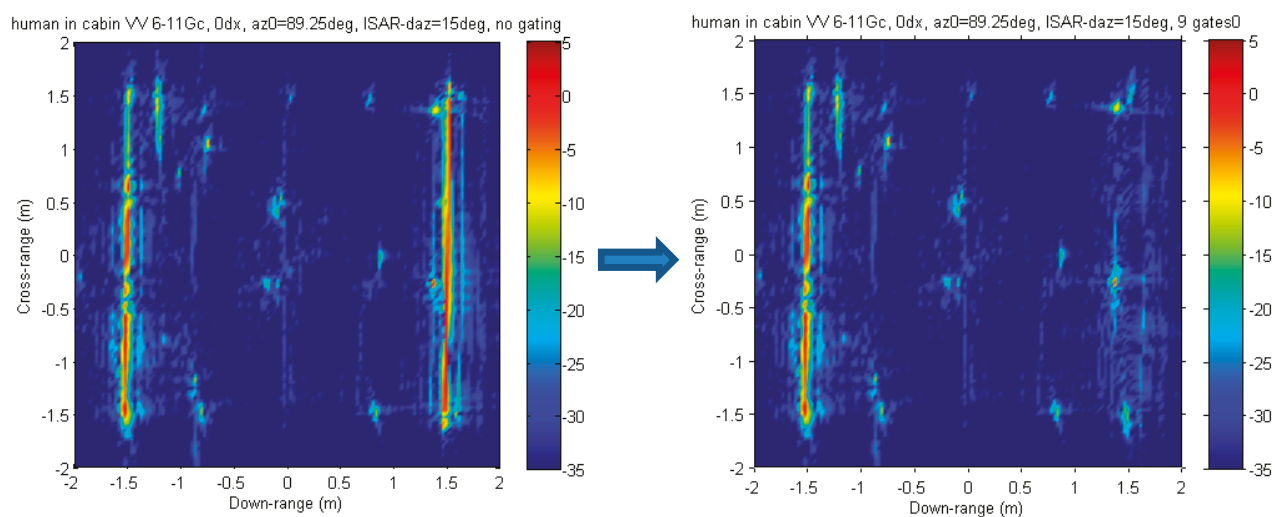


Reducering av väggretur vid penetrerande radarmätning

AIN SUME, ÅSA ANDERSSON, TOMMY JOHANSSON



Ain Sume, Åsa Andersson, Tommy Johansson

Reducering av väggretur vid penetrerande radarmätning

Titel	Reducering av väggretur vid penetrerande radarmätning
Title	Reduction of wall reflection in penetrating radar measurement
Rapportnr/Report no	FOI-R--4034--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2014
Antal sidor/Pages	47 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Försvarsmakten
Forskningsområde	Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E54536
Godkänd av/Approved by	Martin Rantzer
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

Rapporten beskriver det arbete som bedrivits inom projektet "Radar för stridsfältsovervakning", med syfte att studera möjligheter att kompensera för väggens inverkan vid avbildande radarmätningar genom vägg. De mål som här avses är stationära, och då kan man inte använda sig av högkänslig dopplertechnik. Man vill skapa bättre avbildningar av bakomliggande objekt, särskilt nära väggen, och därmed erhålla förbättrade detektionsprestanda. En inledande litteraturstudie har gett impulser till att testa någon metod på mätdata.

Två signalbehandlingsmetoder har valts ut, diametralt motsatta i fråga om hur enkla de är att implementera och deras krav på kännedom om väggegenskaperna. Metoderna har tillämpats på FOI-data från ISAR-mätningar (Invers Syntetisk Apertur-Radar) mellan 6 och 11 GHz av en "friggebod" på vridbord.

Den första metoden består av applicering av ett filter på den starka radarreturen från själva väggen. Filtret justeras in noggrant i avstånd över returen och nollar ut denna i rådata *före* ISAR-bildalstringen. Resultatet är att ett objekt direkt bakom väggen framträder med bättre kontrast i ISAR-bilderna, vilket ger bättre detekterbarhet av objektet. Samma metod är tillämpbar i SAR-fallet (Syntetisk Apertur-Radar).

I den andra metoden modellerar man väggen som en yta med lätt, homogen skrovlighet, för vilken det existerar en teori för beräkning av radarreturen. Metoden kräver att man känner väggens spridande egenskaper, som beror på material och dimensioner, vilka måste mätas upp eller ansättas utifrån annan förkunskap. Väggreduceringen består i att väggens beräknade radarretur subtraheras koherent (med fas) från den uppmätta, även här *före* ISAR-bildalstringen. Appliceringen av denna metod har inte gett något användbart resultat. Någon slutgiltig bedömning kan dock inte göras eftersom modelleringsarbetet kan föras längre. Detta har inte kunnat åstadkommas inom ramen för detta arbete, huvudsakligen därför att simuleringarna krävt långa datorkörningar. Metodens tillämpbarhet i verkliga fall kan alltså ifrågasättas, med tanke på den noggranna kännedom eller uppskattning av väggparametrarna som krävs.

Litteratursökningen har förutom SAR/ISAR-fallen gett en bredare vy av väggreduktionsmetoder. Intressanta metoder som identifierats innefattar spatial filtrering, speciella fokuseringsalgoritmer samt signalbehandlingsmetoder som klassificerar objekt i radarscenen (vägg etc.), med eller utan förkunskap om väggen. Även olika mätmetodik har föreslagits, t.ex. med multipla gruppantennsystem eller med variering av mätavståndet. Metoderna har inte testats på våra FOI-data. Nämnas bör också en välkänd metod vid radarmätningar i allmänhet, nämligen bakgrundssubtraktion, som kräver att man har möjlighet att uppmäta målområdet utan målobjekt.

Nyckelord: radar, se-genom-vägg, bildalstring, avbildning, SAR/ISAR, väggkompensering, modellering

Summary

The report describes the work carried out in the project "Radar for battlefield surveillance", in a work package devoted to studying the possibility to mitigate the influence of the wall in imaging radar measurements through walls. The targets considered are stationary, where high-sensitive Doppler technique is not an option. The aim is to produce better reproduction of objects behind the wall, especially close to it, and hence gain better detection performance. The work has included an initial literature study, giving an impulse to test some methods on measured data.

Two signal processing methods have been selected, diametrically opposed concerning their simplicity of implementation and their requirement of knowledge of the wall properties. The methods have been applied to FOI data obtained from ISAR measurements (Inverse Synthetic Aperture Radar) between 6 and 11 GHz of a wood cabin on a turntable.

The first method, easy to implement, consists of applying a filter to the strong radar return from the wall itself. The filter is carefully adjusted in range across the return, which is set to zero in raw data *before* the generation of the ISAR image. The result is that objects directly behind the wall emerge with better contrast in ISAR images, giving better detectability of the objects. The same method is applicable in the case of SAR (Synthetic Aperture Radar). In the second method the wall is modeled as a surface with light, homogeneous roughness, for which a theory exists for the radar return. The method requires knowledge of the scattering properties of the wall, which depend on material and dimensions, which have to be measured or assumed from other *a priori* knowledge. The reduction of the wall consists of subtracting coherently (with phase) the calculated radar return from the measured return, also here before the generation of the ISAR image. The application of this method has not produced any useful result. However, no definite evaluation can be made since the implementation of the modeling can be developed further. This has not been possible to bring about within the limits of this work, mainly because the simulations have required long computer processing times. The applicability of the method in real cases can hence be questioned considering the accurate knowledge or estimate of the wall parameters that are required.

The literature search has given a broader view of wall reduction methods, beyond the SAR/ISAR cases. Methods considered interesting include spatial filtering, special beamforming algorithms, and signal processing procedures that classify objects in the radar scene (wall etc.) with or without *a priori* knowledge about the wall. Also, various measuring methods have been proposed, for instance with multiple array antenna systems or with different standoff distances. The methods have not been tested on our FOI data. Mention should also be made of a well-known method in radar measurements, *viz.* background subtraction, which requires that it is possible to measure the observed area without target objects.

Keywords: radar, through-wall, imaging, SAR/ISAR, wall mitigation, modeling

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Metodvärdering	8
2.1	Rektangulärt filter	8
2.1.1	Fixt filter	8
2.1.2	Adaptivt filter	10
2.2	Försök med modellbaserad metod - adaptiv CLEAN	11
2.2.1	Radaravbildning i närzon med kompensation för vägginverkan.	11
2.2.2	Skrovlig vägg	14
2.2.2.1	Modellering av spridning från skrovlig vägg	15
2.2.2.2	ISAR-geometrin	17
2.2.2.3	Fältberäkning	20
2.2.2.4	Väggreturen från två väggtyper	21
2.2.2.5	Amplitud- och faskalibrering av modelldata för friggeboden	29
2.2.2.6	Slutresultat; kommentarer	30
3	Litteraturstudie	32
3.1	Signalbehandlingsmetoder	32
3.1.1	Singulärvärdesuppdelning	32
3.1.2	Spatial filtering	35
3.1.3	Andra metoder	35
3.2	Mätmetoder	36
3.2.1	Multi-arraysystem.....	36
3.2.2	Varierande mätavstånd.....	36
4	Sammanfattning	37
5	Referenser	38
Appendix A	Referenser ej citerade i texten	40

1 Inledning

Denna rapport beskriver några metoder för att reducera effekterna av vägginteraktionen vid avbildande ”se-genom-vägg” radarmätningar. Möjligheten att genom signalbehandling eller mätmetodik kompensera för vägginteraktionen undersöks. Syftet är att skapa bättre avbildningar av bakomliggande objekt och därmed erhålla förbättrade detektionsprestanda. Detta gäller speciellt fallet med stationära målobjekt, där man inte kan använda sig av högkänslig dopplertechnik.

Den första väggen kommer normalt att ge den starkaste returen som kan dölja bakomliggande mål, speciellt om dessa ligger nära väggen. Därför är det önskvärt att kompensera för väggens inverkan på den mottagna signalen. Detta kan ske genom signal- eller bildbehandlingsmetoder, eller genom att använda specifikt anpassade mätmetoder.

Kompenseringen kan ske med eller utan kännedom om väggens dimensioner och sammansättning. Om väggens geometri och dielektriska egenskaper är kända kan väggen i princip kompenseras, men detta kan i praktiken visa sig vara orealiserbart t.ex. på grund av beräkningskraven. Osäkerheter rörande dessa egenskaper gör att målpositioner bakom väggen bestäms felaktigt och att mål i bilden smetas ut. Ett exempel på väggkompensering utan användande av väggegenskaper är bakgrundssubtraktion, som dock förutsätter att en mätning av scenen utan mål har gjorts i förväg. Detta kan vara möjligt vid t.ex. övervakningsscenarier, men bakgrundsmätningar är långtifrån alltid tillgängliga.

I detta arbete har försök till reduktion av vägginverkan gjorts via två skilda metoder, kompensering med och utan användande av information om väggens egenskaper. De är diametralt motsatta i fråga om hur enkla de är att implementera. Metoderna har applicerats på samma data från mätningar av en person i en friggebod. Dessa mätningar har tidigare använts för att utvärdera polarimetriska sätt att reducera vägginteraktionen och förstärka kontrasten mellan människor och bakgrund (Johansson m.fl., 2011; Sume m.fl., 2013; Johansson m.fl., 2013). I den ena av metoderna görs en modellering av vägginverkan genom att se den som orsakad av ett skikt med lätt skrovlig yta. Förutom friggebodsmätningarna har där också utnyttjats tidigare gjorda FOI-mätningar genom tegelvägg.

Vidare har en litteraturstudie genomförts, där några olika typer av metoder sammanfattas kortfattat. En metod, som använder singularvärdesuppdelning för att särskilja väggens bidrag, ges större utrymme och sammanfattas i större detalj. Den redovisade sammanställningen är inte heltäckande, men förhoppningsvis har några intressanta och användbara metoder identifierats. För eventuellt fortsatta studier redovisas i Appendix A en lista över alla relevanta publikationer som påträffats.

2 Metodvärdering

I detta arbete har försök gjorts att reducera vägginverkan via två metoder. Den första är enkel att implementera, där man inte behöver någon kunskap om väggens elektromagnetiska egenskaper. Den använder ett rektangulärt filter i rumsdimensionen för att ta bort väggen ("utgrindning"). Den andra metoden är mer komplicerad. Den är baserad på fysikalisk modellering av vägginteraktionen, där modellparametrar ingår som måste bestämmas separat eller ansättas. Fördelen med modellbaserad teknik är att om modellen och de ansatta parametrarna är välvalda, kommer man vid en subtraktion av modellbidraget från mätdata att eliminera väggbidraget, och ingenting annat. Den ska idealt inte påverka mål nära väggen, vilket den första, grövre metoden tenderar att göra.

De två metoderna har testats på data från ISAR-mätningar (Invers Syntetisk Apertur-Radar) i frekvensintervallet 6-11 GHz av en person som satt i en vilstol i mitten av en sparsamt möblerad friggebod. ISAR-avbildningen åstadkoms genom att man placerade friggeboden på ett roterande vridbord. Två stationära antenner, som placerades bredvid varandra på ca 15 m avstånd från boken, användes för sändning och mottagning. Mätningarna beskrevs detaljerat av Johansson m.fl. (2011).

2.1 Rektangulärt filter

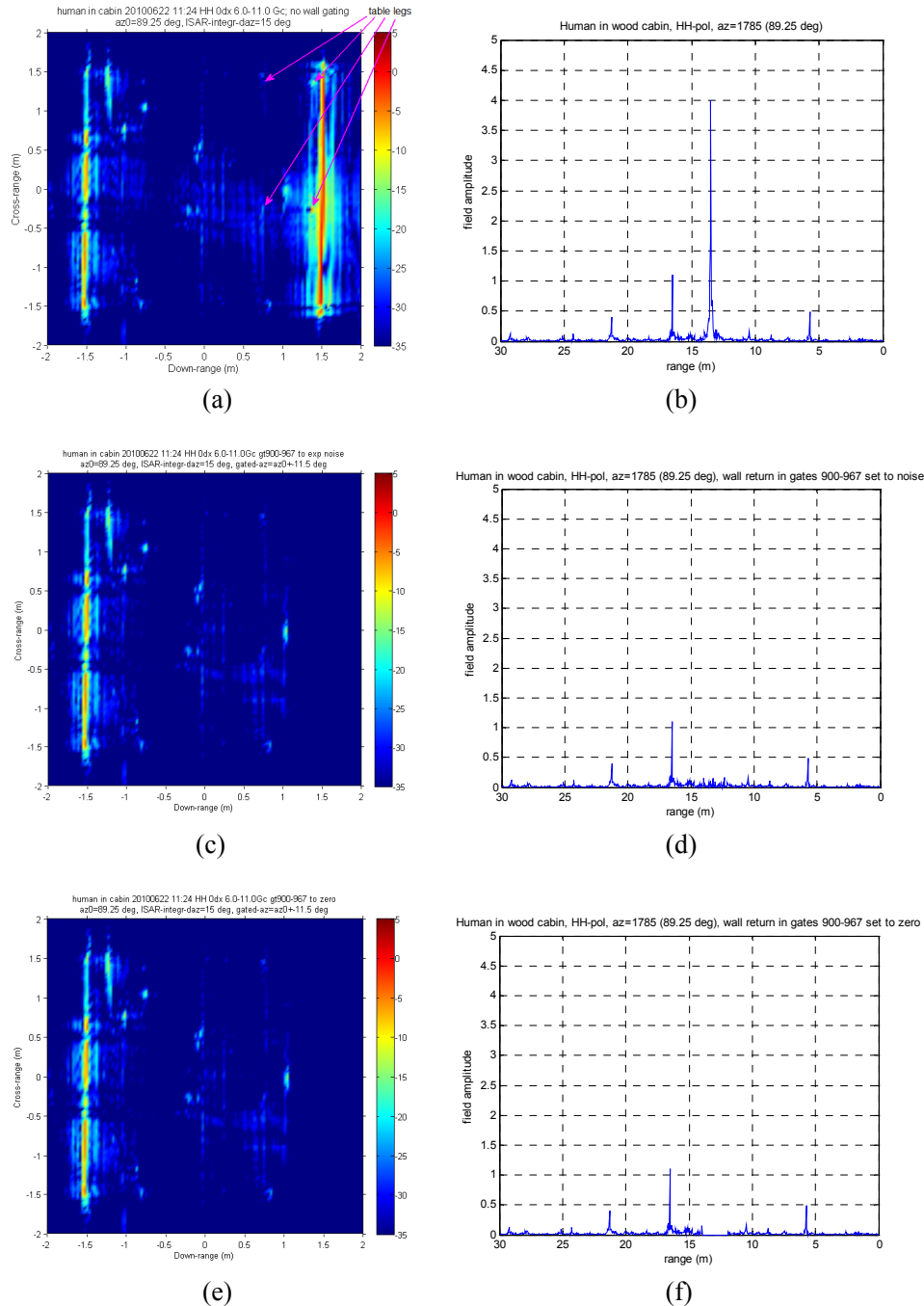
Tillvägagångssättet vid borttagning av väggbidraget från den mottagna radarsignalen inom ett begränsat avståndsintervall (utgrindning) som innehåller väggreturen är följande. Det totala frekvensspektrat insamlades vid ISAR-mätningarna genom frekvensstegning. I det aktuella fallet utnyttjades 1001 frekvenser mellan 6 och 11 GHz. Frekvensstegningen gjordes för varje 0.05° asimutvinkel och så snabbt att vridbordets rörelse under stegningen blev försumbar. Utrustningen är koherent, d.v.s. både amplitud och fas registreras, vilket representeras av komplexa datasampel för varje frekvens. Genom invers fourier-transformering omvandlas ett frekvensspektrum till en tidsföljd av data, vilket genom en omskalning av tidsaxeln ger en följd av datasampel som funktion av avstånd ("avståndsprofil"). I amplitudrepresentationen av denna är det sedan rättframt att identifiera den kraftiga returen från friggebodens närmaste vägg, speciellt nära vinkelrätt infall mot väggen, vilket är det fall som studerats här. Inom ett utvalt avståndsintervall som innefattar väggen, appliceras en lämplig filterfunktion, t.ex. nollställning av data, eller ersättning med lämpligt valda värden, t.ex. brus. Proceduren genomförs för ett antal asimutvärden varefter man alstrar en bild genom ISAR-integration av de väggreducerade data över asimutintervallet. För bildalstringen användes Columbus-programmet (Berlin m.fl., 2000).

Två filterval har undersökts, ett enklare med filtret fixt i avståndsled och ett där filtret förskjuts adaptivt i avstånd så att det är centrerat kring väggreturens topp.

