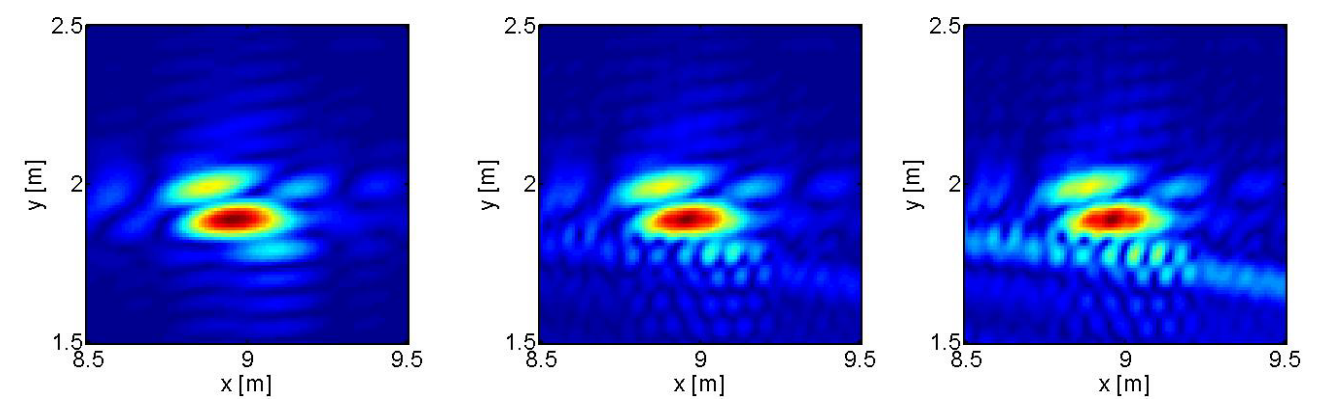


MAGNUS GUSTAFSSON, ÅSA ANDERSSON,
MAGNUS HERBERTHSON, MIKAEL KARLSSON, STEFAN NILSSON



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.

Magnus Gustafsson, Åsa Andersson,
Magnus Herberthson, Mikael Karlsson,
Stefan Nilsson

Metoder för ökad upplösning av målobjekt i urban miljö

Titel	Metoder för ökad upplösning av målobjekt i urban miljö
Title	Methods for increased resolution of targets in urban environment
Rapportnr/Report no	FOI-R--3485--SE
Månad/Month	September
Utgivningsår/Year	2012
Antal sidor/Pages	27 p
ISSN	ISSN 1650-1942
Kund/Customer	Försvarmakten
FoT område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E54023
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

I denna rapport studeras möjligheten att öka upplösningen för ett urbant mål inom en radars blickfång med några olika metoder. En ökad upplösning skulle ge förbättrade avbildningar och möjlighet till noggrannare positionering.

I den första metoden studeras möjligheten att utnyttja *a priori*-kunskap om en urban scen (geometri, material) för att uppnå förbättringen. Scenen som studerats i detta inledande arbete utgörs av en lång rak gata, eller korridor. En radar bestående av flera linjärt distribuerade antenner har simulerats i olika beräkningsscenario. Simuleringarna, gjorda på X-band, visar att ökad upplösning kan fås om *a priori*-kunskap om scenen används för en noggrann skattning av vågutbredningen mellan sändare och mottagare. Denna används sedan för att generera en referenssignal som korreleras med en uppmätt eller beräknad retur från scenen. Resultaten är känsliga för avvikelser i skattningen. Vidare indikeras att ju noggrannare skattningen är desto högre upplösning kan uppnås. Ett scenario bestående av en modellerad människa placerad i en korridor har studerats. En något bättre upplösning av människan fås om flervägsutbredning beaktas. Stora skillnader i resultat beroende på polarisationsval har noterats.

En andra intressant metod diskuteras för ökning av upplösningen i lågupplösta avståndsp profiler. Den aktuella metoden benämns i denna rapport "Cetin-metoden", efter den förste författaren i den presenterande artikeln.

En inledande studie presenteras av en tredje metod för förbättrad målinmätning, nämligen MIMO-radar, som är en generalisering av multistatisk radar och fasstyrd radarsystem. Varje sändare sänder ut individuellt modulerade signaler, vilket gör att de t.ex. kan sändas samtidigt. Detta möjliggör adaptiva system där utsända signaler kan justeras för att ge maximal inmätningensprestanda på önskade objekt i scenen. En intressant egenskap hos MIMO-system, med tillräckligt separerade antenner, är att noggrannheten i inmätningen av ett objekts position begränsas enbart av signalens våglängd, istället för bandbredden som i monostatiska system. Vidare ökar antalet mål som kan inmätas drastiskt med antalet oberoende sändare som används. Upplösningen hos systemet kan också ökas linjärt med antalet sändare genom skapandet av virtuellt förstörade aperturer.

En intressant metod som beaktats i samband med MIMO-radarstudien är *Compressive Sensing*, som är en teknik som fokuserar på att radikalt reducera den mängd data som insamlas av ett sensorsystem, utan att göra signifikant avkall på kvalitén i den rekonstruerade signalen eller bilden. Tekniken tar fasta på att en scen för det mesta är gles, d.v.s. den innehåller många delar där det saknas objekt och signalen därför bara innehåller mätbrus. *Compressive Sensing* kompletterar MIMO-radar på ett mycket attraktivt sätt, eftersom MIMO-radar är beroende av rådatakommunikation mellan sensornoder. Genom att då reducera data som behöver skickas utan signifikant förlust av information, kan MIMO-radarsystem byggas utan orimliga krav på kommunikationssystemen. *Compressive Sensing* kan dessutom ge förbättrad bildkvalité i scener med hög dynamik, på grund av reduktion av sidlobsmönster.

Nyckelord: hög upplösning, polarisation, urban miljö, stridsfältsovervakning, MIMO-radar, Compressive Sensing, SAR, ISAR.

Summary

This report concerns the possibility to increase the resolution of an urban target within the field of view of a radar, using some different methods. An increased resolution would give improved imaging and possibility for more accurate positioning.

In the first method, the possibility to use *a priori* knowledge of an urban scene (geometry, material) is studied to bring about the improvement. The scene that has been studied in this initial work consists of a long, straight street, or corridor. A radar consisting of several linearly distributed antennas has been simulated in various computation scenarios. The simulations, at X-band, show that increased resolution can be obtained if *a priori* knowledge about the scene is used for accurate estimation of the wave propagation between the transmitter and the receiver (so-called transfer function). This is then used to generate a reference signal that is correlated with a measured or calculated return from the scene. The results are sensitive to deviations in the determination of the estimated transfer function. Furthermore, there is an indication that the more accurate the transfer function, the higher the resolution obtained. A scenario has been studied, consisting of a modelled human situated in a corridor. A somewhat better resolution of the human is obtained if the multipath propagation is taken into account in the transfer function. Considerable differences have been found, depending on the choice of polarization for this scenario, and this has to be investigated further.

Another interesting method is discussed for increasing the resolution in low-resolution range profiles. The considered method is called the "Cetin method" in this report, after an author name in the original article.

An initial study is presented of a third method for improved target measurement, *viz.* MIMO radar, which is a generalization of multistatic radar and phase-controlled radar systems. The difference is primarily due to the transmission of individually modulated signals from each transmitter, which entails, *e.g.*, that they can be transmitted simultaneously. This enables adaptive systems where transmitted signals can be adjusted to give maximum performance of the determination of characteristics of chosen objects in the scene. Another interesting property of MIMO systems with sufficiently separated antennas is that the precision of the position measurement of an object is only limited by the wave-length of the signal instead of the bandwidth, as in mono-static systems. Furthermore, the number of targets that can be measured with a MIMO system with co-located antennas increases drastically with the number of independent transmitters used. The resolution of the system can also be increased linearly with the number of transmitters by the creation of virtually enlarged apertures.

An interesting method considered in connection with the MIMO radar study is Compressive Sensing, which is a technique aimed at radically reducing the data volume being collected by a sensor system, without significantly lowering the quality of the reconstructed signal or image. The technique takes as its starting point that a scene as a rule is sparse, *i.e.*, it contains parts with no objects and the signal, hence, only consists of measurement noise. Compressive Sensing forms a complement to MIMO radar in a very attractive way, since MIMO radar is dependent on communication of raw data between sensor nodes. By then reducing the data that needs to be sent without significant loss of information, MIMO radar systems can be built without unreasonable demands on the communication systems. Furthermore, Compressive Sensing can also give improved image quality in scenes with high dynamic range, because of reduction of side-lobe patterns.

Keywords: high resolution, polarization, urban environment, battle-field surveillance, MIMO radar, compressive sensing, SAR, ISAR

Innehållsförteckning

1. INLEDNING	7
2. TEORI	7
2.1. DEFINITION AV UPPLÖSNING	7
2.2. GRUNDSCEANRIO	7
2.3. TEORI	8
2.3.1. Överföringsfunktion	8
2.3.2. Bildformering	9
3. EM-BERÄKNINGAR.....	10
3.1. BERÄKNINGSPARAMETRAR	10
3.2. SCENARIOBESKRIVNING	10
4. RESULTAT	12
4.1. RESULTAT PUNKTSPRIDARE	12
4.2. RESULTAT: FLERVÄGSUTBREDNING FÖR MÄNNISKA I METALLGATA.....	16
4.2.1. Inverkan av antal inkluderade studsar	16
4.2.2. Information från horisontal- respektive vertikal polarisationskanal.....	17
4.3. FLERVÄGSUTBREDNING FÖR MÄNNISKA I BETONGGATA	18
4.3.1. Inverkan av antal inkluderade studsar	18
4.3.2. Information från horisontal- respektive vertikal polarisationskanal.....	19
5. ALTERNATIV METOD FÖR BILDFORMERING	20
5.1. ”CETIN-METODEN”	20
6. INLEDANDE STUDIE AV MIMO-RADAR.....	23
6.1. KARAKTERISERING AV MIMO	23
6.1.1. MIMO-radar med stor separation mellan antennerna	23
6.1.2. MIMO-radar med samlokaliserade antenner	24
6.2. MIMO-RADAR OCH COMPRESSIVE SENSING	25
7. SLUTSATSER OCH FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE.....	26
8. REFERENSER	27

1. Inledning

Vid strid i urban miljö kan stridsfältssradar användas för att lokalisera och i viss möjlig mån klassificera eventuella hot. Den komplexa signalmiljö som staden utgör innebär att den utsända radarvågens energi inte enbart träffar målet för att returneras direkt tillbaks till radarn utan den genomgår olika former av flervägsutbredning som ger en svårtolkad signalbild. Omgivningen ses då som en besvärande omständighet ur en radarmässig synpunkt. FOI har i ett tidigare projekt "Radar för detektion av mänsklig aktivitet runt hörn" visat på möjligheten att faktiskt utnyttja flervägsutbredningen för att detektera rörliga objekt som befinner sig utanför radarns siktlinje, se [1],[2]. Inom projektet "Penetrerande radarsystem för urbana operationer" har positioneringsmetoder utarbetats som bygger på *a priori*-kunskap om den av radarn belysta scenen och som nyttjar flervägsutbredningen [3],[4]. I denna rapport undersöks huruvida en liknande metod, som nyttjar kännedom om scenen i kombination med flervägsutbredning, kan användas för att bättre särskilja mål i ett scenario där målet är i radarns synfält. I tidigare arbeten nyttjades korrelation mellan en referenssignal och beräknade/uppmätta data för att positionera ett objekt. I detta arbete undersöks ifall andra tekniker kan användas för att få en ökad upplösning.

