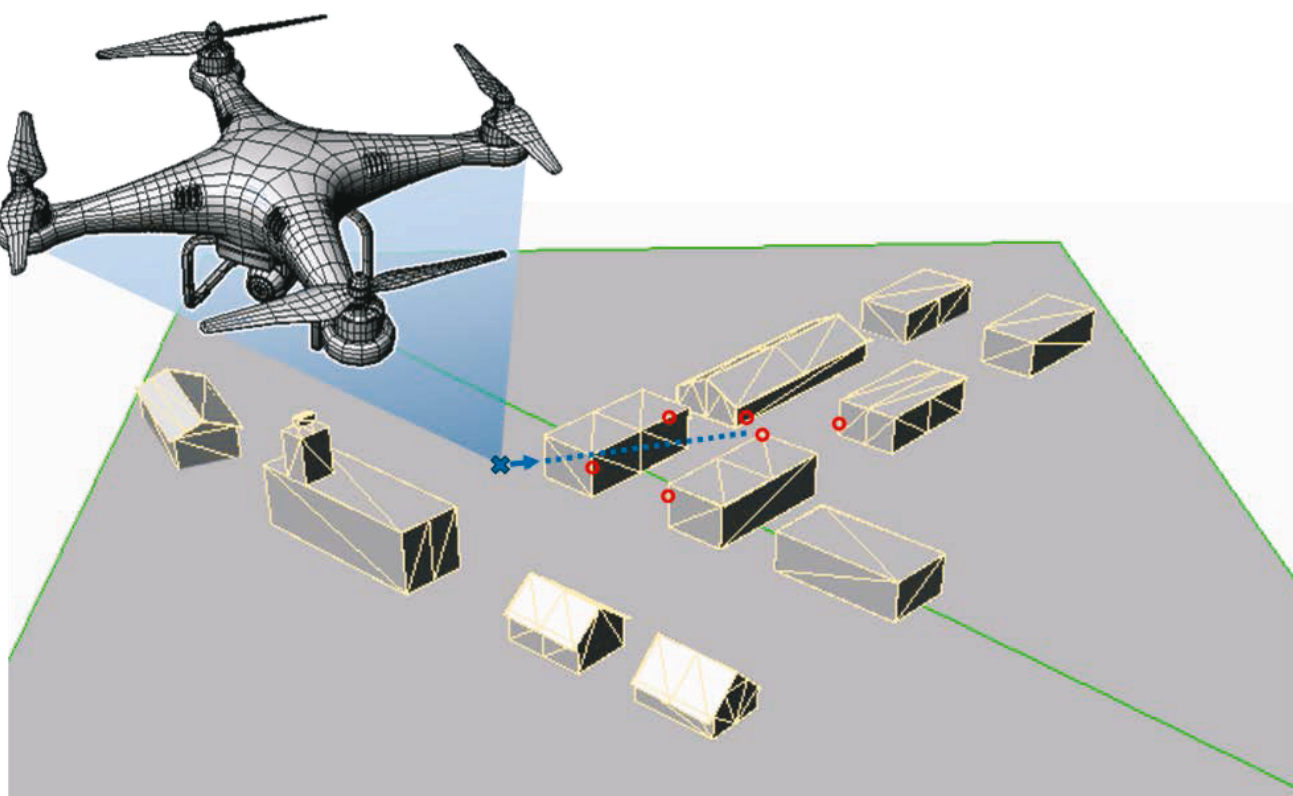


STEFAN NILSSON, THORD ANDERSSON,
ÅSA ANDERSSON, MAGNUS GUSTAFSSON,
TOMMY JOHANSSON, JAN SVEDIN, ANDERS ÖRBOM



Stefan Nilsson, Thord Andersson, Åsa Andersson,
Magnus Gustafsson, Tommy Johansson,
Jan Svedin, Anders Örbom

Radar för övervakning

Lägesrapport 2015

Titel	Radar för övervakning – Lägesrapport 2015
Title	Radar for surveillance – Progress report 2015
Rapportnr/Report no	FOI-R--4225--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2015
Antal sidor/Pages	27 p
ISSN	ISSN 1650-1942
Kund/Customer	Försvarmakten
Forskningsområde	Sensorer och signaturanpassning
FoT område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E54566
Godkänd av/Approved by	Per Johannesson
Ansvarig avdelning	Sensorer och TK-system

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk. All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden.

This work is protected under the Act on Copyright in Literary and Artistic Works (SFS 1960:729). Any form of reproduction, translation or modification without permission is prohibited.

Sammanfattning

Denna lägesrapport redovisar genomförd verksamhet och framkomna resultat 2015 inom det treåriga FoT-projektet *Radar för övervakning*. Projektet vidareutvecklar den kompetens och teknikplattform som genom tidigare satsningar etablerats inom forskningsområdena *väggpenetrerande radar* och *radar för att se runt hörn*. Projektet fokuserar mot att utveckla metoder och systemlösningar för främst dopplerbaserade radarsystem anpassade för urban miljö.

En central forskningsuppgift för projektet är att undersöka hur ett nätverk av små radarsensorer kan samverka för att klara autonom övervakning i olika situationer. Upptäckt av mindre flygfarkoster (UAV) utgör ett viktigt typfall. Under året har i huvudsak litteraturstudier genomförts där kunskap om forskningsfronten och på marknaden tillgänglig hårdvara inhämtats. Den här nyttjade metoden för att upptäcka och följa en UAV baseras på möjligheten att kunna detektera rotorbladens dopplersignatur. Ett inledande moment har därför varit att beräkna radarmålytan från en quadrokopters rotorblad som funktion av dess aspektvinkel och radarfrekvens.

Den av FOI lanserade metoden att med radar detektera rörliga objekt runt hörn har studerats vidare, och en fördjupad analys av kvarnmätningarna har gett nya intressanta resultat. Analysen visar att flera rörliga mål kan särskiljas när avståndsupplösningen så medger, och med dopplersignalbehandling kan i vissa fall även mål i samma avståndslucka särskiljas. Möjligheten att räkna och följa mål har också påvisats. Vi har också i en särskild analys visat att mikrodopplersignaturer bevaras efter det att radarvågen genomgått flera väggreflektioner, och de kan därmed ligga till grund för klassificering av olika objekt. Dessa nya forskningsrön publiceras i en vetenskaplig artikel. En förenad analys av detektioner, dopplerspektrum och mikrodopplerspektrum bör således ge förutsättningar för att kunna utveckla förbättrade metoder att upptäcka, följa och klassificera objekt.

Det systemkoncept som tagits fram för positionering av objekt runt hörn visar i simuleringar på lovande resultat. Det, eller liknande koncept som också utnyttjar multipelreflektioner för att åstadkomma robust positionering och följning av rörliga objekt runt hörn, bör vidareutvecklas med sikte på en möjlig systemlösning som eventuellt också kan placeras på ett fordon.

I en mindre förstudie har vi undersökt möjligheten om en radar placerad på en rörlig plattform kan detektera rörliga objekt bakom hörnet. Huvudfrågan är om det går att filtrera bort det oönskade klotter från omgivningen (t.ex. husväggar) som egenrörelsen skapar och som riskerar att konkurrera med målets signatur i dopplerspektrum. Förutom en mindre litteraturstudie har även testberäkningar utförts, vilka visar på problem som inte är olösbara. Vidare har en tänkbar klotterkompensationsmetod identifierats men denna behöver anpassas till aktuell tillämpning.

Under året har två omvärldsstudier genomförts. Den första är en kartläggning av militära och civila väggpenetrerande radarsystem som finns tillgängliga på den kommersiella marknaden. Studien visar att nyutvecklingen främst sker bland mindre, enklare och billigare system med förmåga att som mest mäta avståndet till målet, medan produktutvecklingen har avstannat för de mest avancerade och kostsamma systemen, med förmåga att positionera målen. Den andra omvärldsstudien sammanfattar den senaste utvecklingen inom området personskaning med högupplösande bildalstrande radarsystem, där alla i dagsläget kända tillgängliga kommersiella system redovisas. Utvecklingen av elektroniskt lobformande system har tagit fart och flera sådana system finns nu tillgängliga. Dessa system arbetar i frekvensområdet 25-80 GHz.

Projektet har medverkat i NATO-gruppen *Advancing Sensing Through the Walls Technologies* (2009-), som studerar nya förbättrade metoder att detektera, följa och avbilda människor bakom väggar. Analysresultaten från det gemensamma försöket i Ottawa 2013 med olika nationers väggpenetrerande system, redovisas i gruppens slutrapport som utkommer nästa år.

Nyckelord: dopplerradar, ”se-runt-hörn”, ”se-igenom-väggen”, väggpenetrerande radar, urban miljö, stridsfältövervakning, MIMO, NLOS

Summary

This progress report gives an account of the activities carried out, and the results produced in the first year of the three-year Swedish Armed Forces sponsored project *Radar for Surveillance*. The project involves a further development of the competence and technology platform established through previous efforts in the research areas of *Wall Penetrating Radar* and *Radar for Seeing behind Corners*. The project is focused on developing methods and system solutions primarily for Doppler radar system designed for urban environments.

An important research task for the project is to investigate how a network of small radar sensors can work together to cope autonomous monitoring in various situations, where detection of small aerial vehicles (UAVs) represent an important case. During the year, literature studies have been conducted to increase knowledge of the research front and available commercial off-the-shelf hardware. The method used to detect and track an UAV is based on the ability to detect the Doppler signature of the rotor blades. As a first step, the radar cross section of the rotor blades of a quadcopter as a function of its aspect angle, and radar frequency, has been calculated.

The FOI-introduced method of using radar to detect moving objects behind the corner has been further studied, and a deeper analysis of the previous measurements have provided interesting new results. The analysis shows that several moving targets can be distinguished where the range resolution allows, and Doppler signal processing can in some cases be used to separate two moving objects in the same range bin. The ability to count and track targets have also been demonstrated. In a special analysis we also demonstrated that micro-Doppler signatures are preserved after the radar wave has undergone several wall reflections, and can thus be the basis for target classification. These new research findings have been published in a scientific paper. A combined analysis of detections, the Doppler spectrum and micro-Doppler spectrum should thus provide the conditions for the development of improved methods to detect, track and classify objects.

The system concept, developed for positioning of objects around the corner, has in new simulations showed promising results. This system, or a similar concept that also utilizes multiple reflections to achieve robust positioning and tracking of moving objects around the corner, should be further developed aiming on a possible system solution, which also might be placed on a vehicle.

In a small pilot study, we have investigated the possibility of detecting moving objects around the corner, using a radar located on a moving platform. The main question is whether it is possible to filter out the unwanted Doppler clutter from the stationary environment (e.g., house walls) which is created by the platforms own movement. The clutter will likely compete with the target's signature in the Doppler spectrum. A small literature study together with test calculations, shows that the problem is not unsolvable. Furthermore, a potential clutter compensation method has been identified, but it needs to be adapted to this application.

During the year, two international surveys have been performed. The first is a survey of military and civilian wall penetrating radar systems available on the commercial market. The study shows that new development occurs primarily among smaller, simpler and cheaper systems with the ability to at most measure the distance to the target. The product development has been halted for the most advanced and costly systems, with ability to position the targets. The other survey summarizes the latest developments in the field of person scanning with high-resolution imaging radar system, where all known available commercial systems are reported. The development of electronic beam forming system has gained momentum and several such systems are now available. These systems operate in the frequency range of 25-80 GHz.

