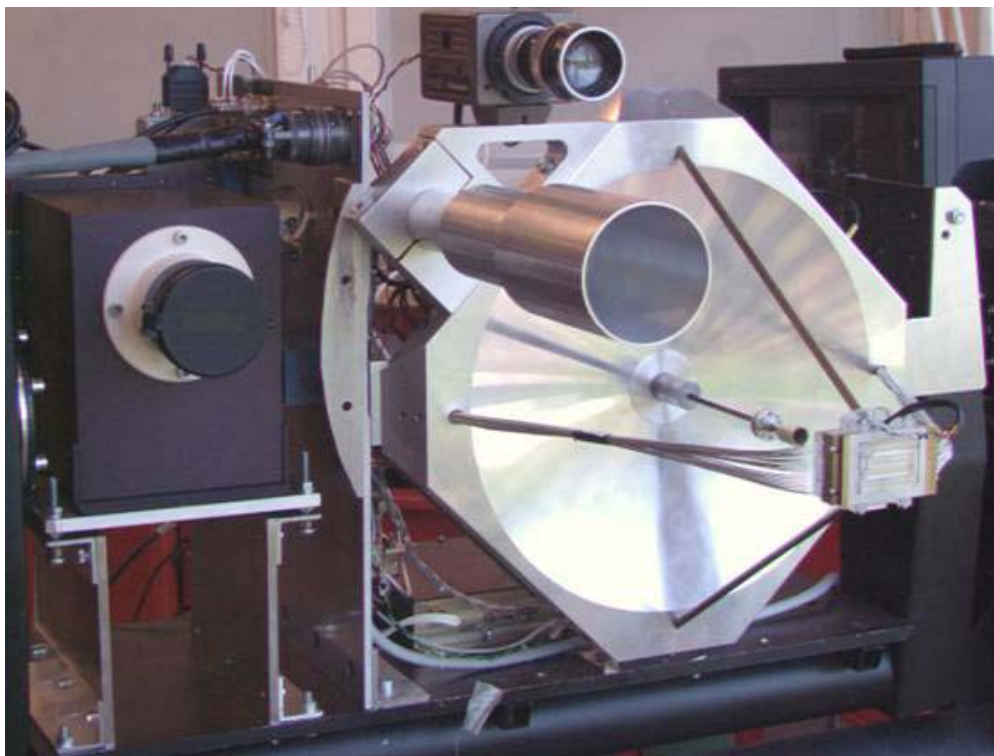


Leif Carlsson, Thord Andersson, Isabel Ferrer, Andreas Gustafsson, Lars-Gunnar Huss,
Mikael Karlsson, Andris Lauberts, Stig Leijon, Staffan Lindström, Sara Molin, Jonas Nygårds,
Fredrik Näsström, Lars Pettersson, Jan Svedin

Multisensormålsökare IR/mm, slutrapport



TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Sensorteknik

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R--1054--SE

November 2003

ISSN 1650-1942

Användarrapport

Leif Carlsson, Thord Andersson, Isabel Ferrer, Andreas Gustafsson, Lars-Gunnar Huss,
Mikael Karlsson, Andris Lauberts, Stig Leijon, Staffan Lindström, Sara Molin, Jonas Nygårds,
Fredrik Näsström, Lars Pettersson, Jan Svedin

Multisensormålsökare IR/mm, slutrapport

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1054--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning	
	Månad, år November 2003	Projektnummer E3003
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
Författare/redaktör Leif Carlsson Thord Andersson Isabel Ferrer Andreas Gustafsson Lars-Gunnar Huss Mikael Karlsson Andris Lauberts Stig Leijon Staffan Lindström Sara Molin Jonas Nygårds Fredrik Näsström Lars Pettersson Jan Svedin	Projektledare Leif Carlsson	
	Godkänd av Svante Ödman	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Leif Carlsson	
Rapportens titel Multisensormålsökare IR/mm, slutrapport		
Sammanfattning (högst 200 ord) Multisensorteknik och datafusion för målsökare har studerats på FOI (FOA) sedan 1993. Orsaken var det ökande internationella intresset för området och problemet med att då sekretessen inom målsökarområdet är mycket hög var och är det fortfarande svårt och i vissa fall omöjligt att få information om moderna internationella målsökare och deras funktion. Nuvarande projekt har pågått i 3 år och visar på möjligheter för en sådan målsökare som utnyttjar kombinationen stirrande IR- och stirrande mm-vågssensorer för markmålstillämpningar. Inom projektet har vi tagit fram ett mät- och signalbehandlingssystem bestående av de båda sensorerna placerade på en styrbar plattform och en signalbehandlingshård- och mjukvara. Systemet har använts både för datainsamling i realtid samt för verifiering och demonstration av målsökarfunktioner i nära realtid. I rapporten beskrivs möjligheterna för autonom upptäckt och klassificering med ingående sensorer. En traditionell målsökare följer ett mål med en sensor som är låst på målet. Trackern i vår målsökare följer många mål samtidigt, med information från flera olika oberoende sensorer, som dessutom inte behöver vara samlokaliserade. Detta koncept medger att på varje målspar måligenkänningsmetoder kan appliceras och flertalet enklare skenmål sällas bort. Avhakning med t.ex. facklor och remsor blir då betydligt svårare att åstadkomma, vilket i kombination med multipla sensorer för målinmätning ger ett mycket svårstört system.		
Nyckelord Multisensorteknik, målsökare, datafusion, IR, mm-våg, mätsystem, störning		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 35 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--1054--SE	Report type User report
	Programme Areas 5. Combat	
	Month year November 2003	Project no. E3003
	General Research Areas 5. Commissioned Research	
	Subcategories 51 Weapons and Protection	
Author/s (editor/s) Leif Carlsson Thord Andersson Isabel Ferrer Andreas Gustafsson Lars-Gunnar Huss Mikael Karlsson Andris Lauberts Stig Leijon Staffan Lindström Sara Molin Jonas Nygåards Fredrik Näsström Lars Pettersson Jan Svedin	Project manager Leif Carlsson	
	Approved by Svante Ödman	
	Sponsoring agency FM	
	Scientifically and technically responsible Leif Carlsson	
Report title (In translation) Multi Sensor Seeker IR/mm-wave, final report		
Abstract (not more than 200 words) At FOI (FOA) we have been studying multisensor technique and datafusion for missile seekers since 1993. The reason for starting this research was the increasing international interest in the area and the problem with the high secrecy. It was and is still very difficult and sometimes impossible to get any information on international seekers and their abilities. The current project has been going on for 3 years and shows the possibilities for a seeker that uses IR- and mm-wave sensors for ground target applications. We have developed and produced a measurement- and signal processing system consisting of the two sensors, a steerable platform and hard- and software for the signal processing. The system has been used for data collection in real-time and for validation and demonstration of seeker functions in near real-time. In the report the possibilities with autonomous detection and classification are described. A traditional missile seeker tracks one target with one sensor that is locked on the target. The tracker in our seeker tracks several targets at the same time with information from several independent sensors, which don't need to be co-located. This concept allows you to apply target identification methods on every track and most simple decoys can be detected this way. Deception with i.e. flares and chaff is then more difficult to achieve, which in combination with multisensors for target tracking gives you a system that is very hard to deceive.		
Keywords Multisensortechnique, missile seeker, datafusion, IR, mm-wave, measuring system, countermeasures		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 35 p.	
Price acc. to pricelist		

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. INLEDNING.....	6
1.1. Bakgrund	6
1.2. Målsättning.....	6
1.3. Tillämpning	7
1.4. Nyttan	7
2. UTVECKLING INOM OMRÅDET	7
2.1. Före 2001.....	7
2.2. Inom projektet (2001-2003)	9
3. SYSTEMBESKRIVNING	9
3.1. Mm-vågsradar	10
3.1.1. Översikt	10
3.1.2. Bakgrund	10
3.1.3. Det bildalstrande radarsystemet	11
3.1.4. IF-del	12
3.1.5. Front-end	12
3.1.6. Systemkänslighet.....	15
3.2. IR-kamera.....	16
3.3. Videokamera och framegrabber	17
3.4. Vridbord	18
3.5. Signalbehandlingsarkitektur	19
4. SYSTEMVÄRDERING.....	22
4.1. Detektion/klassificering	22
4.1.1. Kontrastfilter för IR.....	22
4.1.2. 3-D radar	24
4.2. Följning	25
4.2.1. Introduktion.....	25
4.2.2. Uppbyggnad	27
4.2.3. IR/mm-projektets målföljare	28
4.2.3.1 Designmål och utvecklingsarbete.....	29
4.2.3.2. Status och fortsatt utvecklingsarbete.....	31
4.3. Slutsats	32
4.3.1 Mät- och försökssystemet.....	32
4.3.2 Systemkoncept	33
5. FORTSÄTTNING	33
6. REFERENSER.....	34

1. INLEDNING

Projektet ”Målinmätning IR/mm, datafusion” har i nuvarande form pågått sedan 2001, men multisensormålsökarverksamheten på FOI (FOA) startade under 1993. Inriktningen har under hela tiden varit mot markmål på grund av våra tidigare erfarenheter av denna tillämpning och dess komplexa karaktär. Kan vi lösa dessa bakgrundsproblem och störproblematiken så klarar vi troligen alla andra tänkbara miljöer. Projektet och dess föregångare har huvudsakligen finansierats av FM men utvecklingen av mm-vågssensorn har inledningsvis finansierats av FMV.

1.1. Bakgrund

I projektet har vi valt att huvudsakligen studera sensorkombinationen IR och mm-våg på grund av möjligheten till hög upplösning och kombinationens komplementära karaktär. Detta ger då möjlighet till automatisk detektion, klassificering och följning av markmålen i både ostörd och störd miljö. Tidigare kända multisensorsystem mot markmål har bestått av konventionella radarsystem på mm-vågsområdet kombinerat med någon typ av IR-sensor, skannande eller stirrande.

På FOI har vi valt en stirrande IR-kamera, framtagen på FOI inom ett tidigare projekt, samt en unik stirrande aktiv mm-vågssensor (4x8 pixel), som har tagits fram inom detta projekt av FOI, ACREO och Chalmers i samverkan. Denna sensorkombination kommer att tillsammans med väl utformad sensornära datafusion ge multisensormålsökaren avsevärt förbättrade egenskaper och möjligheter jämfört med tidigare publicerade och kända multisensorsystem. Arbetet har gett möjlighet till internationell publicering och konferenspresentation samt internationellt utbyte.

1.2. Målsättning

Sensorvalet vi har gjort är baserat på tidigare kunskaper och erfarenheter för aktuella våglängdsområden inom FOI (FOA) både beträffande mål- och bakgrundssignaturer såväl som sensoregenskaper i sig. Att vald sensorkombination är bäst i alla markmålsfall är inte givet men den är användbar för värdering av multisensorteknik i målsökare mot i första hand mark- och ytmål.

Inom projektet har vi tagit fram ett mät- och signalbehandlingssystem bestående av IR- och mm-vågssensorer placerade på en styrbar plattform och en signalbehandlingshård- och mjukvara. Detta används dels för datainsamling i realtid samt för verifiering och demonstration av målsökarfunktioner i nära realtid. Avsikten med projektet är att möjliggöra värdering av multisensorteknik och sensornära datafusion, både inom projektet och i framtiden, för att förbättra egenskaper som upptäckt, klassificering och följning i både ostörd och störd miljö, både simuleringsmässigt och genom verifiering.

1.3. Tillämpning

För bekämpning av mark- och ytmål krävs högupplösande sensorer och troligen också multisensorteknik för att klara den svåra bakgrundsmiljön och det framtida störet. Tillämpningen kan då vara i målsökare mot *ett* mark/ytmål av kvalificerad typ eller för bekämpning av flera mål med subtridsdelar, eventuellt i UCAV. Målsökartekniken är användbar även för bekämpning av luftmål med målsökande robotar eller i siktes/eldledningssystem för bekämpning av små mål.

1.4. Nytt

Då sekretessen inom målsökarområdet är mycket hög internationellt, är det svårt och i vissa fall omöjligt att få information om moderna målsökare och deras funktion. Projektet medför en kompetenshöjning inom Sverige inom ett flertal internationellt intressanta områden som berör målsökartekniken och möjliggör ett internationellt informationsutbyte nu och framöver. Den erhållna kompetensen medför också att vi kan värdera denna eller andra sensor-kombinationer i framtida målsökare. Vi kan därför efter detta projekts genomförande på ett betydligt bättre sätt bedöma framtida svenska målsökarsystems prestanda liksom hur vi skyddar oss mot det framtida robohotet. Projektet (och dess föregångare) ligger också till grund för det samarbete med industrin (Saab Bofors Dynamics AB) som sker inom "Multisensormålsökar-demonstratorprojektet", samt som samarbetspartner till ett kommande FM projekt: "Störning av multisensorsystem". Då utvecklingen inom området är snabb (t.ex. sensorer, sensorsignal-behandling, datafusion och processorkraft) krävs fortsatt arbete inom området för att även fortsättningsvis ha aktuell kunskap om nya möjligheter och kommande systems prestanda. Nya möjligheter och krav ställs av t.ex. användning vid internationella operationer, strid i bebyggelse samt för integration i det nätverksbaserade försvaret.

2. UTVECKLING INOM OMRÅDET

2.1. Före 2001

Multisensormålsökarverksamheten inleddes under 1993 och var den första tillämpningen av sensornära datafusion med realtidskrav på dåvarande FOA. De första åren handlade mycket om att bygga upp kompetensen inom realtidsdatafusion och sensorkunskap ur datafusions-synpunkt. Den multisensorkombination som valdes att studeras var stirrande IR och stirrande mm-vågsskannare och tillämpningen var markmål. FOA hade under åren dessförinnan studerat markmål- och markbakgrunds-signaturer inom både IR och mm-våg, varför valet av denna kombination och markscenariot som tillämpning föll sig ganska naturligt. På mm-vågssidan fanns det då på FOA ett pågående forsknings/utvecklingsprojekt, finansierat av FMV, för framtagning av en stirrande aktiv mm-vågssensor. Vi valde att inleda ett samarbete med detta projekt och så småningom övertog vi hela mm-vågssensorutvecklingen.