2.1.1 Fixt filter

Problem uppstår allmänt med målobjekt nära bakom väggen. På grund av avståndssidolober är väggreturen utsmetad i avstånd, och om man vill filtrera bort denna utsmetning riskerar man att också eliminera målet. Figur 1 visar exempel på den beskrivna processeringen med fixt filter, där filtret alltså inte är centrerat kring väggmaximum. Bilderna till vänster, (a), (c) och (e), är ISAR-bilder (processering i frekvensintervallet 6-11 GHz) erhållna genom integration över 15° asimut, centrerat i asimut kring vinkelrätt infall från höger i bilden, mot den högra väggen. Polariseringen är HH (horisontell vid sändning och mottagning). Figurerna till höger, (b), (d) och (f), är avståndsprofiler för asimutvärdet med maximal väggretur. Avståndsskalan går från höger till vänster för att efterlikna infallsriktningen i ISAR-bilderna. Det översta bildparet representerar data utan applicering av väggfilter. Det mellersta bildparet visar resultatet av ersättning av mätdata över 68 avståndsluckor (mellan 11.9 och 14.0 m) med exponentialfördelat brus, så att

större delen av väggtoppen elimineras, men med strävan att minimera borttagning av objekt nära väggen. Filtreningen har applicerats på avståndsprofiler över ett 23° brett asimutintervall, centrerat kring vinkelrätt infall. (Det visade sig att ett 15° brett intervall, d.v.s. ISAR-integrationens bredd, gav rester av väggretur i ISAR-bilderna). Det undre bildparet visar filtrering med nollsättning av returen i samma 68 avståndsluckor.

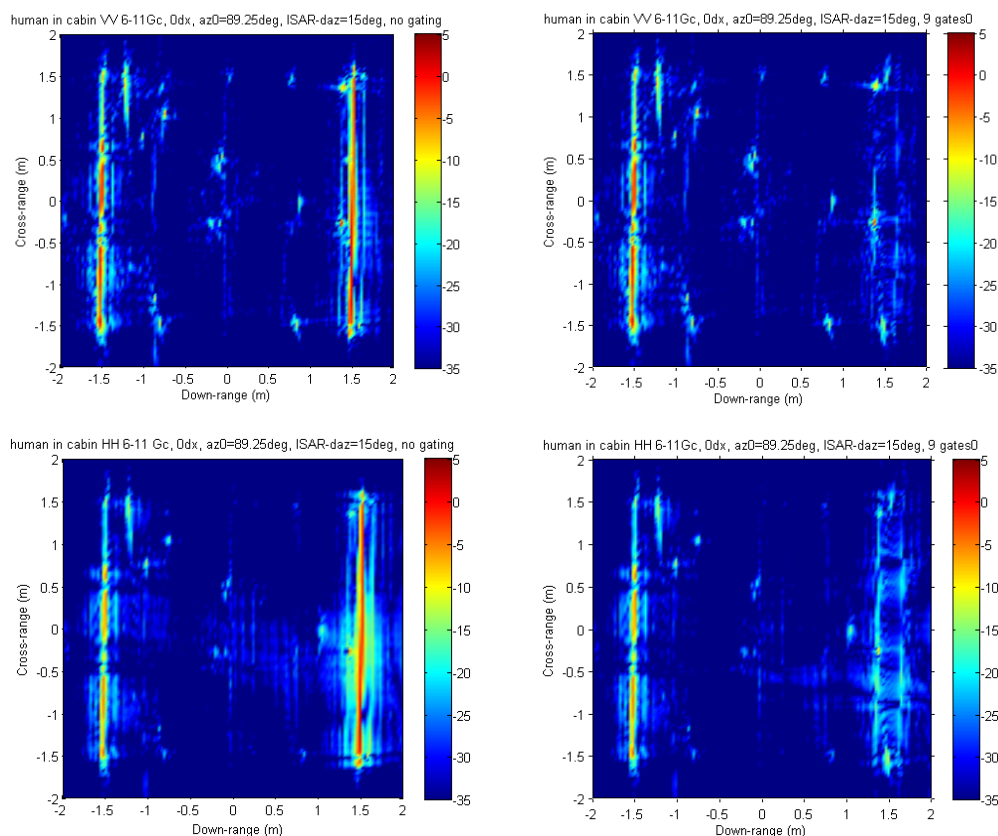


Figur 1. Illustration av bortfiltrering i avståndsdomänen av väggretur före ISAR-bildalstring. ISAR-bilder visas till vänster och avståndsprofiler för vinkelrätt vägginfall till höger. Översta bildparet visar ofiltrerade data, i det mellersta paret har väggreturen ersatts med exponentielfördelat brus inom filtrets utsträckning i avstånd, medan data i samma intervall i det undre figurparet nollsatts, separat för varje asimutvärde över ett 23° brett intervall. ISAR-integrationen har gjorts över ett 15° -intervall, centrerat kring vinkelrätt infall från höger i bilderna. Filtrets placering i avstånd är fix; dess avståndsutsträckning har valts så stor att filtret innefattar väggreturen över hela asimutintervallet.

De båda applicerade filtreringarna medför att väggen närmast radarn inte längre syns i ISAR-bilderna. Att filtreringen sker före bildalstringen och inte i själva ISAR-bilderna medför att även vägginverkan en bit bortom filtrets utsträckning reduceras i amplitud, på grund av ISAR-processeringens egenskaper. Vid det intressanta målobjektet i bodens mitt ser man en mycket svag reduktion av "spökbilderna" av väggen, medan den blir betydande från och med ca 0.5 m från bodens mitt i riktning mot väggen. Bodan innehöll ett bord som utgör ett testobjekt för filtreringens egenskaper närmare väggen. Dess fyra ben är utmärkta med pilar i figurdelen (a). Man ser att filtreringen helt eliminerat de båda benen närmast väggen, vilka syns tydligt i (a).

2.1.2 Adaptivt filter

Det adaptiva filtret reducerar väggreturen genom att nollslätta signalen i några konsekutiva avståndsluckor, med filtret centrerat kring väggreturens maximum (adaptivitet). Eftersom denna vid nära vinkelrätt infall normalt uppträder som en första smal topp i avståndsprofilen för ett specifikt asimutvärde, är den lätt att hitta automatiskt. Detta görs separat för varje asimut före ISAR-bildalstringen, över det vinkelintervall som valts för ISAR-integrationen. Figur 2 visar att den adaptiva filtreringen reducerar väggreturen markant i ISAR-bilderna, medan den inte tar bort bordsbenen strax bakom väggen. Dessa framträder tydligare i de filtrerade bilderna (höger) jämfört med de ofiltrerade (vänster) eller de som erhöles med ett fixt filter (Figur 1).



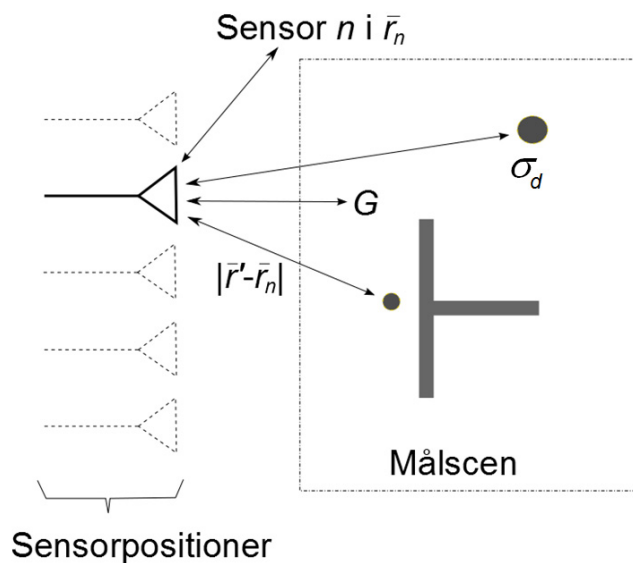
Figur 2. Illustration av reducering av väggretur genom filtrering med adaptiv centrering av filtret kring väggreturens topp. Filtret nollar signalen i 9 konsekutiva avståndsluckor, motsvarande 27 cm i avstånd. Detta görs separat för varje asimutvärde över ett 23° brett intervall, före ISAR-integrationen över ett 15°-intervall, centrerat kring vinkelrätt infall från höger i bilderna. De två vänstra bilderna visar ofiltrerat fall, de två högra med filtrering. Polarisationen är VV för det övre bildparet och HH för det nedre.

2.2 Försök med modellbaserad metod - adaptiv CLEAN

Den andra metoden, adaptiv CLEAN (A-CLEAN) som undersökts genom applicering på mätdata från friggebodsmätningarna bygger på arbeten som gjorts vid Electro Science Laboratory, Department of Electrical and Computer Engineering, The Ohio State University, Columbus OH, USA (Burkholder m.fl., 2007; Chang m.fl., 2010). Den använder sig av en fysikalisk modellering av den första väggreturen. Avsikten är att subtrahera modellreturen från mätdata, varefter bildalstring sker med kompensering för den fasfördröjning och den distorsion som transmissionen genom väggen orsakar. En inkoherent formulering av metodiken är ursprungligen framtagen inom radioastronomi (Högbom, 1974), där den benämns CLEAN (ingen akronym). Ohio-gruppen tillämpar metoden på SAR-avbildning (Syntetisk Apertur-Radar) med avsökande antenn orienterad vinkelrätt mot en plan vägg. Vårt ISAR-fall kräver en mer komplex modell av väggreturen. Som inledning ges här ett sammandrag av Chang m.fl. (2010) genomgång av närfälts-radaravbildning, generaliserad till bildalstring genom vägg; därefter presenteras ett försök till generellare modellering för ISAR-fallet.

2.2.1 Radaravbildning i närzon med kompensation för vägginverkan

Figur 3 visar en SAR-mätscen enligt Chang m.fl. (2010), med en radarantenn som rör sig längs en rakbana under det att den belyser och samlar in data från en målscen i fri rymd.



Figur 3. Inmätning av en målscen med SAR-avsökning i frirymd. Storheterna definieras i texten (efter Chang m.fl., 2010).

Det bakåtspridda fältet (plus brus eller klotter), mottaget av sensor n , kan representeras i frekvensdomänen av integralen

$$S_n(k) = \int_{V'} G(k, \vec{r}', \vec{r}_n) \sigma_d(\vec{r}') dV' + N(k), \quad (2.1)$$

där

G är överföringsfunktionen, eller Green-funktionen, eller punktspridarfunktionen för bildalstringen,

$k = 2\pi f / c$, är vågtalet,

V' är volymen som upptas av målet eller scenen,

$N(k)$ representerar brus och klotter,

σ_d är ”reflektivitetstätheten” som representerar spridd retur från position $\vec{r}'$ på målet,

$\vec{r}_n$ är sensorposition n .

Givet de mottagna signalerna i alla sensorpositioner kan en radarbild skapas enligt

$$I(\vec{r}') = |\tilde{\sigma}_d(\vec{r}')| = \left| \sum_n \int_k G^{-1}(k, \vec{r}', \vec{r}_n) S_n(k) w(k) dk \right|, \quad (2.2)$$

där

$\tilde{\sigma}_d$ är estimerad reflektivitetstäthet från de individuella punkterna i scenen,

$\vec{r}'$ representerar det betraktade scenpixelläget,

$w(k)$ är en fönsterfunktion, som kan introduceras för att minimera sidolobsklotter.

Under antagande om utbredning i fri rymd och med en antagen tidsfaktor $e^{j\omega t}$, ges överföringsfunktionen (tvåvägs) av (Kristensson, 1999)

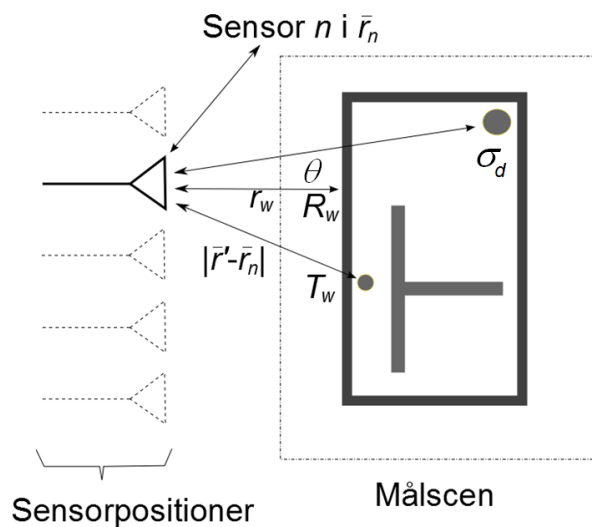
$$G(k, \vec{r}', \vec{r}_n) = \frac{e^{-j2k|\vec{r}' - \vec{r}_n|}}{(4\pi |\vec{r}' - \vec{r}_n|)^2}. \quad (2.3)$$

Bildalstringsfunktionen blir då (med utelämnande av fönsterfunktionen)

$$I(\vec{r}') = |\tilde{\sigma}_d(\vec{r}')| = \left| \sum_n |\vec{r}' - \vec{r}_n|^2 \int_k e^{j2k|\vec{r}' - \vec{r}_n|} S_n(k) dk \right|. \quad (2.4)$$

Den inre integralen över k i (2.4) genererar avståndprofilerna och kan beräknas med FFT-algoritmen.

Radarscenen med en omslutande vägg visas i Figur 4.



Figur 4. Målscen med omslutande vägg. Storheterna definieras i texten (efter Chang m.fl., 2010).

Med väggspredningseffekter blir den mottagna signalen (plus brus eller klotter)

$$S_n(k) = R_w(k)e^{-j2kr_w} + \int_{V'} T_w^2(k, \theta) \sigma_d(\vec{r}') \frac{e^{-j2k|\vec{r}' - \vec{r}_n|}}{(4\pi|\vec{r}' - \vec{r}_n|)^2} dV' + N(k), \quad (2.5)$$

där $R_w(k)$ och $T_w(k)$ är väggens reflektions- respektive transmissionskoefficient och r_w är det vinkelräta avståndet mellan antenn och vägg. Första termen i (2.5) är den direkta väggreflektionen, och som i (2.1) representerar den andra termen spridningen från den väggomslutna scenen. Eftersom syftet är att extrahera σ_d inverterar vi (2.5)

$$\tilde{\sigma}_d(\vec{r}') = \sum_n |\vec{r}' - \vec{r}_n|^2 \int_k [T_w^2(k, \theta)]^{-1} \{S_n(k) - R_w(k)e^{-j2kr_w}\} e^{j2k|\vec{r}' - \vec{r}_n|} w(k) dk. \quad (2.6)$$

Termerna inom de båda klammarna i (2.6) representerar kompensationen för den direkta väggreflexen (den andra klammern) samt propagationsdistortionen genom väggen (klammern som innehåller transmissionskoefficienten).

Chang m.fl. (2010) karakteriserar väggens reflektion och transmission med motsvarande koefficienter enligt Fresnels teori för ett planparallellt skikt av tjockleken t . De anger respektive formel i sina ekv. (7) och (8). (Dessa innehåller ett flertal uppenbara och mindre uppenbara tryckfel.). Väggens elektromagnetiska egenskap bestäms, förutom av t , k och θ , av skiktets (komplexa) dielektricitetstal ϵ_r . Denna koefficient bestäms av dem med en MMSE-estimator (*minimum mean square error*). Den kan också bestämmas med en genetisk algoritm (Zwick m.fl., 2002).

Reduktionen av väggreturen uttrycks i (2.6) inom klammern

$$\{S_n(k) - R_w(k)e^{-j2kr_w}\}. \quad (2.7)$$

Den andra termen, som uttrycker själva väggreturen, implementeras av Chang m.fl. (2010) via en modellbaserad teknik, som utgör en modifiering av CLEAN-algoritmen. Kort uttryckt söker CLEAN-algoritmen efter den starkaste (oönskade) fläcken i en scenbild och tilldelar den en punktspridarfunktion, baserad på dess intensitet. Därefter avlägsnas denna starkaste fläck från scenen och den näst starkaste, oönskade lokaliseras och extraheras. Processen upprepas tills alla oönskade starka bidrag har avlägsnats.

I föreliggande fall har vi inte isolerade (d.v.s. okopplade) punktspridare. I stället för en punktspridarfunktion ansätter Chang m.fl. (2010) en väggspredningsfunktion som erhålls via en bandbegränsad fouriertransform av reflektionskoefficienten i frekvensdomänen. Denna väggspredningsfunktion lokaliseras och extraheras från avståndsprofilen, associerad med varje sensorplacering (i vårt ISAR-fall vridbordsasimut).

I den konventionella CLEAN-algoritmen är den antagna spridningsfunktionen en punktspridares, vilket i frekvensdomänen motsvaras av ett konstant spektrum över det aktuella bandet. I avståndsdomänen är alltså punktspridarfunktionen

$$g(r) = \int_{k_0 - k_B/2}^{k_0 + k_B/2} e^{j2kr} dk = e^{j2k_0r} k_B \text{sinc}(k_B r), \quad (2.8)$$

där $k_0 = 2\pi \cdot f_0 / c$, $k_B = 2\pi B / c$, f_0 är centerfrekvensen och B bandbredden. Vid adaptiv CLEAN (A-CLEAN) har man i stället

$$g_w(r) = \int_{k_0 - k_B/2}^{k_0 + k_B/2} R_w(k) e^{j2kr} dk, \quad (2.9)$$

där $R_w(k)$ är den analytiska reflektionskoefficienten för ett skiktat medium enligt fresnelsk teori.

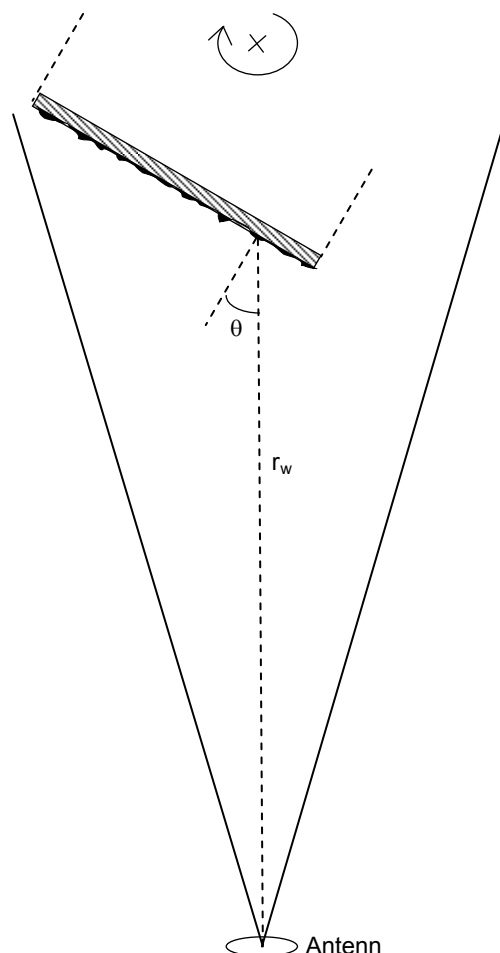
Den adaptiva CLEAN-algoritmen enligt Chang m.fl. (2010) innehåller följande steg:

1. Förberäkna spridarfunktionen $g_w(r) = \int_k R_w(k) e^{j2kr} dk$.
2. För varje sensorposition n :
 - a. Beräkna avståndsprofilen $s(r) = \int_k S(k) e^{j2kr} dk$ för alla r .
 - b. För varje önskad stark topp m :
 - i. Finn A_m och r_m sådana att $\int |s(r) - A_m g_w(r - r_m)| dr$ minimeras.
 - ii. Ersätt $s(r)$ med den renade profilen $s(r) - A_m g_w(r - r_m)$ för alla r .
 - c. Beräkna det renade spektrumet $S(k) = \int s(r) e^{-j2kr} dr$ för alla k .

