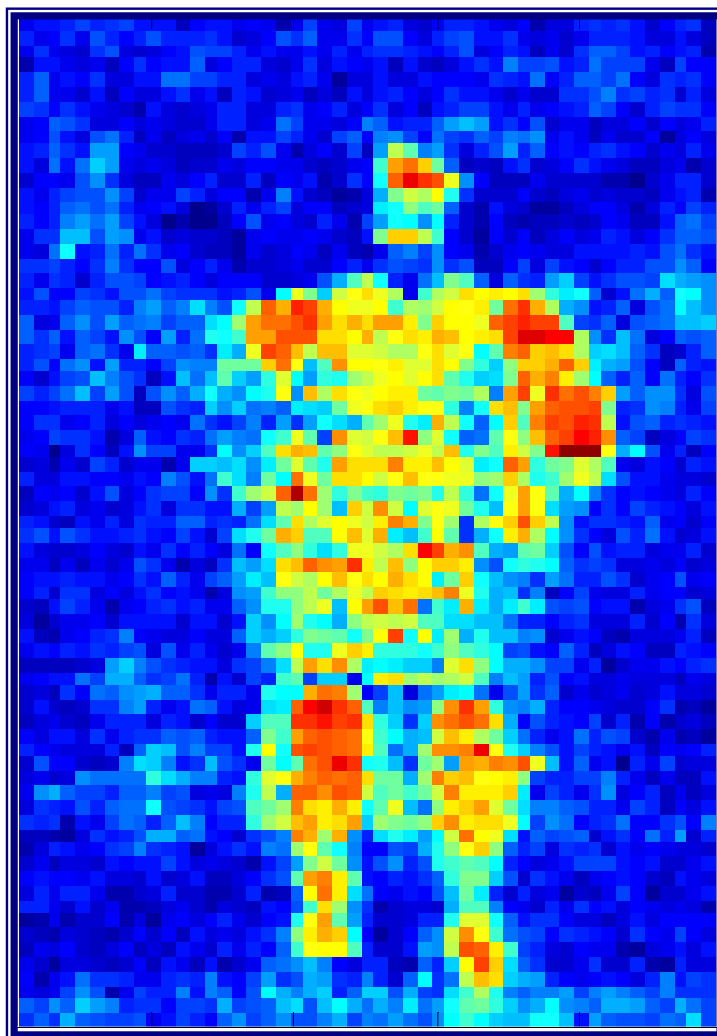


Väggpenetrerande radar En omvärldsanalys

Stefan Nilsson
Dan Axelsson
Magnus Gustafsson
Anna Jänis
Jan Kjellgren
Ain Sume



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1350 anställda varav ungefär 950 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, bedömningen av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
Sensorteknik
Box 1165
581 11 Linköping

Tel: 013-37 80 00
Fax: 013-37 81 00

www.foi.se

Stefan Nilsson

Dan Axelsson, Magnus Gustafsson

Anna Jänis, Jan Kjellgren och Ain Sume

Väggpenetrerande radar

En omvärldsanalys

Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1774--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 4. Ledning, informationsteknik och sensorer	
	Månad, år December 2005	Projektnummer E3065,E3081
	Delområde 42 Spaningssensorer	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Stefan Nilsson Dan Axelsson Magnus Gustafsson Anna Jänis Jan Kjellgren Ain Sume	Projektledare Stefan Nilsson	
	Godkänd av Lena Klasén	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Stefan Nilsson	
Rapportens titel Väggenpenetrerande radar - En omvärldsanalys		
Sammanfattning (högst 200 ord) <p>Föreliggande rapport syftar till att ge en översikt av pågående systemutveckling angående väggenpenetrerande radar. Informationen har inhämtats från olika tidsskrifter, proceedings och via sökning på internet. Nyare referenser har prioriterats framför äldre. Rapporten är framförallt inriktad mot systemutveckling men beaktar vissa intressanta experimentella resultat upptagna med försöksutrustningar. Ett fåtal arbeten rörande simulering/modellering kommenteras. Publikationer innehållande experimentell bestämning av transmissionsegenskaperna för olika typer av väggmaterial redovisas översiktligt. Rapporten beskriver också den verksamhet rörande väggenpenetrerande radar som bedrivs vid FOI Sensorteknik i Linköping.</p> <p>Rapporten avslutas med att redovisa slutsatser från den genomförda omvärldsanalysen. Med bakgrund av det angelägna internationella behovet av system för att detektera människor genom väggar är det anmärkningsvärt att hittills endast ett enda operativt system tagits fram: RadarVision/ SoldierVision. Ett viktigt konstaterande är att FOI Sensortekniks systemarbeten och experimentella resultat rörande väggenpenetrerande radar står sig väl också vid en internationell jämförelse.</p>		
Nyckelord Se igenom väggen, väggenpenetration, TWS, TWI, TWIS, TTW, UWB-radar		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 39 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--1774--SE	Report type User report
	Programme Areas 4. C4ISTAR	
	Month year December 2005	Project no. E3065, E3081
	Subcategories 42 Above water Surveillance, Target acquisition and Reconnaissance	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Stefan Nilsson Dan Axelsson Magnus Gustafsson Anna Jänis Jan Kjellgren Ain Sume	Project manager Stefan Nilsson	
	Approved by Lena Klasén	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Stefan Nilsson	
Report title (In translation) Wall penetrating radar - A survey		
Abstract (not more than 200 words) <p>The report aims at giving an overview of current system development concerning wall-penetrating radar. The information has been gleaned from various journals, proceedings and Internet searches. More recent references have been given priority over older ones. The report is primarily directed towards system development but considers some interesting experimental results obtained with test equipments. A few works concerning simulation/modeling are commented. A summary account is given of publications containing experimental determination of the transmission properties of various types of wall material. The report also describes the activity concerning wall-penetrating radar at the Sensor Technology Division of FOI at Linköping.</p> <p>Finally, conclusions are drawn about the analysis of the activities in the outside world. Considering the pressing international need for systems for the detection of humans through walls it is noteworthy that up to now only one operative system has been developed: RadarVision/SoldierVision. An important observation is that the system work and experimental results of FOI Sensor Technology concerning wall penetrating radar hold their own also in international comparison.</p>		
Keywords see through the wall, wall penetrating radar, TWS, TWI, TWIS, TTW, UWB-radar		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 39 p.	
	Price acc. to pricelist	

1	INLEDNING	6
2	BEHOVSBILD	7
3	VÄGGPENETRERANDE RADAR	8
4	FÖRSÖKSSYSTEM, OPERATIVA SYSTEM.....	11
4.1	RADAR FLASHLIGHT, GTRI (US).....	11
4.2	MARS, RAYTHEON (US)	12
4.3	RADARVISION/SOLDIERVISION, TIME DOMAIN (US)	13
4.4	PMC - PASSIVE MILLIMETRE-WAVE CAMERA, TREX ENTERPRISES (US).....	14
4.5	IMPŠAR AVBILDANDE RADAR, EUREKA AEROSPACE (US)	15
4.6	HANDBUREN FMCW-RADAR, TNO (NL)	17
4.7	VÄGGPENETRERANDE UWB-RADAR, AKELA (US).....	17
4.8	CAMERO (ISRAEL).....	18
4.9	PRISM 100, CAMBRIDGE CONSULTANTS LTD. (UK).....	19
4.10	PRISM 200, CAMBRIDGE CONSULTANTS LTD. (UK).....	19
4.11	EMMDAR, CYTERRA (US).....	21
4.12	AVID, COSATT LTD. (UK).....	21
5	MODELLERINGAR, SIMULERINGAR	22
5.1	FÖRMÅGA HOS UWB SP RADAR, DRDC (CA)	22
5.2	SYNTETISK APERTUR LOBFORMNING	23
6	MODELLBASERADE TOLKNINGAR AV MÄNSKLIG RÖRELSE.....	24
7	BESTÄMNING TRANSMISSIONSEGENSKAPER FÖR BYGGMATERIAL.....	25
8	VERKSAMHET VID FOI	27
8.1	AVBILDANDE VÄGGPENETRERANDE MÄTNINGAR VID 94 GHz.....	27
8.2	AVBILDANDE VÄGGPENETRERANDE MÄTNINGAR VID 28-40 GHz	29
8.2.1	<i>Tillvägagångssätt</i>	30
8.2.2	<i>Resultat</i>	30
8.3	UTVECKLING AV HANDBUREN VÄGGPENETRERANDE RÖRELSEDETEKTOR MINIRADAR II.....	32
8.4	BESTÄMNING AV TRANSMISSIONEN FÖR BYGGMATERIAL VID 1 - 110 GHz	33
8.4.1	<i>Transmission uppmätt i vågledare</i>	33
8.4.2	<i>Transmission uppmätt i frirymd</i>	34
8.4.3	<i>Fuktighetsmätningar</i>	35
9	SLUTSATSER.....	36
10	REFERENSER.....	37

1 Inledning

Föreliggande rapport syftar till att ge en översikt av pågående systemutveckling angående väggpenetrerande radar. Informationen har inhämtats från olika tidsskrifter, proceedings och via sökning på internet. Nyare referenser har prioriterats framför äldre.

Rapporten är framförallt inriktad mot systemutveckling men beaktar vissa intressanta experimentella resultat upptagna med försöksutrustningar. Ett fåtal arbeten rörande simulering/modellering kommenteras. Publikationer innehållande experimentell bestämning av transmissionsegenskaperna för olika typer av väggmaterial redovisas översiktligt. Rapporten beskriver också kortfattat den verksamhet rörande väggpenetrerande radar som bedrivs vid FOI Sensorteknik i Linköping. Rapporten avslutas med några slutsatser från den genomförda omvärldsanalysen.

Framtagningen av denna rapport har skett inom ramen för projekten *Sensorteknik för urban miljö* och *Teknisk värdering av nya sensorförmågor för strid i bebyggelse*. Rapporten utgör en milstolpe för det förstnämnda projektet.

2 Behovsbild

Städer har genom sitt symbolvärde, geografiska placering, koncentration av makt och rikedom varit strategiska mål för många historiska konflikter. Den nutida situationen utgör inget undantag, en allt större andel av världens befolkning bor i städer, och denna trend förstärks allt mer. Städernas strategiska betydelse har idag blivit än mer uttalad. Sannolikheten för att framtida militära konflikter förläggs till städer ökar således, och städerna blir samtidigt allt intressantare måltavlor för olika former av terrorism. Senare års konflikthärddar och terroristattentat vittnar tydligt om detta.

Den komplexa urbana miljön skiljer sig avsevärt från det traditionella tvådimensionella slagfältet, karakteriserat av långa obrutna siktlinjer, vilka övervakades med hjälp av långräckviddiga spaningshjälpmedel. Det nya urbana stridsfältet är tredimensionellt, artificiellt, och motståndare blandas med civil befolkning. Strid i bebyggelse innebär korta stridsmoment med synnerligen hög intensitet och korta stridsavstånd från någon meter och sällan överstigande 100-200 m. Denna miljö ställer helt nya krav på taktisk disposition, soldaternas förmåga, och inte minst på förmågan hos understödjande sensorsystem. Bland de nya sensorförmågor som efterfrågas, är knappast någon högre prioriterad än förmågan att från utsidan kunna ”se igenom” väggar, golv och tak i byggnader. Få moment i den urbana striden är mer riskabla för den enskilde soldaten än då byggnader ska genomsökas. Utrustad med ett sensorsystem som kan detektera om ett angränsande rum innehåller människor eller inte, kan vara helt avgörande för utgången av uppdraget. Väggenetrerande sensorförmåga är samtidigt mycket intressant vid olika typer av polisiära insatser mot grov brottslighet eller terrorism.

I augusti 1999 startade US Air Force Research Laboratory Information Directorate (AFRL/IF) och National Institute of Justice (NIJ/OST) ett gemensamt program för att demonstrera existerande sensorer, och utveckla nya sensorer, för detektion av gömda vapen och övervakning av personer genom väggar. I USA är dessa förmågor de högst prioriterade på såväl statlig som delstatsnivå.

United States Army och United States Marine Corps har insett att man saknar det teknologiska övertaget i den urbana miljön jämfört med andra miljöer. Tillsammans formades Urban Terrain Advanced Concept Technology Demonstration (MOUT ACTD), för att visa på de militära behoven av ny teknologi kombinerad med nya operationella koncept för att öka stridande förmåga och överlevnad hos arme- och marinkårssoldater [32]. Inom MOUT ACTD har 32 operationella krav identifierats för vilka teknologiska lösningar söks. Det sjunde kravet avser väggpenetrerande sensorförmåga. Idealt ska detta vara en liten handhållen sensor med kapacitet att snabbt avgöra om ett rum är tomt, eller ockuperat av vän eller fiende.

I Kanada har Royal Canadian Mounted Police (RCMP) och Canada Customs and Revenue Agency (CCRA) uttryckt intresse för en teknologi för detektion av vapen och droger genom kläder och bagage [6].