Den stirrande mm-vågssensorn var långt ifrån färdigutvecklad [1], och för att starta upp signalbehandling/datafusionsarbetet behövde vi riktiga mätsignaler. Vi placerade därför en befintlig konventionell mm-vågsradar och en nyligen utvecklad stirrande IR-kamera [2] på en styrbar plattform [3], som togs fram inom detta projekt. Med denna utrustning, se Figur 1, kunde vi registrera närmandeförlopp med markfordon genom att låta dessa stanna med lämpliga intervall och skanna in mm-vågsdata (8x8 pixel) så som en stirrande sensor skulle ha sett målsenen. Dessutom registrerade vi IR-bilder vid samma tillfällen. Med detta förfarande fick vi då tidigt tillgång till multisensormätdata för närmandeförlopp, som har visat sig ovärderligt för utveckling av metoder och algoritmer för den sensornära datafusionen.

Mätningar har utförts på ett antal olika terrängbanor samt även mätningar genom artificiell vattendimma [4]. Ett senare exempel på mätningar som gjordes inom ramen för "Multimålsökarprojektet" tillsammans med Saab Bofors Dynamics AB finns i en rapport [5].

Inom signalbehandlingsområdet har vi utvecklat en hel del metoder för framförallt detektion och målföljning [6]. I detta ingår också som en väsentlig del arbete med särdragsextraktion och val av relevanta särdrag för olika tillämpningar. Exempel på metoder för automatisk målföljning finns i en rapport för IR [7]. I [8] beskrivs hur man med polarimetriska metoder kan förbättra förmågan till måligenkänning med en mm-vågsradar och i [9] finns en beskrivning av hur datafusion kan utnyttjas vid klassificering av markmål.

Vi hade nu kommit så lång i arbetet med utveckling av metoder och algoritmer för datafusion att det började bli dags att fundera på hur ett tänkbart multisensormålsökarsystem skulle kunna se ut. En första systemlösning togs fram under 1999 [10], och beskriver ett system bestående av en vapenbärande plattform (helikopter) med en mm-vågsradar för spaning/invisning och en attackrobot med IR/mm-vågs målsökare. Rapporten innehåller också ett systemspelkort. Detta uppdaterades året efter med störvärdering [11]. Arbetet inom datafusionsområdet hade kommit så pass långt att vi presenterade ett konferensbidrag [12] på konferensen "Eurofusion 99" (Stratford-upon-Avon, UK) som togs emot mycket väl. Under samma år hade vi en forskare stationerad hos dåvarande "DERA" i Malvern, UK under 3 månader för samarbete och informationsutbyte inom datafusionsområdet. Inom projektet har både X-jobb och doktorsarbeten utförts inom datafusionsområdet.

Efter denna första systemvärdering gjorde vi en förstudie på för- och nackdelar med multisensormålsökare med valfri kombination av IR, laser eller mm-vågsradar [13], eftersom vi inte ville låsa arbetet till enbart IR och mm-vågsradar. Under åren har vi hela tiden utvecklat hårdvaran till mätsystemet, både mm-vågssensor, utläsning av mm-vågssensorn, datainsamling IR/mm-våg, styrning av plattform och uppbyggnad av signalbehandlings-hårdvara (dator kluster, baserat på PC-datorer med realtidsoperativsystemet QNX RTP). Exempel på detta finns i rapporten [14].



Figur 1. Mätsystem med styrbar plattform, skannande mm-vågsradar, IR-kamera och videokamera.

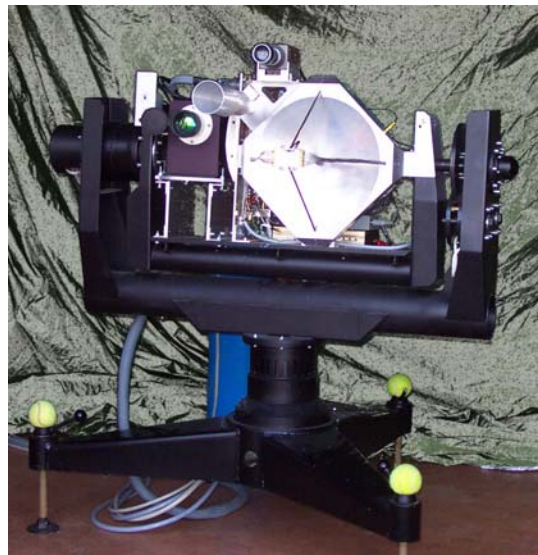
2.2. Inom projektet (2001-2003)

Inom projektet har arbetet koncentrerats mot ett "demonstratorsystem" för demonstration av målsökarfunktioner i (nära) realtid och systemvärdering. Mm-vågssensorn har hela tiden utvecklats och arbetet ledde fram till en första användbar array under 2001. Mm-vågs sensorn har även presenterats vid ett flertal internationella konferenser. Plattformen har försetts med ett nytt styrkort för att möjliggöra återkopplad styrning (målföljning). Detta arbete inklusive realtidsprogramvara för styrning samt implementering av en följealgoritm utfördes som ett X-jobb [16]. Signalbehandlingshårdvaran har tagits fram och driftsatts. Under alla år har programvara, programarkitektur och datafusionsmetoder utvecklats och testats. Det stora arbetet har under senare tid varit att göra om hela programarkitekturen så att den blir moduluppbyggd samt att implementera den i C++ under realtidsoperativsystemet QNX RTP. Hela systemet demonstrerades under hösten 2003 för våra kunder. Systemspecifikationen finns beskriven i [15]. Demonstratorsystemet har inom projektet använts för datainsamling, verifiering och demonstration, men vi har också möjliggjort en fortsättning efter detta projekt med förberedelser för ombyggnad till ett koherent demonstratorsystem. Ett sådant skulle ge utökade/förbättrade möjligheter till detektion, klassificering och följning, se [17-24].

3. SYSTEMBESKRIVNING

Här följer en beskrivning av det mät- och försökssystem som tagits fram i projektet IR/mm. Försökssystemet består av flera delar, allt från sensorer till målföljningsalgoritmer med multisensordatafusion. De aktuella sensorerna är stirrande millimetervågsradar, IR-kamera och video, alla monterade på en styrbar plattform, se Figur 2. I detta dokument kommer de ingående delsystemen endast beskrivas kortfattat. Mer detaljerad beskrivning av de olika delsystemen finns redan eller kommer att redovisas i separata dokument.

Därefter följer en översiktlig beskrivning av designen hos den mjukvara som behövs för datainsamling och styrning av hårdvara på systemnivå. Kapitlet avslutas med en beskrivning av multisensormålföljningssystemet som har tagits fram inom projektet.



Figur 2. Mät-/demosystem med styrbar återkopplad plattform, stirrande mm-vågsradar, IR-kamera och videokamera.

3.1. Mm-vågsradar

I detta avsnitt ges en sammanfattande beskrivning av den mm-vågs mätadar som använts/färdigställts i projektet under åren 2001-2003. En kort redovisning ges även av övrigt arbete som gjorts på mm-vågsområdet.

3.1.1. Översikt

En 94 GHz bildalstrande (4x8 pixel) pulsradar har utvecklats för multisensormålsökarstudier. Systemet utnyttjar fokalplansarraychip tillverkade i samarbete med Acreo AB och Chalmers. Dessa chip utnyttjar en ny typ av kvasi-optiskt pumpad aktiv gate-blandare i MMIC-utförande. Blandarna är direkt associerade med dubbelpolariserade patchantennor för direkt mottagning av både RF och LO. Genom att antennen används som diplexer minimeras förlusterna samtidigt som detta blandarkoncept har ett mycket lågt LO-behov.

Antennkretsarna från Acreo är byggda i multilagerteknik med dielektrikum av typ BCB på en Si-bärare (wafer). Detta byggsätt har utvecklats speciellt för mm-vågstillämpningar.

Som reflektor används en 30 cm parabol som frontmatas från fokalplansarrayen. Denna belyses kvasi-optiskt med LO-effekt från ett skalärt horn placerat i mitten av parabolen. IF-signalerna leds via koaxialkablar till IF-elektronik placerad på baksidan av parabolen. IF-steget omfattar förstärkare, dioddetektorer med filternätverk, videoförstärkare samt multiplexrar.

Sändardelen består av ett flertal steg som i det sista steget lämnar 50 ns pulser med 10 W topp effekt. Pulserna belyser hela synfältet på ca 2,5° x 5° utnyttjande ett cirkulärt 30 dB horn. Hela radarsystemet är monterat på en rörlig plattform som kan vridas i elevation och azimut. På plattformen finns även en IR-kamera, med samma synfält som radarn, samt en videokamera. Radarns känslighet bedöms som tillräcklig för de mätändamål som den skall användas för. Systemet skall i ett senare projekt modifieras för koherent detektion. Studier beträffande möjligheten att göra detta har visat lovande resultat [24].

Ett antal nya antennkretsdesigner har tagits fram som har potential att öka känsligheten i front-end delen för t ex ett framtida flygburet system.

3.1.2. Bakgrund

Det system som använts är ett bildalstrande 94 GHz pulsradersystem omfattande 4x8 parallella kanaler [25]. Jämfört med det system som utvecklades före år 2001, som hade 4x4 kanaler och vars front-end var baserad på resistiva blandare (InP HEMT från Chalmers), har nuvarande system modifierats med en front-end omfattande 4x8 kanaler baserad på en ny typ av aktiva gate-blandare med högre känslighet (GaAs MMIC designad av Chalmers och tillverkad av OMMIC). De nya blandarna har utöver den högre känsligheten även ett lägre

behov av lokalscillatoreffekt (LO), vilket varit avgörande för möjligheten att fördubbla antalet kanaler.

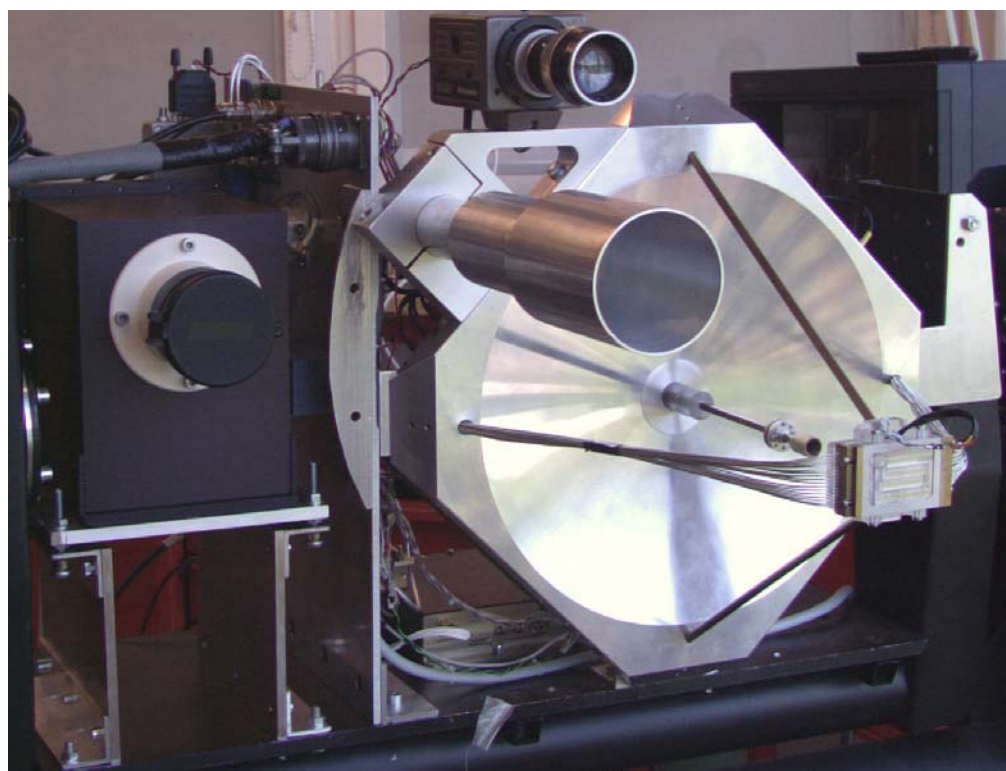
Utöver den nya front-enden (nya blandare och matarantenn) har det nuvarande systemet utrustats med modifierad mellanfrekvenshårdvara (IF).

3.1.3. Det bildalstrande radarsystemet

Som nämnts ovan omfattar systemet 4x8 pixlar (sensorer). Dessa är arrangerade i en rektangulär array med en kvadratisk enhetscell och placerade i fokalplanet framför en parabolisk reflektor på sådant sätt att man får 4 pixlars upplösning i elevation och 8 pixlar i azimuth. Härigenom erhålls ett synfält på omkring 2,5° i elevation och 5° i azimuth.

Reflektorsystemet utnyttjar samma frontmatade paraboliska reflektor som användes för det tidigare 4x4 systemet. Det är en 30 cm reflektor med F/D –tal på 5/6, vilket tidigare befunnits optimalt för våra behov [26]. Lobbredden är ca 0,7° och uppmätt gain är omkring 42-43 dB beroende på avstånd från optiska axeln (scan loss).

Totalt ingår fyra typer av antenner, se Figur 3; den stora paraboliska reflektorn (94 GHz), ett cirkulärt horn för sändarsignalen (94 GHz), ett skalärt horn för kvasi-optisk distribution av LO-signalen (92,4 GHz) och de 32 patchantennerna i fokalplans-arrayen (92,4 GHz och 94 GHz).