Efter appliceringen av A-CLEAN-algoritmen beräknas en omfokuserad bild enligt (2.6) med användning av transmissionskoefficienten $T_w(k, \theta)$ beräknad med Fresnels teori för ett planparallellt skikt. För att undvika möjligheten att transmissionskoefficienten, som uppträder i nämnaren, kan anta värdet noll (i frekvensdomänen) använder Chang m.fl. (2010) bara dess fas, d.v.s. de försummar väggens amplituddämpning och antar att den bara ger en fasändring.

2.2.2 Skrovlig vägg

FOI:s se-genom-mätningar av träbod gjordes i form av ISAR-mätningar på vridbord, vilket innebär att man inte har samma geometri som Chang m.fl. (2010) med sensorn på konstant avstånd från väggen, vilken hela tiden är vinkelät mot antennaxelns riktning. I ISAR-fallet betraktar antennen väggen allmänt under snett infall enligt skissen i Figur 5. Den andra avvikelserna är att väggytan inte är plan utan skrovlig.

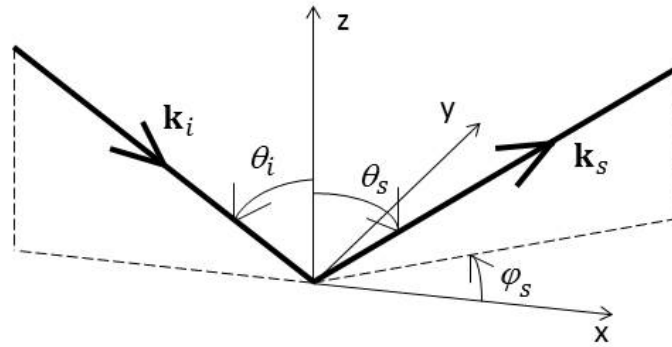


Figur 5. Vy sedd uppifrån av ISAR-fallet. Överst är vridbordets rotationsaxel antydd, och en vägg av en bod visad. En antenn belyser väggen med en lobbredd som väl innesluter densamma.

2.2.2.1 Modellering av spridning från skrovlig vägg

En rent fresnelsk behandling med spekulära väggreflexer i Figur 5 skulle inte ge någon väggretur vid snett infall. För att få det måste man behandla väggen som en ojämn yta. Vi kommer här att använda teori för spridning från en sådan yta som separerar två halvoändliga medier. Man beskriver spridningen allmänt som en superposition av två komponenter: en spekulärt (koherent) spridande komponent samt en diffus (icke-koherent) komponent (Ulaby m.fl., 1982; Elizavetin och Paillou, 1997; González-Partida m.fl., 2009). När ytojämnheternas standardavvikelse är av samma storleksordning som våglängden, eller större, kan den koherenta komponenten försummas, vilket man inte kan göra om den är mindre än omkring en kvarts våglängd.

Figur 6 definierar vinklar i en bistatisk spridningsgeometri.



Figur 6. Bistatisk spridningsgeometri för en skrovlig yta i xy -planet, med en infallande våg med vågvektorn $\mathbf{k}_i$ i xz -planet som sprids i riktningen $\mathbf{k}_s$. Koordinatvalet överensstämmer med Ulaby m.fl. (1982), fig. 12.5.

Uttryckt i spridningskoefficienter σ^0 (effektmått, radarmålearea per belyst ytenhet, m^2/m^2) skriver man spridningen från en skrovlig väggyta som

$$\sigma^0(\theta_i, \theta_s, \varphi_s) = \sigma_c^0(\theta_i) + \sigma_i^0(\theta_i, \theta_s, \varphi_s), \quad (2.10)$$

där σ_c^0 är den koherenta komponenten och σ_i^0 den inkoherenta. Vinklarna definieras i Figur 6. Sannolikheten för en viss skrovlighetshöjd h antas vara oberoende av positionen $\vec{r}$ på ytan och ha en gaussisk fördelning med medelvärde noll och standardavvikelsen σ_h . Täthetsfunktionen är då

$$p(h(\vec{r})) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_h} \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_h^2}\right). \quad (2.11)$$

Vidare antas en statistiskt homogen, isotrop yta, där korrelationsfunktionen mellan två punkter $\vec{r}_1, \vec{r}_2$ på ytan endast beror på avståndet mellan punkterna, ρ . Antag vidare en gaussisk form hos korrelationsfunktion, med korrelationslängden l_c . Korrelationsfunktionen blir då

$$C(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = C(|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|) = C(\rho) = e^{-\rho^2/l_c^2}. \quad (2.12)$$

Den koherenta komponenten blir (Elizavetin och Paillou, 1997)

$$\sigma_c^0 = \frac{|R_{pp}(\theta_i, \varepsilon)|^2}{B^2} \exp\left(-\frac{16\pi^2\sigma_h^2}{\lambda^2}\right) \exp\left(-\frac{\theta_i^2}{B^2}\right), \quad (2.13)$$

där R_{pp} är Fresnels reflektionskoefficient för vald polarisation p , och ε är dielektricitetsstalet för väggmaterialet. Vidare är

$$B^2 = \frac{\lambda}{2\pi \cdot r_w \beta} + \left(\frac{\beta}{2}\right)^2, \quad (2.14)$$

där

β är antennens fjärrfältslobbredd,

r_w är avståndet mellan radarantennen och väggen.

För den inkoherenta komponenten antas att ytavvikelseerna är mindre än våglängden och att ytans medellutning är begränsad. För att beräkna spridningskoefficienten kan man använda *Small Perturbation Model* (SPM) (Ulaby m.fl., 1982). Resultatet blir

$$\sigma_{i,pq}^0 = 8|k^2 \sigma_h \cos \theta_i \cos \theta_s \alpha_{pq}|^2 W(k_x + k \sin \theta_i, k_y), \quad (2.15)$$

där $k=2\pi/\lambda$ är beloppet av vågvektorn vid våglängden λ , vinklarna definierades i Figur 6, och α_{pq} är polarisationsamplituden för polarisationskombinationen pq . I föreliggande arbete studeras endast lika polarisation vid sändning och mottagning. Storheterna är givna i avsnitt 12-5.3 i Ulaby m.fl. (1982), varvid man får observera att de studerar spridning i en horisontell yta (mark), medan vi här har en vertikal (vägg). I Figur 5 ser man att en vertikalt orienterad polarisation som faller in mot väggytan i det horisontalplan som är visat i figuren svarar mot horisontell polarisation i markfallet (jfr Figur 6). Tvetydigheten undviks om man använder benämningarna TE och TM polarisation (Elektriska respektive Magnetiska fältet Transversellt mot infallsplanet). Vi kommer här endast att presentera data för TE-fallet (vertikal polarisation vid sändning och mottagning, VV, vid mättillfället). Vi kommer att försumma avvikelser från detta rena fall för strålar som inte ligger i ett horisontalplan. Den polarisationsamplitud som är aktuell blir då Ulaby m.fl.:s α_{hh} , som ges av ekvation (12.96b) i Ulaby m.fl., som med permeabiliteten $\mu_r = 1$ blir

$$\alpha_{hh} = -\frac{(\epsilon_r - 1) \cos \varphi_s}{(\cos \theta_s + k'_z)[\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}]}, \quad (2.16)$$

där $k'_z = \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_s}$.

Storheten W är ytans skrovlighetsspektrum, d.v.s. fouriertransformen av ytans korrelationskoefficient $C(u, v)$:

$$W(k_x, k_y) = \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} C(u, v) \exp[-jk_x u - jk_y v] du dv, \quad (2.17)$$

där

$$k_x = -k \sin \theta_s \cos \varphi_s,$$

$$k_y = -k \sin \theta_s \sin \varphi_s.$$

Med gaussisk korrelation enl. (2.12) gäller att (Ulaby m.fl., 1982, s. 938)

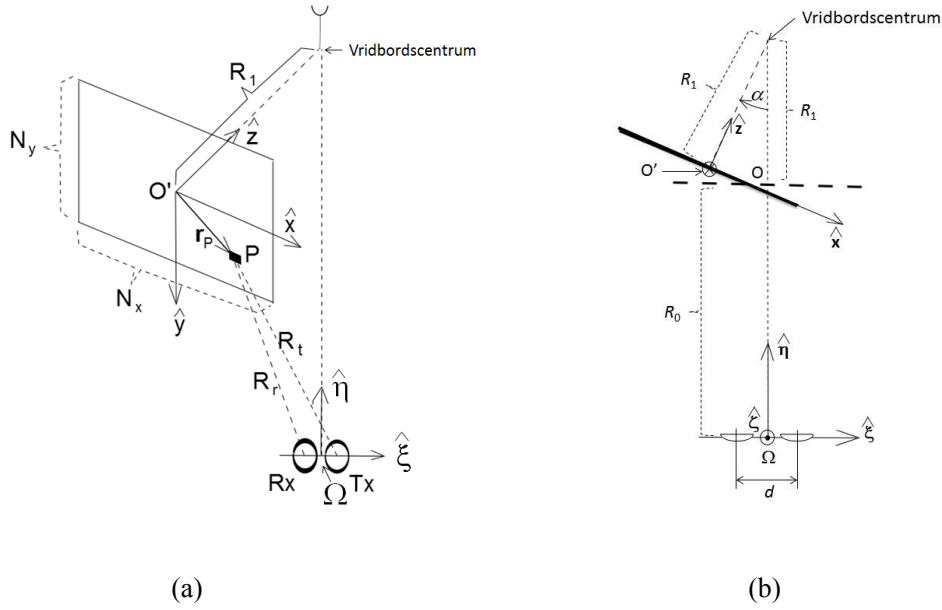
$$\iint_{-\infty}^{\infty} \exp[-\frac{\rho^2}{l_c^2} + jk_x u + jk_y v] du dv = \pi l_c^2 \exp[-\frac{(k_x^2 + k_y^2) l_c^2}{4}], \quad (2.18)$$

och då blir

$$W(k_x, k_y) = \frac{l_c^2}{2} \exp\left[-\frac{(k_x^2 + k_y^2) l_c^2}{4}\right]. \quad (2.19)$$

2.2.2.2 ISAR-geometrin

Spridningen från väggen beräknas som en superposition av delbidrag från $N_x \times N_y$ ytelement, se Figur 7. Bidragen behandlas som punktformade, placerade i centrum av elementen. Med de valda värdena $N_x = 301$, $N_y = 181$ och väggmått $3 \times 1.8 \times 0.02$ m i sida x höjd x tjocklek blir separationen mellan punkterna 3 cm i sida och höjd.



Figur 7. Två ej skalenliga perspektivskisser av mätgeometrin med tvåantennsystemet (Tx=sändare; Rx=mottagare) och den modellerade väggdelen. Figurdelen (a) visar ett snedperspektiv medan (b) är sedd rakt uppfifrån. Vridbordet har roterat vinkeln α från läget då väggen, streckad i (b), är vinkelrät mot antennsystemets symmetriaxel. Spridningen från väggen modelleras som en superposition av delbidrag från ytelement varav ett är visat, beläget i punkten P i figurdelen (a). Bidraget från den andra belysta väggen, som inte ritats ut, försummas, eftersom belysningen blir flack (α är en liten vinkel).

Ytelementet centrerat kring punkten P har Ortsvektorn $\mathbf{r}_P$, som i koordinatform är

$$\mathbf{r}_P = x_P \hat{\mathbf{x}} + y_P \hat{\mathbf{y}}, \quad (2.20)$$

Bidragen summeras med en gångvägsfas $2\pi(R_t + R_r)/\lambda$, som varierar från ytelement till ytelement. På samma sätt varierar vinklarna θ_i, θ_s och φ_s som ingår i beräkningen av de koherenta och inkoherenta bidragen enligt (2.13) respektive (2.15). De beräknas enligt följande.

Infallsvinkeln för en stråle från Tx, som faller in mot punkten P är (se Figur 7 (a)),

$$\theta_i = \cos^{-1}[-\hat{\mathbf{z}} \cdot (-\hat{\mathbf{R}}_t)], \quad (2.21)$$

där $\hat{\mathbf{R}}_t$ är en enhetsvektor längs vektorn $\mathbf{R}_t$ från Tx till P. I komponentform är

$$\mathbf{R}_t = -\frac{d}{2} \hat{\boldsymbol{\xi}} + (R_0 + R_1) \hat{\boldsymbol{\eta}} - R_1 \hat{\mathbf{z}} + x_P \hat{\mathbf{x}} + y_P \hat{\mathbf{y}}. \quad (2.22)$$

Basvektorerna i koordinatsystemet $\boldsymbol{\Omega}$ kan uttryckas i koordinatsystemet $\mathbf{O}'$ som

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\xi}} &= \cos \alpha \hat{\mathbf{x}} + \sin \alpha \hat{\mathbf{z}}, \\ \hat{\boldsymbol{\eta}} &= -\sin \alpha \hat{\mathbf{x}} + \cos \alpha \hat{\mathbf{z}}, \\ \hat{\boldsymbol{\zeta}} &= -\hat{\mathbf{y}}. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Då blir

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_t &= \left[-\frac{d}{2} \cos \alpha - (R_0 + R_1) \sin \alpha + x_P \right] \hat{\mathbf{x}} + y_P \hat{\mathbf{y}} + \\ &\quad \left[-\frac{d}{2} \sin \alpha + (R_0 + R_1) \cos \alpha - R_1 \right] \hat{\mathbf{z}}. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Efter normering av denna vektor kan θ_i beräknas ur (2.21).

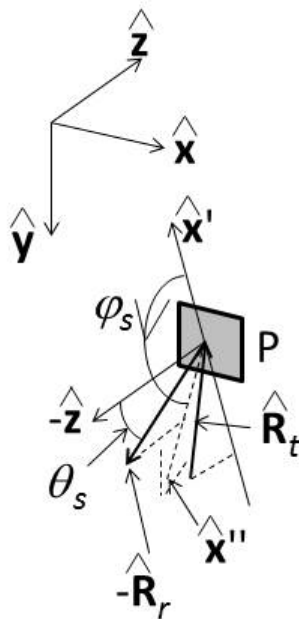
För beräkningen av θ_s och φ_s krävs vektorn $\mathbf{R}_r$ från Rx till P, som i komponentform kan uttryckas som

$$\mathbf{R}_r = \frac{d}{2} \hat{\xi} + (R_0 + R_1) \hat{\eta} - R_1 \hat{z} + x_p \hat{x} + y_p \hat{y}. \quad (2.25)$$

Insättning av (2.23) ger

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_r = & \left[\frac{d}{2} \cos \alpha - (R_0 + R_1) \sin \alpha + x_p \right] \hat{x} + y_p \hat{y} + \\ & \left[\frac{d}{2} \sin \alpha + (R_0 + R_1) \cos \alpha - R_1 \right] \hat{z}. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Figur 8 visar geometrin för den bistatiska spridningen i ytelementet i P, med införda koordinatsystem.



Figur 8. Bistatisk spridningsgeometri i ett ytelement centrerat kring punkten P på väggytan, som ligger i $\hat{x}\hat{y}$ -planet. Enhetsvektorn $\hat{x}'$ ligger också i detta plan. Den infallande strålen i riktningen $\hat{\mathbf{R}}_t$ ligger i $\hat{x}'(-\hat{z})$ -planet. Den reflekterade strålen i riktning $-\hat{\mathbf{R}}_r$ bildar asimutvinkeln φ_s med $\hat{x}'$ -axeln och sin normaliserade komponent $\hat{x}''$ i $\hat{x}\hat{y}$ -planet. Den bildar i spridningsplanet polarvinkeln θ_s med $(-\hat{z})$ -axeln. (Jfr. Figur 6).

Eftersom $\hat{x}'$ ligger i infallsplanet kan den uttryckas som $\hat{\mathbf{R}}_t$'s komponent i $\hat{x}\hat{y}$ -planet, normaliserad:

$$\hat{x}' = [(\hat{\mathbf{R}}_t \cdot \hat{x})\hat{x} + (\hat{\mathbf{R}}_t \cdot \hat{y})\hat{y}] / \sqrt{(\hat{\mathbf{R}}_t \cdot \hat{x})^2 + (\hat{\mathbf{R}}_t \cdot \hat{y})^2}, \quad (2.27)$$

På samma sätt är $-\hat{\mathbf{R}}_r$'s normaliserade komponent i $\hat{x}\hat{y}$ -planet

$$\hat{x}'' = [(-\hat{\mathbf{R}}_r \cdot \hat{x})\hat{x} + (-\hat{\mathbf{R}}_r \cdot \hat{y})\hat{y}] / \sqrt{(\hat{\mathbf{R}}_r \cdot \hat{x})^2 + (\hat{\mathbf{R}}_r \cdot \hat{y})^2}, \quad (2.28)$$

varefter vinkeln φ_s kan beräknas som

$$\varphi_s = \cos^{-1}(\hat{x}' \cdot \hat{x}''). \quad (2.29)$$

Polarvinkeln θ_s ges av

$$\theta_s = \cos^{-1}[(-\hat{\mathbf{R}}_r) \cdot (-\hat{\mathbf{Z}})]. \quad (2.30)$$

2.2.2.3 Fältberäkning

För att beräkna de koherenta och inkoherenta bidragen enligt den valda modellen återstår att bestämma värden för väggmaterialets dielektriska egenskaper samt skrovlighetens statistiska egenskaper, d.v.s. höjdavvikelse samt korrelationslängden.

I beräkningen av den koherenta komponenten enligt (2.13) ingår en reflektionskoefficient R samt vid bildalstringen enligt (2.6) en transmissionskoefficient T . Vi kommer här att använda värden från den fresnelska teorin tillämpad på ett planparallellt skikt. Värdena är funktioner av väggens dielectricitet och tjocklek. Uttryck för dessa finns t.ex. i Kristensson (1999), i en tidigare FOI-rapport (Sume och Nilsson, 2008) samt även i Kong (1986), kapitel III, ekvation (26) och (35), varvid bör uppmärksammas att i ekvation (35) endast uttrycket på sista raden, efter sista likhetstecknet, är korrekt. I Kongs uttryck på näst sista raden på sidan skall p_{1t} ersättas med p_{t1} .

Från mätningar på trä av Jänis och Nilsson (2006) har för dielektricitetsstalet ε antagits värdet

$$\varepsilon = 2.1 - j0.12, \quad (2.31)$$

Uppskattning av skrovlighetsparametrarna redovisas i avsnitt 2.2.2.4.

När valet av alla modellparametrar gjorts, beräknas som nämnts det totala mottagna spridningsbidraget som en superposition av delbidrag från ytelementen. Modelleringen ger effektmått på dess styrka i varje element, i form av reflektivitet. Fältstyrkeamplitud erhålls genom rotutdragning av effektmåttet. Eftersom vi i detta arbete vill använda modelleringen i en ISAR-tillämpning, som innefattar koherent signalintegration för bildalstring, tillkommer att pålägga signalerna fas. Detta görs enligt följande.