Inom den svenska Försvarsmaktens studie MOUT 2010 har man genomfört studieförsök samt studerat olika ämnesområden för att hitta materiel och metoder för att höja effekten för förband vid genomförandet av insatser i bebyggelse. I studien beaktas såväl den nuvarande som den framtida organisationen. FM anger att förmågan att inhämta och delge underrättelser på bataljons-, kompani- och plutonsnivå måste förbättras. FM måste etablera förmåga att se "runt hörn" och "se in" i byggnaden. Utredningen konstaterar att utveckling av utrustning för detektion av rörelser eller respiratoriska rörelser genom vägg eller hinder pågår. Syftet är att kunna hitta en motståndare eller civila innan insats sker. Studien anser att tekniken är mycket intressant och är ett nödvändigt verktyg vid insats i urban miljö. I Norrköping i februari 2005 genomfördes, på initiativ av Markstridsskolan /StriteKE, demonstration av det amerikanska väggpenetrerande systemet "Soldier Vision". Studien rekommenderar Försvarsmakten att genomföra fler materielförsök med den här typen av utrustning så fort den är operativt mogen.

3 Väggenpenetrerande radar

Mikrovågor har till skillnad EM-strålning i det optiska våglängdsbandet (används i IR- och Laser) förmåga att passera igenom optiskt täta material. Denna penetrationsförmåga beror av radiovågans frekvens, det aktuella materialets tjocklek och dess dielektriska egenskaper. En allmän tumregel är att radiovågor med låg frekvens dämpas mindre i ett visst specifikt material än mer högfrekventa radiovågor. Ju högre dielektricitetskonstant (svarar mot förmågan att leda elektrisk ström) desto mer dämpas radiovågen i materialet. I det extrema fallet där materialet utgörs av perfekt ledande metaller sker ingen genomträngning. Väggar, tak och golv i de flesta förekommande byggnader är normalt inte tillverkade i metalliska material. Undantag finns dock, och de utgörs främst av ytterpaneler och yttertak i plåt. I betongväggar förekommer ofta armeringsjärn och i övriga väggar finns ofta elektriska ledningsdragningar. Metalliska skikt är helt dämpande medan mer glesa linjestrukturer, såsom armeringsjärn, medger viss transmission.

Med denna bakgrund blir den naturliga systemlösningen för att se igenom väggar och andra hinder baserad på radartechnik. Visserligen kan system baserade på ultraljud också utgöra ett alternativ (klarar att penetrera metalliska väggar) men problemen med hög luftdämpning, flerskiktutbredning och avsaknad av stand-off förmåga, gör denna teknik alltför begränsad [41].

Genom att utsända mikrovågsstrålning med känd vågform (CW, FMCW, puls, etc) kan information inhämtas om objekt som befinner sig bakom väggen. Den del av radarstrålningen som penetrerar väggen, reflekteras av bakomliggande objekt, och transmitteras åter genom väggen för att slutligen insamlas av mottagarantennen. Genom lämplig systemutformning och lämpliga signalbehandlingsmetoder kan såväl avstånd som riktning till objekten bestämmas. En grundförutsättning för detektion är dock att signalbrusförhållandet S/N är tillräckligt stort. Genom att utsända en bredbandig signal kan

förmåga till avståndsupplösning erhållas. Ju större bandbredd, B , som används, desto högre blir avståndsupplösningen Δr , enligt uttrycket:

$$\Delta r = \frac{c}{2B}$$

Förmågan till hög avståndsupplösning kan användas för att separera objekt i avstånd och för att detektera radiella lägesförändringar (rörelser) hos ett objekt. Ett sätt att generera bredbandig radarstrålning är att utsända mycket korta pulser. Den systemutveckling som pågår runt om i världen rörande väggpenetrerande radar är främst inriktad mot system som utnyttjar extremt bredbandiga signaler, s.k. UWB (Ultra-Wideband) radar.

Definitionen på UWB är att bandbredden är minst 25 % av centerfrekvensen. Det finns tre olika metoder att generera UWB: 1) frekvensmodulation, 2) stegrad frekvens, 3) utsändande av korta pulser (SP, Short Pulse). UWB SP radar är den vanligaste metoden och typiskt utsänds pulser med varaktighet från 0.1 ns till några få ns.

Poliser har i mer än ett decennium tagit hjälp av markpenetrerande UWB-radar vid sökandet efter nedgrävda föremål [42]. Denna teknik att penetrera jordlager kallas GPR (Ground Penetrating Radar) och utvecklades från början för detektion av minor. Erfarenheterna från denna applikation kan nu utnyttjas för detektion genom väggar.

Användningen av UWB-radar måste ske med försiktighet eftersom den naturligt riskerar att störa ut viktig radiokommunikation. Den 14 februari 2002 utfärdade den amerikanska statliga myndigheten FCC (Federal Communication Commission) en s.k. ”Report and Order” som reglerar försäljning och användning av produkter baserade på UWB-teknik [17][18]. I denna standard föreskrivs tillåtna frekvensband och aktörer. Väggpenetrerande UWB-radar anges explicit och FCC meddelar att sådana system tillåts operera på frekvenser under 960 MHz eller inom frekvensbandet 1.99-10.6 GHz. Vidare fastslår FCC att användningen av dylika system (som detekterar position eller rörelser av personer och andra objekt genom väggar) begränsas till poliser, brand- och räddningspersonal. Den tillåtna frekvensdomänen för TWS* är medvetet försiktigt tilltagen, eftersom erfarenheten från användning av dylika system är ringa, då produkter i princip saknas. FCC kommer med jämna mellanrum att göra översyn av denna standard och med tiden kan det tillåtna frekvensområdet komma att utvidgas. FCC meddelar att eventuella överträdelse mot denna standard kommer att bemötas kraftfullt.

De radarsystem som utvecklas för att se igenom väggar är huvudsakligen utformade för att detektera ett statiskt eller ett rörligt mål. Detektion av statiska objekt använder en eller flera av de rumsliga dimensionerna för att skapa en tolkningsbar bild. Framförallt är det förmåga till hög vinkelupplösning (tvärsledd) som här eftersträvas. Vinkelupplösningen ökar med frekvensen och med antennaperturens storlek. För att bygga upp en bild med hög vinkelupplösning krävs att antennen snabbt kan inriktas till nya positioner (antingen

* I den engelskspråkiga litteraturen förekommer olika förkortningar som anknyter till väggpenetrerande radar: TWI - Through-wall-imaging, TWS - Through-wall-sensing, TTW - Through-the-wall.

mekaniskt, via spegelsystem eller helst genom elektrisk styrning). Detektion av rörliga objekt nyttjar den reflekterade signalens förändring i doppler. Beträffande människor är såväl normal rörelse som andningsrörelser möjliga att detektera. I en statisk omgivning är dopplerförskjutningen från en människa i rörelse fri från klotter och även mycket svaga signaler blir möjliga att detektera [30].

Det finns flera faktorer som begränsar möjligheten att se igenom väggar med radar och en del av dessa faktorer är mindre kända. Den viktigaste begränsningen är den dämpning av radarvågen som olika väggmaterial orsakar. I vissa innerväggar, t.ex. gips, är dämpningen relativt låg medan andra byggmaterial som armerad betong uppvisar hög dämpning. Fuktighetshalten i materialen är en annan viktig faktor som starkt begränsar radarvågors genomträngning. Klotterbetingelser och målobjektets radarspridande egenskaper är lite kända och mycket information saknas här [29].

Passiva system som nyttjar att personer utsänder egenemitterad mikrovågsstrålning, alternativt att personer blir belysta av någon naturlig eller artificiell mikrovågskälla är intressanta för att detektera gömda vapen, etc under kläder. Men dessa system är knappast aktuella för att kunna detektera människor genom väggar då de förhållandevis låga effekterna dämpas för mycket.

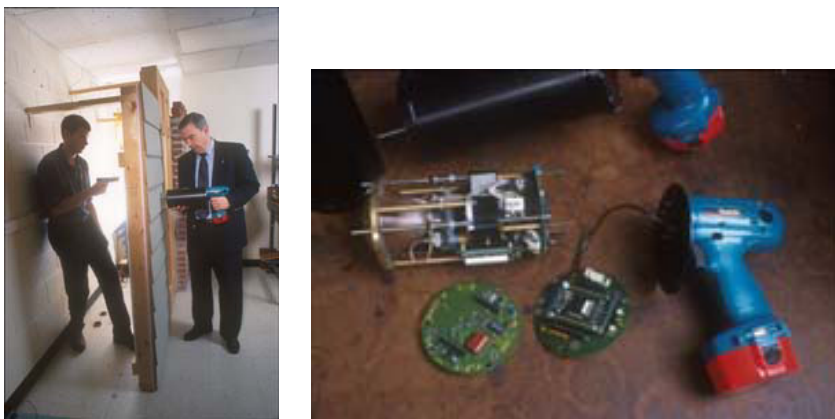
Radarns robusthet mot olika vädersituationer, damm och rök samt mörker är naturligtvis också en fördel i den urbana miljön. Inom vissa delar av millimetervågsbandet är atmosfärsdämpningen förhållandevis kraftig, men den urbana miljöns korta siktsträckor gör att även dessa våglängdsband kan användas.

4 Försökssystem, operativa system

4.1 Radar Flashlight, GTRI (US)

Radar Flashlight är ett prototypsystem som började utvecklas vid Georgia Tech Research Institute (GTRI) omkring 1995. I en artikel från 2001 [15] framgår att Radar Flashlight tagits fram för detektion av andningsrörelser hos en person stående bakom en vägg, en dörr eller något annat slutet utrymme med väggar av icke ledande material. Användning av systemet för penetration av vegetation har också studerats. Radar Flashlight bygger på tidigare forskning utförd vid GTRI där man under mitten av 1980-talet utvecklade ett FM-system för att på avstånd kunna detektera livstecken från skadade soldater. Detta system blev aldrig operativt.

Radar Flashlight kan enligt [15] detektera mänsklig rörelse genom 20 cm tjocka dörrar och väggar. Inget om väggtyp nämns. Systemet nyttjar en 16° bred antennlob och med egenutvecklad signalprocessor kan mänskliga andningsrörelser och andra rörelser detekteras på upp till 3 m avstånd bakom väggen. Systemet arbetar vid frekvensen 10.525 GHz.



Figur 1. Radar Flashlight, utvecklat vid Georgia Tech Research Institute, skulle kunna hjälpa poliser vid sökandet efter någon misstänkt som gömmer sig bakom en dörr eller vägg.

Vid en mailkontakt i november 2005 med Gene Greneker, som utvecklat RadarFlashlight erhålls information om att systemet fortfarande är aktuellt men befinner sig under fortsatt utveckling. Vidare berättar Greneker att systemet och det fortsatta utvecklingsarbetet sker inom Grenekers egna företag Radar Flashlight, LCC. Enligt Greneker har hans företag erhållit ett kontrakt från DARPA om att utveckla nästa generations RadarFlashlight. Någon sluttidpunkt för detta arbete angavs inte.

4.2 MARS, Raytheon (US)

Jeffrey Black verksam vid Raytheon (tidigare Hughes Missile Systems) utvecklar ett portabelt väggpenetrerande radarsystem, kallat **MARS** (Motion and Ranging Sensor), avsedd att användas av polis, antiterroriststyrkor och militärer [5]. Utvecklingen av MARS-systemet finansieras bl.a. med stöd från National Institute of Justice (NIJ).



Figur 2. MARS-systemet är inrymt i en portfölj.

MARS är en FMCW-radar med förmåga att penetrera de flesta förekommande icke-metalliska väggtyper. Upplösningen i avstånd anges till 1 foot (ca 30 cm), vilket motsvarar en bandbredd på 500 MHz. Något absolut frekvensområde specificeras inte, men den goda penetrationsförmågan i kombination med bandbredden tyder på ett fåtal GHz. Systemet ska kunna lokalisera och följa en person genom armerade väggar och tegelväggar. MARS-systemet saknar emellertid förmåga att kartlägga strukturer i en byggnad eller i ett enskilt rum.

Själva radarsystemet inryms i en bärbar väska (Figur 2). Sändarantennen är placerad i väskans lock och mottagarantennen är positionerad i väskans botten. Systemet strömförsörjs via batterier som medger mer än 4 timmars kontinuerlig drift. Informationen från radarsystemet överförs via trådlös Ethernet länk till en separat enhet (Remote Display Unit) med enkel display. På displayen visas avståndet till den närmast detekterade rörelsen samt dess riktning (från/mot radarn). Det finns också möjlighet att använda en laptop för att presentera data. Systemet placeras antingen direkt intill väggen eller på maximalt 9 m avstånd. MARS kan detektera rörelser upp till 30 m bakom väggen.