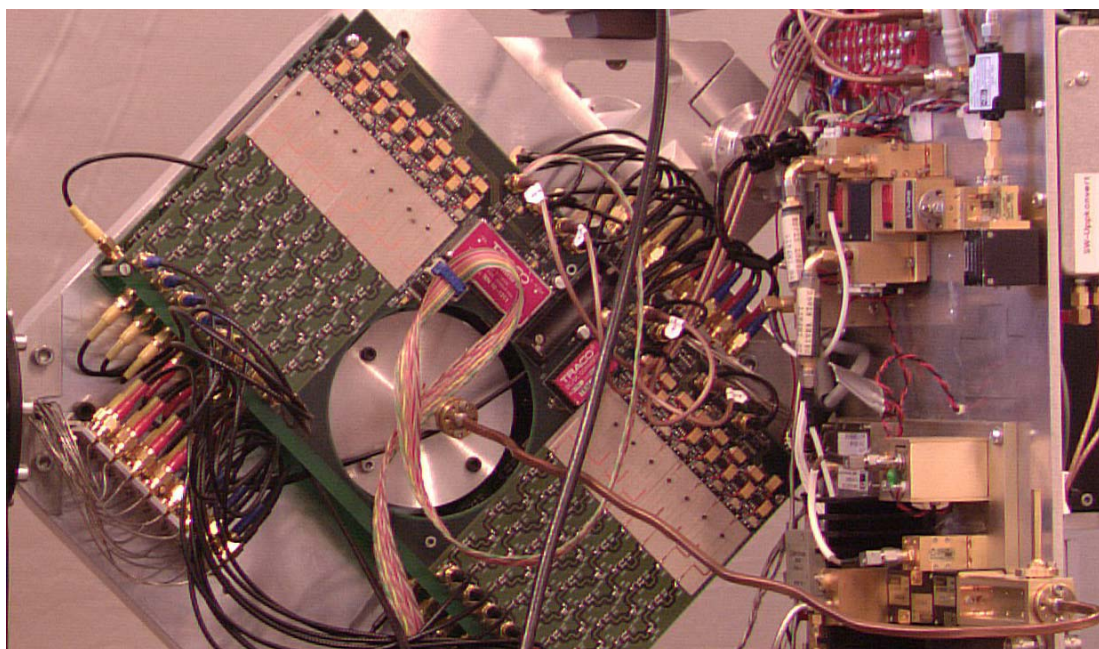
Figur 3. Foto på antenssystemet där den paraboliska reflektorn, sändarantennen (upptill i mitten), LO-antennen (nära mottagarfixturen) är synliga. Längst till vänster syns IR-kameran och längst upp en videokamera.

Radarn sänder 50 ns långa pulser med en topp effekt på ca +40 dBm (10 W) och en justerbar PRF (max 50 kHz) via det cirkulära hornet synligt uppe till vänster i Figur 3. Detta horn har en ungefärlig beräknad 3 dB lobbredd och antennvinst (gain) på respektive 5° och 30 dB.

Mm-vågsradarn och IR-kameran samt en videokamera är monterade på den rörliga plattformen som kan styras i azimut och elevation.

3.1.4. IF-del

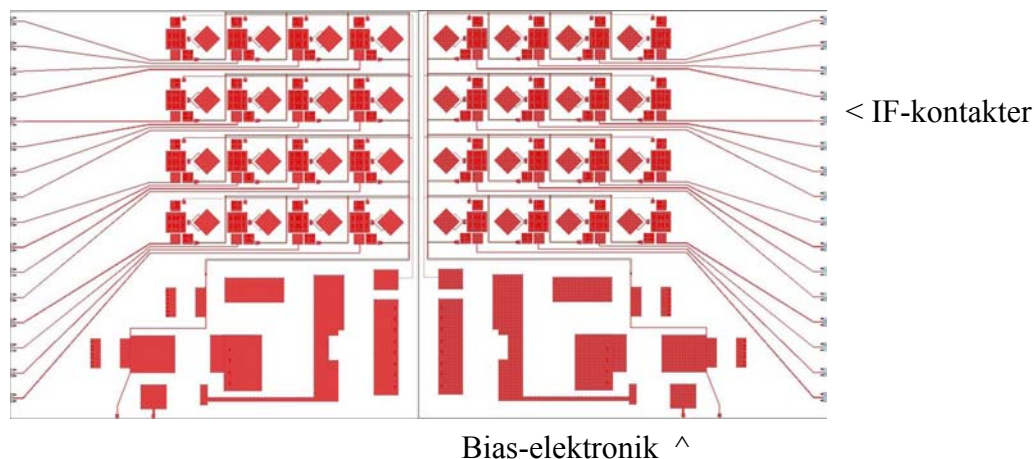
IF-steget omfattar förstärkare, dioddetektorer med anpassningsnät, videoförstärkare samt multiplexrar 4:1. Ett foto som visar hur IF-korten är monterade på baksidan av reflektorn ges i Figur 4. I figuren ser man även hur en vågledare används för att överföra signalen från LO-källan (längst ner till höger) till LO-antennen.



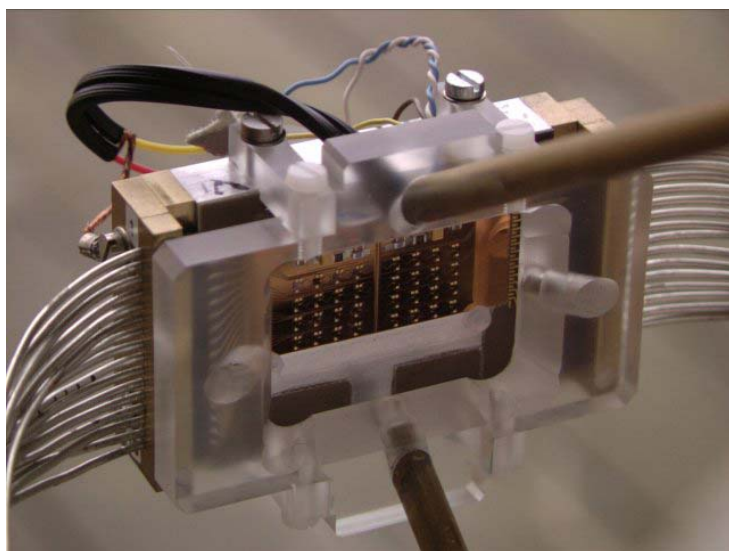
Figur 4. Foto som visar IF-korten monterade på baksidan av parabolen.

3.1.5. Front-end

Det nu använda 4x8 systemet är sammansatt av två fokalplansarraychip, vardera omfattande 4x4 pixlar och vardera med en yta på 20 mm x 20 mm. Chipfixturen är 40 mm x 50 mm. CAD-layouten för hela arrayen visas i Figur 5 och ett foto av chipfixturen ges i Figur 6, där de semirigida koaxialkablarna för IF-kanalerna också är synliga.



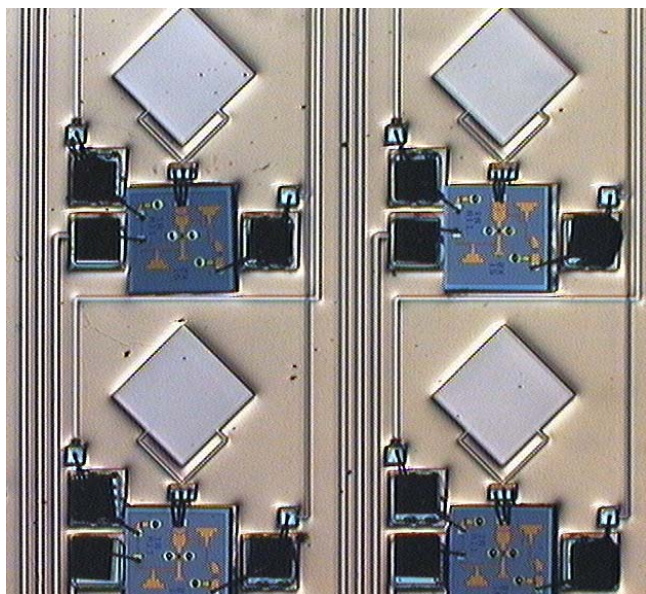
Figur 5. Visar CAD-layouten för fokalplansarraychipen i 4x8 systemet.



Figur 6. Foto visande chipfixturen (50 mm x 40 mm) och de semirigida koaxialkablarna som överför IF-signalerna till baksidan av parabolen.

Som matarelement används rektangulära mikrostripmatade patchantenn med dimensionen $960 \mu\text{m} \times 942 \mu\text{m}$ med två matningspunkter för mottagning av RF och LO i ortogonala polarisationer. LO-signalen sänds kvasi-optiskt till samtliga kanaler samtidigt från en skalär hornantenn positionerad ca 8 cm från sensorarrayen. Gate- och drainbiasspänningarna matas till ett kollektivt filter- och skyddsnätverk på vardera 4x4 chip och distribueras sedan via DC ledningar i de två översta metallagren i BCB-kretsen. En närbild av en del av sensorarrayen ges i Figur 7.

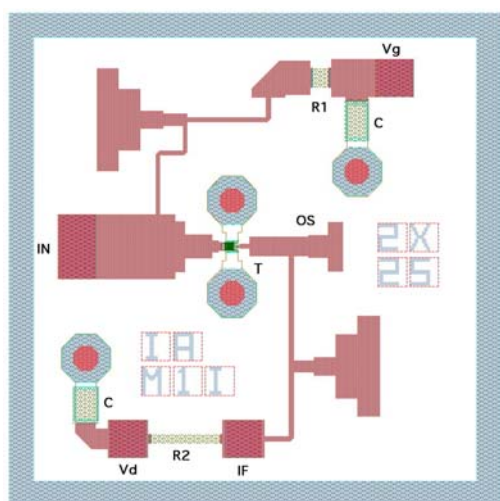
Externa avkopplingkondensatorer används tillsammans med mindre kondensatorer on-chip. IF-kanalerna matas via externa kopplingskondensatorer och sedan via övergångar från mikrostrip till CPW paddar vid kanten av vardera 4x4 chip. Sedan kopplas IF-signalerna vidare med bondtrådar till ett externt kretskort (FR-4) från vilket egenutvecklade övergångar till koaxialkabel används.



Figur 7. Foto som visar del av sensorarrayen där de enskilda sensorelementen syns med dubbelpolariserade patchantennor och aktiv gateblandare i MMIC-utförande med dimension 1 mm x 1 mm.

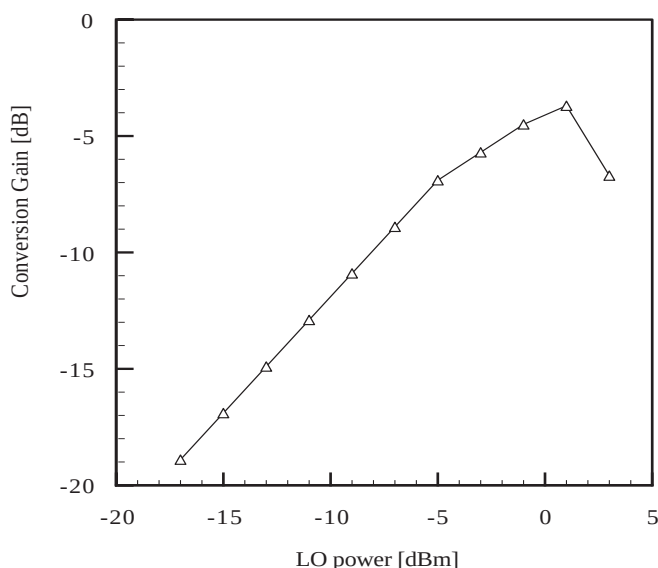
Varje sensor utnyttjar en monolitisk $2 \times 25 \mu\text{m}$ aktiv gateblandare med dimensionen 1 mm x 1 mm, beskriven i mer detalj i [27], se Figur 8. RF- och LO-signalerna extraheras från närliggande sidor av patchantennen och kombineras vid blandarens gate-ingång. Antennen är anpassad till blandarens gate-ingång med hänsyn taget till parasiterna hos bl.a. bondtrådarna. Tre bondtrådar används för att minimera induktansen i bondövergången.

Blandaren har karakteriserats separat och befunnits ge en minsta konversionsförlust på ca 3,7 dB i ett 50Ω system, med en LO-effekt på omkring 0 dBm. Konversionsförlusten plottas i Figur 9. Den konversionsförlust som skulle kunna uppnås vid perfekt anpassning är ca 0 dB, vilket måste anses som mycket bra om man kommer ihåg att den använda MMIC-processen, D01PH, har ett f_T på mindre än 100 GHz.



Figur 8. Layouten för den aktiva gate-blandaren.

På grund av viss missanpassning mellan antennen och blandaren uppstår en förlust på mellan 2 och 3 dB i detta snitt. Detta möjliggör en förbättring av känsligheten i en förbättrad version av sensorn (se nedan).



Figur 9. Uppmätt konversionsförlust för blandaren i 50 Ω system (ej anpassat).

3.1.6. Systemkänslighet

Känsligheten hos systemet har bestämts på två sätt; Som första metod har konversionsförlusten uppmätts med en extern CW-källa i snittet före IF-steget. Sedan har känsligheten uppmätts i radarmod användande kända referensmål. På detta sätt har även en uppskattning av IF-stegets lämplighet erhållits.

Konversionsförlustmätningarna utfördes på FOIs radartaklab. En 94 GHz +18 dBm RF-källa sände en cw-signal genom ett 25 dB rektangulärt vågledarhorn placerat på ett avstånd av $R = 60$ m från mottagaren. En LO-källa med uteffekt +18 dBm illuminerade fokalplansarray-chipen genom ett skalärt horn. Förspänningarna valdes för optimalt SNR.

