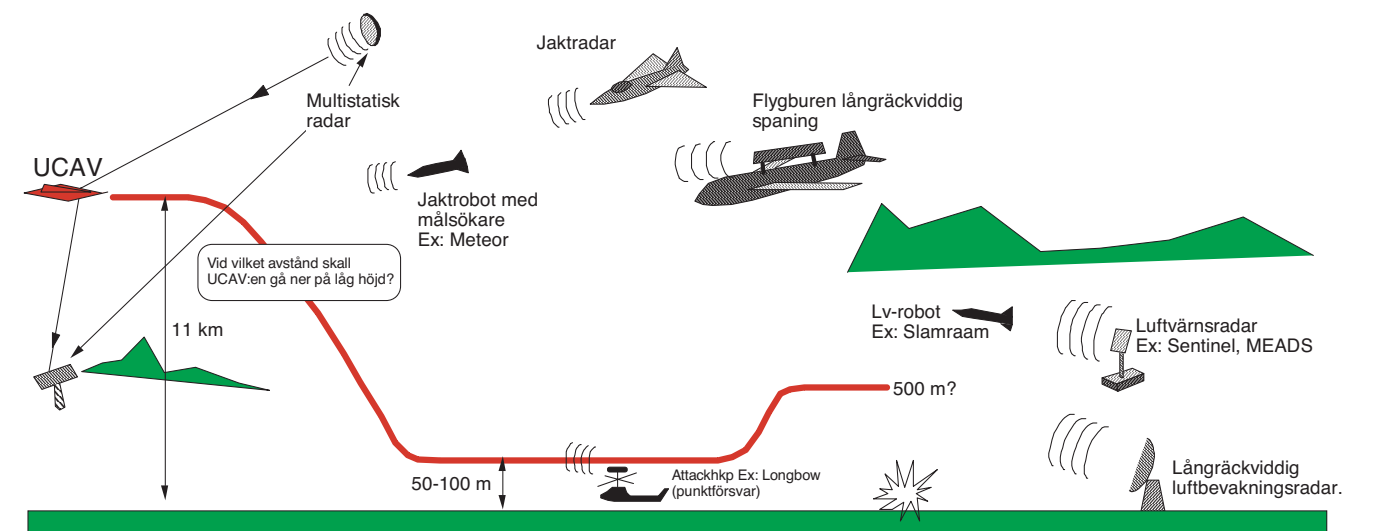


CLAES NELSSON, PATRIK HERMANSSON, JONAS RAHM, HANS STRIFORS, AIN SUME, THOMAS WINZELL



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1350 anställda varav ungefär 950 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömningen av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

Claes Nelsson, Patrik Hermansson, Jonas Rahm, Hans Strifors, Ain Sume,  
Thomas Winzell

## Multidisciplinär optimering av lågsignaturfarkost - projektresultat under 2005

<b>Utgivare</b> FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	<b>Rapportnummer, ISRN</b> FOI-R--1870--SE	<b>Klassificering</b> Teknisk rapport
	<b>Forskningsområde</b> 6. Telekrig och vilseledning	
	<b>Månad, år</b> December 2005	<b>Projektnummer</b> E3072
	<b>Delområde</b> 62 Signaturanpassning	
	<b>Delområde 2</b>	
<b>Författare/redaktör</b> Claes Nelsson Patrik Hermansson Jonas Rahm Hans Strifors Ain Sume Thomas Winzell	<b>Projektledare</b> Claes Nelsson	
	<b>Godkänd av</b> Mattias Severin	
	<b>Uppdragsgivare/kundbeteckning</b> Försvarsmakten	
	<b>Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig</b> Claes Nelsson / Jonas Rahm	
<b>Rapportens titel</b> Multidisciplinär optimering av lågsignaturfarkost - projektresultat under 2005		
<b>Sammanfattning</b> <p>Vid utformning av signaturanpassade flygfarkoster måste flera olika discipliner integreras: Signaturen ska vara så låg som möjligt för flera olika hotsensorsystem och dessutom måste de aerodynamiska och flygtekniska egenskaperna utformas enligt uppställda krav. En gemensam process krävs där olika koncept kan utvärderas och optimeringar kan göras med avseende på flera parametrar.</p> <p>Det här redovisade projektet har bedrivits under 2004-2005 inom ramen för FoT8 och samordnats med projektet "Utformning lågsignaturfarkost" som drivs inom FoT25. Båda projekten har genomförts vid FOI och syftar till att utforma, analysera och förbättra ett UCAV-koncept ("Unmanned combat air vehicle" benämnd EIKON) som bygger på experimentfarkosten Pegasus. Det här redovisade projektet har framför allt fokuserat på sensorrelaterade frågor såsom kravsättning, signaturmodellering, signaturmätning och signaturanalys. Även signaturmaterialfrågor har behandlats.</p> <p>Föreliggande rapport innehåller en redovisning av projektresultat erhållna under 2005. Huvudsakligen avhandlas kravsättning, signaturmodellering, radarsignaturmätning samt en förstudie rörande multidisciplinär optimering. En sammanfattande slutrapport för projektet ges ut samtidigt.</p>		
<b>Nyckelord</b> EIKON, IR, Multidisciplinär, optimering, radar, signatur		
<b>Övriga bibliografiska uppgifter</b>	<b>Språk</b> Svenska	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Antal sidor:</b> 66 s.	
<b>Distribution enligt missiv</b>	<b>Pris:</b> Enligt prislista	

<b>Issuing organization</b> FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	<b>Report number, ISRN</b> FOI-R--1870--SE	<b>Report type</b> Technical report
	<b>Programme Areas</b> 6. Electronic Warfare and deceptive measures	
	<b>Month year</b> December 2005	<b>Project no.</b> E3072
	<b>Subcategories</b> 62 Low Observables	
	<b>Subcategories 2</b>	
<b>Author/s (editor/s)</b> Claes Nelsson Patrik Hermansson Jonas Rahm Hans Strifors Ain Sume Thomas Winzell	<b>Project manager</b> Claes Nelsson	
	<b>Approved by</b> Mattias Severin	
	<b>Sponsoring agency</b> Armed forces	
	<b>Scientifically and technically responsible</b> Claes Nelsson / Jonas Rahm	
<b>Report title (In translation)</b> Multi-disciplinary optimization of a low-signature vehicle - project results for 2005		
<b>Abstract</b> <p>When designing low-signature air vehicles several disciplines have to be integrated: The signature has to be as low as possible for different threat sensor systems and aerodynamic and manoeuvre characteristics have to fulfil the requirements. A common process is needed where different concepts can be evaluated and optimizations can be made with respect to several parameters.</p> <p>The project reported here has been conducted during 2004-2005 within the framework of FoT8 and is coordinated with the project "Utformning lågsignaturfarkost" which is conducted in FoT25. Both projects have been carried out at FOI and the objective is to design, analyze and improve a UCAV concept (Unmanned combat air vehicle called EIKON) which is inspired by the experimental air vehicle Pegasus. The project presented here focuses mainly on sensor related issues such as requirements, signature modelling, signature measurement and signature analysis. Also, low observable materials are treated.</p> <p>This report presents the results obtained during the year 2005. Main topics treated are requirements, signature modelling, radar signature measurement and preliminary study concerning multi-disciplinary optimization. A summarizing final report for the project is issued at the same time.</p>		
<b>Keywords</b> EIKON, IR, multi-disciplinary, optimization, radar, signature		
<b>Further bibliographic information</b>	<b>Language</b> Swedish	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Pages</b> 66 p.	
	<b>Price acc. to pricelist</b>	

**INNEHÅLL**

<b>1</b>	<b>INLEDNING</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>EIKON</b> .....	<b>6</b>
2.1	FARKOSTBESKRIVNING.....	6
2.2	FRAMDRIVNING.....	7
<b>3</b>	<b>MULTIDISCIPLINÄR OPTIMERING – FÖRSTUDIE</b> .....	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>KRAVSÄTTNING INOM OPTISKA OMRÅDET</b> .....	<b>12</b>
4.1	PRINCIPER FÖR BESTÄMNING AV KONTRASTKRAV .....	13
4.2	EXEMPEL PÅ SPANINGSSENSORER OCH SIKTEN.....	14
4.3	KRAV .....	15
<b>5</b>	<b>KRAVSÄTTNING INOM RADAROMRÅDET</b> .....	<b>16</b>
5.1	HOT OCH SENSORER.....	16
5.1.1	Markbaserad långräckviddig luftbevakningsradar .....	16
5.1.2	Flygburen långräckviddig spaningsradar .....	16
5.1.3	Jaktradar.....	17
5.1.4	Multistatisk radar.....	17
5.1.5	Luftvärnsradar .....	17
5.1.6	Målsökarradar i jaktrobot .....	18
5.2	KRAVSÄTTNING.....	18
5.2.1	Kravsättning av radarmålarea.....	18
5.2.2	Prestandamått .....	18
5.2.3	Analysmetoder .....	19
5.2.4	Scenarier och funktioner.....	20
5.2.5	Radarekvationen.....	20
5.2.6	Signalsimulering.....	22
5.2.7	Elektromagnetiska beräkningar .....	22
5.2.8	Värdering av metoder .....	22
5.2.9	Kravanalys EIKON .....	23
<b>6</b>	<b>ANVÄNDNING AV RADARABSORBERANDE MATERIAL</b> .....	<b>29</b>
6.1	DIFFRAKTION FRÅN DISKONTINUITETER OCH KRÖKTA YTOR.....	29
6.2	POLARISATION.....	30
6.2.1	Polarisationsegenskaper hos radarabsorbenter.....	30
6.2.2	Ytvågsabsorption.....	31
6.3	IMPEDANSRANDVILLKOR.....	31
<b>7</b>	<b>MODELLERING AV OPTISK SIGNATUR HOS EIKON</b> .....	<b>31</b>
7.1	MCCAVIDITY .....	32
7.2	SENSORMODELLERING.....	32
7.3	RESULTAT: HEL FARKOST UTAN BAKGRUND.....	33
7.4	RESULTAT: HEL FARKOST I BAKGRUND .....	35
7.5	RESULTAT: PARAMETERSTUDIE REFLEKTANS .....	36
7.5.1	Sidoaspekt .....	38
7.5.2	Framifrån.....	39
7.5.3	Underifrån .....	41
7.5.4	Bakifrån – Motorkaviteten.....	42
<b>8</b>	<b>MODELLERING AV RADARSIGNATUR HOS EIKON</b> .....	<b>43</b>

8.1	X-BAND .....	43
8.1.1	Beräkningsparametrar för SPECRAY .....	43
8.1.2	Beräkningsparametrar för MRANDOLF .....	44
8.1.3	Resultat.....	44
8.2	W-BAND .....	45
8.2.1	Beräkningsparametrar för SPECRAY .....	45
8.2.2	Resultat.....	46
<b>9</b>	<b>MÄTNING AV RADARSIGNATUR.....</b>	<b>46</b>
9.1	ANVÄNDA PARAMETRAR VID MÄTNINGARNA .....	47
9.1.1	Objektparametrar.....	47
9.1.2	Mätparametrar och mätuppställning vid Lilla Gåra mätningar (W-band) .....	48
9.2	MÄT- OCH KALIBRERINGSMETODIK .....	49
9.3	MÄTRESULTAT .....	50
<b>10</b>	<b>JÄMFÖRELSER MELLAN BERÄKNING OCH MÄTNING.....</b>	<b>53</b>
10.1	X-BAND .....	53
10.2	W-BAND .....	57
10.3	SLUTSATSER.....	59
<b>11</b>	<b>UTVÄRDERING OPTISK SIGNATUR.....</b>	<b>60</b>
11.1	KRAVUPPFYLLELSE.....	60
11.2	RÄCKVIDDSBERÄKNING .....	61
<b>12</b>	<b>REFERENSER.....</b>	<b>61</b>
<b>BILAGA 1 BERÄKNAD KONTRAST RELATIVT BAKGRUNDEN FÖR EIKON I DET OPTISKA OMRÅDET.....</b>		<b>65</b>

## 1 INLEDNING

Syftet med projektet *Multidisciplinär optimering av lågsignaturfarkost* är att förverkliga och demonstrera en gemensam process för att värdera och föreslå modifieringar av en flygande plattform utifrån krav på uppgift, flygegenskaper och olika typer av signaturer. Projektet är tvåårigt för perioden 2004 – 2005 och ingår i FOIs uppdrag från Försvarmakten inom FoT8, Sensorer över ytan med SAT. Det bedrivs samordnat med projektet *Utformning lågsignaturfarkost* som är en del av FOIs uppdrag inom FoT25, Luftfarkoster. Genom detta arrangemang förväntas kontakterna stärkas mellan de två FoT-områdena. Tillämpningsobjektet har varit enUCAV (Unmanned Combat Aerial Vehicle) av Pegasustyp som benämns EIKON och beskrivs kort i avsnitt 2.

Det här redovisade projektet har fokuserat på frågeställningar som ligger närmast sensorfrågorna och som anknyter till övrig signaturverksamhet inom FoT8. Projektet har under 2005 framför allt arbetat med följande områden:

- Kravsättning inom signatur
- Studie och val av signaturmaterial
- Signaturmodellering av mål och bakgrund
- Radarsignaturmätning
- SAT-utvärdering, analys
- Metodik för multidisciplinär optimering av farkostutformning

Projektgruppen har samverkat och haft kontakt med projektet *Utformning lågsignaturfarkost* inom FoT25 främst när det gäller optisk signaturmodellering och mätning av radarsignatur i den omfattning som verksamheten påkallat. Dessutom har ett större gemensamt projektmöte hållits med de båda projekten för att koordinera och följa upp aktiviteterna.

Denna rapport redovisar på teknisk nivå den verksamhet som genomförts i projektet under 2005 och ska ses som en fortsättning på den lägesrapport som utkom i december 2004 [1]. Under året har det dessutom utkommit en rapport som redovisar en radarmätning [2]. Inom optisk signaturmodellering har en benchmarking genomförts mellan två koder vid FOI, McCavity och SIGGE, som kommer att rapporteras separat inom kort [3]. I slutet av året ges dessutom en sammanfattande slutrapport ut [4].

## 2 EIKON

### 2.1 FARKOSTBESKRIVNING

Ur projektdokumentationen för projektet *Utformning lågsignaturfarkost*. EIKON bygger på formen hos Pegasus, se *Figur 1*.

#### Allmänt

Lågsignaturfarkosten ska vara ”medelstor”, 5-6 ton och 8 m och konstruerad för underljudsfart. Den skall vara fenlös och olik Filur [5], gärna med ”ruteress-konfiguration”. Den ska ha ett centralt placerat luftintag och endast en motor. Antenner antas vara strukturintegrerade. Teknisk tidshorisont är år 2015-2020.

**Start och landning:** Bas 90: Start och landning skall kunna utföras på en 800 m lång bana. För landning gäller detta med bromskoefficient 0.35. Rullsträcka 800 m; 15 m höjd skall nås efter 1000 m.

**Räckvidd:** 1000 km,  $M=0.85$  för  $H=11$  km

**Max fart:**  $M=0.95$  för  $H=0$  km

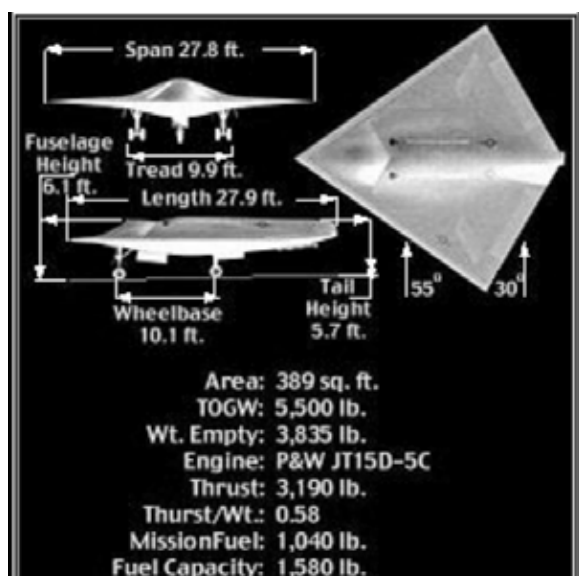
**Rollprestanda:**  $90^\circ$  på 1.7 s,  $V>450$  km/h

**Nz max** 9 g

**Nyttolast** 1000 kg. Volym för lastutrymme:  $L \times B \times H = 3.7 \times 1.1 \times 0.8 \text{ m}^3$

### **Förslag till beväpning för Lågsignatur-farkost**

- 1 8 x Small-Diameter Bomb (130 kg/styck)
- 2 4 x Mk82 bomber (241 kg/styck)



*Figur 1. Planformen på EIKON ges av Pegasus utformning*

EIKON har i sin första version varit helt slät och elektriskt ledande (PEC). Inga klaffar, roder, cockpit, luckor, luftintag eller utlopp har funnits. Det är denna variant som tillverkats i skalmodell och som använts för beräkningar och mätningar i radarområdet. Detta har gjort att viktiga signaturbidrag saknas och å andra sidan att vissa signaturreducerande åtgärder inte har studerats. De första beräkningarna i det optiska området utgick också från denna modell. Under 2005 har en mer realistisk modell med utlopp och motor studerats. Även intag finns i den nya modellen men effekter därav har tyvärr inte analyserats m.a.p. optisk signatur p.g.a. tidsskäl.

## 2.2 FRAMDRIVNING

Framdrivningssystemet som använts i analysen har hämtats från projektet *Framdrivningsintegration* som under perioden genomförts inom FoT25 vid FOI. Till framdrivning räknas intag, motor och utloppsmunstycke. Samverkan har skett med Volvo Aero Corporation, se [6]. Det här studerade utloppsmunstycket har beteckningen Munstycke 6.0 och är den slutliga



aerodesignen framtagen av Volvo Aero Corporation inom projektet TVC/LO Intag och utlopp inom FoT25.

### 3 MULTIDISCIPLINÄR OPTIMERING – FÖRSTUDIE

Vid utformning av signaturanpassade flygfarkoster måste ett flertal olika discipliner integreras såsom metoder för analys av optisk signatur och radarsignatur samt metoder för utformning av aerodynamiska och flygtekniska egenskaper. Ett mål vid utformningen av en signaturanpassad flygfarkost kan vara att minimera signaturen med avseende på ett antal hotsensorsystem under förutsättning att ett antal uppställda krav med avseende på aerodynamiska och flygtekniska egenskaper uppfylls (se avsnitt 2). Vi kan uttrycka detta som att vi har ett problem i multidisciplinär optimering, grovt formulerat: Minimera signaturen under tvång (se nedan för definition av tvång) på aerodynamiska och flygtekniska egenskaper. Detta är dock i allmänhet ett mycket komplicerat problem ty de metoder som idag används för modellering och simulering av optisk signatur, radarsignatur, aerodynamiska egenskaper, hållfasthet m.m., är ofta mycket komplexa och de är implementerade i avancerade datorprogram som i många fall tar lång tid att köra för ett specifikt fall. Många optimeringsproblem är i sig själva mycket svåra att lösa (till rimlig kostnad i tid och pengar) och att då koppla optimering till komplexa beräkningsmetoder för datorbaserad simulering är självklart ett mycket svårt problem att lösa. Vidare kan man i praktiken bara lösa optimeringsproblem med ett begränsat antal frihetsgrader, eller designparametrar. Man kan t.ex. ofta inte i praktiken lösa optimeringsproblem där en geometri godtyckligt kan deformeras. En godtycklig deformation av geometri har nämligen oändligt många frihetsgrader och även en finindeldad diskretisering av geometrin resulterar i allmänhet i allt för många frihetsgrader. Man kan dock tänka sig att ”optimera” vissa enklare delproblem där man begränsar antalet frihetsgrader och utnyttjar att delproblemet i praktiken kan lösas oberoende av andra delproblem. Som exempel kan man t.ex. tänka sig att egenskaper hos (tunna) ytskikt på en flygkropp kan optimeras med avseende på signaturegenskaper utan att nämnvärt påverka aerodynamiska egenskaper. Ett annat exempel kan vara att man deformerar geometrin hos luftintag (eller utblås) med någon enstaka parameter och försöker minimera (eller åtminstone minska) signaturen med bibehållande av flygtekniska krav.

I vad som följer kommer vi att presentera en översikt av metoder som kan vara av värde vid multidisciplinär optimering. Vi kommer speciellt att fokusera på metoder som kan hantera en del av de svårigheter som uppstår vid multidisciplinär optimering. Exempel på potentiella svårigheter vid multidisciplinär optimering är:

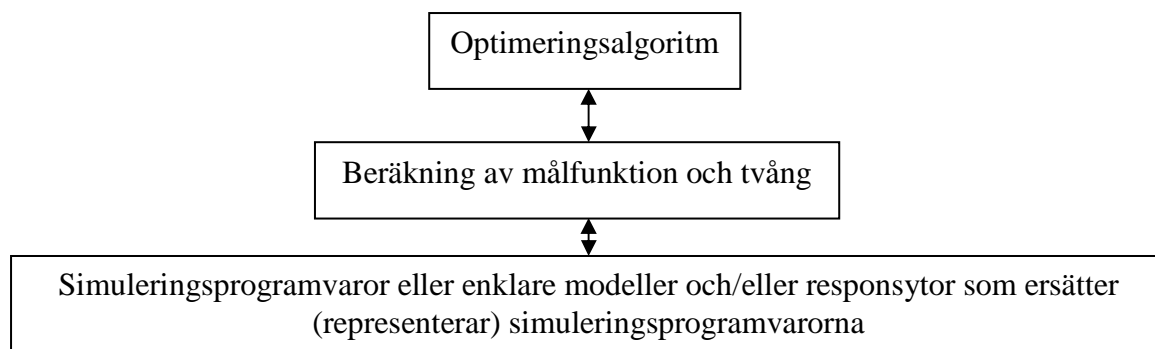
1. Svårigheter att bilda en lämplig målfunktion (kostnadsfunktion) på grund av att multidisciplinär optimering kan kräva att flera olika (och ibland motverkande) målsättningar vägs mot varandra. Ett behov av att väga maximal dragkraft från en jetmotor mot signaturanpassningskrav såsom upptäcktsavstånd skulle t.ex. kunna uppstå. Vi kommer dock inte här att närmare studera hur vi bäst konstruerar lämpliga målfunktioner för våra applikationer. Nämnas kan dock att visst stöd kan fås från metoder och exempel beskrivna i litteraturen, se t.ex. [7].
2. Den tid det tar att beräkna ett enda värde av målfunktionen (som kräver evaluering av beräkningsmodeller för signatur m.m.) för en uppsättning beslutsvariabler är ofta mycket stor. Detta ställer stora krav på att antingen kunna reducera antalet beräkningar av målfunktionen och/eller att kunna reducera beräkningstiden för att beräkna målfunktionen.
3. Det är ofta inte möjligt att analytiskt beräkna derivator av målfunktion och tvång, vilket gör att man är hänvisad till att antingen beräkna derivator numeriskt eller att

använda derivatafria metoder för optimeringen. Båda dessa alternativ ökar normalt beräkningstiden för optimeringen.

4. Optimeringsproblemet har ofta ett flertal lokala optima av vilka endast ett är ett globalt optimum. Metoder för global optimering är ofta långsammare än lokalsökningsmetoder.
5. Vid multidisciplinär optimering ingår oftast parametrar som har en osäkerhet. Sådana parametrar med osäkerhet kan t.ex. vara tillverkningstoleranser, osäkerheter i materialparametrar m.m. Det är därför ofta relevant att optimera olika typer av statistiska mått, och metoder för optimering under osäkerhet är därför av intresse. Metoder för optimering under osäkerhet är dock normalt sett mer beräkningskrävande än optimering utan osäkerhet.

I vad som följer kommer vi att kortfattat ge en översikt över optimeringsmetoder i allmänhet och i synnerhet nämna metoder som på något sätt är relaterade till punkterna 2-5 ovan.

I **Figur 2** illustrerar vi schematiskt processen för deterministisk multidisciplinär optimering, där beräkningen av målfunktion och tvång tar data från exekvering av en eller flera simuleringsprogramvaror, t.ex. programvaror för signatursimulering. Eftersom simuleringsprogrammen ofta är mycket beräkningskrävande, är det vid multidisciplinär optimering ofta lämpligt att använda sig av metoder och modeller som approximativt ger samma resultat som simuleringsprogrammen. I vissa fall kan enklare analytiska (fysikaliska) modeller användas i stället för simuleringsprogrammen. I andra fall kan man med Monte Carlo-metoder (inklusive Latin Hypercube och kvasi-Monte Carlo-metoder) generera responsytor (oftast minstakvadratpassade polynom) som approximativt ger samma resultat som simuleringsprogrammen. När responsyfefunktionerna har konstruerats kan dessa beräknas betydligt snabbare än de ursprungliga programvarorna. För en översikt över metoder för att approximeras simuleringsprogram med inriktning mot applikationer i multidisciplinär optimering [8] och där nämnda referenser. Exempel på mjukvarupaket utvecklade för multidisciplinär optimering och som stödjer sig på approximeringsmetoder är DAKOTA, [9], och iSIGHT, [10].



**Figur 2. Schematisk beskrivning av optimeringsloopen mellan optimeringsalgoritm och simuleringsprogram, eller approximativa metoder som ersätter simuleringsprogrammen.**

En annan effektiv, och ofta använd, metod för att reducera beräkningstider för multidisciplinär optimering är att utnyttja parallelliseringsmetoder för att distribuera beräkningarna på flera datorer och/eller processorer.

Ett relativt generellt optimeringsproblem kan formuleras som ett problem i matematisk programmering, vilket är ett problem av formen:

Minimera målfunktionen  $J(\mathbf{u})$ , under förutsättning att

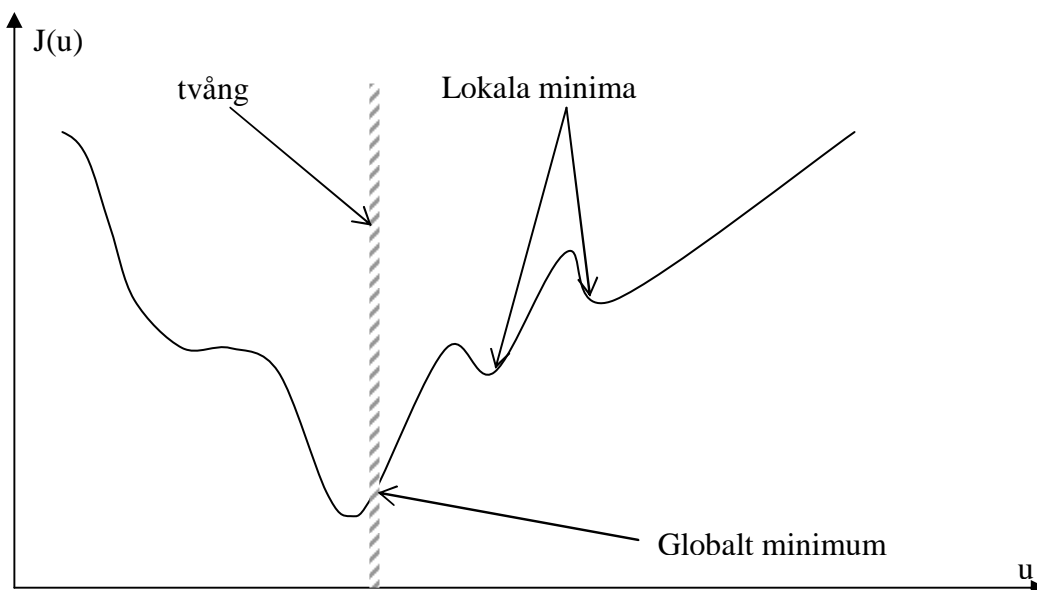
$$\psi_i(\mathbf{u}) = 0, i = 1, \dots, m'$$

$$g_j(\mathbf{u}) \leq 0, j = m'+1, \dots, m$$

Vi önskar alltså minimera en skalär funktion  $J$ , av beslutsvariabler  $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_n)$  (en vektor), under förutsättning att variablerna uppfyller att antal villkor, eller tvång. Problemet omformuleras lätt till ett maximeringsproblem genom att multiplicera målfunktionen  $J(\mathbf{u})$  med  $-1$ . Om såväl målfunktion som tvång är (godtyckliga) icke-linjära funktioner har vi ett problem i icke-linjär programmering, på engelska "Nonlinear Program (NLP)", [11]. Exempel på problemställningar som inte, åtminstone inte utan omformuleringar, faller under ovanstående definition av matematisk programmering är problem som kräver hantering av osäkerhet och problem inom spelteori. Metoder för hantering av osäkerhet återkommer vi till nedan.

