rapporten [19].

CARABAS-II installerat i FMV:s TP86 Sabreliner genomförde två flygmissioner i området vid berget Niesen i Berner Oberland. De två missionerna planerades med identiska flygprogram för redundans och för att öka sannolikheten att insamlade data skulle ha önskvärd kvalitet. Varje mission bestod av nio flyglöpor från sex olika geometrier, varav tre rakbanor och tre cirkelbanor enligt Figur 5. Varje rakbana repeterades två gånger med något olika vågformer för den utsända radarsignalen. LORA-systemet användes som mottagare och placerades nära toppen av Niesen.

Fyra olika mottagarantennor placerades ut på toppen av Niesen för att undersöka olika egenskaper. Tre antenner riktades mot målområdet, huvudentennen med horisontell polarisation samt två likadana som orienterades ortogonalt mot varandra för att undersöka depolarisation. Den fjärde antennen riktades i motsatt riktning, dvs mot de raka flygbanorna, för att studera möjligheten att registrera direktsignalen med bättre signalstyrka (se Figur 9a). Två radarreflektorer placerades ut, en öppet och en dold i skog (se Figur 9b), samt ett fordon som placerades öppet på en gräsplan. I Figur 10 återges en vy från Niesen mot målområdet.



(a)



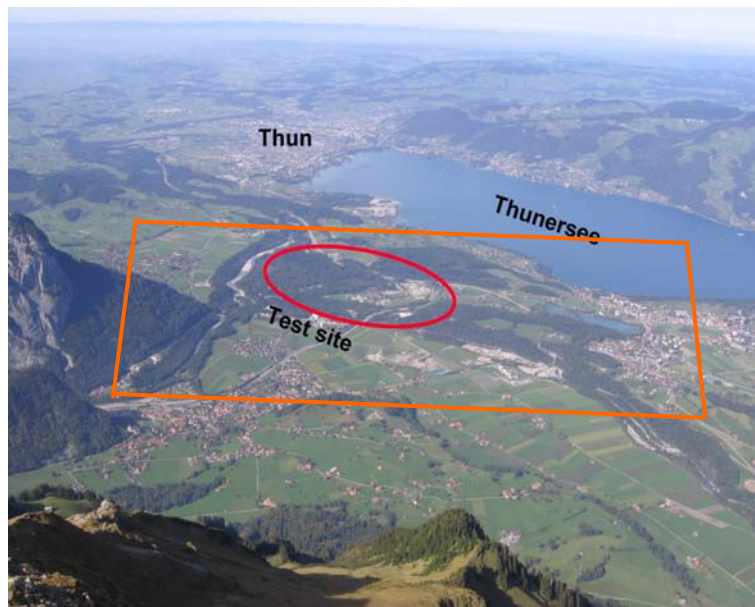
(b)

Figur 9. (a) Den log-periodiska antennen som riktades mot de raka flygbanorna. (b) En radarreflektor med 5 m sida som placerades dold av skog i den centrala delen av målområdet.

LORA använder normalt frekvensbandet 200-800 MHz, men användes här i en modifierad konfiguration för 20-90 MHz [10]. CARABAS-II och LORA har olika momentan bandbredd (2 MHz respektive 10 MHz). Båda utnyttjar stegad frekvens med kodade pulsformer för att täcka den önskade totala bandbredden vilket ger speciella krav i samband med synkroniseringen av systemen. För bistatiska mätningar användes en speciell vågform med frekvensinnehåll i intervallet 28-73 MHz. Vågformen är synkroniserad med GPS-tid genom att den startar på ett väldefinierat sätt för varje GPS-sekund med hjälp av 1PPS-signalen.

Flera tekniska problem uppstod under mätkampanjen. Under första missionen fungerade inte GPS-synkroniseringen som avsett och insamlat radardata blev till del ofullständigt. I den andra missionen fanns liknande problem men i betydligt mindre omfattning vilket innebar att data kunde registreras enligt plan. Analysen av radardata visade dock på ett annat allvarligt problem där starka TV-signaler överstyrde LORA-mottagarna inom 20 MHz av den totala bandbredden. Insamlade bistatiska radardata har därför reducerad känslighet för svaga markreflexer p.g.a. att delar av bandbredden är distorderad. Trots det har den planerade analysen kunnat genomföras och resultaten bekräftat hypotesen att signal-klotter-förhållandet ökar med lämpligt val av bistatisk geometri [1]. Mono- och bistatiska bildexempel finns i Figur 10 och Figur 11.

Mätningar i bilderna visar att signal-klotter-förhållandet ökar med upp till 8 dB för tre olika urbana områden och med upp till 10 dB i skogsterräng (se Figur 12). Resultaten är mycket lovande och visar på potentialen att förbättra detektionsprestanda med bistatisk geometri.