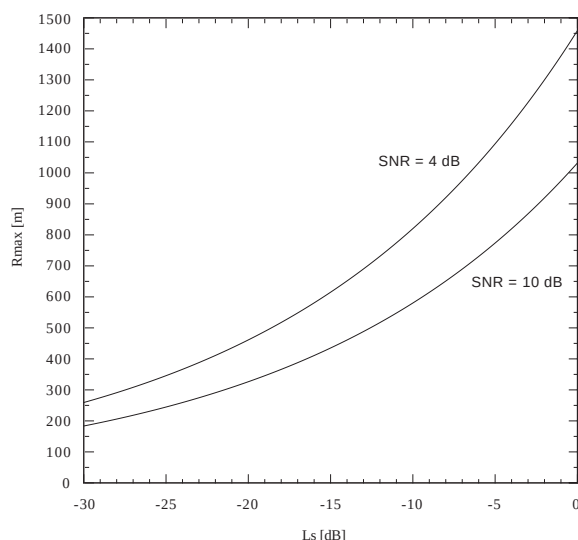
Konversionsförlusten för de 32 kanalerna uppmättes i medel till 13,2 dB. Detta är 10,2 dB sämre jämfört med resultat från tidigare mätningar [28]. Den viktigaste förklaringen till detta är att det sista LO-steget inte längre används pga. en förhöjd brusnivå varför LO-effekten reducerats signifikant. Högsta uppmätta sidlobsnivå var -11 dB.

Huruvida det nuvarande systemet förmår uppfylla specifikationen för känslighet (1 m^2 radarmålyta på 500 m enkelpuls) undersöktes enligt följande: RF-effekten reducerades med en dämpare till en nivå som vid mottagaren motsvarar den effekt som reflekteras från ett 1 m^2 mål på 500 m avstånd om man använder en 10 W sändare och en sändarantenn med 30 dB

antennvinst. En IF-förstärkare ($G=23$ dB, $NF = 4$ dB) placerades sedan före ingången på spektrumanalysatorn (HP8563E, $NF = 25$ dB vid 1,6 GHz och 1 MHz mätbandbredd). SNR mättes för fyra kanaler, två på varje 4x4 chip, slumpvis valt. Resultatet visar på ett SNR mellan ca 2 och 6 dB. I medel var SNR omkring 3,6 dB för denna mätning. Denna känslighet är tillräcklig för projektets behov. Det är dock i alla fall önskvärt att det sista LO-steget repareras/ersätts för att erhålla en bättre marginal vid mätningar.

Mätningar i radarmod på omkring 450 m med olika radarmål har gett som resultat en känslighet som är ca 5 dB sämre än vad som ges av cw-mätningarna. Genom att använda ett snabbt digitalt oscilloskop för sampling av IF-signalen samt m h a Matlab™ har en omkring 5 dB högre känslighet uppnåtts jämfört med data från det befintliga systemet. En reviderad version av IF-hårdvaran har därför tagits fram [24].

Genom att använda plottarna i Figur 10, som visar max mätavstånd för vår radar som funktion av systembrusfaktorn, för olika SNR, kan vi uppskatta systemets brusfaktor till omkring 15 dB. Ett väsentligt bidrag till detta tros vara den IMPATT-baserade LO-källan.



Figur 10. Maximalt mätavstånd som funktion av systembrusfaktor vid olika krav på SNR. Det nya systemet har ett största mätavstånd på omkring 500 m jämfört med det gamla systemet (före 2001) som hade ett största mätavstånd på mellan 200 och 300 m.

Under projektet har även ett antal nya front-end designers designats och lämnats in för tillverkning (Acreo AB). Dessa kommer att redovisas senare i mer detalj i en separat rapport.

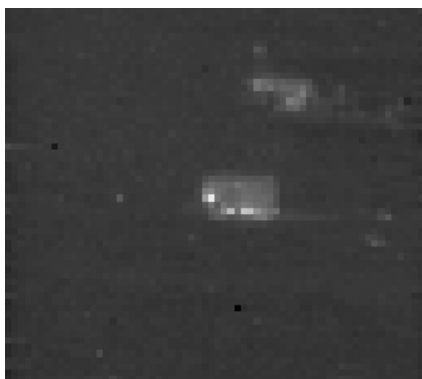
3.2. IR-kamera

IR-kameran som används i projektet är en egentillverkad kamera som använder en MCT sensor (Mercury Cadmium Telluride, HgCdTe) med 64x64 element, se Figur 12. Den levererar i denna tillämpning bilder med 25 Hz, vilket ger en dataakt på 100 KB/s. MCT-sensorn måste kylas med flytande kväve till en temperatur på ca 77 K för att fungera. Vid

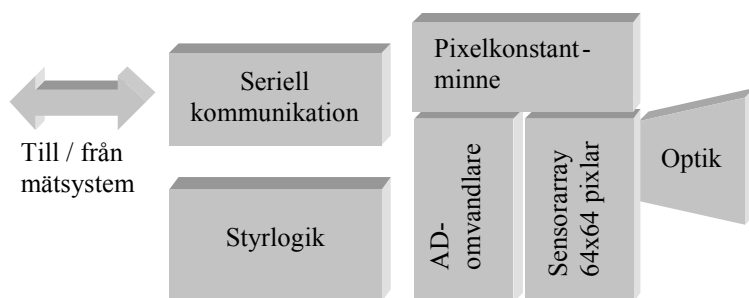
uppstarten av kameran måste de enskilda sensorelementen också kalibreras noggrant för att en bra bild ska erhållas, se Figur 11.

Kalibreringen görs med hjälp av två tempererade referensplattor som hålls framför optiken på kameran. Den ena plattan anger den undre referenspunkten och den andra den övre referenspunkten. Kalibreringen startar med att den kalla plattan hålls upp. Kameran tabellerar då offsetspänningar till AD-omvandlaren för varje pixel så att arbetspunkten hamnar rätt (en särskild knapp på kameran hålls intryckt under detta förlopp). Den nedre referensspänningen justeras sedan in (knappen släppt), varefter den varma plattan används för att kalibrera den övre referensspänningen.

I kamerahuset sitter således minne och annan elektronik för tvåpunktskorrektionen av pixlarna, se Figur 13. Dåliga pixlar kan identifieras och lagras i ett särskilt minne. Dessa kan sedan maskas bort om så önskas, varvid föregående pixels värde kopieras och används i stället för det dåliga. En detaljerad beskrivning av kamerans uppbyggnad finns i [2].



Figur 11. IR-Bild tagen med den aktuella IR-kameran. I mitten av bilden syns ett fordon som använts vid försök.



Figur 13. Kameran innehåller elektronik och minne för att hantera kalibrering och utläsningen av data från sensorarrayen.



Figur 12. IR-kameran med tillhörande gasflaska.

3.3. Videokamera och framegrabber

Kameran som sitter monterad på försöksplattformen är en Panasonic WV-BL200, se Figur 14. Det är en svartvit CCD-kamera med en halvtums CCD-sensor, som levererar komposit-video. I nuläget används den mest för inriktning av vridbordet och för dokumentation av de genomförda mätningarna.

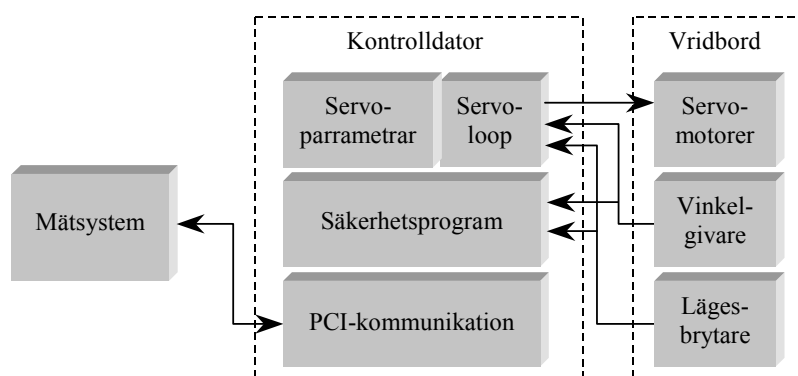
CCD-kameran ansluts till en framegrabber från Imagenation. Denna framegrabber har beteckningen PXC200 och består huvudsakligen av ett PCI-kort och programvara för PC-datorer. Det som är lite speciellt med denna produkt är stödet för QNX 4, vilket var det aktuella operativsystemet när den införskaffades. För övrigt har PXC200 ganska standardmässiga funktioner för inläsning av videosekvenser. Den kan hantera färgkonverteringar, inläsning i olika upplösningar och utklipp av en del av bilden. Detta möjliggör skalbarhet i den datamängd som levereras från framegrabbern, vilket är nödvändigt för att klara av att spara ner bilddata till disk i mätsystemet.



Figur 14. Videokamera Panasonic WV-BL200.

3.4. Vridbord

Sensorerna är monterade på ett vridbord [3] som tillverkats tidigare i projektet, se Figur 16. Vridbordet är utrustat med två servomotorer, servoförstärkare, vinkelgivare, lägesbrytare och ett PCI-kontrollkort för styrning via PC. Vridbordet kan vridas $\pm 60^\circ$ i sidled och -20° till $+60^\circ$ i höjdlid.



Figur 15. Principskiss över de olika komponenterna som tillhör vridbordet och dess styrenhet.



Figur 16. Vridbordet med den gamla radarutrustningen monterad. Kontrollerdatorn syns ej på bilden.

Styrning av vridbordet sker genom direkt kommunikation med kontrollkortet på PC. Möjliga parametrar som kan ställas är bland annat: hastighet, acceleration och position. Samtliga värden kan även läsas av från kontrollkortet. Lägesbrytarna anger dels ändlägena för vridningen i sidled och höjdlid, men även mittlägesbrytare finns för kalibrering av mittläget för båda vridaxlarna. Dessutom sitter det en säkerhetsbrytare som slår ifrån strömmen till motorerna om vridbordet vrids utanför ändlägesbrytarna, som en sista säkerhetsåtgärd. När strömmen till motorerna bryts, kan vridbordet rotera fritt. Beroende på var tyngdpunkten

ligger hos den sensoruppsättning som sitter monterad, skulle vridbordet kunna slå runt och sensorerna skadas. För att förhindra detta, finns det en mekanisk relästyrd broms, som låser vridbordet i höjdlid då strömmen bryts. I sidled förblir dock vridbordet rörligt.

Kontrollkortet har en inbyggd processor samt några små program för enklare och säkrare styrning av vridbordet. Förutom de mekaniska säkerhetsbrytarna, är kontrollkortet inställd på att bryta strömmen till motorerna, om någon vridaxel överstiger eller understiger de gradantal nämnda tidigare för respektive axel. Kontrollkortet har även andra säkerhetsinställningar som kontrollerar olika styrparametrar som användaren begär, för att inte skada vridbordet (till exempel för hög hastighet eller felaktig position).

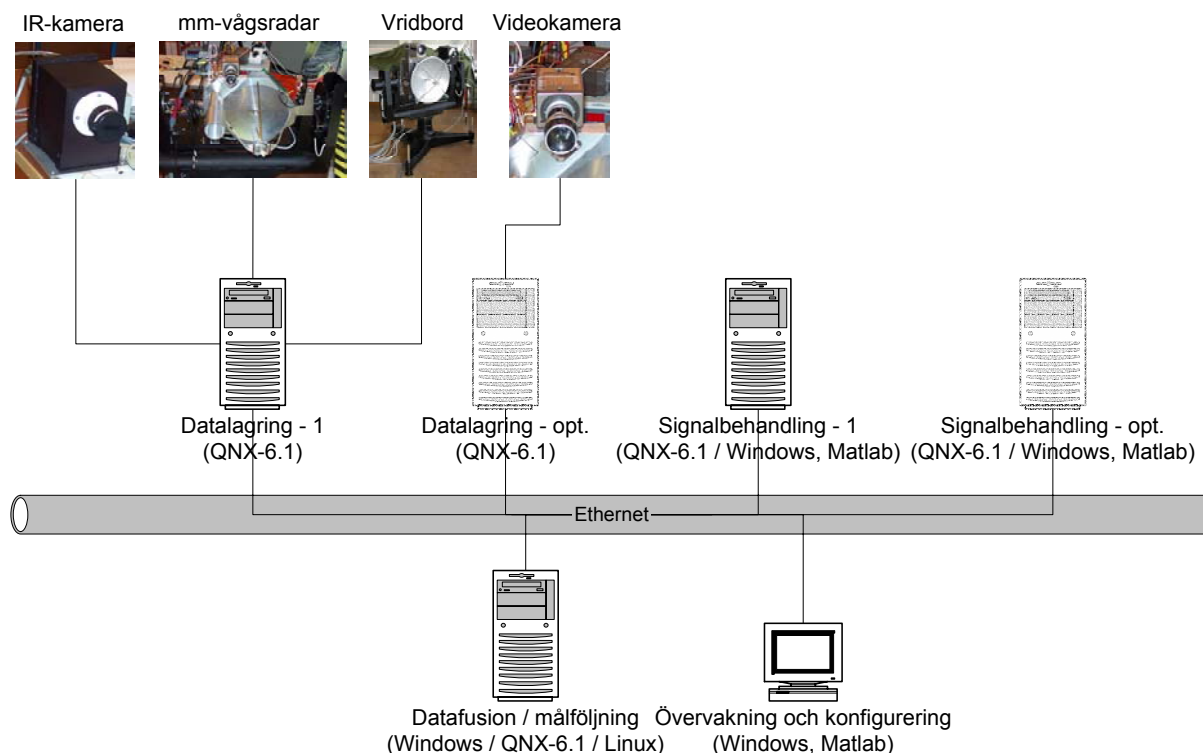
Kommunikationen mellan kontrollkortet och vridbordet sker med hjälp av en programmodul som är en del av datainsamlingssystemet. Programmodulen är synkroniserad med det övriga mätsystemet och används för styrning av vridbordet samt lagring av positioner under insamling, se Figur 15. Programmodulen har två viktiga lägen: insamling och konfiguration. Under konfiguration kan de flesta parametrar ställas och vridbordet kan konfigureras. Under körning finns endast ett fåtal parametrar tillgängliga. Detta för att förhindra fel i styrningen, samt garantera synkronisering med det övriga mätsystemet under hela insamlingstiden.