The project finances the participation in the NATO Group *Advancing Sensing Through the Walls Technologies* (2009-). The group studies new improved methods to detect, track and image people behind walls. Results from the joint trial in Ottawa in 2013 with various nations' wall-penetrating systems, will be reported in the final report which will be published next year.

Keywords: Doppler radar, "see behind corners", "see-through-the-wall", wall penetrating radar, polarization, urban scenario, battlefield surveillance, MIMO, NLOS

Innehållsförteckning

1. INLEDNING	7
1.1. PROJEKTETS MOTIV	7
1.2. PROJEKTETS INRIKTNING OCH FRÅGESTÄLLNINGAR	7
1.3. PROJEKTETS EFFEKT MÅL/KUNDNYTTA	8
1.4. INTERNATIONELL SAMVERKAN	8
1.5. KOMPETENSUPPBYGGNAD OCH PROJEKTSAMVERKAN	9
2. SENSORNÄTVERK AV RADARSENSORER	10
2.1. BAKGRUND	10
2.2. ELEKTROMAGNETISKA BERÄKNINGAR	10
2.3. SLUTSATSER OCH FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE	12
3. DOPPLERRADAR PÅ RÖRLIG PLATTFORM	13
3.1. PROBLEMFORMULERING OCH AVGRÄNSNING	13
3.2. LITTERATURÖVERSIKT	14
3.2.1. Undertryckning av klotter	14
3.2.2. Korrektion för relativ rörelse	14
3.2.3. Bilradartillämpningar	15
3.3. TESTBERÄKNINGAR KORREKTION FÖR EGENRÖRELSE	15
3.4. SLUTSATSER OCH FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE	16
4. SE RUNT HÖRN MED RADAR	17
4.1. DOPPLERANALYS AV KVARNMÄTNINGARNA	17
4.2. MÅLFÖLJNING I KVARNMÄTNINGARNA	18
4.3. MIKRODOPPLER AV KVARNMÄTNINGARNA	19
4.4. SYSTEMKONCEPT FÖR POSITIONERING RUNT HÖRN	19
4.5. SLUTSATSER OCH FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE	20
5. OMVÄRLDSBEVAKNING	21
5.1. VÄGGPENETRERANDE RADARSYSTEM	21
5.2. HÖGUPPLÖSANDE BILDALSTRANDE SYSTEM FÖR DETEKTION AV HOTOBJEKT UNDER KLÄDER	22
6. NATO SET-155	24
7. MEDFINANSIERING AV INACHUS	25
8. REFERENSER	26

1. Inledning

Denna lägesrapport redovisar genomförd verksamhet och hittills framkomna forskningsresultat under det första året av det treåriga FoT-projektet *Radar för övervakning*.

I rapportens inledande kapitel beskrivs projektets motiv, inriktning, frågeställningar och kundnytta. I kapitlen 2-5 ges en kortfattad redovisning av projektets forskningsinsatser inom olika delområden under året. För mer ingående information hänvisas till refererade egna eller andras arbeten (se sista kapitlet). Kapitel 2 ger en lägesbeskrivning av arbetet med att studera hur ett sensornätverk av små enkla radarsensorer bör vara utformat för att på ett autonomt och robust sätt kunna detektera och positionera rörliga hot i en komplex urban miljö. I kapitel 3 redovisas en genomförd förstudie rörande realiserbarheten av en fordonsplacerad radar för se-runt-hörn-tillämpningar med detektion av rörliga mål. Kapitel 4 presenterar aktuellt forskningsläge med vidareutvecklingen av vår metod att använda radar för att se runt hörn. I år har bl.a. analysen utvidgats genom att även studera uppmätta dopplerspektrum, för att utveckla bättre och säkrare detektionsmetoder. I kapitel 5 redovisas resultaten från två omvärldsbevakningar; den ena har kartlagt vilka väggpenetrerande system som finns tillgängliga på den kommersiella marknaden och den andra är inriktad mot högupplösande bildalstrande radarsystem för detektion av hotobjekt under kläder. Kapitel 6 presenterar arbetet inom NATO SET-155, och i kapitel 7 beskrivs EU FP7-projektet INACHUS, vilket FoT-projektet medfinansierar.

1.1. Projektets motiv

Dagens konflikter utspelar sig i allt högre grad i komplexa tredimensionella urbana miljöer som utmärks av korta siktsträckor och högt stridstempo. Motståndaren kan utnyttja den ur övervakningssynpunkt besvärliga miljön för att gömma sig eller för att dolt rycka fram i skydd av byggnader och andra strukturer. I en stridssituation kan också damm från kollapsade byggnader eller brandrök ytterligare bidra till att begränsa den optiska sikten. Militära operationer i sådana miljöer är mycket riskfyllda och det finns här ett behov av robust tekniskt stöd som förmår att automatiskt upptäcka, klassificera och följa fientlig aktivitet, och i synnerhet kunna registrera dolt fientlig aktivitet. Det kan t.ex. handla om fiender gömda i byggnader, eller under framryckning längs tvärgator eller i korridorer. Genom att utnyttja radarvågors unika reflektions- och penetrationsförmåga, kombinerad med radarns utmärkta förmåga att detektera rörelser, kan nya systemlösningar utvecklas som förmår att upptäcka dessa hot, och som signifikant bidrar till att öka den operativa förmågan och säkerheten för den egna insatsgruppen.

Forskning rörande användning av övervakande radar i komplex miljö har påbörjats i flera länder, främst i USA, men också i Holland, Tyskland, England, Italien, Kina, Japan och Australien. En aktuell inriktning är hur man kan utnyttja den komplexa vågutbredningen (t.ex. runt hörn) i sådan miljö som en källa för bättre situationsuppfattning, måldetektion och följning. Som medel för att uppnå detta studerar man användning av multipla antenner och antennelement för sändning och mottagning, deras positionering, lämpliga signalformer och signalbehandlingsmetoder, samt samverkan av samtidigt aktiva sensorer i nätverk.

Det beskrivna forskningsområdet är under stark utveckling och utvecklingspotentialen bedöms vara stor. Området kan delvis utnyttja den starka teknikutvecklingen som sker inom det civila säkerhetsforskningsområdet. Projektet bidrar till att upprätthålla nyckelkompetens inom korthållsradarområdet.

1.2. Projektets inriktning och frågeställningar

Projektet undersöker hur radarsystem kan användas för övervakning i en komplex miljö, och här utnyttjas främst radarns goda förmåga att upptäcka rörliga objekt. Allvädersprestanda, möjligheten att se igenom olika material och att via multipelreflektioner kunna se runt hörn, är alla unika radaregenskaper som ger viktiga bidrag till övervakningsförmågan.

I aktuella övervakningstillämpningar fungerar radarn som en primärsensor, vars uppgift är att upptäcka, positionera och följa potentiella hot och vid behov inrikta bildalstrande system för hotvärdering.

En forskningsuppgift för projektet är att undersöka hur ett nätverk av små radarsensorer kan samverka för att klara autonom övervakning i olika situationer, vilket inkluderar upptäckt av mindre flygfarkoster (UAV¹). En annan uppgift är att undersöka potentialen för markbaserade radarsensorer placerade på mobila plattformar (UGV²), där metoder för kompensation av egenrörelsen studeras. Genom detta arbete kan realiserbarheten av en fordonsbaserad se-runt-hörn-radar bedömas.

Med hjälp av främst simuleringar men även experiment utvecklas och värderas metoder, signalbehandlingsalgoritmer och tekniska system-lösningar som förmår att detektera, följa, och klassificera objekt i rörelse. En angelägen forskningsuppgift är att undersöka om multipelreflektioner kan användas för att åstadkomma robust positionering och följning av rörliga objekt runt hörn.

En avgränsad uppgift inom projektet är att bevaka internationell forskning och system-utveckling avseende högupplösande bildalstrande system (THz) för detektion av hotobjekt under kläder.

Målet är att bygga kompetens för att besvara följande frågeställningar:

- 1) Hur kan ett nätverk av små radarenheter utnyttjas för att detektera och följa rörliga hotobjekt i komplexa övervakningssituationer?
- 2) Hur kan ett radarsystem integreras i ett samverkande övervakningssystem?
- 3) Hur kan signalbehandlingsmetoder användas och vidareutvecklas för robust detektion, klassificering och följning av rörliga hot i övervakningssituationer?
- 4) Är det möjligt att realisera ett system för positionering och följning av rörliga objekt runt hörn genom utnyttjande av multipelreflektioner?

1.3. Projektets effektmål/kundnytta

Ett effektmål för Försvarmakten är att resultaten från forskningen kan bidra till säkrare etablering och närvaro i komplex miljö samt ge ökad kunskap om potentialen för olika tekniska radarlösningar som stöd vid urbana operationer. Genom projektet ges förutsättningar för att kunna ge Försvarmakten och Försvarets materielverk ett ännu bättre expertstöd vid anskaffning, utveckling och kravställning på framtida system. På längre sikt kan forskningsresultaten också komma att inkorporeras i operativa systemlösningar och därmed ge ett omedelbart stöd till den militära förmågan.

1.4. Internationell samverkan

Projektet har under året medverkat i NATO-gruppen SET-155 RTG-085 *Advancing Sensing Through the Walls Technologies* (2009-). Inom denna grupp studeras metod- och teknikutveckling för väggpenetrerande radar (se kapitel 6).

Genom internationell samverkan får FOI tillgång till viktig information om övriga länders pågående forskning, erfarenheter och resultat inom området. Delar av denna information kan sällan inhämtas från litteraturen eller via konferenser. Genom denna ökande kunskap kan forskningen inriktas mot de viktigaste och mest intressanta problemområdena. Att FOI är en internationellt efterfrågad forskningspartner är en viktig kvalitetssäkring.

¹ Unmanned Aerial Vehicle

² Unmanned Ground Vehicle

1.5. Kompetensuppbyggnad och projektsamverkan

Projektet vidareutvecklar den kompetens och teknikplattform som FOI genom tidigare satsningar etablerat inom områdena *väggpenetrerande radar* och *se runt hörn med radar*. Kompetensuppbyggnad och forskningsinsatser inom området har tidigare genomförts inom FoT-projekten *Teknisk värdering av nya sensorförmågor för SIB* (2004-2006) [1], *Radarsensorer för urban miljö* (2005-2006) [2], *Radar för detektion av mänsklig aktivitet "runt hörn"* (2007-2009) [3], *Lokal stridsfältsovervakning i urban miljö* (2007-2008) [4], *Penetrerande radarsystem för urbana operationer* (2009-2011) [5] och *Radar för stridsfältsovervakning* (2012-2014) [6].

Projektet samverkar med FOI-projekt som arbetar med radarsignalbehandling och radarsystemtillämpningar: *Gruppantennbaserade radarsystem - GUARD* (FoT), *Multisensor-system för övervakning* (FoT), *Sensorer för fjärrspaning mot sjö- och luftmål* (FoT) och *P5* (EU FP7). Projektets medverkan i NATO-gruppen *SET-155 Advancing Sensing Through the Walls Technologies* och dess planerade fortsättning, samt medfinansieringen av *INACHUS* (EU FP7), ger tillgång till aktuell internationell forskning inom området.