Den mottagna fältstyrkan fås genom att till den modellerade fältstyrkeamplituden alstrad av ett ytelement pålägga en gångvägsfas lika med vågtalet $2\pi/\lambda$ gånger tillryggelagd gångväg, både för den inkoherenta och den koherenta komponenten. För den inkoherenta komponenten tillkommer en stokastisk fas, som representerar den inkoherenta spridningen, orsakad av att ytan inte är jämn. Om man antar att skrovligheten är liten jämfört med våglängden och att ytelementen är högst av våglängdsstorlek, är det rimligt att anta att den stokastiska fasan är betydligt mindre än 2π . Tester i samband med simuleringarna visade att en fas med gaussisk fördelning med medelvärdet noll och standardavvikelsen $\pi/3$ var förenlig med mätdata. Faser som närmade sig 2π gav fasbrus i den simulerade mottagna signalen som inte kunde ses i mätdata.

Formelmässigt blir gångvägsfasen från sändning till mottagning

$$\Delta\phi = 2\pi(R_t + R_r)/\lambda. \quad (2.32)$$

Mottagen fältstyrka för en viss orienteringsvinkel α av väggen (se Figur 7), för den koherenta respektive den inkoherenta komponenten blir,

$$E_c \propto \sum_{nx=1}^{N_x} \sum_{ny=1}^{N_y} \sqrt{\sigma_{c,P}} \exp[-j \frac{2\pi}{\lambda} (R_{t,P} + R_{r,P})], \quad (2.33a)$$

$$E_i \propto \sum_{nx=1}^{N_x} \sum_{ny=1}^{N_y} \sqrt{\sigma_{i,P}} \exp[-j \frac{2\pi}{\lambda} (R_{t,P} + R_{r,P}) + \varphi_i], \quad (2.33b)$$

där index P representerar ett visst ytelement svarande mot specifikt nx , ny i summeringen, och där φ_i är en normalfördelad fas med medelvärdet noll och standardavvikelsen $\pi/3$.

Fältstyrkan enligt (2.33) ger inget absolutvärde; den är okalibrerad. Då den i den senare processeringen kommer att subtraheras från den uppmätta, krävs någon slags kalibrering.

Här har använts en enkel normeringsprocedur, där modelldata normeras med hjälp av relativa styrkan hos väggreturtopparna i modelldata jämfört med mätdata. (Se vidare avsnittet före Figur 14).

2.2.2.4 Väggeturen från två väggtyper

I detta avsnitt skall vi studera själva väggeturen genom jämförelse mellan mätningar och modellsimuleringar. Förutom friggebodens trävägg kommer modelleringen testas på en tidigare uppmätt tegelvägg, vilken vi presenterar först. Testet med tegelvägg görs för att validera modelleringen på väggar med olika egenskaper (skrovlighet, material, tjocklek).

Tegelvägg

Modelleringen av spridningen från en skrovlig yta tillämpas här på data från en tidigare FOI-mätning mot en 11 cm tjock tegelvägg enligt Figur 9 (Nilsson m.fl., 2006, 2008).



Figur 9. Bildalstrande mätning genom tegelvägg med avsökande antennsystem (från Nilsson m.fl., 2008).

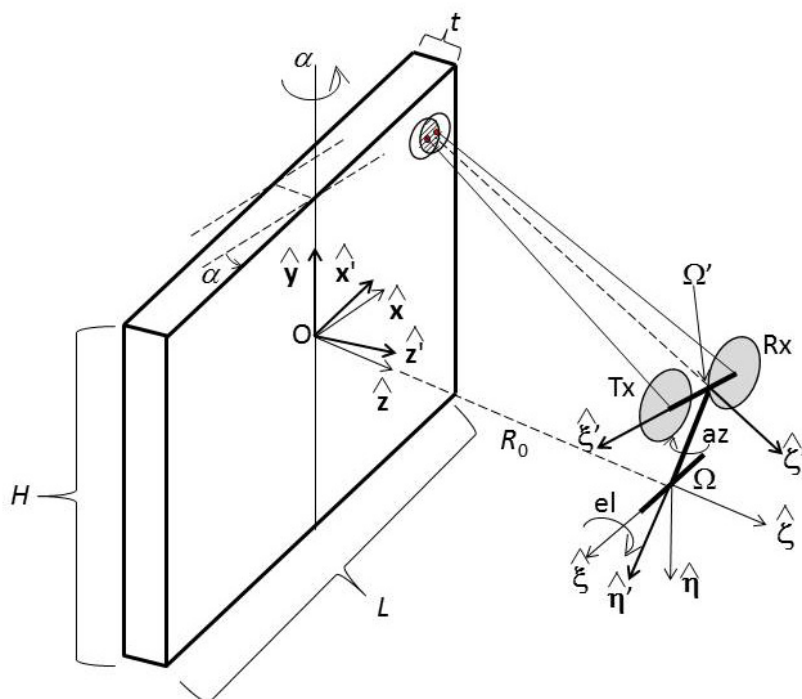
Mätningarna gjordes med ett tvåantennsystem, som med en stegmotor kunde inriktas noggrant i asimut och elevation, vilket möjliggjorde bildalstring av mätobjektet. Eftersom mätobjekten befann sig i antennernas närfält gjordes två närfältsfokuseringar. Genom vridning av antennerna justerades de båda antennernas *boresight*-riktningar att korsa varandra 1 m bortom väggen, där ett mätobjekt (stående människa) var placerat (ej visat i Figur 9). Vidare närfältsfokuserades varje antenn separat mot mätobjektet genom förskjutning av respektive matarhorn i längdled (Sume, 2005a), vilket gav ett lobavtryck med en diameter mindre än 1 dm på väggavståndet 3 m. Systemets viktigaste data framgår av Tabell 1.

Tabell 1. Mätssystemdata vid mätningar mot tegelvägg.

Princip	Frekvensstegad, tidsgrindad CW ("continuous wave") radar
Frekvensområde	28-40 GHz
Avståndsupplösning	1.25 cm
Frekvensstegning	1001 frekvenser i steg om 12 MHz
Stegtid	10 μ s/frekvens
Antenner	
Diameter	0.328 m
Fokalavstånd	0.116 m
Fjärrfältslöbbredd	1.3°
Fokusering	Närfältsfokuserade genom förskjutning av antennmatningen och inriktning av antennaxlarna mot ett mätobjekt bakom väggen
Antennvridbord	Asimut- och elevationsstegning; steglängd 0.4°
Mottagare	Koherent (amplitud och fas)

Radarbilder skapas med detta antensystem genom realbildalstring, enligt följande. För varje asimut/elevationsriktning där datainsamling gjorts transformerar man med IFFT (Invers Fourier-Transform) det genom frekvensstegningen skapade spektret (komplexa värden) till en avståndsprofil. Man låter sedan fältstyrkans belopp för ett specifikt asimut/elevation/avstånds-värde direkt presenteras som en färgkodad bildpunkt. Varje bildpunkt (pixel) i de asimut-/elevations-bilder som visas i det följande är alltså skapad från data enbart i en enda asimut/elevationsriktning hos en realantennlob. Detta skiljer sig från bildalstring med SAR eller ISAR, där en bild är en sammanlagring (syntetisering) av data från insamling från olika relativa antenn/mål-orienteringar. Väggreduktionen i tegelfallet sker i data efter bildalstringen, medan det i ISAR-fallet sker före alstringen. I det senare fallet görs en omfokusering med reducerade data enligt (2.6). Detta bör, förutom dämpning av bildelement från väggreturen, resultera i en skarpare bild av målet, eftersom fördröjnings- och brytningseffekter i väggen bör ha reducerats. Någon sådan effekt har man inte i realbildsfallet; reduktionen minskar amplituden hos bildelement från väggreturen, vilket kan ge en tydligare målsignatur för ett mål nära väggen. Här avser vi bara att ge en åskådlig, kvalitativ bild av själva väggmodelleringens kvalitet.

Figur 10 visar modelleringen av geometrin. Ur den kan man på liknande sätt som vid ISAR-geometrin räkna ut de storheter som krävs för att modellera mottaget fält av mottagarantennen. Dessa beräkningar presenteras inte här.

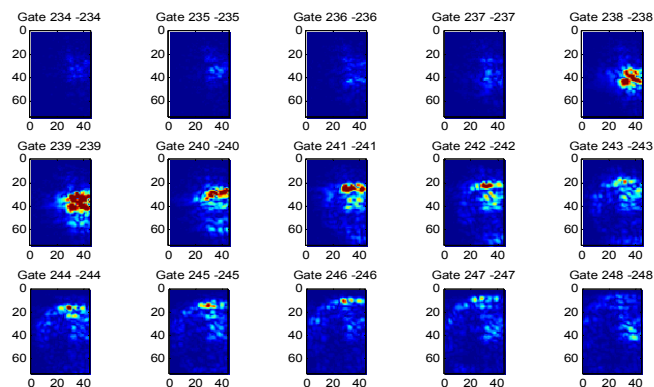


Figur 10. Geometri vid mätningarna mot tegelvägg. Koordinater med prim-tecken refererar till fallet med vriden vägg (vinkeln α) och roterad antenn i asimut och elevation, medan koordinater utan prim-tecken avser ett neutralläge, utan utvridningar.

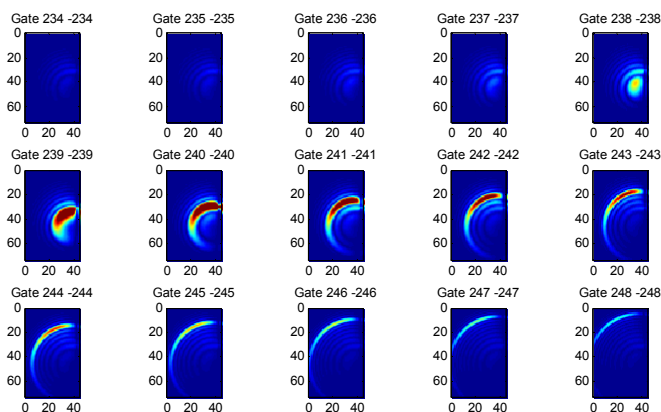
Figur 11 visar bilder över radarreturen i enskilda avståndsluckor (1.25 cm avståndsupplösning) innefattande tegelväggen. Modelldata har genererats enligt den redovisade modellen för skrovlighet, med inkoherent och koherent komponent. Skrovlighetsparametrarna, σ_h och l_c , har uppskattats utgående från okulärbesiktning av teglet samt data från González-Partida (2006) till $\sigma_h = 3$ mm och $l_c = 1$ cm. Tegelväggen uppvisade tydlig inhomogenitet, speciellt i skarvarna mellan tegelstenarna, med tydliga springor.

Det visade sig att den koherenta komponenten blev försumbar jämfört med den inkoherenta. Genetisk algoritmt teknik har använts för att få noggranna uppskattningar av fyra geometriska storheter som modellbilderna var känsligt beroende av, nämligen

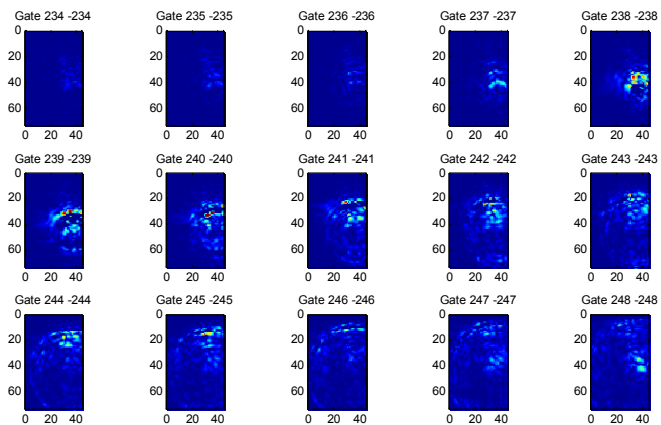
- antensystemets absoluta inriktning i elevation och i asimut (två storheter) vid start av antennavsökningen längst upp till vänster i en bild, d.v.s. punkten (0,0) i indexkoordinater,
- väggens avstånd till antensystemet,
- den vertikala väggens absoluta vridning kring en vertikal axel (den var inte exakt parallell med laboratoriets husvägg).



Mätdata



Modelldata

Inkoherent subtraktion
Mätdata-Modelldata

Figur 11. Tre grupper av radardata i form av bilder av radareturen i samma konsekutiva avståndsluckor (1.25 cm djupa), numrerade 234-248, innefattande tegelväggen på avståndet 3 m från antennerna. Varje bild mäter $36^\circ \times 22^\circ$ (elevation x asimut) eller ca 2.5 m x 1.5 m (höjd x sida) på väggen. Skalsiffrorna i bilderna för höjd och sida avser index för elevation respektive asimut; ett indexinkrement motsvarar 0.4° . Den nedersta gruppen (Mätdata-Modelldata) utgör en inkoherent subtraktion av de två övre grupperna. Den har samma färgskala som den översta gruppen, medan modelldatas färgskala (mellersta gruppen) valts separat för lämplig presentation.

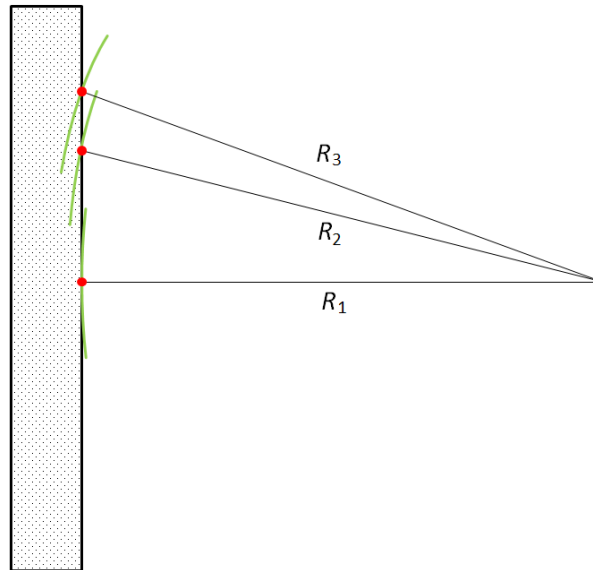
Den genetiska algoritmtekniken har beskrivits av bl.a. Zwick m.fl. (2002) i en tillämpning för bestämning av materialparametrar hos multilagerstrukturer. Tekniken kan i korthet beskrivas enligt följande. Utgående från startuppskattningar av värden för de parametrar man vill bestämma med algoritmen slumpar man ett stort antal värden (M) kring

startvärdena, varvid man stipulerat spridningsintervallen. För varje slumpningsomgång testas parametervärdena via någon lämplig storhet (här: fältstyrka) som kan jämföras med mätdata i en kvalitetsfunktion ("fitness function"). Parametervärdena från den slumpningsomgång som ger bäst överensstämmelse med mätdata tas som startuppskattning för en ny "generation" slumpningar, nu med snävare spridning. En rad sådana upprepningar leder förhoppningsvis till att parametrarna uppvisar en konsekvent konvergens. Kvalitetsfunktionen utgörs av det normaliserade rms-värdet

$$\Delta_{g,m} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (A_k - A'_{k,g,m})^2}, \quad (2.34)$$

där k är ett löpande index för datavärden som jämförs, K är totala antalet jämförda data, A_k är uppmätt fältamplitud, $A'_{k,g,m}$ är modellerad amplitud (efter lämplig normering till mätdata, se nedan) beräknad för parametervärdena från slumpning m i generation g . För jämförelsen i (2.34) användes inte alla datavärden, utan bara de som hade ett signifikant bidrag från väggen, som är den dominerande reflektorn i mätrymden. Signifikansen avgjordes i mätdata, genom att bara inkludera A_k -värden som översteg en lämpligt satt tröskel. Deras k -värden svarar mot specifika index i den 3-dimensionella A_k -mätmatrisen (asimut $\times$ elevation $\times$ avstånd). Den genetiska algoritmen ger bästa förskjutning av data i motsvarande $A'_{k,g,m}$ -matris i de tre dimensionerna. Ytterligare detaljer rörande algoritmen, med flödesschema, ges av Zwick m.fl. (2002).

En förklaring till bildernas allmänna utseende och deras förändring med ökande avstånd från radarn ges tydligast av modelldata i Figur 11, med den månskärformade radarreturen i avståndsluckorna, och skissen i Figur 12.



Figur 12. Tvådimensionell figur och monostatisk förenkling, med tre olika inriktningar hos antennen, med tre punkter på väggen där fältet beräknas enligt den tidigare beskrivna modellen för skrovlig yta. Geometrin och sfäriska avståndsluckor förklarar det allmänna utseendet hos det modellerade fältet i Figur 11, enligt beskrivningen i texten.

Avståndsluckorna i Figur 11 visar radarbilder som genererats från datainsamlingen i asimut och elevation. Figur 12 visar (tvådimensionellt) geometrin med avståndsluckorna approximerade med sfäriska skal, i tre lägen hos antennsvepningen, där datainsamling antas ske i simuleringen. Denna räknar ut avståndet från sändarantennen till lobens träffpunkt på väggen och simulerar en retur, som beror av infallsvinkeln hos loben mot väggen. En gångvägsfas $2R_i \cdot 2\pi/\lambda$ tilldelas fältreturen, vilket senare vid

sammanlagringen av de frekvensstegade data ger en synlig retur på avståndet R_i . Eftersom avståndet varierar för de tre lägena visade i figuren, hamnar returererna i det visade fallet i tre olika avståndsluckor. I tre dimensioner (asimut, elevation, avstånd) får man "månskäror" i de sfäriska avståndsluckorna. Den något vridna väggen (ca 5°) ger olika lutning och placering i sidled av returererna i Figur 11. Vid den verkliga simuleringen gjordes inte en monostatisk approximation.

De båda översta figurdelen i Figur 11 visar att modelleringen har gett en fältbild som storskaligt överensstämmer med den uppmätta: en väggretur vars form övergår från en fläck med maximal intensitet (riktningen R_1 i Figur 12 med vinkelrätt infall), till nämnda skärar, som också kan skönjas i mätdata. Läget och storleken hos dessa former i simuleringen är beroende av de fyra geometriska parametrar som bestämdes med genetisk algoritmteknik; utan denna bestämning når man inte överensstämmelsen i Figur 11. Den undre figurdelen visar att man med den inkoherenta subtraktionen kraftigt reducerat väggen. Väggreduktionen har dock i detta fall ingen märkbar effekt på detekterbarheten av en stående människa 1 m bakom väggen, vilket skurits bort i Figur 9 och som inte täcks av avståndsluckorna i Figur 11. Reduktionen ökar inte den svaga signal på personens avstånd, som fanns antydd i mätdata och som skulle kunna tolkats som en målretur.