Vid fel, behöver endast återställningsknappen till kontrollkortet tryckas in. Då återställs samtliga parametrar på kontrollkortet till de förinställda värdena, och motorerna stängs av (om de inte redan var avstängda). Kontrollkortet är nu klart att användas på nytt.

För mer detaljerad information om vridbordet, se [16].

3.5. Signalbehandlingsarkitektur

Signalbehandlingen är av prestandaskäl utlagd på en dedicerad dator. Datainsamling, loggning och distribuering av sensordata är på grund av begränsningar i den nuvarande hårdvaran och operativsystemet, mycket CPU intensivt. Det är således inte lämpligt att försöka hantera signalbehandlingen på datainsamlingsdatorn. Då hela systemet är uppbyggt av kommunicerande processer är det relativt enkelt att flytta funktioner mellan olika datorer beroende på aktuell systemkonfiguration. Nuvarande konfigurerings vid mätning visas i Figur 17. Videokameran är i dagsläget inte med i det egentliga systemet utan kopplas till en TV-monitor för övervakning och insyn av systemet. Videokameran kan dock anslutas till en framegrabber i mät datorn, men på grund av den stora datamängd som videokameran genererar är det nu inte möjligt att använda den tillsammans med de övriga sensorerna. Man kan dock ansluta videokameran till en separat dator och integrera denna i systemet om så önskas, vilket indikeras i Figur 17.

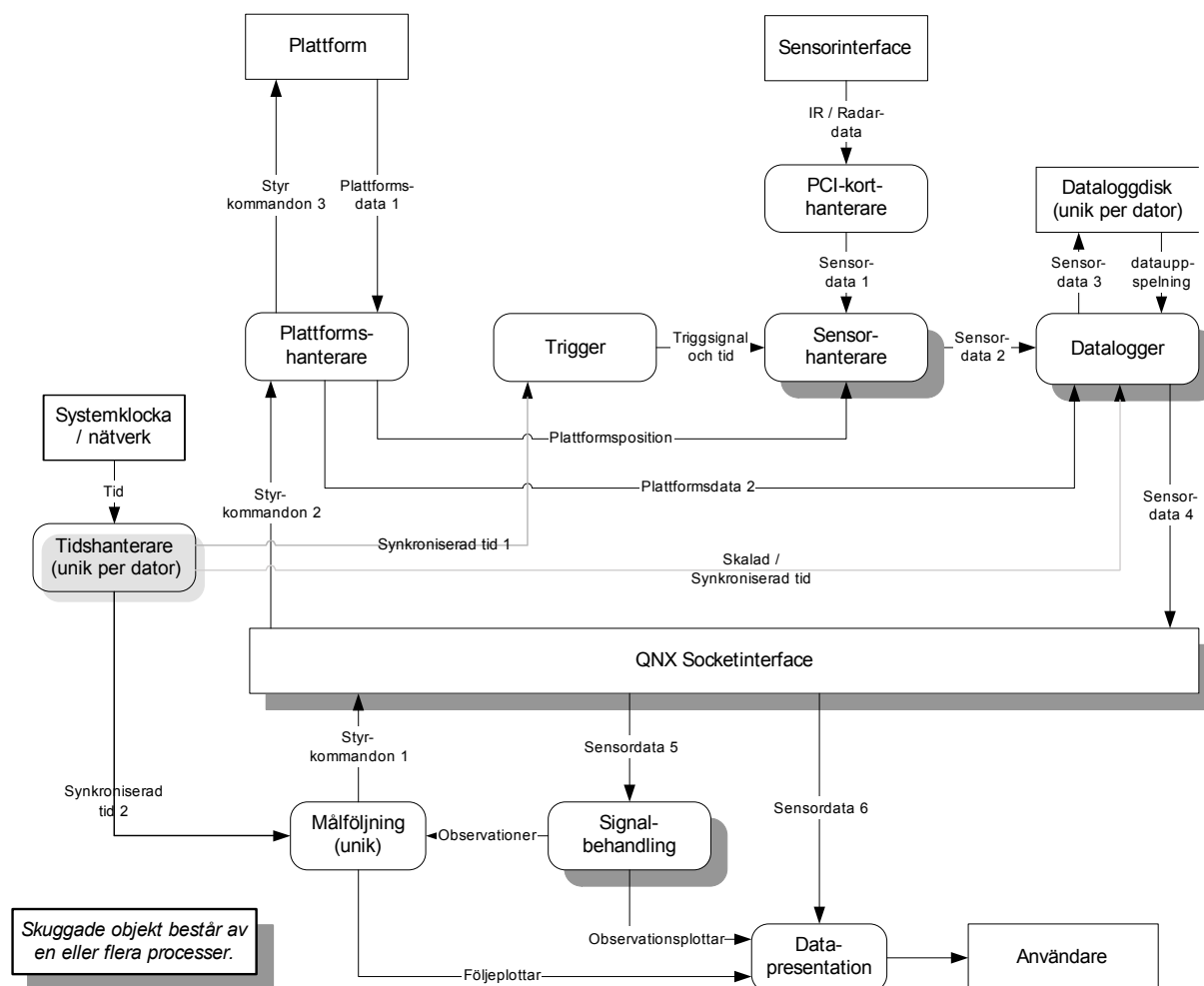


Figur 17. IR/mm systemet är distribuerat över flera datorer. Arkitekturen är flexibel vilket gör det möjligt att utöka antalet datorer om så önskas. Detta är indikerat i figuren med de halvtransparenta objekten som även är markerade med option (opt.).

Signalbehandlingen för de olika sensorerna kan antingen samlas på en dator eller spridas ut på flera vid behov. I nuläget ligger all signalbehandling samlad på en dator och sensordata skickas till signalbehandlingsprocesserna via nätverket. Denna uppdelning fungerar så länge datamängderna från sensorerna inte blir för stora. Då mängden data överskrider en viss gräns, är det bättre att distribuera datainsamlingen på flera datorer och låta signalbehandlingen ske på den dator där respektive data insamlas.

Figur 18 visar dataflödet vid mätning eller uppspelning av loggat data. Vid mätning loggas all data till disk av dataloggprocesser, en per sensor (inkl plattformen). Data distribueras också vid förfrågan till andra klienter, t.ex. övervakningsinterface och signalbehandling.

Möjlighet finns också att spela upp data i efterhand, för att kunna analysera en mätning eller för experimenterande av alternativa algoritmer "off-line". Vid uppspelning används inte processerna före dataloggprocessen, utan data hämtas direkt från disk. Tidssynkroniseringsprocessen används då för att "tidsstämpla om" data till aktuell tid. Man kan i "off-line"-mode justera tidsskalan, dvs. köra ett scenario i "slow-motion" om så önskas.



Figur 18. Figuren visar en förenklad bild av det totala mät- och signalbehandlingssystemet. Den övre delen visar sensordataflödet i datalagringssystemet med tidshanteringen indikerad som transparenta objekt. Signalbehandlingsprocesserna återfinns i mitten nertill.

Signalbehandlingen utförs i den takt som efterfrågas av målföljningsalgoritmen, eller så snabbt systemet klarar av. Sensordata efterfrågas av signalbehandlingsprocessen i den resulterande takten, vilket innebär att dataloggningen sker oberoende av senare delar i systemet och kan ske i full data takt och inte begränsas av kapaciteten hos signalbehandlingen och målföljningen.

Resultatet av signalbehandlingen är en uppsättning observationer per sensor och datapaket. Dessa skickas till målföljningen via nätverket för vidare processning och fusionering, se Figur 17. Målföljningen presenteras utförligare i avsnitt 4.2. Observationerna kan även efterfrågas av användargränssnittet för presentation för användare.

Utdata från målföljningen är en uppsättning målspar. Genom att välja ett av dessa kan systemet sedan följa det aktuella målet då styrningen av plattformen är återkopplad. Valet av målspar som man vill följa görs idag manuellt.

4. SYSTEMVÄRDERING

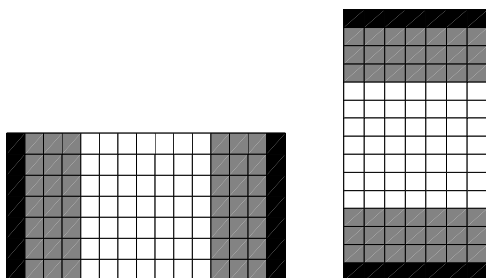
I detta avsnitt visas på möjligheter och prestanda med nuvarande systemkonfiguration vad avser detektion och följning, samt vilka möjligheter/förbättringar som kan förväntas med nästa generation av stirrande mm-vågradar (både koherent och med bättre känslighet). Prestandabedömning utgår från en snarlik konfiguration och målscenario som i systemlösningen i [10], dvs roboten skjuts från flygande plattform med egen spanings/invisningskapacitet. Prestanda bedöms utifrån simuleringar och verifieras mot registreringar med de aktuella sensorerna.

4.1. Detektion/klassificering

Autonom upptäckt, identifiering (klassificering) och följning av ett mål ställer krav på robusta algoritmer för signalbehandling, målföljning och sensorstyrning. I det tänkta målscenariot förutsätts någon form av invisning från t.ex. en helikopter till ett målområde som målsökaren har att avöka under anflygningen. Utgångspunkten för spårföljning är ett detekterat mål från åtminstone en sensor. Med nuvarande sensorprestanda observeras målet normalt först i IR och därefter med radarn, i nästa generation av mm-vågradar kommer förhållandet att bli omvänt. Radarns nuvarande roll är att förse IR-data med bättre avstånd med en viss tvärsupplösning och därmed skärpa storleksurvalet av filtren. Denna fusion av IR- och radardata verkar för att sälla ut målkandidater av förväntad storlek mot en varierad bakgrund.

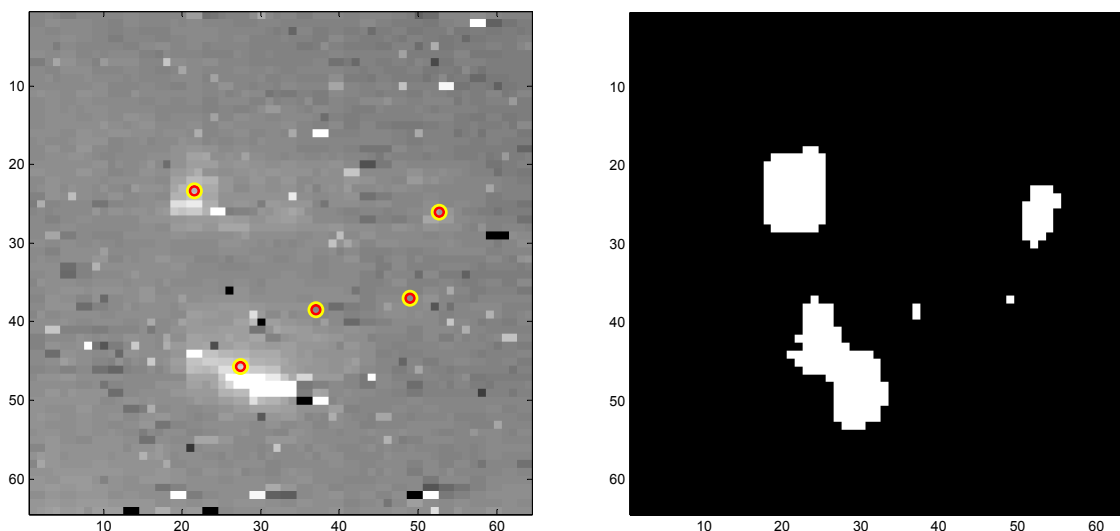
4.1.1. Kontrastfilter för IR

IR-bilden filtreras med en grupp kontrastfilter avstämde i storlek och orientering till målets förväntade utsträckning i höjd och bredd. Figur 19 visar två orienteringar av sådana filter med storleken 14×7 pixlar. Den inre 7×7 regionen med positiva värden är avstämde till målets vinkelutsträckning. Omgivande korridorer på vardera 3×7 nollar utgör en friyta till marginalerna på 1×7 negativa värden som känner av den lokala bakgrunden. Summan av alla filterelement är noll så att en ren bakgrund returnerar filtervärdet noll. Kombination av filter med olika orientering resulterar i undertryckning av ej önskad bakgrund. I detta fall väljs en kombination som ger den maximal kontrasten. Den vänstra bilden i Figur 20 visar en scen med en terrängbil på ett öppet gräsfält.



Figur 19. Kontrastfilter i två orienteringar för IR-bilder.

Resultatet från filtreringen ger en ny bild som trösklas m.a.p. förhöjda kontrastvärden (= den normerade skillnaden mellan mål och bakgrund). Den högra bilden i Figur 20 visar resultatet efter kontrastfiltrering (14×7 kärna) och tröskling (1,5×bakgrundsvariation) bestående av tre större och två små segment. Centroiderna för segmenten utgör centra för målkandidater i IR-bilden. Förutom två tydliga detektioner ses tre markeringar på betydligt kontrastsvagare partier.



Figur 20. Vänster bild: IR scen med terrängbil på gräsfält. Starkaste målkandidater indikeras med 5 rödgula cirklar. Terrängbilen syns vid koordinaterna (30,48). En personbil kör på en längre bort liggande väg vid (20,30). Flertalet helt ljusa/mörka pixlar är defekter i IR-sensorn. **Höger bild:** Trösklad kontrastbild.