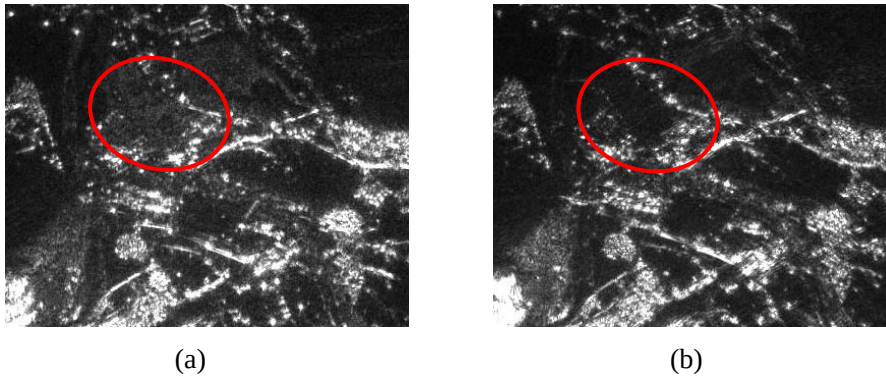


(a)

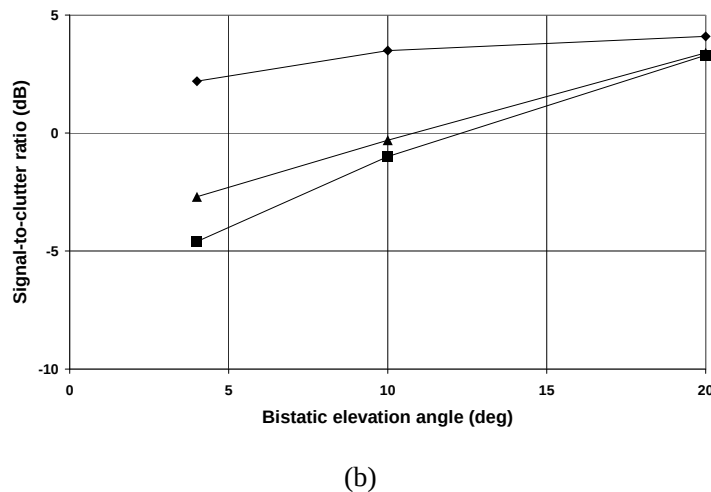
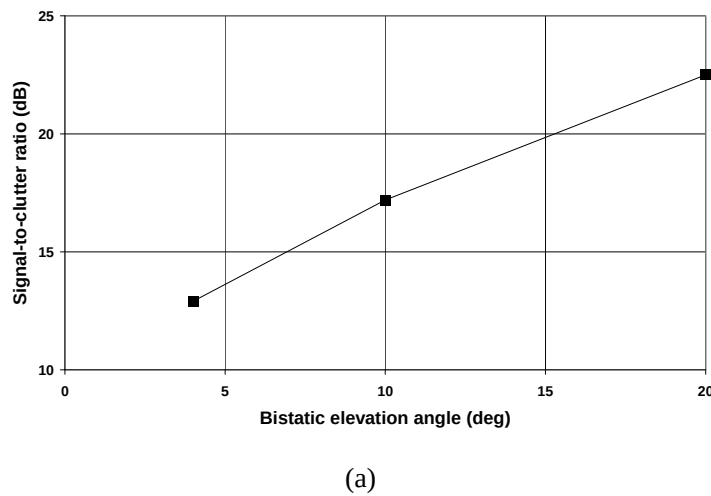


(b)

Figur 10. (a) Målområdet fotograferat från toppen av berget Niesen på en höjd av 2362 m.ö.h. där mottagarantennerna var placerade. Thunersjön ligger på en höjd av 558 m.ö.h. Det rektangulära området (orange linje) ger ungefärlig utsträckning av SAR-bilden. (b) Monostatisk CARABAS-II SAR-bild (frekvensband 28-73 MHz, infallsvinkel 61° vid siktpunkten). Det cirkulära området (röd linje) är den centrala delen av målområdet med SPIEZ LABORATORY tillhörande armasuisse och inom vilket de två radarreflektorerna samt ett fordon av typen lastbil placerades.



Figur 11. Bistatiska SAR-bilder med samma bildutsnitt och frekvensband som i Figur 10b. Den bistatiska elevationsvinkeln är (a) 4°, dvs kvasi-monostatisk geometri, respektive (b) 20°. Notera att klotternivån över både urbana och skogsklädda områden i (b) är lägre jämfört med i (a).



Figur 12. Mätningar av signal-klotter-förhållandet (SCR) i bistatiska SAR-bilder (28-73 MHz) som funktion av bistatisk elevationsvinkel (0° motsvarar monostatiskt fall). Signalen är i alla fallen uppmätt på samma fordon medan klottermätningen gjorts på olika typer av områden (skog och urban miljö). (a) SCR i skoglig terräng ökar med ca 10 dB från det kvasi-monostatiska fallet (4°) till bistatiska geometrin med 20° skillnad i elevationsvinkel. (b) SCR i urban miljö ökar på motsvarande sätt med mellan 2 och 8 dB beroende på byggnadernas olika karaktär (låga respektive höga) i de tre analyserade områdena.