2. Teori

I detta kapitel definieras upplösningbegreppet för radar och den algoritm, som används för att nyttja flervägsutbredningen för att öka upplösningen. Det bör påpekas att nedan nämnda uttryck är approximativa och gäller i fjärrfältet och för monostatiska fall.

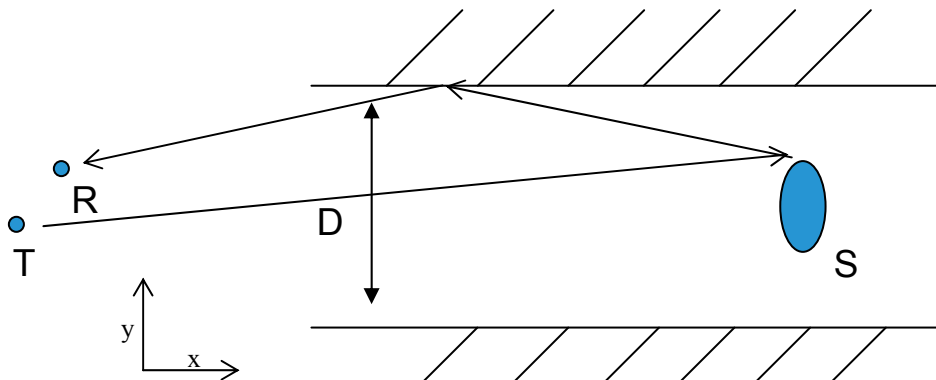
2.1. Definition av upplösning

Med begreppet upplösning i radarsammanhang menas det minsta osäkerhetsområde inom vilket ett punktmål kan sägas vara lokaliserat. Det handlar om hur bred huvudlob ett punktmål ger. Man brukar skilja på tvärsupplösning, Δs , och avståndsupplösning, Δr . För en traditionell realaperturantenn ges tvärsupplösningen ungefärligen av den lobbredd antennen har vid målet, d.v.s. $\Delta s = r\theta$ där r är avståndet och θ är antennens lobbredd. Avståndsupplösningen ges av den utsända pulsens varaktighet. En kort puls ger en hög avståndsupplösning medan det omvända gäller för en lång puls. I frekvensdomänen ges avståndsupplösningen för ett monostatiskt radarsystem av $\Delta r = c/2B$, där c är vågens utbredningshastighet och B är dess bandbredd.

Genom att anta vissa *a priori*-kunskaper om den belysta scenen kan upplösningen ökas genom exempelvis SAR (Synthetic Aperture Radar) [5]. Man antar då att det finns ett antal isotropa punktspridare som ger en retur enligt $\sum_{n=1}^p e^{ikr_n}/r_n$ där k är vågtalet och r_n är avståndet till punktmålet n . Om det i den uppmätta signalen finns ett mål vid dessa avstånd kommer den genom koherent integration att förstärkas om man också känner r_n . För en monostatiskt SAR som belyser punktmålet under flygsträckan L_{SA} ges vinkelupplösningen parallellt med flygbanan som $\delta_{CR} = \lambda/2L_{SA}$ där λ är den våglängd som svarar mot pulsens centerfrekvens. I avståndsled ges upplösningen på samma sätt som för en realapertur.

2.2. Grundscenario

Metoden utnyttjar flervägsutbredningen för att uppnå en ökad radarupplösning i den urbana stridsmiljön, där ett antal olika scenarion studeras. Husväggarna kommer att bestå av olika material och med varierande struktur. Gemensamt är dock att alla dessa fall bygger på det huvudscenario som illustreras i figur 1.



Figur 1. Visar huvudscenario. D anger den konstanta gatubredden. Väggarna består av godtyckligt material och kan innehålla fönster, dörrar och andra strukturer. Målet är placerat i S och belyses från en sändare i T . Mottagaren är placerad i R .

Fler specifika scenarion presenteras i kapitel 3.

2.3. Teori

Vi betraktar ett scenario enligt figur 1. Väggarna antas i detta avsnitt vara metalliska. Vi vill kunna beskriva överföringsfunktionen mellan sändare och mottagare. Om denna är känd kan detta nyttjas för att skärpa inmätningen av ett mål genom att korrelera en uppmätt signal med en skattad signal som bygger på ovan nämnda överföringsfunktion.

2.3.1. Överföringsfunktion

Vi vill beskriva överföringsfunktionen mellan den sända signalen och den mottagna. Följande approximationer införs i beskrivningen.

1. Det spridda fältet beräknas med GO-approximationen (Geometrisk Optik), vilket innebär att det spridda fältet i varje punkt är detsamma som om spridningen skett mot en oändlig yta. Spegelkällor och spegelmål uppkommer då enligt figur 2.
2. Alla randytor anses vara perfekta elektriska ledare.
3. Endast det skalära fältet beaktas vid beräkningen av överföringsfunktionen.
4. Gatubredden D antas känd och konstant längs gatans utbredning.
5. Born-approximationen [6] används vid beskrivning av spridarna, d.v.s. skuggning och inbördes interaktioner mellan spridarna ignoreras.

Ovanstående approximationer gör att det mottagna skalära fältet $E_r(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_t, \mathbf{r}_s, k)$ vid $\mathbf{r}_r$ från en spridare i positionen $\mathbf{r}_s$ skrivs som:

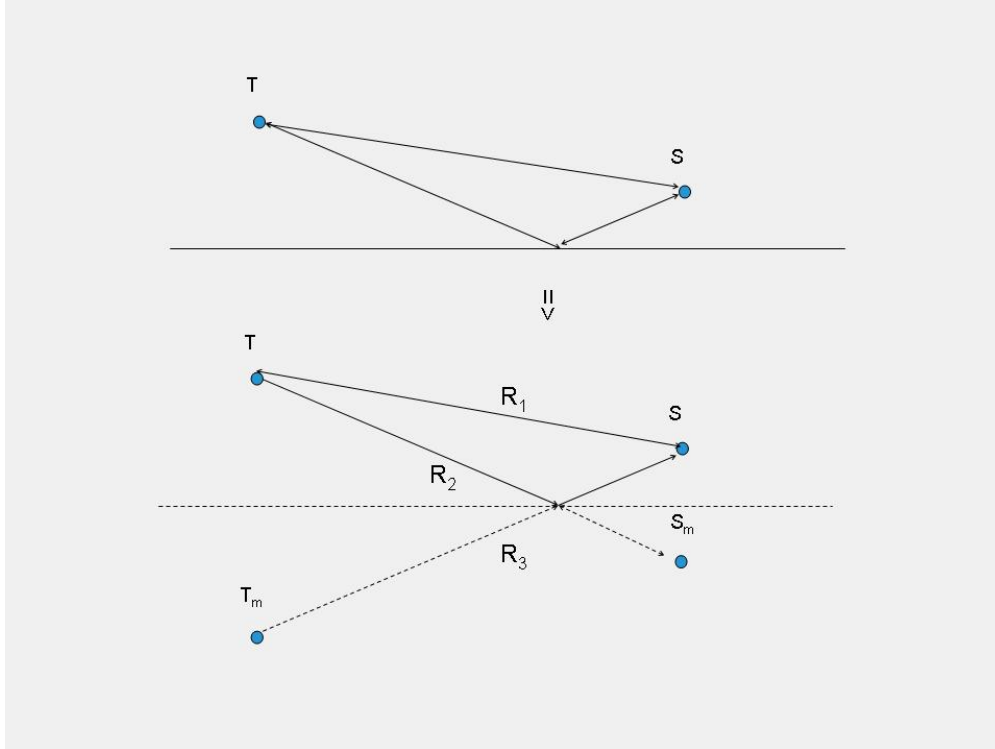
$$E_r(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_t, \mathbf{r}_s, k) = G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_t, \mathbf{r}_s, k)E_t(\mathbf{r}_t, k) \quad (1)$$

där $E_t(\mathbf{r}_t, k)$ är den sända signalen för vågtalet k , $\mathbf{r}_t$ är sändarens position och $G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_t, \mathbf{r}_s, k)$ är scenens överföringsfunktion för ett punktmål i koordinaten $\mathbf{r}_s$. Införda approximationer gör att $G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_t, \mathbf{r}_s, k)$ kan skrivas som:

$$G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_t, \mathbf{r}_s, k) = \sum_{q=1}^{b_r} \sum_{p=1}^{b_t} \{g(k, |\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_{t,p}|)g(k, |\mathbf{r}_{r,q} - \mathbf{r}_s|) + g(k, |\mathbf{r}_{sm} - \mathbf{r}_{t,p}|)g(k, |\mathbf{r}_{r,q} - \mathbf{r}_{sm}|)\} + g(k, |\mathbf{r}_t - \mathbf{r}_s|)g(k, |\mathbf{r}_r - \mathbf{r}_s|) \quad (2)$$

Här är $g(k, \mathbf{r}) = \frac{\exp(ik|\mathbf{r}|)}{4\pi|\mathbf{r}|}$ och b_t, b_r är antalet studsar för infallande respektive reflekterad stråle. Index m syftar på det m :te spegelmålet i motstående vägg.

Den sista termen i (2) är direktspridningsbidraget från målet, d.v.s. bidraget utan vägginteraktioner.



Figur 2. Visar hur ett oändligt jordplan (övre figurdelen) kan ersättas med en spegelkälla T_m och spegelspridare S_m (undre figurdelen). Sändaren och mottagaren är placerad i T och spridaren i S. Figuren visar det monostatiska fallet men ekvivalensen är oberoende av mottagarens position. Ekvivalensen är polarisationsberoende, något som inte visas i figuren. Metoden bygger på att det totala E-fältets komponent parallellt med jordplanet är noll. Man noterar att alla interaktioner mellan spridare och jordplan inkluderas på detta sätt. R_1 anger sträckan TS, R_2 sträckan TS_m och R_3 sträckan T_mS .