En vidareutveckling av MARS, kallad EMARS (Enhanced MARS) ger förmåga till tvådimensionell positionering och följning av den detekterade rörelsen. EMARS-konceptet innehåller upp till fem radarenheter som positioneras på lämpligt sätt runt en byggnad. Den insamlade doppler-informationen i respektive sensor kombineras med de övriga och genom att utveckla avancerade signalbehandlingsalgoritmer hoppas man kunna positionera och följa personers rörelse i byggnaden.

Ingen information efter 2002 har kunnat identifieras som anger om systemutveckling fortfarande pågår eller huruvida MARS är kommersiellt tillgänglig.

4.3 RadarVision/SoldierVision, TimeDomain (US)



Figur 3. Till vänster visas TimeDomains SoldierVision-system. Notera displayen nära kanten. Den högra bilden ger ett exempel på hur två objekt i rörelse framträder på olika positioner i operatörens display.

Amerikanska TimeDomains system SoldierVision (Figur 3) och dess föregångare RadarVision är de enda kända kommersiella TWS-systemet på marknaden [10]. Systemen baseras på UWB-radarteknik, där korta pulser utsänds med mycket hög PRF. Genom att registrera förändringar i det mottagna pulssvarets avståndsdomän fås indikation om objekt i rörelser. Systemet är handhållet och placeras direkt mot väggen. RadarVision var från början tänkt att användas av militär medicinsk personal för att lokalisera skadade soldater inne i byggnader. Den nya uppgraderade versionen SoldierVision är huvudsakligen tänkt för att möta det militära men också det polisiära behovet av att i realtid kunna detektera och följa fiender/terrorister/gisslantagare inne i byggnader.

Upplösning i vinkel fås genom att använda en array bestående av flera antenner [42]. Systemet ger en 2D representation (avstånd/vinkel) av rörliga objekt i scenen. Det finns dock ingen möjlighet att avgöra vad det rör sig om för slags objekt.

Specifikation för SoldierVision hämtad från [10]:

- Size:** 56 cm x 35.5 cm x 20.3 cm
- Weight:** <4.5 kg
- Enclosure:** High Impact Plastic
- Power:** Removeable/rechargeable lithium ion battery
- Operating Time/Charge:** >3 Hours
- Rechargeable Time:** <4 Hours
- Range Accuracy:** +/-1 meter
- Horizontal Field of View:** >+/-60 degree
- Vertical Field of View:** >+/-30 degree
- Line of Sight:** 20 m through wood, brick, Gypsum wall & 20cm solid concrete
- Shock/Vibration:** Drop tested at 2 meters
- Humidity:** 0% to >90% (non-condensing)
- Liquid:** Water resistant (not submersible)
- Operating Temperature:** -10 degree C to +50 degree C
- Store Temperature:** -20 degree C to +60 degree C
- Emission Type:** Coded ultra wideband pulses
- Pulse Rate:** 10 Million pulses per second
- Transmit Power:** 1.5 mW

Vidare sägs att operatören erhåller riktning och avstånd till objektet bakom väggen med 98% noggrannhet.

De väsentligaste skillnaderna mellan SoldierVision och RadarVision är att SoldierVision utsänder 30 gånger högre pulseffekt - 1.5 mW mot 50 μ W. Detta ger en förbättrad penetrationsförmåga och ett högre S/N-förhållande. RadarVision opererar inom frekvensbandet 2.1-5.6 GHz. Ingen uppgift rörande frekvensband har kunnat inhämtas för SoldierVision. SoldierVision har en något smalare vertikal vinkeltäckning jämfört med Radar Vision ($\pm 30^\circ$ resp. $\pm 45^\circ$). RadarVision2 är certifierad av FCC för kommersiell användning. SoldierVision har ej motsvarande certifiering.

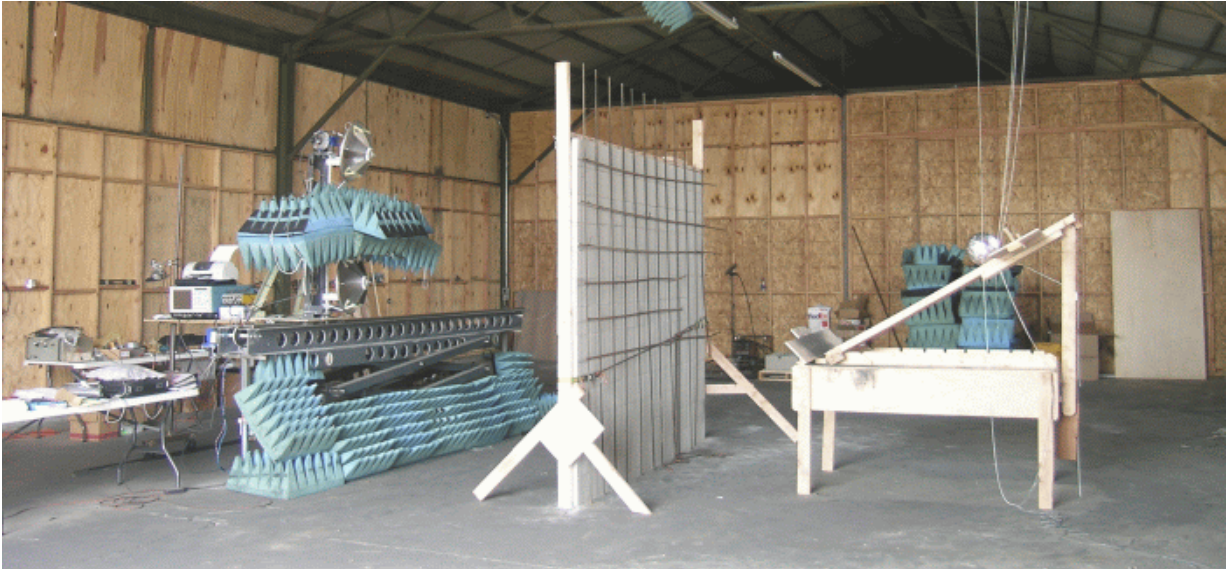
På initiativ av Markstridsskolan i Kvarn demonstrerades SoldierVision i Norrköping i februari 2005. Vid denna visning deltog två representanter från FOI. Vid detta tillfälle framkom att priset för systemet ligger på ca 500 kSEK och att det i denna kostnad ingår en operatörsutbildning på ca 1-2 veckor. Deltagarna fick möjlighet att testa systemet och slutsatsen var att systemet klarar att detektera mänsklig rörelser bakom innerväggar av betong. En iakttagelse var att antalet falsklarm var tämligen stort samt att ekot från personen på andra sidan väggen ibland försvann.

Pågående systemutveckling vid TimeDomain handlar om att tillföra systemet förbättrad stand-off förmåga samt möjlighet att kommunicera med systemet via fjärrlänk. Vidare sker utveckling av signal- och bildbehandlingsalgoritmerna. TimeDomain har fått ett kontrakt av Unites States Air Force för att utveckla en radar anpassad för detektion av personer som begravts under rasmassor. Systemet ska kunna bestämma på vilket djup personen ligger samt kunna registrera personens andningsfrekvens.

4.4 PMC - Passive millimetre-wave camera, Trex Enterprises (US)

Trex Enterprises i San Diego [20] har tagit fram ett passivt avbildande realtidssystem, **PMC-1** (Passive millimetre-wave camera) med känslighet inom frekvensbandet 90-96 GHz i millimetervågsområdet. Med detta system är det möjligt att detektera och avbilda objekt gömda under kläder etc. En ny generation, **PMC-2** är under utveckling och den stora förändringen är att mottagarsensorns bandbredd utökas till 77-95 GHz. Det nya lägre frekvensomfånget medför eventuellt möjlighet att kunna använda systemet för att kunna detektera personer som gömmer sig bakom tunnare väggar och dörrar etc. Enklare försök (utomhus) redan med PMC-1 visar att en lastbil som delvis skymms av en gipsskiva i sin helhet kan avbildas.

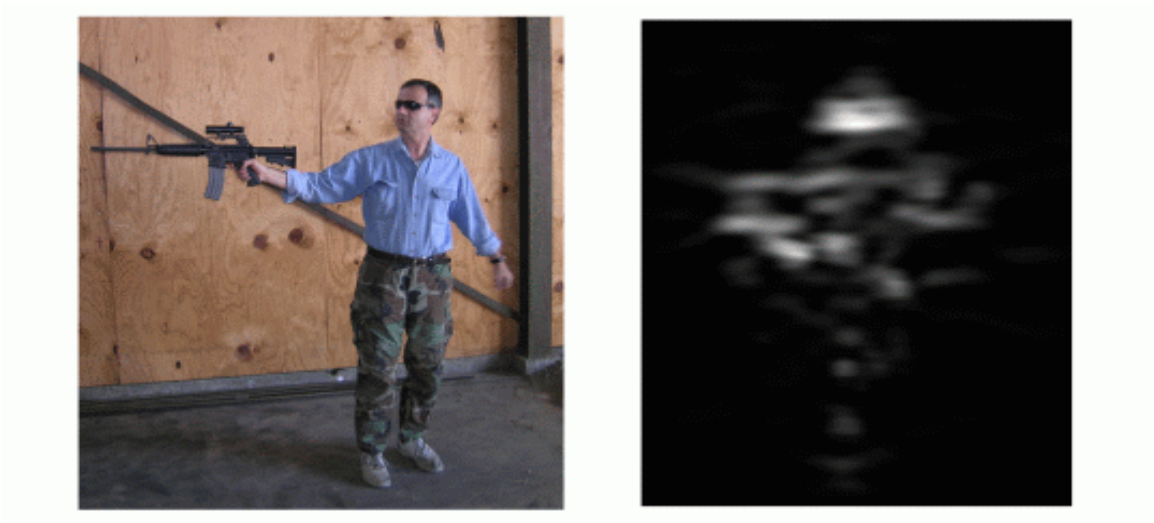
4.5 ImpSAR avbildande radar, Eureka Aerospace (US)



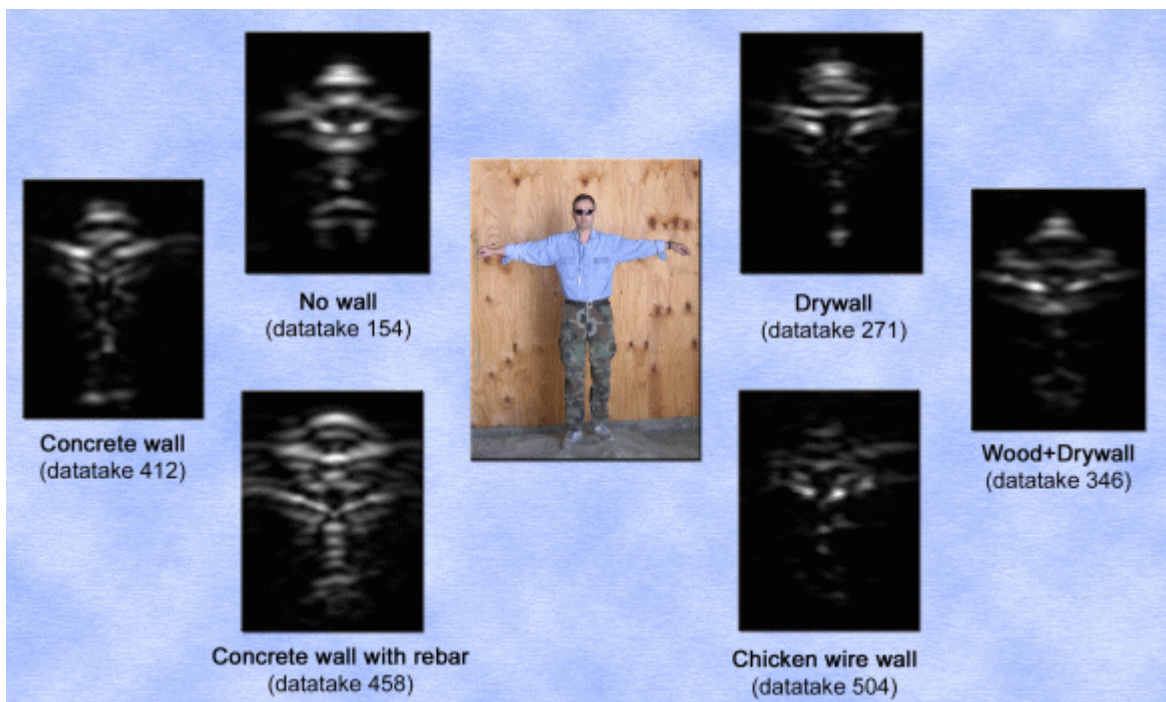
Figur 4. Experimentell försöksupställning vid Eureka Aerospace.

Amerikanska **Eureka Aerospace** utvecklar ett väggpenetrerande avbildande radarsystem med kapacitet att se igenom väggar av gips, trä, betong och tegel. Försökssystemet använder en extremt högupplöst impuls-SAR [11]. Systemet klarar av att stand-off avbildna personer, vapen, bord etc. Extremt korta pulser på omkring 100 ps, vilket motsvarar en bandbredd på ca 3.5 GHz, utsänds från en speciell s.k. IRA (Impulse radiating antenna). Med frekvenser från ca 250 MHz - 3.5 GHz fås en avståndsupplösning på ca 5 cm.