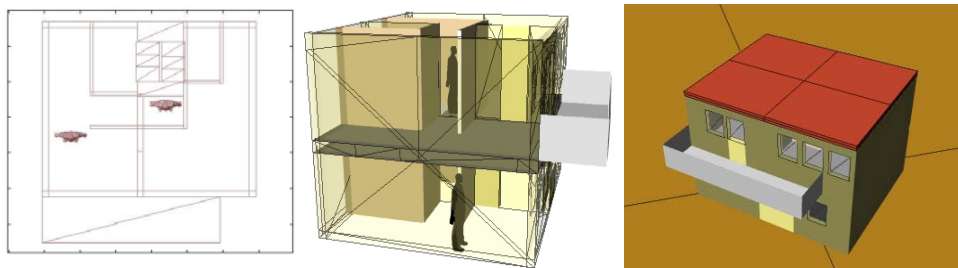
4 Verksamhet och resultat 2008

4.1 Konferensbidrag EUSAR 2008 (Q1-08)

Planering, genomförande och resultat från den första bistatiska mätkampanjen med CARABAS-II och LORA i VHF-mod presenterades på EUSAR 2008 ("7th European Synthetic Aperture Radar Conference") i Friedrichshafen, Tyskland, 2-5 juni 2008. Presentationen delades upp på två konferensbidrag, se [20][21]. I huvudsak är det en sammanfattande översikt av det material som beskrevs i avsnitt 3.4 samt i [19]. Bidragen arbetades fram gemensamt av deltagande parter i Sverige och Schweiz.

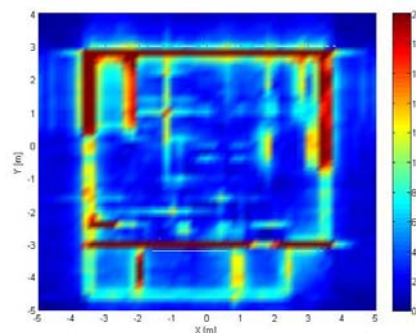
4.2 Mono- och bistatiska SAR-simuleringar av ett tvåplanshus (Q2-08)

2008 gjordes fördjupade EM-beräkningar (300 MHz – 3 GHz) och SAR-simuleringar för en modell av ett tvåplanshus [22]. Byggnadsmodellen hade tämligen realistisk inre och yttre struktur bestående av olika slags material med olika permittivitet. Byggnadsmodellen visas i några olika vyer i Figur 13.



Figur 13. CAD-modell för ett tvåvåningshus visat i några olika vyer. Modellen användes vid EM-beräkningar och SAR-simuleringar.

Både 2D och 3D SAR-simuleringar genomfördes för att undersöka mervärdet av att utnyttja en två-dimensionell syntetisk apertur för att skapa en 3D-avbildning. Exempel på bistatiska 2D och 3D SAR-bilder av byggnadsmodellen i Figur 13 visas i Figur 14 respektive Figur 15.



Figur 14. Bistatisk 2D SAR-bild baserad på EM-beräkningar och SAR-simulering för en modell av ett tvåvåningshus.

Några viktiga slutsatser som drogs från dessa simuleringar var:

- Resultaten tyder på att ett bredbandigt lågfrekvent radarsystem (0.3-3 GHz) kan användas för kartläggning av byggnaders yttre och inre strukturer, även där armerad betong ingår i väggarna (se även [23]).

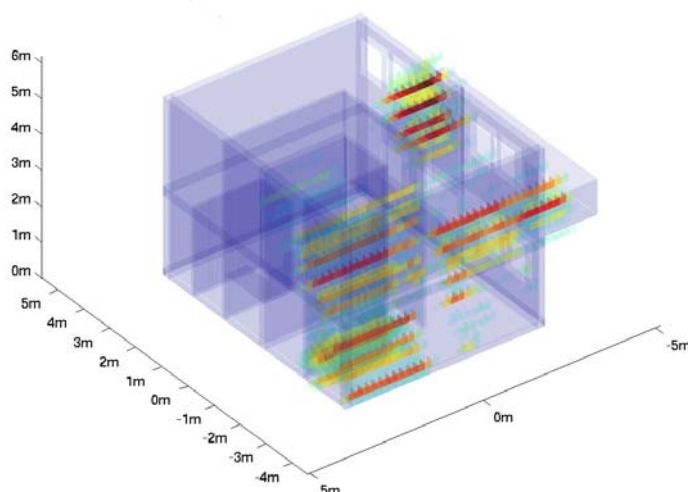
- Resultaten visar på principiella skillnader mellan monostatiska och bistatiska husavbildningar i 3D. I det monostatiska fallet avbildas t.ex. väggar som linjer medan i det bistatiska fallet avbildas väggar som sluttande ytor.
- Fortsatt arbete krävs för att rekonstruera den tredimensionella interiören från radardata.