Känsligheten kan ökas genom att istället sätta in pixelvärden för respektive mål och bakgrund i Bhattacharyyas avståndsmått μ som mäter skillnaden mellan två fördelningar X_1 och X_2 :

$$\mu = \frac{1}{8} (M_2 - M_1)^T \left[\frac{\Sigma_1 + \Sigma_2}{2} \right]^{-1} (M_2 - M_1) + \frac{1}{2} \ln \frac{\left| \frac{\Sigma_1 + \Sigma_2}{2} \right|}{\sqrt{|\Sigma_1| |\Sigma_2|}},$$

där

M_i = medelvärde av X_i

Σ_i = kovarians av X_i .

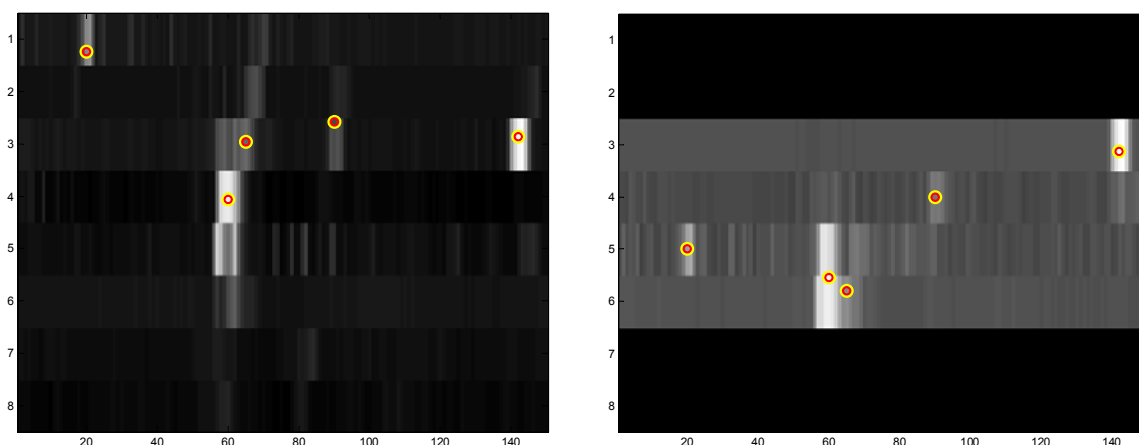
Även här fås en ny bild, med pixelvärden i μ , som trösklas m.a.p. förhöjda avståndsvärden. Man kan se Bhattacharyyas avståndsmått som en uppdelning i två klasser, mål och bakgrund, grundat på medelvärde och spridning för respektive klasser. I vissa fall har det dock visat sig att det enkla kontrastfiltret ger lika bra resultat som det mer tidskrävande avståndsmåttet.

4.1.2. 3-D radar

Den stirrande radarn genererar en 3-D volym av signalekon (sida×höjd×avstånd). Tvärsupplösningens 8×4 lobber bidrar till en väsentligt bättre associationsförmåga med motsvarande element i IR-bilden jämfört med ett radarsystem med endast en lobe. Detektion görs på lokala maxima i volymen av radarekon varefter resultatet interpoleras:

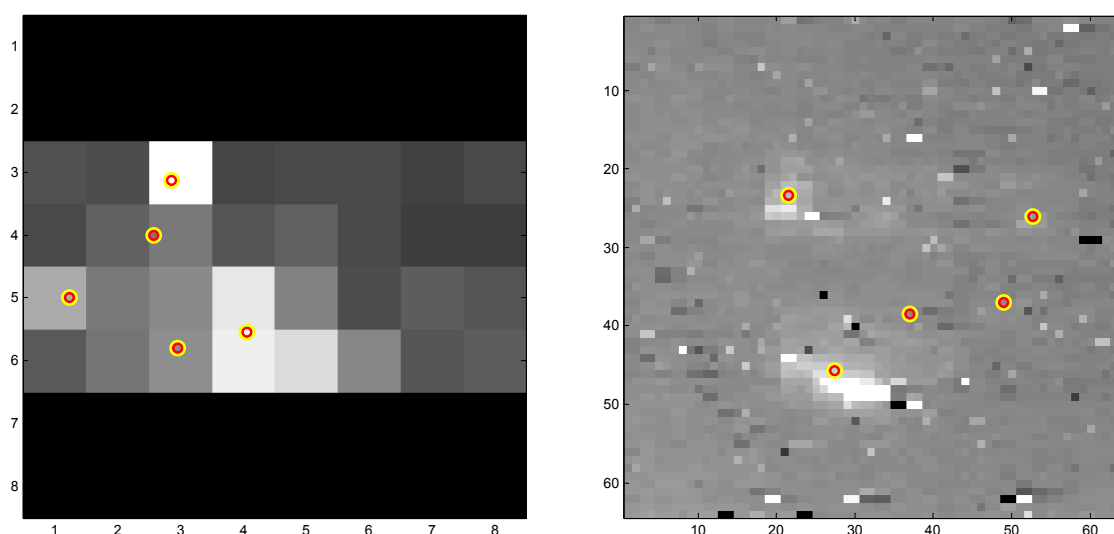
1. Glätta radarvolymen i avståndsled med ett Gaussfilter av storlek $[1,1,5]$.
2. Finn lokala maxima (x,y,z) och vikter w (signalstyrka).
3. Interpolera över (x,y) i en 3×3 omgivning (reduceras vid kanter).
4. Sortera detektioner efter vikt w .

Figur 21 visar toppvy och sidovy av $8 \times 4 \times 150$ lokala maxima i ekon från bl.a. en terrängbil och en personbil. Observera att radarn belyser scenbilderna från *vänster*. Terrängbilen ses vid koordinaterna (60, 4 - toppvy) och (60, 5,5 - sidovy). Ett starkt reflekterande objekt, troligen en personbil, ses vid koordinaterna (140,3 - toppvy) och (140,3 - sidovy).



Figur 21. *Vänster bild:* Toppvy av radarvolym visande lokala maxima. Röd-gula ringar utmärker 5 starkaste lokala maxima. *Höger bild:* Sidovy av radarvolym kompletterad med nollor upptill/nertill. Radarn belyser scenen från vänster.

Figur 22 visar i vänster bild en frontvy av radarvolymen. Som jämförelse visas motsvarande IR-scen i höger bild. Terrängbilens högre reflektiva delar och varma partier förtätas vid koordinaterna (4, 5,5) och (30,48) för respektive radar- och IR-bilder. Personbilen detekteras vid koordinaterna (3, 3) och (22, 25).



Figur 22. Vänster bild: Frontvy av radarvolym visande lokala maxima. Bilden kompletteras med nollor upptill/nertill för att tydligare associera med IR (bilderna inte helt ensade). Starkaste målkandidater indikeras med 5 röd-gula cirklar. **Höger bild:** Motsvarande IR scen.

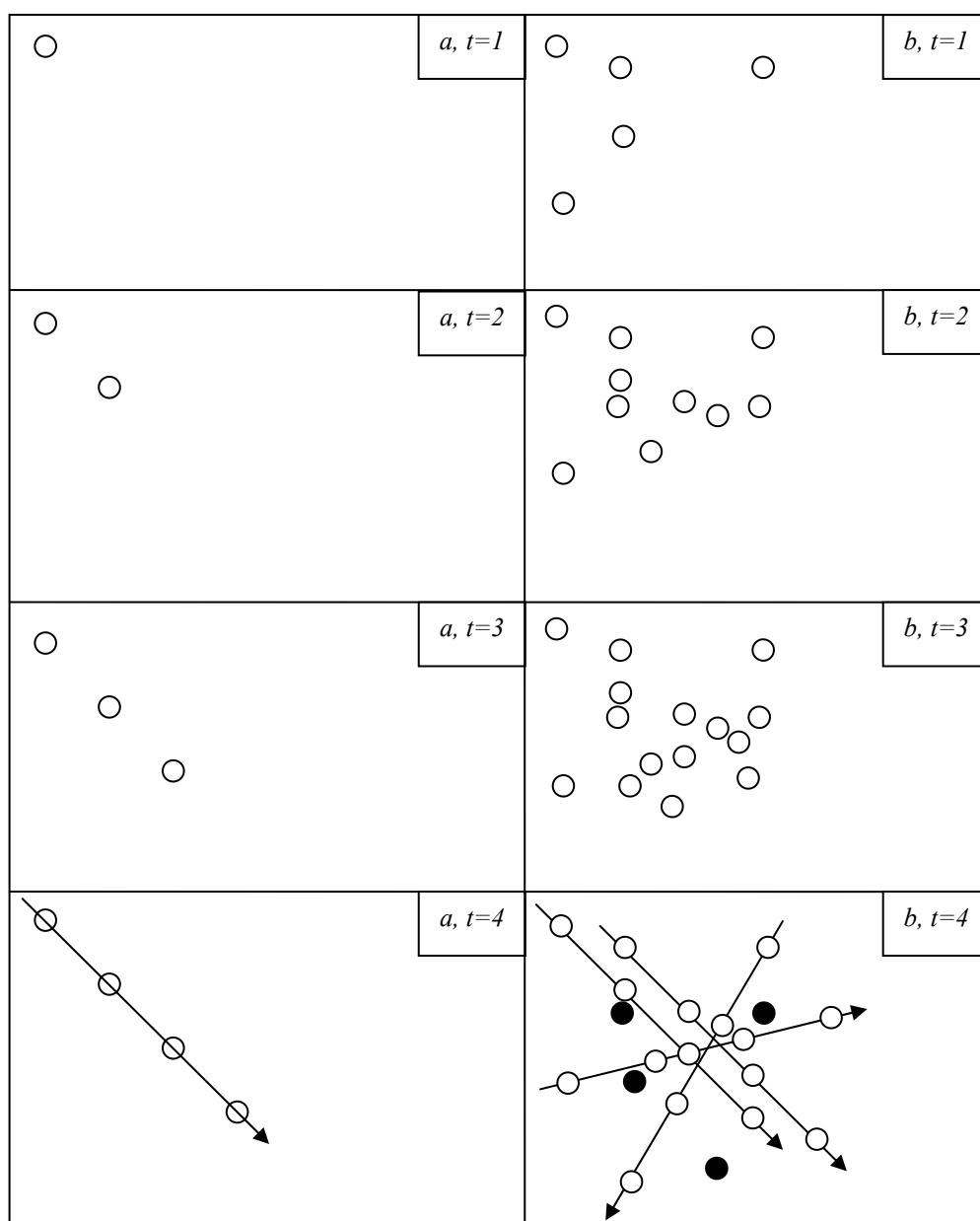
En visuell jämförelse mellan radar- och IR-bilderna i Figur 22 visar två detektioner (terrängbil och personbil) synliga i båda sensorerna. Återstående tre detektioner faller på helt olika platser i radar- och IR-bilderna. Under antagandet att det sökta målet ses i både radar och IR, har vi i detta fall begränsat antalet intressanta mål från 5 till 2. Ytterligare avgränsning kan göras i IR genom att anpassa storleken på kärnan i kontrastfiltret till målets vinkelutsträckning. Utsträckning ges av målets verkliga storlek skalat med avståndet givet av radarn. Till exempel kvarstår med en kärna på 23×11 pixlar endast terrängbil och personbil. Till sin fulla rätt kommer detektionsfiltren först i kombination med en multimål-spårföljare där dynamiken kan avgöra medlemskapet av ett visst mål.

4.2. Följning

4.2.1. Introduktion

En målföljare är ett system som utifrån sensordata skapar *spår* för intressanta objekt. Med hjälp av dessa spår kan man estimerar parametrar som kan vara intresse, t.ex. antalet verkliga mål och deras positioner, hastigheter och rörelsemodeller.

I Figur 23 illustreras svårigheterna att utifrån observationer från olika tidpunkter bilda korrekta spår.



Figur 23. Illustrerar svårigheterna att utifrån observationer från olika tidpunkter generera korrekta spår. Kolumn a visar ett enkelt fall med ett mål som genererar observationer. Kolumn b visar ett svårare fall då 4 objekt samt brus genererar observationer. Vid tidpunkten t=4 har de verkliga spåren markerats. (Fritt efter [32]).

Kolumn a i figuren visar hur ett mål som rör sig rätlinjigt genererar observationer. Vid t=1 detekteras målet för första gången och då t=4 har systemet fått in 4 observationer totalt. I detta extremt enkla fall kan man snabbt med ögat se hur målet rör sig och systemet kan enkelt bilda ett spår utifrån observationerna.

Kolumn b visar ett litet svårare fall då fyra mål genererar observationerna. Dessutom tillkommer en falsk observation per tidpunkt härrörande från brus eller klotter. Antalet

möjliga spår man kan bilda ur dessa observationer är här otroligt många fler än i fall a. Detta illustrerar ett centralt problem, det s.k. associationsproblemet, som man måste kunna hantera i en målföljare; vilka observationer skall associeras till vilka spår?