2.3.2. Bildformering

Metoden för bildformeringen består av att för olika bildpunkter $\mathbf{r}_p$ korrelera en referenssignal $E_s(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_t, \mathbf{r}_p, k)$ med den uppmätta eller beräknade signalen $S_{r,t}$, utsänd från en sändare t och mottagen i en mottagare r och spridd i den aktuella geometrin med förekommande målobjekt. I vårt fall är $S_{r,t}$ beräknad. Referenssignalen beräknas för ett punktmål i $\mathbf{r}_p$. Vi antar att den mottagna signalen i $\mathbf{r}_r$ är proportionell mot referenssignalen $E_s(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_t, \mathbf{r}_p, k)$, $S_{t,r}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_t, \mathbf{r}_s, k) \propto E_s(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_t, \mathbf{r}_p, k)$, där $\mathbf{r}_s$ beskriver målens källpunkter. Vi definierar därmed bildalgoritmen i pixel $\mathbf{r}_p$ som följande korrelation (3):

$$I(\mathbf{r}_p) = \alpha \sum_{r=1}^{n_r} \sum_{t=1}^{n_t} \sum_{i=1}^{n_i} E_s(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_t, \mathbf{r}_p, k_i) \overline{S_{t,r}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_t, \mathbf{r}_s, k_i)} \quad (3)$$

Under förutsättning att E_s är en god beskrivning av $S_{t,r}$ fås, för väl separerade mål, ett lokalt maximum för $I(\mathbf{r}_p)$ då $\mathbf{r}_p = \mathbf{r}_s$ och vi har en positionering av spridaren.

3. EM-beräkningar

Eftersom inget lämpligt mätsystem kunnat användas för analys av positioneringsalgoritmen beräknas istället $S_{t,r}$ med hjälp av beräkningsprogrammet SE-Workbench-RF [7].

Programmet använder fysikalisk-optik (PO) i kombination med geometrisk-optik (GO) för beräkning av de elektromagnetiska fälten. Varje studs beräknas med GO. Alla ytor kommer då att få ytströmmar från vilka det spridda fältet beräknas med PO.

3.1. Beräkningsparametrar

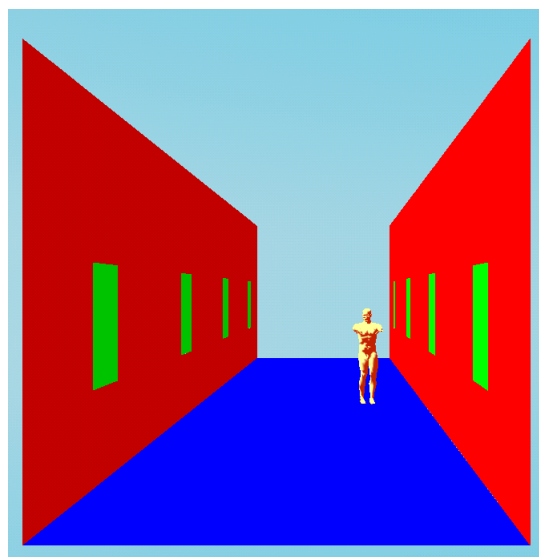
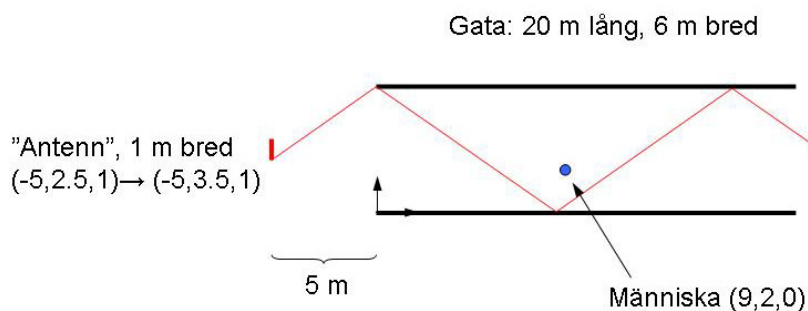
I samtliga beräkningsscenario har följande beräkningsparametrar använts.

- Bandbredd 9-11 GHz, uppspänd av 801 jämnt fördelade frekvenssteg
- Antal GO-studsar för beräkning av $S_{t,r}$: 10 st
- Isotrop antenntendiagram där antennteffektförstärkningen är 1 i både H- och V-polarisation

3.2. Scenariobeskrivning

De scenarier som har studerats och beräknats med SE-Workbench-RF innefattar en CAD-modell av en 20 m lång och 6 meter bred gata, vars väggar är 4 m höga, se figur 3. På vardera av de två väggarna finns två fönster. Två antenner har simulerats med SAR-liknande funktion. I den ena simuleringen är antennen placerad 5 m utanför gatans ena kortsida.

Beräkningar har utförts för antenntpositioner ± 0.5 m kring gatans mittlinje. Flera av beräkningarna inbegriper också en CAD-modell av en ca 2 m lång människa, placerad 1 m framför samt till höger (sett från antennen) om gatans mittpunkt. Med origo i gatans nedre hörn (se figur 3), är människans fötter centrerade i punkten $[9,2,0]$ m. Antennen rör sig över 1 m apertursträcka från $[-5,2.5,1]$ m till $[-5,3.5,1]$ m i steg om 1 cm, och har alltså hela tiden direktsikt till människan och gatans fasader.



Figur 3. Geometrisk beskrivning av gatuscenario med människa. Överst: Schematisk bild, vy uppifrån (xy-plan). Rödmarkerade streck visar exempel på geometrisk strålgång. Nederst visas den modellerade gatuvyn med människa, betraktad från radarantennen.

De olika färgerna i den nedre av bilderna i figur 3, indikerar ytor för vilka materialsättning kan göras. Människan har vid alla beräkningar för enkelhets skull modellerats helt i metall. Gatuavsnittet, bestående av golv, väggar och fönster, har vid vissa beräkningar modellerats i metall, medan i andra beräkningar har golvet modellerats i betong (tjocklek 30 cm), väggarna som betong (tjocklek 20 cm) och fönstren som glas (tjocklek 2 cm). Följande materialparametrar har använts [7]:

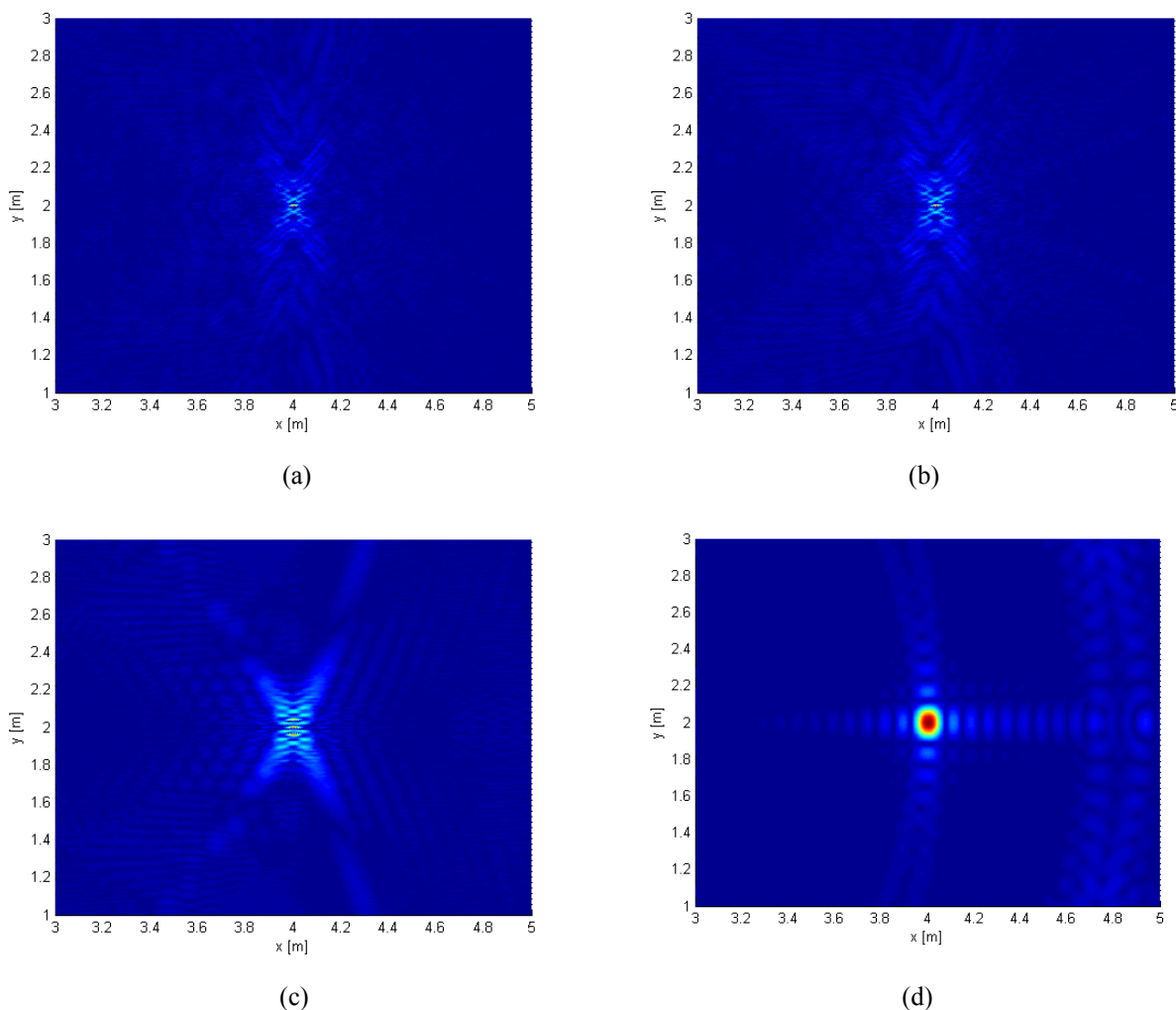
- Betong: $\epsilon_r = 6.0$, $\mu_r = 1.0$, $\sigma = 2.0 \cdot 10^{-3}$ S/m
- Glas: $\epsilon_r = 6.0$, $\mu_r = 1.0$, $\sigma = 3.5 \cdot 10^{-1}$ S/m.

Antenn och mål i den andra simuleringen beskrivs i följande avsnitt.

4. Resultat

4.1. Resultat punktspridare

För att undersöka den ”ideala” vinsten med att inkludera spegelmål och ett antal spegelkällor studeras först spridningen från punktspridare. $S_{r,t}$ beräknas därför med samma program som beräknar E_s , fastän med olika antal interaktioner. En tvådimensionell geometri antas för samtliga beräkningar i detta avsnitt. I figurerna 4-6 visas exempel med en 4 m bred korridor som scenario. Radarn består här av en 0.5 m lång array-antenn bestående av 34 st likafördelade element placerade i y-riktningen, figur 3, med mitten i $[0,2,0]$. Radarn sänder och tar emot elementvis, d.v.s. sändning från element i och mottagning i element i . Alla 34 elementen stegas därefter igenom för bildformering enligt ekv (3).