2. Sensornätverk av radarsensorer

2.1. Bakgrund

Inom detta delområde studeras hur ett sensornätverk av små enkla radarsensorer bör vara utformat för att på ett autonomt och robust sätt kunna detektera och positionera rörliga hot i en komplex urban miljö. En huvudinriktning är upptäckt av mikro-UAV:er. Radarsensorerna antas arbeta i s.k. distribuerad MIMO³, där varje sensor sänder ut en unik vågform men också kan ta emot och urskilja vågformer från de andra sensorerna. De utspridda sensorerna och MIMO-funktionen skall utnyttjas för att ge stor täckning, robust övervakningsfunktion med möjlighet att utnyttja multipelreflektioner för se-runt-hörn-funktionalitet. Vidare antas att relativt snabb etablering krävs av sensornätverket och den autonoma övervakningsfunktionen.

Ett radarsensornätverk är ett system av många delsystem och produkten av många designbeslut; från val av radarvågformer, radar- och beräkningshårdvara upp till val av nätverkstopologier och följningsalgoritmer. I princip alla delar pågår forskning och en stor del av arbetspaketets aktivitet 2015 har bestått i att skaffa överblick över forskningsfronten och på marknaden tillgänglig hårdvara.

En annan viktig aktivitet har varit att undersöka egenskaperna för små UAV:er, som vi antagit som primärt mål; storlek, material, antal rotor, radarmålarea och dopplersignaturer är exempel på intressanta parametrar.

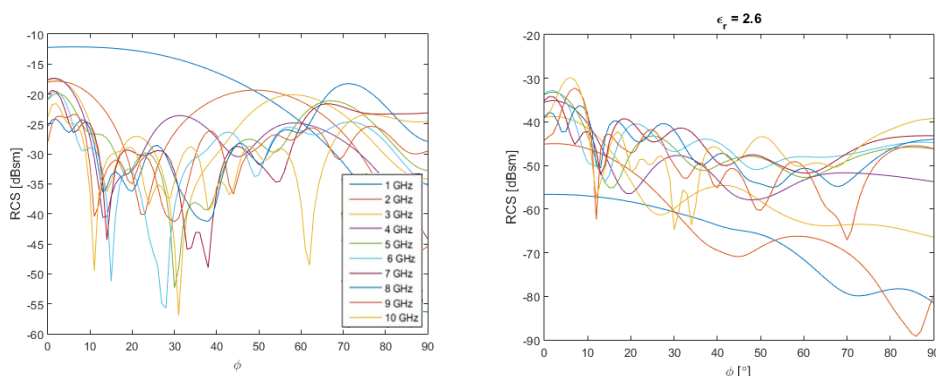
Under 2015 har arbetspaketet genomfört följande aktiviteter:

- en litteratur- och omvärldsöversikt har genomförts för bl.a. distribuerade MIMO-radarsystem, detektions- och följningsmetoder, avstånd- och dopplerestimering, vågformsoptimering, multipath-adapting, mjukvarudefinierad radio/radar, simuleringsmjukvara och marknadstillgänglig programmerbar radarhårdvara. En redovisning av översikten är för omfattande för att ges här. Från översikten har intressanta alternativ sållats fram vilka utgör en grund för framtida arbete.
- en litteraturöversikt har genomförts avseende radaregenskaperna hos små UAV:er. En CAD-modell för en quadrokopter, *Phantom III* [7], har köpts in för elektromagnetiska beräkningar. Dessutom har en riktig quadrokopter, av samma modell köpts in för användning vid framtida referens- och valideringsmätningar.
- Elektromagnetiska beräkningar för ett scenario där en drönare dyker ner mot ett tänkt mål som står bland hus.

2.2. Elektromagnetiska beräkningar

Årets simuleringar rörande radaregenskaperna hos quadrocoptern kan sammanfattas i två separata delar. I den första delen undersöks hur stor radarmålarea (RCS) quadrocopters rotor ger som funktion av vinkel och frekvens. Denna är, som vi antar, fundamental för att kunna upptäcka quadrocoptern i en urban miljö eftersom rotorn ger väldigt stora dopplerhastigheter, till skillnad från övrig omgivning. Beräkningarna är gjorda med "Finita tidsdifferensmetoden" (FDTD) [8, 9] vilken löser Maxwells fältekvationer numeriskt utan fysikaliska approximationer. Nackdelen är dock att metoden är beräkningskrävande vilket gör att endast elektriskt små objekt kan beräknas. Resultaten från dessa simuleringar illustreras i Figur 1.

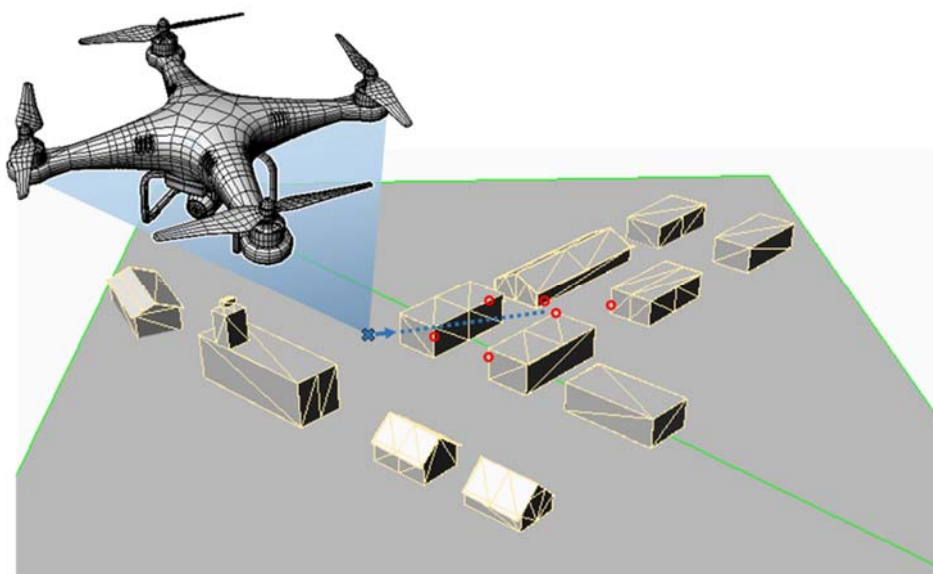
³ Multiple Input Multiple Output



Figur 1. Radarmålearea vid HH-polarisation som funktion av azimutvinkel för en metallisk rotor (t.v.) och en plastrotor (t.h.), för olika frekvenser (1-10 GHz).

Figur 1 visar radarmålearea som funktion av belysningsvinkel mot rotorbladet, där bladets bredsida belyses vid $\phi=0^\circ$. Man noterar stora måleareaskillnader mellan det metalliska rotorbladet och det av plast. Detta gäller speciellt vid 1 GHz som i metallfallet p.g.a. resonanseffekter uppvisar betydligt högre radarmålearea än övriga frekvenser emedan det omvända gäller för plastrotorbladen. För övriga frekvenser fås inbördes ungefär samma radarmåleareor, men plastrotorbladet ger ca 10 dB lägre radarmålearea.

I den andra delen simuleras ett urbant scenario där vi antar att vi m.h.a. rotoreernas dopplersignatur kan separera målen från den urbana omgivningen. Som en inledande simulering har en CAD-modell av del av Markstridsskolans (MSS) SIB-anläggning i Kvarn använts tillsammans med en CAD-modell av quadrokoptern, se Figur 2. Radarsensorer har placerats ut i ett nätverk i scenariot där ungefärliga positioner markeras av de röda cirkelarna.



Figur 2. Bild av CAD-modellerna över en del av Kvarn och den anflygande quadrokoptern "Phantom III". De röda cirkelarna markerar ungefärliga positioner för de radarsensorer som placerats ut i omgivningen. Blått kryss visar quadrokopterns startposition och blå streckad linje visar dess flygbana.

Quadrokoptern är tänkt att flyga an, längs den blå streckade linjen i pilens riktning, mot ett tänkt mål som befinner sig i slutet av linjen. Scenens storlek är ca 140 m x 140 m och anflygningen ca 30 m. I den initiala simuleringen, som utförts med SE-Workbench: SE-RAY-EM [27], har alla ytor antagits vara metalliska och husens ytor släta, men dessa kommer i framtida planerade simuleringar att göras mer realistiska. För denna och framtida elektromagnetiska simuleringar används en s.k. högfrekvensmetod som fungerar väl när våglängden är liten i förhållande till objekten.

2.3. Slutsatser och förslag till fortsatt arbete

Litteratur- och omvärldsöversikten gjorde det tydligt att mycket forskning pågår inom bl.a. sensornätverk [10], distribuerad MIMO [11] och detektion och följdning [12]. Däremot så verkar MIMO i komplexa miljöer med multipelreflektioner vara ett område där förhållandevis lite arbete är gjort. Till exempel så antar väldigt många artiklar line-of-sight förhållanden, och relativt få detektioner/mål vid lokalisering och målföljdning. Detta står i kontrast med arbetspaketets målskenario i urban miljö som kräver multi-path, multi-sensor och multi-target tracking (M3T). Efter att ha undersökt problemet på bred front 2015 kommer det fortsatta arbetet därför att avgränsas till ett par olika systemdesignalternativ som i stället kommer att analyseras på djupet:

- Nivå 1: Utan multipelreflektioner: En grundläggande nivå implementeras som stödjer detektion och följdning av små UAV:er. Robusta och välkända metoder används. Stor vikt läggs på flexibla representationer av sannolikhetsfördelningar lämpliga för fusion.
- Nivå 2: Med multipelreflektioner: Med nivå 1 som bas utvecklar vi effektiva metoder att projicera sannolikhetsfördelningar över känd geometri för fusion i multipath-omgivningar.

Vi utvärderar och kompletterar det från 2015 föreslagna systemet genom simuleringar på två olika nivåer:

- Simulera förslaget till MIMO-radarnätverk med detektion och följdning enligt målskenariot i komplex miljö givet en viss radarprestanda. Denna simulering sker på systemnivå och skall fokusera på datafusion-, följdning- samt nätverk/MIMO-aspekterna. Resultat är detektions- och följningsprestanda givet en viss radarprestanda för olika distributioner av sändare- och mottagare och olika klotternivåer.
- Gör noggranna elektromagnetiska radarsimuleringar enligt (delar av) målskenariot i komplex miljö. Resultat är mottagarnas signaler i olika representationer (t.ex. vågform och range-doppler matriser).

3. Dopplerradar på rörlig plattform

3.1. Problemformulering och avgränsning

En förstudie rörande realiserbarheten av en fordonsplacerad radar för se-runt-hörn-tillämpningar med detektion av rörliga mål har genomförts. Långsiktiga mål är exempelvis att kunna stödja Försvarsmakten vid urbana operationer samt polis och räddningstjänst vid insatser då man av olika skäl inte har en fri siktlinje.