Det aktuella frekvensbandet innebär samtidigt förmåga till god penetration genom de flesta byggmaterial. Genom att förflytta antensystemet längs en vertikal räls skapas en syntetisk antenn vars apertur ger en upplösning i sida vid målet som motsvarar avståndsupplösningen. Vidare anges att systemet är portabelt, systemet väger strax under 14 kg vilket måste ifrågasättas med utgångspunkt från Figur 4.



Figur 5. Avbildning av beväpnad (M16) person bakom gipsvägg. Till vänster visas ett visuellt foto och till höger visas den erhållna radarbilden. Källa: <http://www.eurekaerospace.com/impsar.php>



Figur 6. Avbildande mätningar av en försöksperson utförda med Eureka Aerospace försökssystem. Personen avbildas dels utan vägg och dels bakom 5 olika väggar. Källa: <http://www.eurekaerospace.com/impsar.php>

4.6 Handburen FMCW-radar, TNO (NL)

TNO - Physics and Electronics Laboratory, i Haag, arbetar under kommande år med att utveckla en billig, handburen FMCW-radar för TWS [37]. Projektet finansieras av den Nederländska staten inom ramen för ett nationellt teknologiprogram. Under 2004 genomfördes en experimentell demonstration av FMCW-teknikens förmåga vid 2.48 GHz.

Under 2005 ska ett prototypsystem tas fram. Den handburna enheten inrymmer alla komponenter (inklusive display) medan strömförsörjningsenheten (batteripack) förvaras separat. Vid användning håller operatören antingen systemet mot väggen, eller positionerar det max 4-5 m från väggen. För ”normalväggar” blir räckvidden 25-50 m bakom väggen. I fri rymd blir räckvidden 125 m. I den slutliga fasen av systemutvecklingen ska klassificeringsalgoritmer tas fram som klarar att identifiera hur många och helst vilka slags personer som befinner sig bakom väggen. Systemet ska t.o.m. kunna separera kvinnor från män och härvid utnyttjas karakteristiska skillnader i dopplersignaturer från olika kroppsdelars rörelse.

Framtida möjlig användning är att på ett synkront sätt utnyttja två sensorer för att via trianguleringsteknik bestämma den exakta positionen till målobjektet. TNO ser också möjligheten att sensorn ska kunna användas för detektering av hotobjekt gömda under kläder, men härvid krävs högre upplösning och den operativa frekvensen bör därvid höjas.

4.7 Väggenpenetrerande UWB-radar, AKELA (US)

Med finansiering från National Institute of Justice (NIJ) och Air Force Research Laboratory har **AKELA** utvecklat en bredbandig avbildande väggpenetrerande stand-off radar [26][27]. Det interferometriska försökssystemet använder en tomografisk bildrekonstruktionsmetod och systemet består av tre huvuddelar: en digitalt styrd frekvensstegad radar, en antennkonfiguration bestående av fyra log-periodiska antenner, samt en dator för systemstyrning, dataprocessering och presentation. Antennsystemet är 2.2 m i bredd och kan inför transport fällas ihop, se Figur 7. Systemet väger mindre än 18 kg, uteffekt 50 mW, batteridrivet. Systemet beskrivs som portabelt och som enkelt att sätta upp.

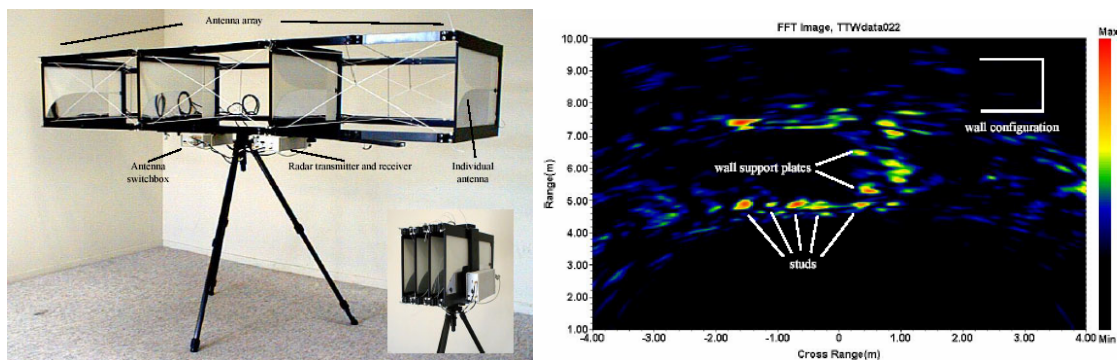
Frekvensområdet 450 MHz - 2 GHz är en avvägning av goda väggpenetrerande egenskaper och att komponentpriserna är tillräckligt låga. Bandbredden på 1.5 GHz ger en avståndsupplösning på 10 cm. Då 1024 frekvenssteg används fås vid denna bandbredd ett entydighetsavstånd på 102.4 m.

Data samlas in genom att först låta en antenn användas för sändning och de övriga för mottagning. Därefter låter man nästa antenn fungera som sändare och de övriga som mottagare, osv. För en dylik antennkonstruktion erhålls en upplösning i tvärsledd, Δx , som bestäms av uttrycket:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{4 * \sin \Theta / 2}$$

där Θ är öppningsvinkeln till antennens ytterelement betraktade från målobjektet.

I extremfallet med ytterantennerna fås stora bistatiska vinklar. Med denna konstruktion innehållande fyra antenner fås 12 oberoende kombinationer. Bildrekonstruktion erhålls genom Fourier-transformering. Systemet ger ingen upplösning i höjdledd.



Figur 7. Till vänster visas AKELAS radarsystem med de fyra antennerna i utfällt resp ihopfällt läge (infällda bilden). Till höger visas exempel på hur en väggkonstruktion avbildas av radarbilder i avstånd.

Vid experiment med systemet placerades människor i rum omgivna av 8-12 tum tjocka innerväggar av armerad betong. Efter bakgrundssubtraktion erhålls avbildningar i avstånd och sida av personerna. Den höga dämpningen i betongen gör att reflexer i betongen ger höga signalnivåer jämfört med returen från människorna. Enligt [27] har lyckade försök gjorts att detektera personer gömda bakom upp till 25 m tjockt buskage med dämpning 0.6 dB/m.

Den största begränsningen med försökssystemet är radarns sveptid och de fasta antennenpositionerna. Tiden att alstra en radarbild tar ca 10 sek. Rörelsedetektering genom koherent bildsubtraktion fungerar inte för personer i rörelse som normalt hinner förflyttas för mycket mellan varje ny bild. En annan problematik är att de fasta avstånden mellan antennenpositionerna som ger upphov till besvärande spökbilder. Enligt artikeln håller AKELA på att utveckla ett nytt antensystem med en bilduppdateringstakt på 10 Hz och där avstånden mellan antennerna är "slumpmässiga", vilket torde reducera spökbilderna.

4.8 Camero (Israel)

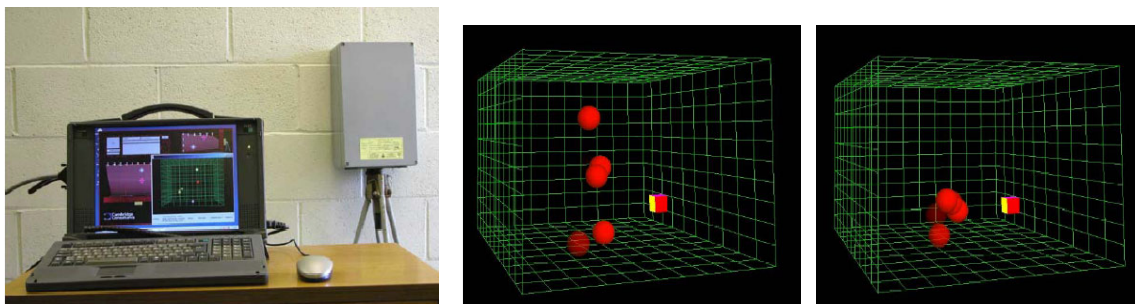
Enligt den israeliska tidningen Haaretz är israeliska forskare vid ett mindre teknologiföretag, Camero, i Netanya i färd med att utveckla en UWB-radar för TWS [12][13]. Systemet ska generera 3D-bilder av det som göms bakom väggen. Cameros system ska kunna placeras 20 m från väggen och kunna detektera antalet personer i ett rum, deras position och t.o.m. deras beväpning. Detektion ska kunna göras genom armerade betongväggar. Systemet har inte enbart tänkta militära tillämpningar utan ska också vara användbart i letandet efter levande personer som begravts under rasmassor. Enligt [9]

kommer systemet att bli en allvarlig konkurrent till amerikanska TimeDomain's Soldier Vision-system. Till konkurrensfördelarna återfinns stand-off-förmågan och den avbildande förmågan. En första version av systemet kommer enligt planeringen att släppas under 2006.

I oktober 2004 meddelades [14] att det Londonbaserade riskkapitalbolaget Alta Berkeley investerat över 6 miljoner dollar i utvecklingen av Cameros TWI-system.

4.9 PRISM 100, Cambridge Consultants Ltd. (UK)

Engelska Cambridge Consultants Ltd (CCL) har under de senaste åren arbetat med att utveckla en handhållen väggpenetrerande UWB-radar, avsedd för såväl den civila som militära marknaden. Produktserien heter PRISM, vilket står för Portable Radar Interior Space Monitor [7]. Den första versionen, kallad Prism 100, består av två moduler: en radarmodul och en bärbar PC för signalprocessering och visning (Figur 8). Radarn, monteras eller trycks mot väggen och kan operera i frekvensbandet 1.7-2.2 GHz eller 1.1-1.6 GHz. Dessa två frekvensband är öppna enligt FCC (Federal Communications Commission). Enligt CCLs specifikationer kan Prism 100 användas genom drygt 20 cm tjock massiv tegelvägg och klarar även att penetrera armerad betong. Här anges dock inte tjocklek. Radarns uppdateringstakt är 20 Hz och den utsända effekten anges till -30 dBm/MHz.



Figur 8. Engelska Cambridge Consultants UWB-radar Prism 100. Till vänster visas systemet. Den mellersta och den högra bilden visar 3D avbildning av karakteristiska dopplercentra hos en person i rörelse bakom väggen. Källa: http://www.cambridgeconsultants.com/Downloads/Case_Studies/ImTrack-S-002%20v0.2.pdf

Ingen information har kunnat inhämtas som visar att PRISM 100 varit kommersiellt tillgängligt.

4.10 PRISM 200, Cambridge Consultants Ltd. (UK)

Under första delen av 2006 släpper CCL ut sin andra generations väggpenetrerande radar, Prism 200 [8]. Systemet är en vidareutveckling av den tidigare framtagna Prism 100. Det nya innehåller flera förbättringar jämfört med Prism 100 och dessa ökar enligt CCL effektivitet och säkerhet för den personal som använder systemet i utsatta situationer (gisslantagning, spanings- och räddningsinsatser). Den mest påtagliga yttre förändringen är att radar, signalbehandling och presentation är inkorporerat i en enda modul.



Figur 9. Operatören håller systemet stilla mot väggen. Efter ca 2 sekunder erhålls en 3D-avbildning av pågående aktiviteter. Källa: http://www.cambridgeconsultants.com/news_pr150.shtml

Enligt CCL penetrerar Prism 200 igenom mer än 40 cm tjocka betongväggar och klarar att detektera rörelser på upp till 15 m avstånd från väggen. Radarn använder en array av antenner som ger minst 140° synfält i både horisontal- och vertikalled. Antennkonfigurationen ger förmåga till 3D-positionering i rummet av rörliga objekt, och möjliggör för operatören att avgöra huruvida personen bakom väggen befinner sig stående, sittande eller liggande. Detta ger i sin tur möjlighet att t.ex. särskilja gisslantagare från gisslan, människa från hund, eller vuxen från barn.

Avbildningarna är på intet sätt reella utan varje identifierad individ representeras av ett kluster av delreflektorer. Dessa visas med samma färg för att illustrera personens rörelse i rummet. I systemet finns en särskild funktion som lagrar tracking-historiken för personerna. Denna information kan sedan användas för att bygga upp rummets interiör.

Den resulterande radarbilden visas i realtid på en inbyggd 6.4 tums färgskärm, eller alternativt överförs trådlöst till en bärbar datorenhet. Vid användning trycks Prism 200 mot väggen eller monteras på ett stativ stående högst 2 m från väggen, och sänder ut lågfrekventa UWB radarpulser som passerar igenom de flesta byggmaterial.

Enligt CCL kan den inbyggda signalbehandlingen och grafiska bildpresentationen anpassas för olika typer av tillämpningar.