Eftersom problem i icke-linjär programmering i allmänhet är svåra att lösa behandlas i litteraturen ofta ett antal enklare specialfall. Ett ofta studerat problem är optimering under linjära tvång, d.v.s. då  $\psi$  och  $g$  är linjära funktioner. Om dessutom målfunktionen är högst kvadratisk, kallas problemet för ett problem i kvadratisk programmering, "Quadratic Programming (QP)" på engelska. Vidare, om både objektfunktion och tvång är linjära, sägs optimeringsproblemet vara av typen linjär programmering. Problem i matematisk programmering som helt saknar tvång är också viktiga specialfall.

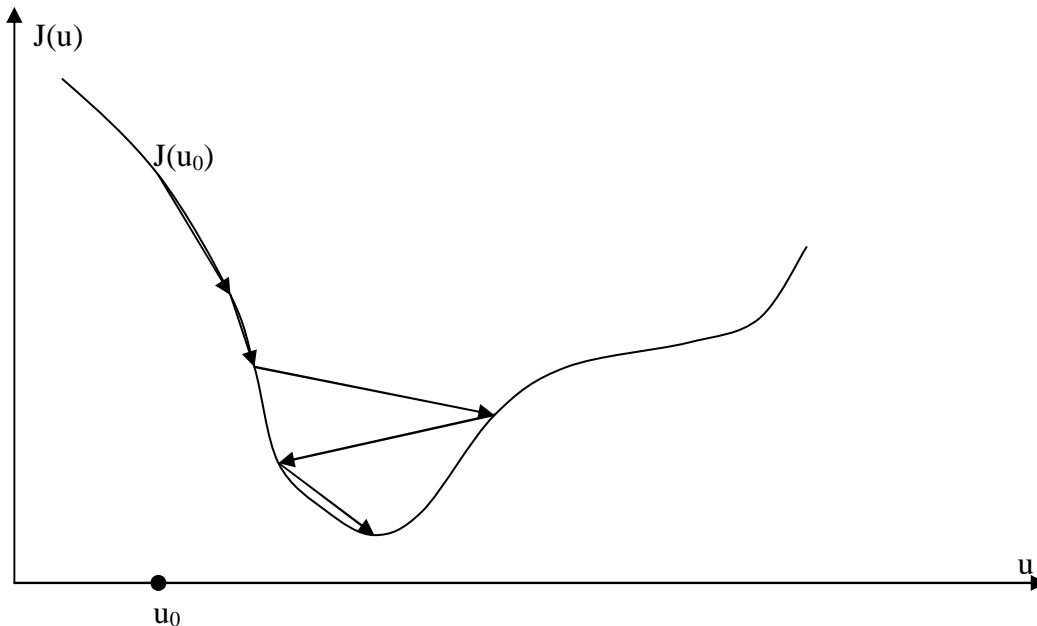
En stor utmaning i icke-linjär programmering är att vissa problem har ett flertal lokala optima, problemet sägs vara ickekonvext, av vilka endast ett är ett globalt optimum, se. **Figur 3**



**Figur 3. Olika typer av minima i ett optimeringsproblem med tvång.**

Många av de metoder som utvecklats för att lösa problem i icke-linjär (matematisk) programmering är så kallade deterministiska algoritmer, vilka oftast söker lokala minima som lösning till optimeringsproblemet och kallas därför för lokalsökningsmetoder. I många praktiska tillämpningar ger också lokala metoder tillräckligt bra uppskattningar av globala optima. Ett stort antal deterministiska algoritmer för sökning av lokala minima kan hittas i litteraturen. Sammanställningar och översikter av deterministiska metoder finns i t.ex. [12]. Principen för iterativa lokalsökningsmetoder är ganska enkel. Man väljer ett startvärde och algoritmen

anger en riktning i vilken sökning skall ske. Algoritmen väljer sedan ett lämpligt steg varpå processen upprepas tills ett lokalt minimum har påträffats. Principen illustreras i *Figur 4*



*Figur 4. Struktur för iterativ lokalsökningsalgoritm.*

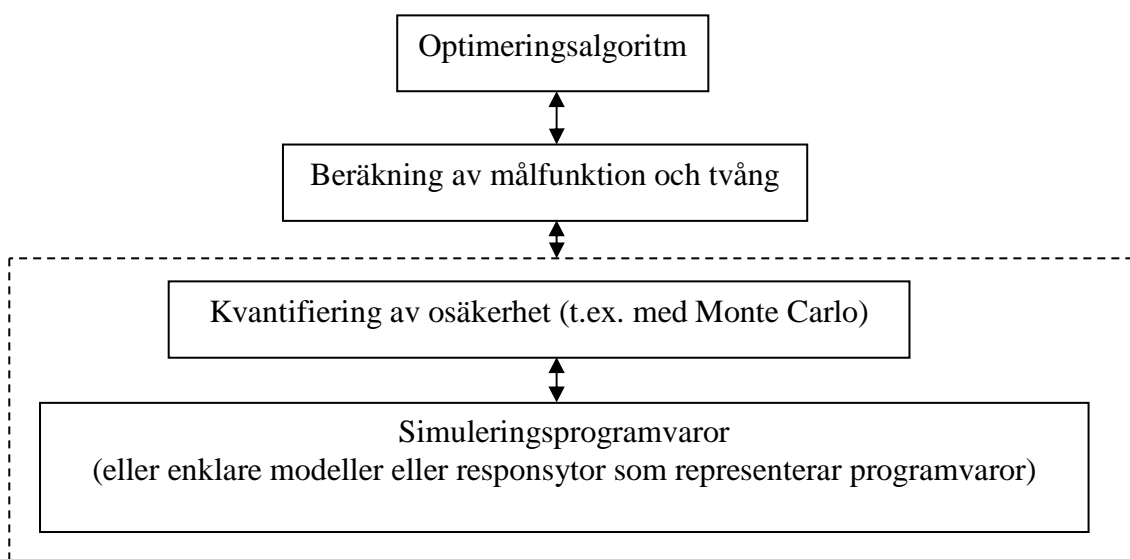
Olika lokalsökningsalgoritmer karaktäriseras bland annat av på vilket sätt sökriktningar väljs. Exempel på klasser av algoritmer är derivatafria metoder [13] och [14], gradientbaserade metoder [14] och andraderivatametoder, så kallade Newton-metoder [14]. Vi nöjer oss här med att nämna att de ofta använda Newton-metoderna i allmänhet baseras på att approximera målfunktionen lokalt med en kvadratisk modell och sedan minimera denna funktion approximativt.

Allmänt sett kan sägas att till fördelarna med deterministiska lokalsökningsmetoder hör att de är relativt enkla att förstå och att implementera. Metoderna ger vidare relativt snabbt en lösning och metodernas konvergenssegenskaper är ofta väl kända. Till nackdelarna hör naturligtvis först och främst att algoritmerna fastnar i lokala optima och ingen garanti finns att den lokala lösningen ens ligger i närheten av ett globalt optimum.

När deterministiska sökmetoder inte fungerar för global lösning av ickelinjära program används oftast någon typ av stokastisk sökmetod. Exempel på algoritmer baserade på stokastiska sökmetoder är genetiska algoritmer och "Simulated Annealing". I genetiska algoritmer, se t.ex. [14], härmas naturens evolutionsprocess. Simulated annealing, se t.ex. [15], är en heuristisk teknik som efterliknar ett avkylningsförlopp. Metoden fungerar på ickelinjära problem och en stor fördel med simulated annealing är att den ofta kan undvika att "fastna" i lokala optima. Typiskt för metoder för global optimering är att de är ganska långsamma. Vidare kan det vara svårt att på ett bra sätt välja parametervärden för metoden. Såväl genetiska algoritmer som simulated annealing är dock exempel på derivatafria metoder som inte ställer några krav på kontinuitet hos funktionerna i modellen.

I punkt 5 ovan nämnde vi att optimering under osäkerhet kan vara önskvärt för att ge större förtroende för att en robust (eller tillförlitlig lösning) erhålls från optimeringsprocessen. Op-

timering under osäkerhet kan formuleras som att vi önskar minimera en målfunktion  $J(\mathbf{u}, \mathbf{x})$ , där beslutsvariablerna  $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_n)$  betraktas som designparametrar, som kan kontrolleras av användaren, medan vektorn  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_m)$  består av stokastiska osäkerhetsparametrar. Av särskilt praktiskt intresse är fallet då man söker optimum av väntevärdet av målfunktionen, d.v.s. minimera  $E(J(\mathbf{u}, \mathbf{x}))$ , och fallet då man vill minimera sannolikheten för att målfunktionen överskrider ett givet värde, d.v.s. minimera  $\text{Prob}(J(\mathbf{u}, \mathbf{x}) > J^*)$ . I *Figur 5* illustreras schematiskt en loop för optimering under osäkerhet där beräkningen av målfunktion och tvång erhåller data från exekvering av en eller flera simuleringsprogramvaror. För att kvantifiera fortplantning av osäkerheter används t.ex. lineariserad felfortplantning eller Monte Carlo-baserade metoder, se t.ex.[16]. För en översikt av metoder för optimering under osäkerhet, se [18]. Generellt kan sägas att eftersom kvantifiering av osäkerhet i optimeringsproblemet ökar problemets komplexitet ökar också behovet av att använda någon typ av approximeringsmetod för simuleringsprogramvarorna eller förenklade modeller ytterligare.



*Figur 5. Schematisk beskrivning av optimeringsloopen mellan optimeringsalgoritm, simuleringsprogram och metod för kvantifiering av osäkerhet.*

En kortfattad allmän översikt av metoder för multidisciplinär optimering har presenterats i detta avsnitt. Vilken metod, eller vilken kombination av metoder, som bör användas i ett specifikt multidisciplinärt optimeringsproblem, som är av intresse för oss, beror av ett antal faktorer. Avgörande är antagligen i många fall huruvida man kan genomföra optimeringsloopen "tillräckligt" många gånger med de beräkningsresurser som finns tillgängliga. Ibland är det kanske möjligt att minska beräkningstiden genom att använda olika typer av approximeringsmetoder, medan detta i andra fall inte är möjligt och man blir kanske tvungen att istället lösa ett enklare optimeringsproblem.

## 4 KRAVSÄTTNING INOM OPTISKA OMRÅDET

I den lägesrapport [1] som summerar projektets aktiviteter under 2004 finns en beskrivning av hur krav för en flygande plattform kan tas fram. För det optiska området leder det fram till en diskussion om principer för beräkning av kontrastkrav. I denna rapport fortsätter den diskussionen och dessutom tas krav för några exempel på spaningsensorer och sikten fram.

#### 4.1 PRINCIPER FÖR BESTÄMNING AV KONTRASTKRAV

I [1] presenteras uttryck som ger den största tillåtna irradiansdifferens  $E_{diff}$  som ett ej upplöst mål får uppvisa relativt sin bakgrund:

$$E_{diff} = \left| \frac{1}{R^2} \sum_i^{delelement} (L_i^T \tau + L_a - L^B) A_i^T \right| < \Lambda \cdot NEI \quad (4.1)$$

där

$R$	avståndet mellan målet och sensorn
$\tau$	atmosfärens transmission mellan målet och sensorn
$L_i^T$	radiansen hos målet för målets delelement $i$
$L_a$	atmosfärens radiansbidrag från sträckan mellan mål och sensor
$A_i^T$	projicerade arean för målets delelement $i$
$L^B$	radiansen hos bakgrunden
$NEI$	Noise equivalent irradiance. Brusnivå eller klotternivå som är begränsande
$\Lambda$	tröskel för $SNR$ som sätts beroende på önskad falsklarmssannolikhet och andra signalbehandlingsrelaterade faktorer

För fallet att målet är större eller lika med arean av hotsensorns synfält,  $A_{IFOV}$ , och målradiansen konstant övergår kravet till ett radianskrav:

$$L_{diff} = \left| L^T \tau + L_a - L^B \right| < \Lambda \cdot NEI \cdot R^2 \frac{1}{A_{IFOV}} = \Lambda \cdot NER \quad (4.2)$$

där

$A_{IFOV}$	den area vid målet som ett sensorelement ser
$NER$	Noise equivalent radiance. Brusnivå eller klotternivå som är begränsande p.s.s. som för $NEI$ .

I [1] beskrivs hur de olika parametrarna i ekvationerna kan tas fram. Här följer en kompletterande diskussion.

Vid framtagning av kraven måste ett dimensionerande fall identifieras och karakteriseras. När det gäller krav som baseras på mål/bakgrundskontrast är det i fallet flyg mot himmelsbakgrund extremt beroende av atmosfärsförhållandena, dels i form av transmissionsförluster genom atmosfären men också i form av klotternivåer hos himmelsbakgrunden. Effekterna och variationerna är störst för låg höjd och blir lindrigare för höghöjdsfall. Problemen med höga höjder är att mängden tillgängliga data rörande atmosfären är lägre. Kraven kan utformas för tydliga vackert-väder-fall med klar himmel och god sikt och blir i de fallen tämligen stränga eftersom klotternivån är låg. För himmel med varierande molnighet blir kontrastkraven lindrigare. Vilket fall som väljs är ett principbeslut som har sin motsvarighet inom andra områden. Ska man dimensionera mot värsta fallet eller mot det mest sannolika? Det ligger bortom denna rapport att gå vidare in på det. I avsnittet nedan genomförs en beräkning av kravnivåer för klar himmel.

Ekvationerna ovan utgår från att kraven på ett relativt okomplicerat sätt relateras till brusnivån i sensorn eller till klotternivån i bakgrunden. Detta är fundamentala parametrar men beskriver inte fullständigt duellen mål – sensor. Det antas bl.a. att bakgrunden är homogen med en viss (slumpmässig) variation. För fall med varierande molnighet bör bakgrunden beskrivas mer fullständigt. Ett exempel är det fall när ett mål passerar en molnkant. Det kan ha en god kon-

trast både mot himlen och molnet – kanske med olika tecken – men när det rör sig nära molnkanten blir det mycket svårt att detektera. Man kommer alltså att ha ett mål som tidvis har bra kontrast och tidvis dålig. Kan det omvandlas i krav?

Funktionen hos sensorsystemets signalbehandling är också en viktig del i duellen. I parametern  $A$  ovan gömmer sig signalbehandlingens förmåga. Ett alternativt sätt vore att inkludera konkret signalbehandlingsförmåga i kravet, exempelvis i form av krav på maximal detektionssannolikhet för en viss sensorspecifikation. Nackdelen med det angreppssättet är att kravmålet blir mer komplext och besvärligare att använda i designarbetet. Anknypande till detta är frågan om kravsättningen ska relatera till detektion, klassificering, igenkänning eller målföljning.

#### 4.2 EXEMPEL PÅ SPANINGSSENSORER OCH SIKTEN

För att exemplifiera kravsättningsprocessen har krav tagits fram för ett antal sensorer inom IR-området, IRV. De representerar både äldre system och nyare spetsystem. Som förebild till de äldre systemen har sensorer vid institutionen för IR-system på FOI använts eftersom de är väl kända och mätdata finns. Sensorsystemen kan man tänkas använda som markbaserade spaningssensorer eller som sikten.

De äldre sensorerna begränsas av deras brus medan de nyare är begränsade av klottret i bakgrunden. En tidigare analys [19] av bakgrundens variabilitet, som genomförts vid FOI, har använts för att uppskatta klotternivån för de äldre systemen. Klotternivån sattes till standardavvikelsen för ett område strax över horisonten. Värden för juni 2000 och februari 2001 har använts och de minsta värdena för klar himmel valdes för dag respektive natt. Nivån visade sig vara likartad för dag/natt respektive vinter/sommar. Denna klotternivå har legat till grund för uppskattningar även för de modernare systemen. Att göra klotteruppskattningar för ett annat synfält och våglängdsområde relativt mätdata innebär en osäkerhet. I Tabell 1 finns en sammanställning av beräknade NEI och NER för sensorerna. Vid beräkningen har en konstant klotternivå och NER antagits för de sensorer som har flera olika synfält. Värdena på NER och NEI är där mer osäkra för SC3000 och Emerald LR.

Tabell 1 Exempel på hotsensorer för framtagning av krav.

Kategori	Modell-exempel	Antal element	synfält/ IFOV	NEI	NER	Begr.
			°/mrad	$10^{-12}$ W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup> /sr	
Äldre scannande IRV LWIR 8-12 µm	Thermovision 900 LW	272x136	5 x2,5 / 0,4	9600	0,06	Brus/ klotter
Semi-modern stirrande IRV LWIR 8-9 µm	ThermaCam SC3000	320x240	7,5x5 / 0,4 (zoomläge)	2400	0,015	Klotter
Äldre scannande IRV MWIR 3,5-5 µm	Thermovision 900 SW	272x136	5 x2,5 / 0,4	2000	0.013	Brus
Modern stirrande IRV MWIR 3,7-4,8 µm	CEDIP Emerald LR	640x512	22x17/0.58 (wide)	1600	0,005	Klotter
			6,6x5,5/0.18 (medium)	160	0,005	
			1,7x1,4/0,045 (narrow)	10	0,005	

### 4.3 KRAV

Vid beräkning av krav kommer endast fallet rakt framifrån att hanteras. Avståndskravet, hotsensorn och målets storlek avgör om målet kommer att vara upplöst eller inte. Detta påverkar i sin tur om ett radians- eller irradianskrav ska ställas. I anvisningarna till projektet angavs avståndskravet 1,5 km i framifrånsektorn. För EIKON innebär det vinkelupplösningen 0,7 mrad för höjden vilket innebär att alla sensorer i Tabell 1 kommer lösa upp målet. Som en komplettering studeras här också avståndet 5 km och då blir EIKONs storlek 0,2 mrad vilket innebär att vissa sensorer inte riktigt löser upp målet. EIKON kommer dock att vara upplöst med hänsyn till dess bredd och därför antas här för enkelhets skull att den är upplöst även för 5 km. Om tröskeln sätts  $\Lambda=5$  blir kraven enligt Tabell 2 för det upplösta fallet eftersom

$$L_{\text{diff}} = \Lambda * \text{NER} \quad (4.3)$$

Tabell 2 Krav för några exempel på hotsensorer i framifrånaspekten.

Kategori	Modellexempel	Ldiff
		W/m <sup>2</sup> /sr
Äldre scannande IRV LWIR	Thermovision 900 LW	0,3
Modernare stirrande IRV LWIR	ThermaCam SC3000	0,075
Äldre scannande IRV MWIR	Thermovision 900 SW	0,065
Modern stirrande IRV MWIR	Emerald LR	0,03

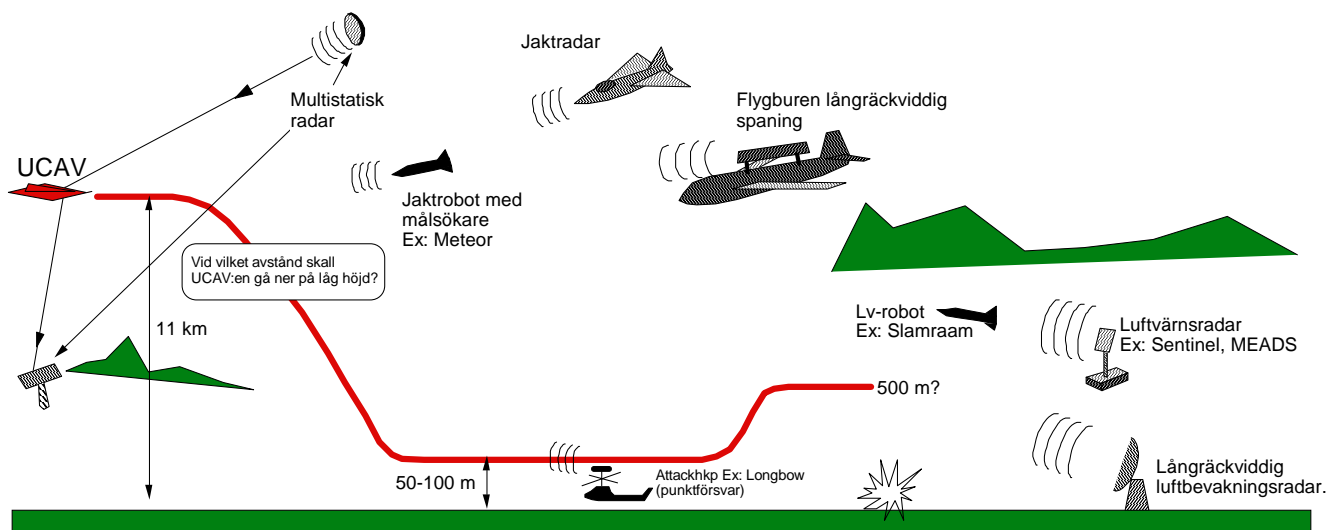
Dessa krav för radiansdifferensen mål/bakgrund är gemensamma för de båda avstånden. Inför designprocessen kan dessa krav genom ytterligare arbete omformas till krav på ytbeläggning t.ex.



## 5 KRAVSÄTTNING INOM RADAROMRÅDET

### 5.1 HOT OCH SENSORER

**Figur 6** visar schematiskt de vanligaste radarhoten mot en anflygande UCAV av typ EIKON, som kan förutses omkring 2020. Samtliga representerar kategorin spetsteknologi. Hoten beskrivs i följande avsnitt.



**Figur 6. Radarhot mot anflygande EIKON (banprofilen i rött).**

#### 5.1.1 Markbaserad långräckviddig luftbevakningsradar

Räckvidden för denna radartyp ges delvis av fysikaliska lagar och kan förväntas ligga omkring 400 km mot mål av storleksordningen 1 m<sup>2</sup> radarmålarea med klotterfri bakgrund. Frekvensen kan ligga mellan VHF (30-300 MHz) upp till S-band (2-4 GHz), med L-band (1-2 GHz) som ett typiskt val, med hög medeleffekt (upp till ca 40 kW) och stor antennarea. Radarsystemen är allmänt av s.k. 3D-typ, d.v.s. mäter in mål i azimut, elevation och avstånd. Höjdtäckningen är upp till 50 km. Antennens avsökning av spaningsområdet kan ske mekaniskt (i azimut) eller elektroniskt.

#### 5.1.2 Flygburen långräckviddig spaningsradar

Flygburen långräckviddig radarspaning finns idag operativt eller i beställning/utveckling i ett antal länder (Brasilien, Chile, Indien, Israel, Kina, Ryssland, Sverige, Sydafrika, UK, USA m.fl.; se [20]). De modernaste varianterna är utrustade med elektroniskt fäststyrda antenner, som är sidtittande, placerade konformt på flygkroppen och ev. kompletterade med framåt- och bakåt/nedåttittande antenner i flygplanets för och akter. Denna variant bör vara i allmänt bruk vid prognostidpunkten. Radarn kommer att vara av multifunktionstyp med detektions-, följnings-, och igenkänningsfunktioner med flexibelt utnyttjande av antennkapaciteten och med STAP (Space Time Adaptive Processing). Frekvensvalet baseras på vägning mellan bl.a. aktuella spaningsavstånd, målstorlek, svårighet av detektion. Aktuella frekvenser är UHF (300 MHz - 1 GHz), L-band (1 - 2 GHz), S-band (2-4 GHz), och X-band (8-12,5 GHz). Bärarna kan som idag vara medelstora till stora jet- eller turbopropflygplan, men även nedskalade radarversioner på UAV:er har föreslagits. Maximala operationshöjder mellan 6 km och 12 km. Vinkeltäckningen är 360° i azimut och minst 10° i elevation. Radarräckvidden beror av ett antal radarparametrar och måltypen. Ett grovt värde för utsänd medeleffekt är någon

kW per m<sup>2</sup> antenntyta. Maximal räckviddsgräns för de kraftfullaste versionerna ligger vid ca 800 km. Upptäcktsavstånd till små lågtflygande mål (ca 1 m<sup>2</sup> radarmålarea) är större än ca 150 km.

### 5.1.3 Jaktradar.

Radarn är koherent (mäter och kontrollerar amplitud och fas). Den använder elektroniskt fasstyrd gruppantenn (aktiv array) vilket möjliggör flexibel lobformning, oberoende spanings- och målsökningsfunktion, adaptivitet och STAP bl.a. för 2-dimensionell filtrering som undertrycker klotter men ej mål [21], [23], [24]. Antennens totala täckningsområde i rymdvinkel är större än  $3\pi$ . Radarfrekvensen är X-band (8-12 GHz) eller Ku-band (12-18 GHz). Räckvidderna är över 100 km.

### 5.1.4 Multistatisk radar

Hotet från multistatisk radar (sändare och mottagare icke samlokaliserade) är svårt att prognostisera, främst beroende på bristen på operativa system att extrapolera från. Trots att ett antal bistatiska system byggts och utvärderats har få nått förbi "demonstratorstadiet" [25]. Idag upplever man återigen en topp i intresset för multistatiska system. Några faktorer har ändrats från tidigare motsvarande perioder av intresse, bl.a. ökad teknisk kapacitet att hantera multistatiska signaler samt ökad förekomst av belysningskällor, som inte primärt är avsedda för radartillämpningen, men som kan användas för denna. Dessa källor utgörs främst av radio- och TV-sändare, samt av kommunikationssignaler i VHF och UHF-banden, s.k. "tillfällesbelysare" (eng. illuminators of opportunity). Det andra alternativet är att ha dedicerade radarsändare/belysare, vilka frekvensmässigt kan läggas på någon konventionell spaningsradarfrekvens. Sändning kan ske från jordytan, från någon luftfarkost eller från satellit. Mottagning kan ske, huvudsakligen från de båda förstnämnda plattformarna. En närmare undersökning och kvantifiering krävs i den aktuella UCAV-tillämpningen, vilket inte har kunnat göras inom projektets resursram.