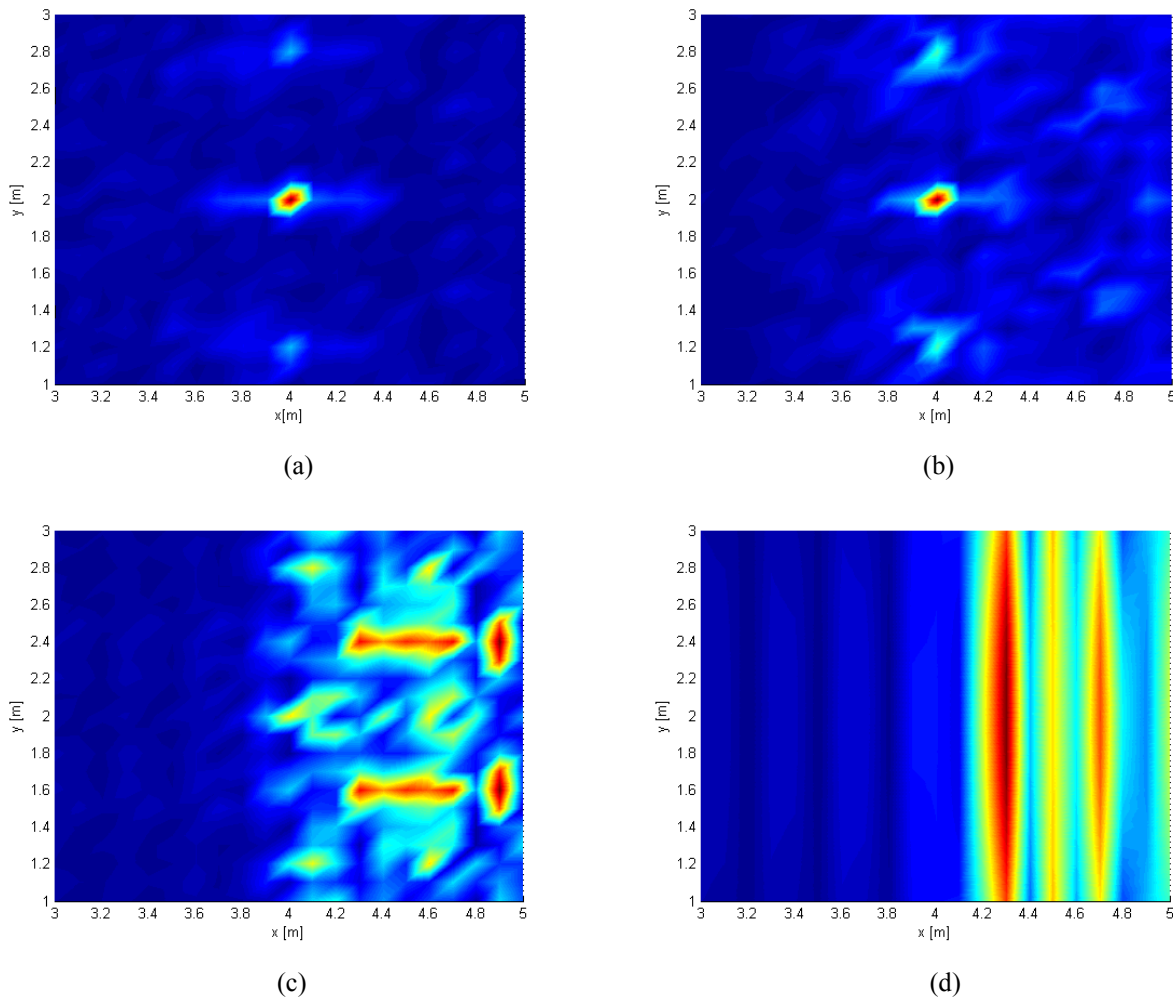


Figur 4. Visar resultat efter bildformering för ett punktmål placerat i $[4,2,0]$ för ovan nämnda radar. Bandbredden är 2 GHz centrerad kring 10 GHz. $S_{t,r}$ är beräknad enligt (2) där 6 studsar till och 6 studsar från radarn använts. Figur (a) visar resultatet då $E_s = S_{t,r}$. Figurerna (b) och (c) visar då 3 respektive 1 studs till, och 3 respektive 1 studs från radarn använts. (d) visar när endast direktbidraget inkluderas i E_s , d.v.s. vanlig SAR-formering. Bildpixelstorleken är 1 cm.

Från figurerna 4 (a)-(d) syns effekten av att inkludera fler studsar. I figur 4 (a) och (b) syns en mycket smal topp vid $[4,2,0]$, d.v.s. i punktspridarens position. Då antalet studsar minskar

ökar sidloberna något. Skillnaden mellan (a) och (b) är dock liten. I figur (c) noteras att även här är maximumet beläget i $[4,2,0]$, men att två andra toppar noteras nära målpositionen. Sidolobsnivåerna har ytterligare ökat något. I figur (d) syns en ”klassisk” punktspridarbild. En kraftig retur med maximumet i $[4,2,0]$ observeras. Returen har en typisk sinc-liknande form.

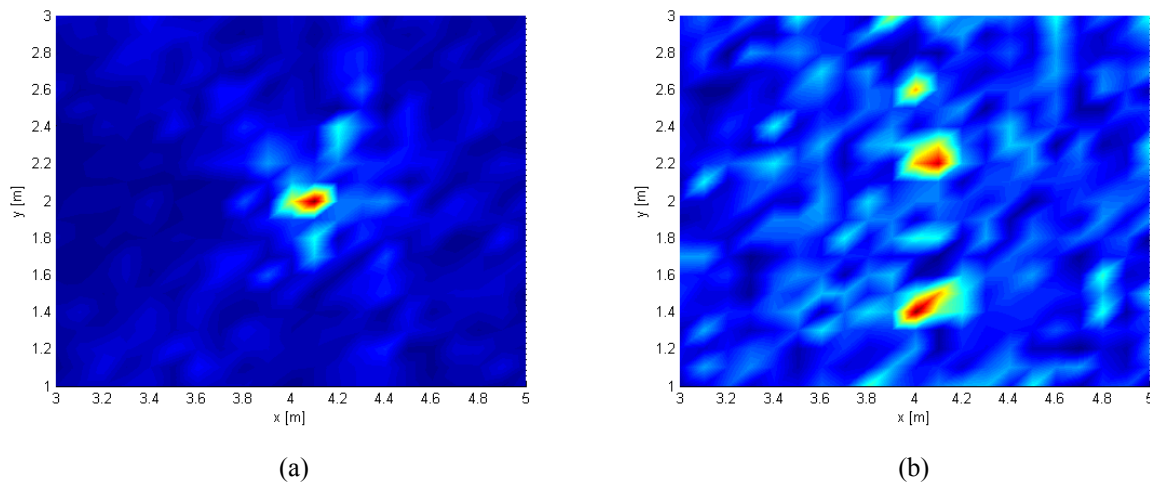
För att undersöka hur avståndet mellan mål och sändare påverkar upplösningen vid användandet av (2) i (3) visar figur 5 resultatet då sändaren placerats på 104 meters avstånd från målet.



Figur 5. Visar resultat efter bildformering för ett punktmål placerat i $[4,2,0]$. Radarn har flyttats till $[-100,2,0]$. Bandbredden är 2 GHz centrerad kring 10 GHz. $S_{t,r}$ är beräknad enligt (2) där 6 studsar till och 6 studsar från radarn använts. Figur (a) visar resultatet då $E_s = S_{t,r}$. Figur (b) visar då 3 studsar till och 3 studsar från radarn använts. Figurerna (c) och (d) visar då 1 studs till och från radarn använts, respektive frirymdsfallet, d.v.s. då endast direktbidraget från spridaren har inkluderats. Bildpixelstorleken är 10 cm.

Resultatet är känsligt för hur många studsar som inkluderas. Figur 5 (a) uppvisar naturligtvis en lokaliserad punkt eftersom $E_s = S_{t,r}$. I figur 5 (b) syns också målet lokaliserat vid $[4,2,0]$, fastän skenmål uppkommit både ovanför och nedanför målpositionen. Dessa kan också noteras i figur 5 (a), fastän deras amplitud nu ökat betydligt. Genom att endast inkludera 1 studs till och från radarn, figur 5 (c), har skenmålspositioner förstärkts och kan inte längre särskiljas från den verkliga målpositionen. Fyra starka reflexer har uppkommit på felaktiga positioner och kan tolkas som mål. Då endast direktbidraget inkluderats, figur 5 (d), går det inte längre att särskilja någon målposition, varken för skenmål eller verkliga mål. Man

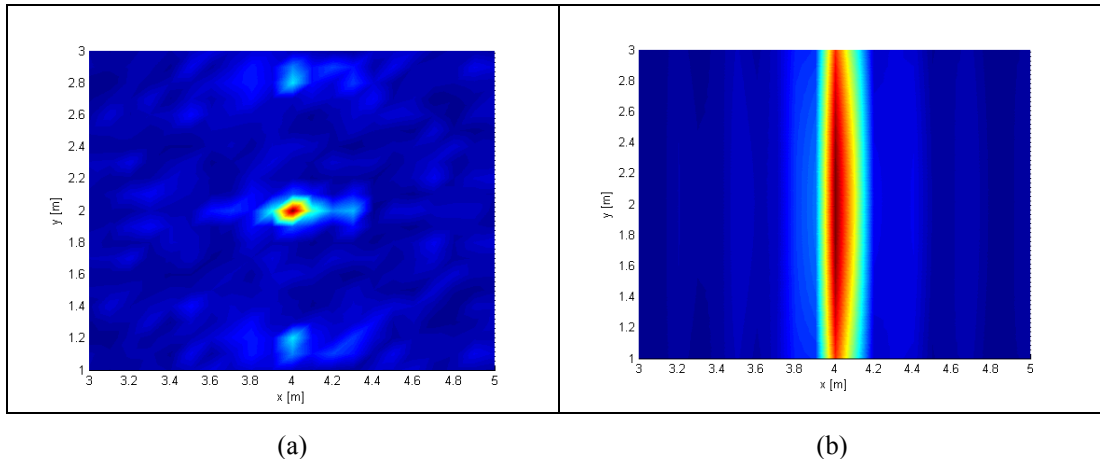
noterar att upplösningen för skenmålen motsvarar frirymdsupplösningen för ett punktmål på detta avstånd. Ovanstående resultat visar att genom att inkludera fler studsar i bildformeringen kan ”upplösningen” ökas. Effekten är störst när målen inte kan upplösas med aktuell bandbredd eller antenndimension, vilket i detta fall sker vid stora målavstånd. En konsekvens av små gångvägsskillnader mellan studsarna är att överföringsfunktionens känslighet ökar. I figur 6 visas resultaten då $S_{t,r}$ beräknats med 6 studsar och gatubredd $D = 4.1$ m, medan i bildformeringen har $D=4$ m använts.



Figur 6. Visar resultatet efter bildformering för ett punktmål placerat i $[4, 2, 0]$. Bandbredden är 2 GHz centrerad kring 10 GHz. I (a) är radarn placerad i $[0, 2, 0]$ medan den i (b) flyttats till $[-100, 2, 0]$. $S_{t,r}$ är beräknad enligt (2) med $D = 4$ m, där 6 studsar till och 6 studsar från radarn inkluderats. I bildformeringen har $D=4.1$ m använts.