Trävägg (Friggebod)

Figur 13 visar tre foton av friggebodsväggen; man ser att ytan inte är en homogen yta, utan innehåller ådring och horisontella fåror i fogarna, medan andra delar är relativt släta. Modelleringen med homogen, lätt skrovlig yta är således approximativ och de båda parametrarna som beskriver skrovligheten, σ_h och l_c , bör då inte tolkas att ha en tydlig fysisk motsvarighet, utan snarare som två mera allmänna modellparametrar. En följd av detta är att parametrarna inte nödvändigtvis bäst bestäms genom direkt uppmätning; i stället har vi valt att bestämma dem genom en kombination av bedömningar grundade på

- 1) okulärbesiktning med försök till direkt uppmätning enligt Figur 13, nedre vänstra delfiguren
- 2) jämförelse av modelldata med mätdata i en genetisk algoritm och i en mer subjektiv bedömning
- 3) publicerade värden.



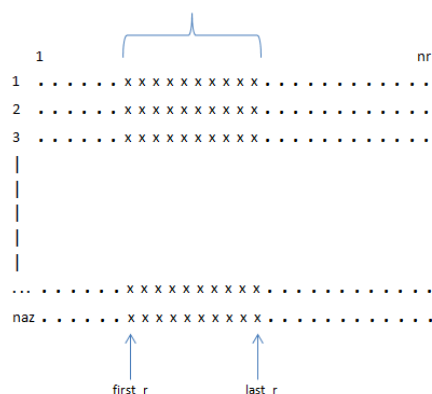


Figur 13. Tre foton av friggeboden för illustration av ytstrukturen.

Punkt 2) ovan kan beskrivas i mer detalj enligt följande.

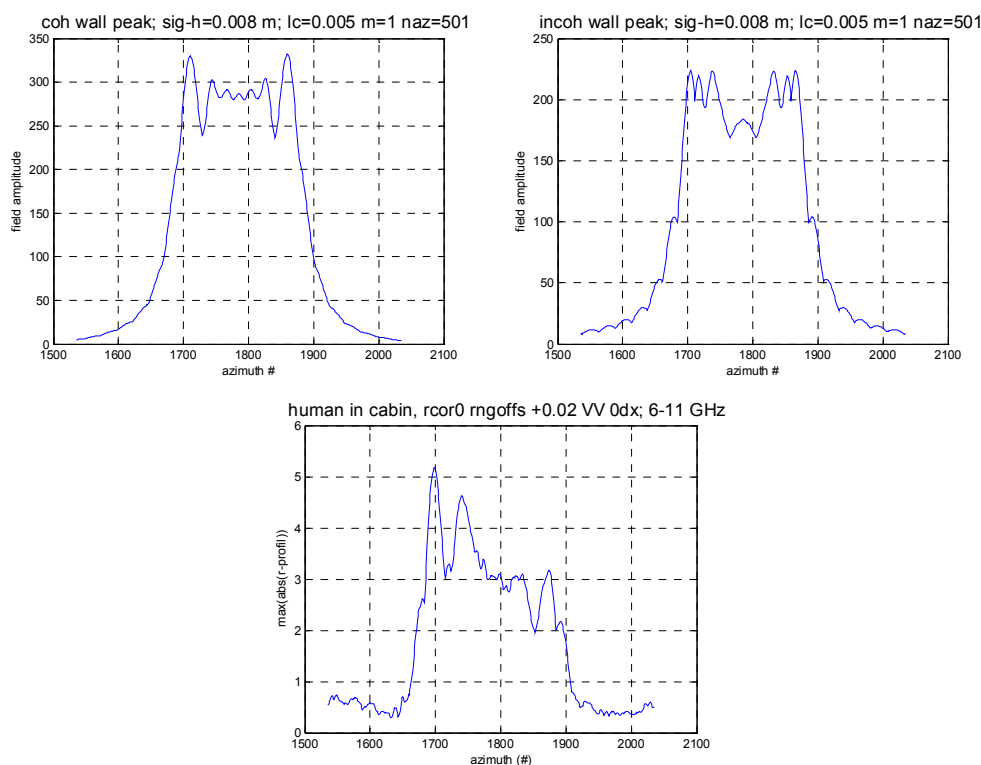
Som nämnts i det tidigare avsnittet om tegelväggen, ingår som en central del i den genetiska algoritmen en jämförelse, i en kvalitetsfunktion, mellan uppmätt fältstyrka och en modellerad fältstyrka. Denna senare är baserad på i algoritmen slumpade värden av de båda sökta parametrarna, instoppade i modellerna för den koherenta och den inkoherenta spridningen från en lätt skrovlig yta. För kvalitetsfunktionen har här valts att summera dessa två komponenter med samma fas (=gångvägsfasen) till en total, komplex fältstyrka, som efter invers fouriertransformering bildar en avståndsprofil med komplexa värden. Fältet beräknas inom ett 25° brett asimutintervall, centrerat kring vinkelrätt infall mot väggen, för samma värden och täthet i asimut som i mätningarna. ISAR-mätdata å sin sida bearbetas genom att man för varje asimutvärde bildar en avståndsprofil genom invers fouriertransformering av det insamlade komplexvärda frekvensspektret (stegning över 1001 frekvenser mellan 6 och 11 GHz).

Man har då två $naz \times nr$ -matriser (antalet asimutvärden $\times$ antalet frekvenser), en med komplexa mätdata och en med komplexa modelldata, med avståndsprofilerna i horisontell led i Figur 14. Separat för varje asimut normeras (kalibreras) modellavståndsprofilen genom multiplikation med en faktor sådan att profilens största absolutbelopp (väggtoppen) blir lika stor som motsvarande största topp i mätdata. För att spara räknetid görs inte jämförelsen mellan modell- och mätdata för alla matriselement i avståndsled, utan bara mellan data centrerade kring väggtoppen i avståndsprofilerna, mellan avståndsluckorna $first_r$ och $last_r$, inom klammern i Figur 14. Jämförelsen i kvalitetsfunktionen ger kvalitetsmättet $\Delta_{g,m}$ enligt (2.34), där $K=last_r-first_r+1$ är totala antalet jämförda element.



Figur 14. Mät- och modelldata (komplexa) samlas i var sin matris enligt figuren, där naz (=501) är antalet asimutvärden för vilka data producerats, och nr (=1001) är antalet avstånds-”luckor” (=antalet frekvenser). Modell- och mätdata jämförs för ett utvalt antal matriselement (markerade med x och klammern), såsom beskrivs i texten.

Den genetiska algoritmen visade ingen klar konvergens mot väl avgränsade värden på de båda sökta skrovlighetsparametrarna utan gav ungefär samma godhetsmått $\Delta_{g,m}$ för relativt skilda parametervärden: den minsta differensen mellan uppmätt och modellerat fält, med $\Delta_{g,m}=0.151140784$, erhöles för $\sigma_h=9.3$ cm och $l_c=0.06$ mm, medan den slumpning som hamnade på tionde plats med avseende på $\Delta_{g,m}$ hade $\sigma_h=2.98$ cm och $l_c=9.3$ mm, med $\Delta_{g,m}=0.151141607$, alltså en skillnad i godhetstal först i sjunde siffran. Den dåliga diskrimineringen kan bero på ett dåligt valt godhetsmått $\Delta_{g,m}$, eller på att modellen med lätt skrovlighet i grunden är en dålig representation av träväggen, vilket också antyds av att värdena på σ_h känns fysikaliskt orealistiskt höga. I stället för att anamma de enligt den genetiska algoritmen bästa parametervärdena har vi valt ett mer subjektivt motiverat val av de mera fysikaliskt rimliga värdena $\sigma_h=8$ mm och $l_c=5$ mm. Valet har delvis motiverats av det värde som det ger för den relativa styrkan mellan den inkoherenta och koherenta komponenten. Figur 15 visar absolutbeloppet för väggreturens maximala värde i de modellerade avståndsprofilerna, inom hela asimutintervallet inom vilket väggkompenseringen applicerats. Som jämförelse visas i samma figur mätningarnas maximivärden.



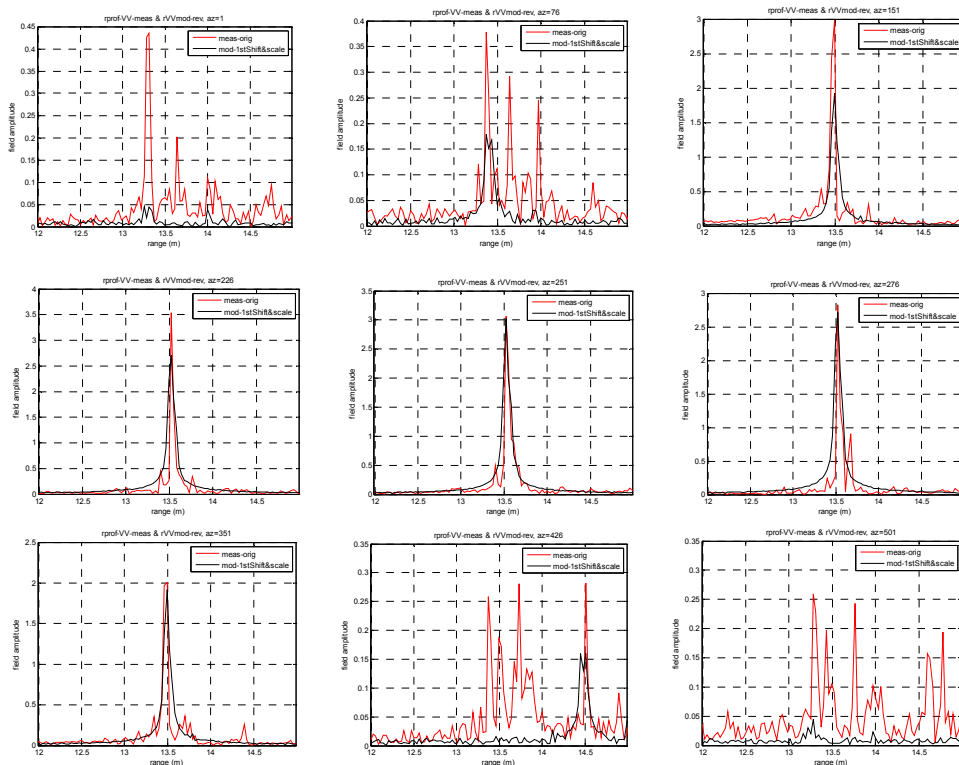
Figur 15. Absolutbeloppet för väggreturens maximala värde i avståndsprofilerna, inom hela asimutintervallet inom vilket väggkompenseringen applicerats. De båda övre figurerna visar modelldata för den koherenta respektive den inkoherenta komponenten, med modellparametervärdena $\sigma_h=8$ mm och $l_c=5$ mm. Som jämförelse visas i den undre figuren de uppmätta maximivärdena (VV-polarisation). Modelldata är här okalibrerade relativt mätdata, men har rätt styrkeförhållande relativt varandra.

Man ser i Figur 15 att modelleringen fångat in ett par karakteristika hos mätdata: bredden hos kurvorna överensstämmer mycket väl; modellkurvorna uppvisar liknande flikighet, vilket i mätdata förmodligen beror på interferens mellan delreflektorer hos bodväggen inklusive knutarna, som bildar diedrar i höjddled. Även takstrukturer kan inverka. Någon närmare undersökning har inte gjorts inom detta arbete rörande vad som orsakar flikigheten. Man kan notera att endast den inkoherenta komponenten innehåller

fluktuationerna på flankerna och bortom dessa, som man kan se i mätprofilen. Å andra sidan efterliknar den koherenta komponenten bäst de stora flikarna i kanterna av den breda toppplattan. Av dessa skäl har det bedömts lämpligt att anta ovannämnda skrovlighetsparametervärden som ger ungefär likvärdiga amplituder hos den koherenta och inkoherenta komponenten. Den koherenta summan av dessa båda får representera den totalt mottagna fältstyrkan, inklusive den stokastiska fasen enligt (2.33b) hos den inkoherenta komponenten. De höga σ_h -värdena på flera cm i de bästa slumpningarna i den genetiska algoritmen resulterar i att den koherenta komponenten är försumbar, vilket alltså här inte bedömts vara fallet i friggebodsmätningarna.

2.2.2.5 Amplitud- och faskalibrering av modelldata för friggeboden

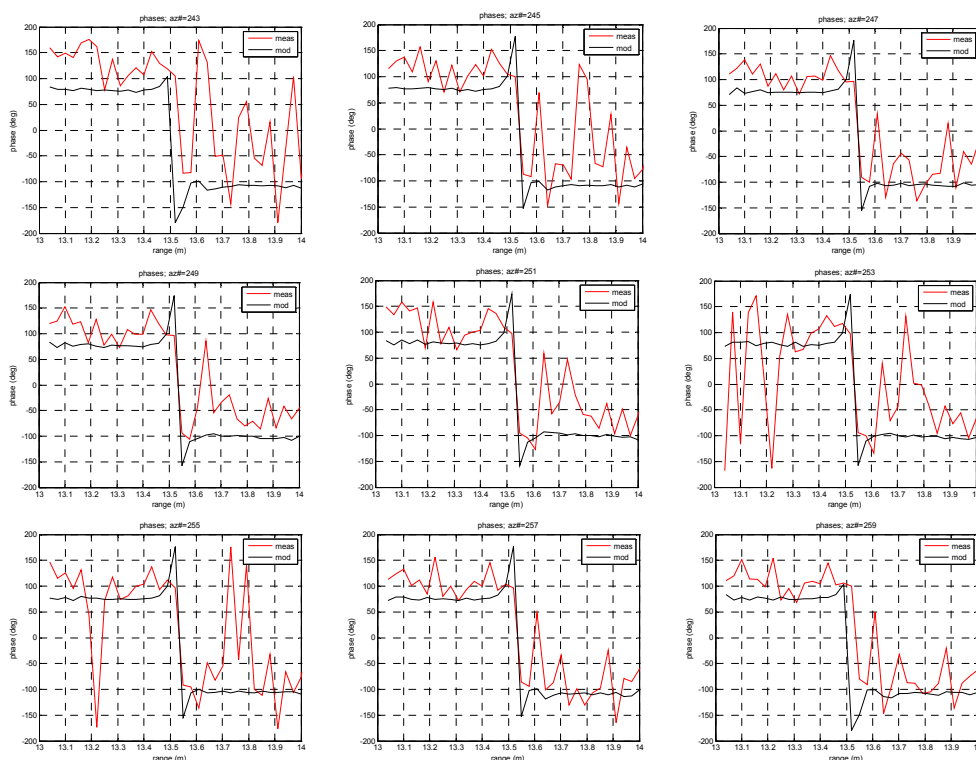
Eftersom avsikten är att subtrahera modelldata för friggeboden koherent från mätdata för att reducera väggreturen, behövs en noggrann injustering i avstånd samt en normering i amplitud av modelldata relativt mätdata, vilket kan ses som amplitud- respektive faskalibrering. Amplitudnormeringen beskrevs i anslutning till Figur 14. Avståndsskalan hos modelldata baserar sig på uppmätning med måttband av ingående sträckor vid mätningarna och kan därför skilja sig från de verkliga värdena med någon cm, vilket medför alltför stort fel för den senare koherenta ISAR-bildalstringen. En första avståndsjustering av modelldata har gjorts genom bestämning av avståndet från radarn till väggen utifrån topparna i modellerad respektive uppmätt profil. Om en avståndsskillnad förelegat har en fasjustering gjorts av den modellerade profilen (i frekvensdomänen) så att toppen hamnat i samma avståndslucka som i den uppmätta profilen. Figur 16 visar resultatet av dessa båda justeringar i form av avståndsprofiler för 9 utvalda asimutvärden (av totalt 501 stycken), centrerade kring asimutvärdet vid vinkelrätt infall, som är #251 (femte figuren).



Figur 16. Absolutbeloppet av uppmätta (röd) och modellerade (svart) avståndsprofiler för 9 asimutvärden, centrerade kring värdet med vinkelrätt infall mot väggen (asimut #251). Asimutsteget mellan delfigurerna är 3.75° i den övre och den nedre raden, medan i den mellersta raden är steget 1.25° . Hela det visade intervallet är 25° brett. Amplitud- och fasjustering har gjorts av modellprofilerna för bästa överensstämmelse med mätdata; se texten.

Man ser att för de centrala asimutvärdena är väggtoppen korrekt identifierad i mätdata och modelltoppen rätt injusterad. För de återstående asimutvärdena, längst bort från vinkelrätt infall är väggtoppen inte alltid dominerande i mätprofilerna, och modellprofilerna kan ha injusterats till en topp som inte härrör från väggen. Dessutom är modelltopparna här avsevärt svagare än i mätdata; modellen har inte fångat upp alla aspekter hos boden. En annan systematisk avvikelse mellan modell och mätning är att väggtoppen enligt modelldata genomgående är något bredare än i mätdata.

Fasen för data i det centrala avståndsintervallet mellan 13.0 och 14.0 m visas i Figur 17. Asimutsteget mellan delfigurerna har här valts lika med 0.1° , d.v.s. dubbla insamlingsupplösningen; det totala intervallet är alltså 0.8° . Modelldata representerar bara väggreturen, med en karakteristisk fasändring om 180° vid väggytan, som utgör en övergång från tunnare till tätare medium med låga förluster (se t.ex. Stratton, 1941, kapitel IX). Förändringen sker från en avståndslucka till den följande. Mätdata uppvisar samma fasändring dock inte alltid vid exakt samma avstånd, givet av den finita avståndsupplösningen, 0.03 m. Dessutom uppvisar mätdata snabba fasändringar bortom väggen där man har icke-modellerade spridare.



Figur 17. Faser hos uppmätta (röd) och modellerade avståndsprofiler (svart) för 9 asimutvärden centrerade kring värdet med vinkelrätt infall mot väggen (asimut #251). Asimutsteget mellan delfigurerna är här 0.1° , vilket motsvarar dubbla insamlingsupplösningen. Hela visade intervallet är 0.8° brett. Som i föregående figur har amplitud- och fasjustering gjorts av modellprofilerna för bästa överensstämmelse med mätdata.

2.2.2.6 Slutresultat; kommentarer

Ovanstående modelldata representerar stadiet så långt som arbetet hunnit drivas. Det visar sig att en koherent subtraktion av mät- och modelldata enligt ovanstående figurer med efterföljande ISAR-bildgenerering med Columbus inte ger undertryckning av väggen, i motsats till resultatet i Figur 1 och Figur 2. Figur 16 ger en fingervisning om detta resultat: den tydligt större bredden hos väggreturtopparna jämfört med mätdata gör att även om

man lyckas eliminera den topp som motsvarar 180° fasväxling i Figur 17, återstår omgivande avståndsluckor. I dessa skiljer sig amplituder och faser hos mät- och modelldata så att en (komplex) subtraktion ger en rest som är större än de båda ingående komponenterna. En sådan antydning har konstaterats i avståndsprofiler av skillnadsdata. Svårigheterna visar att koherent signalbehandling kräver noggrannhet.

Någon slutgiltig bedömning av metoden kan inte göras eftersom en mer sofistikerad signalbehandling och en mer förfinad bestämning av parametrarna som ingår i modelleringen skulle kunna ge en förbättring av slutresultatet. Detta har inte kunnat åstadkommas inom ramen för detta arbete, huvudsakligen därför att simuleringarna med genetisk algoritm och fältberäkningen av bidragen från alla ytelement för det utvalda asmutintervall kräver dygnslånga datorkörningar. Beräkningarna har gjorts i Matlab, utan försök att reducera beräkningstiderna.