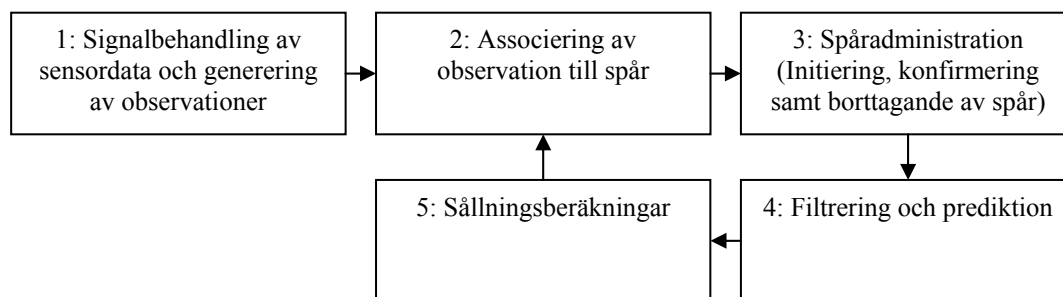
I ett verkligt system blir svårigheterna många fler. Man måste då t.ex. beakta att:

- ett följbart objekt kan tillkomma eller försvinna när som helst
- ett objekt man följer genererar inte observationer vid varje tidpunkt
- andelen falska observationer härrörande från brus och/eller klotter är normalt betydligt högre än i exemplet
- objekten rör sig inte rätlinjigt utan utför normalt olika manövrar
- observationerna är inte exakta utan är behäftade med olika fel
- mätningar, och därmed observationer, saknas för vissa tidpunkter
- observationer från olika sensorer inkommer vid olika tidpunkter

Det finns många olika varianter på målföljare. Den enklaste möjliga är en följare som försöker följa ett mål i en sensor i t.ex. ett sikte. I exempelvis partikelfysik och i USA's Strategic Defence Initiative (SDI) hittar man de mest avancerade följarna där man försöker följa hundratusentals objekt (partiklar, robotar, verkansdelar, splitter och falska mål) som rör sig i komplicerade banor med höga hastigheter.

4.2.2. Uppbyggnad

En konventionell följare som kan följa många objekt (MTT¹) kan grovt sägas vara uppbyggd ungefär som i Figur 24.



Figur 24. Uppbyggnad av en konventionell följare. (Fritt efter [31]).

Det börjar med att sensordata passerar ett signalbehandlingssteg (1). Man försöker här detektera intressanta objekt i datat och generera observationer för dessa. En observation består vanligtvis av koordinater och andra parametrar som beskriver objekt-detektionen. Notera att det är långt ifrån bara observationer för verkliga mål som genereras här. Förutom mål kommer även observationer genereras för "mål-lik" objekt såsom naturliga formationer i terrängen, reflektioner samt artefakter från brus och störningar.

I steg två i Figur 24 försöker man para ihop de nya observationerna med befintliga spår som är predikterade till den tidpunkt som sensordatat insamlades. Detta är ett mycket

¹ Multi Target Tracker

processorkrävande steg och därför försöker man först sälla bort (engelska "gating") de mest osannolika paren i en följd av allt mer avancerade sällningssteg.

Steg 3 hanterar spåradministration som består i initiering av nya spår, konfirmering av befintliga spår och borttagande av dåliga spår. Initiering av nya spår görs då det har inkommit observationer som man inte kan tilldela något av de befintliga spåren. Konfirmerade spår är spår som under ett antal tidssteg har gett bra prediktioner, medan dåliga spår är sådana som har gett dåliga prediktioner och som därför inte har blivit tilldelade observationer på länge.

Då alla befintliga och nyskapade spår har blivit tilldelade en observation uppdateras spåret med observationens information i ett filtreringssteg (4). Detta görs normalt med någon typ av Kalman-filtrering. Om man vet tidpunkten för när sensorerna samplas nästa gång gör man även en prediktion av spåren till denna tidpunkt i detta steg. Detta används i associeringssteget (2) men även i steg 5 där man gör förberedande beräkningar för sällningsmetoderna.

De 5 stegen i Figur 24 beskriver en målföljares uppbyggnad bara i stora drag då blockens uppbyggnad och relationer kan skilja sig väsentligt från följare till följare. När man försöker kategorisera och särskilja följarna tar man hänsyn till bl.a. följande egenskaper:

- följning av ett eller flera objekt samtidigt
- följning med hjälp av data från en eller flera sensorer. Om flera sensorer används skiljer man på de följare som kräver samma sensortyp för alla sensorer och de som kan använda heterogena sensortyper.
- följning av objekt med olika rörelsemodeller
- använd associeringsmetod
- komplexiteten hos filtreringsmetoden och dess process- och mätmodeller. Detta kontrollerar hur man uppdaterar ett spår med nya observationer.
- använd metod för att kontrollera tvetydigheter, dvs. hur man bildar hypotetiska spår som får konkurrera om framtida observationer.
- synkroniseringskrav på observationerna till följaren. Måste alla observationer från alla sensorer levereras samtidigt och alltid eller klarar följaren att "ta vad den får"?
- skalbarheten hos följaren när det gäller antalet följbara objekt och andelen "falska" observationer.
- de systemkrav följaren ställer på "sin" plattform.
- de krav följaren ställer på sin hård- och mjukvaruomgivning inklusive sensorer och kommunikationskanaler
- central eller distribuerad följning

4.2.3. IR/mm-projektets målföljare

Under hela IR/mm-projektets löptid har olika versioner av en målföljare använts, utvecklats och studerats. Dessa har varit implementerade i Matlab™ och varit ett lappverk av examensarbeten och olika personers ansträngningar att lägga till och göra om. Även om koden fungerade var den svår att underhålla och utöka då den saknade modularitet och en klar designidé. Dessutom ville projektet skriva om alla mjukvaror i C/C++ för portabilitets-, effektivitets- och prestandaskäl. Därför beslutades hösten 2002 att en helt ny design skulle tas fram och implementeras inför projektets avslut 2003.

4.2.3.1 Designmål och utvecklingsarbete

Följande punkter formulerades som mål för den nya målföljar-designen:

- Då målföljaren skall användas till forskning måste den vara flexibel, modulär och utbyggbar. Målföljaren skall stödja IRmm-projektets behov men inte vara begränsad eller onödigt specialiserad för dessa.
- Den skall stödja standardtekniker såsom t.ex. JPDA² [29] och MHT³ [33].
- Den skall klara att behandla observationer från många, olika och asynkrona sensorer.
- Den skall klara multipla processmodeller per spår, dvs. kunna hantera många rörelsemodeller samtidigt (IMM⁴).
- Den skall stödja många olika typer av filtreringsmetoder såsom t.ex. KF⁵, EKF⁶ och PF⁷. Detta innebär att så få antaganden som möjligt skall göras om representationen av modeller, observationer och spår.
- Designen skall vara objekt orienterad (OO).
- Designen och implementationen skall vara plattformsoberoende så långt som möjligt. (Fungera under Windows, QNX, Linux etc.)
- Implementationen skall använda fria, plattformsoberoende standarder, verktyg och bibliotek så långt som möjligt för att slippa ”uppfinna hjulet”-effekter.
- Design- och implementationsarbete skall göras så att aktuell och spårbar dokumentation kan skapas kontinuerligt.
- Implementerings- och/eller underhållsarbete skall kunna göras av fler personer samtidigt.

Designarbetet mynnade ut i en objektorienterad design och en utvecklingsmiljö som uppfyller kraven. Utvecklingsmiljön består av följande komponenter:

- Kompilatorn GCC: Denna finns för många plattformar och operativsystem. GCC stödjer vidare, och uppmuntrar även till, användning av öppna standarder och programvaror.
- Utvecklingsmiljön CYGWIN: Denna erbjuder en Linux-liknande miljö under Windows och underlättar portabilitetskravet dramatiskt.
- Biblioteket GSL (GNU Scientific Library): GSL innehåller många vanliga matematiska funktioner, t.ex. snabba operationer för matriser och vektorer (BLAS) som är vanligt förekommande i en målföljare. Med GSL har projektet sluppit att implementera många funktioner.
- Versionshanteringssystemet CVS: Då många personer skall programmera delar av samma kod samtidigt, krävs ett versionshanteringssystem som kan hålla koll på vem som har gjort vilka ändringar, detektera kollisioner osv. CVS underlättar på detta sätt utvecklingsarbetet och spårbarheten dramatiskt. Alla programvaror i projektet ligger numera under CVS.

² Joint Probabilistic Distribution Association

³ Multiple Hypothesis Tracking

⁴ Interacting Multiple Model

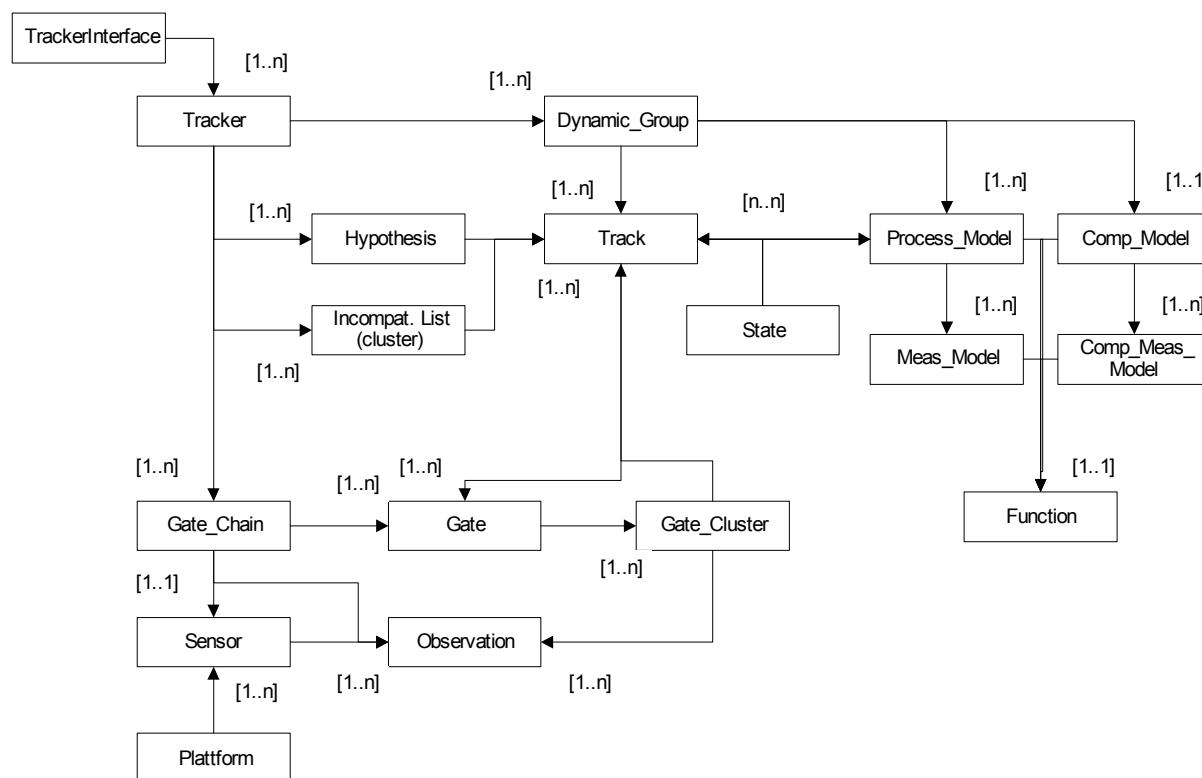
⁵ Kalman Filter

⁶ Extended Kalman Filter

⁷ Particle Filter

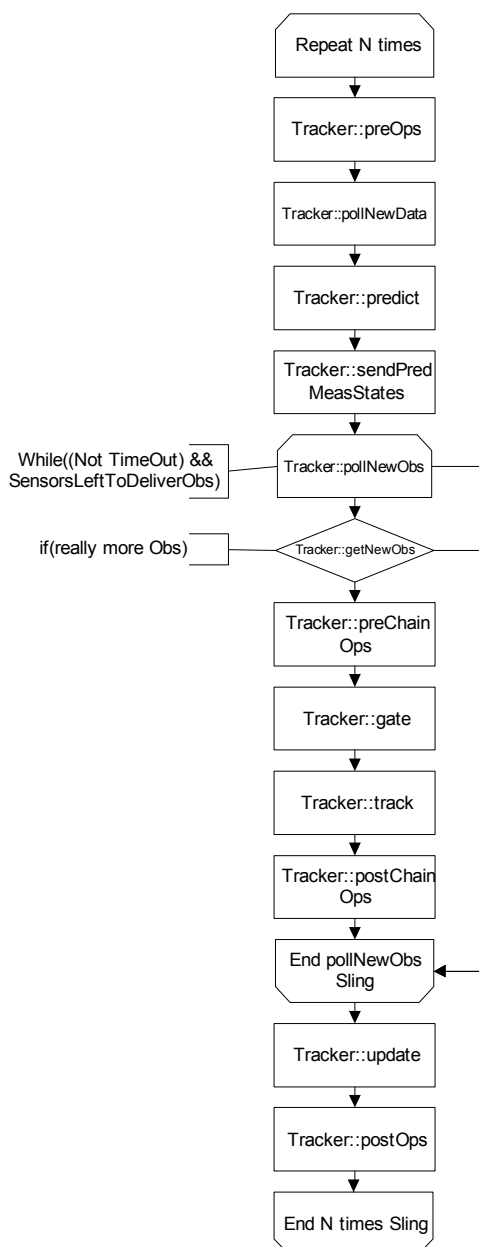
- Webgränssnittet ViewCVS: Detta är ett verktyg där man lätt och direkt kan få fram relevant information ur CVS-databasen. Man använder sin vanliga web-läsare för att ta fram informationen.
- Dokumentationssystemet Doxygen: Detta verktyg genererar dokumentation (HTML, PDF, XML m.m.) direkt från programkoden och dess kommentarer vilket garanterar aktuell dokumentation och uppmuntrar även till god kodningsdisciplin.

Den nya målföljaren är uppbyggd av ett antal objekt av olika klass. I Figur 25 ser vi de viktigaste objekten och deras huvudsakliga relationer.



Figur 25. Objektdiagram för de viktigaste objekten och de viktigaste relationerna i den nya målföljaren.