### 5.1.5 Luftvärnsradar

Två luftvärnssystem som idag är på projektstadium kan vara operativa vid prognostidpunkten kring 2020. Det ena, som planeras att vara operativt 2014, är luftvärnssystemet MEADS (Medium Extended Air Defense System), en samutveckling mellan Tyskland, Italien och USA. Det kommer att innehålla tre radarsystem, för respektive spaning, eldledning och slutfasstyrning. De båda första typerna utgörs av en spaningsradar på UHF-bandet, resp. två X-bands eldledningsradarenheter av multifunktionsstyp. Båda typerna är utrustade med aktiva fasstyrda gruppantennar. Systemets mest kvalificerade robot utgörs av Pac-3 som tagits fram som en uppgradering av Patriot-systemet. Pac-3 är slutfasstyrd, försedd med en radarmålsökare som arbetar på mm-vågsbandet (Ka-bandet, 27-40 GHz). Som enklare och billigare varianter, som är avsedda för enklare mål, t.ex. UAV:er, övervägs bl.a. markbaserade Amraam (Slamraam, Surface-Launched Advanced Medium Range Air-to-Air Missile) eller Meteor, som är under utveckling i Europa.

Det andra luftvärnshotradarsystemet är det amerikanska Sentinel Enhanced Target Range and Classification Radar (ETRAC), en uppgradering av AN/MPQ-64 Sentinel stridsfält-/luftförsvarsradar [22]. Systemet är avsett för korträckviddigt luftförsvar. Uppgraderingen avser att förbättra förmågan att upptäcka mål med liten radarmålarea, t.ex. en UAV. Radarn arbetar på X-bandet och har en fasstyrd gruppantenn med 360° azimuttäckning. Dess instrumenterade räckvidd är 40 km, höjdtäckningen 4 km.

Som en punktförsvarsradar kan nämnas spanings/eldledningsradarn Longbow, i USA:s attackhelikopter Apache. Den arbetar på Ka-band (35 GHz) och kan användas mot lågflygande mål i en puls-dopplermod. Räckvidden är 8 km.

#### 5.1.6 Målsökarradar i jaktrobot

Jaktrobotar med lång räckvidd kommer att vara försedda med aktiva radarmålsökare. Även om den egna målsökarräckvidden är högst ca 10 km kan den avfyras på mer än 100 km avstånd; den erhåller då via länk lägesuppdateringar under banan. Den egna målsökaren används för slutfasstyrning mot målet. Frekvensen kan vara Ku-band. Ett exempel på en radarjaktrobot av det beskrivna slaget, som kan förväntas vara operativ vid prognostidpunkten är Meteor, som är under utveckling i Europa. Den har som nämnts ovan också föreslagits som kandidat i luftvärnssystemet MEAD.

### 5.2 KRAVSÄTTNING<sup>1</sup>

I de följande avsnitten 5.1.25.2.8 ges en beskrivning av kravsättning generellt vid radar. I avsnitt 5.2.9.6 tillämpas en förenklad variant i EIKON-fallet, som kan ses som ett exempel, som varit realistisk att genomföra inom projektet.

#### 5.2.1 Kravsättning av radarmålarea

Kravsättning av radarmålarea mot olika radarsystem och bakgrundsmiljöer kan utföras med flera olika modeller, metoder och principer. Modellerna kan utformas deterministiskt eller statistiskt eller efter olika blandformer. De kan innehålla mer eller mindre kända egenskaper och parametrar för radarsensor, mål och bakgrund. Kravsättningen baseras på prestandamått, och både objektiva och subjektiva inslag kan ingå.

Kravsättning av radarmålarea kan ses som ett matematiskt inversproblem, där det gäller att från givna radarfunktioner med olika scenarier, radarsensorer och bakgrunder beräkna krav på radarmålarea som uppfyller prestandamåtten.

#### 5.2.2 Prestandamått

För en fullständig kravsättning behövs prestandamått på alla relevanta radarfunktioner såsom detektion, målinmätning, målföljning och igenkänning. Prestandamåtten beskriver möjligheten att genomföra respektive funktion. I detta arbete kommer endast kravsättningen i samband med detektion att behandlas närmare. Den är den primära av nämnda funktioner och påkallas före de övriga.

Som det grundläggande prestandamåttet för EIKON-målet i förekommande bakgrund föreslås detekteringssannolikhet med en förutbestämd falsklarmsannolikhet. Detta bygger på Neyman-Pearson-kriteriet i statistisk detekteringsteori, när man inte har en bra uppfattning på förhand om sannolikheter för mål och bakgrund och kostnader för olika typer av beslut [26]. Man väljer en så låg falsklarmsannolikhet för hotradarn att åtgärder som bekämpning mot falska mål får en tillräckligt låg kostnad för användaren. Ofta sker detekteringen i flera steg, vilka leder till ett slutligt detektionsbeslut. Metoderna för krav och värdering av radarmålarea tar hänsyn till detta vid beräkningarna.

<sup>1</sup> Detta avsnitt bygger på tillämpliga delar av [42]

Det föreslagna prestandamåttet är otillräckligt för de mer komplexa radarfunktionerna som målinmätning, målföljning och igenkänning. För målinmätning och målföljning krävs flera mätningar under en viss tid och med tillräcklig noggrannhet för att skatta målets tillståndsvektor. Detta kan beskrivas med en sannolikhet från ett antal mätningar under en viss tid, kombinerat med noggrannhetskrav. Denna sannolikhet är ett kumulativt mått på att radarfunktionerna kan utföras med tillräckliga prestanda.

### 5.2.3 Analysmetoder

Vid kravsättningen är målet givet. Radarsignaturen kan vara känd i olika hög grad, alltifrån givet av omfattande mätningar till en ren ansats. Målet skall testas mot tillämpliga radarsystem, bakgrundsmiljöer och taktiska och tekniska målsättningar.

Bedömningen av ett mål kan ske med olika grad av precision. Här kommer att användas en indelning av analysmetoderna i tre nivåer:

- 1) Radarekvationen
- 2) Signalsimulering
- 3) Elektromagnetiska beräkningar

Komplexiteten för analysmetoderna ökar allmänt från nivå 1 till 3. Olika typer av modeller och mätdata ingår i metoderna beroende på krav på beräkningsbörda, noggrannhet, robusthet och realism. Blandningar av olika analysmetoder är möjliga för ökad noggrannhet och realism i beräkningarna. Mätdata kan ersätta modeller och tvärtom för ökad robusthet. Detta är även viktigt för validering av modeller och fysikalisk förståelse av olika fenomen.

#### 5.2.3.1 Radarekvationen

Analysmetoder baserade på radarekvationen använder effektmått för ingående storheter och deterministiska och statistiska modeller för att beskriva variationer i radarsignaler. Detta innebär att kvadratiska medelvärden av stokastiska variabler används vid beräkningarna och att fördelningsfunktionerna för de stokastiska variablerna måste vara kända eller modellerade för att kunna bestämma sannolikheter och andra statistiska mått vid beräkningarna. Radarekvationen är primärt avsedd för detektionsberäkningar, men kan ge fingervisning om möjligheterna till följning och igenkänning, genom värden på relativa storlekar på mål- resp. bakgrundsreturer.

#### 5.2.3.2 Signalsimulering

Analysmetoder baserade på signalsimulering använder simulerade komplexa signaler som realiseringar av radarsignaler utgående från deterministiska och statistiska modeller. Simuleringarna ger statistiska utfall för stokastiska signaler och flera simuleringar måste göras med Monte-Carlo-teknik för att beräkna medelvärden, sannolikheter och andra statistiska mått. Signalsimulering kan använda mätdata direkt utan att gå via en analytisk modell för olika typer av signaler.

#### 5.2.3.3 Elektromagnetiska beräkningar

Analysmetoder baserade på elektromagnetisk beräkning använder beräknade fält och signaler utgående från beskrivningar av radarsensor, mål och bakgrund med deterministiska och statistiska modeller. Elektromagnetisk beräkning ger de fysikaliskt mest realistiska signalerna men kräver kända egenskaper för ingående objekt. Detta är enbart möjligt i enklare fall eller

vissa delproblem. Statistiska variationer måste oftast införas med Monte-Carlo-teknik eller i vissa fall med analytiska metoder.

#### 5.2.3.4 Applicering

Analysmetoderna beräknar detekteringssannolikheten, som det valda, grundläggande prestandamåttet för målet i en brusbakgrund jämte eventuellt klotter, med en förutbestämd falsklarmsannolikhet. Detekteringssannolikheten bestäms av målsignal och bakgrundssignal i den aktuella upplösningcellen och den beräknade detekteringströskeln. Falsklarmsannolikheten bestäms på samma sätt av bakgrundssignalen i den aktuella upplösningcellen och den beräknade detekteringströskeln. Detekteringssannolikheten för ett visst mål kan komma att variera beroende på om tröskeln sätts adaptivt med hänsyn till bakgrunden (CFAR, Constant False Alarm Rate) för att få en så nära som möjligt konstant falsklarmsannolikhet, falsklarmfrekvens och falsklarmtäthet. Starkt varierande bakgrund kan ge falsklarm kopplade till variationerna och då måste falsklarmsannolikheten bestämmas med hänsyn till dessa.

#### 5.2.4 Scenarier och funktioner

Detekteringssannolikheten beror på ett antal olika parametrar och scenariovariationer. Primärt beror detekteringssannolikheten på målsignal/bakgrundsförhållandet. Fördelningsfunktionen för summan av målsignalens variationer och bakgrundssignalens variationer bestämmer detekteringssannolikheten vid en viss tröskel. Tröskeln är i sin tur variabel beroende på bakgrundssignalens variationer.

Detekteringssannolikheten kan beräknas i olika scenarier som funktion av radarmålarea, aspektvinkel i azimut och elevation, höjd och hastighet för målet och som funktion av upplösning, avstånd, hastighet och höjd för olika radarfunktioner. Detta ger en uppfattning om upptäcktsprestanda för ett visst scenario med given bakgrund och givna positioner för mål och radarsensor. Om scenariot eller bakgrunden inte är homogent eller om målet rör sig i en viss bana måste detekteringssannolikheten beräknas efter dessa variationer.

För variationer i scenariot måste deterministiska eller statistiska modeller införas så att dessa kan ingå i prestandamåtten. Detekteringssannolikheten måste integreras över dessa variationer för att få ett totalt prestandamått. Om flera mätningar krävs för radarfunktionen kan scenariots variationer medföra bättre eller sämre totalprestanda.

#### 5.2.5 Radarekvationen

Radarekvationen ger sambandet mellan utsänd och mottagen effekt under idealiserade förhållanden. Ofta är det lämpligt att använda en energiformulering, som gör den oberoende av använd signalform, om signalanpassat filter används i mottagaren. Enligt denna formulering är kvoten mellan mottagen signal och brus

$$\frac{E_r}{N_0} = \frac{E_t G_0^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 k T_0 F L} \quad (1)$$

Här är  $E_t$  utsänd energi över integrationstiden,  $N_0$  brusets spektraltäthet,  $E_r$  den energi som användes i mottagaren för detektionen (=energin över integrationstiden),  $G_0$  antennvinsten i lobmaximum,  $\lambda$  våglängden,  $\sigma$  radarmålarean,  $R$  avståndet mellan radar och mål,  $k$

Boltzmanns konstant,  $T_0$  en referenstemperatur (= 290 K),  $F$  mottagarens brusfaktor,  $L$  de dämpningar och förluster som förekommer i systemet.

Ovanstående formulering av radarekvationen tar inte explicit ställning till några fluktuationer hos radarmålarean eller deras statistik, och måste kompletteras med statistiska överväganden enligt nästa avsnitt.

Vid detektion av mål mot markbakgrund är det kvoten mellan mottagen signal (+klotter) och klotterreturen som utgör grunden för ett detektionsbeslut. Klotterreturen (effekt) är

$$C = \frac{P_t \lambda^2 \int p(t - 2R/c) G^2 \sigma^0 dA}{(4\pi)^3 R^4 L}. \quad (2)$$

Här är  $P_t$  utsänd effekt,  $p$  den utsända signaleffektens viktning i avståndsled (pulsformen vid en pulsad radar), och  $\sigma^0$  klotrets radarmålarea per belyst ytenhet. Övriga storheter är enligt (1). I (2) utförs integrationen över det belysta markområdet. Inom integrationsgränserna kan klotterreflektiviteten samt viktningfunktionerna svarande mot pulsformen och antennvinsten variera. Belysningsgränserna i avståndsled bestäms antingen av antennlobens bredd eller av signalens tidsutsträckning, se t.ex. [26], kap. 7. Som en vanlig approximation för en pulsradar med pulslängden  $\tau$  och azimutlobbredden  $\theta_B$  blir (2) med pulslängdsbegränsat klotter i avståndsled

$$C = \frac{P_t \lambda^2 G_0^2 \sigma^0 \theta_B (c\tau/2)}{(4\pi)^3 R^3 \cos \psi}, \quad (3)$$

där  $\psi$  är radarns depressionsvinkel relativt horisontalplanet.

Vid kravsättning av målsignatur söker man förhållandet mellan signal och brus (eller klotter) för ett visst avstånd, för att göra en bedömning om målets möjlighet att undgå upptäckt, följning eller igenkänning av ett radarsystem, i en bakgrundsmiljö och med antagna taktiska och tekniska målsättningar.

### 5.2.5.1 Detektion

I radarekvationen räknar man med medelvärden av ingående parametrar, inte med ett statistiskt utfall. Ekvationen ger då medelvärdet av signal till brus- eller klotterförhållandet. Variationerna hos signal resp. brus/klotter kring medelvärdena beskrivs med täthetsfunktioner. Problemet är att fastlägga dessa, varefter detektionen kan tas t.ex. som ett tröskelöverskridande av den mottagna, processerade signalen. Fluktuationerna blir beroende av det valda detektionsschemat, som kan innefatta integration över upprepade transmissioner, filtrering, CFAR (Constant False Alarm Rate) etc.

Variationerna eller osäkerheterna i storheterna i radarekvationen är i stort av två slag:

- 1) Osäkerheter på grund av ofullständiga underrättelser. Storheterna har då väldefinierade, deterministiska värden, som emellertid värderaren/kravställaren inte känner.
- 2) Osäkerheter som användaren väljer att klassa som icke-deterministiska, som bakgrundsfluktuationer enligt någon statistik. En huvuduppgift är att beskriva denna statistik och välja rätt parametrar och deras värden för problembeskrivningen.

### 5.2.6 Signalsimulering

Signalsimulering bygger på komplexa signaler som realiseringar av radarsignaler utgående från deterministiska och statistiska modeller. Signalerna genereras med de aktuella vågformerna från radarsändaren, sänds ut via sändarantennens antenndiagram, utbredds och reflekteras med impulssvar eller överföringsfunktioner från mål och klotter, tas emot via mottagarantennens antenndiagram, förstärks i mottagaren med en viss brusfaktor samt signalbehandlas och databehandlas i mottagaren, [27].

Signalsimulering ger för varje simulering ett statistiskt utfall av ingående stokastiska signaler och flera simuleringar måste göras med Monte-Carlo teknik för att beräkna medelvärden, sannolikheter och andra statistiska mått. Detta kan vara mycket beräkningskrävande om falsklarms sannolikheten skall uppskattas för att värdera en given radar i en bakgrundsmiljö. För värdering av detektering av mål krävs ett färre antal simuleringar för att uppnå en statistisk signifikans.

De olika delarna i signalsimulering motsvarar de olika faktorerna i radarekvationen. Komplexa signaler, viktsfunktioner, filter etc. ersätter radarekvationens effektmått och parametrar. Signalsimulering efterliknar den verkliga radarns signaler och målets och bakgrundens reflektionssegenskaper. Olika typer av ofullkomligheter i radarn kan simuleras och analyseras. Komplexa interaktioner mellan radar, mål och bakgrund kan införas utan en föregående analytisk beräkning. Radarns signalbehandling och databehandling kan simuleras mer verklighetstroget än med andra metoder.

### 5.2.7 Elektromagnetiska beräkningar

Elektromagnetiska beräkningar, som är användbara för den här aktuella systemtillämpningen, bygger vanligtvis på geometrisk optik och fysikalisk optik. Dessa är optiska approximationer av den maxwellska fältteorin, och hanterar i sina ursprungliga formuleringar inte t.ex. diffraction och mer komplicerad refraktion. Det finns dock korrektionsmetoder för att förbättra och korrigera resultaten [28]. Det finns idag kommersiellt tillgängliga programvaror för sådana beräkningar, framtagna av olika forskningsinstitut och universitet.

Det finns också "exakta" lösningsmetoder som löser Maxwells ekvationer numeriskt. Eftersom de kräver en indelning av beräkningsvolymerna i ett antal element per våglängd, växer kraven på beräkningskapacitet med ökande frekvens; de brukar därför vara begränsade till lägre frekvenser, och kallas lågfrekvensmetoder.

### 5.2.8 Värdering av metoder

Alla tre nämnda metoderna (radarekvationen, signalsimulering, elektromagnetiska beräkningar) bedöms kunna användas. Ambitionsnivån får avgöra valet. Både radarekvationsmetoden och signalsimuleringsmetoden bedöms ha goda förutsättningar för vidareutvecklingen av metoder för krav och värdering av radarmålarea. Elektromagnetiska beräkningsmetoder bedöms ha ökad tillämpning på delproblem inom krav och värdering av radarmålarea, men komplett systemvärdering bedöms ännu inte vara realiserbar.

Som nämnts finns redan exempel på kommersiella programutvecklingar, varför en marknadsundersökning bör ingå, om man överväger någon metod. Någon sådan har inte gjorts här; men vid FOIs båda radarinstitutioner har under senaste tiden två programvaror utvärderats. Den ena är SADM, utvecklad av BAE Systems, för duell mellan fartyg och anfallande robotar [30]; målsignaturer krävs som indata och måste ha producerats externt på något sätt.

Programvaran bedöms vara så allmän att den skulle kunna anpassas till den aktuella tillämpningen. Den andra programvaran är SPECRAY EM [28], utvecklad av det franska företaget OKTAL i samarbete med forskningsinstitutet ONERA. Den är en allmän programvara för radarmålareberäkningar och sensorsimuleringar i syntetiska omgivningar. Den är baserad på ray-tracingteknik och använder geometrisk optik i kombination med fysikalisk optik för spridningsberäkningarna.

### 5.2.9 Kravanalys EIKON

Två dimensionerande fall för målarean kommer att analyseras på den enklaste nivån enligt det allmänna avsnittet om kravställning ovan, nämligen med radarekvationen. Det ena fallet berör den första fasen av EIKONs anflygning mot målområdet, då farkosten befinner sig på långt avstånd och på hög höjd (11 km). Där är huvudsyftet att uppskatta avståndet då EIKON kan detekteras av en markbaserad, långräckviddig spaningsradar. Kravställningen kan antingen utgöras av ett krav på målarea så att detektionen omöjliggörs, eller ett krav på att farkosten måste ha gått ner på låg höjd för att undgå upptäckt. Låghöjdsanflygningen utgör det andra dimensionerande fallet för målarean. Där är huvudsyftet detsamma, att uppskatta detektionsavstånd, men för en hotradar i form av en flygburen spaningsradar.

#### 5.2.9.1 Hotradar: markbaserad spaningsradar

Här exemplifieras gången i en kravställning av målarea med hjälp av radarekvationen. Gången följer ett standardschema för analys av ett spaningsradarsystem med avseende bl.a. på de tre fundamentala parametrarna detektionssannolikhet, räckvidd och målarea. Det finns beskrivet i [31], bl.a. med ett schema ( [31] fig. 4.16, sid 171) och Matlab-rutiner.

Avsikten är att finna den målarea som uppfyller kravet att målet (EIKON) inte upptäcks av radarn på ett specificerat avstånd. Som radarsystem i exemplet har valts en markbaserad spaningsradar för långräckviddig spaning efter flygmål. En radar av denna typ bedöms utgöra ett kvalificerat normalhot mot en UCAV som EIKON. Parametrarna för radarn kan varieras på en mångfald sätt; eftersom avsikten här är att beskriva den principiella beräkningsgången, väljs endast en uppsättning av parametrar, utan variationer. Uppsättningen representerar en kvalificerad radarstation med prestanda som delvis begränsas av fysikaliska lagar och därmed kan anses vara relativt konstanta och möjliga att kvantifiera för den aktuella tidsperioden. Förebilden är den franskbyggda radarn MPR, som ingår i NATO-försvaret. I Sverige går den under benämningen PS-66. De flesta använda data har tagits från [32]. Några parametrar har skattats. Detta ger värden enligt Tabell 3 på de radarparametrar som ingår i beräkningsexemplet.



Tabell 3 Radarparametrar för sökradarexempel

Storhet	Värde
Frekvens ( $f$ )	3 GHz (S-band); (våglängd 10 cm)
Pulsrepetitionsfrekvens (PRF)	250 Hz
Pulsbredd ( $\tau$ )	4 $\mu$ s
Medeleffekt ( $P_{av}$ )	40 kW
Räckviddsgräns	400 km
Avståndsupplösning	600 m
Öppningsvinkel, azimut ( $\Delta\varphi$ )	0.45°
Öppningsvinkel, elevation ( $\Delta el$ ), (flera lober)	30° (15 lober med $\Delta el = 2^\circ$ per lob)
Antennrotation ( $t$ )	10 s per varv
Bandbredd ( $B$ )	0.5 MHz
Brusfaktor ( $F$ )	8 dB
Effektiv antennarea ( $A_e$ )	25 m <sup>2</sup>
Systemförluster ( $L$ )	12 dB (15.8 ggr)

### 5.2.9.2 Signal/bruskvot vid icke-fluktuerande målarea

I sökradarfallet är det lämpligt att införa två fundamentala parametrar i radarekvationen, nämligen det avsökt rymdvinkelintervallet samt avsökningstiden. Kvoten mellan signal och brus,  $SNR$  ges enligt den omtransformerade ekvationen som ([31] sid. 33, [26] sid. 89.)

$$SNR = \frac{P_{av} A_e \sigma T}{4\pi R^4 k T_0 L F \Omega}, \quad (4)$$

där  $P_{av}$  är utsänd medeleffekt,  $A_e$  antennens effektiva area, som är den geometriska arean reducerad med en faktor  $\eta$  (aperturverkningsgraden  $<1$ ), som är ett mått på hur effektivt antennbelysningen utnyttjar den geometriska antenntytan. Vidare är i (4)  $T$  tiden för avsökning av spaningsområdet, som ges av rymdvinkeln  $\Omega$ . För den valda spaningsradarn är tiden mellan två övermålningar av ett målobjekt av en lob (återkomsttiden) lika med antennens rotationsperiod,  $t$ , och kvoten  $T/\Omega$  blir för mål nära horisonten approximativt

$$\frac{T}{\Omega} = \frac{t}{2\pi(\Delta el)}. \quad (5)$$

Övriga storheter i (4) är enligt tidigare.

Enligt avsnittet om prestandamått, förutsätts att man specificerar en falsklarmsannolikhet  $P_{fa}$ . Den bestäms av bakgrundsbrusstatistiken och är relaterad till falsklarmstiden, d.v.s. den genomsnittliga tiden mellan två falsklarm, som man kan acceptera. Detektionssannolikheten  $P_D$ , då bakgrundsbruset är gaussiskt brus, kan erhållas ur följande approximation ([31] s. 147)

$$P_D = 0.5 \times \operatorname{erfc}(\sqrt{-\ln P_{fa}} - \sqrt{SNR + 0.5}), \quad (6)$$

där den s.k. komplementära felfunktionen  $\operatorname{erfc}$  definieras av

$$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-x^2} dx. \quad (7)$$

Ansätt  $P_{fa} = 10^{-6}$ , och antag att man kräver  $P_D = 0.9$  för detektion. För detta krävs enligt (6) och (7) ett signal/brusförhållande

$$SNR = 14.25 \text{ dB}. \quad (8)$$

### 5.2.9.3 Modell för fluktuerande målarea

Det av (8) givna värdet gäller för ett icke-fluktuerande mål. För fluktuerande mål har fyra stiliserade fall undersökts av Swerling [33],[34], som ofta används för systemuppskattningar. För att avgöra vilket fall som bäst representerar EIKON visas i **Figur 7** ett histogram över uppmätta data, från mätningar på frekvensen 10 GHz (X-band) av EIKON-modellen [2], inom vinkelintervallet azimuth  $-90^\circ$  till  $+90^\circ$  och elevation  $-10^\circ$  till  $0^\circ$ , alltså för framsida/undersida vilket är representativt för en anflygning på hög höjd och långt avstånd. Målareafördelningen har en exponentialfördelad karaktär, i den meningen att den för små målareavärden är snabbt avtagande från ett maximum vid målarean noll, och att den har en utdragen svans för stora värden. Mätvärdena är alltför få för att svansen skall kunna definieras närmare.

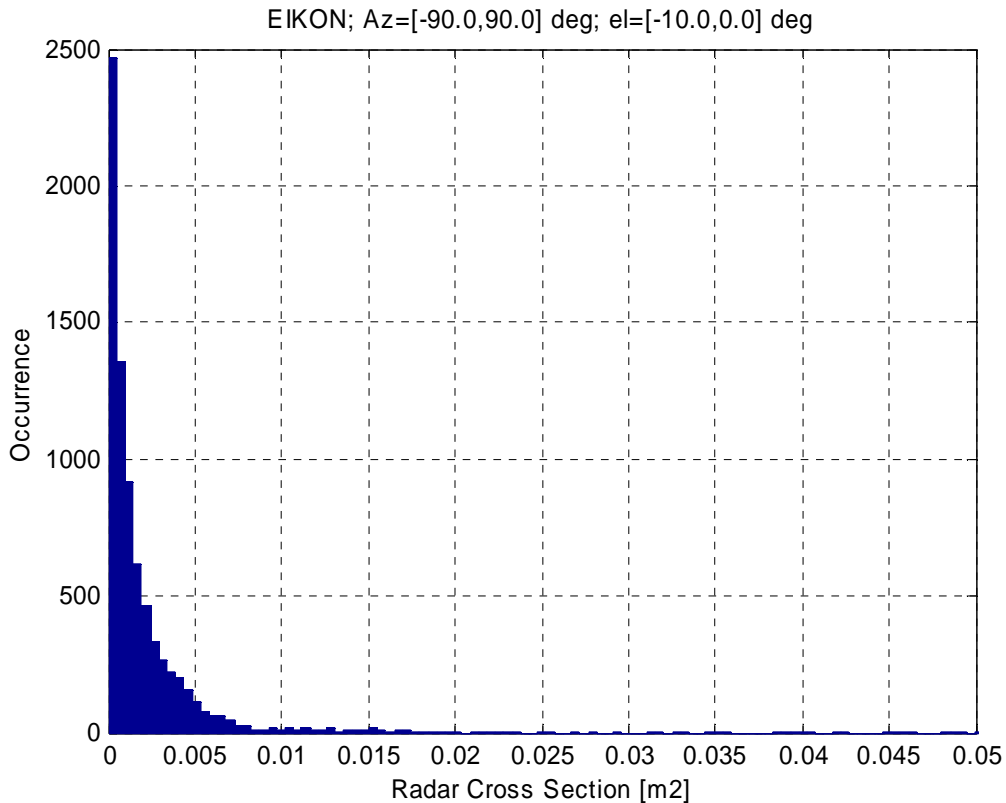
Det med avseende på mätningarna mest relevanta Swerlingfallet är Fall 1. Detta uppstår då målet består av ett antal spridare, där ingen är dominerande. Täthetsfunktionen för radarmålarean ges av en exponentialfördelning, som är en enparameterfördelning

$$p(\sigma) = \frac{1}{\bar{\sigma}} \exp\left(-\frac{\sigma}{\bar{\sigma}}\right), \quad (9)$$

där  $\bar{\sigma}$  är medelvärdet av radarmålarean  $\sigma$ .