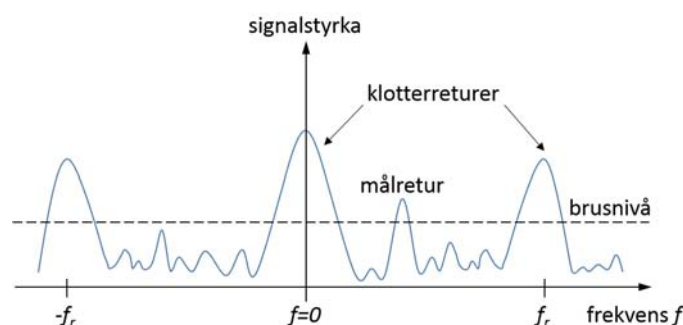
Ett väl avgränsat problem har definierats och en översikt av relevant litteratur har genomförts. Testberäkningar för ett enkelt scenario har utförts med avsikt att belysa problem som man kan komma att ställas inför i ett reellt scenario. För ovan nämnda tillämpningar utnyttjas informationen från radarstrålningens reflektioner i t.ex. väggar, s.k. flervägsutbredning. Ett enkelt men fullt realistiskt scenario för en sådan se-runt-hörn-tillämpning beskrivs i detta avsnitt. Syftet är att formulera och avgränsa uppgiften.

I den tilltänkta tillämpningen antas att endast en liten, enkel radar är realistisk med hänsyn tagen till kostnad, komplexitet, och användning. Exempelvis antas att en gruppantenn inte används. Radarsensorn ska integreras med fordonet utan att påverka dess funktionalitet i övrigt, den ska vara enkel att hantera utan stor manuell insats.

En fordonsbaserad radar innebär att radarn har en egenrörelse. Detta kommer dels att ge upphov till klotter i dopplerspektrumet från stationär bakgrund, dels till en avståndshastighetskoppling. Här avses måttliga fordons- och målhastigheter.

Koppling mellan avstånd och hastighet uppkommer när det finns en relativ rörelse mellan radarn och målet. Två effekter uppträder: ett skifte och en breddning av det mottagna dopplerspektrumet från målet. För att kompensera för den relativa hastigheten måste den mätas eller skattas.

Figur 3 visar en schematisk bild av klotterreturer i ett dopplerspektrum. Med en rörlig radar kommer returer från stationär bakgrund, t.ex. väggar och andra fasta objekt, att orsaka klotter i dopplerspektrumet. På grund av de många olika avstånden mellan radar och bakgrund, kommer klotterprofilen i dopplerspektrumet förmodligen att vara bredare än svaret från målet. Detta gäller speciellt i en se-runt-hörn-tillämpning där väggreflektioner och flervägsutbredning förekommer.



Figur 3. Schematisk illustration av klotter i ett dopplerspektrum.

Exempel på ett enkelt men realistiskt scenario är följande; ett fordon utrustat med en enkel radar kör relativt långsamt längs en gata fram mot en korsning med bebyggelse. Målet är att med hjälp av radarn kunna se runt hörnet på en byggnad vid korsningen, in på en sidogata, och därmed upptäcka och helst följa ett rörligt mål, t.ex. ett fordon eller en UAV. När fordonet rör sig mot korsningen omriktas radarantennen kontinuerligt mot motstående vägg så att flervägsutbredningen utnyttjas tillfullo. För den här tillämpningen har vi i huvudsak identifierat två problem:

- 1) Korrektion av målposition p.g.a. den relativa rörelsen mellan mål och radarn. Denna effekt bör vara relativt enkelt att kompensera för, då vi vet radarns hastighet men målets hastighet måste uppmätas eller skattas.
- 2) Klotter i dopplerspektrumet p.g.a. radarns rörelse (egenrörelse) – undertryckning av klotter behövs.

3.2. Litteraturöversikt

En litteratursökning gällande metoder för klotterkompensering och mållkorrektion för en rörlig radar har genomförts med syfte att undersöka om relevanta metoder finns redovisade i litteraturen. Inga artiklar som exakt beskriver den aktuella tillämpningen (se avsnittet ovan) med se-runt-hörn hittades. Däremot finns mycket publicerat för SAR- (*Synthetic Aperture Radar*-) och flygtillämpningar med gruppantennlösningar. Mycket finns publicerat kring STAP-metoder (*Space Time Adaptive Processing*, eller adaptiv rum/tid-filtrering) men även där används gruppantennar, vilket inte är aktuellt här.

Det finns en uppsjö av artiklar rörande bilradar. Vissa av dessa är av intresse för det här projektet, men förvånansvärt få tar överhuvudtaget upp klotterproblematik. Detta skulle kunna indikera att dopplerklotter helt enkelt inte utgör ett problem för dessa tillämpningar.

Nedan följer exempel på några artiklar.

3.2.1. Undertryckning av klotter

Bland artiklar som rör klotterundertryckning kan nämnas två exempel:

- Andrews [13] beskriver en metod kallad TACCAR (*time average clutter coherent airborne radar*) för att kompensera för dopplerklotter genom subtrahera medelvärde av allt uppmätt dopplerskift inom ett avståndintervall och en tidsperiod. Metoden är i princip enkel och rättfram men innebär en viss tidsfördröjning p.g.a. medelvärdebildningen.
- En relaterad metod som syftar till att genomföra kompensationen i realtid beskrivs av Kwag [14] för fallet med en luftburen pulsad dopplerradar. Först görs en uppskattning av medeldopplerfrekvensen för klotret. Denna frekvens används sedan för att skifta ner – klotterkompensera – andra frekvenser. Slutligen görs dopplerdetektion på det kompenserade frekvensspektrumet. Om klotter och mål överlappar i dopplerfrekvens kan även mål tas bort. Kompenseringen kan behöva itereras. Slutsatsen i artikel är att den föreslagna metoden fungerar för alla rörliga plattformar men en tillämpning av metoden på mätdata visas inte.

3.2.2. Korrektion för relativ rörelse

Flera artiklar behandlar korrektion av målposition p.g.a. relativ rörelse. De flesta gäller fall då radarn är stationär. Radarns egen rörelse utgör inte ett problem, men målets hastighet måste uppskattas.

Lin m.fl. [15] behandlar fallet med en (stationär) stegad frekvensradar som mäter högupplösta avståndsprofiler (*high-resolution range profiles*, HRRP) av snabba mål. Den använda metoden uppskattar målets hastighet i tre steg. Först uppskattas ett initialvärde m.h.a. en pulsdopplermetod, sedan görs en grov uppskattning m.h.a. en entropimetod, och slutligen görs en noggrann bestämning m.h.a. en metod baserad på l_1 -normen. Det uppskattade värdet används för att kompensera påverkan från målets hastighet på avståndsprofiler. Metoden fungerar väl för fall med lågt signal-brusförhållande och för höghastighetsmål. Fördelen med denna metod jämfört med andra, är högre noggrannhet och kortare beräkningstid. Metoden har testats i simuleringar. Värt att notera är dock att denna artikel är en av många exempel med höghastighetstillämpning.

3.2.3. Bilradartillämpningar

Inom bilradarområdet finns krav på att kunna upptäcka mål på avstånd upp till 200 m, med en avståndsupplösning på 1 m och en hastighetsupplösning på 0,16 m/s, eller 0,58 km/h, se Ref. [16]. Samtliga mål i det belysta området ska upptäckas samtidigt som det inte får finnas falska mål ("spökmål"). Slutligen måste mättiden vara mycket kort.

För att lösa dessa uppgifter har en metod utvecklats som kombinerar LFM (*linear frequency modulation*) och FSK (*frequency shift keying*), se t ex Rohling och Meinecke [17], Rohling och Möller [18] och Huel och Rohling [16]. Denna kombination innebär att två linjärt modulerade signaler utsänds omväxlande. Signalerna skiljer sig endast åt med en liten frekvensförskjutning. Ett mål detekteras i båda signalerna och fasskillnaden mellan dem kan användas för att göra en finbestämning av avstånd och hastighet. Signalerna måste sändas ut och registreras koherent. Den kombinerade metoden kallas ibland för MFSK (*multi frequency shift keying*).

Den beskrivna MFSK-metoden verkar vara lämplig för bilradartillämpningar och ser ut att klara de krav som ställs på hög noggrannhet i avstånd och hastighet. Ingen av de artiklar refererade till ovan diskuterar explicit kompensation av den egna rörelsen hos radarplattformen (bilen). Måttiderna, som är mycket korta, innebär möjligen att sensorn momentant kan anses vara stationär. På 10 ms hinner en bil som kör med 50 (100) km/h röra sig 0,14 (0,28) m.

Diskussion av klotter som ett problem förekommer heller inte i artiklarna.

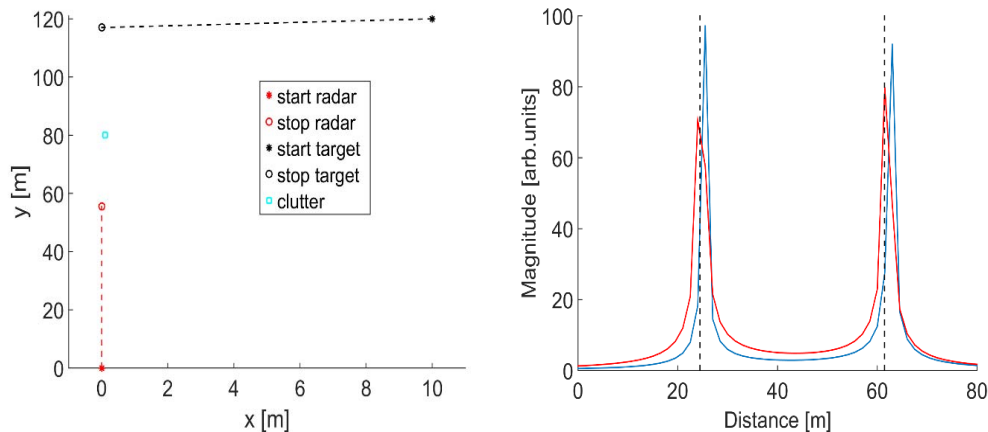
3.3. Testberäkningar korrektion för egenrörelse

Enkla beräkningar rörande det dopplerskift, och medförande fel i målposition, samt breddning av dopplerspektrum som den relativa rörelsen mellan mål och radar orsakar, har gjorts utifrån en problembeskrivning av Keel och Baden [19]. Dessa tester ger en inblick i problemet för de frekvenser och hastigheter som här är av intresse.

För ett radarsystem som arbetar med stegad frekvens kan en korrektionsfaktor, beroende av en uppmätt eller skattad relativ hastighet, tas fram och appliceras på den mottagna signalen. Detta har implementerats i Matlab för beräkning av scenarier med en rörlig radar, ett rörligt punktmål och en stationär bakgrund i form av ett punktmål. Scenarierna är alltså mycket förenklade och beräkningarna är endast tänkta att ge en känsla för de problem som uppkommer vid de hastigheter och med det radarsystem som vi tänker oss. Avsaknaden av utbredda bakgrundsmål (väggar) och flervägsutbredning, samt samma radarmålarea (samma signalstyrka) för mål och klotter är de största bristerna. En noggrannare simulering föreslås i det fortsatta arbetet, se nästa avsnitt.

Flera fall har studerats, ett exempel visas i Figur 4 där radarn antas placerad på ett långsamt körande fordon (20 km/h) och målet är en gående person (1 m/s). Radarsystemparametrarna och signalbehandlingen är samma som de som användes för insamling och analys av Kvarndata, se kapitel 4 och Nilsson m.fl. [20]. Avståndsupplösningen är 1,5 m. Beräkningarna visar att *med korrektionen* ligger felet i uppmätt målavstånd inom avståndsupplösningen men *utan korrektion* riskerar att målet hamnar i fel avståndslucka. Med högre avståndsupplösning blir korrektion ännu viktigare. På samma sätt kan klotteravstånd korrigeras.