Andra möjliga förklaringar till det negativa resultatet är att modellen (homogent, lätt skrovlig yta) kanske inte är någon bra representation av friggebodsväggen, eller att modellerings- och reduktionstekniken inte är tillämpbar för icke-laboratoriemässiga fall.

Man får ha i åtanke att våra ISAR-mätdata producerats för polarisationsstudier, som inte var inriktade mot att studera reduktion av vägginverkan. Ett mer optimalt försök för att studera väggreduktion vore att ha en tjockare vägg i förhållande till våglängden, med möjlighet att erhålla flera sampel inom väggskiktet, vilket borde underlätta att justera modell- och mätdata i avstånd (fas). Dessutom bör man bestämma väggegenskaperna mera noggrant i separata material- och strukturmätningar.

Man kan också kritiskt studera förebilden till detta arbete, d.v.s. Chang m.fl. (2010). Alla deras utmärkta resultat utgörs av simuleringar (t.ex. Figur 4), där det verkar som om man inte har introducerat något brus i data. Deras sista Figur 8 visar resultat från en SAR-mätning inomhus. Den visar bra reduktion av själva väggen, men måttligare resultat rörande objekten bakom. Metodens tillämpbarhet i praktiska fall kan alltså ifrågasättas, med tanke på den noggranna kännedom eller uppskattning av väggparametrarna som verkar krävas.

3 Litteraturstudie

Att väggpenetrerande radar är ett aktivt forskningsområde illustreras av att en litteratursökning på metoder för väggreduktion hittade fler än 100 referenser från de senaste 10 åren. De funna arbetena spänner över olika områden som signal- och bildbehandling, mätmetodik, systemkrav och materialegenskaper hos olika väggtyper. Alla dessa arbeten har inte kunnat studeras i detalj, utan en sällning var nödvändig. Ett tiotal arbeten har i slutändan studerats noggrannare. Nedan följer kortare sammanfattningar av dessa och deras värde kommer att diskuteras. Några metoder kommenteras mer i detalj, övriga nämns mer kortfattat. Singulärvärdesuppdelning ägnas störst uppmärksamhet i denna sammanställning.

De funna referenserna kan sorteras på olika sätt. Ett sätt, som valts här, är att skilja på de metoder som främst kan karakteriseras som signalbehandlingsmetoder (SVD, CLEAN, MUSIC, etc.) och de som mer har karaktären av mätmetod, även om signalbehandling naturligtvis är en viktig del även i den senare gruppen.

Denna sammanställning är inte på något sätt heltäckande men förhoppningsvis har några intressanta och användbara metoder identifierats.

3.1 Signalbehandlingsmetoder

3.1.1 Singulärvärdesuppdelning

Tivive et al. (2011a) använder singulärvärdesuppdelning (*singular value decomposition*, SVD) för att reducera den första väggreturen i avbildande radarmätningar. Den utvecklade metoden testas på både simulerade och uppmätta data. De tillämpar metoden innan bilden skapas. Detta skiljer Tivive et al. (2011a) från andra arbeten som använder SVD-metoder på bilddata (Chandra et al., 2008; Verma et al., 2009). Tidigare har SVD-baserade metoder även använts i tillämpningar som markradar, t.ex. Karlsen et al. (2001), och måligenkänning, t.ex. Sume (2005b).

I mätsituationen används en monostatisk syntetisk apertur-radar (SAR) där en antenn används för både sändning och mottagning. Radarn arbetar med stegad frekvens med M frekvenser och använder N antennpositioner. Inga förkunskaper om väggen krävs. Det första steget i signalbehandlingen är att omvandla signalen i varje antennposition till avståndsprofiler ("A-scan"). Av dessa bildas sedan ett medelvärde som subtraheras från varje enskild avståndsprofil. Därefter skapas en matris S ("B-scan") av de nya avståndsprofilerna. Raderna i matrisen S svarar mot avstånd, medan kolumnerna svarar mot antennpositioner. Singulärvärdesuppdelning fås sedan med

$$\mathbf{S} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^T \quad (3.1)$$

där $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_M]$ och $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_N]$ är unitära matriser vars kolumner är egenvektorer till $\mathbf{S}\mathbf{S}^T$ respektive $\mathbf{S}^T\mathbf{S}$. Matrisen $\mathbf{D}$ är en diagonal matris som innehåller singulärvärdena för $\mathbf{S}$ i fallande ordning. Matrisen $\mathbf{S}$ kan representeras som en linjär kombination av *eigen*-komponenterna

$$\mathbf{S} = \sum_{i=1}^N w_i (\mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T) = w_1 \mathbf{E}_1 + w_2 \mathbf{E}_2 + \dots + w_n \mathbf{E}_n \quad (3.2)$$

där $\mathbf{E}_i = \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T$ är i :te *eigen*-komponenten och $w_i = D_{ii}$ är i :te singulärvärdet. Relationen mellan singulärvärden och egenvärden är $w_i = \sqrt{\lambda_i}$.

Chandra et al. (2008) och Verma et al. (2009) ansåg att målsignalen fanns i den andra *eigen*-komponenten men, argumenterar Tivive et al. (2011a), då det antagligen finns flera mål (innerväggar, möbler, etc.) är det rimligare att tro att målsignalerna finns i en

delmängd av *eigen*-komponenter. Med hjälp av simuleringar visar Tivive et al. (2011b) att antalet *eigen*-komponenter som innefattar målet varierar beroende på antalet mål i scenen och deras positioner.

Egenskaperna hos väggen påverkar hur den fördelas på *eigen*-komponenterna. Om radarantennen är parallell med en homogen och invariant (med avseende på antennens förflyttning) vägg är väggen representerad av en *eigen*-komponent. Detsamma gäller för en heterogen vägg så länge som den är frekvensoberoende. Om väggen istället är heterogen och frekvensberoende, eller om radarn inte är parallell med vägg (homogen eller heterogen), så är väggen representerad av flera *eigen*-komponenter (Tivive et al., 2011b).

Tivive et al. (2011a) antar att det finns tre komponenter i den mottagna signalen: klotter (väggen), mål och brus. Var och en av dessa upptar en delmängd av *eigen*-komponenterna. Problemet är då att avgöra gränsen mellan dessa. I de flesta praktiska mätfallen kommer väggen att uppta några *eigen*-komponenter. Bruset finns i de sista *eigen*-komponenterna. För att ta bort väggreflektionen och undertrycka brus används en delmängd av *eigen*-komponenterna. De första *eigen*-komponenterna förkastas och de kvarvarande *eigen*-komponenterna viktas så att brusets påverkan minskar. Sedan återskapas matrisen **S** ("B-scan") från vilken bilder skapas med hjälp av lobformning (*beamforming*).

Tivive et al. (2011a) testar sin metod på data från en SAR-mätning där centerfrekvensen var 2,5 GHz och där de använde 201 steg om 5 MHz. Antennerna flyttades parallellt med väggen, 1,27 cm från väggen, och en array med 69 antennelement syntetiserades. Väggen bestod av en 1,6 cm tjock gipsskiva och en 1,9 cm tjock plywoodskiva. Bakom väggen fanns nio mål (tre dihedraller, fyra trihedraller av olika storlek, en cylinder och en sfär) på olika avstånd.

För att avgöra vilka *eigen*-komponenter som ska förkastas och hur viktningen ska göras, måste gränsen mellan klotter (vägg), mål och brus avgöras. Tivive et al. (2011a) använder två metoder. I den första antas att en bakgrundsmätning har genomförts och den jämförs med en mätning med mål i scenen. De tidiga singularvärdena där skillnaden mellan de två mätningarna är små antas härröra från väggen. I det mätfall som de analyserar är det de tre första singularvärdena.

Den andra metoden kan användas om tillgång till bakgrundsmätning saknas. I detta fall studeras skillnaden mellan på varandra följande singularvärden. Lokala maxima i den resulterande kurvan indikerar gränser mellan olika delmängder, enligt författarna.

När gränserna är uppskattade, vet man vilka *eigen*-komponenter som ska förkastas och **S**-matrisen ("B-scan") återskapas. Den bild av scenen som då fås kan jämföras med bilden efter bakgrundssubtraktion. I den jämförelsen (för den mätning författarna visar) ses att några mål framträder svagare i bilden skapad med SVD-metoden.

För att få svaga mål att framträda bättre i bilden kan *eigen*-komponenterna viktas enligt

$$w_i = \left[1 + \left(\frac{q-1}{\beta L} \right) \alpha \right]^{-1} \quad (3.3)$$

där q har värden mellan 1 och L , som är antalet kvarvarande *eigen*-komponenter efter att de som hör samman med väggen förkastats. α och β är parametrar som kontrollerar viktningen. När α minskar och β ökar, framträder mål med svaga retur men samtidigt ökar mängden klotter i bilden. När α ökar och β minskar, undertrycks mål med svaga retur. Parametervärderna är en avvägning mellan motstridiga önskemål. Författarna använder $\alpha = 4$ och $\beta = 0.5$ för att få fram samtliga mål samtidigt som klotret är undertryckt. Den bild som då fås visar alla mål och har kraftigt undertryckt väggreturen utan att någon förkunskap om eller skattning av väggparametrar gjorts, och utan någon bakgrundsmätning. Jämfört med bakgrundssubtraktion är SVD-metoden i detta fall bättre på att undertrycka väggreturen och väggreturens residualer. Viktningen gör att alla mål

framträder, vilket inte var fallet i bakgrundssubtraktionen. SVD-metoden ger dock mer klotter än bakgrundssubtraktion.

I ett senare arbete vidareutvecklas metoden (Tivive och Bouzerdoud, 2013). Även här bygger metoden på insikten att olika delar av scenen representeras av en delmängd av *eigen*-komponenterna. Genom en projektion undertrycks väggreturen och genom en segmentering av avståndsprofilerna minskas effekten av klotterresidualer.

Om w är de index som svarar mot de *eigen*-komponenter som representerar väggen kan följande projektionsmatriser skapas

$$\mathbf{P}_w = \sum_{i \in W} \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^H \quad (3.4a)$$

$$\mathbf{P}_w^\perp = \mathbf{I} - \mathbf{P}_w \mathbf{P}_w^H \quad (3.4b)$$

där $\mathbf{I}$ är identitetsmatrisen. För att undertrycka bidraget från väggen beräknas sedan en ny $\mathbf{S}$ -matris

$$\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{P}_w^\perp \mathbf{S}. \quad (3.5)$$

Bruset kan behandlas på samma sätt.

När dessa två projektioner har genomförts finns ändå residualer kvar från väggen. Tivive och Bouzerdoud (2013) hanterar dem genom att använda en segmenteringsmetod på avståndsprofilerna. Denna bygger på en modell av avståndsprofilerna som en blandning av gaussiska fördelningar. Avståndet till väggen uppskattas som avståndet från radarn till den högsta toppen i avståndsprofilen. De gaussiska komponenter vars avståndsmedelvärden sammanfaller med detta avstånd klassas som härrörande från väggen. Genom att uttrycka sannolikhetstäthetsfunktioner för väggen och mål kan författarna bestämma den optimala tröskeln för att segregera väggen i avståndsprofilerna. Den del av avståndsprofilen som funnits svara mot väggen nollas och den nya avståndsprofilen fouriertransformeras för att återgå till frekvensplanet. Därefter skapas bilder av scenen.

Tivive och Bouzerdoud (2013) utvärderar den senare metoden på simulerade data och jämför med bakgrundssubtraktion, att förkasta ett antal *eigen*-komponenter (Tivive et al., 2011a), två andra SVD-baserade metoder (Verma et al. (2009); Riaz och Ghafoor (2012)) samt spatial filtrering (t.ex. Yoon och Amin (2009)) och tidsutgrindning. Författarna finner att deras senare metod klarar bättre än de jämförda metoderna att undertrycka väggreturen. Det mått som används i jämförelsen är förbättringen av mål-till-klotterkvoten. Med deras föreslagna metod är mål-till-klotterkvoten 15,82 dB och förbättringen är 12,57 dB, vilket är jämförbart med bakgrundssubtraktion. De två andra SVD-metoderna, spatial filtrering och tidsutgrindning har alla mål-till-klotter-kvoter lägre än 3 dB och förbättringsfaktorer på som mest 4,05 dB.

De metoder som Tivive et al. (2011a) och Tivive och Bouzerdoud (2013) föreslår är effektiva med avseende på reduktion av väggens retur, de kräver ingen kunskap om eller uppskattning av väggparametrar och en bakgrundsmätning är inte nödvändig. Radarantennen behöver heller inte vara parallell med väggen. Den första metoden har testats på både simulerade och uppmätta data, men den andra metoden har bara testats på simulerade data. Båda metoderna uppvisar goda resultat.

Ett grundläggande antagande är att vägg, mål och brus kan delas upp i delmängder av *eigen*-komponenterna. Författarna har visat att så är fallet men hur gränserna mellan dem ska bestämmas får anses som en kritisk del i metoderna. Här är det en fördel att ha en bakgrundsmätning men då faller idén med SVD-metoden då bakgrundssubtraktion i sig är en enkel och effektiv metod. Författarna ger ingen explicit diskussion om hur felaktiga klassningar av *eigen*-komponenterna påverkar slutresultatet men väggen kommer att bidra eller mål ej framträda om gränsen mellan vägg och mål sätts felaktigt.

Den första metoden får bedömas som enklare att implementera. Viktningen för att undertrycka brus styrs med hjälp av koefficienter men riskerar att bli godtycklig.

Den vidareutvecklade metoden är mer komplex. Hanteringen av residualer från väggen saknas helt i den första metoden men innebär att ett extra steg i metoden införs.

3.1.2 Spatial filtering

Yoon och Amin (2009) har utvecklat en metod för att undertrycka väggen genom att applicera ett spatialt filter. Metoden bygger på att svaret från väggen är i stort sett lika oavsett från vilken antenn i en array (parallell med väggen, reell eller syntetisk) som den betraktas. Detta förutsätter monostatisk mätning och att väggen är mycket bredare än antennens lobbredd. Returen från mål bakom väggen däremot, varierar från antennelement till antennelement.

Författarna jämför sin metod med MTI (*moving target indication*) som fungerar på ett liknande sätt i tidsdomänen. Istället för att arbeta med Dopplerfilter i snabb-tidsdomänen, används det spatiala filtret längs med arrayaperturen. Temporal frekvens ersätts med spatial frekvens. Med ett spatialt notch-filter, som tar bort noll-frekvensen, applicerat på mätadata visar Yoon och Amin (2009) att spatial filtrering kan användas för att ta fram bilder som är jämförbara med bilder från bakgrundssubtraktion.

Fördelen med denna metod är att varken förkunskaper om väggen eller bakgrundsmätningar krävs. Problem uppstår om antennarrayen inte är parallell med väggen eller om väggens karaktäristik varierar i rummet. Skillnaden mellan denna metod och det rektangulära filter som implementerades i Kapitel 2 är att den senare arbetar direkt i rumsdimensionen. Yoon och Amin (2009) filtrerar i spatial frekvens.

3.1.3 Andra metoder

CLEAN och MUSIC är två algoritmer som båda går ut på att identifiera punktmål i en scen. CLEAN-algoritmen letar efter det starkaste punktmålet och avlägsnar det. Därefter identifieras det nästa starkaste punktmålet, o.s.v., i en repetitiv process. Eftersom väggen inte kan ses som ett isolerat punktmål måste algoritmen modifieras. Ett sätt att göra det har beskrivits i Kapitel 2 och diskuteras inte vidare här.

Även MUSIC-algoritmen behöver anpassas för att vara användbar i se-genom-vägg-tillämpningen. Yoon och Amin (2008) beskriver en metod som de kallar beam-space (BS)-MUSIC. Till skillnad från vanlig MUSIC applicerar författarna inte sin algoritmen direkt på rådata, utan på data efter lobformning (*beamforming*). Fördelen med detta är att metoden fungerar för både punktmål och utsträckta mål. Dessutom fås bättre prestanda i fall med lågt signal-till-brusförhållande. Nackdelen är att det tillkommer beräkningssteg vilket gör signalbehandlingen tyngre. Yoon och Amin (2008) menar att metoden passar i övervakningssystem där data kan post-processas och jämföras med tidigare mätningar.

Andra generella metoder för att skapa bilder som används i se-genom-vägg-tillämpningen är autofokusering och lobformning (*beamforming*). Ett exempel är Ahmad et al. (2007) som kombinerar dessa i en iterativ process. Metoden testas på simulerade data från ett arrayantennsystem som avbildar punktmål bakom en homogen vägg i fjärrfältet. Väggens tjocklek och dielektriska konstant är antingen korrekt eller felaktigt antagna. Först skapas en bild av scenen med hjälp av lobformning, sedan estimeras bildens kvalitet innan väggparametrarna justeras och en ny bild skapas. Bildens kvalitet bedöms med avseende på bildens kontrast. Det finns ett antal mer eller mindre standardmässiga kontrastmått, som kvoten mellan standardavvikelsen och medelamplituden i bilden. Ahmad et al. (2007) föreslår istället ett mått framtaget med högre ordningens statistik, nämligen skevhet, kurtosis ("toppighet") och högre moment. (Skevhet och kurtosis är de tredje och fjärde momenten, medelvärde och variansen är de två första.) Slutsatsen är, enligt författarna, att detta mått är känsligare för fel i väggparametrarna jämfört med konventionella mått. Detta leder till en ökad kontrast i bilden, vilket är lovande då deras mål är autofokuserade se-genom-vägg avbildningar.

3.2 Mätmetoder

3.2.1 Multi-arraysystem

Dehmollaian och Sarabandi (2008) föreslår att tre parallella arrayantennar, placerade på olika höjd över marken, används för att avbilda en scen bakom en vägg. Författarna tänker sig att den mellersta antennen sänder och att alla tre tar emot signalen. Den symmetriska uppställningen gör att en subtraktion mellan de mottagna signalerna i den övre och den undre antennen åstadkommer en reduktion av väggreflekturen. Effekten påvisas i en enkel mätuppställning.

Fördelen med denna mätmetod är en enkel signalbehandling. Nackdelar inkluderar okända effekter av subtraktionen som inte kan kontrolleras, och att mätsystemet utökas med två ytterligare arrayantennar. Alla antenner måste också vara inbördes parallella och gemensamt parallella med väggen.

3.2.2 Varierande mätavstånd

Wang och Amin (2006) använder två eller flera antennavstånd till väggen för att avbilda en scen när väggparametrarna är okända. De implementerar två olika signalbehandlingsmetoder som båda kräver minst två mätavstånd.

Med den första metoden skapas flera bilder för varje avstånd. Varje bild för ett visst avstånd är skapad med en viss uppsättning antagna parametrar (väggreflekteringskoefficient och dielektrisk konstant). I var och en av bilderna detekteras de starkaste reflektionserna, vilka antas svara mot mål. När de detekterade reflektionernas positioner plottas uppstår ett ”målsår” per avstånd. Varje punkt i målsåret svarar mot en viss uppsättning antagna parametrar. Målets position bestäms sedan som den punkt där spårarna korsar varandra.