Uttrycket (9) tas som matematisk modell för EIKON-modellens målareafluktuationer, med ett medelvärde lika med mätningarnas

$$\bar{\sigma}_{Eik,mod} = 0.007 \text{ m}^2. \quad (10)$$



*Figur 7. Histogram över fördelningen av mätdata av EIKON-modellen, från mätningar vid 10 GHz [2], mellan azimutvinklarna  $-90^\circ$  till  $+90^\circ$  (framsektorn), och elevationsvinklarna  $-10^\circ$  till  $0^\circ$  (undersida).*

Eftersom det uppmätta objektet var en modell i skala 1:10, måste uppmätta radarmålareor skalas upp, om man vill få dem att representera objektet i naturlig storlek. Skalningen tas som för en sfär vid korta våglängder. För korta våglängder är sfärens radarmålarea oberoende av våglängden, och lika med dess geometriska tvärsnitt. Således blir fullskaleobjektets radarmålarea (medelvärde)

$$\bar{\sigma}_{Eik} = 10^2 \times 0.007 = 0.7 \text{ m}^2. \quad (11)$$

Uttrycket (9) beskriver den statistiska storleksfördelningen av målarean och utgör en aspekt på fluktuationerna. Den andra, som ingår i Swerlings modellering, är deras tidskaraktär. Swerling 1-modellen antar att fluktuationerna är relativt långsamma, med fullständig korrelation av radarreturen från puls till puls, då antennen sveper över målet, men ingen korrelation mellan två spaningsvep av antennen. För ett mål med denna fluktuationstyp krävs ett ökat signal/brus-förhållande,  $SNR_{Swe1}$ , för att uppnå de ansatta värdena på  $P_D$  och  $P_{fa}$ , jämfört med det icke-fluktuerande fallets 14.25 dB enligt (8). Kravet i Swerling 1-fallet kan beräknas med en Matlab-rutin i [31], sid. 180-181. Man får

$$SNR_{Swe1} = 21.1 \text{ dB (130 ggr)}. \quad (12)$$

Detta är det signal/brusförhållande som krävs för detektion med en enda puls, med de ansatta värdena på  $P_D$  och  $P_{fa}$ .

#### 5.2.9.4 Integration

En detektion baseras ofta på flera mätningar, vilka kan integreras inkoherent eller koherent. Denna senare integration kräver att fasinformation kan utnyttjas över integrationstiden. Enligt den antagna fluktuationsmodellen bevaras koherensen från puls till puls; antalet pulser som träffar målet under ett spaningssvep av antennen är 3, med antenn- och svepningsdata enligt Tabell 3. Vi antar att radarn är koherent och kan utföra en sådan integration. Med koherent integration över  $n$  pulser reduceras kravet på signal/brusförhållande,  $SNR(n)$ , för samma  $P_D$  och  $P_{fa}$ , från enpulsvärdet  $SNR(1)$ , till

$$SNR(n) = \frac{SNR(1)}{n}. \quad (13)$$

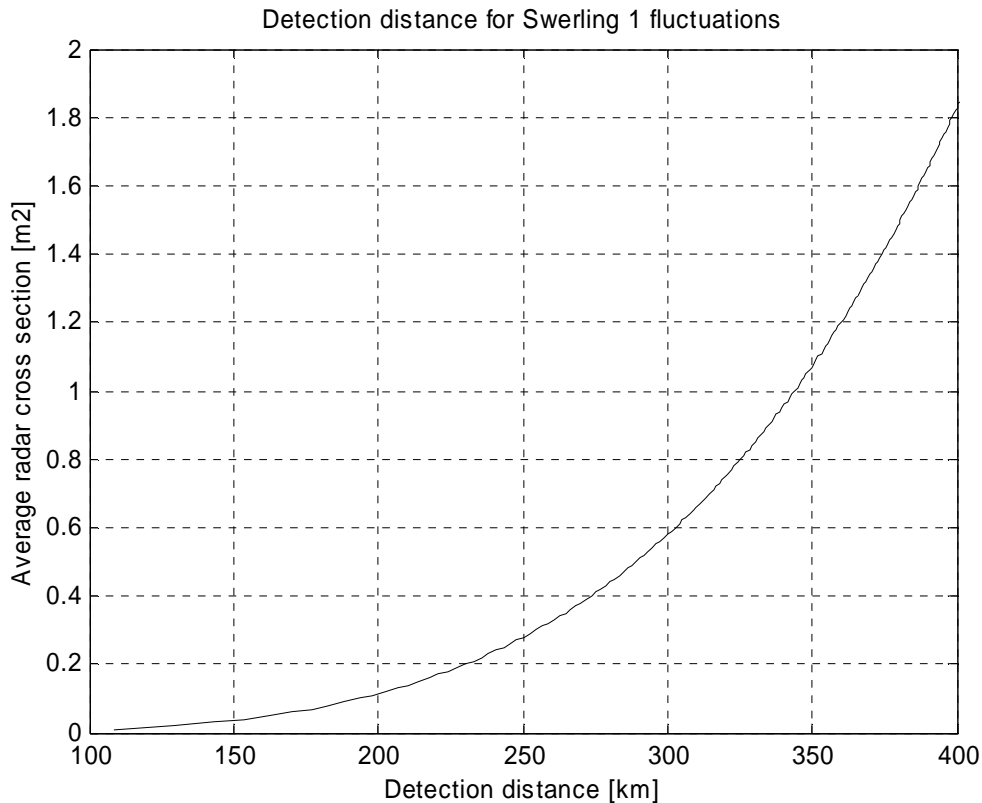
Måldetektion kan deklarerats baserad på flera övermålningar av målet (antennvarv) på ett flertal sätt. Som exempel på ett sådant kriterium för att deklarerat närvaro av ett mål, baserat på flera varv, är att kräva  $M$  detektioner på  $N$  varv, där  $1 < M \leq N$ . För beräkning av detektionssannolikheter och falsklarmstal i detta, och andra, fall hänvisas till radarlitteraturen ([26], sid. 90). Här baseras kravsättningen på prestanda som uppnås med en enda övermålning ( $N = 1$ ).

#### 5.2.9.5 Kravställning målarea/upptäcktsavstånd

Ovanstående signal/bruskvot enligt (13), med  $n = 3$  och  $SNR(1) = 130$ , kan nu sättas in i radarekvationen (4). Instrumenterade räckvidden hos radarn är 400 km. På detta avstånd är med ovan bestämda data den minsta detekterbara målarean

$$\sigma = \frac{130 \times 4\pi \times 400000^4 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 290 \times 6.3 \times 15.8 \times 2\pi \times (2\pi / 180)}{3 \times (40000 / 15) \times 25 \times 10} = 1.83 \text{ m}^2.$$

Således detekteras inte en fullskale-EIKON på detta avstånd av den antagna radarn. Om radarmålarean reduceras med signaturåtgärder så att målarean fortfarande kan modelleras enligt Swerling 1, erhåller man kortare detektionsavstånd med samma radar. Figur 8 visar hur detektionsavståndet beror av målareans medelvärde, från 400 km för  $\bar{\sigma}_{Eik} = 0.7 \text{ m}^2$  ner till 100 km för  $\bar{\sigma}_{Eik} = 0.007 \text{ m}^2$ .

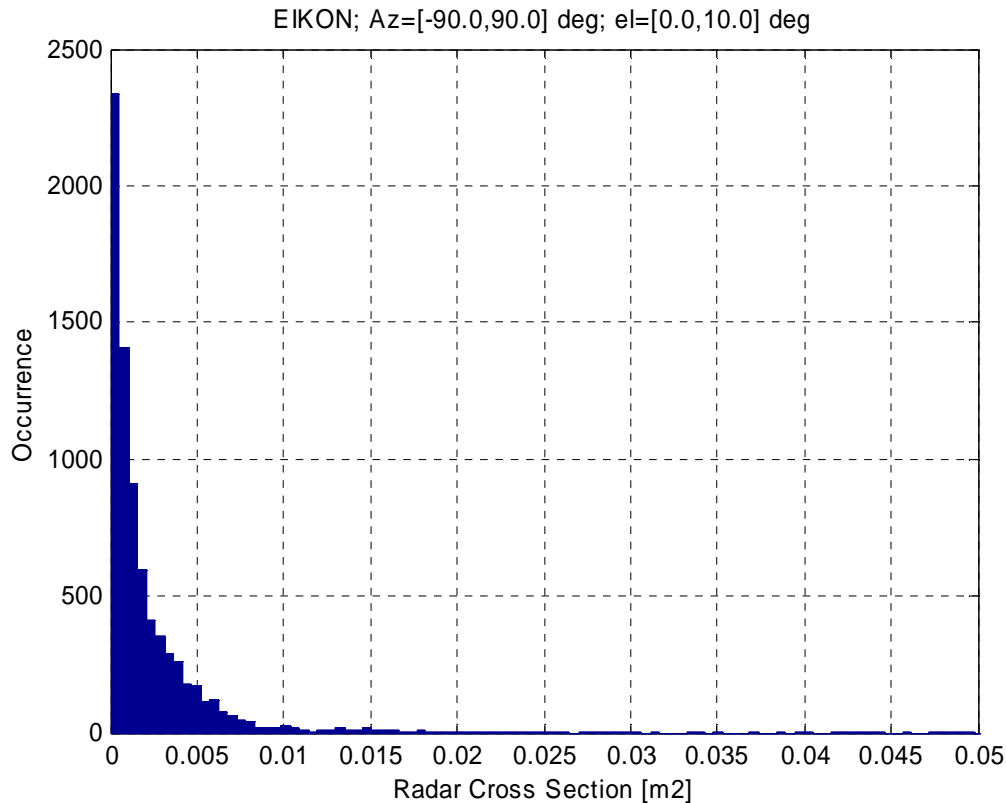


**Figur 8.** Krav på högsta tillåtna medelmåarea för fullskale-EIKON, för olika detektionsavstånd med detektionssannolikheten  $P_D = 0.9$  och  $P_{fa} = 10^{-6}$ , och antagande om målfuktuationer enligt Swerlings Fall 1.

#### 5.2.9.6 Hotradar: flygburen spaningsradar

Efter att ha gått ner på låg höjd för att undgå upptäckt på långt avstånd se **Figur 6** kan EIKON flyga flera hundra km på den låga höjden. Därvid utgör flygburen långräckviddig spaningsradar det viktigaste hotet i **Figur 6** och kan tas som det dimensionerande i denna fas. För spaningsradar består uppgiften av detektion av ett rörligt mål mot en bakgrund av markklotter. Detta fall är komplicerat att behandla, då det är beroende av geometriska förhållanden, hastigheter, bakgrundstyp, frekvensval och signalformer m.m. En närmare analys faller utanför projektramen. Med hänvisning till avsnittet om radarhot, återger vi här uppgiften att upptäcktsavstånd för små lågtflygande mål (ca 1 m<sup>2</sup> radarmåarea) är större än ca 150 km.

EIKON-modellens uppmätta målareafördelning på frekvensen 10 GHz visas i **Figur 9** som gäller vinkelintervallet azimuth  $-90^\circ$  till  $+90^\circ$  och elevation  $0^\circ$  till  $+10^\circ$ , alltså för framsida/översida vilket är den representativa aspekten mot spaningsradarn, för en anflygning på låg höjd och långt avstånd.



*Figur 9. Histogram över fördelningen av mätdata av EIKON-modellen, från mätningar vid 10 GHz [2], mellan azimutvinklarna  $-90^\circ$  till  $+90^\circ$  (framsektorn), och elevationsvinklarna  $0^\circ$  till  $+10^\circ$  (översida).*

Fördelningen i *Figur 9* är mycket lik den i *Figur 7*; dess medelvärde är  $\bar{\sigma}_{Eik,mod} = 0.008 \text{ m}^2$ , vilket uppskalat som tidigare motsvarar en fullskalemålarea  $\bar{\sigma}_{Eik} = 10^2 \times 0.008 = 0.8 \text{ m}^2$ . Eftersom detta värde är av samma storleksordning som ovan nämnda detekterbara  $1 \text{ m}^2$  vid 150 km, löper EIKON alltså risk att upptäckas i sin lågflygande banfas, innan den nått målområdet. För att undgå detta krävs signaturreducerande åtgärder, vilkas omfattning kan uppskattas efter en noggrannare analys än den som gjorts här.

## 6 ANVÄNDNING AV RADARABSORBERANDE MATERIAL

### 6.1 DIFFRAKTION FRÅN DISKONTINUITETER OCH KRÖKTA YTOR

Noggrann beräkning av radarmålytor kräver kraftfulla ekvationslösare för Maxwells ekvationer, vilka tyvärr blir utomordentligt beräkningskrävande. Tillräckligt goda beräkningsalternativ finns emellertid, eller kan utvecklas, för speciella typer av diffraktionseffekter. Det är främst två huvudtyper av diffraktion som måste kunna hanteras för att radarmålytor hos lågsignaturfarkoster skall kunna uppskattas med tillfredsställande noggrannhet. Den ena är diffraktion genererad av diskontinuiteter, geometriska eller materialmässiga. Geometriska diskontinuiteter som t.ex. kanter eller (koniska) spetsar genererar bidrag till de monostatiska radarmålytorerna, något som optisk teori inte förmår beskriva. (Se [35] och [36]). Diskontinuiteter i materialövergångar hos ett radarmål genererar liknande slag av diffraktionseffekter.

Den andra huvudtypen av diffraktion som inte låter sig behandlas med optisk spridningsteori är ytvågsdiffraktion. Ytvågor, även kallade krypvågor, genereras vid strykande infall mot en konvex (enkel- eller dubbelkrökt) begränsningsyta. Dessa ytvågor utbreder sig längs geodetiska linjer medan de successivt avstrålar i tangentialriktningen. Om ytvågor reflekteras mot en diskontinuitet, kan de bidra till återspridning mot den belysande radarn. Ytvågsdiffraktion har studerats under flera decennier, t.ex. med hjälp av asymptotiska metoder som bygger på Watson-transformen (cylindrisk eller sfärisk geometri) eller på approximativa lösningsansatser.

Bidragen till monostatiska radarmålytor från de ovan diskuterade diffraktionstyperna är speciellt viktiga att kunna ta hänsyn till när objektet är en lågsignaturfarkost som EIKON. Skälet till detta är att objektets geometriska utformning medför att monostatiska radarmålytor beräknade med optikbaserade metoder är högst obetydliga i hotsektorerna. De dominerande bidragen är de som genereras av diverse diffraktionseffekter, vilka undandrar sig optikbaserad analys.

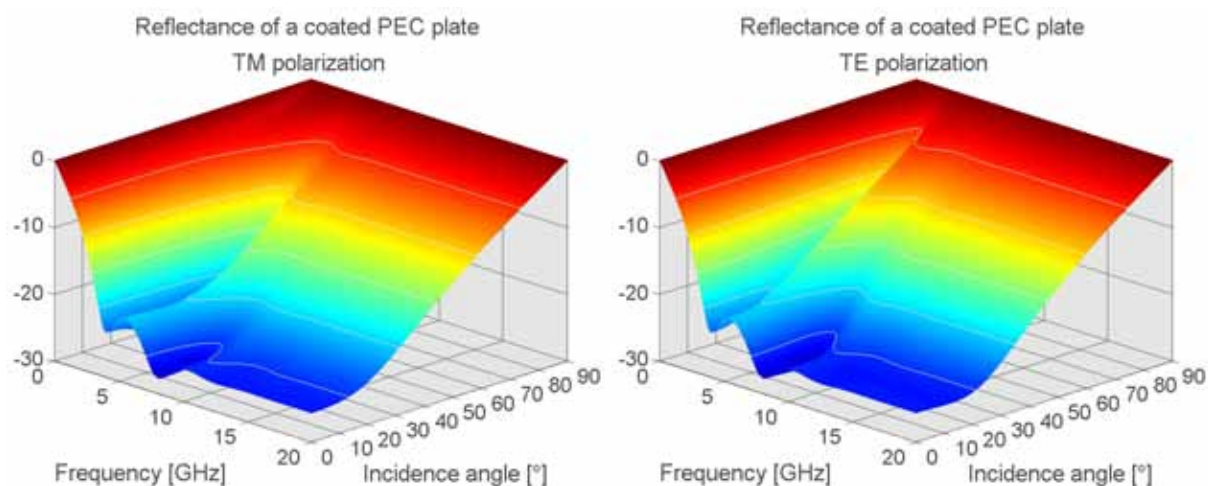
## 6.2 POLARISATION

Betecknande för optiska metoder för beräkning av radarmålytor är, att de är okänsliga för depolarisation, dvs. det (approximativa) spridda fältet är en skalär multipel av det infallande fältet med oförändrad vektororientering. Detta är i allmänhet ofysikaliskt, och i det fall att polarisationsväxlande målytemätningar kan göras, behövs en mer komplett spridningsmodell. Övriga diffraktionstyper är i allmänhet också depolariserande.

### 6.2.1 Polarisationsegenskaper hos radarabsorbenter

Radarabsorberande material (RAM) används primärt för att reducera ett radarmåls signatur i hotsektorerna. För att väl utnyttja RAM på plana eller krökta ytor är det angeläget att kunna utnyttja möjligheterna till depolarisation av det spridda fältet. Man kan t.ex. vilja undvika en absorbent som har otillräcklig effekt för en viss polarisation hos det infallande fältet, medan den istället är överstark för en annan.

Inom projektet har speciellt studerats polarisationseffekter vid plana vågors reflektion mot en perfekt ledande plan platta försedd med ett tunt radarabsorberande materialskikt. För det fall att absorbentmaterialet är magnetodielektriskt (med eller utan magnetiska förluster) är det möjligt att åstadkomma absorption av snett infallande vågor antingen de är TE- eller TM-polariserade. Med hjälp av optimeringsalgoritmer är det möjligt, åtminstone teoretiskt, att åstadkomma ungefär samma reflektionsegenskaper oberoende av den infallande vågens polarisation. *Figur 10* nedan visar resultatet av en sådan RAM-design.



*Figur 10. Plan platta försedd med magnetodielektrisk RAM belyst i TM-polarisation, vänster, eller TE-polarisation, höger.*

### 6.2.2 Ytvågsabsorption

Ytvågsabsorption på en perfekt ledande cylinder med ett tunt skikt av en magnetodielektrisk radarabsorbent har undersökts teoretiskt. Preliminär analys tyder på att det råder en stor överensstämmelse mellan radarabsorbenters förmåga till polarisationsoberoende absorption av ytvågor respektive snett infallande vågor mot en perfekt ledande platta försedd med samma slags absorbent. Det vore önskvärt att bättre förstå polarisationsberoendet hos radarabsorbenter.

### 6.3 IMPEDANSRANDVILLKOR

Numerisk analys av radarmåltor hos ett objekt försett med RAM kompliceras i hög grad om den dielektriska materialstrukturen måste modelleras i tre dimensioner. Detta kan undvikas om RAM-strukturen först modelleras som en uppsättning impedansrandvillkor. Med hjälp av dessa impedansrandvillkor kan därefter objektets radarmåltor beräknas lika numeriskt effektivt som om objektets begränsningsytor vore perfekt ledande. I ett tidigare projekt har en förberedande studie gjorts av absorbentmodellering i form av impedansrandvillkor och dess fördelar demonstrerats. Det vore mot denna bakgrund önskvärt, att metoder och algoritmer utvecklades för beräkningsnoggranna modeller av radarabsorbenter i form av impedansrandvillkor. Moderna datorprogram för lösning av spridningsproblem erbjuder i allmänhet också möjligheten att använda impedansrandvillkor.

## 7 MODELLERING AV OPTISK SIGNATUR HOS EIKON

Till skillnad från radarsignatur är den optiska signaturen inte knuten till skrovets geometri medan däremot utlopp (och för den delen inlopp) kan konstrueras med avseende på att minska strålningsbidraget från gasutsläppen i t ex MWIR (3-5  $\mu\text{m}$ ) och LWIR (8-12  $\mu\text{m}$ ). Dessutom kan utloppet smygkonstrueras för att så mycket som möjligt hindra insyn i det heta utloppet. För modellering av den optiska signaturen hos en flygfarkost krävs två saker: i) skrovbeskrivning, och ii) beskrivning av motorkaviteten och dess gasinnehåll. Till detta kommer atmosfärsberäkning, t.ex. atmosfärstransmission. Skrovbeskrivningen är inte bara en geometrisk beskrivning utan information måste också finnas om skrovets aerodynamiska uppvärmning för aktuellt flygfall. Beskrivningen av motorkaviteten innehåller temperaturinformation samt gasblandning och temperatur beroende på flygfall. Med denna information kan spektral emis-



sion och vinkelberoende spridning bestämmas för att uppfylla fastställda krav på skrovets optiska signatur. Denna signatur gäller inte bara för termisk IR såsom MWIR och LWIR utan även i andra våglängdsområden såsom visuellt och när-IR, där solreflexer dominerar signaturen. I detta kapitel kommer dock endast termisk IR att behandlas.

Det finns en rad olika metoder och mjukvaror för att uppskatta en flygfarkosts IR-signatur. En av dessa mjukvaror är Camouflage Electro-Optic Simulation System (CAMEO-SIM) [37] som utnyttjades för preliminära beräkningar i [1] för EIKONs skrovsignatur. Dessvärre innehåller inte CAMEO-SIM någon tillfredsställande modell för beräkning av strålningen från gaser och är därmed ej lämpad för motorkavitetsberäkningar. McCavity, däremot, är en kod som lämpar sig mycket väl för sådana beräkningar.

I detta kapitel redovisas de modelleringar av IR-signatur som genomförts för EIKON under hösten 2005. De har syftat till att ge underlag till olika frågeställningar inom projektet och sammanfattas i *Tabell 4*. Enligt planen skulle dessutom en studie av intaget ha genomförts men den har skjutits på framtiden av tids- och prioriteringsskäl.

**Tabell 4** Modellering med McCavity. Översikt.

Moment	Syfte	Antal körningar
Hel farkost i bakgrund	Underlag för bedömning av kravuppfyllelse och räckviddsberäkningar	3
Hel farkost utan bakgrund och atmosfär	Benchmarking med SIGGE	3
Parameterstudie ytrefleksans hos skrov och motorkavit	Studera ytmaterialets effekt på mål/bakgrundskontrasten under olika förhållanden.	80

## 7.1 MCCAVITY

McCavity (Monte Carlo Radiation Prediction Code) [38], [39] är ett kommersiellt datorprogram utvecklat av det brittiska företaget Insys Ltd och används förutom FOI bl a även av den brittiska försvarsmyndigheten DSTL.

Genom att mata McCavity med information om flygplansgeometri och/eller flödeslösningar sk CFD-lösningar inklusive beskrivning av material (spektral reflektans och spridning) och omgivning predikteras spektral radians för aktuell farkost inklusive dess jet-flamma. I den här rapporten har beräkningar utförts på UCAV-farkosten EIKON med flödeslösningar från FOI, avdelningen för Systemteknik samt från Volvo Aero Corporation (VAC) via Fluent<sup>TM</sup>-beräkningar. Beräkningen är genomförd för hastigheten Mach=0,85 på höjden 100 m. För beräkning av IR-strålningen från gas ingår i McCavity en bandmodell (statistisk beskrivning av gaser) utvecklad av NASA som har en upplösning på 5 cm<sup>-1</sup>. Atmosfärsmodellen i McCavity är baserad på beräkningar från atmosfärsprogrammet MODTRAN och alla atmosfärsberäkningar är gjorda med atmosfärsstandarden *sub arctic summer* i mitten av juni, klockan 12.00 (dvs med solen i syd-sydost). Aerosolmodellen *Rural 23 km* användes och avståndet i beräkningarna har varit 5 km.

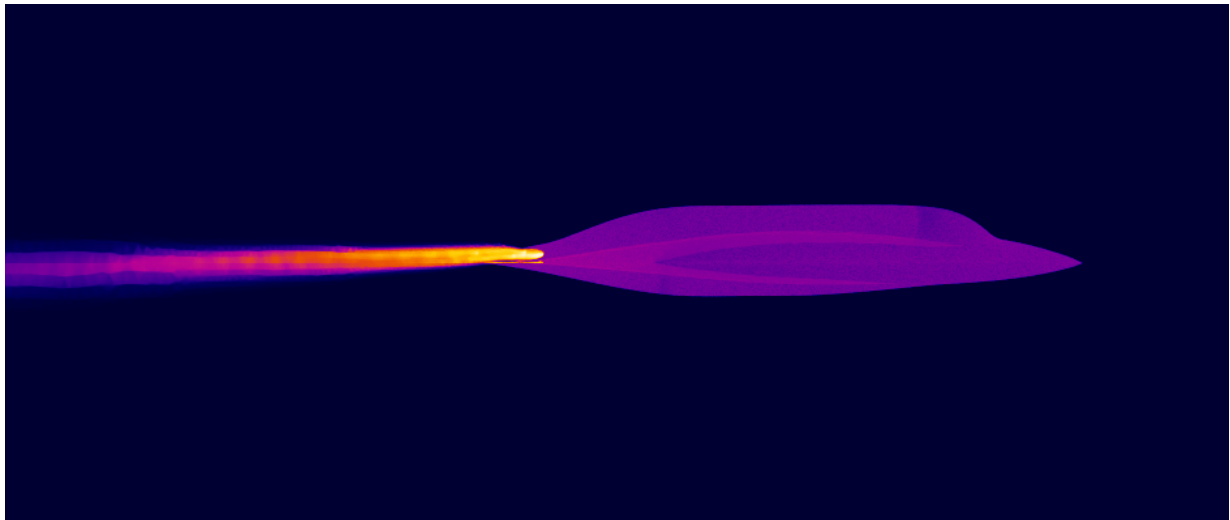
## 7.2 SENSORMODELLERING

Liksom det är viktigt att modellera en farkosts signatur genom atmosfären är det också viktigt att uppskatta hur den optiska signaturen ser ut genom en relevant sensor. Med relevant sensor

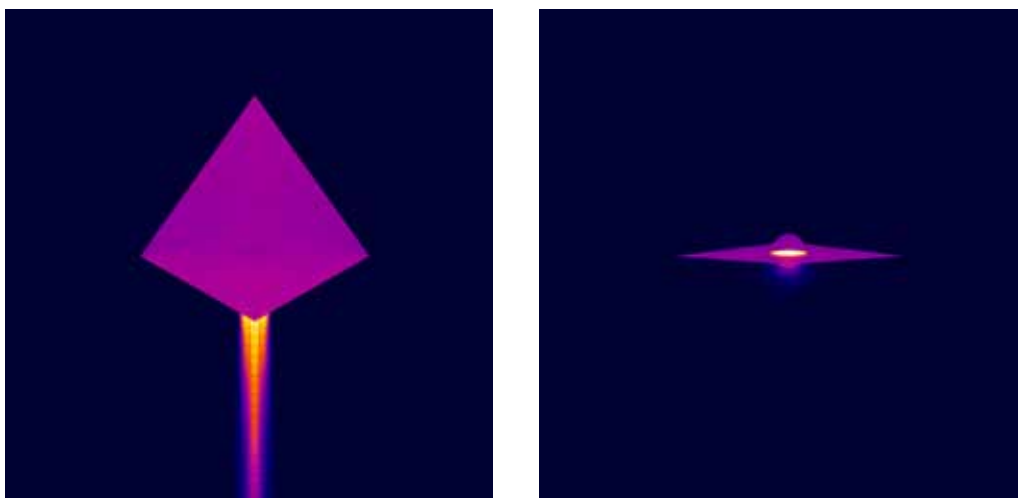
menas inte bara existerande sensorer utan även sensorer som kanske blir verklighet om några år, t ex flerbandskameror och hyperspektrala kameror och inte bara inom visuellt och när-IR utan även i det termiska området. Signaturanpassningen är därmed inte bara en fråga om låg- och högemissiv färg, reflektansen bör sannolikt vara olika i MWIR och LWIR, dvs. spektralt olika eftersom olika band domineras av olika fysikaliska fenomen. När det gäller optisk signaturmodellering bör alltså relevanta sensormodeller också ingå, men detta ligger utanför denna rapportering om modellering av en flygfarkosts IR-signatur.