Den färdiga produkten förväntas väga ca 3 kg (inklusive Li-batterier) och har en kontinuerlig drifttid på ca 2 h. Försäljningspriset på Prism 200 beräknas hamna under £30,000.

4.11 EMMDAR, CyTerra (US)

Det amerikanska företaget CyTerra, Orlando, demonstrerade nyligen sin nyutvecklade handburna radarutrustning för detektion av personer bakom väggar [16]. Systemet kallas EMMDAR (ElectroMagnetic Motion Detection And Ranging) och man hävdar att systemet klarar att detektera en persons andningsrörelser genom flera stycken armerade betongväggar. Systemet bygger på erfarenheterna från utvecklingen av AN/PSS-14, vilket är ett personburet radarsystem för detektion av minor. Enligt Cyterra kommer TWS förmågan också att tillföras minradarn, som därvid får dubbel förmåga.

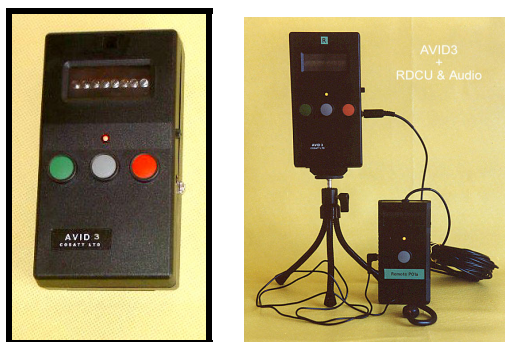


Figur 10. Illustration av CyTerras EMMDAR. Källa: <http://www.cytteracorp.com/radar/through-wall.html>

4.12 AVID, Cosatt Ltd. (UK)

Engelska Cosatt Ltd utvecklade under åren 1999-2001 en liten handburen dopplerradar för TWS. Systemet lanserades år 2001 under namnet AVID 3. Sedan detta år finns ingen information om systemet och den troliga förklaringen är att det lagts i malpåse eller helt avvecklats. Information om systemet har erhållits från Markstridsskolan, Kvarn, som studerat systemet som tänkbart för den svenska internationella insatsstyrkan. Enligt Markstridsskolan var priset per enhet mycket högt, vilket främst förklaras av att man snabbt önskade få tillbaka utvecklingskostnaderna.

Enligt ett produktblad från Cosatt Ltd hävdades att systemet har förmåga att detektera såväl rörliga som stationära objekt genom upp till 60 cm tjocka betongväggar. Systemet finns i tre olika frekvenskonfigurationer: 2.45 GHz, 10.515 GHz (Amerikanska marknaden) och 10.687 (Europeiska marknaden). Dessutom sägs systemet klara att detektera mänskliga hjärtslag genom dörrar och fönster.

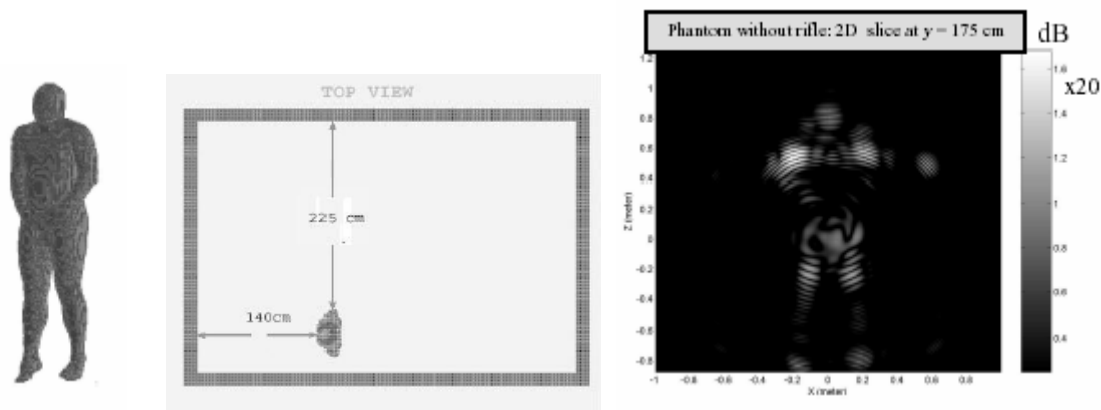


Figur 11. AVID 3 – systemet.

5 Modelleringar, Simuleringar

5.1 Förmåga hos UWB SP radar, DRDC (CA)

Sylvain Gauthier vid DRDC har studerat förmågan hos UWB SP (ultrawideband short pulse) radar för övervakning genom betongväggar, inklusive multistatisk radar övervakning och 3D TWI (through-wall imaging) [22]. Med ett simuleringsprogram baserad på FDTD (finite- difference time-domain) modelleras den elektromagnetiska spridningen för olika objekt genom väggar, se Figur 12. Radarrådata transformeras till radarbilder genom åter-projektion. DRDC visar att en UWB SP radar kan följa mål som rör sig inne i ett rum med betongväggar samt att man kan skapa en radarbild av rummets interiör. Hastigheten hos den elektromagnetiska vågen reduceras i betongen jämfört med frirymd och detta leder till defokusering av radarbilden, vilket förflyttar målobjekten från deras verkliga positioner, och troligen skapas också falska målekon. DRDC visar via simuleringar att detta problem väsentligen kan övervinnas genom att kompensera för radarvågens hastighetsförändring. Bl a jämförs möjligheten att använda UWB SP radar centrerad vid 2 resp 10 GHz. I artikeln anges att fördelen med den höga frekvensen är att antennsystemet kan göras mindre, men dessvärre ökar dämpningen.



Figur 12. Simuleringar av UWB SP radar genomförda vid DRDC. Till vänster visas CAD-modell av en person. I mitten visas en ovanifrånvy över försökupställningen. Till höger visas resultatet från simuleringen.

5.2 Syntetisk Apertur lobformning

En artikel av Fauzia Ahmad m.fl. [2] handlar om att vid bildgenerering av objekt bakom vägg med en fasstyrd antenn kunna fokusera bilden på ett bättre sätt genom att ta hänsyn till väggens refraktion.

En relativt stor del av artikeln presenterar hur lobformningen åstadkoms. För kompensation av refraktionen i väggen används Snells lag och enkel strålföljning. Endast väggar bestående av ett materiallager beaktas. Detta medför fel eftersom inga studsar av högre ordning beaktas. En mer avancerad metod skulle i detta fall kunna vara att, på liknande sätt som vid FOI, använda impedansrandvillkor för att på så sätt få med alla ytans interaktioner. Problemet som uppstår är att man inte på ett enkelt sätt kan uttrycka strålens parallellförskjutning, vilket i speciella fall kan leda till en del fel. Dessa är dock små om ytans utsträckning är stor, och/eller om ytans tjocklek är liten i förhållande till antennloben.

I artikeln förutsätts att väggens elektriska egenskaper är kända, men en störningsanalys görs för att se hur små ändringar av väggens tjockleken och dielektricitetskonstant distorderar bilden.

Inga jämförelser mellan mätningar görs, eller med beräkningar som inte använder ovanstående kompensationsmetod. Arbetet kan dock anses som intressant och kan vara av intresse för tillämpningar vid FOI.

6 Modellbaserade tolkningar av mänsklig rörelse

Vid FOI har tidigare inletts verksamhet med radardetektion av människor bakom vägg, dels av stationära mål som studeras genom bildalstring utan användning av dopplerteknik samt dels av detektion av rörelser av olika slag, med sådan teknik. Mätningarna visar att dopplermethodiken ger mycket hög känslighet, bl.a. därför att radarreturer från stillastående omgivning filtreras bort.

Utomlands har påbörjats verksamhet avseende modellbaserad tolkning av dynamiken hos en människa under förflyttning, med användande av ovannämnda doppler, som brukar benämnas mikrodoppler (dopplersidband kring en dominerande centralkomponent). Zhang och Amin (2004) [43] använder dielektriska cylindrar som modellkomponenter för torso och armar, och beräknar radarsignaturen med fältberäkningar.

I Israel har Bilik m.fl. (2004) [4] använt en biomekanisk modell, sammansatt av linjeformade segment ("tändsticksmänniska"), där man fördelar punktformade radarreflektorer utmed segmenten. Radarreturen fås som en koherent summa av de dopplerförskjutna delreflektionerna från de olika segmentens reflektorer, där man beaktar biomekaniska begränsningsvillkor. Tillämpningen är diskriminering mellan människor och fordon som rör sig. Arbetet är huvudsakligen baserat på beräkningar.

Det mest omfattande arbetet har rapporterats av en grupp vid Georgia Tech. Research Institute (Geisheimer, m.fl. 2001, 2002) [23][24], som studerat dopplerdynamiken hos mänsklig gång. De använder samma typ av "stickmodell" för en människa som Bilik m.fl. ovan, men baserar sin modellering på speciella modelldefinierande mätningar. Dessa görs samtidigt med en dopplerradar och sex IR-kameror, med ett antal IR-reflektorer fördelade på mätobjektets kropp, armar och ben. IR-mätningarna visar i detalj hur kroppsdelarna rör sig, vilket sedan överförs på punktreflektorer på modellens linjesegment. Den totala radarreturen beräknas genom koherent summering och dopplerspektrets dynamik jämförs med den som uppmäts från en normalt gående människa, utan reflektorer. Man har hittills kunnat separera och identifiera dopplersignaturerna från över- och underdelen av benen, samt torson. Armar och huvud ger svagare returer.

Chen (2003) [19] har skrivit en översiktsartikel av mikrodopplereffekter och arbeten som utförts i olika tillämpningar bl.a. gående människor.

Någon litteratur som behandlar dynamiken hos en vapentyngd människa har inte påträffats.

7 Bestämning transmissionsegenskaper för byggmaterial

Transmissionsegenskaperna för olika material som funktion av frekvensen är fundamentala för möjligheten att kunna detektera bakomliggande objekt. Dämpningen svarar mot materialets dielektriska egenskaper och dess tjocklek. I princip kan sägas att materialets elektriskt ledande förmåga korresponderar mot dämpningen. Metalliska material är således helt opaka i det radiofrekventa området. Kunskapen om olika materials dielektriska egenskaper är fundamental för att kunna avgöra möjligheten att med ett visst radarsystem kunna detektera gömda objekt. Med bakgrund av det stora internationella intresset för att utveckla sensorsystem med förmåga att "se igenom väggar" är det märkligt att konstatera hur lite som faktiskt publicerats beträffande materials transmissionsegenskaper.

I ett arbete av P.M. Alexander från 1985 [3] redogörs för experimentell bestämning av reflektiviteten hos följande naturmaterial: trä, tallbarr, blad från buskar, ekblad, bark. Flertalet material uppmättes såväl färskt som i torrt tillstånd. Endast rent trä uppvisade någon skillnad i reflektivitet beroende på fukthalt. Om absorptionsförmågan antas vara låg fås här också ett indirekt mått på transmissionsegenskaperna. Mätningarna utfördes med en frirymdsuppställning.

Mohammed Nurul Asfar genomförde i mitten av 1980-talet grundläggande uppmätning av dielektricitetskonstanten för olika slags material med den s.k. open-resonator metoden. Resultat från keramiska material, teflon, glas m.m. redovisas utförligt [1].

I en artikel från 1995 redovisar japanska forskare experimentella [34] mätningar av reflektions- och transmissionskoefficienten för betong, gipsplatta, mineralull, golvplatta, tegelplatta vid frekvenserna 57.5, 78.5 och 95.9 GHz. Dessa mätningar har primärt gjorts för att undersöka olika materials begränsningar för trådlös kommunikation i byggnader (wireless-LAN). Samma japanska forskargrupp publicerade påföljande år resultat av transmissionsmätningar av betong utförda vid 57.5 GHz [35]. Mätningarna skedde under en 14 månader lång period för att studera hur den minskande fukthalten påverkade det komplexa refraktionsindexet. Forskargruppen visade att transmissionskoefficienten för en plan nygjuten betongplatta är lägre än -20 dB/cm. Efter 14 månader när fukthalten minskat är transmissionskoefficienten -9 dB/cm.

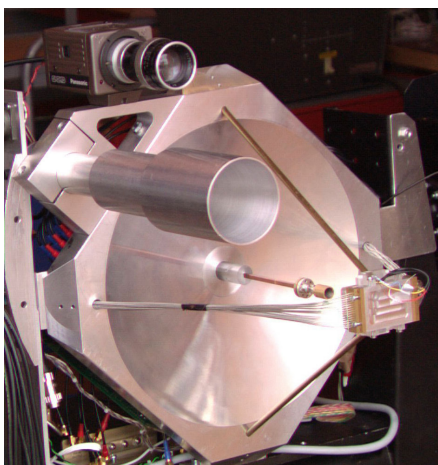
Daniel Pena m fl. publicerar 2003 mätningar av dämpningen i tegel och betongväggar vid 900 MHz [33]. Bl a. studeras effekterna av armering i betong och enligt Pena är detta första gången sådana verifieringar publiceras. Mätningar har utförts för att ge underlag vid bedömning av möjligheten att kommunicera med mobiltelefoni i olika byggnader.