Författarna bedömer att metoden är effektiv på korta avstånd. På längre avstånd kommer scenen vara sämre upplöst i bilden. Detta kan ställa till problem för mållokalisering och skapandet av ”målsår”.

På längre avstånd kan ett mål komma att avbildas i flera bildpixlar som sträcker sig över flera luckor i avstånd och vinkel. (Vinkelupplösningen i en viss position i scenen försämras när arrayantennen flyttas till större avstånd.)

Den andra metoden ska avhjälpa detta problem. Bilder från olika avstånd men med samma parameterantaganden summeras. En fokuseringsalgoritm har använts på varje summerad bild, och den bild som blir bäst fokuserad är skapad med bäst skattad parameter. Kriteriet för att bedöma fokusering kan t.ex. vara entropi, där en väl fokuserad bild har låg entropi.

Wang och Amin (2006) genomför simuleringar där såväl den dielektriska konstanten som väggreflekteringskoefficienten är okända och testar sina metoder med goda resultat. I simuleringen har punktmål och en enkel, uniform vägg antagits.

Med dessa metoder fås inga explicita värden på väggparametrarna, men ofta är det mindre intressant utan det viktiga är målets position. En klar nackdel är att flera mätningar måste genomföras innan signalbehandlingen kan påbörjas.

4 Sammanfattning

Avbildande radarmätningar genom vägg är ett aktivt forskningsområde. Hur väggens inverkan bäst ska kompenseras har varit i fokus för många arbeten. Några av dessa diskuteras i rapporten i anknytning till den litteratursökning som gjorts. Det finns fördelar och nackdelar med alla metoder och den metod som fungerar bäst i en viss mätsituation behöver inte vara mest lämpad i en annan mätsituation. Faktorer som spelar roll är om det handlar om ett övervakningsscenario där kunskap om scenen och kanske även om väggen kan inhämtas i förväg, eller om det handlar om ett system som ska arbeta i nära realtid i en okänd miljö. Om bakgrundsmätningar i frånvaro av mål är tillgängliga är bakgrundssubtraktion en enkel och effektiv metod.

En del metoder är komplicerade och kräver omfattande beräkningar (t.ex. Yoon och Amin, 2008) medan andra är snabbare, men är kanske inte lika tillförlitliga (t.ex. Dehmollaian och Sarabandi, 2008).

En del metoder bygger på att väggparametrar (tjocklek, skrovlighet och dielektriska egenskaper) först bestäms explicit (t.ex. Burkholder et al., 2007 och avsnitt 2.2.1 ovan), medan andra metoder kan använda speciella mätmetoder eller signalbehandlingstekniker för att kringgå detta steg (t.ex. Wang och Amin, 2006).

En intressant metod som bygger på fysikaliska insikter om hur den mottagna signalen byggs upp av klotter (väggen), mål och brus använder singularvärdesuppdelning av en matris som bildas av mätdata, för att separera dessa bidrag (Tivive et al., 2011). Resultaten som visas av författarna är goda. En vidareutveckling av metoden (Tivive et al., 2013) tar bort ett viss mått av godtycke som fanns i den ursprungliga metoden, men den introducerar samtidigt nya beräkningssteg.

I detta arbete har gjorts försök att implementera två signalbehandlingsmetoder och testa dem på mätdata från en ISAR-mätning som gjorts tidigare vid FOI mot en ”friggebod”. Den ena metoden, rektangulärt filter, är enkel att implementera och kräver inga förkunskaper om väggens egenskaper. Filtret justeras in noggrant i avstånd över den starka väggetreturen och nollar ut denna i rådata *före* ISAR-bildalstringen. Resultatet är att ett objekt direkt bakom väggen framträder med bättre kontrast i ISAR-bilderna, vilket ger bättre detekterbarhet av målobjektet. Samma metod är tillämpbar i SAR-fallet.

I den andra metoden modellerar man väggen som en yta med lätt, homogen skrovlighet, för vilken det existerar en teori för beräkning av radarreturen. Metoden kräver att man känner väggens spridande egenskaper, som beror på material och dimensioner som måste mätas upp eller ansättas utifrån annan förkunskap. Väggreduktionen består i att väggens beräknade radarretur från modellen subtraheras koherent (med fas) från den uppmätta, även här *före* ISAR-bildalstringen. Appliceringen av denna metod har inte gett något användbart resultat, så långt som arbetet hunnit drivas. Någon slutgiltig bedömning kan dock inte göras eftersom modelleringsarbetet kan föras längre. En förfinad bestämning av väggegenskaperna skulle kunna ge en förbättring av slutresultatet, likaså en mer sofistikerad signalbehandling. Detta har inte kunnat åstadkommas inom ramen för detta arbete, huvudsakligen därför att simuleringarna har krävt långa datorkörningar. Samtidigt är det till metodens nackdel att tunga beräkningar och sofistikerad signalbehandling krävs för att få fram resultat. Hur realistisk en implementering av denna metod är för fall utanför laboratoriet kan ifrågasättas.

En generell metod eller mätmetodik kan inte rekommenderas. För SAR/ISAR-fallet är dock filtrering med rektangulärt filter alltid tillämpbar och enkelt implementerbar. Övriga metoder som påträffats och diskuterats i rapporten bör helst testas mot egna mätdata innan slutgiltig bedömning kan göras. Den metod som används måste få bero på tillgängligt mätsystem och användningsområde. Området är, som antalet funna referenser visar, aktivt och en fundamental del i ett välfungerade radarsystem för avbildande mätningar i se-genom-vägg tillämpningen.

5 Referenser

- Ahmad, F., Amin, M., Mandapati, G.: "Autofocusing of through-the-wall radar imagery under unknown wall characteristics," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 16, no. 7, p. 1785-1795, 2007.
- Berlin, H.-O., Rahm, J., Larsson, C.: "Utveckling och implementering av Columbus, ett verktyg för ISAR-analys. Delrapportering inom VU-SAT," FOA-R--00-01491-615--SE, Linköping, FOA, 2000.
- Burkholder, R.J., Chang, P., Bayram, Y., Marhefka, R.J., Volakis, J.L.: "Model-based near-field imaging of objects inside a room," *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, Honolulu, p. 1469-1472, 2007.
- Chandra, R., Gaikwad, A.N., Singh, D., Nigam, M.J.: "An approach to remove the clutter and detect the target for ultra-wideband through wall imaging," *Journal of Geophysics and Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 412-419, 2008.
- Chang, P.C., Burkholder, R.J., Volakis, J.L.: "Adaptive CLEAN with target refocusing for through-wall image improvement," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 1, p. 155-162, 2010.
- Dehmollaian, M., Sarabandi, K.: "Analytical, numerical, and experimental methods for through-the-wall radar imaging," *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Process.*, p. 5181-5184, 2008.
- Elizavetin, I.V., Paillou, P.: "Study of surface scattering properties in S-band using radar image simulation," *Proc. Radar 97*, Edinburgh, p. 811-815, 1997.
- González-Partida, J.-T., Almorox-González, P., Burgos-García, M., Dorta-Naranjo, B.-P., Alonso, J.I.: "Through-the-Wall Surveillance with Millimeter-wave LFM CW Radars," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 6, p. 1796-1805, 2009.
- Högbom, J.A.: "Aperture synthesis with a non-regular distribution of interferometer baselines," *Astronomy & Astrophysics, Supplement Series*, vol. 15, pp. 417-426, 1974.
- Johansson, T., Sume, A., Rahm, J., Nilsson, S., Örbom, A.: "Polarimetry for penetrating radar - evaluation of polarimetric ISAR radar measurements," FOI-R--3260--SE, *Teknisk Rapport/Technical Report*, Linköping, FOI, 2011.
- Johansson, T., Sume, A., Nilsson, S., Örbom, A.: "Enhancement of Static Human-to-Background Contrast in Through-The-Wall Polarimetric Radar ISAR Measurements," *Proc. 10th European Radar Conference*, p. 176-179, 2013.
- Jänis, A., Nilsson, S.: "Transmissionsegenskaper av material i frekvensområdet 2-110 GHz och möjligheter att 'se igenom' – slutrapport," FOI-R--2065--SE, *Teknisk Rapport*, Linköping, FOI, 2006.
- Karlsen, B., Larsen, J., Sorensen, H.B.D., Jakobsen, K.B.: "Comparison of PCA and ICA based clutter reduction in GPR systems for anti-personal landmine detection," *Proc. 11th IEEE Signal Processing Workshop on Statistical Signal Processing*, pp. 146-149, 2001.
- Kjellgren, J.: "System-oriented work at millimeter-waves," Presentation at Fraunhofer Institute, Freiburg, November 17, 2005.
- Kong, J.A.: *Electromagnetic Wave Theory*, Wiley, 1986.
- Kristensson, G.: *Spridningsteori med antenntillämpningar*, Studentlitteratur, 1999.
- Nilsson, S., Gustafsson, M., Karlsson, M., Kjellgren, J., Larsson, H., Sume, A., Örbom, A.: "Radarsensorer för urban miljö – Slutrapport," FOI-R--2137--SE, *Teknisk Rapport*, Linköping, FOI, 2006.

- Nilsson, S., Jänis, A., Gustafsson, M., Kjellgren, J., Sume, A.: "Through-the-wall high resolution imaging of a human and experimental characterization of the transmission of wall materials," *Proc. SPIE*, vol. 7117, Millimetre Wave and Terahertz Sensors and Technology, pp. 71170L-1 -- 71170L-16, 2008.
- Riaz, M.M., Ghafoor, A.: "Through-wall image enhancement based on singular value decomposition," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2012, no. Article ID 961829, 2012.
- Stimson, G.W.: *Introduction to Airborne Radar*, Hughes Aircraft Company, 1983.
- Stratton, J.A.: *Electromagnetic Theory*, McGraw-Hill, New York, 1941.
- Sume, A.: "Närfältsfokusering av paraboloidantenn," FOI-R--1719--SE, *Teknisk Rapport*, Linköping, FOI, 2005a.
- Sume, A.: "Recognition of ground targets with high range resolution radar," FOI-R--1881--SE, *Teknisk Rapport/Technical Report*, Linköping, FOI, 2005b.
- Sume, A., Johansson, T., Nilsson, S., Örbom, A.: "Polarimetric optimization of static human-to-background contrast in through-the-wall ISAR measurements," FOI-R--3670--SE, *Teknisk Rapport/Technical Report*, Linköping, FOI, 2013.
- Sume, S., Nilsson, S.: "Fenomenologisk beskrivning av väggpenetrerande radar," FOI-R--2635--SE, *Teknisk Rapport*, Linköping, FOI, 2008.
- Tivive, F., Bouzerdoum, A., Amin, M.: "An SVD-based approach for mitigating wall reflections in through-the-wall radar imaging," *Proc. IEEE International Radar Conference*, p. 519–524, 2011a.
- Tivive, F., Amin, M., Bouzerdoum, A.: "Wall clutter mitigation based on eigen-analysis in through-the-wall radar imaging," *Proc. International Conference on Digital Signal Processing*, p. 1-8, 2011b.
- Tivive, F., Bouzerdoum, A.: "An improved SVD-based wall clutter mitigation method for through-the-wall radar imaging," *Proc. IEEE 14th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, p. 425-429, 2013.
- Ulaby, F.T., Moore, R.K., Fung, A.K.: *Microwave Remote Sensing – Active and Passive*, vol. II, "Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory," sect. 12-5, "Scattering from a slightly rough surface," Boston, MA, Artech House, 1982.
- Verma, P.K., Gaikwad, A.N., Singh, D., Nigam, M.J.: "Analysis of clutter reduction techniques for through wall imaging in UWB range," *Progress in Electromagnetics Research B*, vol. 17, p. 29-48, 2009.
- Wang, G., Amin, M.: "Imaging through unknown walls using different standoff distances," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 54, no. 10, p. 4015-4025, 2006.
- Yoon, Y., Amin, M.: "High-resolution Through-the-Wall Radar Imaging Using Beamspace MUSIC," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 6, p. 1763-1774, 2008.
- Yoon, Y., Amin, M.: "Spatial filtering for wall-clutter mitigation in through-the-wall radar imaging," *IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 9, p. 3192-3208, 2009.
- Zwicky, T., Haala, J., Wiesbeck, W.: "A genetic algorithm for the evaluation of material parameters of compound multilayered structures," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 4, p. 1180-1187, 2002.

Appendix A Referenser ej citerade i texten

Nedan listas de referenser som identifierats men som ej har studerats i detalj.

Aftanas, M.: "Through wall imaging using M-sequence UWB radar system," PhD Thesis, Technical University at Kosice, Faculty of Electrical Engineering and Informatics, Department of Electronics and Multimedia Communications, 63 pp., 2007. Downloaded from <http://www.aftanas.sk/aftanas/publications/TDE.pdf> (2009-05-18).

Aftanas, M.: "Signal processing steps for objects imaging through the wall with UWB radar," *Proc. 9th Scientific Conference of Young Researchers*, pp. 14-17, 2009. Downloaded from <http://www.aftanas.sk/aftanas/publications/SY2009.pdf> (visited 2009-05-18).

Aftanas, M., Drutarovsky, M.: "Imaging of the building contours with through the wall UWB radar system," *Radioengineering*, vol. 18, no. 3, pp. 258-264, 2009.

Aftanas, M., Rovnakova, J., Drutarovsky, M., Kocur, D.: "Efficient method of TOA estimation for through wall imaging by UWB radar," *International Conference on Ultra-Wideband, ICUWB*, pp. 101-104, 2008.

Aftanas, M., Sachs, J., Drutarovsky, M., Kocur, D.: "Efficient and fast method of wall parameter estimation by using UWB radar system," *Frequenz*, vol. 63, no. 11-12, pp. 231-235, 2009.

Aftanas, M., Zaikov, E., Drutarovsky, M., Sachs, J.: "Through wall imaging of the objects scanned by M-sequence UWB radar system," *Proc. 18th International Conference Radioelektronika*, p. 33-36, April 24-25, 2008.

Ahmad, F.: "Multi-location wideband through-the-wall beamforming," *Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP*, p. 5193-5196, 2008.

Ahmad, F., Amin, M.G.: "Analyses of autofocus schemes for indoor imaging with unknown walls," *Proc. IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM 2006)*, vol. 2, p. 358-362, 2006.

Ahmad, F., Amin, M.G.: "Performance of autofocus schemes for single target and populated scenes behind unknown walls," *Proc. SPIE* vol. 6547, Radar Sensor Technology XI, p. 654709-1 -- 654709-11, 2007.

Ahmad, F., Amin, M.G.: "Multi-location wideband synthetic aperture imaging for urban sensing applications," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 345, no. 6, p. 618-639, September 2008.

Ahmad, F., Amin, M.G.: "Optimal waveform design for multi-antenna monostatic through-the-wall radar imaging," *Proc. SPIE*, vol. 7308, Radar Sensor Technology XIII, pp. 73080R-1 -- 73080R-12, 2009.

Ahmad, F., Amin, M.G.: "Wall clutter mitigation for MIMO radar configurations in urban sensing," *Proc. 11th International Conference on Information Science, Signal Processing, and their Applications*, 6 pp., 2012.

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, 2005.

Ahmad, F., Amin, M.G., Mandapati, G.: "Autofocusing of through-the-wall radar imagery under unknown wall characteristics," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 16, no. 7, p. 1785-1795, 2007.

- Ahmad, F., Amin, M.G., Setlur, P.: "Through-the-wall target localization using dual-frequency CW radars," *Proc. SPIE*, vol. 6201, Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Security and Homeland Defense V, pp. 62010H-1 -- 62010H-12, 2006.
- Ahmad, F., Zhang, Y., Amin, M.G.: "Three-dimensional wideband beamforming for imaging through a single wall," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 5, no. 2, 176-179, 2008.
- Amin, M.G., Ahmad, F.: "Through-the-wall radar imaging: Theory and applications," in R. Chellappa and S. Theodoridis (Eds), *E-reference Signal Processing*, Elsevier, Oxford, 53 pp., 2013.
- Amin, M.G., Ahmad, F.: "Compressive sensing for through-the-wall radar imaging," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 22, no. 3, pp. 030901-1 -- 030901-21, 2013.
- Barrie, G.: "UWB impulse radar characterization and processing techniques," Defence R&D Canada, Ottawa, *Technical Report*, DRDC Ottawa TR 2004-251, 62 pp, 2004.
- Boudamouz, B., Millot, P., Pichot, C.: "Through the wall radar imaging with MIMO beamforming processing - simulation and experimental results," *American Journal of Remote Sensing*, vol. 1, no. 1, doi 10.11648/j.ajrs.20130101.12, 2013.
- Boudamouz, B., Millot, P., Pichot, C.: "MIMO antenna design with genetic algorithm for TTW radar imaging," *Proc. 9th European Radar Conference*, pp. 150-153, 2012.
- Bourdi, T., Boone, F., Rhazi, J.E., Ballivy, G.: "Use of Jonscher model for estimating the thickness of a concrete slab by technical GPR," *Progress in Electromagnetics Research M*, vol. 28, pp. 89-99, 2013.
- Bourdi, T., Rhazi, J.E., Boone, F., Ballivy, G.: "Application of Jonscher model for the characterization of the dielectric permittivity of concrete," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 41, doi:10.1088/0022-3727/41/20/205410, 9 pp., 2008.
- Bourdi, T., Rhazi, J.E., Boone, F., Ballivy, G.: "Modelling dielectric-constant values of concrete: an aid to shielding effectiveness prediction and ground-penetrating radar wave technique interpretation," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 45, doi:10.1088/0022-3727/45/40/405401, 12 pp., 2012.
- Braga, A.J., Gentile, C.: "An ultra-wideband radar system for through-the-wall imaging using a mobile robot," *Proc. IEEE International Conference on Communication*, 6 pp., 2009.
- Browne, K.E., Burkholder, R.J.: "Nonlinear optimization of radar images from a through-wall sensing system via the Lagrange multiplier method," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 9, no. 5, pp. 803-807, 2012.
- Browne, K.E., Burkholder, R.J., Volakis, J.L.: "A novel low-profile portable radar system for high resolution through-wall radar imaging," *Proc. IEEE Radar Conference*, pp. 333-338, 2010.
- Browne, K.E., Burkholder, R.J., Volakis, J.L.: "Through-wall opportunistic sensing system utilizing a low-cost flat-panel array," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 3, pp. 859-868, 2011.
- Browne, K.E., Burkholder, R.J., Volakis, J.L.: "Fast optimization of through-wall radar images via the method of Lagrange multipliers," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 1, pp. 320-328, 2013.
- Burkholder, R.J.: "Electromagnetic models for exploiting multi-path propagation in through-wall radar imaging," *Proc. International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, pp. 572-575, 2009.