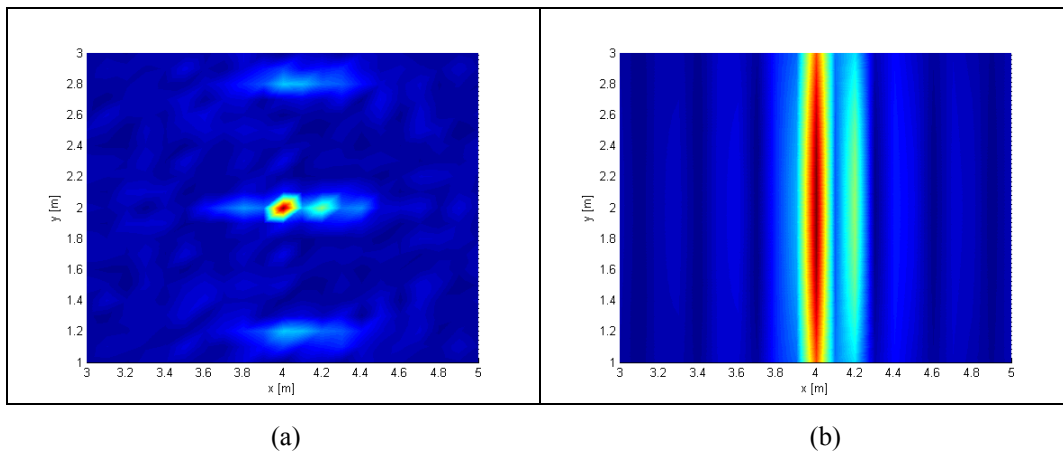
Närfältsfallet, figur 6 (a), är relativt okänsligt vad gäller fel i antagen gatubredd D . I figur 6 (b) då gångvägsskillnaderna är små syns målet inte längre vid $[4, 2, 0]$, utan två nya mål har introducerats i scenen. Hur stort felet i D får vara för att kunna fokusera på målet beror på avståndet mellan mål och sändare/mottagare, antal studsar samt på objektets geometriska form etc. För närvarande finns inte något explicit uttryck för det maximala felet. För dessa ovanstående scenarion gäller att felet $\Delta D \approx 1$ cm för 100 m avstånd och $\Delta D \approx 2$ cm för 4 m avstånd.

Upplösning kan definieras som det separationsavstånd för vilka två mål kan särskiljas. Vi introducerar därför ytterligare ett mål i scenen. Resultaten illustreras i figurerna 7- 9. Radarn är i dessa figurer placerad i $[-100, 2, 0]$.



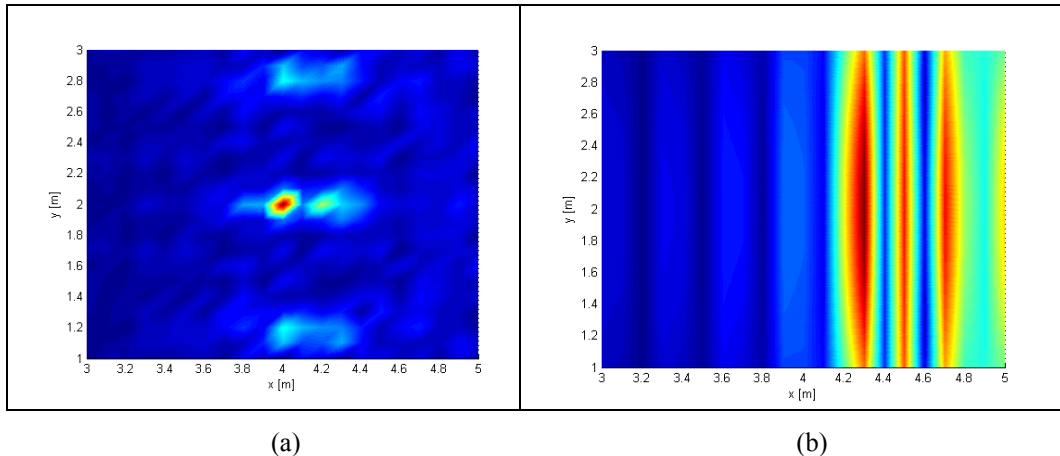
Figur 7. Visar bildformeringsresultatet då två punktmål introducerats i koordinaterna $[4, 2, 0]$ och $[4.05, 2, 0]$, I figur (a) befinner sig målen i tänkt gatuscenario där referenssignalen beräknad med 6/6 studsar är korrelerad med sig själv. Figur (b) visar frirymdsfallet för en signal korrelerad med sig själv. Bandbredden är 2 GHz centrerad kring 10 GHz.

I figur 7 (a) ser vi effekten av att inkludera studsar. Upplösningen i sida som är beroende av belysningsbredden vid målet har ökat markant. I avståndsled är upplösningen ungefär densamma eftersom bandbredden $B=2$ GHz är samma i båda beräkningarna. Vi noterar att de två målen inte kan upplösas inbördes med denna bandbredd som motsvarar en avstånds-upplösning $\Delta r = 7.5$ cm. I figur 8 då målen har separerats 15 cm kan de särskiljas med aktuell avståndsupplösning.



Figur 8. Visar bildformeringsresultatet då två punktmål introducerats i koordinaterna $[4, 2, 0]$ och $[4.15, 2, 0]$, I figur (a) befinner sig målen i tänkt gatuscenario där referenssignalen beräknad med 6/6 studsar är korrelerad med sig själv. Figur (b) visar frirymdsfallet för en signal korrelerad med sig själv. Bandbredden är 2 GHz centrerad kring 10 GHz.

I följande figur visas resultatet då $S_{t,r}$ är beräknad med 4/4 respektive 0/0 ditstuds/hemstuds. Referenssignalen E_s är som förut beräknad med studsar 6/6.



Figur 9. Visar bildformeringsresultatet då två punktmål introducerats i koordinaterna $[4,2,0]$ och $[4.15,2,0]$, då $S_{t,r}$ är beräknad med 4/4 ditsuds/ hemstuds respektive 0/0 ditsuds/hemstuds. Bandbredden är 2 GHz centrerad kring 10 GHz.

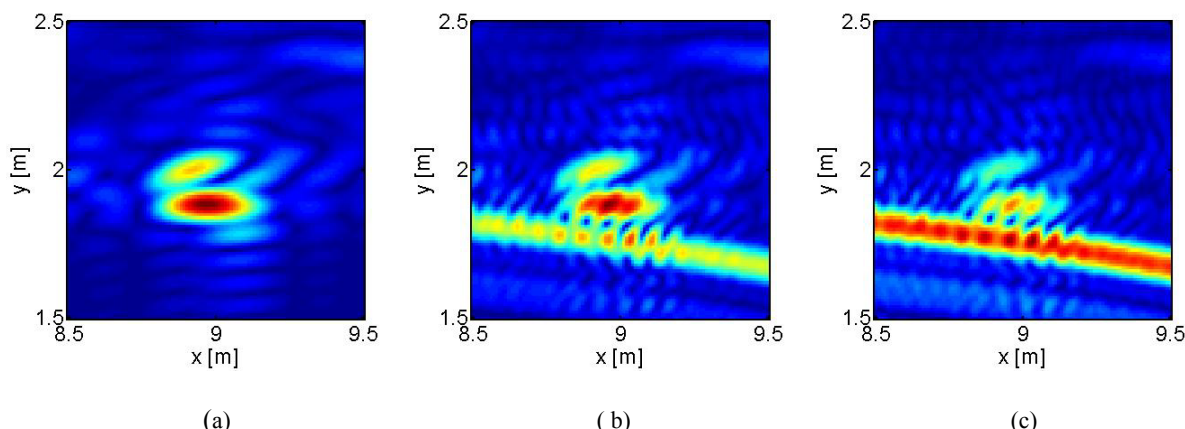
Vi ser från figur 9 att de två målen tydligt kan särskiljas i figur 9(a) men att detta är omöjligt i figur 9(b), där även ett antal spökmål dykt upp på avstånd som motsvarar vissa returer från flervägsutbredningen.

4.2. Resultat: Flervägsutbredning för människa i metallgata

Positioneringsmetoden som har använts för scenariot beskrivs i kapitel 3 med geometrin enligt figur 3. I första fallet har både människan, placerad i $[9,2,0]$, och gatan modellerats i metall. Spridningen från gatan och människan, $S_{t,r}$, har beräknats med SE-Workbench-RF. Horizontal- respektive vertikalkomponenten av det beräknade mottagna fältet har korrelerats till I_H respektive I_V enligt (3).

4.2.1. Inverkan av antal inkluderade studsar

Figur 10, visar absolutbeloppet av pixelkorrelationen $|I_H|$, beräknad från det mottagna E -fältet i horisontal (H), i ett 1 m^2 stort område kring målet i xy -planet, $z=1$. Figur 10 visar 0/0, 0/4 och 4/4 ditsudsar/hemstudsar. Sändpolarisationen är linjär med lika H- och V-komponenter med lika amplitud och fas.

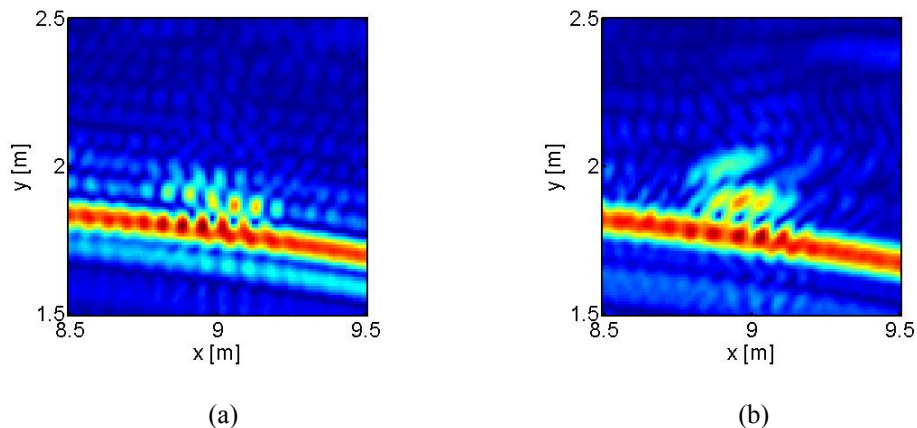


Figur 10. Beräknad pixelkorrelation från mottaget fält i H-polarisation för metallmänniska i $[9, 2, 0]$ i metallgata (tvärsnitt i xy-planet, $z=1$). Dilstuds/hemstudsar inkluderade i beräkningen: (a) 0/0, (b) 0/4 och (c) 4/4.

I figur 10 (a) då endast direktbidraget inkluderats vid bildformeringen syns två skarpa reflexer vid ungefär vid $x=9$ och $y=2$. Den ena reflexen är något svagare än den andra. Den starkare härrör från större delen av människokroppen och den svagare troligtvis från de utsträckta armarna, figur 3. Då fyra studsar tillbaka till mottagaren inkluderas i beräkningen, figur 10 (b), är målet möjligen något bättre upplöst än i figur 10 (a) då den mörkröda toppen blivit något smalare. Ett band av stark retur uppträder i bilderna figur 10 (b) och (c). Detta band härrör från väggreflexen och korreleras fram av positioneringsalgoritmen med ökad intensitet då antalet studsar ökar. Att inkludera fler antal studsar i bildformeringen ger inte för detta scenario någon betydande ökning av upplösningen. På samma sätt som i punktspridarfallet ser vi för korta avstånd endast liten, om än någon, förbättring av upplösningen. Dock återstår arbete att som i punktspridarfallet undersöka fall då sändaren befinner sig på större avstånd från målet.