Hastighetsprofiler har också beräknats med förväntat resultat, se illustration i Figur 3, men med delvis överlappande toppar. Med ett utsträckt klottermål (t.ex. en vägg), kommer förmodligen klotterbidraget att ge en bredare topp.



Figur 4. Vänster: Start- och stoppositioner för radar, mål och klotter. Höger: Avståndprofil när radar och mål befinner sig i slutpunkterna. De streckade svarta linjerna markerar de sanna avstånd från radarn till mål (61,44 m) respektive klotter (24,44 m). Resultat utan och med korrektion plottade i blått respektive rött.

3.4. Slutsatser och förslag till fortsatt arbete

För att testa metoder för kompensation av radarns egenrörelse behöver vi i ett första skede genomföra simuleringar. De testberäkningar som gjorts i år fyller endast funktionen att illustrera vissa problem. Simulering av rörlig radar i en gatumiljö med ett rörligt mål i en tvärgata föreslås. Detta scenario liknar det som används när systemkonceptet för positionering studeras, se kapitel 4.4. Den främsta skillnaden består i att här är radarn rörlig, där är den stationär. Det är radarns egenrörelse som orsakar klotter från stationära väggar i dopplerspektrumet. Ytterligare en skillnad är att radarloben i detta fall fix och bredare än den smala, skannande loben som studeras i kapitel 4.4.

En mindre litteratursökning har genomförts. En tänkbar klotterkompensationsmetod har identifierats men anpassningar till denna tillämpning krävs. Noterbart är att diskussion av klotter som ett problem saknas i de funna artiklar som tar upp bilradarsystem. En utökad litteratursökning föreslås. I ett senare skede vore det önskvärt att genomföra en mätning med ett verkligt system.

4. Se runt hörn med radar

4.1. Doppleranalys av kvarnmätningarna

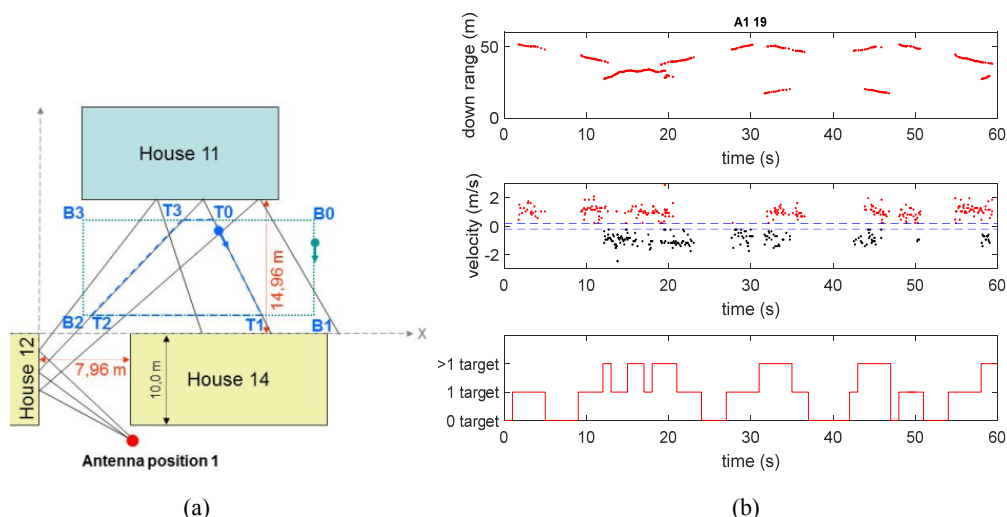
Under 2013 genomfördes ett fältförsök vid Markstridsskolans SIB-anläggning i Kvarn då möjligheten att detektera rörliga objekt runt hörn med radar testades i en realistisk urban miljö. En överblick av mätscenen ges i Figur 5a och en detaljerad redogörelse för kvarnmätningarna gavs av Nilsson m.fl. [20]. Vid mätningen användes Lilla Gåras frekvensstegade radar-mätsystem. Frekvensbandet 9,95–10,05 GHz var uppspant med 101 frekvenser och vald PRF (*Pulse Repetition Frequency*) var 990 Hz. Det ger en avståndsupplösning på 1,5 m, ett entydigt avstånd på 150 m och en entydig hastighet på $\pm 7,5$ m/s.

Den första dataanalysen visade att det var möjligt att detektera rörliga mål [6,21]. Den signalbehandlingsalgoritm som används för att detektera rörliga mål bakom ett hörn är baserad på koherent subtraktion av olika frekvenssväp [22]. Efter subtraktionen av de komplexvärda signalerna görs en invers Fouriertransform (IFFT) och avståndsprofiler kan skapas. Detektionerna görs när en adaptiv tröskelnivå i avståndsprofilen överskrids.

I år har analysen utvidgats genom att även studera uppmätta dopplerspektrum, för att utveckla bättre och säkrare detektionsmetoder. Vidare underlättas målföljning av kännedom om ett objekts hastighet.

Dopplerhastighetsprofiler har tagits fram med en signalbehandlingsalgoritm som beskrivits i detalj tidigare av Sume m.fl. [23]. För varje detektion beräknas en hastighetsprofil utifrån 128 frekvenssväp, vilket ger en hastighetsupplösning på 0,117 m/s. För att bestämma målets hastighets största toppen i hastighetsspektrum utanför intervallet $\pm 0,2$ m/s. Konventionen här är sådan att positiva hastigheter svarar mot rörelse mot radarn, och negativa hastigheter svarar mot rörelse från radarn. Rörelseriktningen bestäms så gott som alltid korrekt i samtliga mätfall. Hastigheterna som erhålls är rimliga och varierar på sätt som stämmer väl överens med rörelserna.

I Figur 5b visas resultaten för två personer som går med en hastighet av cirka 1 m/s i en rektangelbana, så att de möts vid tiden $t \sim 15$ s. I den övre panelen visas avstånd och tid för detektioner. I den mellersta panelen visas hastighet för varje detektion. Uppmätta hastigheter har en tyngdpunkt vid $|v| \sim 1,0$ m/s. Avvikelserna från ± 1 m/s kan förklaras med att radarn observerar den radiella hastigheten och att personerna går snett genom radarloben. När personerna möts och inte kan upplösas i avstånd, kan de särskiljas i hastighet.



Figur 5. (a) Skiss av mätscenen sedd ovanifrån, som visar rörelsebanor och radarvågens utbredning. Beroende på var det rörliga objektet befinner sig i mätscenen är detektionen ett resultat av en eller flera reflektioner. (b) Detektioner (överst), hastighet (mitten) och antalet mål (underst) för två personer går mot varandra i en rektangelbana (B0-B1-B2-B3 i (a)).

I den tredje panelen visas det automatiskt bestämda antalet mål. Måttet är en sammanvägning av resultaten från tre olika metoder. Den första räknar antalet målspar i detektionsplotten (övre panelen). Den andra metoden kontrollerar om det samtidigt finns både positiva och negativa hastigheter. Metoden fångar två mål med olika rörelseriktningar bra, t ex vid möte mellan två gående personer. Den tredje metoden avser att finna mål som rör sig i samma riktning men med olika hastigheter. Metoden letar efter andra stora toppar i hastighetsprofilen, utanför huvudtoppen. Resultaten från den tredje metoden är ofta osäkra. Detta beror delvis på att de tillgängliga mätfallen med två personer som går efter är ”svåra”, då de rör sig med snarlika hastigheter. Slutligen har en sammanvägning av de tre metoderna gjorts. Den tredje metoden har viktats lägre än de två första. Det sammanvägda resultatet trösklas till kategorierna inget mål, ett mål, fler än mål. Resultat visas i den nedersta panelen i Figur 5b.

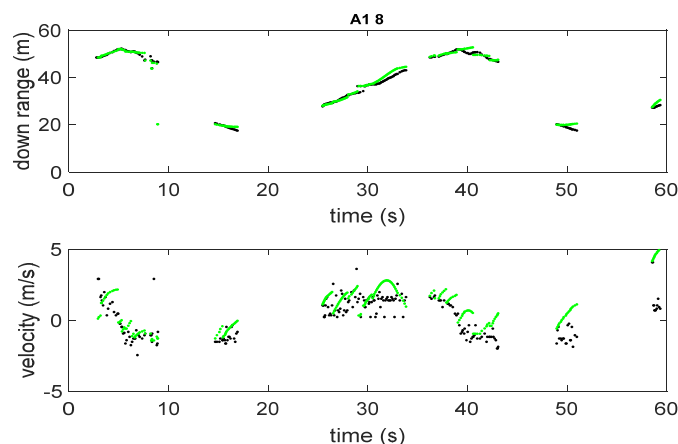
Resultaten gällande bestämning av antalet mål är lovande. Antalet falska detektioner är mycket lågt och i avsaknad av mål fås aldrig en felaktig uppgift att det finns ett mål. Ett mål räknas generellt rätt, men ibland kan det felaktigt bli två mål p.g.a. flervägsutbredningseffekter. Två mål på olika avstånd, eller två mål som möts (olika rörelseriktningar), räknas generellt rätt. Två mål som rör sig efter varandra (samma rörelseriktningar) kan felaktigt räknas som ett mål. Målen är då i samma avståndslucka och har ungefär samma hastighet.

4.2. Målföljning i kvarnmätningarna

Målföljning i tillämpningen se-runt-hörn har undersökts. Ett enkelt Kalmanfilter, se Ref [24], har implementerats och ett test av principen har gjorts på kvarndata.

Följningen har gjorts på detektioner i mätdata beskrivna ovan. Indata är uppmätta avstånd och hastigheter, samt tidssteget dt mellan detektionerna. Prediktion har gjorts av både avstånd och hastighet. Filtret initieras vid första tidssteget, om $dt > 0,5$ s (om det finns en stor lucka i detektionsdata), och om målet ändrar rörelseriktning.

För en person som går i rektangelbana fås en god prediktion av avstånd, se Figur 6. Prediktionen av hastighet är sämre men bestämningen av hastighet från mätdata är också mer osäker och varierar mer. För två personer som går efter varandra där det endast finns ett detektionsspår, fås bra prediktion av personernas gemensamma position. För två personer som går mot varandra och befinner sig i olika delar av banan, växlar predikerad position mellan de två målen. Filtret följer ett mål, sedan det andra målet, tillbaka till det första målet, osv. Det sammantagna resultatet är att målsparen följs ganska väl. När två mål är i samma del av banan och ej är upplösta i avstånd, följer filtret det gemensamma målsparet ganska väl.



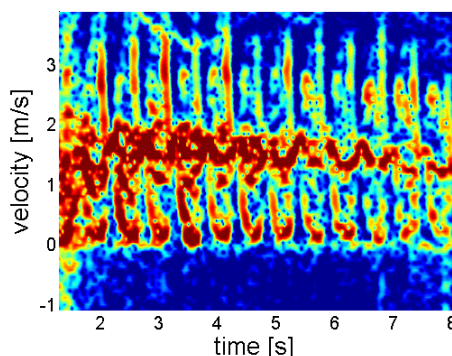
Figur 6. Uppmätta (svart) och predikerade (grönt) avstånd (överst) och hastigheter (underst) för en person som går i en rektangelbana (B0-B1-B2-B3 i Figur 5a).