4.3 Värdering av SAR-avbildningar av byggnaders interiörer (Q3-08)

Hösten 2008 presenterades i rapporten [24] en översikt och värdering av resultat och slutsatser från tidigare utförda EM-beräkningar på byggnader inom projektet. Beräkningar och simuleringar har utförts med successivt ökande komplexitet och realism.

Rapporten innehåller också en sammanfattning av några andra gruppers arbeten avseende fjärravbildning av byggnaders interiörer och strukturer utnyttjande radar.

I rapporten beskrivs även ett nytt sätt att visualisera 3D SAR-data från tidigare simuleringar med lovande resultat, se Figur 15.



Figur 15. Bistatisk 3D SAR-bild simulerad från EM-beräkningar för en modell av ett tvåvåningshus.

Några viktiga slutsatser som drogs från studien var:

- Arbetet gav viktiga erfarenheter för val av lämpliga parametrar och geometrier vid denna typ av avbildningar.
- För avbildning av byggnader bestående av armerade betongväggar bör frekvenser i intervalllet 0.3- 3 GHz användas.
- Studierna visar att fortsatt arbete krävs för att rekonstruera och presentera 3D SAR-data.
- Ytterligare EM-beräkningar och SAR-simuleringar bör göras för en realistisk stadsmiljö, med flera närliggande flervåningshus, samt jämförelser med motsvarande experimentella SAR-försök.

5 Slutsatser

Projektet har under perioden 2006-2008 utvecklat och värderat flygburen SAR-teknik för att upptäcka och lägesbestämma dolda mål i svåra miljöer, speciellt urban miljö och skogsklädd terräng.

Två typfall har varit utgångspunkten för forskningen:

- Fjärrkartering av byggnaders interna struktur, dvs golv, väggar, tak *etc.* Elektromagnetiska beräkningar kombinerat med mono- och bistatiska SAR-simuleringar har använts för att värdera koncept och förmågor. Beräkningar av den elektromagnetiska vågutbredningen genom olika byggnader visar att de svåraste materialen är metall och armerad betong. I det senare fallet kan man dock åstadkomma penetration genom att välja radarfrekvensen inom bandet 300 MHz – 3 GHz. Konventionell SAR-teknik ger en bra avbildning av interiören fast begränsad till två dimensioner. Avbildning av den tredimensionella interiören har också undersökts genom att utnyttja SAR-teknik med tvådimensionell syntetisk apertur. Resultaten är lovande och ger ny höjdinformation men tekniken behöver vidareutvecklas.
- Detektion av dolda mål i tät skog. Tidigare forskning har visat att frekvensbandet 20-500 MHz är lämpligt för att både ge penetration genom vegetationen och geometrisk upplösning. Utan förändringsdetektion är klottersignalen från skogen starkt begränsande för detektionsprestanda.

Projektet har vidare experimentellt undersökt potentialen hos bistatisk SAR, dvs med geometriskt separerade sändare och mottagare. Projektet har utvecklat teknik för synkronisering av sändare och mottagare i bistatiska radarsystem baserad på GPS-signaler. De första experimenten med bistatisk SAR genomfördes på VHF-bandet (28 – 73 MHz) och resultaten visar att klotternivån minskade med 2-8 dB i urbana områden och 10 dB i skogsområden. Resultaten är mycket lovande och motiverar fortsatt forskningsarbete inom bistatisk SAR. Ytterligare bistatiska experiment är planerade för de närmaste åren, bl.a. planeras bistatiska flygprov på UHF-bandet under 2009 och 2010.

Avslutningsvis önskar författarna tacka alla projektmedarbetare och personalen på FMV T&E (ansvarar för provflygplanet TP86 Sabreliner) för väl genomfört arbete.