### 7.3 RESULTAT: HEL FARKOST UTAN BAKGRUND

I detta avsnitt har några fall modellerats med komplett flygsignatur förutom inloppskanal med och utan atmosfär. Ytmaterialet var rent spekulärt med emissiviteten 0,7. Exempel på resultat visas i *Figur 11* och *Figur 12*. Ett syfte med dessa beräkningar var att genomföra en benchmarking med signaturkoden SIGGE som utvecklats vid FOI. Resultatet av benchmarkingen redovisas i [3].

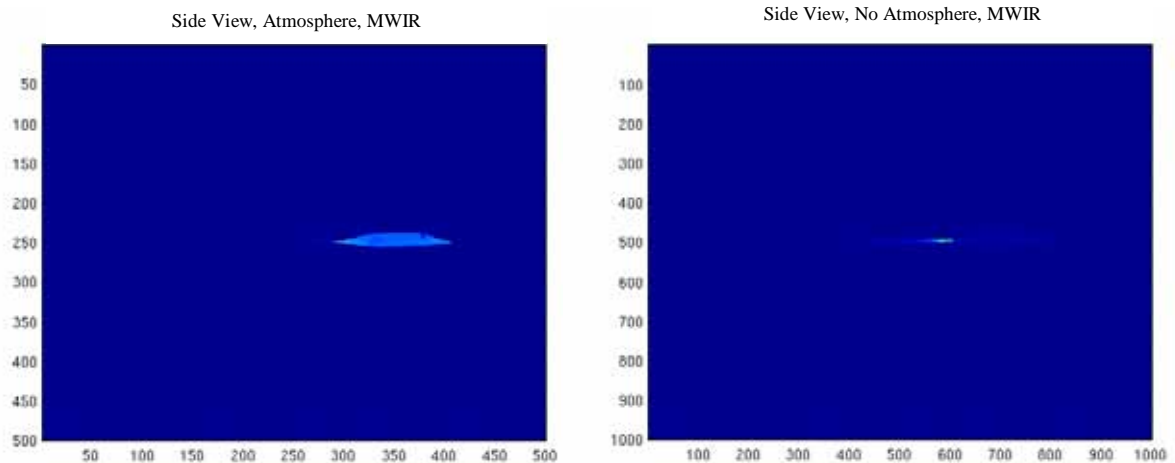


*Figur 11. Simulering av signaturen hos EIKON i MWIR utan atmosfärs effekter. Logaritmisk skala.*

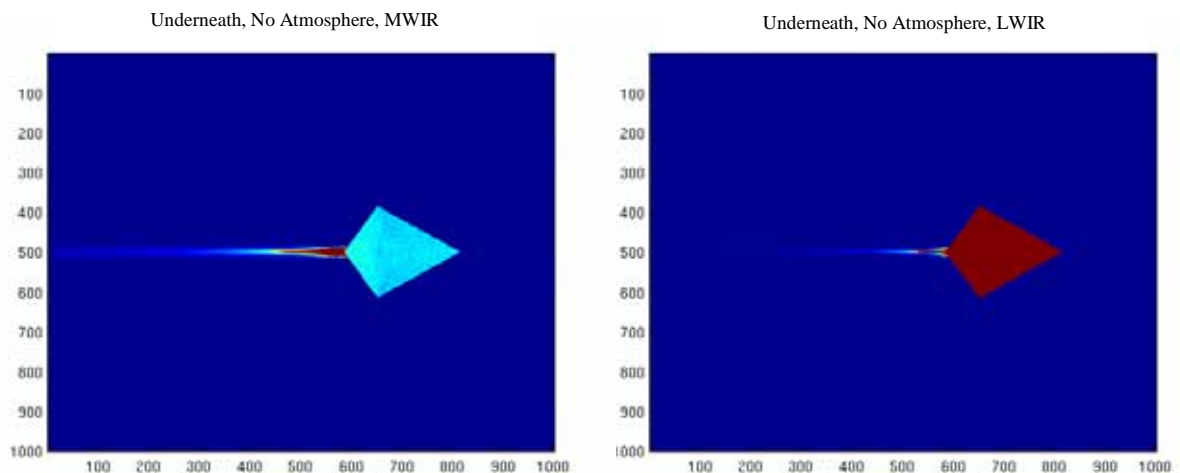


*Figur 12. Simulering av signaturen hos EIKON i MWIR underifrån (vänster) och bakifrån (höger) utan atmosfärs effekter. Logaritmisk skala.*

I **Figur 13** visas EIKON från sidan i MWIR med atmosfär (till vänster) och utan atmosfär (till höger). Av sekretesskäl är skalorna borttagna. Vid inspektion av **Figur 13** kan konstateras att flammans dominerar scenen utan atmosfär medan skrovstrålningen dominerar när flam- och skrovstrålning transmitterats genom 5 km atmosfär. Detta är ett direkt resultat av att gaserna ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) i flammans utanför EIKON är relativt kalla och därför absorberas ganska så effektivt av atmosfären. I **Figur 14** visas hur IR-signaturen ser ut underifrån för MWIR och LWIR. Notera att graferna är överstyrda för att förtydliga flamstrålningen.

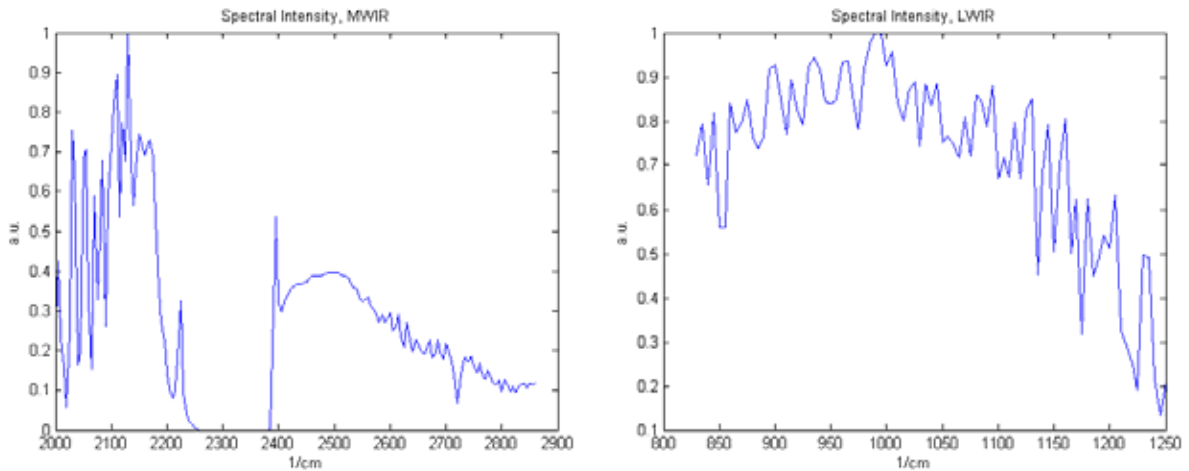


**Figur 13.** Skrovsignatur inklusive flamma med atmosfär (vänster) och utan atmosfär (höger).



**Figur 14.** Skrovsignatur inklusive flamma sedd underifrån utan atmosfär för MWIR (vänster) och LWIR (höger).

I **Figur 15** visas den spektrala intensiteten för EIKON inklusive flamma utan bakgrund transmitterad genom 5 km av atmosfär. Vid inspektion av **Figur 15** kan man tydligt se hur spektrum (i båda fallen) utgörs av flamstrålning plus svartkroppsstrålning. Ett sätt att skatta olika bidrag (t ex gasstrålning, egenemission, himmel/markreflexer och solreflexer) är att dela upp strålningen på bidragsgivare (se t ex [1][3]).



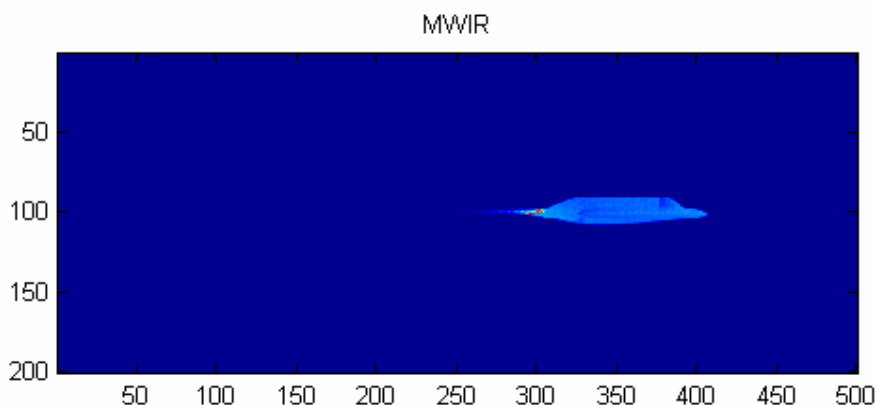
**Figur 15.** Spektral intensitet (godtyckliga enheter) för sidoaspekt utan bakgrund transmitterad genom 5 km atmosfär för MWIR (vänster) och LWIR (höger).

#### 7.4 RESULTAT: HEL FARKOST I BAKGRUND

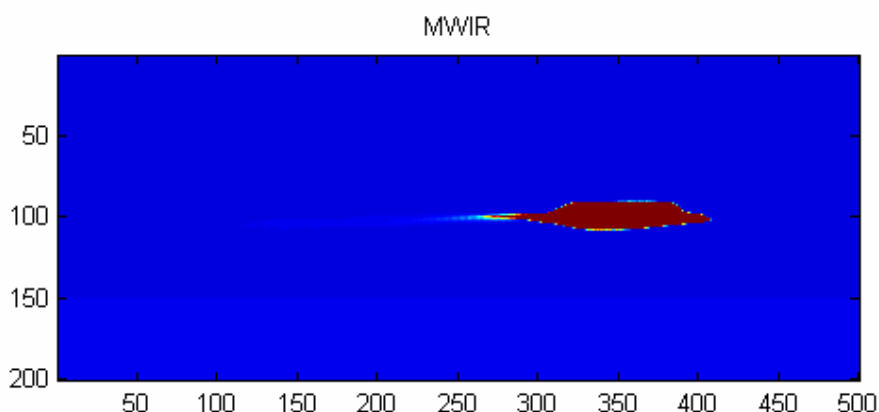
Beräkningar har genomförts av EIKON i bakgrund för att kunna bestämma mål/bakgrundskontrasten så bra som möjligt enligt specifikationen i *Tabell 5*. Bakgrunden utgörs i detta fall av himlens radians som funktion av atmosfärparametrar och elevation. Solstrålningen ger ett bidrag till bakgrunden. Denna information behövs för att avgöra om EIKON uppfyller de krav som ställs på den med hänsyn till detektion av hotsensor. Resultaten för sidoaspekten redovisas för MWIR i *Figur 16* och *Figur 17*. Som framgår dämpas strålningen från avgasplymen kraftigt och dess nivå överstiger bara bakgrunden närmast motorutloppet för denna aspekt. Troligen kommer den allra högsta strålningsnivån närmast utloppet från skrovstrukturen men gasstrålningen ger också ett visst bidrag där.

##### **Tabell 5** Indata för simulering av hel farkost i bakgrund

<b>Färg</b>	Diffus utan vinkelberoende, emissiviteten 0.95
<b>Atmosfär</b>	MODTRANs <i>Sub arctic summer</i> , kl. 12.00 i mitten av juni, Rural 23 km
<b>Avstånd</b>	5 km
<b>Fart</b>	Mach 0,85 i rakt södergående riktning
<b>Höjd</b>	100 m

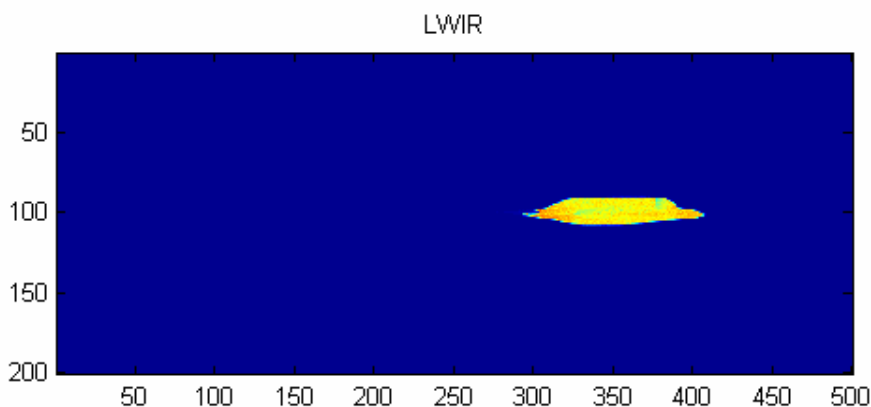


**Figur 16.** Signaturen hos EIKON i bakgrund i MWIR.



**Figur 17.** Signaturen hos EIKON i bakgrund i MWIR. Förstoring av skalan i Figur 16 för att åskådliggöra avgasplymen.

För LWIR är som väntat skrovet det enda som höjer sig över bakgrunden, se **Figur 18**. En närmare analys av skrovstrålningen följer i avsnitt 7.5.



**Figur 18.** Signaturen hos EIKON i bakgrund i LWIR.

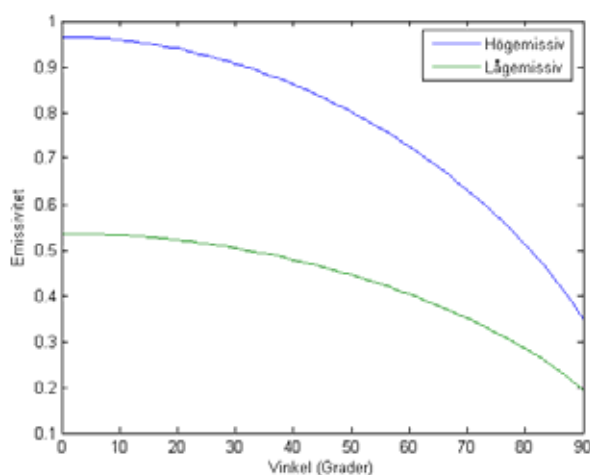
## 7.5 RESULTAT: PARAMETERSTUDIE REFLEKTANS

Den optiska signaturen hos skrovet för en flygfarkost som t ex EIKON är en funktion av dess materialegenskaper såsom färg och ytspridning samt även av omgivningen, dvs. väder, tid på dygnet och flygfall (t ex flyghöjd och fart). För att ge exempel på hur några av dessa parametrar kan skattas har en studie genomförts där materialegenskaperna varierats samt hur den optiska signaturen för dessa material uppträder vid sol och utan sol. Studien har tillämpats på EIKON enligt definitionen i avsnitt 2.

Materialegenskaperna har delats in i två extremer, perfekt diffus och perfekt spekulär och totalt fyra typer har använts, se **Tabell 6**.

**Tabell 6. Reflektansegenskaper hos de färger som användes i parameterstudien.  $\theta$  är infallsvinkeln mot ytnormalen**

Spridning	Emissivitet ( $\theta=0^\circ$ )	Vinkelberoende
Diffus	0,95 (hög)	nej
Diffus	0,50 (låg)	nej
Spekulär	0,97	$0.9 \times \sqrt{\cos \theta + 0.15}$ (se <b>Figur 19</b> )
Spekulär	0,54	$0.5 \times \sqrt{\cos \theta + 0.15}$ (se <b>Figur 19</b> )



**Figur 19. Hög- (blå) och lågemissiv färg som funktion av vinkel.**

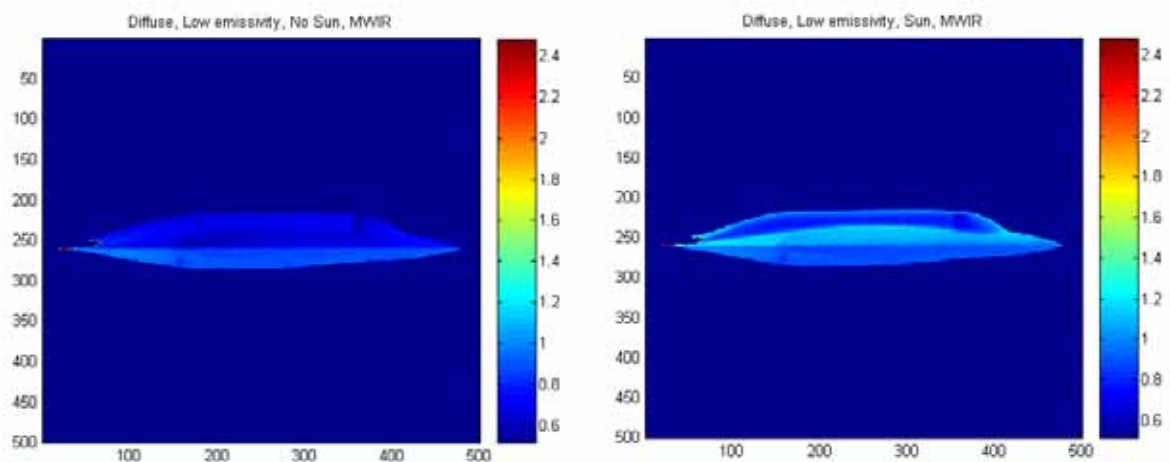
Omgivningen har definierats med hjälp av MODTRAN [40] för atmosfärsstandarden ”Sub Arctic Summer”, sikten 23 km och solstrålningen klockan 12.00 i juni. Solen har konstruerats som en svartkroppskälla på 5770 K transmitterad genom atmosfären till 100 m höjd. Avståndet till farkosten är 5 km, synfältet har satts till  $0.4^\circ \times 0.4^\circ$  och antalet pixlar till  $500 \times 500$ . Beräkningarna har utförts för fem olika vyer, från båda sidor, fram- och bakifrån, samt underifrån. Totala antalet beräkningar är därmed 5 fall  $\times$  4 färger  $\times$  2 väder (sol och inte sol), samt  $\times$  2 våglängdsband ( $3.5\text{-}5.0 \mu\text{m}$  och  $8.0\text{-}12.0 \mu\text{m}$ ), d.v.s. 80 beräkningar. Flygplankroppens temperatur är beräknad för fallet definierat i avsnitt 2.

I den här rapporten redovisas ett axplock av dessa beräkningar för att exemplifiera olika parametrars påverkan på ett skrovs IR-signatur. Flygplansflamman har medvetet utelämnats i denna studie av skrovet för att dels få en mer renodlad diskussion, dels för att resultaten visar (avsnitt 5.5) i det definierade fallet (åtminstone för sido- och framifrånaspekter) att skrovets signatur dominerar inte bara i LWIR utan även i MWIR. En kort diskussion om utloppets materialegenskaper för IR-signaturen kommer dock att genomföras.

För varje simulerat fall har den totala irradiansen från EIKON beräknats. Dessutom har irradiansen från ett lika stort område av bakgrunden beräknats. Dessa värden har subtraherats för att få fram ett mått på den totala kontrasten relativt bakgrunden. Dessa kontrastresultat är redovisade i Bilaga 1. De kan sägas vara ett sammanvägt mått på EIKONs anpassning till bakgrunden. Speciellt för lågemissiva ytbeläggningar kan stora kontraster inom målet också uppstå, exempelvis solbelyst översida, som kan vara väsentliga för klassificering och identifiering. Kvantifiering av dessa effekter redovisas emellertid inte här. Generellt för de studerade färgerna och beräkningsfallen är att EIKON visar en högre strålningsnivå än bakgrunden. Man kan dock inte förutsätta att det är allmängiltiga slutsatser för dessa färger under alla förhållanden.

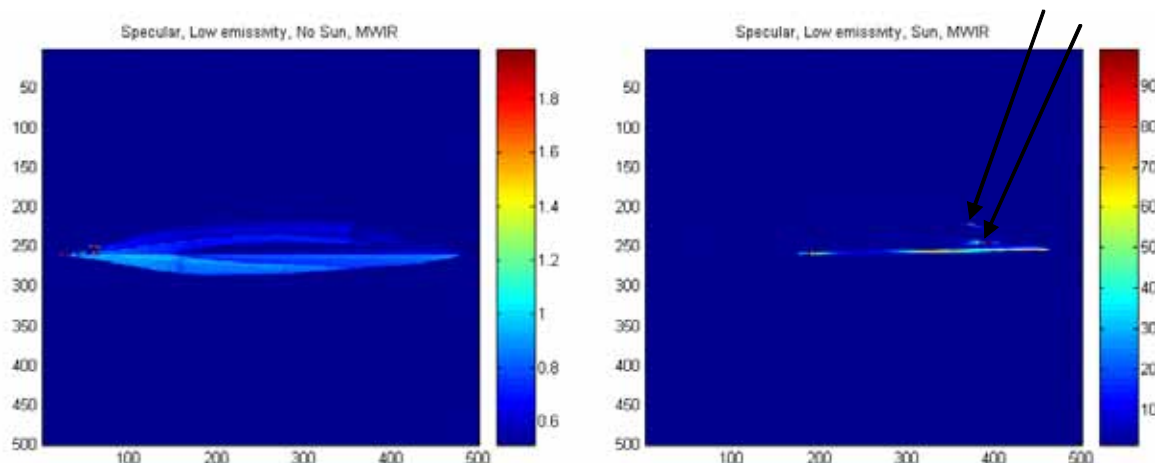
### 7.5.1 Sidoaspekt

I sidoaspekten är IR-signaturen i MWIR en blandning av strålningen från flamman och skrovet men här studeras endast skroveffekter. I takt med att åtgärder genomförs för att minska strålningsbidraget från avgasplymen tenderar skrovsignaturen att stå för en allt större andel av flygfarkostens totala IR-signatur och då inte bara i MWIR. I MWIR är skrovsignaturen en kombination av egenemission och reflekterad omgivning, t.ex. solstrålning. I vissa aspekter kan solreflexer ge betydande bidrag om skrovet är för just dessa vinklar blankt och relativt lågemissivt. I **Figur 20** visas skrovet med lågemissiv diffus färg, sedd från sidan. Vid inspektion av figur 4 kan tydligt ses den förhöjning av strålningsnivån som solstrålningen ger upphov till. Notera också i fallet utan sol den något varmare undersidan av skrovet, ett resultat av den jämfört med himmelstrålningen något varmare markstrålningen. Effekter av reflekterat soljus är endast närvarande i MWIR vilket framgår av Bilaga 1.



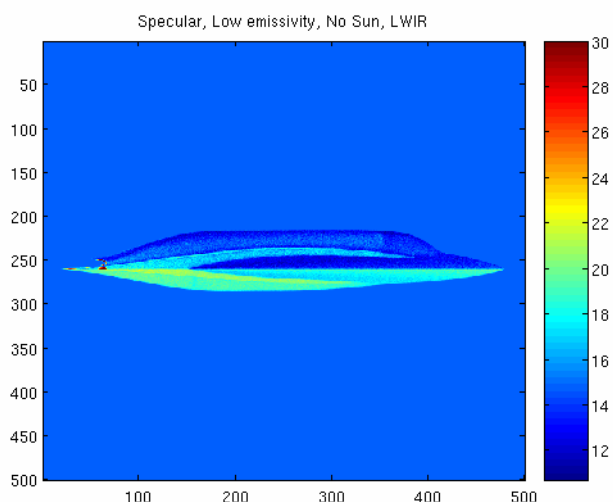
**Figur 20. Jämförelse av diffus lågemissiv färg utan sol (vänster) och med sol (höger i MWIR).**

I fallet spekulär färg kan dessa solreflexer ge upphov till extremt höga värden i vissa pixlar. I **Figur 21** visas samma fall fast med spekulär lågemissiv färg. Notera i **Figur 21** för fallet med sol, de skarpa "solkatterna" vid de svarta pilarna. Solen i detta fall kommer snett framifrån från motsatt sida av skrovet. Denna perfekta spekulära färg ger i detta fall ett väldigt extremt resultat och kan därmed anses som något "akademisk". Känsligheten vid beräkning av spekulära solreflexer är väldigt stor. Ytans geometriska representation och beräkningsprogrammets hantering av ytans spekulära reflektansegenskaper är avgörande för nivån på den reflekterade strålningen. Resultaten här bör därför framför allt ses som kvalitativa. I Bilaga 1 belyses detta tydligt.



**Figur 21. Jämförelse av spekulär lågemissiv färg utan sol (vänster) och med sol (höger) i MWIR..**

För MWIR ger både diffusa och spekulära solreflexer ett försumbart bidrag medan däremot markstrålning kan ge en förhöjd strålningsnivå från skrovet, som visas i **Figur 22**. Detta är ett resultat av att solstrålningen har sitt strålningsmaximum i det synliga området och ger därmed sitt största bidrag i MWIR. För marken (temperatur 15-20 grader i dessa fall) ligger strålningsmaximum mitt i LWIR.