En målföljare (Tracker i figuren) används och kontrolleras genom funktioner i TrackerInterface. Denna ställer krav på hur en målföljare skall vara uppbyggd och fungera. T.ex. så måste alla funktioner i den s.k. målföljar-kedjan vara implementerade. Varje funktion i kedjan har en, klart specificerad, uppgift och garanterar en modular uppbyggnad hos målföljaren. I Figur 26 ser vi de viktigaste funktionerna i kedjan.



Figur 26. De viktigaste funktionerna i målföljarkedjan.

4.2.3.2. Status och fortsatt utvecklingsarbete

När detta skrivs är alla klasser för en Nearest Neighbor målföljare (NN) implementerade och testade. Huvuddelen av klasserna är oberoende av målföljartyp och kan därför, som designen avsåg, återanvändas för att implementera andra typer av målföljare. Den befintliga NN-målföljaren används nu i det övriga IR/mm-systemet för att styra sensorplattformen så att den följer valfritt mål.

Det fortsatta arbetet kommer i närtid bestå i att implementera en JPDA-målföljare samt optimera koden och systemet för att eliminera flaskhalsar. På längre sikt avser vi att utnyttja designens stöd för parallellism. Därför vill vi göra klasserna tråd-säkra så att en målföljare

skall kunna dra nytta av ett system med många processorer. En parallelliserad målföljare skulle också underlätta designen av vissa komponenter i det övriga IR/mm-systemet.

Den nya målföljaren i IR/mm-projektet har designats och utvecklats under 2003. I detta arbete har projektets långa erfarenhet av målföljare utnyttjats och kombinerats med moderna mjukvarutekniker. Detta gör att den nya målföljaren står väl rustad för att utnyttjas i kommande forskningsprojekt.

4.3. Slutsats

4.3.1 Mät- och försökssystemet

Det försöks- och mätsystem som finns tillgängligt idag kan användas för försök på upp till 400 m avstånd. Mätdata från IR-kameran, millimetervågsradarn och plattformen kan insamlas och lagras i realtid. Datafusion och följning av ett manuellt valt mål kan göras återkopplat från datafusionsalgoritmerna i realtid så länge antalet mål/detektioner inte blir för många i ett tidssteg.

Signalbehandlingen för observationsgenerering ur IR-bilder är i nuläget av enklare slag, men eftersom kvalitén (upplösning och pixeljämnhet) på sensorn är låg, har det liten betydelse för systemets totala prestanda. Känsligheten hos IR-kameran räcker dock till för mätningar på längre avstånd än 400 m.

Radarsensorn lider också av ojämn kanalförstärkning samt av att den inte är koherent. Detta i kombination med att AD-omvandlarna bara har 8-bitar, gör att man noggrant måste justera in systemet för att inte mäta AD-omvandlarna, samtidigt som maximal känslighet eftersträvas under mätning. Signalbehandlingen av radardata är också av enklare slag men kan inte i dagsläget anses begränsande för systemet. För att utöka räckvidden för systemet krävs koherent integration, alternativt högre uteffekt eller känsligare mottagarkretsar.

Målföljningen har i den nuvarande implementeringen i C++ en betydligt större potential att uppfylla de krav som ställs på den för att kunna genomföra såväl fältförsök som simuleringar av monte-carlo typ för prestandaevaluering. Den i nuläget testade associeringsalgoritmen är NN (nearest neighbor), men de initiala resultaten av JPDA är lovande. Den Matlab™ implementering av JPDA vi använt under flera år i projektet har visat sig fungera väl, varför vi är säkra på att den nya implementeringen kommer att uppnå minst lika goda resultat. Den modulära objektorienterade designen ger oss också stor potential att använda denna nya målföljare i framtida forskningsverksamhet.

Systemet kan i nuvarande skick användas för försök med multisensorteknik och målföljning med datafusion, liksom för insamling av multisensordata för ”offline” analys av t.ex. störningsförsök. Särskild hänsyn måste dock tas till den korta räckvidden och det begränsade synfältet. Den absolut viktigaste funktionen med systemet är dock den synkroniserade och noggrant tidsmärkta datainsamlingen, vilken är en förutsättning för analyserbara datafusionsstudier och försök. Dessa utgör en god grund för förståelsen kring hur multisensorteknik kan användas i framtida system.

4.3.2 Systemkoncept

Under senare delen av projektet har i huvudsak en multisensormålsökar-robot för bekämpning av högvärdiga mobila markmål varit av huvudintresse. Denna robot var tänkt att skjutas från en helikopter, attackflygplan eller större UAV/UCAV. Detta koncept har varit det drivande scenariet för studierna, men de valda forskningsfrågeställningarna har hållits mer generella. Det innebär att man kan generalisera resultaten av forskningen till flera robottyper, men även till mer radikalt annorlunda målinvisningskoncept. Exempelvis kan sensorerna distribueras mellan flera plattformar, såsom en enklare sensor i verkansdelen och en mer avancerad sensor i en återanvändningsbar vapenbärare, såsom en UCAV. Vad gäller målföljningsalgoritmerna som framtagits, så är dessa generella och gör inget antagande om huruvida sensorerna är samlokaliserade eller ej.

En annan aspekt på målföljningen har mindre att göra med multisensorteknik, men desto mer med den grundläggande funktionen hos den målföljningsteknik som studerats. Genom att arbeta med något större synfält än traditionellt i målsökaren och kontinuerligt följa alla måлиндikationer, fås en följealgoritm som kan hantera t.ex. skenmål på ett betydligt mer sofistikerat sätt än i traditionella målsökare. Genom att applicera måligenkänningsmetoder på varje enskilt målspar kan flertalet enklare skenmål sällas bort. Avhakning med hjälp av t.ex. facklor eller remsor blir då betydligt svårare att åstadkomma, vilket i kombination med flera sensorer för målinmätning ger ett mycket svårstört system.

5. FORTSÄTTNING

Forskningsfrågorna kring multisensormålsökare är långt ifrån färdigbehandlade. Det är därför viktigt att även framöver utveckla våra kompetenser inom området, både för att kunna bedöma framtida möjligheter och hot samt för att tillsammans med svensklokaliserad försvarsindustri kunna ta fram idéer till och utveckla lämpliga demonstratorer. På detta sätt kommer Sverige att förbli en internationellt intressant samarbetspartner. De kompetenser som vi utvecklat inom detta område är:

- Generell multisensorsignalbehandling (kräver ej ensade eller samlokaliserade sensorer)
- Detektion av ”mål” för initiering av målspar i målföljningen
- Klassificering
- Målföljning
- Multisensormålsökarkompetens

På hårdvarusidan finns följande resurser:

- Unik stirrande mm-vågsradar (bör utvecklas till koherent)
- Universell styrbar plattform
- Hårdvarulösning till signalbehandlingsarkitekturen.

Den kompetens som har byggts upp inom projektet rörande datafusion, målföljning, millimetervågsteknik, samt signalbehandling och dataloggning i realtid, har skapat förutsättningar att analysera framtida hot och bedriva studier kring ett flertal frågor rörande multisensorteknik för målsökare. Den mätresurs som tagits fram kan användas till enklare verifierande försök men kan förbättras och kompletteras framöver. Med koherent integration av radarsignalen bedöms räckvidden kunna ökas markant. Det skulle ge större frihet vid exempelvis störningsförsök, där t.ex. säkerhetsavstånd till granatkastarenheter etc. annars skulle medföra svårigheter.

Mätsystemet kan också i framtiden modifieras och användas som "teknikdemonstrator" i fält. Den kompetensnisch som FOI har i dag rörande markmål, är unik i landet och bör tas till vara. Exempel på nya målsökarfrågor är kopplingen mellan målsökare och yttre sensorer i NBF (det Nätverks Baserade Försvaret) och hantering av den komplexa miljön i SiB (Strid i Bebyggelse).

6. REFERENSER

- [1] U. Dahlgren, H. Hentzell, J. Kjellgren, H. Zirath, B. Albinsson, S. Gong, O-J. Hagel, J. Svedin, "Förstudie angående aktiv millimetervågssensor", FOA Rapport, FOA-C-30734-3.2, okt 1993, 39 s.
- [2] S. Lindström, "IR-CCD kamera, uppbyggnad av IR-kamera", FOA Rapport, FOA-C-30716-8.3, juni 1993, 69 s.
- [3] S. Lindström, "Multisensorplattform, IRmm", FOA Rapport, FOA-D--96-00254-3.3--SE, april 1996, 25 s.
- [4] C. Johansson, J. Kjellgren, S. Lindström, A. Sume, "IR och mm-vågsdämpning i artificiellt alstrad vattendimma. Mätning och beräkning", FOA Rapport, FOA-DH--97-00089-310, april 1997, 12 s.
- [5] M. Karlsson, "Mätrapport, multimålsökare, v 23", FOA Rapport, FOA-D--98-00388-314--SE, juli 1998, 11 s.
- [6] M. Karlsson, A. Lauberts, S. Nilsson, J. Nygårds, "Målupptäckt, målföljning och datafusion", FOA Rapport, FOA-R--98-00929-314--SE, okt 1998, 21s.
- [7] A. Lauberts, "Automatic target tracking in infrared images", FOA Rapport, FOA-R--96-00227-3.4--SE, feb 1996, 12 s.
- [8] A. Sume, "Recognition of ground targets with polarimetric radar at 94 GHz", FOI Rapport, FOI-R--0180--SE, 2001, 58 s.
- [9] M. Karlsson, A. Lauberts, "Användning av datafusion vid klassificering av markmål, en inledande studie", FOA Rapport, FOA-R--00-01655-314--SE, november 2000, 18 s.
- [10] M. Karlsson, A. Lauberts, S. Nilsson, J. Nygårds, A. Sume, "IRmm-målsökare, en systemlösning", FOA Rapport, FOA-RH--99-00443-314, juni 1999, 39 s.
- [11] M. Karlsson, A. Lauberts, S. Nilsson, J. Nygårds, F. Näsström, "Uppdatering av spelkort för IR/mm-målsökare, störningsutvärdering", FOA Dokument, Dnr: 00-H529/L.
- [12] L. Carlsson, M. Karlsson, A. Lauberts, S. Nilsson, J. Nygårds, "Multiple target tracking using staring IR and staring mm-wave radar", Proceedings of Eurofusion 99, sid 115, 1999, 7 s.
- [13] M. Karlsson, A. Lauberts, D. Letalick, S. Nilsson, J. Nygårds, "Laserradar/IR/mm-vågsradar i målsökare, en förstudie av olika kombinationer", FOA Rapport, FOA-R--00-01552-314--SE, juli 2000, 27 s.

-
- [14] S. Lindström, "Beskrivning av mätsystem IR/mm, datainsamlingskort", FOA Rapport, FOA-D--00-00505-314--SE, nov 2000, 97 s.
 - [15] M. Karlsson, J. Nygårds, "Systemspecifikation, mätsystem IR/mm", FOI Rapport, FOI-R--0285--SE, nov 2001, 30 s.
 - [16] A. Haddad, "Development of Real-Time Multi-Sensor Data Acquisition and Tracking System", LiTH-IDA-Ex-02/110, dec 2002, 60 s.
 - [17] C. Johansson, A. Sume, "Polarimetrisk kalibrering av koherent radar med tillämpning vid 94 GHz", FOI-R--0161--SE, FOI Rapport, 2001, 77 s.
 - [18] A. Gustafsson, S. Lindström, J. Svedin, "Underlag för design av koherent mm-vågssystem", FOI Dokument, Dnr: 01-3140/L.
 - [19] S. Lindström, "Beskrivning av mätsystem IR/mm, PRF-generatorn", FOI Rapport, FOI-R--0433--SE, 2002, 35 s.
 - [20] L-G. Huss, "94 GHz staring mm-wave radar", FOI Dokument, Dnr: 02-1669.
 - [21] L. Carlsson, M. Karlsson, S. Lindström, "Mätning med stirrande mmvågssensor", FOI Dokument, Dnr: 02-2442.
 - [22] L. Carlsson, m.fl, "IR/mm målsökare med återkopplad plattform", FOI Dokument, Dnr: 02-3218.
 - [23] L. Carlsson, "Mm-vågsradar för mätändamål färdigställd", FOI Dokument, Dnr: 03-818.
 - [24] J. Svedin, A. Gustafsson, S. Lindström, "Implementering av koherent detektion med mm-vågs mottagare", FOI Dokument, Dnr: 03-2222, sept. 2003.
 - [25] J. Svedin, G. Huss and I. Angelov, "A Staring 94 GHz Antenna-Integrated Focal Plane Receiver Array Using a Quasi-Optically Pumped Active Gate Mixer MMIC", Proc. of the 2002 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Kyoto, 19-20 nov. 2002.
 - [26] J. Svedin, "An Evaluation of Reflector Systems for Use with a 94 GHz Staring Receiver Array", FOA Rapport FOA-D--95-00138-3.2--SE, juni, 1995
 - [27] J. Svedin, FOI Dokument, Dnr. 01-460/L, jan, 2001.
 - [28] J. Svedin, FOI Dokument, Dnr. 01-1463/L, april, 2001.
 - [29] Y. Bar-Shalom, and T.E. Fortmann, "Tracking and Data Association", Orlando, FL: Academic Press, 1988
 - [30] T.E. Fortmann, et. al., "Sonar Tracking of Multiple Targets Using Joint Probabilistic Data Association", IEEE J. of Oceanic Engineering, Vol. OE-8, July 1983, pp. 173-184.
 - [31] S. Blackman, and R. Popoli, "Design and Analysis of Modern Tracking Systems", Artech House, ISBN 1-58053-006-0, 1999.
 - [32] David L. Hall (Editor) and James Llinas(Editor), "Handbook of Multisensors Data Fusion", CRC Press, ISBN 0-8493-2379-7, 2001
 - [33] D.B. Reid, "An Algorithm for Tracking Multiple Targets", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol AC-24, Dec 1979, pp. 843-854.