Burkholder, R.J.: "Through-wall radar imaging," RF Alliance Conference, EW and Antenna Communication Applications, 2009. Downloaded from [http://www.rfalliance.org/Nov%2009%20Conference/Presentations/\(10\)%20Burkholder_RFA_talk_compressed.pdf](http://www.rfalliance.org/Nov%2009%20Conference/Presentations/(10)%20Burkholder_RFA_talk_compressed.pdf) (visited 2010-02-02).

Burkholder, R.J.: "Electromagnetic models for exploiting multi-path propagation in through-wall radar imaging," *Proc. International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, pp. 572-575, 2009.

Cacciamano, A., Martorella, M., Berizzi, F., Haywood, B., Bates, B.: "CLEAN technique for polarimetric ISAR," *Proc. International Radar Symposium, IRS 2007*, Cologne, Germany, 2007.

Catapano, I., Crocco, L.: "An imaging method for concealed targets," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 5, p. 1301-1309, 2009.

Chang, P.C.: "Near zone radar imaging and feature capture of building interiors," MSc Thesis, Ohio State University, Electrical Engineering Graduate Program, 99 pp., 2008. Downloaded from http://etd.ohiolink.edu/send-pdf.cgi/Chang%20Paul%20Chinling.pdf?acc_num=osu1197399599 (visited 2009-10-09).

Chang, P.C., Burkholder, R.J., Volakis, J.L.: "Through-wall building image improvement via signature-based CLEAN," *Proc. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp. 1-4, 2008.

Chang, P.C., Burkholder, R.J., Volakis, J.L.: "Adaptive CLEAN with target refocusing for through-wall image improvement," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 1, p. 155-162, 2010.

Chang, P.C., Burkholder, R.J., Volakis, J.L., Marhefka, R.J., Bayram, Y.: "High-frequency EM characterization of through-wall building imaging," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 5, p. 1375-1387, 2009.

Charvat, G.L., Kempel, L.C., Rothwell, E.J., Coleman, C.M., Mokole, E.L.: "A through-dielectric radar imaging system," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 8, pp. 2594-2603, 2010.

Charvat, G.L., Ralston, T.S., Peabody, J.E.: "Real-time Through-Wall Imaging using an Ultrawideband Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) phased-array radar system," 13 pp., downloaded from <http://www.ll.mit.edu/mission/space/Thru-wall%20Imaging%20with%20realtime%20radar.pdf> (visited 2012-03-02).

Chen, P.-H., Narayanan, R.M.: "Shifted pixel method for through-wall radar imaging," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 8, pp. 3706-3716, 2012.

Davis, J., Huang, Y.: "Determination of dielectric properties of insitu concrete at radar frequencies," *Proc. International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, 5 pp., 2003.

Debes, C., Amin, M.G., Zoubir, A.M.: "Target detection in single- and multiple-view through-the-wall radar imaging," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 5, p. 1349-1361, 2009.

Debes, C., Hahn, J., Zoubir, A.M., Amin, M.G.: "Target discrimination and classification in through-the-wall radar imaging," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 10, pp. 4664-4676, 2011.

Debes, C., Zoubir, A.M., Amin, M.G.: "Enhanced detection using target polarization signatures in through-the-wall radar imaging," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 5, pp. 1968-1978, 2012.

Dehmollaian, M.: "Hybrid electromagnetic models for the purpose of detection and identification of visually obscured targets," *PhD Thesis*, University of Michigan, 151 pp,

2007. Downloaded from

<http://www.eecs.umich.edu/RADLAB/html/NEWDISS/Dehmollaian.pdf> (2008-05-09).

Dehmollaian, M.: "Through-wall shape reconstruction and wall parameters estimation using differential evolution," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 8, no. 2, pp. 201-205, 2011.

Dehmollaian, M., Sarabandi, K.: "Refocusing through building walls using Synthetic Aperture Radar," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, no. 6, p. 1589-1599, 2008.

Dehmollaian, M., Sarabandi, K.: "Analytical, numerical, and experimental methods for through-the-wall radar imaging," *Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, p. 5181-5184, 2008.

Dehmollaian, M., Thiel, M., Sarabandi, K.: "Through-the-wall imaging using differential SAR," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 5, pp. 1289-1296, 2009.

Engin, E., Ciftcioglu, B., Özcan, M., Tekin, I.: "High resolution ultrawideband wall penetrating radar," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 49, no. 2, p. 320-325, 2007.

Ertin, E., Moses, R.L.: "Through-the-wall SAR attributed scattering center feature estimation," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 5, p. 1338-1348, 2009.

Foo, S.: "EM modeling of UWB through-wall radar imaging using the high-frequency Geometrical Optics (GO)," Defence R&D Canada, Ottawa, *Technical Memorandum*, TM 2002-166, 42 p., 2002.

Gaikwad, A.N., Singh, D., Nigam, M.J.: "Application of clutter reduction techniques for detection of metallic and low dielectric target behind the brick wall by stepped frequency continuous wave radar in ultra-wideband range," *Proc. IET Radar, Sonar and Navigation*, vol. 5, no. 4, p. 416-425, 2011.

Gaunaurd, G.C., Nguyen, L.H.: "Impact of rain on radar transmittance through building walls," *Optical Engineering*, vol. 47, no. 2, p. 026201-1 -- 026101-8, 2008.

Gauthier, S., Chamma, W.: "Surveillance through concrete walls," *Proc. SPIE*, vol. 5403, Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Security and Homeland Defense III, p. 597-608, 2004.

Gibson, T.B., Jenn, D.C.: "Prediction and measurement of wall insertion loss," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 47, no. 1, p. 55-57, 1999.

Hantscher, S., Reizenzahn, A., Diskus, C.G.: "Through-wall imaging with a 3-D UWB SAR algorithm," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 15, p. 269-272, 2008.

He, F., Zhu, G., Huang, X., Zhou, Z.: "Detection of human targets using ultra-wide band through-the-wall radar," *Proc. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, pp. 1748-1751, 2010.

Holloway, C.L., Perini, P.L., DeLyser, R.R., Allen, K.C.: "Analysis of composite walls and their effects on short-path propagation modeling," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 46, no. 3, pp. 730-738, 1997.

Huang, Q., Qu, L., Wu, B., Fang, G.: "UWB through-wall imaging based on compressive sensing," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no. 3, pp. 1408-1415 (Corrections on p. 1634), 2010.

Innocenti, R.: "Sparse array of RF sensors for sensing through the wall," *Proc. SPIE*, vol. 6547, Radar Sensor Technology XI, p. 65470B-1 -- 65470B-10, 2007.

Jin, T., Chen, B., Zhou, Z.: "Image-domain estimation of wall parameters for autofocusing of through-the-wall SAR imagery," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, no. 3, pp. 1836-1843, 2013.

Johnson, J.T., Ouellette, J.D.: "Polarization features in bistatic scattering from rough surfaces," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, no. 3, pp. 1616-1626, 2014.

Khatri, H., Le, C.: "Identification of electromagnetic parameters of a wall and determination of radar signal level behind a wall," *Proc. SPIE*, vol. 6210, Radar Sensor Technology X, p. 62100Q-1--7, 2006.

Khatri, H., Le, C.: "Estimation of electromagnetic parameters and thickness of a wall using synthetic aperture radar," *Proc. SPIE*, vol. 6547, Radar Sensor Technology XI, p. 654708-1 -- 654708-9, 2007.

Kocur, D., Rovnáková, J.: "Through-wall tracking of moving persons by UWB sensor network," *Proc. 9th European Radar Conference, EuRAD*, pp. 226-229, 2012.

Kong, L., Cui, G., Yang, J., Wang, X.: "A new wall compensation algorithm for through-the-wall radar imaging," *Proc. IEEE Radar Conference*, pp. 261-265, 2008.

Kong, L., Cui, G., Yang, X., Yang, J.: "Three-dimensional human imaging for through-the-wall radar," *Proc. IEEE Radar Conference*, 4 pp., 2009.

Kong, L.J., Zhao, B., Cui, G.L.: "Sidelobe suppression method for stepped frequency continuous-wave radar," *Electronics Letters*, vol. 47, no. 7, pp. 460-462, 2011.

Lagunas, E., Amin, M.G., Ahmad, F., Nájar, M.: "Joint wall mitigation and compressive sensing for indoor image reconstruction," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, no. 2, pp. 891-906, 2013.

Le, C., Dogaru, T., Nguyen, L., Ressler, M.A.: "Ultrawideband (UWB) radar imaging of building interior: measurements and predictions," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 5, p. 1409-1420, 2009.

Leigsnering, M., Debes, C., Zoubir, A.M.: "Compressive sensing in through-the-wall radar imaging," *Proc. International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pp. 4008-4011, 2011.

Li, L., Zhang, W., Li, F.: "A novel autofocusing approach for real-time through-wall imaging under unknown wall characteristics," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no. 1, pp. 423-431, 2010.

Liu, J., Kong, L., Yang, X., Jia, Y.: "Image auto-focusing with multi-layer non-homogeneous wall in through-wall-radar imaging," *Proc. IEEE Radar Conference*, pp. 543-546, 2012.

Maaref, N., Millot, P., Ferrires, X.: "Electromagnetic imaging method based on time reversal processing applied to through-the-wall target localization," *Progress In Electromagnetics Research M*, vol. 1, p. 59-67, 2008.

Maaref, N., Millot, P., Pichot, Ch., Picon, O.: "A study of UWB FM-CW radar for the detection of human beings in motion inside a building," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 5, p. 1297-1300, 2009.

Marble, J., Hero, A.O.: "Phase distortion correction for see-through-the-wall imaging radar," *Proc. IEEE International Conference on Image Processing*, p. 2333-2336, 2006.

Martorella, M., Cacciamano, A., Giusti, E., Berizzi, F., Haywood, B., Bates, B.: "CLEAN technique for polarimetric SAR," *International Journal of Navigation and Observation*, vol. 2008, 12 pp., doi:10.1155/2008/325279, 2008.

- Martorella, M., Giusti, E., Demi, L., Zhou, Z., Cacciamano, A., Berizzi, F., Bates, B.: "Automatic target recognition by means of polarimetric ISAR images: a model matching based algorithm," *Proc. IEEE International Conference on Radar*, pp. 27-31, 2008.
- Martorella, M., Giusti, E., Demi, L., Zhou, Z., Cacciamano, A., Berizzi, F., Bates, B.: "Target recognition by means of polarimetric ISAR images," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 47, no. 1, pp. 225-239, 2011.
- Mecatti, D., Pieraccini, M., Luzi, G., Noferini, L., Atzeni, C.: "A high frequency penetrating radar for masonry investigation," *Proc. International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, 2003.
- Montoro, T., Manrique, E., González-Reviriego, A.: "Measurement of the refracting index of wood for microwave radiation," *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 57, pp. 295-299, 1999.
- Mostafa, A.A.: "Segmentation and classification for through-the-wall radar imaging," *PhD Thesis*, Technische Universität Darmstadt, Elektrotechnik und Informationstechnik, 95 pp., 2013.
- Moulton, J., Kassam, S., Ahmad, F., Amin, M., Yemelyanov, K.: "Target and change detection in Synthetic Aperture Radar sensing of urban structures," *Proc. IEEE Radar Conference*, Rome, IT, pp. 2102-2107, 2008.
- Muqaibel, A., Safaai-Jazi, A.: "Characterization of wall dispersive and attenuative effects on UWB radar signals," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 345, no. 6, p. 640-658, 2008.
- Muqaibel, A., Safaai-Jazi, A., Bayram, A., Attiya, A.M., Riad, S.M.: "Ultrawideband through-the-wall propagation," *Proc. IEE Microwaves, Antennas, Propagation*, vol. 152, no. 6, p. 581-588, 2005.
- Nguyen, L., Le, C., Gaunard, G.C.: "Computerized tomographic radar target imaging behind opaque walls," *Optical Engineering*, vol. 46, no. 7, 076201, 10 pp., 2007.
- Nilsson, S., Jänis, A., Gustafsson, M., Kjellgren, J., Sume, A.: "Through-the-wall high resolution imaging of a human and experimental characterization of the transmission of wall materials," *Proc. SPIE*, vol. 7117, Millimetre Wave and Terahertz Sensors and Technology, Cardiff, 2008.
- Qian, J., Ahmad, F., Amin, M.G.: "Joint localization of stationary and moving targets behind walls using sparse scene recovery," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 22, no. 2, pp. 021002-1 -- 021002-10, 2013.
- Rhim, H.C., Buyuköztürk, O.: "Electromagnetic properties of concrete at microwave frequency range," *ACI Materials Journal*, vol. 95, no. 3, pp. 262-271, 1998.
- Riaz, M.M., Ghafoor, S.: "Principle component analysis and fuzzy logic based through wall image enhancement," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 127, pp. 461-478, 2012.
- Riaz, M.M., Ghafoor, S., Khurshid, M.H.: "Principal component analysis and minimum description length criterion based through wall image enhancement," *Proc. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 2513-2516, 2013.
- Ruixue, Z., Cheng, H., Tao, Z., Lu, Z.: "A close approximate method of slant range for through-wall-radar imaging," *Proc. IEEE Radar Conference*, pp. 441-445, 2012.
- Safaai-Jazi, A., Riad, S.M., Muqaibel, A., Bayram, A.: "Through-the-wall propagation and material characterization," DARPA NETEX program, "Ultra-wideband propagation measurements and channel modeling," Time Domain and RF Measurement Laboratory, Bradley Department of Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Report, 75 pp., November 18, 2002.

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.66.7516&rep=rep1&type=pdf>
(visited 2013-12-04)

Sagnard, F., El Zein, G.: "In situ characterization of building materials for propagation modeling: frequency and time responses," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 10, pp. 3166-3173, 2005.

Setlur, P., Amin, M., Ahmad, F.: "Multipath model and exploitation in through-the-wall and urban radar sensing," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 10, pp. 4021-4034, 2011.

Shargo, P.J., Melody, J.W.: "Model-based correction of through-wall SAR imagery via raytracing," *Proc. IEEE Radar Conference*, pp. 679-684, 2007.

Solimene, R., Di Napoli, R., Soldovieri, F., Pierri, R.: "TWI for an unknown symmetric lossless wall," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 8, pp. 2876-2886, 2011.

Solimene, R., Soldovieri, F., Prisco, G., Pierri, R.: "Three-dimensional through-wall imaging under ambiguous wall parameters," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 5, p. 1310-1317, 2009.

Song, L.-P., Yu, C., Liu, Q.H.: "Through-wall imaging (TWI) by radar: 2-D tomographic results and analysis," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43, no. 12, p. 2793-2798, 2005.

Thajudeen, C., Hoorfar, A., Ahmad, F., Dogaru, T.: "Measured complex permittivity of walls with different hydration levels and the effect on power estimation of TWRI target returns," *Progress in Electromagnetic Research B*, vol. 30, pp. 177-199, 2011.

Thành, N.T., van Kempen, L., Savelyev, T.G., Zhuge, X., Aftanas, M., Zaikov, E., Drutarovsky, M., Sahli, H.: "Comparison of basic inversion techniques for through-wall imaging using UWB radar," *Proc. 5th European Radar Conference, EuRAD*, Amsterdam, 2008.

Venkatasubramanian, V., Leung, H.: "A novel chaos-based high-resolution imaging technique and its application to through-the-wall imaging," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 12, no. 7, p. 528-531, 2005.

Venkatasubramanian, V., Leung, H., Liu, X.: "Chaos UWB radar for through-the-wall imaging," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 18, no. 6, pp. 1255-1265, 2009.

Wang, G., Amin, M.G., Zhang, Y.: "New approach for target locations in the presence of wall ambiguities," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 42, no. 1, p. 301-315, 2006.

Wang, Y., Fathy, A.E.: "Advanced system level simulation platform for three-dimensional UWB through-wall imaging SAR using time-domain approach," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 5, pp. 1986-2000, 2012.

Wilson, R.: "Propagation losses through common building materials - 2.4 GHz vs 5 GHz," Magis Networks Inc., *Report (Reflection and Transmission Losses through Common Building Materials)*, 28 pp., 2002.
[http://www.ko4bb.com/Manuals/05\)_GPS_Timing/E10589_Propagation_Losses_2_and_5_GHz.pdf](http://www.ko4bb.com/Manuals/05)_GPS_Timing/E10589_Propagation_Losses_2_and_5_GHz.pdf) (visited 2013-12-04)

Wilson, R.D.: "Characterization and identification of ultrawideband radio propagation channels," *PhD Thesis*, University of Southern California, December 2005.
<http://ultra.usc.edu/assets/002/38639.pdf> (visited 2007-03-11)

Yang, C.-Y., Ko, C.-J., Wu, B.-C.: "A free space approach for extracting the equivalent dielectric constants of the walls in buildings," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, AP-S, Digest*, vol. 2, p. 1036-1039, 1996.

- Yang, M., Kong, L., Zhao, B.: "A novel method to suppress range sidelobes for stepped frequency continuous-wave radar," *Proc. IEEE Radar Conference*, pp. 404-407, 2012.
- Yoon, Y.-S., Amin, M.G.: "High resolution through-the-wall radar imaging using extended target model," *Proc. IEEE Radar Conference*, pp. 266-269, 2008.
- Yoon, Y.-S., Amin, M.G.: "High-resolution Through-the-Wall Radar Imaging Using Beam-space MUSIC," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol 56, no. 6, p. 1763-1774, 2008.
- Yoon, Y.-S., Amin, M.G.: "Behind-the-wall target identification (BWTI)," *Proc. SPIE*, vol. 7308, Radar Sensor Technology XIII, pp. 73080S-1 -- 73080S-12, 2009.
- Yoon, Y.-S., Amin, M.G., Ahmad, F.: "MVDR beamforming for through-the-wall radar imaging," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 47, no. 1, pp. 347-366, 2011.
- Zhang, P., Cui, G., Kong, L., Luo, W., Wu, J.: "Wall compensation in imaging of hidden targets behind multiple walls," *Proc. IEEE Radar Conference, RadarCon 2014*, Cincinnati, OH, May 19-23, pp. 1179-1181, 2014.
- Zhang, W., Hoorfar, A.: "Three-dimensional polarimetric diffraction tomographic algorithm for real-time through-the-wall radar imaging," *Proc. XXXth URSI General Assembly*, Istanbul, August 13-20, 2011.
- Zhang, W., Hoorfar, A.: "Three-dimensional real-time through-the-wall radar imaging with diffraction tomographic algorithm," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, no. 7, pp. 4155-4163, 2013.
- Zhang, W., Hoorfar, A., Thajudeen, C., Ahmad, F.: "Full polarimetric beam-forming algorithm for through-the-wall radar imaging," *Radio Science*, Vol. 46, no. RS0E16, 17 pp., 2011.
- Zhang, P., Zhang, Y., Cui, S., Xu, X., Chen, J., Zhang, X.: "A modified phase-shift migration algorithm applied to through wall imaging," *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 5191-5193, 2012.
- Zwack, T., Haala, J., Wiesbeck, W.: "A genetic algorithm for the evaluation of material parameters of compound multilayered structures," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 4, pp. 1180-1187, 2002.

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