I ett nyare arbete (2003) utfört vid National Chiao Tung University, Taiwan [31] redovisas transmissionsmätningar vid 3.1-10.6 GHz för fyra byggmaterial: Ca-Si platta, spånskiva, tempererat glas och gipsskiva. En vektoriell nätverksanalysator användes som sändare och mottagare och härvid kunde transmissionskoefficienten med amplitud och

fas bestämmas i frirynd. För att minimera effekterna av bakgrundsbrus var mätuppställningen med antenner och materialprov inrymd i ett ekofritt rum. Vid försöken användes såväl vertikal som horisontell polarisation. De redovisade resultaten visar på ett lågt polarisationsberoende (max 10.3%). För spånskiva resp Ca-Si platta var skillnaderna i transmission som funktion av frekvensen ej signifikant. För spånskivan ökade dämpningen svagt med ökande frekvens.

8 Verksamhet vid FOI

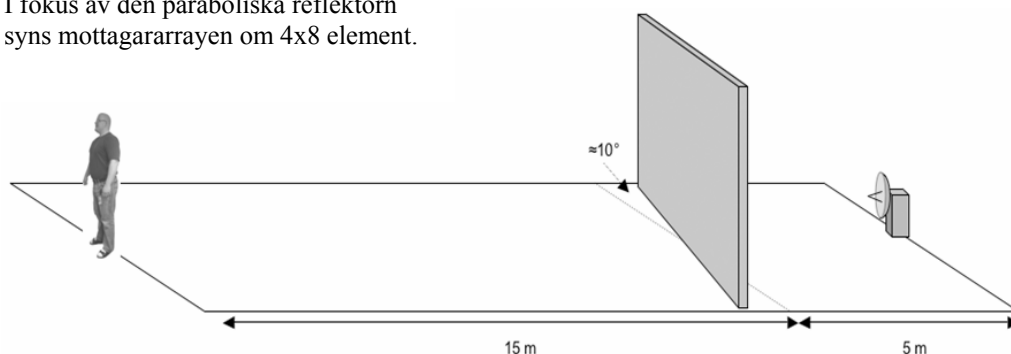
8.1 Avbildande väggpenetrerande mätningar vid 94 GHz



Figur 13. FOI's stirrande 94-GHz radar. I fokus av den paraboliska reflektorn syns mottagararrayen om 4x8 element.

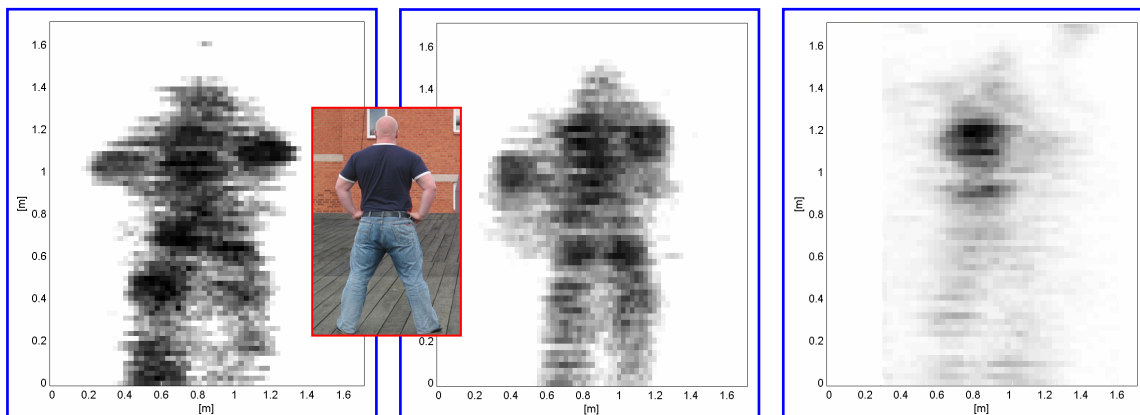
Vid institutionen för Radarsensorer genomfördes under sommaren 2004 experimentella försök att med radar avbilda en människa stående bakom en vägg [28]. Vid försöken användes den vid FOI utvecklade stirrande millimetervågsradarn, som ingår som en delsensor i det s.k. IR/mm-systemet (Figur 13).

Detta avbildande 94 GHz system är framtaget för målsökarstudier. Sändar- och mottagarantennerna är separerade. En parabol reflekterar den infallande radarvågen mot en fokalplansarray innehållande 4x8 mottagarelement. Radarsystemet är uppställt på ett datorstyrt vridbord som mekaniskt kan stegas i asimut och elevation.



Figur 14. Mätuppställning. Konfigurationen bestämdes i princip av begränsningar i radarsystemet.

Mätuppställningen visas i Figur 14. Avståndet från radarn till mätobjektet var 20 m. Begränsningar hos radarsystemet gjorde att detta var det kortaste möjliga avstånd för att kunna separera mätobjektet från väggen. Mätningen sker ändå i antennens närfält och vinkelupplösningen uppskattas till någon decimeter. Tre olika väggtyper användes: en enkel gipsvägg, en dubbel gipsvägg och en enkel spånskivevägg. Den aktuella väggen placerades 5 m från radarn. För att undvika mätning av systemet vinklades väggen 10° från vinkelrät infall. För att täcka aktuellt vinkelområde stegades systemet mekaniskt $8^\circ \times 10^\circ$ i elevation resp asimut. Steglängden var 0.1° i elevation och ca 0.08° i asimut. Den totala tiden för att genomföra mätningen var ca 10 minuter. Insamling skedde samtidigt i samtliga 32 mottagarelement.



Figur 15. De slutliga radarbilderna vid 94 GHz av en människa stående bakom en gipsvägg (vänster), dubbel gipsvägg (mitten) resp en spånskivevägg (höger).

I Figur 15 visas de slutliga radarbilderna av en person stående bakom de tre olika väggtyperna. Bilderna har erhållits genom att summera ihop delbilderna från varje mottagarkanal. En kalibrering har utförts för att kompensera för skillnader i känslighet mellan kanalerna. Avbildningar genom enkel- och dubbel gipsvägg visar att ben, rygg och nacke är väl synliga, medan armarna ej kan separeras från kroppen. Huvudet går inte att urskilja. Mätningarna visar att en person kan detekteras genom spånskiva, men att det förutom ben och torso är svårt att urskilja några detaljer. För samtliga fall härrör den starkaste radarreturen från ryggpåret .

Det är viktigt att betona att resultaten har framtagits med ett radarsystem som inte är avsett eller anpassat för denna typ av mätningar. Systemet har stora begränsningar beträffande upplösningsförmåga och kortaste möjliga mätavstånd.

8.2 Avbildande väggpenetrerande mätningar vid 28-40 GHz

Se-genom-vägg-mätningar har gjorts med ett bildalstrande radarsystem i frekvensbandet 28-40 GHz. Mätutrustningen som användes ingår normalt i instrumentparken på FOIs mätplats Lilla Gåra. Den har byggts om till ett mer kompakt utförande och utgör nu en transportabel, generell mätresurs, med ett antensystem och sändar-, mottagar-, styr- och registreringsdelar. Figur 16 visar utrustningen på plats på takmätplatsen i FOI-huset, Linköping, med antennerna i dörröppningen utåt Q-husets takmätplats.



Figur 16. Mätssystemet med styr- och registreringsutrustning, samt vridbord med sändar- och mottagarantennerna.

Systemetes viktigaste data:

Princip	Frekvensstegad, tidsgrindad CW ("continuous wave") -radar
Effekt	26-29 dBm
Frekvensområde	Vid försöket: 28-40 GHz (totalt 300 MHz-110 GHz)
Avståndsupplösning	1.25 cm
Frekvensstegning	1001 frekvenser i steg om 12 MHz
Stegtid	10 μ s /frekvens
Antenner	2 st paraboloider, fokuseringsbara i avstånd
Diameter	0.328 m
Fokalavstånd	0.116 m
Fjärrfältslobbredd (40 GHz)	1.3°
Antennvridbord	azimut och elevationsstegning; använd steglängd 0.2-0.5°
Mottagare	Koherent (amplitud och fas)

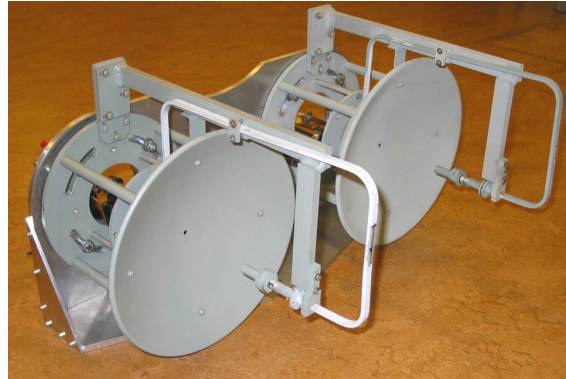
Mätobjekt utgjordes av personer, med och utan vapen (pistol) bakom vägg av tre olika material enligt följande tabell:

Material	tjocklek	antal skikt
Gips	1.25 cm	2 st *
Spån	1.25 cm	enkeltvägg
Tegel	11.0 cm	enkeltvägg

* med 5 cm mellanrum mellan skikten



Figur 17. Mätuppställning med radarregistrering av person bakom gipsvägg.



Figur 18. Antennfixtur konstruerad vid FOI. Den speciella konstruktionen gör det möjligt att omfokusera antennerna.

8.2.1 Tillvägagångssätt

Mätningarna gjordes på stillastående person bakom vägg (Figur 17), med variation av alla tre inbördes avstånd mellan radar, vägg och person. Radarbilder genererades genom stegning av vridbordet med antensystemet i azimut och elevation. I varje riktning stegades frekvensen över intervallet 28-40 GHz, i 1001 steg.

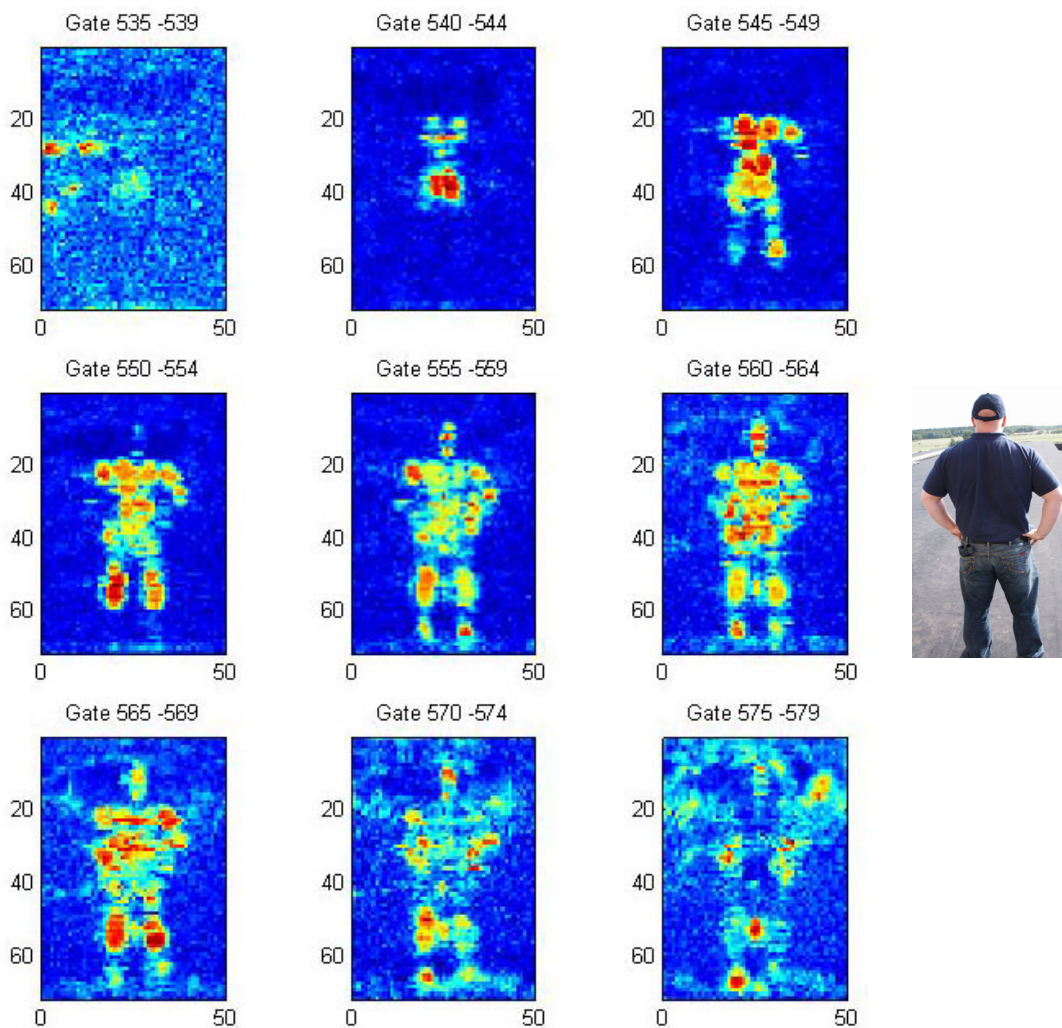
Mätningarna inriktades speciellt mot registreringar på korta avstånd till mätobjekten, varvid antennerna omfokuserades för varje mätning mot det aktuella avståndet.