4.2.2. Information från horisontal- respektive vertikal polarisationskanal

Eventuella skillnader i horisontal respektive vertikal polarisationskanal har studerats. För den vertikala polarisationskanalen har bildformeringsberäkningar utförts i fallen distuds/hemstuds: 1/1, 4/4 samt 20/20. Dessa tre fall ger - liksom för H-kanalen - i det närmaste identiska bilder av pixelkorrelationen. Som exempel har valts fallet med 4 distudsar och 4 hemstudsar. Figur 11 visar absolutbeloppet av pixelkorrelationen $|I_H|$ och $|I_V|$ kring målet i xy-planet, $z=1$. Sändarpolarisationen är linjär med lika H- och V-komponenter med lika amplitud och fas.



Figur 11. Beräknad pixelkorrelation för metalliserad människa positionerad i $[9,2,0]$ omgiven av en metallgata (tvärsnitt i xy -planet, $z=1$). Figur (a) visar $|I_V|$ och (b) $|I_H|$. I båda fallen har 4 studsar från sändaren och 4 studsar till mottagaren inkluderats i bildformeringen.

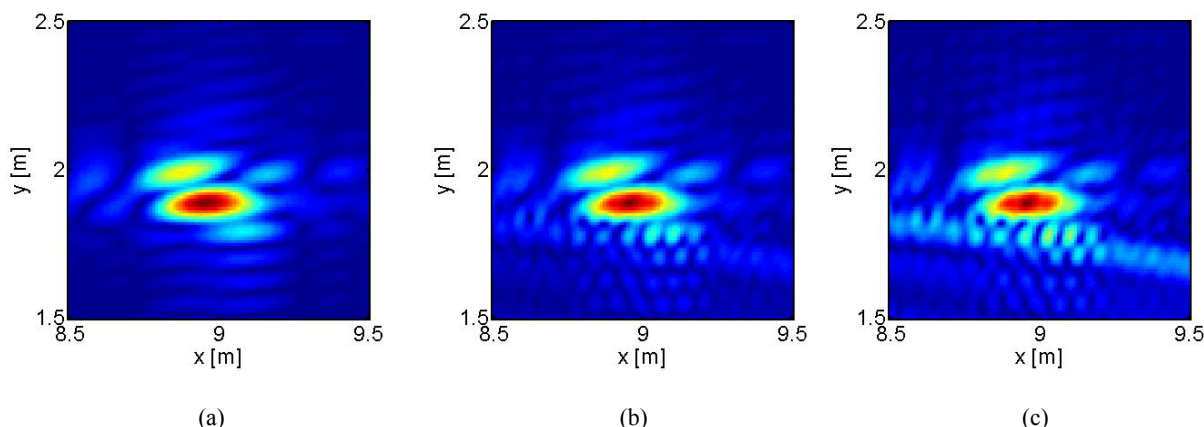
Stora skillnader i resultaten noteras beroende på mottagen polarisationskanal. Vad gäller målindikation så ger den horisontala kanalen (b) en någorlunda tydlig position, medan det i den vertikala kanalen (a) är svårt att ens urskilja ett mål utan vetskap om dess position. Det mest framträdande i båda bilderna är de tvärgående banden. Vad skillnaderna beror på är i dagsläget oklart, men i överföringsfunktion (2) tas ingen hänsyn till polarisation utan reflektionskoefficienten är alltid 1, något som i så fall motsvarar det vertikala polarisationsfallet. Frågan kommer att undersökas i fortsatt arbete.

4.3. Flervägsutbredning för människa i betonggata

För att undersöka hur ett realistiskt väggmaterial påverkar resultaten används föregående scenario fast denna gång har gatan modellerats i betong och med glasfönster, se avsnitt 3.2. Liksom för metallfallet, avsnitt 4.2, har horisontal- respektive vertikalkomponenten av det beräknade mottagna fältet korrelerats till pixelkorrelationerna I_H respektive I_V , se ekv. (3).

4.3.1. Inverkan av antal inkluderade studsar

Beräkning utifrån mottaget E -fälts horisontalkomponent har utförts för fallen ditstuds/hemstuds: 0/0, 0/4, 1/1, 4/0, 4/4 samt 20/20. Fallen 1/1, 4/4 samt 20/20 ger i det närmaste identiska bilder av pixelkorrelationen. Motsvarande gäller även för fallen 0/4 samt 4/0. Med anledning av detta, visas i Figur 12 absolutbeloppet av pixelkorrelationen $|I_H|$, (xy -planet, $z=1$) för fallen 0/0, 0/4 samt 4/4. Sändpolarisationen är linjär med lika H- och V-komponenter med lika amplitud och fas.



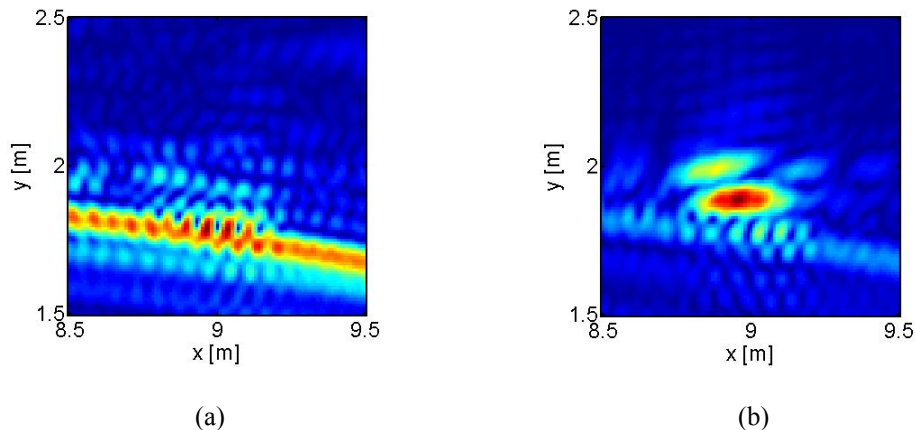
Figur 12. Beräknad pixelkorrelation för metallmänniska i $[9,2,0]$ i betong- & fönstergata (tvärsnitt i xy -planet, $z=1$). Ditsudsar/hemstudsar inkluderade i beräkningen: (a) 0/0, (b) 0/4 och (c) 4/4.

För direktbidragsfallet i Figur 12 (a) är resultatet likt det resultat som erhålls då gatan modelleras i metall. Då fler studsar inkluderas i beräkningen, 12 (b) och (c), förbättras målupplösningen något, d.v.s. området med starkast pixelkorrelation (rött - mörkrött i bilden) blir mindre.

Då fler studsar inkluderats, figur 12 (b) och (c), syns tydlig skillnad mot metallfallet. Den starka korrelationen med reflexen från väggen i metallfallet är betydligt mindre framträdande i betong- och fönsterfallet. Detta är naturligt då metall har betydligt bättre reflexionsegenskaper än vad glas och betong har. Vi noterar även att den defokusering av målet som skedde för metallfallet då 4/4 studsar inkluderades, se figur 10 (c), inte gäller för fallet med betongväggar, figur 12 (c), utan här har det mörkröda området ytterligare minskat då fler studsar inkluderats. Sammanfattningsvis kan sägas att för detta scenario verkar bättre resultat uppnås för fallet med betongväggar jämfört med metallväggsfallet. Detta resultat är något förbryllande då $G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_t, \mathbf{r}_s, k)$ förutsätter metallväggar. Resultaten bör därför undersökas vidare i framtida arbete.

4.3.2. Information från horisontal- respektive vertikal polarisationskanal

På motsvarande sätt som i metallfallet har eventuella skillnader i H- respektive V-kanal studerats. För V-kanalen har beräkningar utförts i fallen ditsuds/hemstuds: 1/1, 4/4 samt 20/20. Dessa tre fall ger - liksom för H-kanalen - i det närmaste identiska bilder av pixelkorrelationen. Som exempel har fallet med 4 ditsudsar och 4 hemstudsar valts. Figur 13 visar absolutbeloppet av pixelkorrelationen $|I_H|$ och $|I_V|$ kring målet i xy -planet, $z=1$. Sändpolarisationen är linjär med lika H- och V-komponenter med lika amplitud och fas.



Figur 13. Beräknad pixelkorrelation för metallmänniska i $[9,2,0]$ i betong- & fönstergata (tvärsnitt i xy -planet, $z=1$). Figur (a) visar $|I_V|$ och (b) $|I_H|$. I båda fallen 4 ditsudsar och 4 hemstudsar.

En betydande skillnad mellan de båda polarisationskomponenterna noteras. För V-polarisation, figur 13 (a) syns inget mål utan bilden domineras av en vägginteraktion som återigen löper som ett band genom bilden. För H-polarisation, figur 13 (b) syns däremot människan tydligt vid målpositionen, medan endast ett svagt bidrag fås från vägginteraktionen. Jämfört med metallgatu-fallet skiljer sig resultatet mer för de olika polarisationerna.

5. Alternativ metod för bildformering

Föregående resultat är framtagna genom att korrelera referenssignalen $E_s(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_t, \mathbf{r}_p, k)$ med en beräknad eller uppmätt signal $S_{t,r}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_t, \mathbf{r}_s, k)$. För att få en god positionering när signalerna korreleras krävs en kort puls, d.v.s. att ett stort antal frekvenser beräknas i referenssignalen. Genom att använda andra metoder vid bildformeringen skulle eventuellt antalet frekvenser kunna reduceras. I detta kapitel följer en beskrivning av en metod som kan återskapa högupplösta avståndsprofiler från data med lägre upplösning under förutsättning att målen till viss del liknar punktmål. Genom att nyttja denna algoritm skulle eventuellt antalet frekvenser n_i i den inre summationen av (3) kunna reduceras.

5.1. "Cetin-metoden"

I detta avsnitt beskrivs en metod som presenteras i "Formulation of HRR Profiles by Non-Quadratic Optimization for Improved Feature Extraction" [8] av M. Cetin, W. C. Karl och D. A. Castanon. Metoden presenterades vid SPIE 2002. Även om inte namnet är etablerat, väljer vi i fortsättningen att kalla metoden för "Cetin-metoden".

Konferensbidraget är sprunget ur det ökande intresset för högupplösta radardata, *high range-resolution*, (HRR), som kan användas till exempel för automatisk måligenkänning (ATR, *Automatic Target Recognition*). Detta kräver typiskt en mycket kort (eventuellt syntetisk) puls och således en stor bandbredd. I fallet med en mer begränsad bandbredd är man intresserad av så kallade superupplösningsmetoder, som enligt någon metod skapar högupplösta avståndsprofiler (eller liknande). Detta åstadkoms vanligtvis genom någon form av mer eller mindre implicit antagande kring spridningsmiljön precis som i ekvation (2), ett antagande som i sin tur kan vara mer eller mindre riktigt.