6 Referenser

- [1] L.M.H. Ulander, T. Martin, Bistatic Ultra-wideband SAR for imaging of Ground targets under foliage, Proc. 2005 IEEE International Radar Conference, held in Arlington, VA, 9-12 May, 2005, pp. 419-423, 2005
- [2] E. Baranoski, Through-wall imaging: Historical perspective and future directions, Journal of the Franklin Institute, vol. 345, pp. 556-569, 2008
- [3] M. Farwell, J. Ross, R. Luttrell, D. Cohen, W. Chin, T. Dogaru, Sense through the wall system development and design considerations, Journal of the Franklin Institute, vol. 345, pp. 570-591, 2008
- [4] S. Nilsson, M. Gustafsson, M. Karlsson, J. Kjellgren, H. Larsson, A. Sume, A. Örbom, Radarsensorer för urban miljö. Slutrapport, FOI Teknisk rapport, FOI-R--2137--SE, 2006
- [5] S. Nilsson, R. Gunnarsson, M. Gustafsson, M. Karlsson, J. Kjellgren, T. Martin, J. Rahm, A. Sume, A. Örbom, Lokal stridsfältsovervakning i urban miljö. Slutrapport, FOI Teknisk rapport, FOI-R--2615--SE, 2008
- [6] A. Sume, S. Nilsson, Fenomenologisk beskrivning av väggpenetrerande radar, FOI Technical report, FOI-R--2635--SE, 2008
- [7] H. Hellsten, L.M.H. Ulander, A. Gustavsson, B. Larsson, Development of VHF CARABAS II SAR, Proc. Radar Sensor Technology, held in Orlando, FL, 8-9 April 1996, SPIE vol. 2747, pp. 48-60, 1996
- [8] L.M.H. Ulander, P.O. Frölind, A. Gustavsson, H. Hellsten, B. Larsson, Detection of concealed ground targets in CARABAS SAR images using change detection, Proc. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery VI, held in Orlando, FL, 5-9 April 1999, SPIE vol. 3721, pp. 243-252, 1999
- [9] L.M.H. Ulander, M. Lundberg, W. Pierson, A. Gustavsson, Change detection for low-frequency SAR ground surveillance, IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation, vol. 152, no. 6, pp. 413-420, 2005
- [10] L. Ulander, M. Blom, B. Flood, P. Follo, P.-O. Frölind, A. Gustavsson, T. Jonsson, B. Larsson, D. Murdin, M. Pettersson, U. Rääf, G. Stenström, The VHF/UHF-band LORA SAR and GMTI system, Proc. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery X, held in Orlando, FL, 21-23 April 2003, SPIE vol. 5095, pp. 206-215, 2003
- [11] L.M.H. Ulander, M. Blom, B. Flood, P. Follo, P.-O. Frölind, A. Gustavsson, G. Haapalahti, T. Jonsson, M. Lundberg, Daniel Murdin, G. Stenström, The LORAM airborne radar experiment: Final report, FOI Technical report, FOI-R--2077--SE, 2006
- [12] J. Rasmusson, M. Blom, T. Jonsson, G. Stenström, L. Ulander, Definition av bistatiska flygprov, FOI Teknisk rapport, FOI-R--1964--SE, 2006
- [13] L. Pettersson, Low frequency airborne antenna for bistatic SAR. Initial study of wing-mounted antennas, FOI Memo 1722, 2006
- [14] T. Martin, A. Pohl, J. Rasmusson, EM-simulering av bistatisk SAR för ett hus, FOI Teknisk rapport, FOI-R--2062--SE, 2006

- [15] G. Stenström, M. Blom, T. Jonsson, J. Rasmusson, Resultat från bistatiskt flygprov, FOI Teknisk rapport, FOI-R--2152--SE, 2006
- [16] L. Ulander, Definition av bistatiska experiment 2007, FOI Memo 2016, 2007
- [17] T. Martin, J. Rasmusson, L. Ulander, Concept for imaging of building interiors using bistatic radar, FOI Memo 2066, 2007
- [18] T. Jonsson, J. Rasmusson, A. Gustavsson, G. Stenström, L. Ulander, On bistatic transmitter-receiver synchronization using GPS disciplined 10 MHz oscillators, FOI Technical report, FOI-R--2375--SE, 2007
- [19] L.M.H. Ulander, B. Flood, P.-O. Frölind, A. Gustavsson, T. Jonsson, G. Stenström, Results from bistatic VHF-band SAR experiment 2007, FOI Technical report, FOI-R--2389--SE, 2007
- [20] L. M.H. Ulander, B. Flood, P.-O. Frölind, T. Jonsson, A. Gustavsson, J. Rasmusson, G. Stenström, A. Barmettler, E. Meier, Bistatic experiment with ultra-wideband VHF-band synthetic-aperture radar, Proc. EUSAR 2008, 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, held in Friedrichshafen, Germany, 2-5 June 2008, vol. 1, pp. 131-134, 2008
- [21] A. Barmettler, L. Zuberbühler, E. Meier, L. Ulander, A. Gustavsson, P. Wellig, swiss airborne monostatic and bistatic dual-pol SAR experiment at the VHF-band, Proc. EUSAR 2008, 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, held in Friedrichshafen, Germany, 2-5 June 2008, vol. 1, pp. 139-142, 2008
- [22] M. Gustafsson, L.M.H. Ulander, Monostatic and bistatic 3D SAR-imaging study - simulations using physical optics, FOI Scientific report, FOI-R--2560--SE, 2008
- [23] M. Gustafsson, Reflection and transmission of reinforced concrete between 0-4 GHz: calculations using FDTD, FOI Teknisk rapport, FOI-R--2567--SE, 2008
- [24] J. Rasmusson, D. Murdin, Värdering av SAR-avbildningar av byggnaders interiörer med UHF-radar, FOI Användarrapport, FOI-R--2584--SE, 2008

7 Lista på publikationer

I detta avsnitt listas alla publikationer som har producerats av projektet under perioden 2006-2008. En del tidskriftsartiklar och konferensbidrag inom perioden kan dock hänföras till tidigare projekt inom samma verksamhetsområde p.g.a. eftersläpningseffekten i samband med publiceringar. På motsvarande sätt kan bidrag som arbetats fram under 2008 saknas då de ännu ej hunnit komma i tryck i externa publikationer.