Sammanfattningsvis är resultaten lovande. Implementerat filter är anpassat till ett mål och som förväntat blir det problem med två mål. Ett filter anpassat till att följa flera mål bör fungera även här. Denna analys har påvisat möjligheten till följning även i tillämpningen se-runt-hörn. Inga problem specifika för denna tillämpning har identifierats. Alternativa filter som partikelfilter skulle kunna testas.

4.3. Mikrodoppler av kvarnmätningarna

En särskild analys har visat att mikrodopplersignaturen bevaras efter flera väggreflektioner, se [6, 25]. Med mikrodoppler avses den dopplersignal som delar av ett objekt genererar, exempelvis arm- och benrörelsen hos en gående människa. Mikrodoppleranalys av några utvalda mätfall från ovan beskrivna Kvarnmätningar har redovisats i en vetenskaplig artikel som accepterats för publicering i *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* [25].

Som ett exempel visas i Figur 7 resultat från mätningar av en gående person i en parallelltrapetsbana, observerad efter två väggreflektioner. Här innebär positiva hastigheter att målet fjärrar sig från radarn. De oscillerande mönster som kan ses i diagrammet orsakas av pendlande rörelser från torso, ben och armar. Den högsta intensiteten (mörkröd) härrör från torsorörelsen med en hastighet på $\sim 1,6$ m/s. Arm- och benrörelser ses som periodiska signaturer med hastigheter mellan 0 och 3 m/s och en periodicitet på $\sim 0,6$ s. Mikrodopplersignaturen efter multipla väggreflektioner liknar signaturen från mätning av gående person i fri sikt, se t.ex. Björklund [26]. Det innebär en mikrodopplersignatur som extraheras från en radarsignal som genomgått multipla reflektioner bör kunna användas för klassificering av rörliga objekt runt hörn. Arbete med mikrodoppler har även genomförts inom delområdet Sensornätverk av radarsensorer, se kapitel 2.



Figur 7. Hastighets-tidsdiagram från en mätning av en person som går utmed en parallelltrapetsbana (delsträckan T0-T1 i Figur 5a). Notera att ju rödare färg desto högre amplitud.

4.4. Systemkoncept för positionering runt hörn

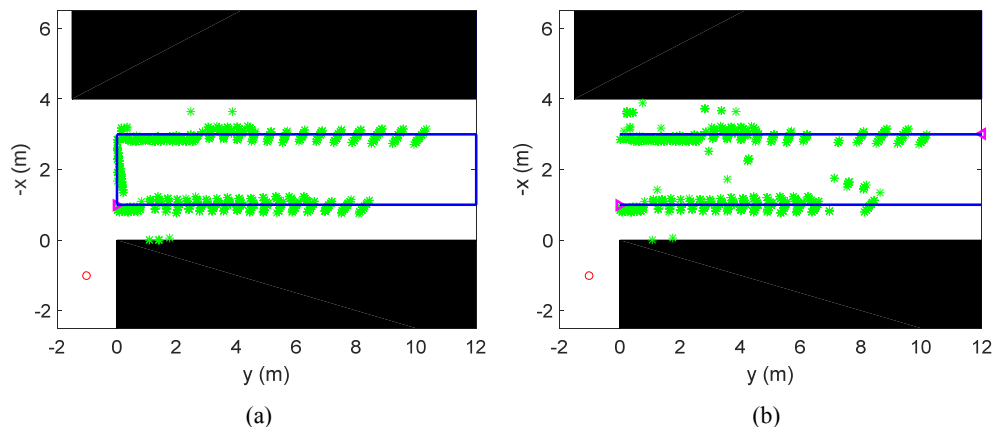
I tidigare projekt har en radarsystemlösning för att bestämma ett objekts position bakom ett hörn testats med beräkningar [6]. Det föreslagna radarsystemet har en styrbar antenn med en smal radarlob (drygt $2,5^\circ$) som skannar motsatt vägg. Radarn arbetar med stegad frekvens i frekvensintervallet 12-14 GHz. Målet är en metallcylinder med en radie på 20 cm och alla väggar är av metall. Beräkningarna, som utfördes i SE-Workbench: SE-RAY-EM [27], inkluderar inte diffraktion. Den fysikaliska modellen i SE-RAY-EM utgörs av geometrisk optik (GO), även kallad *ray-tracing*, i kombination med fysikalisk optik (PO). Detektioner görs med samma algoritm som i analysen av mätdata från Kvarnmätningarna, se Nilsson m.fl., [20].

För att kunna bestämma objektets position måste avståndet från radarns till hörnet och gatans bredd vara kända. Dessa avstånd kan vara kända sedan tidigare eller mätas upp på plats. Då även radarlobens riktning är känd vid varje tidpunkt kan alla detektionsavstånd enkelt översättas till positioner.

I år har ett utvidgat arbete påbörjats för att t ex studera om flera mål kan positioneras. Osäkerheter i geometrin har tidigare introducerats och systemets robusthet m a p dessa studeras vidare i de nya fallen. Att systemet är robust mot osäkerheter och störningar anses vara viktigare än att det ger position med hög noggrannhet.

Två exempel på positioneringsresultat visas nedan; ett mål som rör sig i en rektangelbana (Figur 8a) och två mål som rör sig i motsatta rakbanor (Figur 8b). Överensstämmelse med de faktiska rörelserna är goda. För fallet med ett mål erhålls få avvikande positioner. Objektets utsträckning tillsammans med avståndsupplösningen bidrar till att målsparat breddas.

Detektioner kan göras långt från hörnet med en god bestämning av position. I fallet med två mål som rör sig i motsatta riktningar kan båda detekteras samtidigt, men antalet felaktiga positioner ökar. Med flera beräknade fall kommer en bedömning av systemets pålitlighet kunna göras med större säkerhet. Dessutom underlättas algoritmutvecklingen av att ha flera fall att testa mot. Senare i projektet kan dels beräkningar göras i en geometri liknande den som användes i Kvarnmätningarna, dels kan radarsystemet göras rörligt genom att placera det på ett fordon.



Figur 8. Positionering (grön) av (a) ett mål som rör sig moturs i en rektangelbana (blå) och av (b) två mål som rör sig i separata, motsatta rakbanor (blå). Målens startpunkter och rörelseriktningar markeras med röda trianglar. Den röda cirkeln visar radarns position.

4.5. Slutsatser och förslag till fortsatt arbete

Analysen av kvarnmätningarna visar att detektion av rörliga mål bakom ett hörn är möjlig i en realistisk miljö. Flera mål kan särskiljas när avståndsupplösningen så tillåter och med hjälp av dopplersignalbehandling kan även mål i samma avståndslucka särskiljas under vissa förutsättningar. Med genomtänkta val av antenntposition kan en stor del av gatan övervakas, vilket gör det svårt för en person eller ett fordon att röra sig obemärkt i gatan. Den tillämpade analysmetoden, inklusive analys av dopplerspektrum, har visat sig vara robust för olika mät-situationer. Möjligheterna att räkna och följa mål har också påvisats. Mikrodopplersignaturer bevaras även efter väggreflektioner och kan ligga till grund för klassificering av olika objekt. Analys av detektioner, dopplerspektrum och mikrodopplerspektrum bör tillsammans ge förutsättningar för att utveckla metoder för att bättre upptäcka, följa och klassificera objekt.

Det koncept som redovisats för positionering visar lovande resultat. Det, eller liknande koncept som också utnyttjar multipelreflektioner för att åstadkomma robust positionering och följning av rörliga objekt runt hörn, bör vidareutvecklas med sikte på en möjlig systemlösning och eventuellt placeras på ett fordon.

5. Omvärldsbevakning

Inom projektet har två stycken omvärldsstudier genomförts under året. Den ena har kartlagt de väggpenetrerande system som finns tillgängliga på den kommersiella marknaden och den andra avser högupplösande bildalstrande system för detektion av hotobjekt under kläder.

5.1. Väggenpenetrerande radarsystem

En omvärldsstudie [28] som syftar till att kartlägga militära och civila väggpenetrerande radarsystem som idag finns tillgängliga att upphandla på den kommersiella marknaden har genomförts. Den redovisade informationen om systemen har främst inhämtats från öppna källor. Systemen presenteras kortfattat med tillhörande uppgifter om tekniska och ibland operativa prestanda.

Förmågan hos de system som identifierats varierar. Samtliga system klarar att upptäcka mänsklig rörelse bakom väggar, men vilken information som inhämtas och hur den presenteras för operatören varierar mellan systemen. De enklaste typerna förmår endast registrera att något rör sig bakom väggen, medan de mer avancerade systemen klarar att positionera och följa en eller flera personer i rummet, samt att presentera detta för operatören på systemets bildskärm.

Studien konstaterar att få nya väggpenetrerande system har tillkommit på marknaden sedan den förra omvärldsstudien och att utvecklingen av nya avancerade systemlösningar tycks ha avstannat. Nyutveckling har främst skett bland mindre, enklare och mindre kostsamma system, med förmåga att detektera och möjligen bestämma avståndet till bakomvarande rörliga objekt. Här märks de nya produkterna *Xaver 100* och *Range-R*, se Figur 9, samt det svenska systemet *CPR3* som uppgraderats till *CPR4*. Av de 2D- och 3D-avbildande systemen, baserade på UWB⁴-teknik och gruppantennlösningar, finns idag få konkurrenter till det israelisk-amerikanska systemet *Xaver 800* (Figur 10a), ifråga om tekniska och operativa prestanda.

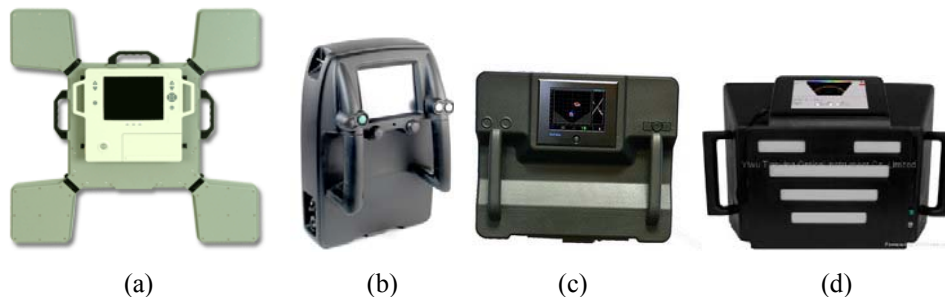


Figur 9. Exempel på nya kommersiella handhållna väggpenetrerande 1D-system. Den vänstra bilden (a) visar *Xaver 100* från Camero-Tech [29], bilden i mitten (b) visar exempel på operativ användning av systemet. Bilden till höger (c) visar det handhållna systemet *Range-R* [30] som enligt den amerikanska tillverkaren CyTerra är det minsta och lättaste av existerande väggpenetrerande system.

Nackdelen med de mer avancerade bildalstrande systemen, t.ex. *Xaver 800* (Figur 10a) och *Prism 200* (Figur 10b), är det höga priset, som beror på höga utvecklingskostnader, dyra systemkomponenter och små tillverkningsserier. Kostnadsaspekten är en begränsande faktor som måste vägas mot behovet av den extra information dessa system ger användaren. Jämfört med att bara ha tillgång till ett avancerat system under insatsen kan enklare och billigare alternativ bidra effektivt genom att fler soldater utrustas med systemen.