I det presenterade arbetet klargörs att många viktiga frågor som till exempel klotterundertryckning inte beaktas, utan metoden demonstreras i ett ganska snällt syntetiskt sammanhang. Metoden är ganska principiellt beskriven, med en del intressanta parametrar oklart beskrivna. I stora drag utgår man från en högupplöst avståndsprofil med N sampel, $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$. $\mathbf{x}$ i sig är okänd, men man känner vissa frekvenskomponenter hos $\mathbf{x}$:s fouriertransform. Man försöker sedan gissa $\mathbf{x}$ genom att söka minimum för en viss reellvärd funktion av $\mathbf{x}$ (funktional). Sökningen efter en minimipunkt sker med en Kvasi-Newton-metod, och själva poängen tycks vara att funktionalen innehåller en norm som favoriserar punktmål. I detta ligger alltså själva modellantagandet.

Metoden fungerar, enligt [8], som följer. Medan $\mathbf{x}$ är okänd, känner man i stället

$$\mathbf{y} = \mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{w}$$

där $\mathbf{w}$ är ett brus som [8] verkar bortse ifrån, och där $\mathbf{F}$ betecknar "a high-resolution to low-resolution Fourier transform operator". Det tolkas som att man känner vissa frekvenskomponenter i (den fulla) fouriertransformen av $\mathbf{x}$. Sålunda är $\mathbf{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_M\}$, där $M < N$ eller till och med $M \ll N$. $\mathbf{F}$ blir därför (med $\mathbf{x}$ och $\mathbf{y}$ skrivna som kolonnvektorer) av format $M \times N$. Utifrån kännedom om $\mathbf{y}$, försöker man sedan skatta $\mathbf{x}$ genom att hitta det $\mathbf{x}$ som minimerar funktionalen

$$J_0(\mathbf{x}) = \|\mathbf{y} - \mathbf{F}\mathbf{x}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{x}\|_p^p$$

Här är den första normen (l_2 -normen) på högersidan tagen "i fourierrummet":

$$\|\mathbf{y}\|_2 = \left(\sum_{m=1}^M |y_m|^2 \right)^{1/2} \text{ och den andra normen } (l_p\text{-normen}) \text{ är tagen i "avståndsrummet":}$$

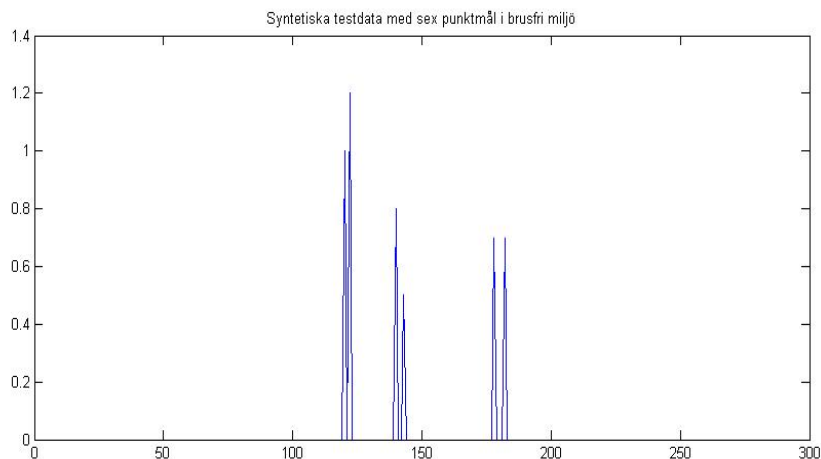
$$\|\mathbf{x}\|_p = \left(\sum_{n=1}^N |x_n|^p \right)^{1/p}. \text{ Vidare är } \lambda \text{ en valbar parameter, och } p \text{ är valt så att } p < 2. \text{ I [8]}$$

kommenteras för övrigt att fallet $p=1$ finns rapporterat i litteraturen. Tanken med bidraget från l_p -normen är enligt [8] att det skall vara regulariserande, vilket med en något ovanlig betydelse nog menas att bland alla $\mathbf{x}$ som gör $\|\mathbf{y} - \mathbf{F}\mathbf{x}\|_2^2$ liten, favoriseras sedan med termen $\lambda \|\mathbf{x}\|_p^p$ de $\mathbf{x}$ som dessutom är punktspridarlrika. Av numeriska skäl används i [8] i praktiken

$$\text{funktionalen } J(\mathbf{x}) = \|\mathbf{y} - \mathbf{F}\mathbf{x}\|_2^2 + \lambda \left(\sum_{n=1}^N |x_n|^2 + \varepsilon \right)^{p/2}. \text{ Den Kvasi Newton-metod som}$$

används ger en följd av skattningar av $\mathbf{x}$: $\hat{\mathbf{x}}^{(1)}, \hat{\mathbf{x}}^{(2)}, \dots, \hat{\mathbf{x}}^{(n)}$, där man dels hoppas att metoden konvergerar och dels hoppas att den konvergerar mot det sökta minimet. Detta kan i viss mån styras av vald steglängd i iterationerna. I praktiken bryts iterationerna när successiva skattningar inte ändrar sig så mycket.

Metoden låter användaren välja storheter som λ , ε , p , men även vissa förenklingar av vald numerisk metod kan varieras. Givet en testdatamängd är det naturligtvis frestande att trimma dessa parametrar för att metoden skall framstå så fördelaktigt som möjligt, och så har förmodligen också skett i [8]. Framför allt är det valet av λ och p som är intressant, och i artikeln har $p=0.1$ valts. Det hänger antagligen samman med testdata som syns i figur 14.



Figur 14. Syntetiska testdata, bestående av sex punktmål i en övrigt brusfri miljö (sammanlagt 256 sampel).

Det låga värdet på p gör att punktmål favoriseras, och i [8] finner man också att den föreslagna metoden ger utmärkta resultat på testdata. Bland annat jämförs metoden med metoderna "Relax" [9] och "Capon" [11], där den står sig mycket väl. Man undersöker också metoden på något mer realistiska data, och finner då att valet $p=0.1$ kan vara olämpligt. Å andra sidan ger, för precis den då valda datamängden, $p=1.1$ ett bättre resultat.

Författarna skriver själva att arbetet är preliminärt och att till exempel parametervärderna är gjorda för bästa resultat (givet en datamängd). Metoden behöver utvärderas på fler datamängder, och dessutom behöver aspekter såsom brus beaktas. Icke desto mindre kan metoden vara ett intressant alternativ, speciellt om man har viss kännedom om mätdata.

6. Inledande studie av MIMO-radar

6.1. Karakterisering av MIMO

Ovanstående avsnitt har behandlat radarsystem med monostatisk enkanalig sändar-mottagarkonfiguration. En intressant utveckling inom radarområdet de senaste åren har skett inom vad som kallas MIMO-radar. MIMO står för "Multiple Input Multiple Output" och är ursprungligen en benämning som kommer från radiokommunikationsteorin. Benämningen indikerar vad som avses, nämligen att man använder multipla sändare och mottagare i olika konfigurationer för att skapa sitt system. Underlag för denna text har främst hämtats från referenserna [10],[12].

En viktig egenskap i ett MIMO-system är att signalerna som sänds ut kan vara allt från starkt korrelerade till helt oberoende signaler beroende på vilken systemegenskap som efterfrågas. Med korrelerade signaler menas t.ex. den typ av fasvridna signaler som används i fasstyrda antenner, där alla element sänder ut samma pulsform, fast tidsförskjuten och möjligen amplitudskalad. Oberoende signaler innebär att de endast ger ett nollskilt resultat om de korskorreleras med sig själva. Förutom signalmodulation kan även polarisationen varieras mellan olika sändare och mottagare, även om det vanligaste är att denna parameter inte varieras i radarsystem.

Den geometriska konfigurationen av sändare och mottagare kan i ett MIMO-system vara allt från fullbestyckade arraystrukturer med en halv våglängds separation mellan elementen, till glest distribuerade sändare och mottagare i *ad hoc* strukturer. Sändare och mottagare kan vara separerade eller samlokaliserade och antalet av varje slag kan variera. Beroende på viken struktur som används kommer olika systemegenskaper att erhållas.

Således kan man sammantaget säga att MIMO-radar är den mest generella radarsystemstruktur som kan konstrueras.

Inom radarteorin används begreppen multistatisk radar och aktiva elektroniskt skannade arrayer (AESA). Dessa koncept ligger mycket nära det som kallas MIMO-radar, men av praktiska och kostnadsskäl används idag oftast tidsseparerade signaler, respektive korrelerade signaler i dessa system. Det ger begränsningar i flexibiliteten hos systemet, varför de prestanda som kan erhållas med en fullskalig MIMO-radar inte kan uppnås i dessa. Man kan således säga att MIMO-radar är en generalisering av multistatiska och AESA radarsystem.

De prestanda som kan predikteras med den teori som tagits fram för att beskriva dessa system, ger gränser för vad som är möjligt att åstadkomma och ger insikt i vilka kompromisser som behövs för att bygga realistiska system. Nedan beskrivs de två största kategorierna av system som kan skapas med MIMO-system, system med separerade antenner eller samlokaliserade antennstrukturer.

6.1.1. MIMO-radar med stor separation mellan antennerna

Med stor separation mellan antennerna kan inte vanlig lobformning göras på grund av de tvetydigheter som uppkommer på grund av undersampling. Det finns dock andra egenskaper hos strukturer med glesa sensorer som är av intresse för vissa applikationer. För urbana miljöer kan några av dessa vara användbara.

Radarmålytan hos utbredda sammansatta mål varierar ofta ganska snabbt då aspektvinkeln till målet ändras. Denna egenskap gör att sannolikheten för detektion av denna typ av mål kraftigt varierar med aspektvinkeln då ett monostatiskt system används. Med ett MIMO-system med M mottagare och N sändare erhålls MN oberoende mätningar av målet så länge dessa har separerats mer än $R_{min}\lambda/D$, där R_{min} är avståndet till den sändare eller mottagare som är närmast målet, D är målutbredningen ortogonalt mot den riktningen och λ är våglängden hos systemet. Denna ökade mängd mätningar ger en medelvärdesbildning av den flikiga radarmålytan och ger stabilare och säkrare detektioner av målet. Observera att dessa resultat även gäller för de fall där flervägsutbredning ger fädning av signalen i t.ex. en urban miljö. Stabilare måldetektion kan därför erhållas med MIMO-system i sådana miljöer. En annan

viktig sak att påpeka är att denna prestandaökning inte kräver faskoherens mellan sändare och mottagare, det räcker med en tidsnoggrannhet motsvarande avståndsupplösningen i systemet.

Med liknande resonemang kan man även visa att detektion av rörliga mål gynnas av den multistatiska konfigurationen. Detta beror på att maximal doppler fås då rörelsen är parallell med signalens utbredningsriktning, vilket är mer sannolikt vid observation från flera håll. Vidare finns blinda hastigheter i de flesta radarsystem, beroende på den använda vågformen. De utökade hastighetsobservationerna mildrar denna effekt och förbättrar detektionen av rörliga mål. Faskoherens krävs endast lokalt hos mottagarna för att dopplerestimering skall kunna göras, men för övrigt krävs bara tidssynkronisering av de distribuerade enheterna.