7.1 FOI rapporter

J. Rasmusson, M. Blom, T. Jonsson, G. Stenström, L. Ulander, Definition av bistatiska flygprov, FOI Teknisk rapport, FOI-R--1964--SE, 2006

T. Martin A. Pohl, J. Rasmusson, EM-simulering av bistatisk SAR för ett hus, FOI Teknisk rapport, FOI-R--2062--SE, 2006

G. Stenström, M. Blom, T. Jonsson, J. Rasmusson, Resultat från bistatiskt flygprov, FOI Teknisk rapport, FOI-R--2152--SE, 2006

M. Lundberg, L.M.H. Ulander, Change detection for VHF- and UHF-band SAR, Technical report, FOI-R--2303--SE, 2007

T. Jonsson, J. Rasmusson, A. Gustavsson, G. Stenström, L. Ulander, On bistatic transmitter-receiver synchronization using GPS disciplined 10 MHz oscillators, FOI Technical report, FOI-R--2375--SE, 2007

L.M.H. Ulander, B. Flood, P.-O. Fröling, A. Gustavsson, T. Jonsson, G. Stenström, Results from bistatic VHF-band SAR experiment 2007, FOI Technical report, FOI-R--2389--SE, 2007

M. Gustafsson, L.M.H. Ulander, Monostatic and bistatic 3D SAR-imaging study - simulations using physical optics, FOI Scientific report, FOI-R--2560--SE, 2008

J. Rasmusson, D. Murdin, Värdering av SAR-avbildningar av byggnaders interiörer med UHF-radar, FOI Användarrapport, FOI-R--2584--SE, 2008

7.2 FOI memo

L. Pettersson, Low frequency airborne antenna for bistatic SAR. Initial study of wing-mounted antennas, FOI Memo 1722, 2006

M. Blom, Utvärdering av VHF-kort till LORA, FOI Memo 1755, 2006

L. Ulander, Definition av bistatiska experiment 2007, FOI Memo 2016, 2007

T. Martin, J. Rasmusson, L. Ulander, Concept for imaging of building interiors using bistatic radar, FOI Memo 2066, 2007

7.3 Tidskriftsartiklar (peer-review)

P.-O. Fröling, L.M.H. Ulander, Evaluation of angular interpolation kernels in fast back-projection SAR processing, IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation, vol. 153, no. 3, pp. 243-249, 2006

G. Smith-Jonforsen, K. Folkesson, B. Hallberg, L. M. H. Ulander, Effects of forest biomass and structural consolidation on P-band backscatter, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 4, no. 4, pp. 669-673, 2007

B. Hallberg, G. Smith-Jonforsen, L.M.H. Ulander, G. Sandberg, A physical-optics model for double-bounce scattering from stems standing on an undulating ground surface, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 46, no. 9, pp. 2607-2621, 2008

K. Folkesson, G. Smith-Jonforsen, L. M. H. Ulander, Validating backscatter models for CARABAS SAR images of coniferous forests, *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 34, no. 5, pp. 480-495, 2008

7.4 Konferensbidrag

M. Lundberg, L.M.H. Ulander, W.E. Pierson, A. Gustavsson, A challenge problem for detection of targets in foliage, *Proc. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XIII*, held in Orlando, FL, 2006, SPIE vol. 6237, pp. 62370K-1--12, 2006

X. Dupuis, P. Dreuillet, L.M.H. Ulander, A. Gustavsson, Multi-pass and multi-date at P and L bands: Ground penetration and change detection, *Proc. EUSAR 2006*, 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar, held in Dresden, Germany, 16-18 May 2006, 4 pp., 2006

A. Gustavsson, L.M.H. Ulander, P.-O. Frörlind, B. Hallberg, Gary Smith-Jonforsen, P. Dreuillet, Pascale Dubois-Fernandez, O. Ruault du Plessis, LORAM – a SAR/GMTI data collection campaign, *Proc. EUSAR 2006*, 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar, held in Dresden, Germany, 16-18 May 2006, 4 pp., 2006

G. Smith-Jonforsen, B. Hallberg, J.E.S. Fransson, P.-O. Frörlind, K. Folkesson, A. Gustavsson, M. Magnusson, L.M.H. Ulander, VHF/UHF ultra-wideband SAR measurements of forests, *Proc. EUSAR 2006*, 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar, held in Dresden, Germany, 16-18 May 2006, 4 pp., 2006