Antennerna var fästa i en speciellt tillverkad aluminiumfixtur (Figur 18), som medgav omfokusering. Denna bestod i att dels båda antennerna riktades mot en gemensam riktpunkt på mätobjektets kortaste avstånd till radarn och dels att fokus för varje antenn försköts till detta avstånd med hjälp av förskjutning av respektive matare. Det senare förfarandet har dokumenterats i [36]. Utan omfokusering har man i antennernas närområde, upp till ca 25 m avstånd vid frekvensen 40 GHz, en tvärsupplösning ungefär lika med antenndiametern 30 cm, medan man med en närfokusering för uppställningen i Figur 17 teoretiskt kommer ner till ca 8 cm. Även om inga speciella mätningar gjordes för att verifiera fokuseringseffekten, indikerar de registrerade radarbilderna att det teoretiska värdet approximativt uppnåts.

En komplett registrering av en bild med stegningar i vinkel och frekvens krävde 15-20 min.

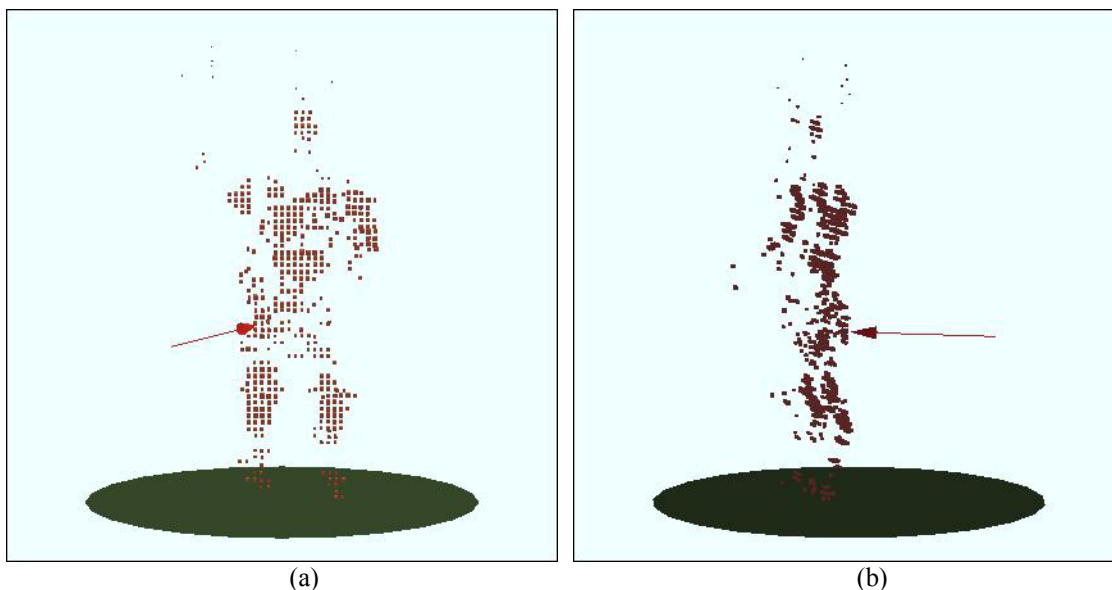
8.2.2 Resultat

Analys av det omfattande mätmaterialen pågår. Figur 19 visar ett exempel på en avbildning genom spånväggen, som befinner sig 1 m från radarantennerna, medan personen står ytterligare 2 m längre bort, med en pistol instoppad i vänster bakficka enligt det optiska fotot till höger i figuren. Radarbilderna visar personen uppskivad radarmässigt i nio stycken 6 cm tjocka skivor ("avståndsluckor"), totalt 0.54 m i djupled.



Figur 19. Bildserien till vänster visar radarbilder av person sedd bakifrån, bakom spånvägg med pistol i vänster bakficka enligt fotot till höger. Varje radarbild visar radarreturen från en ca 6 cm tjock ”avståndslucka”, med successivt ökande avstånd från bild till bild, räknat radvis åt höger.

Studium har påbörjats av olika sätt att presentera insamlade radardata, bl.a. genom att utnyttja den höga avståndsupplösningen (1.25 cm). Figur 20 a,b visar 3D-representationer av mätobjektet med brus och andra störlika signaler undertryckta. Figur 20 a visar personen sedd från radarns position, medan Figur 20 b visar, med användande av samma grunddata, objektet sett från en annan betraktningvinkel, snett bakifrån vänster, från en position som är roterad 120° från Figur 20 a. Man ser pistolen i bakfickan framhävvd, främst av den höga avståndsdiskrimineringen.



Figur 20. 3D-bilder av person sedd bakifrån bakom gipsvägg med pistol i vänster bakficka. Figur (a) är sedd från radarns position, medan (b) är sedd från en riktning roterad 120° från den i (a). Den pilmarkerade pistolen framträder främst på grund av den höga avståndsdiskrimineringen (b).

8.3 Utveckling av handburen väggpenetrerande rörelsedetektor Miniradar II

Vid FOI Sensorteknik Institutionen för Radarsensorer har sedan år 2004 arbete pågått med att utveckla en liten kompakt dopplerradar för detektion av mänsklig rörelse genom väggar och andra hinder. Radarn utsänder en 10 GHz CW-signal och detekterar enbart det frekvensskift som orsakas av objekt i rörelse. Man får således ingen information om avstånd eller riktning till dopplerkällan. Med det första försökssystemet, *Miniradar I*, utfördes en omfattande testkampanj där möjligheten att detektera mänsklig rörelse bakom olika typer av väggmaterial undersöktes. Resultatet från dessa tester visade att systemet utan svårighet klarar att registrera mänsklig rörelse bakom inner- och ytterväggar av gips, trä och tegel. Även en till synes stillastående människa avger registrerbar dopplersignal, t.o.m. genom en 30 cm tjock armerad betongvägg.



Figur 21. Den vänstra bilden visar Miniradar II monterad mot en vägg. Den högra bilden visar exempel på tillämpning där en försöksperson befinner sig bakom en 20 cm tjock betongvägg.

Under 2005 har systemet vidareutvecklats och all styrelektronik har integrerats på ett kretskort. Den registrerade dopplersignalen presenteras för operatören med ljus- eller ljudsignal. Möjlighet finns nu också att kommunicera med systemet via RF-länk. Det nya systemet som benämns *Miniradar II*, kan antingen monteras på väggen eller hållas mot väggen av operatören (Figur 21).

Den primära användningen av systemet är att snabbt kunna säkra byggnader på människor. Systemet ger operatören enbart information om huruvida ett rum är tomt på människor eller ej.

Innan systemet blir operativt kommer en provserie att tas fram, som skall distribueras ut till olika slutanvändare för utprovning i realistiska situationer och miljöer. Resultaten från dessa tester kommer att ligga till grund för vidareutveckling av systemet.

Slutmålet är att polis och militär (t.ex. internationella insatsstyrkan) utrustas med systemet för att uppnå en ökad effektivitet och säkerhet i urban miljö. Flera andra användningsområden är också tänkbara.

8.4 Bestämning av transmissionen för byggmaterial vid 1 - 110 GHz

Vid Institutionen för Signaturmaterial pågår sedan två år tillbaka forskning med att experimentellt bestämma transmissionsegenskaper för olika typer av konstruktionsmaterial, förpackningsmaterial och textilier. Material som är intressanta i samband med strid i bebyggelse och övervakning och som skulle undersökas inom projektet är emballage, textilier och byggmaterial. Experimentella mätningar har genomförts dels i vågledare och dels i frirymd. Under 2006 fortsätter kartläggningen.

8.4.1 Transmission uppmätt i vågledare

Vågledarmätningarna har utförts med en Wiltron 37269B vektornätverksanalysator i frekvensområdet 0.04 - 40 GHz. Speciella materialprover tillverkades för att passa in i provhållare i sju olika storlekar. Härvid uppmättes amplitud och fas för reflekterade och transmitterade fält. Därefter bestämdes den komplexa permittiviteten [21][38][39].

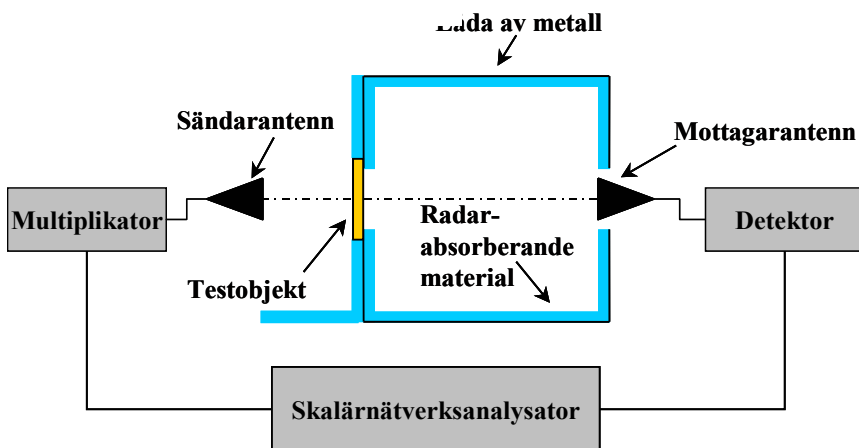
Resultatet presenteras i tabell 1 där värde för permittivitet är medelvärde i frekvensområdet mellan 0.04 och 40 GHz.

Material	Relativ permittivitet
Tegel	3.907-j0.035
Träpanel	2.066-j0.111
Spånskiva	2.224-j0.130
Gipsskiva	2.311-j0.023
Mineralull	1.056-j0.001

Tabell 1. Beräknad permittivitet hos byggmaterial

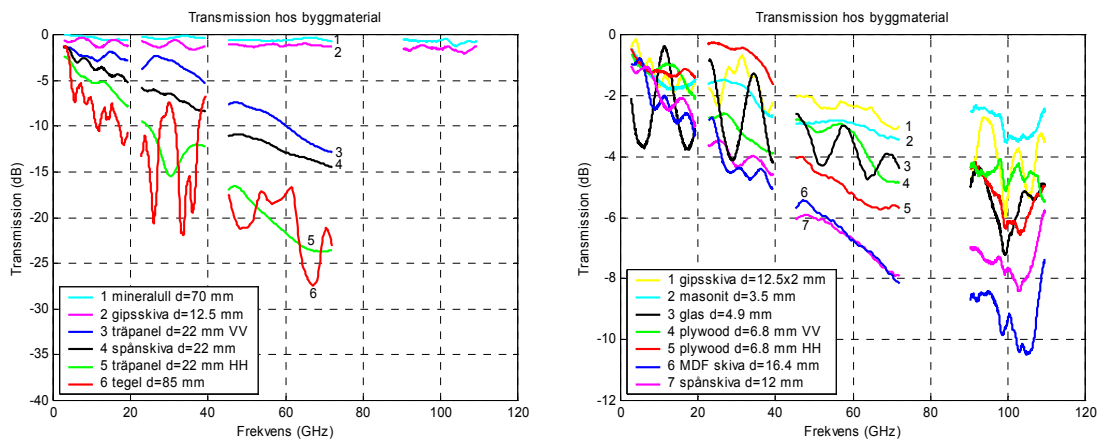
8.4.2 Transmission uppmätt i frirymd

En Wiltron 54147A skalär nätverksanalysator (10 MHz - 20 GHz) användes vid frirymdsmätningar. Schematisk bild av mätupställningen visas i Figur 22.



Figur 22. Transmissionsväg för frirymdsmätningar, frekvenser 2-110 GHz.

Tre stycken multiplikatorer användes för att klara att mäta frekvenser upp till 110 GHz. Transmission hos nio byggmaterial har mätts upp i frirymd: tegel, träpanel, spånskiva, gipsskiva, mineralull, masonit, glas, plywood och MDF (Medium Density Fibreboard). Resultaten av mätningarna presenteras i Figur 23.



Figur 23. Transmission hos byggmaterial uppmätt i frirymd, där d är tjocklek, VV är vertikal polarisation och HH är horisontal polarisation. Notera att det vänstra och högra diagrammet har olika dB-skalar.