⁴ Ultra-Wide Band

Ett tecken på att marknaden är liten och konkurrensen hård för de mer avancerade systemen, är avvecklingen av amerikanska *RadarVision* och dess militära version *SoldierVision* från *Time Domain Inc* som var de första väggpenetrerande 2D-systemen.



Figur 10. Exempel på avancerade 2D/3D-system: (a) *Xaver 800* från israeliska *Camero-Tech* [31], (b) *Prism 200* från engelska *Cambridge Consultants* [32], (c) *ReTWis 4.3* från tjeckiska *Retia* [33] och (d) *SuperVision 1600* radarn från kinesiska *Tianying* [34].

Utveckling och tillverkning av väggpenetrerande system sker främst i USA och Israel, men i mindre skala också i Storbritannien, Kina, Tjeckien och Sverige. Studien visar att i princip samtliga system använder UWB-teknik för att skapa hög avståndsupplösning och använder dopplersignalbehandlingsmetoder för att detektera rörelser. Man kan också konstatera att den dominerande impulsradartekniken börjar ersättas av stegad eller svept frekvens för att syntetiskt generera korta pulser. Denna teknik ger mindre problem med att hantera stora kontrastskillnader mellan radarreturer från rörliga mål och läckage mellan sändar- och mottagarantenn, som är typiska för pulssade radarsystem.

De flesta tillverkare hävdar att deras system klarar att detektera mänskliga andningsrörelser. Att kunna avgöra vilka personer bakom väggen som rör sig och vilka som inte rör sig, kan vara användbart vid t.ex. gisslansituationer. De flesta tillverkare har även tillmötesgått behovet av att kunna fjärrstyra radarn och fjärravläsa data på t.ex. en bärbar dator. Ett fåtal system, som t.ex. *Xaver 400* och *Xaver 800*, har också kompletterats med förmåga att kunna avbilda stationära ekon från rummets interiör, såsom väggar, dörrars och möbler. Denna information kan i vissa situationer vara till stor nytta för att kunna avgöra var, när och hur en inbrytning eller en bekämpning ska göras.

I likhet med omvärldsstudien från 2011 konstaterar även denna studie att inget system klarar att avgöra vilka personer som bär vapen. Denna förmåga är av stort intresse för att kunna avgöra vilka personer som utgör potentiella hot och vilka som inte gör det. Givet den svåra propageringsmiljön och att detektionsmetoderna primärt är dopplerbaserade, är bedömningen att denna förmåga inte har förutsättningar att kunna realiseras.

5.2. Högupplösande bildalstrande system för detektion av hotobjekt under kläder

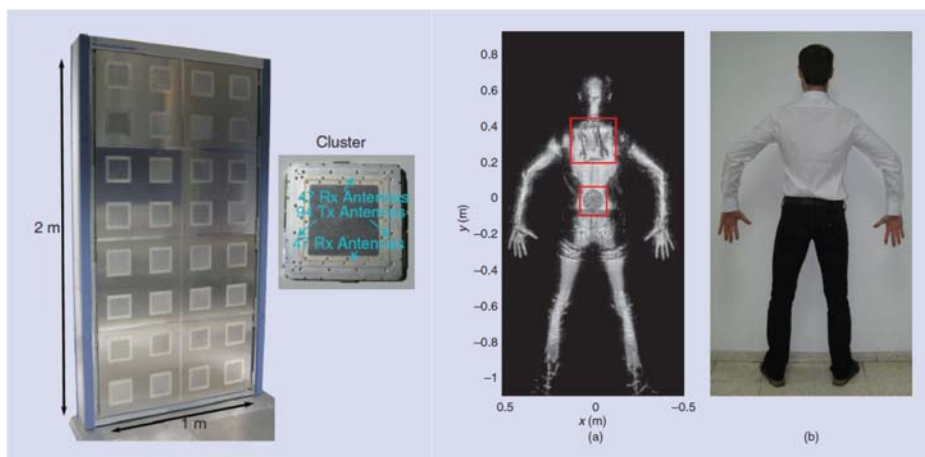
En omvärldsstudie har här genomförts [35] som omfattar ett antal publicerade bildalstrande system för detektion av hotobjekt under kläder. Exempel på hotobjekt kan vara dolda knivar, skjutvapen samt sprängämnen i form av t ex PBIED⁵. Systemen kan vara antingen passiva, aktiva eller både och. De kan vara avsedda för användning på mycket kort håll, s.k. portal-system, d.v.s. av den typ som nu finns installerade vid säkerhetskontroller på flygplatser, vissa offentliga byggnader etc., eller för användning på explosionssäkert avstånd, s.k. standoff-system. Sammanställningen inkluderar kommersiella system såväl som publicerade system på lägre TRL-nivå. Data på systemen är hämtade från öppna källor varför viktiga parametrar som t ex falsklarmsfrekvensen som regel saknas.

Omvärldsstudien sammanfattar den senaste utvecklingen (*state-of-the-art*) inom området personsanning med mm-vågs- och THz-teknik, och redovisar i dagsläget kända tillgängliga kommersiella system (inklusive några intressanta laboratorieprototyper). Dessutom beskrivs

⁵ *Person-Borne Improvised Explosive Devices*.

några tekniska utvecklingslinjer som på olika tidshorisonter bedöms kunna vara av intresse för att tillgodose befintliga såväl som nya behov inom området. När det gäller valet mellan passiva och aktiva system är bedömningen att aktiva system som regel är att föredra, speciellt för inomhusapplikationer. Genom att kombinera aktiva och passiva modaliteter kan dock i vissa fall ett mervärde erhållas. Kommersiella system av denna typ saknas dock. Rent allmänt kan sägas att tillgängliga portalsystem idag har adekvata prestanda om än bedömningen är att falsklarmsfrekvensen bör förbättras. När det gäller standoff-system kan sägas att tillgängliga system har alltför låg genomströmningshastighet samt för litet synfält/persontäckning, speciellt för scenarier där man vill övervaka större områden (torg, publika evenemang, etc). Användningen av elektroniskt bildalstrande system (där förekomsten av optomekaniska aktuatorer minimeras eller helt undviks) bör därför undersökas med avseende på möjligheten att uppnå större synfält och/eller snabbare bildtakt.

På portalsidan har utvecklingen av system baserat på elektronisk lobformning pågått ett tag och flera kommersiella system finns nu tillgängliga. Dessa system arbetar i frekvensområdet 25-80 GHz och är baserade på antingen reflectarray-teknik eller på multistatiska radararkitekturer med många simultana sändare och mottagare. Ett exempel på det senare är QPASS-systemet utvecklat av Rohde & Schwarz. Systemet som arbetar från 72 till 80 GHz är ett portalsystem som används på upp till 1 m mätavstånd. Radararkitekturen är ett MIMO-system (se avsnitt 2.1) med 3072 sändare och 3072 mottagare, se Figur 11. Systemet som baseras på FMCW⁶-teknik har en lateral upplösning på ca 2 mm och ca 15 mm i avstånd. Ett problem med denna typ av system är kostnaden som enligt uppgift ligger på omkring 200 kEUR samt den höga effektförbrukningen som krävs dels för att driva alla 6144 RF-kanaler och dels för den hårdvara som krävs för att utföra 3D-SAR-kompressionen i realtid.



Figur 11. Rohde & Schwarz QPASS imager (vänster). 3D radaravbildning av en person som gömmer två dielektriska föremål under kläderna, en vätskebehållare och ett konstgjort sprängmedel (höger).

För standoff-system krävs betydligt högre arbetsfrekvenser än för portalsystemen beroende på kravet på största tillåtna antennstorlek. Typiskt arbetar dessa system därför i frekvensområdet 220 - 670 GHz, beroende på upplösningskrav och mätavstånd. Högre frekvens ger bättre upplösning men samtidigt sämre genomträngning i kläder så valet är en kompromiss. Basteknologier som nu utvecklas snabbt och som bedöms kunna få stor betydelse för att möjliggöra industriell produktion även av denna typ av system är bl.a. halvledarkretsar i SiGe med gränsfrekvenser långt upp i sub-mm vågsområdet och integrerade byggsätt i Si för integrerade THz-system (mikromaskinsystem). FOI är för närvarande verksamt inom dessa områden i nära samarbete med universitet och högskolor. Andra intressanta utvecklingsområden av vikt för realtidssystem som arbetar med elektronisk lobformning är nya signalbehandlingsmetoder, t.ex. baserade på *compressive sensing* samt nya hårdvaruarkitekturer för snabb signalprocessering som t.ex. massivt parallelliserade hårdvaruarkitekturer för 3D-SAR-kompression.

⁶ Frequency-Modulated Continuous-Wave

6. NATO SET-155

Projektet medverkar i NATO-gruppen SET-155 *Advancing Sensing Through the Walls Technologies* (2009-2014), vilken är en fortsättning på NATO SET-100 (2005-2009) [36], i vilken FOI också medverkade. Gruppen består av representanter från USA (ARL, I2WD, Villanova University), Kanada (DRDC), Frankrike (Onera, DGA), Italien (IDS), Norge (FFI), Turkiet (ASELSAN) och Sverige (FOI). Gruppens främsta uppgift är att bidra till framtagning av metoder och tekniska lösningar för väggpenetration som ger förbättrade möjligheter till detektion av mänsklig aktivitet samt ger tydligare avbildningar av rumsliga exteriörer. För att åstadkomma detta utnyttjas dels resultat från medlemsnationernas pågående forskning och dels resultaten från det gemensamma fältförsök som genomfördes i Kanada i oktober 2013 med de olika nationernas väggpenetrerande system. I Figur 12 visas försöksdeltagarna och några av de system som användes. FOI utförde mätningar med tre system från det svenska företaget Cinside. Insamlat mätdata är tillgängligt för alla nationer och kan t.ex. användas som referens vid utveckling och testning av detektionsalgoritmer och simuleringsprogram. För en mer detaljerad beskrivning av gruppens syfte och arbete hänvisas till Ref. [37].

Under 2015 har arbetet enbart handlat om att sammanställa den omfattande officiella slutrapporten. Detta arbete är ännu pågående och slutrapporten utges troligen 2016. Huvudfokus för rapporten är redovisning, analys och jämförelse av mätresultat från de olika testade systemen.

En kvittens på att gruppens arbete och forskningsinsatser inom området ligger på en hög nivå manifesteras av det faktum att SET-155 under året blev nominerad till *SET Panel Excellence Award*.