En tredje egenskap är förbättrad riktningsbestämning till ett mål, genom de utökade oberoende mätningar som erhålls. För detta krävs dock att mottagarna sitter samlokaliserade med ett avstånd av $\lambda/2$ för att invikningsfri riktningsbestämning ska kunna göras. Faskoherens mellan mottagarna krävs, men endast tidssynkronisering med sändarna.

De ovanstående egenskaperna hos MIMO-radar är alla oberoende av full fassynkronisering mellan sändare och mottagare. Med fassynkronisering kan dock ett MIMO-system göra mycket noggranna inmätningar av positionen hos ett mål. Det intressanta är att upplösningen inte längre blir begränsad av bandbredden hos systemet, utan av våglängden. Det krävs dock att man kan hantera de tvetydigheter som uppkommer med den undersampling som fås då man distribuerar sensorerna glest. Det finns flera sätt att mildra problemet med tvetydigheter. Exempelvis ger en slumpvis positionering av sensorerna en generell ökning av medelnivån för sidoloberna i riktningsdiagrammet för systemet, istället för distinkta lober med kraftig förstärkning. Vissa vågformer med olika modulationer kan också användas för att reducera kraftiga sidolobor. Vidare kan man använda den icke-koherenta lågupplösta detektionen, som nämnts ovan, som en initial inmätning av målet och på så vis eliminera vissa tvetydigheter. Man kan observera att medelnivån på sidoloberna för en radar med en sändare och MN mottagare i en slumpmässig arraystruktur minskar med antalet mottagare som $1/MN$, medan det för ett fullkoherent system med M sändare och N mottagare minskar nivån som $1/(M+N)$. Det senare systemet ger en markant vinst i form av en kraftig reduktion i antalet sensorer som behövs för att uppnå en önskad sidolobsnivå.

6.1.2. MIMO-radar med samlokaliserade antenner

För samlokaliserade antenner kan MIMO ses som en generalisering av elektriskt styrda antenner där de ingående sändarelementen har kapaciteten att sända individuellt modellerade signaler. Detta ger främst en kraftigt ökad förmåga till parameteridentifierbarhet i systemet. Det innebär att det antal mål, klotter m.m. som kan inmätas av systemet är kraftigt förbättrat. En MIMO-radar med M oberoende sändare och N oberoende mottagare kan mäta in mellan [13] $(2(M+N)-5)/3$ och $2MN/3$ parametrar och en fasstyrd array med N mottagare kan mäta in $(2N-3)/3$ parametrar. Om man studerat uttrycken ser man att det är antalet oberoende sändare som dramatiskt ökar kapaciteten i radarsystemet. Genom att placera sändarna på ett avstånd om $N\lambda/2$ fås vidare en syntetisk utökning av arrayen till en struktur som är M gånger så lång. Detta ger möjlighet att mäta in M stycken fler parametrar. Man kan även resonera kring att det ger möjlighet att skapa en skärpning av lobor och därmed upplösningen med en faktor M .

En annan möjlighet som uppkommer med den flexibilitet man får i ett MIMO-system med samlokaliserade antenner är förmågan att adaptivt styra signalenergin till de punkter i rummet där det finns intresse att mäta, typiskt där det finns mål. Genom att applicera adaptiva signaloptimeringsalgoritmer kan systemet ges förmåga att skapa lobmönster som ger minimal korskorrelation mellan olika mål. Det ger maximal upplösning och precision vid inmätning av flera mål i en scen. Vidare kan signalenergin fokuseras maximalt på målen och ge bästa möjliga detektionsprestanda i en svår signalmiljö. Ett exempel på tekniker som ryms inom denna kapacitet är "time reversal".

6.2. MIMO-radar och Compressive Sensing

Compressive Sensing är en teknik som studerats flitigt de senaste åren. Genom att observera att en scen generellt är gles, d.v.s. att stora delar av den inte innehåller några objekt eller klotter, kan man inse att man inte behöver all data (sampler) som normalt samlas in av ett radarsystem för att rekonstruera signalen från systemet i det närmaste perfekt, och i vissa fall bättre. I ett tidssamplande system kan detta inses som ganska trivialt, genom att strunta i att sampla när man ändå inte har någon retur. Ingen information förloras, men motsvarande gäller även för ett frekvenssvep eller för en arrayantenn. Termen *Compressive Sensing* kommer således av förmågan att reducera datamängden som samlas in av ett system nere på sensornivå. Datamängden kan i flera visade fall reduceras tiofalt [14].

Ett MIMO-system behöver även central dataprocessering för att realiseras. *Compressive Sensing* kan därmed vara den teknik som gör detta praktiskt möjligt genom att få ner den datamängd som behöver kommuniceras till hanterbar storlek. Som även framgår av diskussionen ovan om MIMO-system, så kan ett sådant mäta in betydligt fler mål och detaljer i en scen jämfört med en fasstyrd array. Om scenen är gles tillför ju detta inte mycket, men om man då reflekterar över att man istället kan använda *Compressive Sensing* till att t.ex. glesa ut sin sändar- och mottagararray, inser man att *Compressive Sensing* och MIMO-radar tillsammans kan ge stora vinster. Man kan även använda flexibiliteten i signalgenereringen i ett MIMO-system till att skapa probningssignaler som adaptivt styr signalenergin och samplingen till de delar av scenen där den viktiga informationen finns.

Compressive Sensing använder också modellbaserade tekniker vid rekonstruktion av signalen. Det medför att signalen inte återskapas i de delar av scenen där objekt saknas. Det medför att de sidolobsmönster som erhålls vid traditionell signalbehandling baserad på fouriertransformering undertrycks, vilket förbättrar bildkvaliteten avsevärt i scener med stor dynamik.

7. Slutsatser och förslag till fortsatt arbete

Möjligheten att använda känd kunskap om en scen för att kunna öka upplösningen för ett radarsystem har studerats genom simuleringar i denna rapport. Målet har alltid varit i sändarens blickfång och studerat scenario har varit en lång gata eller en korridor. En array-antenn vid X-band har använts som simulerad sändare. Resultaten visar att om scenens överföringsfunktion från sändare till mottagare noggrant kan skattas så kan förekommande flervägsutbredning nyttjas för att bestämma målets position noggrannare, eller för att öka systemets upplösning. Resultaten indikerar att ju känsligare scenens överföringsfunktion är för felskattning, desto högre upplösning kan uppnås vid en god skattning.

Ett scenario, där en metallisk människa befunnit sig i en 6 m bred gata med väggar bestående av olika material har simulerats med hjälp av beräkningsprogrammet SE-Workbench-RF för att pröva om superupplösning kan uppnås. Preliminära resultat visar att en något ökad upplösning kan uppnås om en mycket noggrann skattning av scenens geometri kan göras. Resultatet är dessutom polarisationsberoende och detta måste noggrannare studeras i fortsatta studier.

För ett generellt stridsfältsscenario bedöms, utifrån detta arbete, möjligheten till ökad upplösning för ett semi-monostatiskt radarsystem som små då chansen till *a priori*-bestämning av scenens överföringsfunktion bedöms som liten. För övervakningssystem eller vid medicinsk tillämpning där möjlighet finns att noggrant skatta överföringsfunktionen bedöms metoden ha mycket stor potential.

MIMO-radar behöver studeras mer ingående och då främst ur ett system och applikationsperspektiv. Den simuleringskapacitet som idag finns tillgänglig vid FOI i form av SE-Workbench-RF kan användas för att göra relevanta systemsimuleringar för såväl soldatburna MIMO-radarsystem för stridsstöd, som fordonsmonterade system för områdesövervakning i urban miljö med se-runt-hörn kapacitet. Frågor att belysa är förbättrad detektionsprestanda genom väggar och runt hörn, förbättrad dopplerestimering för objektklassificering, förbättrad inmättningsnoggrannhet och förbättrad förmåga att hantera många samtidiga mål. Det senare är självfallet av stor vikt i en urban miljö där scenen är komplex och fylld av objekt. Ett MIMO-systems förmåga till adaptiv signalformering ger möjligheter att hantera de svåra signalmiljöer som råder i en urban miljö. Detta bör särskilt utvärderas och värderas för användning i olika applikationer för urban radar.

Studie av *Compressive Sensing* bör genomföras. Det är då två frågeställningar som är av särskilt intresse. Datakomprimering för realisering av MIMO-radarsystem är en av dessa och den andra är de förbättrade bildegenskaper som erhålls genom den modellbaserade signalrekonstruktion som används.

8. Referenser

- [1] A. Sume, M. Gustafsson, M. Herberthson, A. Jänis, S. Nilsson, J. Rahm, and A. Örbom: "Radar Detection of Moving Targets Behind Corners", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 6, Part 2, pp. 2259-2267, June 2011.
- [2] A. Sume, M. Gustafsson, A. Jänis, S. Nilsson, J. Rahm, and A. Örbom: "Radar detection of moving objects around corners", presented at SPIE, *Radar Sensor Technology XIII*, Orlando, 2009.
- [3] M. Gustafsson, "Positioning of objects behind corners using X-band radar" in *URSI General Assembly*, Istanbul, 2011.
- [4] S. Nilsson, M. Gustafsson, M. Herberthson, T. Johansson, A. Nezirovic, J. Rahm, A. Sume, N. Wellander and A. Örbom: "Penetrerande radarsystem för urbana operationer - Slutrapport", Swedish Defence Research Agency, Linköping, FOI-R--3317--SE, 2011.
- [5] R. J. Sullivan: *Microwave Radar Imaging and Advanced Concepts*, Norwood MA: Artech House Inc, 2000.
- [6] G. Kristensson: *Spridningsteori med antenntillämpningar*, Lund: Studentlitteratur, 1999.
- [7] OKTAL Synthetic Environment, SE-Workbench: SE-RAY-RF [Software], Tillgänglig: <http://www.oktal-se.fr> [28 Sept. 2012].
- [8] M. Cetin, W. C. Karl, and D. A. Castanon: "Formulation of HRR Profiles by Non-Quadratic Optimization for Improved Feature Extraction", presented at SPIE, *Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery IX*, Orlando, 2002.
- [9] J. Li and P. Stoica, "Efficient mixed-spectrum estimation with applications to target feature extraction," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 44, no. 2, pp. 281–295, Feb. 1996.
- [10] A. M. Haimovich, R. S. Blum, and L. J. Cimini, "MIMO radar with widely separated antennas", *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 25, no. 1, pp. 116–129, Jan. 2008.
- [11] J. Capon, "High resolution frequency-wavenumber spectrum analysis", *Proc. IEEE*, vol. 57, no. 8, pp. 1408–1418, Aug. 1969.
- [12] P. Stoica and J. Li, "MIMO radar with colocated antennas", *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 24, no. 5, pp. 106–114, Sep. 2007.
- [13] J. Li, P. Stoica, L. Xu, and W. Roberts, "On Parameter Identifiability of MIMO Radar", *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 14, no. 12, pp. 968-971, Dec 2007.
- [14] C.-Y. Chen and P. P. Vaidyanathan, "Compressed Sensing in MIMO Radar", *42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 26-29 Oct, 2008.