Transmissionen är relativt god för mineralull, gipsskiva (även dubbel gipsskiva), masonit, glas och plywood medan transmissionen för MDF skiva, spånskiva, träpanel och tegel drastiskt minskar med frekvensen (Figur 23). Transmissionen beror också på tjockleken hos materialprovet. Ju tjockare materialprov desto lägre transmission. Detta konstateras

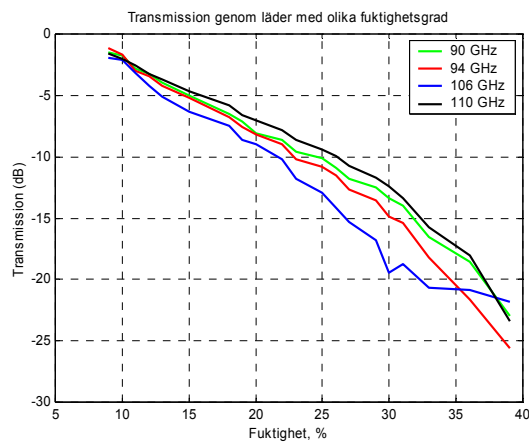
om man jämför mätningar för enkel och dubbel gipsskiva samt för spånskiva med tjocklek 12 mm och 22 mm. För träpanel och plywood är det också av betydelse hur träfibrer ligger i relation till det elektriska fältet. Transmissionen är högre om den elektriska fältvektorn är parallell med träfibrer och lägre om den elektriska fältvektorn är vinkelrätt mot träfibrer.

Genomförda mätningar och beräkningar visar att lägre frekvenser krävs för att uppnå tillräckligt hög penetration genom byggmaterial. Riktigt låga frekvenser krävs för godtycklig penetration genom ytterväggar och något högre frekvenser för godtycklig penetration genom innerväggar. Det beror delvis på att olika material används för att bygga ytter- och innerväggar samt på att ytterväggar i allmänhet är tjockare än innerväggar.

8.4.3 Fuktighetsmätningar

Det är allmänt känt att fuktiga material ger en högre dämpning jämfört med torra material. För att få en uppfattning om hur mycket transmissionen påverkas av olika fuktighetsgrader, uppmättes transmissionen genom läder av olika fuktighetsgrad, i frekvensområdet 90-110 GHz. Mätresultat för frekvenser 90 GHz, 94 GHz, 106 GHz och 110 GHz presenteras i Figur 24.

Mätningarna genomfördes med mätsystem som finns presenterat i Figur 22 med jämna mellanrum i tiden medan lädret fick torka i luften genom vanlig vattenavdunstning vid rumstemperatur. Enligt förväntningar minskar transmissionen med fuktighetsgraden. Processen är något långsammare vid lägre grad av fuktighet och blir snabbare vid högre fuktighetsgrad.



Figur 24. Transmission genom läder med olika fuktighetsgrad.

Transmission genom material beror på materialets fuktighetsgrad. Ju högre fuktigheten är desto lägre blir transmissionen. Minskning av transmissionen med fuktighetsgraden är en ganska snabb process och därför är det viktigt att alltid ta hänsyn till fuktigheten i materialet vid transmissionsmätningar. Även här är lägre frekvenser att föredra för bättre penetration genom materialet.

9 Slutsatser

Den omvärldsanalys som genomförts konstaterar följande:

- Med bakgrund av det angelägna internationella behovet av system för att detektera människor genom väggar etc, är det anmärkningsvärt att konstatera att hittills endast ett enda operativt system tagits fram: RadarVision/ SoldierVision.
- Få systemrelaterade referenser härrör från de två senaste åren. En möjlig förklaring är att systemutvecklingen idag anses så strategiskt viktig att den belagts med restriktioner.
- Det har generellt varit svårt att inhämta mer detaljerad systeminformation såsom specificering av fundamentala parametrar eller som mer i detalj beskriver systemlösningar och signalbehandlingsmetoder. T.ex. är frekvensintervallet för SoldierVision obekant. Denna bristande information har gjort det svårt att jämföra de olika systemkoncepten med varandra.
- Bärbara systemkoncept existerar t.ex. MARS, RadarVision/SoldierVision, RadarFlashlight, TNO och FOI Miniradar II.
- Flertalet av de väggpenetrerande systemkoncept som identifierats vid kartläggningen är av typen UWB SP - radar. Den använda frekvensen är typiskt några GHz, vilket ger relativt god penetrationsförmåga genom torra ytterväggar. Dessa låga frekvenser är dock inte tillräckliga för att generera högupplösta reella avbildningar av personer bakom väggar. I fallet med innerväggar av spånskiva och gips är det fullt möjligt att operera i millimetervågsbandet (över 30 GHz) och härvid skapa förutsättningar för högupplösta avbildande system. Detta har bl.a. tydligt visats genom de mätningar som utförts vid FOI med IR/mm- och Lilla Gårasystemet.
- Renodlade dopplersystem baserade på CW-teknik, liknande FOIs Miniradar II, finns inte operativt tillgängliga.
- Behovet av sensorsystem som på stand-off-avstånd klarar att utifrån kartlägga byggnaders inre struktur och riktningen till möjliga dopplerkällor är stort. Dylika system torde baseras på någon form av SAR-metod. Denna information ger militärer/poliser förmåga att kunna orientera sig i byggnader. Om informationen också kombineras med ett rörelsedetekterande system kan en förhöjd förmåga att lokalisera motståndare i byggnader erhållas.
- Vad beträffar bestämning av transmissionsegenskaper för olika typer av material finns ingen publicerad motsvarighet till det arbete som genomförts vid FOI, vad beträffar spännvidden av undersökta material och det vida frekvensområde som beaktas (2-110 GHz).
- Ett viktigt konstaterande är att FOI Sensortekniks systemarbeten och experimentella resultat rörande väggpenetrerande radar står sig väl också vid en internationell jämförelse.

10 Referenser

- [1] Afsar, M.N., Button, K.J.: "Millimeter-wave dielectric measurements of materials", Proc. IEEE, vol. 73, no. 1, p. 131-153, January 1985.
- [2] Ahmad, F., Amin, M.G., Kassam, S.A.: "Synthetic aperture beamformer for imaging through a dielectric wall", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 41, no. 1, p. 271-283, January 2005.
- [3] Alexander, P.M., "Reflectivity of some materials at 94 GHz", International Journal of Infrared and Millimeter Waves, vol. 2, no. 6, p. 1243-1251, 1981.
- [4] Bilik, I., Tabrikian, J., Cohen, A.: "Locomotion model-based ATR for ground surveillance radar", Radar 2004, International Conference on Radar Systems, Toulouse, 18-22 October, Paper 8B-NCTR-1, 2004.
- [5] Black, J.: "Motion and Ranging Sensor Through-the-Wall Surveillance System ", Proc. SPIE vol. 4708, International Conference on Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Defense and Law Enforcement, p. 114-121, 2002.
- [6] Burton, G.J., Ohlke, G.P.: "Exploitation of millimeter waves for through-wall surveillance during military operations in urban terrain", Report, Land Force Technical Staff Program V, Department of Applied Military Science, Royal Military College of Canada, Kingston, Ontario, Unofficial Document, 24 May 2000.
- [7] http://www.cambridgeconsultants.com/Downloads/Case_Studies/ImTrack-S-002%20v0.2.pdf
- [8] http://www.cambridgeconsultants.com/news_pr150.shtml
- [9] <http://www.primidi.com/2004/07/02.html>
- [10] <http://www.radarvision.com>
- [11] <http://www.eurekaaerospace.com/impsar.php>
- [12] <http://www.camero-tech.com/>
- [13] <http://www.camero-tech.com/press040630.shtml>
- [14] <http://www.camero-tech.com/press041012.shtml>
- [15] <http://gtresearchnews.gatech.edu/newsrelease/RADARFLASH.html>
- [16] <http://www.cytteracorp.com/radar/through-wall.html>
- [17] <http://www.g-p-r.com/SB02r157.pdf>
- [18] http://www.fcc.gov/Bureaus/Engineering_Technology/News_Releases/2002/nret0203.html
- [19] Chen, V.C.: "Micro-Doppler effect of micro-motion dynamics: A review", Proc. SPIE vol. 5102, Independent Component Analyses, Wavelets, and Neural Networks, p. 240-249, 2003.
- [20] Clark, S.E., Lovberg, J.A., Martin, C.A., Galliano, J.A.: "Passive millimeter-wave imaging for concealed object detection, Proc. SPIE vol. 4708, Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Defense and Law Enforcement, p. 128-133, 2002.
- [21] Damaskos N. J., et al.: "The Inverse Problem for Biaxial Materials", IEEE MTT, 32, 400, 1984.

- [22] Gauthier, S., "Surveillance through concrete walls", SPIE C3I Technologies for homeland security and Homeland Defense III, Orlando 12-16 April, pp. 597-602, ISBN 0-8194-5326-9, 2004
- [23] Geisheimer, J.L., Marshall, W.S., Greneker, E.F.: "A continuous-wave (CW) radar for gait analysis", 35th Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers, Nov. 4-7, Pacific Grove, CA, Conference Record, vol. 1, p. 834-838, 2001.
- [24] Geisheimer, J.L., Greneker, E.F., Marshall, W.S.: "A high-resolution Doppler model of human gait", Proc. SPIE vol. 4744, Radar Sensor Technology and Data Visualization, p. 8-18, 2002.
- [25] Hewish, M.: "New Funding for Through-Wall Surveillance", Jane's International Defense Review, Volume No. 32, August 1999.
- [26] Hunt, A. R., Hogg, R.D.: "A stepped-frequency, CW radar for concealed weapon detection and through the wall surveillance", Proc. SPIE vol. 4708, International Conference on Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Defense and Law Enforcement, p. 99-105, 2002.
- [27] Hunt, A. R.: "A wideband imaging radar for through-the-wall surveillance", SPIE C3I Technologies for homeland security and Homeland Defense III, Orlando 12-16 April, pp. 590-596, ISBN 0-8194-5326-9, 2004.
- [28] Jänis, A., Nilsson, S., Huss, L.-G., Gustafsson, M., Sume, A.: "Through-the wall imaging measurements and experimental characterization of wall materials," presented at Military Remote Sensing, London, UK, 2004.
- [29] Kjellgren, J.: "Short-range radar and radiometer applications at mm-waves", FOI Memo 759, January 2004.
- [30] Kjellgren, J.: "On millimeter wave sensors for urban warfare", 10 pp, Trilateral Workshop on Urban Warfare, FMV, May 2005.
- [31] Lao, R.-R., Tarnq, J.-H., Chiuder, Hsiao, C.: "Transmission coefficients measurement of building materials for UWB systems in 3-10 GHz", 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, VTC 2003, Jeju, South Korea, 22-25 April, vol. 1, p. 11-14, IEEE, 2003.
- [32] MOUT ACTD Operational Requirements, accessed 20 May 2000, Tillgänglig från <http://mout.actd.org/reg.html>; Internet
- [33] Pena, D., Feick, R., Hristov, H.D., Grote, W.: "Measurements and modeling of propagation losses in brick and concrete walls for the 900-MHz band", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 51, no. 1, p. 31-39, January 2003.
- [34] Sato, K., Kozima, H., Masuzawa, H., Manabe, T., Ihara, T., Kasashima, Y., Yamaki, K.: "Measurements of reflection characteristics and refractive indices of interior construction materials in millimeter-wave bands", IEEE 45th Vehicular Technology Conference, Chicago 25-28 July 1995, vol. 1, p. 449-453, 1995.
- [35] Sato, K., Manabe, T., Polivka, J., Ihara, T., Kasashima, Y., Yamaki, K.: "Measurement of the complex refractive index of concrete at 57.5 GHz", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 44, no. 1, p. 35-40, January 1996.
- [36] Sume, A.: "Närfältsfokusering av paraboloidantenn", FOI Sensorteknik, Linköping, Teknisk Rapport FOI-R--1719--SE, september 2005.
- [37] "TNO offers through-the-wall radar for special operations", Jane's International Defense Review, p. 18, August 2004.
- [38] Weir, W.B.: "Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies", Proceedings of the IEEE, vol. 62, no. 1, p. 33-36, January 1974.

- [39] Von Hippel, A.R.: "Dielectric Materials and Applications", The MIT Press, Cambridge, 1954.
- [40] Walton, E.K., Stevens, S.: "Tracking and classification of vehicles and humans using a ground wave radar", Proc AMTA 2003, p. 440-443, 2003.
- [41] Wild, N., Doft, F., Wondra, J., Niederhaus, S. and Lam, H.: "Ultrasonic through-the-wall surveillance system", Proc. SPIE vol. 4708, International Conference on Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Defense and Law Enforcement, p. 106-113, 2002.
- [42] Withington, P., Fluhler, H., Nag, S.: "Enhancing homeland security with advanced UWB sensors", IEEE Microwave Magazine, p. 51-58, September 2003.
- [43] Zhang, Y., Amin, M.G.: "Joint Doppler and polarization characterization of moving targets", IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, Monterey, CA, USA, 20-25 June, vol. 3, p. 3083-3086, 2004.