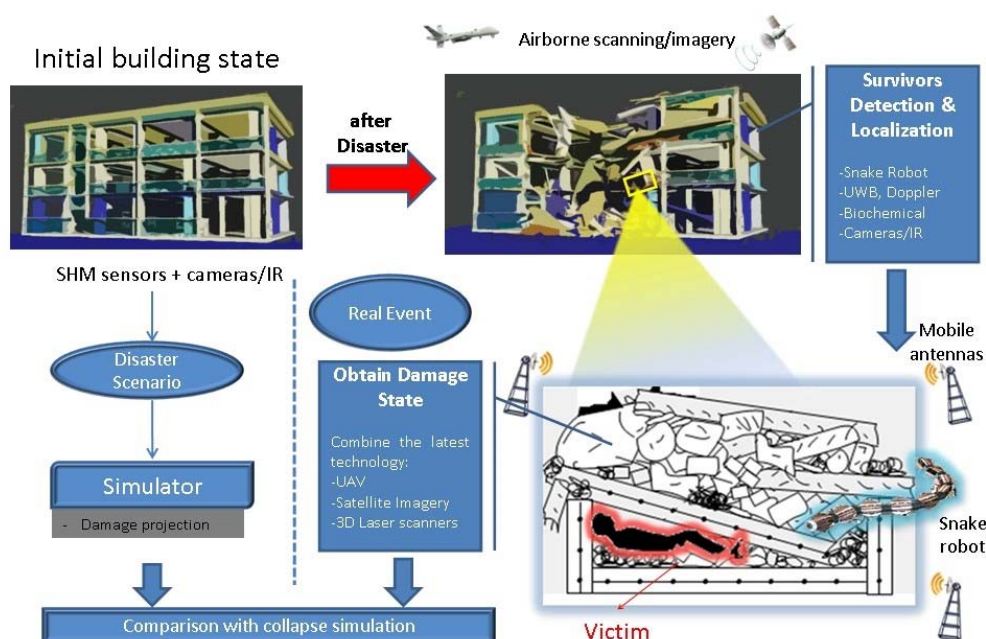
Figur 12. Deltagarna i det gemensamma fältförsöket. I bakgrunden syns antennerna till de väggpenetrerande SAR-systemen från DRDC (skåpbil) och FFI (personbil). Personen i vit jacka håller ett prototypsystem från IDS. En CPR3-enhet från Cinside är monterat på stativ och hålls av fjärde personen från höger.

7. Medfinansiering av INACHUS

Radar för övervakning har medfinansierat EU FP7 projektet *INACHUS* som startade 1 januari 2015 och planeras pågå fram till 31 december 2018. Projektet koordineras av ICCS (Grekland) och totalt deltar 20 partners (inklusive slutanvändare) från 10 länder. Från Sverige deltar, förutom FOI, även Cinside och Södertörns brandförsvär. Projektet presenterades nyligen i form av en poster på konferensen TAMSEC 2015 [38].

Projektets syfte är att ta fram teknik och metodik för att kunna detektera och lokalisera levande människor begravnade i rasmassor. Kärnan i projektet är att utveckla en ormliknande robot, bestyckad med sensorer för att detektera människor i rasmassor (radar, elektronisk näsa, högtalare, mikrofon, IR- och visuella kameror). Roboten ska kunna ta sig in i håligheter större än 20 cm och kunna förflytta sig inåt i rasmassan.

Den huvudsakliga tillämpningen för projektet är tekniskt stöd till *Search-And-Rescue* (SAR) personal vid räddningsaktioner efter jordbävningar. Figur 13 ger en illustration av INACHUS-konceptet.



Figur 13. Illustration av INACHUS-konceptet.

FOI deltar i sex olika tekniska arbetspaket varav den huvudsakliga verksamheten sker inom två arbetspaket; *WP4 - Wide area surveillance tools*, där 3D-laserskanningsmetodik studeras, och *WP5 - Victim localisation solutions*, där sensorer utvecklas (FOI som leder arbetspaketet studerar radarsensorer och seismiska sensorer). FOI arbetar dessutom med framtagning av relevanta scenarier och inom området integration/validering av utvecklad teknik.

Under projektets första år har fokus varit behovs- och scenariodefinition. Under två workshops har tekniska presentationer hållits för och diskuterats med slutanvändare för att identifiera och analysera behovsbilden för att i förlängningen skapa relevanta tekniska lösningar på SAR-styrkornas behov.

Nyttan för FOI har hittills varit att vi genom kontakter med slutanvändare fått ökad förståelse av behovsbilden för tekniskt stöd vilket även ger nytta inom FoT-verksamheten, där i förlängningen FOI-utvecklad teknik, metodik och koncept ska komma till nytta. Den antenn- och radarsystemdesign som ingår i *INACHUS*, bidrar till att utveckla FOI kompetens och stärka vår expertroll inom gruppantennbaserad radar.

8. Referenser

- [1] S. Nilsson, D. Axelsson, M. Gustafsson, A. Jänis, H. Habberstad, L-G. Huss, M. Karlsson, J. Kjellgren, H. Larsson, D. Letalick, A. Sume, A. Örbom: "Teknisk värdering av nya sensorförmågor för strid i bebyggelse – Slutrapport", FOI-R--2138--SE, 2006.
- [2] S. Nilsson, M. Gustafsson, M. Karlsson, J. Kjellgren, H. Larsson, A. Sume, A. Örbom: "Radarsensorer för urban miljö – Slutrapport", FOI-R--2137--SE, 2006.
- [3] S. Nilsson, M. Gustafsson, M. Herberthson, T. Johansson, A. Jänis, J. Rahm, A. Sume, A. Örbom: "Se-runt-hörn med radar – Slutrapport", FOI-R--2939--SE, 2009.
- [4] S. Nilsson, R. Gunnarsson, M. Gustafsson, M. Karlsson, J. Kjellgren, T. Martin, J. Rahm, A. Sume, A. Örbom: "Lokal stridsfältsovervakning i urban miljö - Slutrapport 2008", FOI-R--2615--SE, 2008.
- [5] S. Nilsson, M. Gustafsson, M. Herberthson, T. Johansson, A. Nelander, A. Nezirovic, J. Rahm, A. Sume, N. Wellander, A. Örbom: "Penetrerande radarsystem för urbana operationer – Slutrapport", FOI-R--3317--SE, 2011.
- [6] S. Nilsson, Å. Andersson, T. Boman, M. Gustafsson, T. Johansson, M. Karlsson, A. Sume, A. Örbom, "Radar för stridsfältsovervakning. Slutrapport 2014", FOI-R--3970--SE, 2014.
- [7] DJI Phantom III Drone. Url 2015: <http://www.dji.com/products/phantom>
- [8] Kane Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media". IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 14 (3), pp. 302–307, 1966.
- [9] A. Taflove, "Application of the finite-difference time-domain method to sinusoidal steady state electromagnetic penetration problems". IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 22 (3), pp. 191–202, 1980
- [10] R. S. Thomä, et al, "UWB sensor networks for position location and imaging of objects and environments", *Short-Range Wireless Communications: Emerging Technologies and Applications* (2009): 97-112.
- [11] A. M. Haimovich, R. S. Blum, and L. J. Cimini, "MIMO radar with widely separated antennas", *Signal Processing Magazine, IEEE* 25.1 (2008): 116-129.
- [12] C. Qiu, et al., "A Survey of Motion-Based Multitarget Tracking Methods", *Progress In Electromagnetics Research B* 62 (2015): 195-223.
- [13] G. A. Andrews, "Airborne Radar Motion Compensation Techniques - Evaluation of TACCAR," NRL Report NRL-7407, 1972.
- [14] Y. K. Kwag, "An airborne radar system with adaptive MTD Doppler compensation scheme using DSP based real-time spectral estimation, proceedings IEEE Radar conference," doi:10.1109/RADAR.2008.4720780, 2008.
- [15] Y. Lin, X. Xu, J. Pang, B. Li, och R. Zhou, "The New Mathematical Model of Motion Compensation for Stepped-Frequency Radar Signal, Mathematical Problems in Engineering," Volume 2014, Article ID 142482, 2014.
- [16] S. Huel och H. Rohling, "Pedestrian recognition in automotive radar sensors," Proc. 14th International Radar Symposium (IRS), p. 732-739, 2013.
- [17] H. Rohling och M.-M. Meinecke, "Waveform design principles for automotive radar systems," Proc. CIE International Conference on Radar, 2001.
- [18] H. Rohling och C. Möller, "Radar waveform for automotive radar systems and applications," Proc. IEEE Radar Conference, doi:10.1109/RADAR.2008.4721121, 2008.

- [19] B. M. Keel och J. M. Baden, "Advanced Pulse Compression Waveform Modulations and Techniques," i: W. L. Melvin, J. A. Scheer (Eds.), *Principles of Modern Radar – Advanced Techniques*, 2013.
- [20] S. Nilsson, Å. Andersson, M. Gustafsson, M. Herberthson, T. Johansson, A. Sume, och A. Örbom: "Se-runt-hörn-mätningar i Kvarn" FOI Memo 5010, 2014.
- [21] T. Johansson, A. Örbom, A. Sume, J. Rahm, S. Nilsson, M. Herberthson, M. Gustafsson, Å. Andersson, "Radar measurements of moving objects around corners in a realistic scene", *Proc. SPIE*, vol. 9077, doi:10.1117/12.2049588, 2014 (FOI-S--4699--SE).
- [22] J. Rahm, T. Johansson, J. Gustavsson, S. Nilsson, A. Sume and A. Örbom, "Detection of human activity behind the wall - analysis of radar measurements", FOI-R--2996--SE, FOI, 2010.
- [23] A. Sume, S. Nilsson, J. Rahm, A. Örbom, "Radarmätningar med realistisk väggtyp för verifiering av se-runt-hörnprincipen", FOI-R--2688--SE, 2008.
- [24] E. Brookner, "Tracking and Kalman filtering made easy", John Wiley & Sons, 1998.
- [25] M. Gustafsson, Å. Andersson, T. Johansson, S. Nilsson, A. Sume, A. Örbom, "Extraction of Human Micro-Doppler Signature in an Urban Environment Using a 'Sensing-Behind-the-Corner' Radar", accepterad för publicering i *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015.
- [26] S. Björklund, H. Petersson, A. Nezirovic, M. B. Guldogan, F. Gustafsson, "Millimeter-wave radar micro-Doppler signatures of human motion", *Proc. Int. Radar Symp. (IRS 2011)*, pp. 167-174, 2011.
- [27] OKTAL Synthetic Environment, SE-Workbench: SE-RAY-EM. Frankrike, 2010. (Software) Tillgänglig: <http://www.oktal-se.fr> (16 oktober 2013).
- [28] S. Nilsson: "Väggpenetrerande radarsystem – Omvärldsstudie 2015", FOI-R--4122--SE, 2015.
- [29] http://www.camero-tech.com/files/files/Xaver100_web.pdf
- [30] <http://www.range-r.com/>
- [31] <http://www.camero-tech.com/files/files/Xaver800.pdf>
- [32] <http://www.cambridgeconsultants.com/prism-200/technical-specification>
- [33] <http://www.retwis.com/en/retwis>
- [34] http://www.nightvisioncn.com/sdp/625512/4/pd-3235797/5016779-1745273/SuperVision-1600_Through_Wall_Rada_Life_Detector.html
- [35] J. Svedin: "Högupplösande bildalstrande system för detektion av hotobjekt under kläder", FOI Memo 5606, 2015.
- [36] S. Nilsson: "Kommentarer kring slutrapport NATO SET-100/RTG056 - Sensing Through the Walls Technologies", FOI Memo H655, september 2009.
- [37] S. Nilsson, M. Gustafsson: "Status report NATO SET-155 RTG-085 - Advancing Sensing Through the Walls Technologies", FOI Memo 3273, september 2010.
- [38] G. Tolt, A. Gustafsson, D. Axelsson, et. al., "The EU FP7 project INACHUS," *Proceedings of the TAMSEC Conference*, Stockholm, Sweden, Nov. 24-25 2015.

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.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se