L.M.H. Ulander, T. Martin, Bistatic clutter suppression in low-frequency SAR, *Proc. EUSAR 2006*, 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar, held in Dresden, Germany, 16-18 May 2006, 4 pp., 2006

L.M.H. Ulander, P.-O. Frörlind, D. Murdin, Fast factorised backprojection algorithm for processing of microwave SAR data, *Proc. EUSAR 2006*, 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar, held in Dresden, Germany, 16-18 May 2006, 4 pp., 2006

K. Folkesson, B. Hallberg, G. Smith-Jonforsen, L.M.H. Ulander, J.E.S. Fransson, and M. Magnusson, Automatic detection of wind-thrown forest in VHF SAR images, *Proc. IGARSS 2006*, IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, held in Denver, CO, 31 July-4 August 2006, pp. 3599-3602, 2006

L.M.H. Ulander, A. Gustavsson, J.E.S. Fransson, M. Magnusson, G. Smith-Jonforsen, K. Folkesson, B. Hallberg, L. Eriksson, Mapping of wind-thrown forests using the VHF-band CARABAS-II SAR, *Proc. IGARSS 2006*, IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, held in Denver, CO, 31 July-4 August 2006, pp. 3684-3687, 2006

L.M.H. Ulander, L. Eriksson, G. Smith-Jonforsen, J.E.S. Fransson, H. Olsson, ALOS calibration and validation activities in Sweden, *Proc. IGARSS 2006*, IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, held in Denver, CO, 31 July-4 August 2006, pp. 336-339, 2006

X. Dupuis, P. Dreuillet, L.M.H. Ulander, A. Gustavsson, Change detection using multi-pass and multi-date data at P and L bands, *Proc. IGARSS 2006*, IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, held in Denver, CO, 31 July-4 August 2006, pp. 4044-4047, 2006

P.-O. Frörlind, L.M.H. Ulander, D. Murdin, Fast factorised backprojection algorithm for processing of SAR data, *Proc. IoA International Conference on Synthetic Aperture Sonar and Synthetic Aperture Radar*, held in Lerici, Italy, 11-12 September 2006, pp. 168-175, 2006

- J.R. Rasmusson, M. Blom, B. Flood, P.-O. Frölind, A. Gustavsson, T. Jonsson, B. Larsson, G. Stenström, L.M.H. Ulander, Bistatic VHF and UHF SAR for urban environments, Proc. Radar Sensor Technology XI, held in Orlando, FL, 9-13 April 2007, SPIE vol. 6547, pp. 654705-1--12, 2007
- A. Gustavsson, P.-O. Frölind, P. Grahn, T. Jonsson, M. Lundberg, D. Murdin, G. Stenström, L.M.H. Ulander, Wide area surveillance during combined challenge 2006, Proc. MilTech 3, held in Stockholm, Sweden, 14-15 June 2007, 8 p., 2007
- L.E.B. Eriksson, G. Sandberg, L.M.H. Ulander, G. Smith-Jonforsen, B. Hallberg, K. Folkesson, J.E.S. Fransson, M. Magnusson, H. Olsson, A. Gustavsson, B. Flood, ALOS PALSAR calibration and validation results from Sweden, Proc. IGARSS 2007, IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, held in Barcelona, Spain, 23-27 July 2007, pp. 1589-1592, 2007
- J.E.S. Fransson, M. Magnusson, H. Olsson, L.E.B. Eriksson, G. Sandberg, G. Smith-Jonforsen, L.M.H. Ulander, Detection of forest changes using ALOS PALSAR satellite images, Proc. IGARSS 2007, IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, held in Barcelona, Spain, 23-27 July 2007, pp. 2330-2333, 2007
- J.E.S. Fransson, M. Magnusson, K. Folkesson, B. Hallberg, G. Sandberg, G. Smith-Jonforsen, A. Gustavsson, L.M.H. Ulander, Mapping of wind-thrown forests using VHF/UHF SAR images, Proc. IGARSS 2007, IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, held in Barcelona, Spain, 23-27 July 2007, pp. 2350-2353, 2007
- M. Magnusson, J.E.S. Fransson, L.E.B. Eriksson, G. Sandberg, G. Smith-Jonforsen, L.M.H. Ulander, Estimation of forest stem volume using ALOS PALSAR satellite images, Proc. IGARSS 2007, IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, held in Barcelona, Spain, 23-27 July 2007, pp. 4343-4346, 2007
- X. Dupuis, P. Dreuillet, L.M.H. Ulander, A. Gustavsson, Change detection using multi-pass and multi-date data at P and L bands, Proc. Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology VII, held in Florence, Italy, 17-20 September 2007, SPIE vol. 6749, pp. 67491D-1--9, 2007
- L.E.B. Eriksson, M. Magnusson, J.E.S. Fransson, G. Sandberg, L.M.H. Ulander, Stem volume estimation for boreal forest using ALOS PALSAR, Proc. 5th International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, held in Bari, Italy, 25-28 September 2007, 8 pp., 2007
- B. Hallberg, G. Sandberg, L.M.H. Ulander, G. Smith-Jonforsen, A physical-optics model for predicting VHF/UHF-band HH-pol backscatter from coniferous forests in undulating terrain, Proc. 5th International symposium on retrieval of bio- and geophysical parameters from SAR data for land applications, held in Bari, Italy, 25-28 September 2007, 8 p., 2007
- L.M.H. Ulander, G. Sandberg, K. Folkesson, G. Smith-Jonforsen, J.E.S. Fransson, Topographic and number density effects in forest observations with P-band SAR, Proc. 5th International symposium on retrieval of bio- and geophysical parameters from SAR data for land applications, held in Bari, Italy, 25-28 September 2007, 8 p., 2007
- V.T. Vu, T.K. Sjögren, M.I. Pettersson, H.J. Zepernick, A. Gustavsson, Experimental results on moving target detection by focusing in UWB low frequency SAR, Proc. Radar 2007, IET International Conference on Radar Systems, held in Edinburgh, UK, 15-18 October 2007, 5 pp., 2007
- T.K. Sjögren, V.T. Vu, M.I. Pettersson, H.J. Zepernick, A. Gustavsson, Speed estimation experiments for ground moving targets in UWB SAR, Proc. Radar 2007, IET International Conference on Radar Systems, held in Edinburgh, UK, 15 -18 Oct 2007, 5 p., 2007
- L.E.B. Eriksson, G. Sandberg, J.E.S. Fransson, M. Magnusson, L.M.H. Ulander, ALOS PALSAR calibration and validation activities in Sweden, Proc. The First Joint PI

Symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program, held in Kyoto, Japan, 19-23 November 2007, 4 pp., 2007

L. M.H. Ulander, B. Flood, P.-O. Frörlind, T. Jonsson, A. Gustavsson, J. Rasmusson, G. Stenström, A. Barmettler, E. Meier, Bistatic Experiment with ultra-wideband VHF-band synthetic-aperture radar, Proc. EUSAR 2008, 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, held in Friedrichshafen, Germany, 2-5 June 2008, vol. 1, pp. 131-134, 2008

A. Barmettler, L. Zuberbühler, E. Meier, L. Ulander, A. Gustavsson, P. Wellig, Swiss Airborne monostatic and bistatic dual-pol SAR experiment at the VHF-Band, Proc. EUSAR 2008, 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, held in Friedrichshafen, Germany, 2-5 June 2008, vol. 1, pp. 139-142, 2008

J.E.S. Fransson, M. Magnusson, H. Olsson, L.E.B. Eriksson, K. Folkesson, G. Sandberg, M. Santoro, L.M.H. Ulander, Detection of clear-cuts using ALOS PALSAR satellite images, Proc. EUSAR 2008, 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, held in Friedrichshafen, Germany, 2-5 June 2008, vol. 4, pp. 103-106, 2008

P.-O. Frörlind, L. M.H. Ulander, A. Gustavsson, First results on VHF-band SAR imaging using circular tracks, Proc. EUSAR 2008, 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, held in Friedrichshafen, Germany, 2-5 June 2008, vol. 1, pp. 221-224, 2008

L.M.H. Ulander, M. Lundberg, Modeling of change detection in VHF- and UHF-band SAR, Proc. EUSAR 2008, 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, held in Friedrichshafen, Germany, 2-5 June 2008, vol. 4, pp. 127-130, 2008

A. Gustavsson, B. Flood, P.-O. Frörlind, T. Jonsson, G. Stenström, L.M.H. Ulander, First results from a bistatic VHF SAR experiment, Proc. RVK08/MMWP08, Radio Science and Communications & Mathematical Modelling of Wave Phenomena, held in Växjö, Sweden, 9-13 June 2008, p. 197-201, 2008

M.I. Pettersson, V.T. Vu, T.K. Sjögren, A. Gustavsson, Multi-dimensional hypotheses test of movement detection in wide band radar systems associated with long integration time, Proc. RVK08/MMWP08, Radio Science and Communications & Mathematical Modelling of Wave Phenomena, held in Växjö, Sweden, 9-13 June 2008, pp. 212-216, 2008

P. Dubois-Fernandez, S. Angelliaume, I. Champion, L. Ulander, Review of polarimetric indicators for forest characterisation over several sites, Proc. IGARSS 2008, IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, held in Boston, MA, 6-11 July 2008, vol. IV, pp. 319-322, 2008

V.T. Vu, T.K. Sjögren, M.I. Pettersson, A. Gustavsson, Definition on SAR image quality measurements for UWB SAR, Proc. Image and Signal Processing for Remote Sensing XIV, held in Cardiff, Wales, UK, 15-18 September 2008, SPIE vol. 7109, pp. 71091A-1--9, 2008