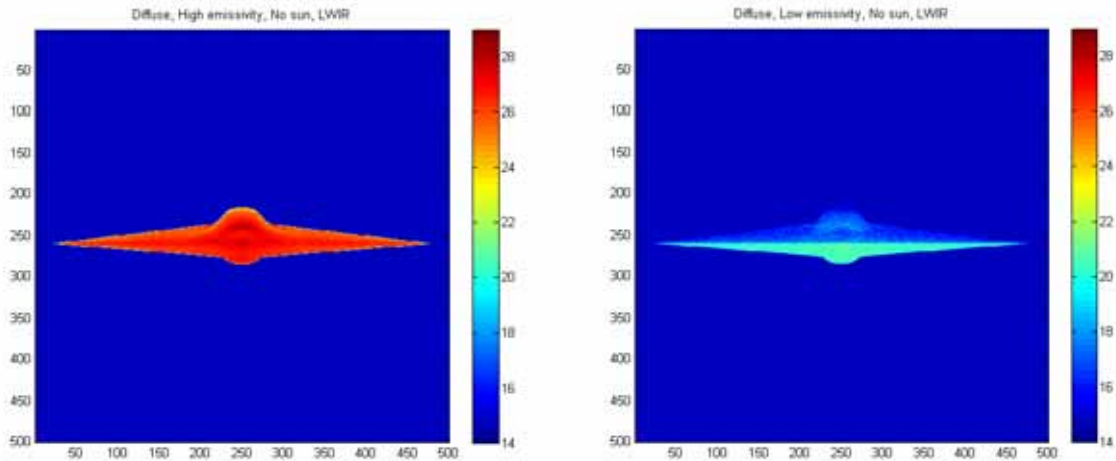


**Figur 22 . Lågemissiv spekulär färg i LWIR utan solbelysning.**

### 7.5.2 Framifrån

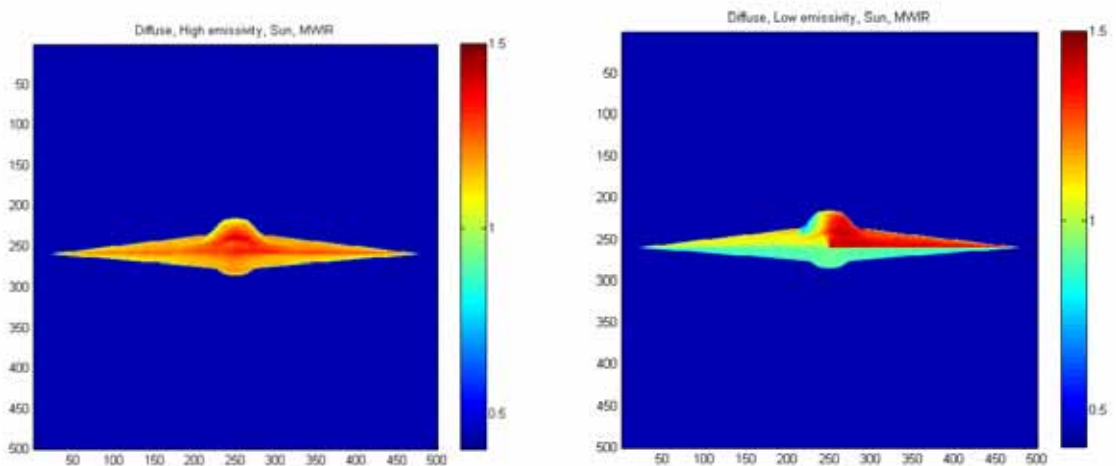
Aspekter framifrån är viktiga ur spaningsynpunkt, men samma resonemang gäller som för sidoaspekten. **Figur 23** visar hur strålningsnivån effektivt kan minskas med lågemissiv färg. I detta fall har samma färg använts på både över- och undersidan men genom att optimera emissiviteten individuellt kan kontrasten minskas, åtminstone för denna aspekt. Signaturen i samtliga aspekter måste emellertid ingå i en sådan optimering. De beräknade kontrastvärdena (Bilaga 1) visar också att kontrasten mot bakgrunden är lägre för den lågemissiva färgen relativt den högmissiva. Detta är speciellt tydligt för LWIR där kontrasten mot bakgrunden för den lågemissiva färgen endast är ca 30% av den för den högmissiva.





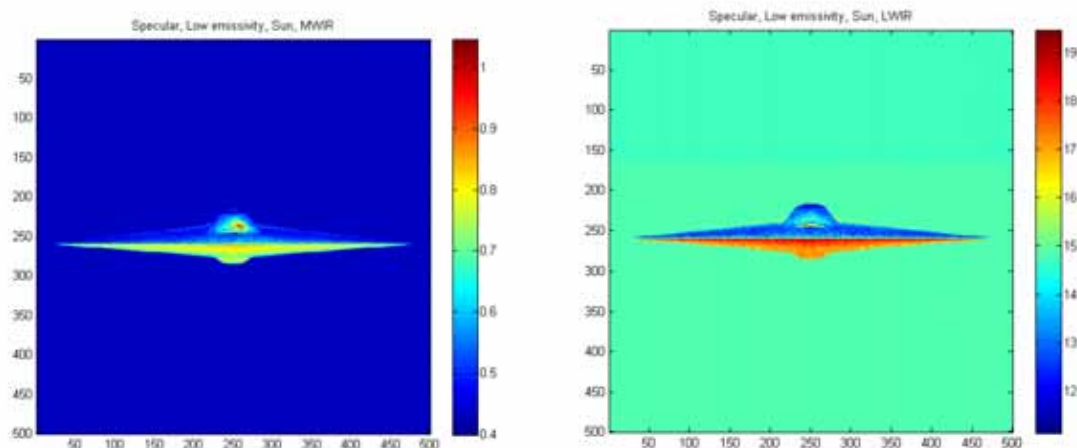
**Figur 23. Jämförelse av diffus färg med hög emissivitet (vänster) och låg emissivitet (höger) i LWIR.**

För MWIR är vinsten med lågemissiv färg lägre för dagfallet beroende på att mängden reflekterat solljus ökar. I **Figur 24** åskådliggörs hur signaturen kraftigt förändrar karaktär för lågemissiv färg medan den totala nivån endast minskar måttligt.



**Figur 24. Jämförelse av diffus färg med hög emissivitet (vänster) och låg emissivitet (höger) i MWIR för dagfallet.**

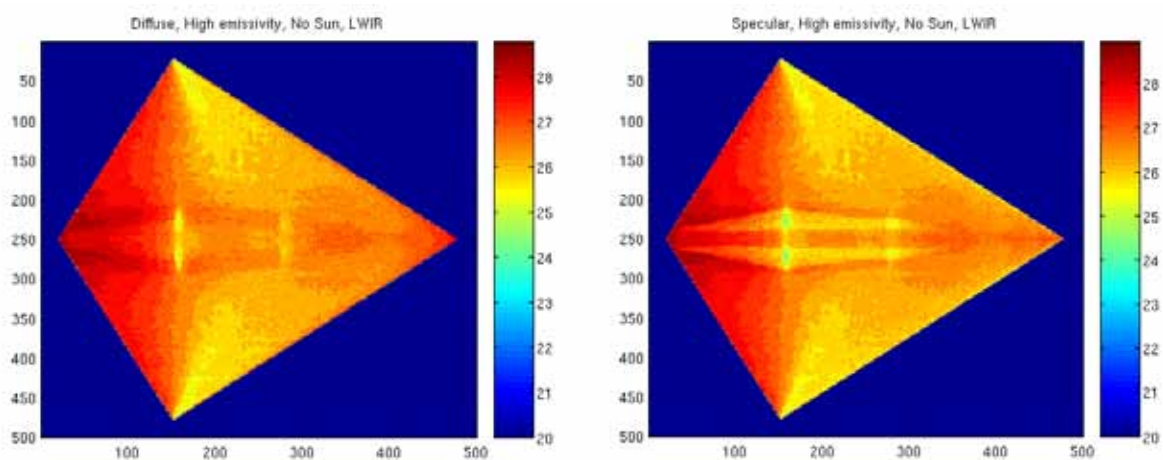
Den emissivitet som krävs för att minimera kontrasten mot bakgrunden för denna aspekt är olika för MWIR och LWIR. Anledningen har inte utretts i detalj men det kan bero på både den reflekterade bakgrundens karaktär (bl.a. diffus solstrålning) och på egenstrålningen. Skrovets egenstrålning och det reflekterade solljuset har olika spektralfördelning i enlighet med Plancks strålningslag. Solstrålningens inverkan varierar också beroende på om reflektansen är diffus eller spekulär vilket framgår av resultaten i Bilaga 1. **Figur 25** visar exempel på fall där den totala kontrasten mot bakgrunden är låg. Eftersom en enhetlig färg använts har det för LWIR gett effekten att kontrasten på översidan är negativ och på undersidan positiv. Som nämndes ovan bör färgen på över- och undersida optimeras individuellt. För MWIR går kontrasten inte ner lika långt.



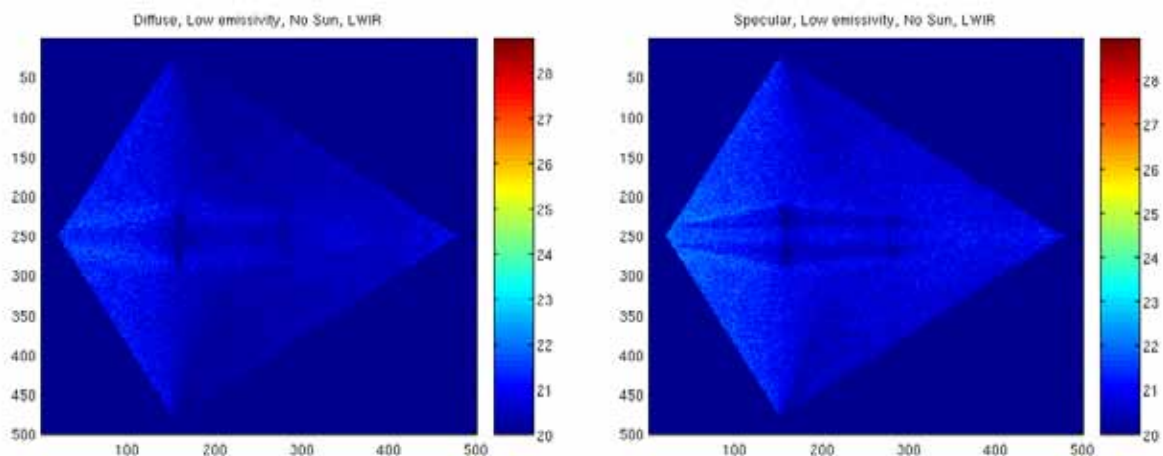
*Figur 25. Jämförelse av spekulär färg med låg emissivitet i MWIR (vänster) och LWIR (höger).*

### 7.5.3 Underifrån

I aspekten rakt underifrån är skillnaden mellan diffus och spekulär färg liten för både diffus och spekulär färg, se *Figur 26*, *Figur 27* och Bilaga 1. Anledningen är att de lågemissiva färgerna i denna aspekt reflekterar markstrålningen och på grund av markens utbredning blir det reflekterade bidraget i stort sett lika för diffus och spekulär färg. Strålningsnivån för den lågemissiva färgen är ca 75% av den för den högmissiva för båda spektralbanden. Inga effekter av solstrålning noteras. De här genomförda beräkningsfallen utgår från klar himmel. Ett fall med moln som sprider solljus skulle medföra skillnader mellan fallen sol och ej sol.



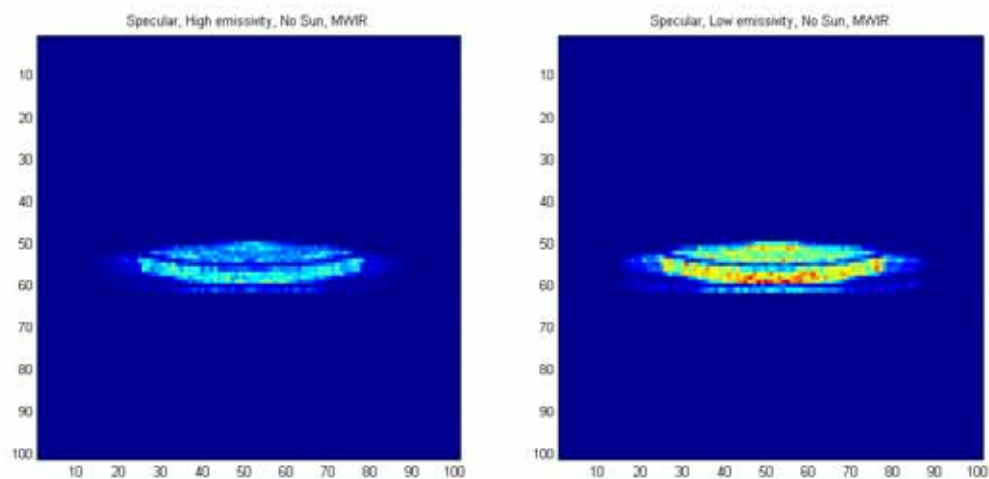
*Figur 26. Jämförelse av diffus (vänster) och spekulär (höger) högmissiv färg i LWIR.*



**Figur 27. Jämförelse av diffus (vänster) och spekulär (höger) lågemissiv färg i LWIR.**

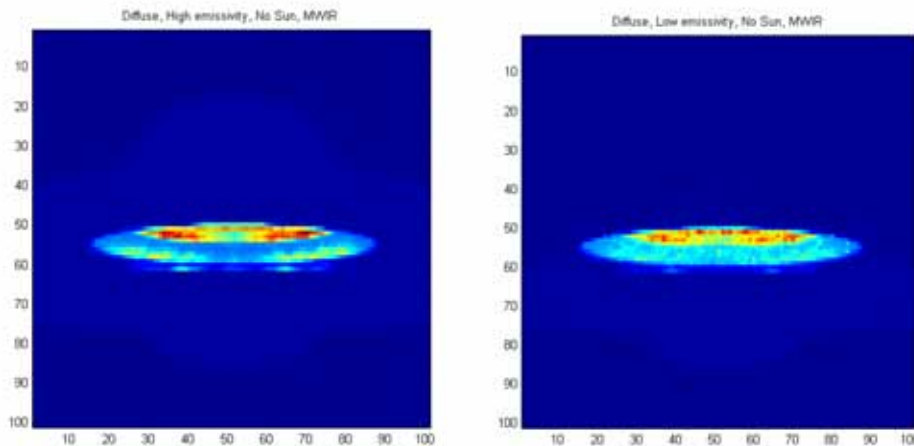
#### 7.5.4 Bakifrån – Motorkaviteten

IR-signaturen bakifrån domineras naturligt av utloppet. I denna studie har endast väggmaterialets betydelse analyserats och gasstrålningen ingår inte. Inkludering av den påverkar säkert resultaten och studien kan inte anses färdig förrän hänsyn tagits till även till den delen. Att bara studera väggmaterialet bör dock ge värdefulla insikter. I **Figur 28** jämförs låg- och högmissiv spekulär färg för MWIR. Vid en jämförelse mellan dessa båda spekulära färger kan konstateras att kaviteten med den lägre emissiviteten ger ett högre bidrag än den med den högre emissiviteten.



**Figur 28. Jämförelse mellan spekulär högmissiv färg (vänster) och lågemissiv färg (höger) för motorkaviteten i MWIR. Förstoring.**

Görs däremot motorkaviteten perfekt diffus istället för perfekt spekulär kan konstateras att nivåerna för utloppets IR-signatur minskar, samt att skillnaden mellan hög- och lågemissiv färg är betydligt mindre. Detta är ett resultat av att strålningen från kavitets inre inte längre speglas fram lika effektivt som tidigare eftersom den nu diffusa ytan sprider lika mycket i alla riktningar. I **Figur 29** visas detta exempel för MWIR.



Figur 29. Jämförelse mellan diffust hög- och lågemissivt utlopp i MWIR.

För LWIR är reflektion av motorkavitets hetaste delar inte lika betydelsefull och motorstrålningen förefaller vara relativt oberoende av väggmaterialets reflektionsegenskaper.

## 8 MODELLERING AV RADARSIGNATUR HOS EIKON

Radarmålareberäkningarna har utförts med hjälp av beräkningsverktyget SPECRAY EM och med beräkningsverktyget MRANDOLF. SPECRAY EM har utvecklats av det franska företaget OKTAL. Programmet är baserat på fysikalisk optik (PO) i kombination med geometrisk optik (GO) och fysikalisk diffraktion teori (PTD). En mer detaljerad beskrivning och utvärdering av programmet redovisas i [28]. SPECRAY EM har använts för att beräkna radarmålarean för EIKON både vid X- och W-bandet. MRANDOLF är ett nationellt utvecklat program som är baserat på en metod som man brukar benämna ”Fast Multipole Metod” (FMM). En mer detaljerad beskrivning av metoden ges i [29]. Den stora skillnaden mellan de ovannämnda beräkningsmetoderna är att SPECRAY EM är en högfrequensmetod som bygger på ett antal approximativa antaganden medan MRANDOLF är en metod som löser Maxwell-sekvationer utan att göra några approximationer. Följderna blir då att MRANDOLF ger ett mer noggrant resultat på bekostnad av höga minneskrav och långa CPU-tider emedan SPECRAY EM inte tar hänsyn till vissa spridningsfenomen (t ex krypvågor, resonanseffekter mm) men kan användas för att utföra helkroppsbereäkningar. Eftersom MRANDOLF bygger på en beräkningstung metod har endast beräkningar utförts inom en snäv parameterrymd.

### 8.1 X-BAND

Beräkningarna utfördes på ett sådant sätt att vinkeldefinitionerna i referens [1] gäller.

#### 8.1.1 Beräkningsparametrar för SPECRAY

<b>Frekvenser:</b>	6 – 16 GHz i steg om 100 MHz → #f = 101
<b>Azimutvinklar:</b>	0° – 360° i steg om 0,25° → #azimut = 1441
<b>Elevationsvinkel:</b>	0°
<b>Polarisation:</b>	HH
<b>Beräkningsoptioner:</b>	Endast direkt bidrag från PO, PTD

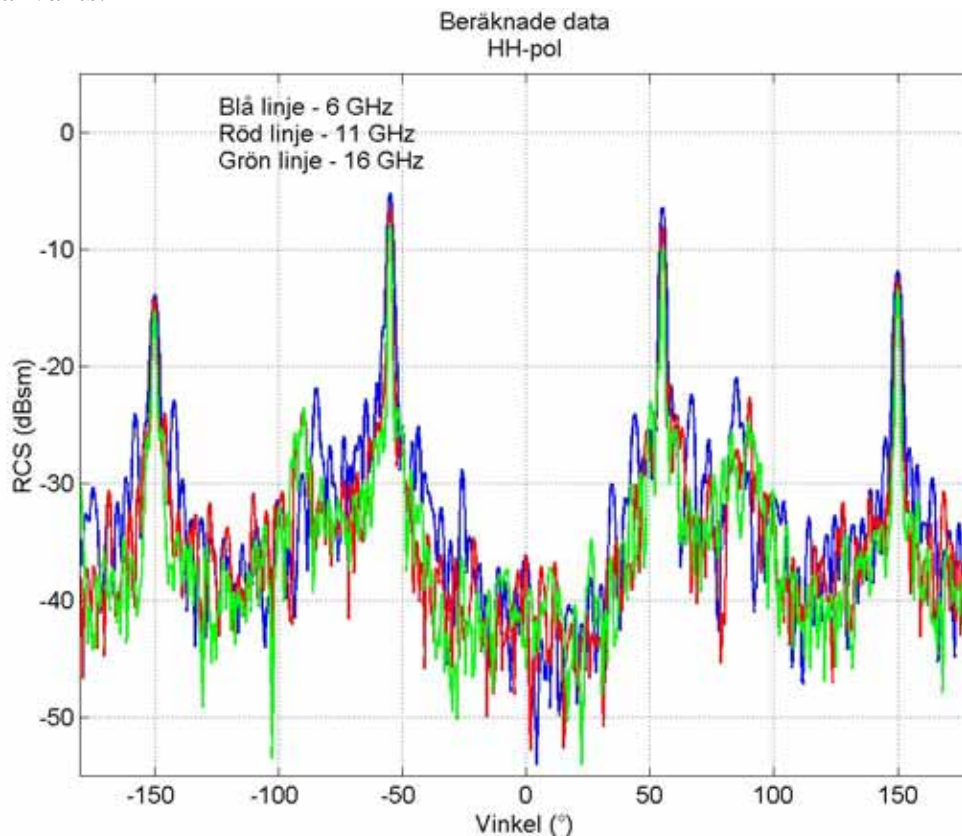
Med de ovanstående parametrarna har vi möjlighet att få en avståndsupplösning på  $\sim 0,015$  meter med en invikningsfri avståndslucka på 1,5 meter, eller  $\pm 0,75$  meter. För att uppnå denna upplösning i tvärsled krävs, rent teoretiskt, en vinkelsektor på ca  $65^\circ$ . Vi har här valt att sätta vinkelsektorn till  $55^\circ$ . Invikningsavståndet i tvärsled blir då ca 3,7 meter.

### 8.1.2 Beräkningsparametrar för MRANDOLF

**Frekvens:** 10 GHz  
**Azimutvinklar:**  $-180^\circ$  till  $-140^\circ$  i  $2^\circ$  steg  $\rightarrow$  #azimut = 21  
 $-40^\circ$  till  $0^\circ$  i  $2^\circ$  steg  $\rightarrow$  #azimut = 21  
**Elevationsvinkel:**  $0^\circ$   
**Polarisation:** HH

### 8.1.3 Resultat

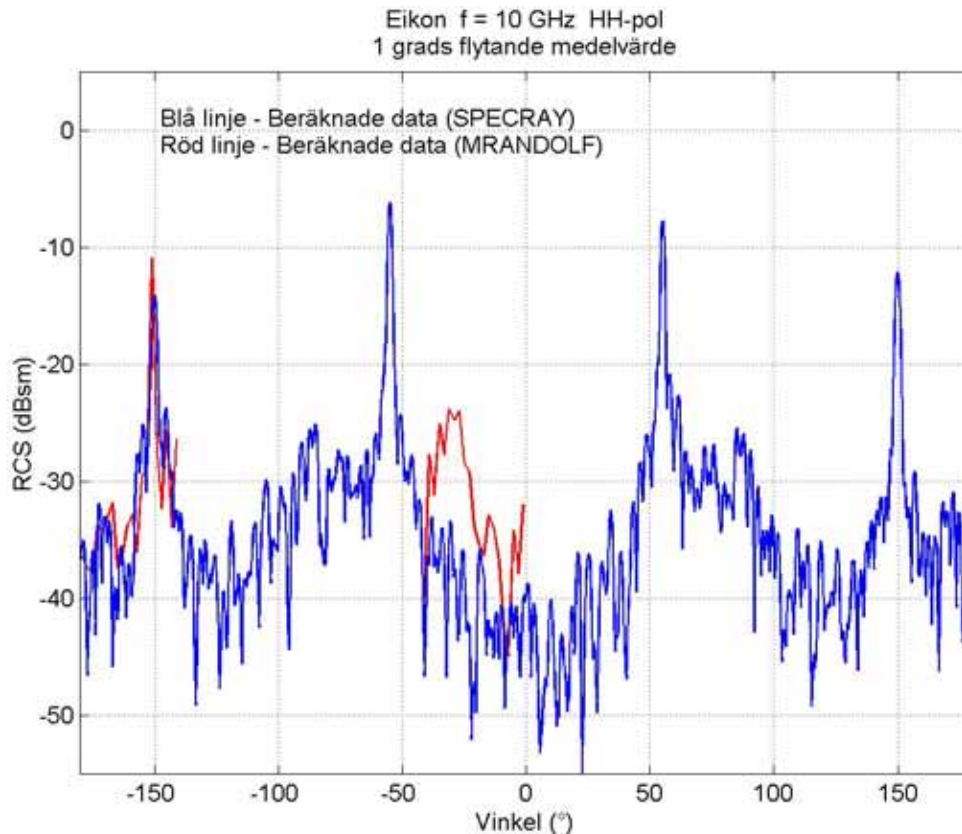
**Figur 30** visar resultaten från SPECRAY beräkningarna vid 6, 11 och 16 GHz som funktion av azimutvinkeln. För att undvika plottriga diagram har ett 1-gradigt flytande medelvärdesfilter använts.



**Figur 30.** Radarmålarean som funktion av azimutvinkeln vid 6 GHz (blå linje), 11 GHz (röd linje) och 16 GHz (grön linje).

**Figur 31** visar den beräknade radarmålarean från SPECRAY och MRANDOLF som funktion av azimutvinkel vid 10 GHz.





*Figur 31. Radarmålarean som funktion av azimutvinkeln vid 10 GHz för SPECRAY (blå linje) och för MRANDOLF (röd linje).*

## 8.2 W-BAND

Beräkningarna utfördes på ett sådant sätt att vinkeldefinitionerna i referens [1] skall gälla.

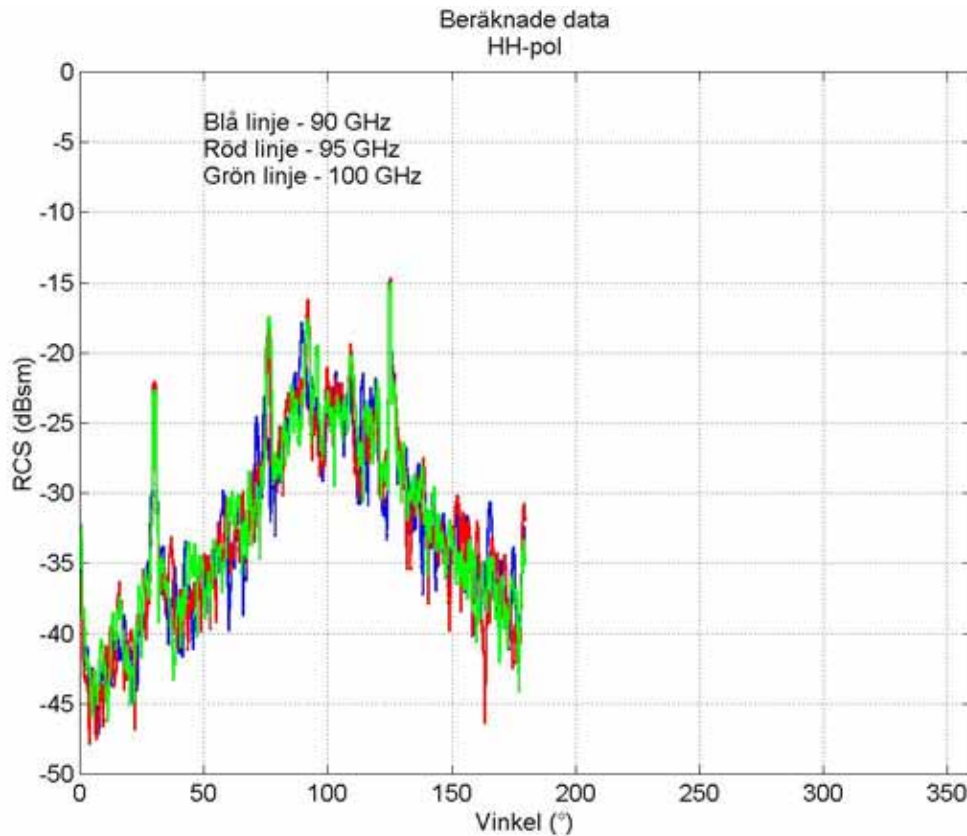
### 8.2.1 Beräkningsparametrar för SPECRAY

<b>Frekvenser:</b>	ISAR 90 – 100 GHz i steg om 100 MHz → #f = 101 RCS 90 – 100 GHz i steg om 5GHz → #f = 3
<b>Azimutvinklar:</b>	ISAR 20° – 40° i steg om 0,02° → #azimut = 1000 ISAR 120° – 140° i steg om 0,02° → #azimut = 1000 RCS 0° – 180° i steg om 0,025° → #azimut = 7200
<b>Elevationsvinkel:</b>	0°
<b>Polarisation:</b>	HH
<b>Beräkningsoptioner:</b>	Endast direkt bidrag från PO och PTD

Med de ovanstående parametrarna har vi möjlighet att få en avståndsupplösning på  $\sim 0,015$  meter med en invikningsfri avståndslucka på 1,5 meter, eller  $\pm 0,75$  meter. För att uppnå denna upplösning i tvärsled krävs, rent teoretiskt, en vinkelsektor på ca  $6^\circ$ . Vi har här valt att sätta vinkelsektorn till  $6^\circ$ . Invikningsavståndet i tvärsled blir då ca 1,8 meter, dvs ca  $\pm 0,9$  meter.

### 8.2.2 Resultat

**Figur 32** visar resultaten från beräkningarna vid 90, 95 och 100 GHz som funktion av azimutvinkeln. För att undvika plottriga diagram har ett 1-gradigt flytande medelvärdesfilter använts.



**Figur 32.** Radarmålearen som funktion av azimutvinkeln vid 90 GHz (blå linje), 95 GHz (röd linje) och 100 GHz (grön linje).

## 9 MÄTNING AV RADARSIGNATUR

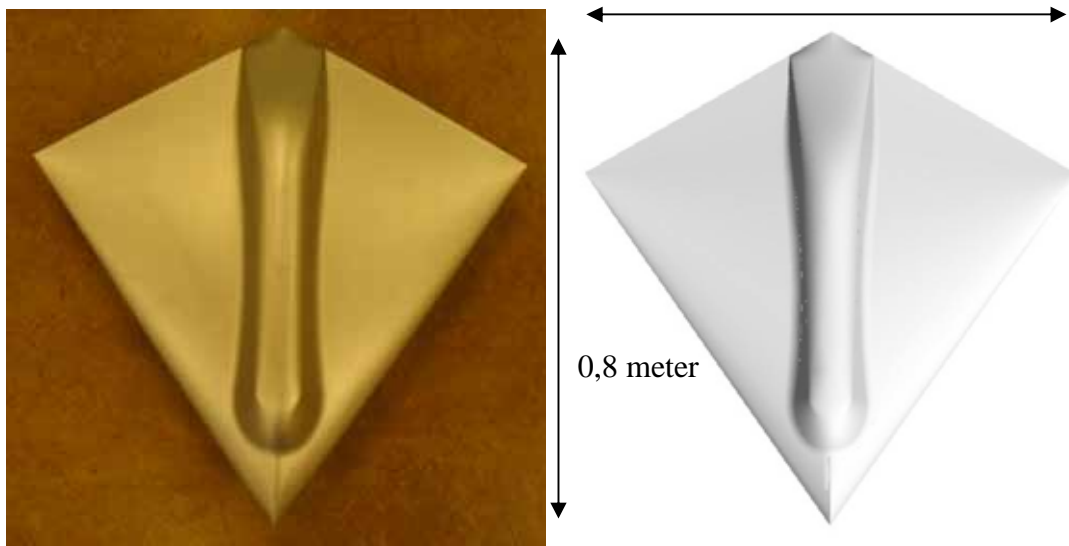
FOI har under 2005 utförts mätningar på skalmodellen EIKON. Mätningarna finansierades av detta projekt och av projektet *Utformning lågsignaturfarkost*. Mätuppställning, mätmetodik, mätparametrar och mätresultat presenteras i rapporten "Radarmålmätningar på EIKON", se [2]. Den relativt korta resultatanalysen som utfördes i rapporten visade på att mätningarna som utfördes vid X-band är relativt frirymdslika medan resultaten vid W-band visar på att bakgrundsbidragen som härrör från bland annat frigolitstödet är av signifikant betydelse för resultatet och svåra att filtrera bort. På grund av detta utfördes en kompletterande testmätning med ett nytt stöd som bedöms ge mindre bakgrundsbidrag än frigolit vid W-band. Stödet har placerats på ett vridbord vilket innebär att hela stödet roterar tillsammans med objektet. Bättre hade varit om man lyckats med en konstruktionslösning där endast objektet roterar och där man visar stödets "lågsignatur-sida" mot antennerna. På grund av de begränsade resurserna har vi ändå valt att testa denna lösning. Mätuppställning, metodik, mätparametrar och resultat från dessa kompletteringsmätningar presenteras nedan.

## 9.1 ANVÄNDA PARAMETRAR VID MÄTNINGARNA

EIKON-modellen är formgjuten i en glasfiber-epoxy blandning (Ciba-Geigy Araldit 5052). Modellen är ihålig och har målats med silverfärg för att erhålla en ledande yta, se **Figur 33**. Vi bedömer att CAD-geometrin har en mycket god överensstämmelse med den fysiska modellen.

### 9.1.1 Objektparametrar

<b>Objekt:</b>	EIKON (se <i>Figur 33</i> , <i>Figur 34</i> , <i>Figur 35</i> )
<b>Ytmaterial:</b>	Silverfärg (betraktas här som perfekt ledande)
<b>Dimensioner:</b>	Se <i>Figur 33</i> , <i>Figur 34</i> , <i>Figur 35</i> .

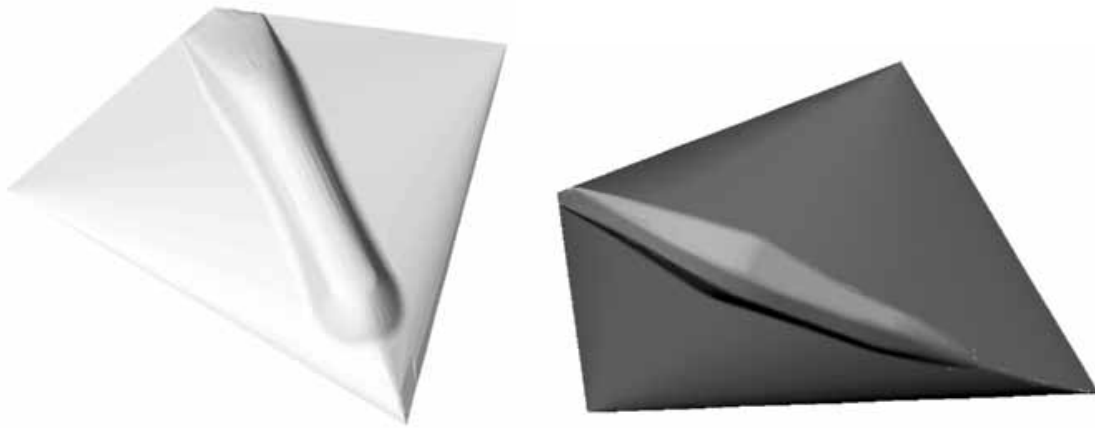


*Figur 33. Till vänster visas foto av den tillverkade modellen och till höger CAD modellen.*



*Figur 34. EIKON betraktad rakt framifrån.*

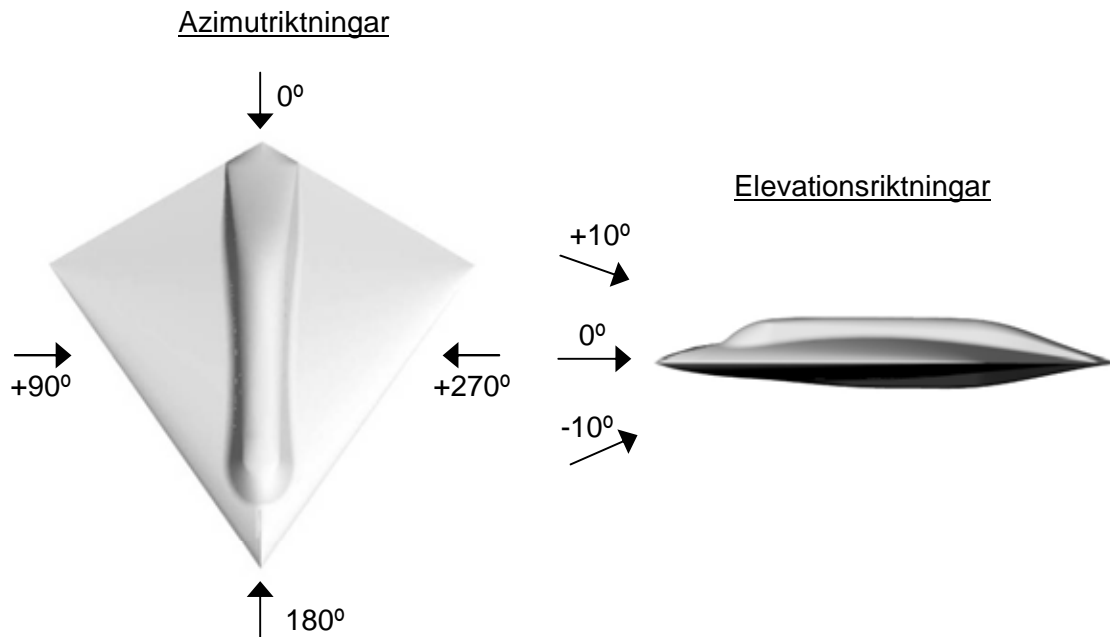




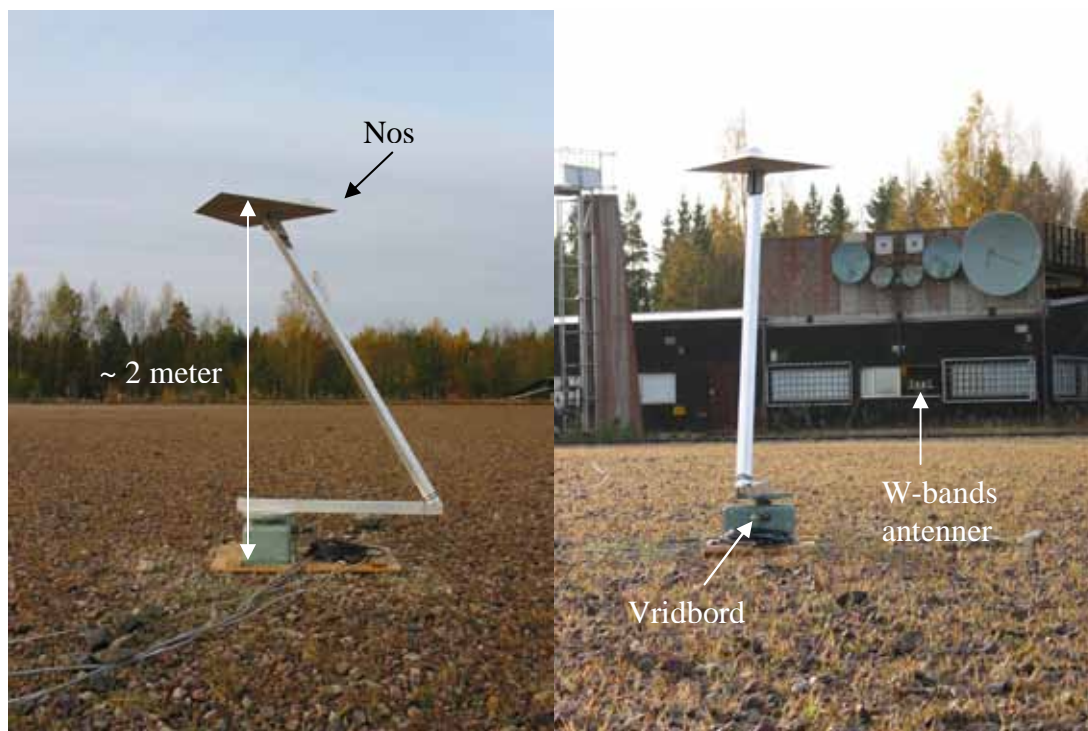
*Figur 35. Perspektivbilder av EIKON ovanifrån (vänster) och underifrån (höger).*

#### 9.1.2 Mätparametrar och mätuppställning vid Lilla Gåra mätningar (W-band)

<b>Kalibreringsobjekt:</b>	Triangulär trihedral med kantsidlängd = 70 mm → $\sigma_{HF} = 10,0$ dBsm vid 95 GHz
<b>Frekvenser:</b>	91,2 – 97,8 GHz i steg om 16,5 MHz → #f = 401
<b>Azimutvinklar:</b>	0° – 360° i steg om ~0,022° → #azimut = 16384 (se orienteringsdefinition i <i>Figur 36</i> )
<b>Elevationsvinklar:</b>	0° (se <i>Figur 36</i> för definition)
<b>Polarisation:</b>	HH
<b>Mätavstånd:</b>	55 meter
<b>Antal pulser/mät:</b>	64 för kalibreringsmätningarna och 1 för objektmätningarna
<b>Lobbredd (3dB):</b>	~ 1,4 meter vid avståndet 55 meter.
<b>Uteffekt:</b>	70 mW (18,5 dBm)
<b>Antenner:</b>	Linsantenner (Millitech 10-STP-6-DP)



**Figur 36.** Definition av vinkelriktningarna vid mätningarna utförda vid Lilla Gåra.



**Figur 37.** EIKON på nya stativet.

För att få EIKON att ligga stabilt på stödet var vi tvungna att göra ett hål på undersidan av EIKON och konstruera en infästning för stativet.

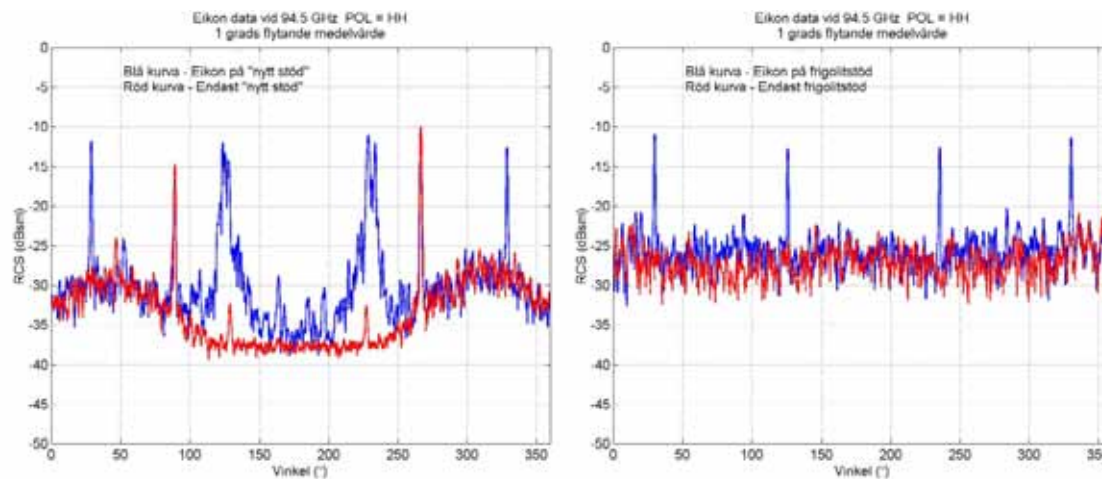
## 9.2 MÄT- OCH KALIBRERINGSMETODIK

Kalibreringen gjordes med hjälp av en triangulär trihedral med kantlängden 70 mm. En mer detaljerad beskrivning av kalibreringsförfarandet finns i [2]. Mätningar utfördes som tidigare

med och utan EIKON på stativet. Detta för att kunna jämföra hur stor del av målarean som kommer från objektet respektive stativet.

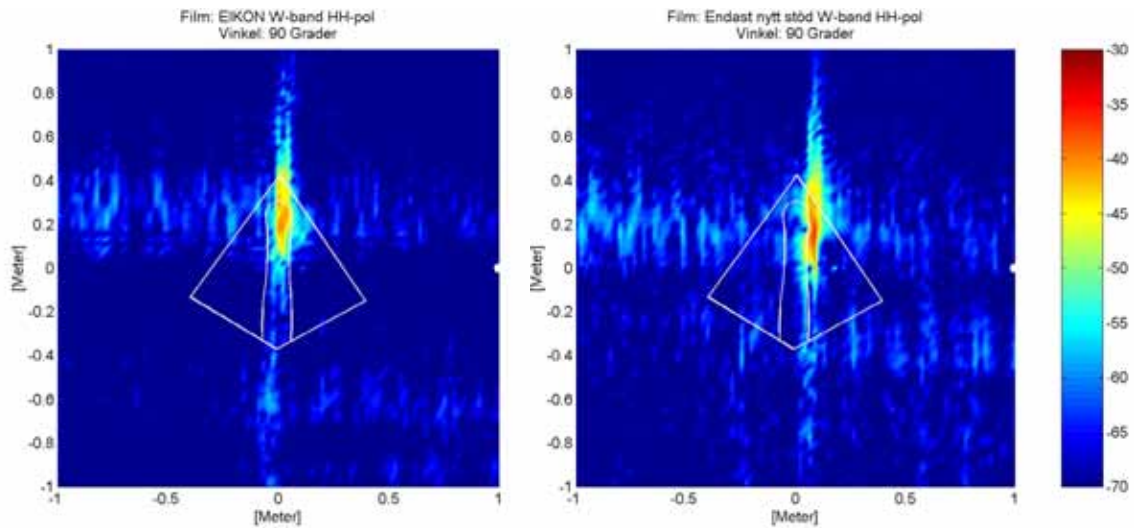
### 9.3 MÄTRESULTAT

Resultaten kommer att presenteras tillsammans med mätresultaten från mätningarna med frigolitstödet [2]. För att inte få plottriga figurer har vi valt att filtrera data genom att använda 1-graders flytande medelvärde. Detta innebär att varje punkt i kurvorna är ett medelvärde av  $46 (\pm 23)$  stycken vinkeldata. **Figur 38** visar den kalibrerade målarean för EIKON med det nya stödet samt med frigolitstödet vid 94,5 GHz. Ingen 0-doppler eller bakgrundsubtraktions filtrering har utförts på data.

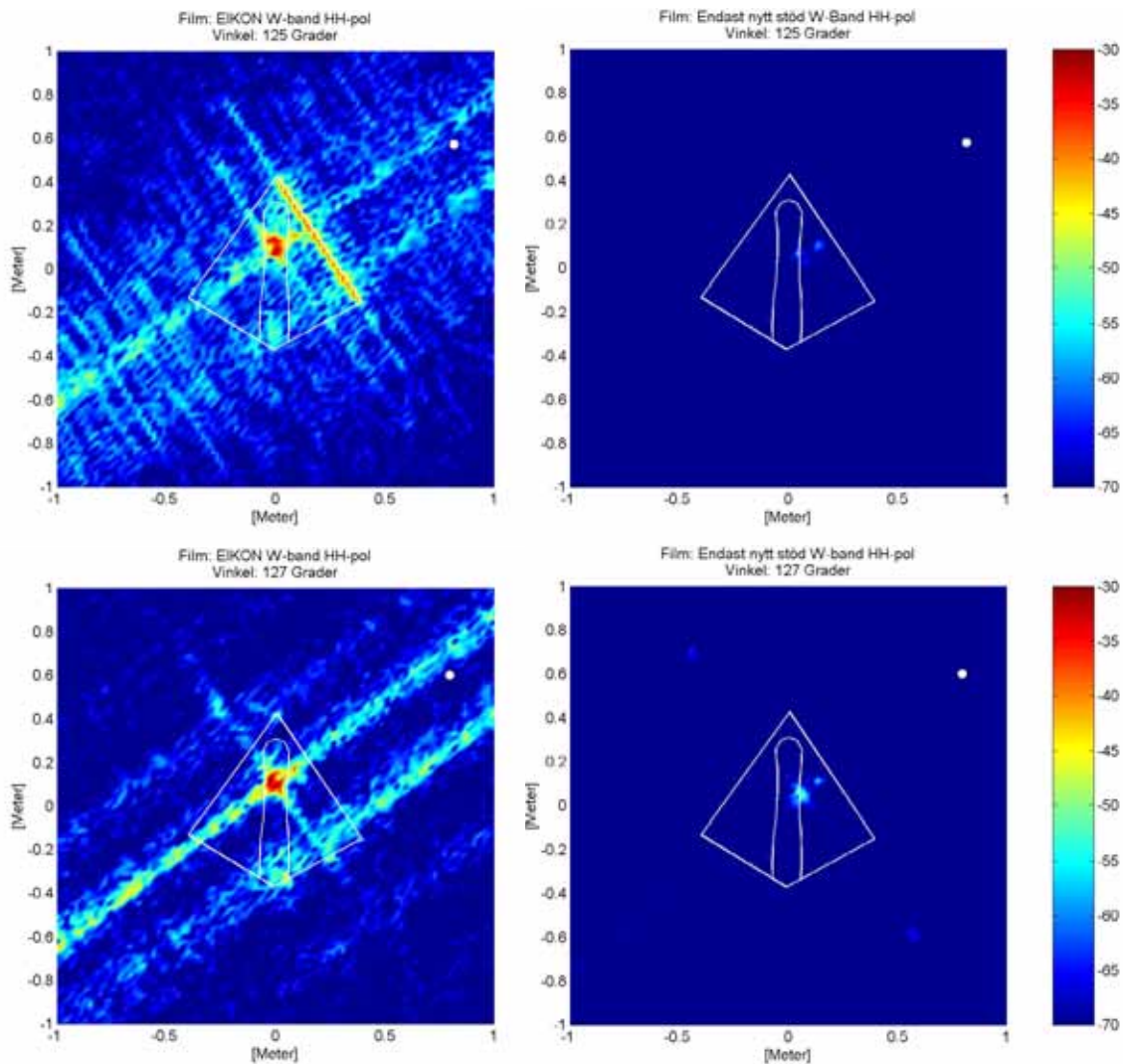


**Figur 38.** Radarmålarean som funktion av azimutvinkeln för EIKON vid 94,5 GHz. Polarisationen är HH. Vänstra bilden visar med det nya stödet och högra bilden visar med frigolitstödet.

I **Figur 38** framgår att medelnivån av bakgrundsbidraget reducerats med ca 5 – 10 dB. Dock har, som förväntat, nya toppar introducerats vid ca 90° och 270°. Dessa toppar härrör från stativets bredsidor som visas mot antennerna. Vid 180° har bakgrunden reducerats med ca 10 dB jämfört med frigolitbakgrunden. I **Figur 38** ser man också att topparna vid ca 125° och 235° har breddats markant mellan de olika mätningarna. För att undersöka orsakerna till denna breddning mer i detalj använder vi oss av ISAR. I **Figur 39** och **Figur 40** visas ISAR-avbildningar med och utan EIKON på stativet. Man ser att infästningen samt interaktionen mellan stativ och EIKON ger ett signifikant bidrag till målarean och är orsaken till breddningen av topparna vid 127° och 230°. Genom att titta på ISAR-filmen varvet runt framgår att infästnings- och interaktionsbidraget ger signifikanta bidrag vid vinklarna vid ca 127° och 230°.



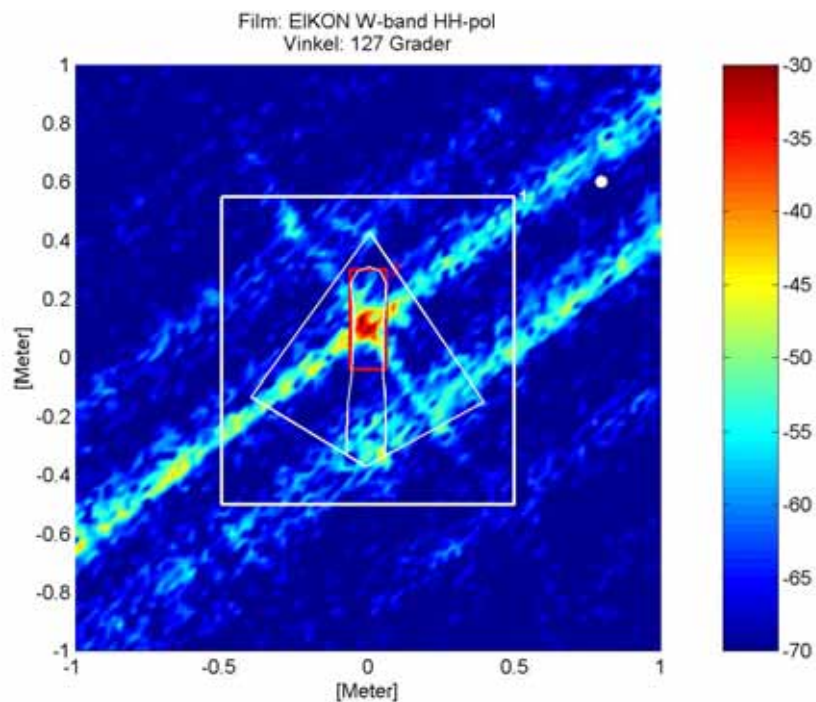
**Figur 39.** ISAR-avbildningar av: Till vänster) EIKON på nytt stöd. Till höger) Endast nytt stöd. Den vita prickens motsvarar aperturens bisektrisposition, dvs 90°.



**Figur 40.** ISAR-bilderna är genererade utifrån mätdata vid W-band. Till vänster visas ISAR-bilder av EIKON på det ”nya” stativet vid 125 och 127 grader. Det relativt stora bidraget som kan ses i bil-

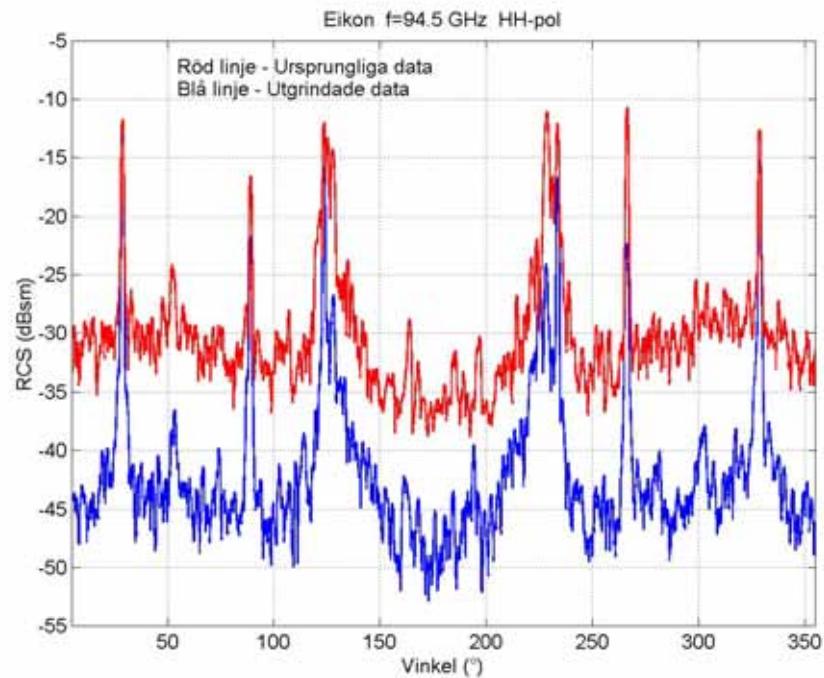
*den härrör från interaktionen mellan objekt och stativ. Bilderna till höger visar ISAR-bild på enbart stativet vid samma vinklar.*

För att få en uppfattning om hur mycket infästning och annan bakgrund påverkar målarean för EIKON har vi använt utgrindningsfunktionen i analysverktyget Columbus [43]. Det bör påpekas att denna option skall användas med försiktighet. Här används den enbart i syfte att ge en uppskattning på hur mycket man skulle kunna reducera bakgrunden genom att konstruera ett mer påkostat ”lägsignaturstöd”. **Figur 41** visar hur grindarna är placerade i ISAR-bilden. Den vita grinden (inklusivegrind) motsvarar att allt inom grinden konverteras tillbaka till RCS medan den röda grinden (exklusivegrind) motsvarar att allt inom grinden sätts till 0 (oändlig dämpning) eller godtycklig dämpning. I detta fall sattes allt inom den röda grinden till oändlig dämpning.



**Figur 41.** ISAR-bild av EIKON på nytt stativ. Infästningsbidraget syns tydligt som en röd punkt inom exklusivegrinden (röd ram). Den vita ramen definierar inklusivegrinden.





*Figur 42. Den blåa linjen visar den utgrindade (se figur ovan) mälarean. Den röda linjen visar data utan någon filtrering.*

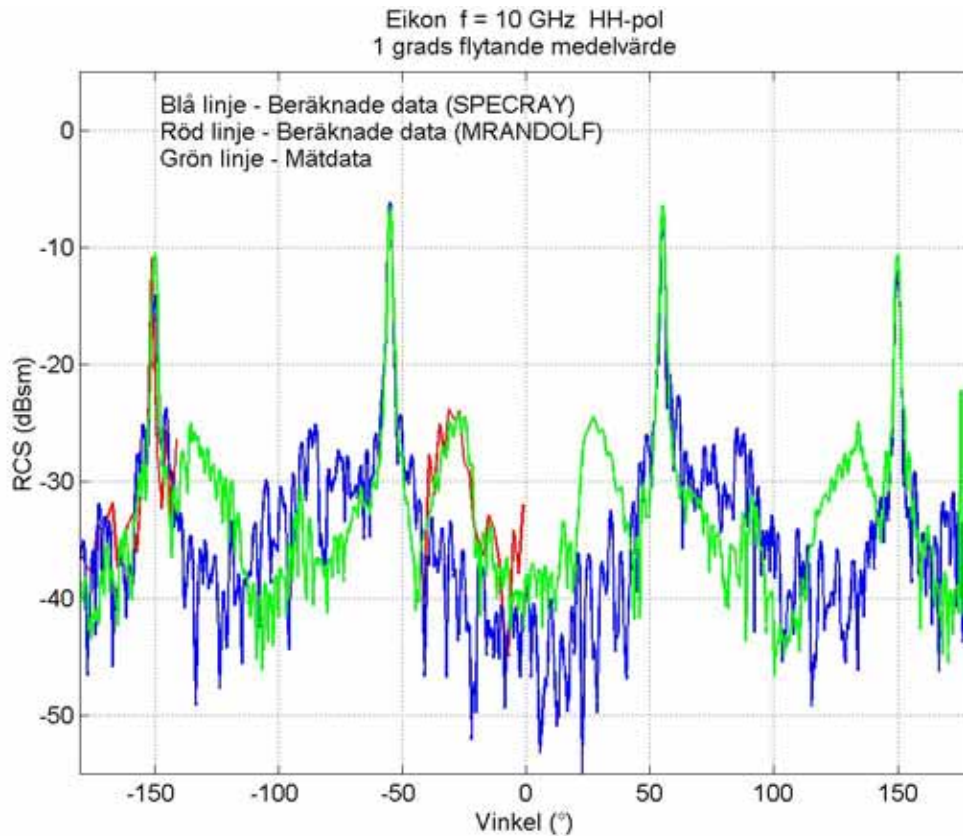
*Figur 41* och *Figur 42* visar att det finns förutsättningar att minska bakgrunden betydligt vid dessa frekvenser genom att konstruera ett mer påkostat stativ samt en infästningskonstruktion som ger liten retur.

## 10 JÄMFÖRELSE MELLAN BERÄKNING OCH MÄTNING

För att undvika plottriga diagram har vi valt att jämföra filtrerade data. Alla data som presenteras har filtrerats med ett 1-gradigt flytande medelvärdesfilter.

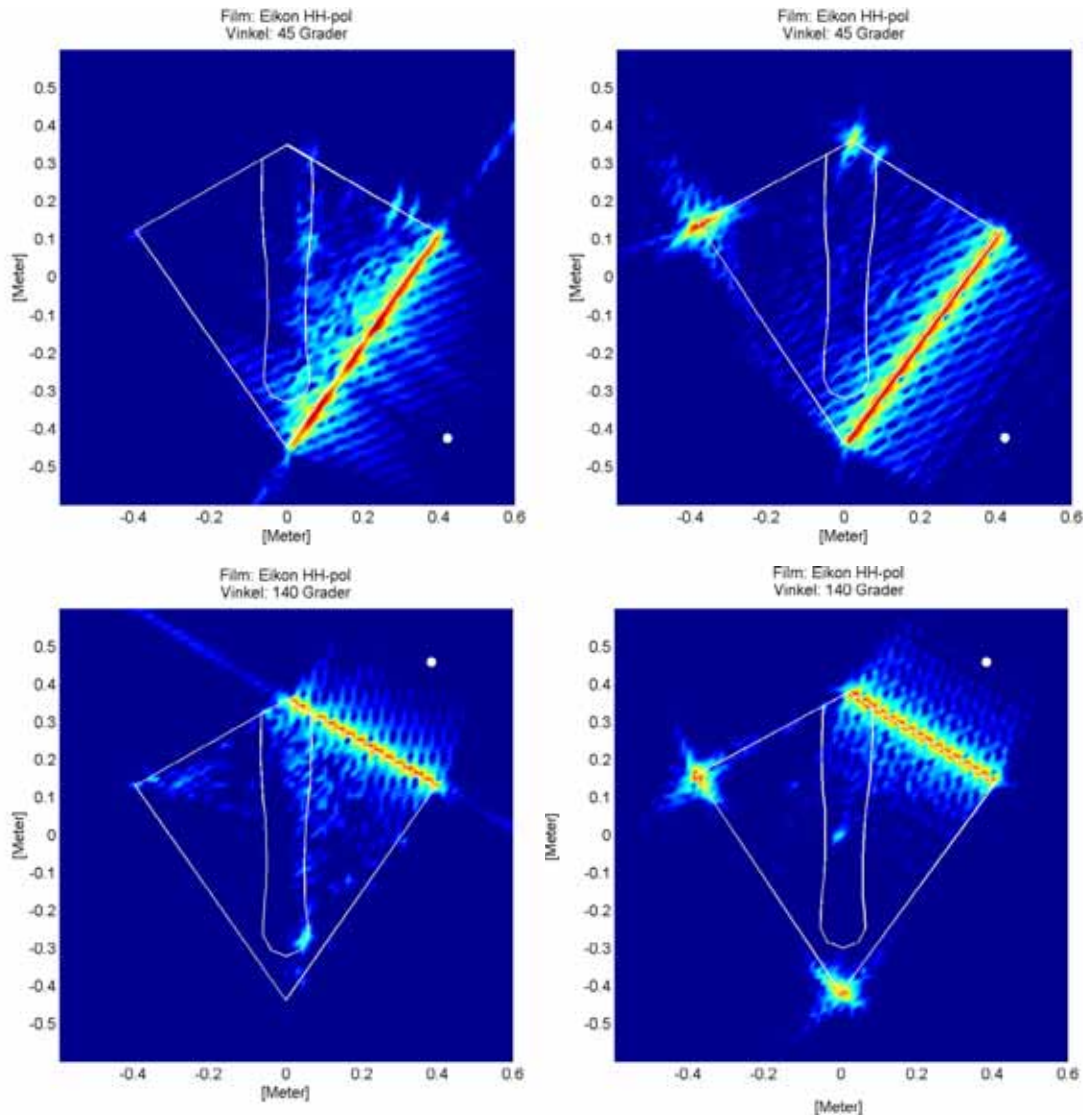
### 10.1 X-BAND

*Figur 43* visar radarmålarean som funktion av azimutvinkeln vid 10 GHz från mätningarna respektive beräkningarna. Polarisationen är HH.



*Figur 43. Diagrammet visar målarean som funktion av azimutvinkeln för EIKON. Blå linje representerar beräknade data från SPECRAY, röd linje representerar beräknade data från MRANDOLF och grön linje är mätdata.*

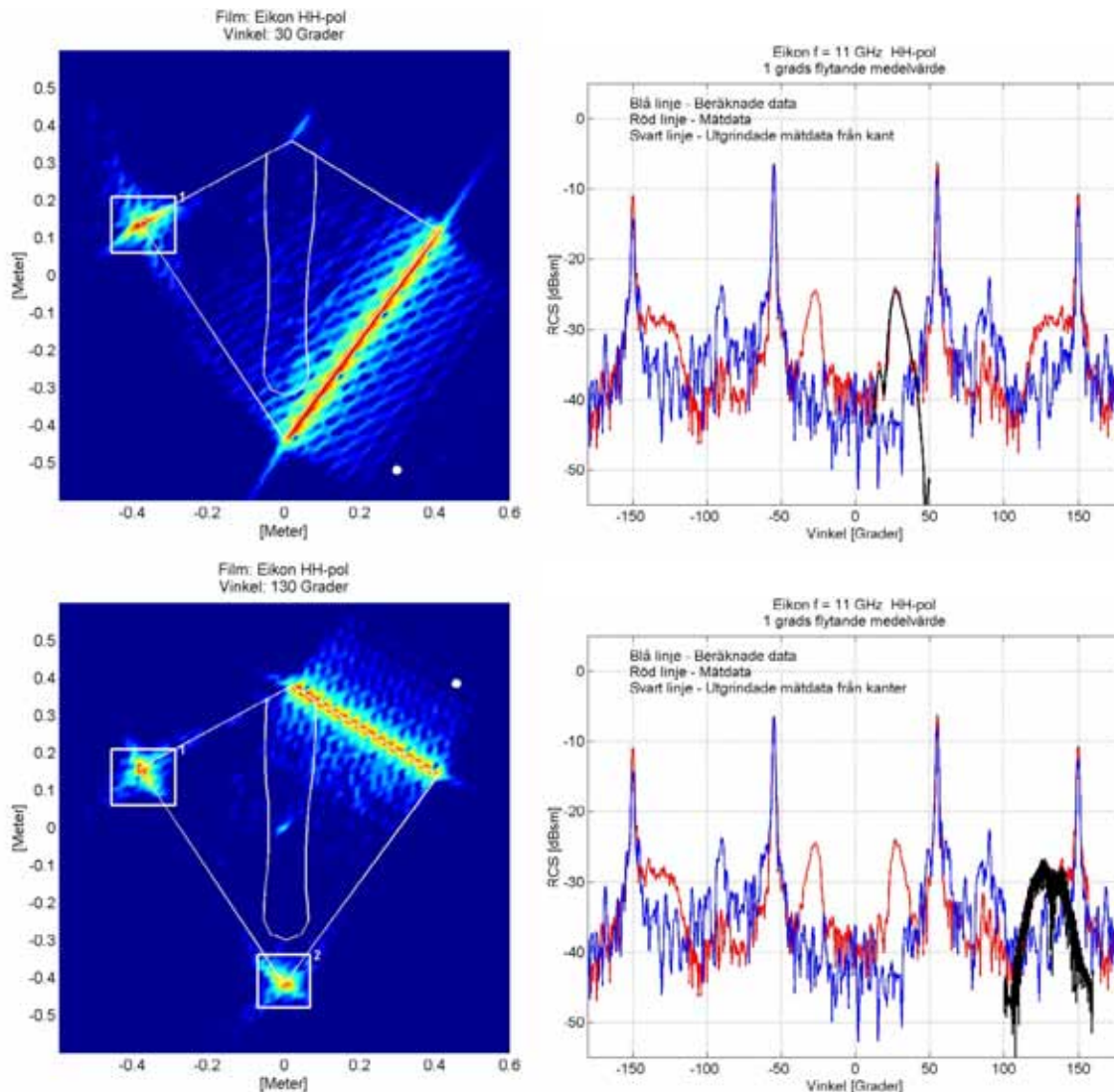
I *Figur 43* framgår att det i vissa vinkelsektorer är god överensstämmelse medan i andra mindre god överensstämmelse. Genom att betrakta ISAR-avbildningar från både beräknade och uppmätta data går det att finna orsakerna till avvikelserna mellan de olika data. *Figur 44*, *Figur 45* och *Figur 46* visar dessa avvikelser.



**Figur 44.** Till vänster visas ISAR-avbildningar av beräknade data och till höger av uppmätta data. Den vita pricken motsvarar den syntetiska antennaperturens bisektrisriktning. I detta fall är antennens aspektvinkel =  $45^\circ$  och  $140^\circ$ .

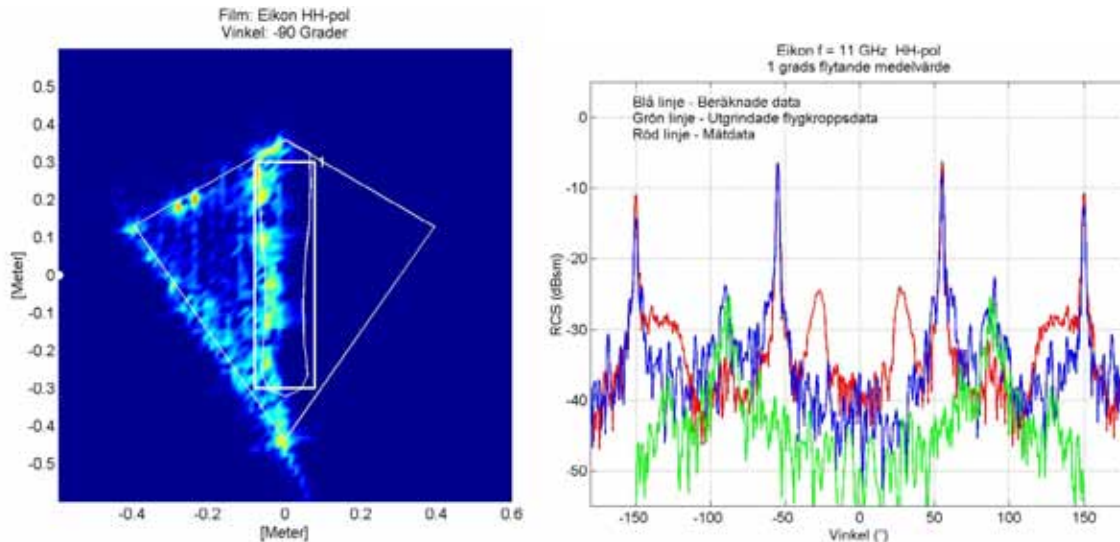
Vi ser i figurerna att det för de beräknade data inte finns något bidrag som härrör från bakkanterna, sett ifrån antennens aspekt. Detta beror på att SPECRAY EM, i nuläget, inte beaktar ytvågor och deras interaktion med t ex kanter. Genom att använda grindfunktionen i analysprogrammet Columbus [43] kan man ”klippa ut” dessa bidrag från ISAR-bilden och konvertera data tillbaka till radarmålareadata. I *Figur 45* och *Figur 46* har detta utförts och man ser att det är dessa bidrag som står för de skillnader som kan identifieras vid ca  $-130^\circ$ ,  $-30^\circ$ ,  $+30^\circ$  och  $130^\circ$  i radarmålareadiagrammen.





**Figur 45.** De vita ramarna i ISAR-bilderna representerar de områden som har "klippts ut" och konverterats tillbaka till målareadata. ISAR-bilderna är gjorda utifrån mätdata. Diagrammen till höger visar uppmätta (röd linje) och beräknade data (blå linje) tillsammans med utgrindade data (svart linje) från respektive grinduppsättning som visas i ISAR-bilderna till vänster.

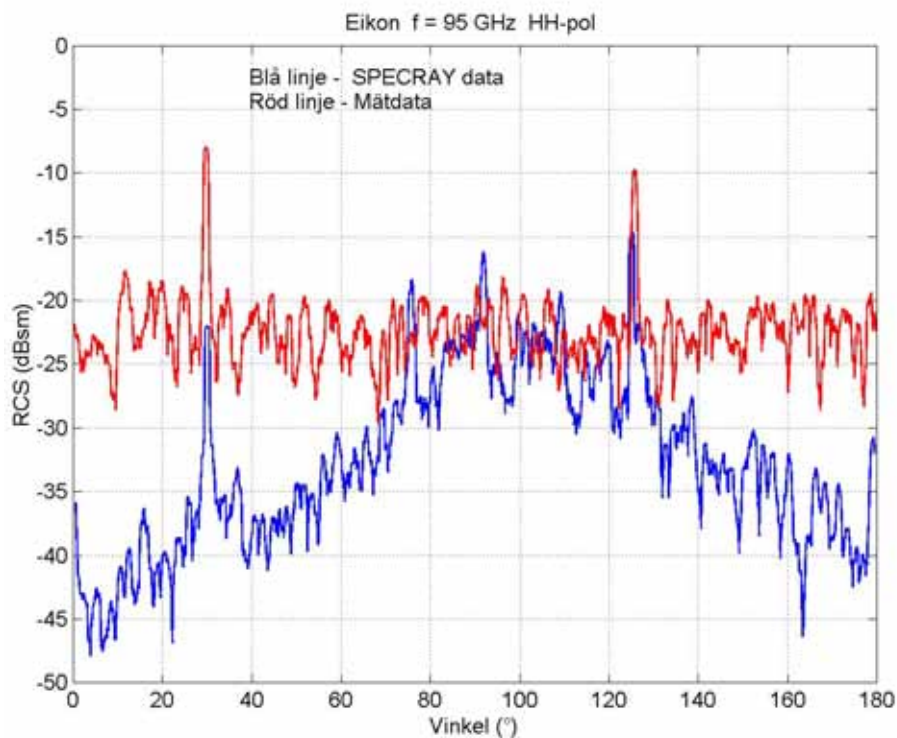
Man ser också från radarmålareadiagrammen att det finns en signifikant skillnad mellan uppmätta och beräknade data vid ca  $-90^\circ$  och  $90^\circ$ . Denna skillnad härrör från det faktum att flygkroppen ger ett bidrag vid beräkningarna, se **Figur 46**. Man ser i ISAR-bilden ovan att man får bidrag från en del delar på objektet som man inte förväntar sig att få bidrag ifrån. En förklaring till dessa artefakter är att vissa facetter kan ligga orienterade på ett sätt som gör att deras kanter ligger vinkelrätt mot antennriktningen och därmed ger ett signifikant bidrag till målarean. Problemet kan troligtvis avhjälpas genom att beskriva modellen med en finare facettering.



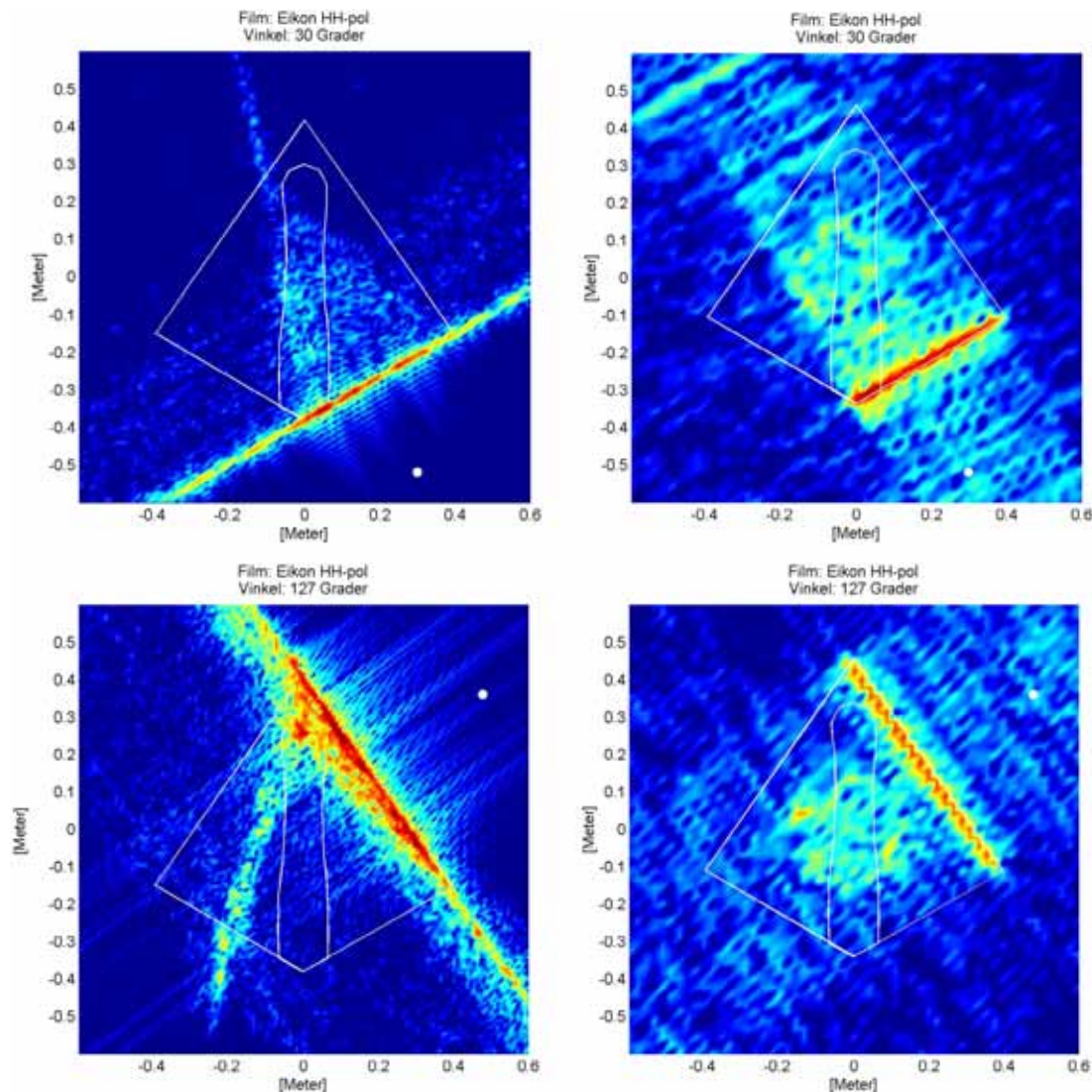
**Figur 46.** Den vita ramen i ISAR-bilden representerar det område som har "klippts ut" och konverterats tillbaka till målareadata. ISAR-bilden är gjorda utifrån beräknadedata. Diagrammet till höger visar de uppmätta (röd linje) och beräknade data (blå linje) tillsammans med utgrindade data (grön linje) från grinden som visas i ISAR-bilden till vänster.

## 10.2 W-BAND

**Figur 47** visar radarmålarean som funktion av azimutvinkeln. Figuren visar att det är svårt att dra några egentliga slutsatser direkt från målareadata. Detta beroende på att mätningarna innehåller signifikanta bakgrundsbidrag från frigolitstödet, dvs en basnivå kring -25 dB. Figurenerna nedan visar ISAR-avbildningar från beräknade och mätta data.



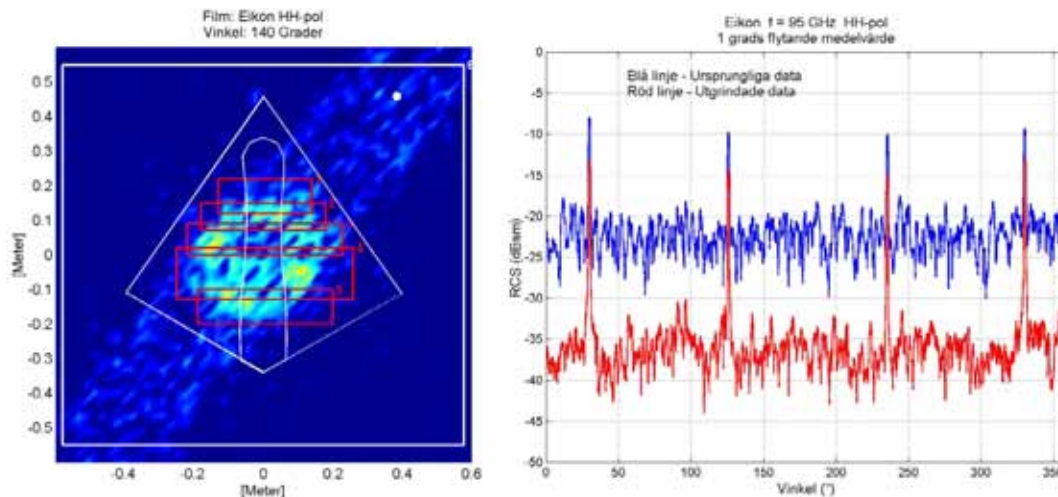
**Figur 47.** Radarmålarean för mätningarna (röd linje) respektive beräkningarna (blå linje) vid 95 GHz och HH-polarisation.



**Figur 48.** Till vänster visas ISAR-avbildningar av beräknade data och till höger av uppmätta data. Den vita pricken motsvarar den syntetiska antennaperturens bisektrisriktning. I detta fall är antennens aspektvinkel  $30^\circ$  och  $127^\circ$ .

**Figur 48** visar dels på att beräknade data ger oförklarliga bidrag (längst ned till vänster) och dels på att de uppmätta data uppvisar relativt hög bakgrunds nivå från frigolitstödet. **Figur 49** visar en uppskattning på hur mycket frigolitbakgrunden påverkar målarean för EIKON.





**Figur 49.** ISAR-bilden visar de grindar (röda ramar) som använts för att ”klippa bort” frigolitbakgrunden. RCS-diagrammet visar de ursprungliga data (blå linje) och de utgrindade data (röd linje) vid 95 GHz och HH-pol.

Genom att ”dämpa ut” det som ligger inom de röda ramarna i **Figur 49**, dvs främst frigolitbidrag, får vi en uppskattning på hur mycket frigoliten påverkar resultatet.

### 10.3 SLUTSATSER

Som tidigare nämnts så är EIKON ett orealistiskt ”rent” objekt, d.v.s. utan luftintag, utblås, skarvar, klaffar, roder och dylikt, samt utformat på ett smyganpassat sätt. Detta medför att målarean är mycket liten vilket i sin tur ställer höga krav på både mätningar och beräkningar. För att kunna mäta så låga nivåer krävs mycket stabila mätförhållanden. Stabiliteten är här ett mått på hur mycket bakgrunden har förändrats mellan en bakgrundsmätning och en objekt-mätning samt hur mycket den förändras under pågående mätning.

Mätningarna som utfördes i FOIs stora mätstuga vid X-band visar på att mätförhållandena har varit mycket stabila. Filtreringsmetoder som bakgrundssubtraktion och 0-dopplerfiltrering går med mycket gott resultat att utföra för dessa mätningar.

Mätningarna som utfördes på FOIs utomhusmätplats ”Lilla Gåra” vid W-band visar dels på att bakgrundsbidraget från de olika stativerna ger signifikant bidrag till målarean och dels att mätförhållandena inte var tillräckligt stabila för att kunna nyttja de olika filtreringsmetoderna. Vill man nyttja de filtreringsmetoder som beskrivs ovan krävs en stabilitet som är bättre än  $\lambda/8$  för att reducera bakgrunden med ca 1,6 dB. Detta innebär, vid 100 GHz, att en stabilitet på ca 0,4 mm krävs för att reducera bakgrunden med ca 1,6 dB. Det är svårt att uppnå denna stabilitet vilket gör att man istället får koncentrera sig på att reducera bakgrunden och/eller belysa mindre del av bakgrunden. Från mätningarna på de två olika stativerna (frigolit och lågbudget-lågsignaturstöd) ser vi att bakgrunden kan reduceras med minst 12 dB, se **Figur 38**, då stativet visar lågsignatursidan mot antennerna. Genom att tillverka ett stöd med en konstruktion som gör det möjligt att endast vrida objektet (lågbudget pylon) kommer man ha möjlighet att minska bakgrunden med minst 12 dB vid W-band.

Vid jämförelsen mellan de beräknade och de uppmätta resultaten vid X-band kan man identifiera betydande skillnader vid vissa vinklar. Dessa skillnader kan dels förklaras med att den använda beräkningsmetoden inte tar hänsyn till inducerade ytvågor och dess interaktion med

kanter och dels att flygkroppens bidrag överskattas i beräkningarna vilket kan bero på en för grov facettering av modellen.

Vid W-band ger de beräknade data oförklarliga bidrag till radarmålarean. För att komma till rätta eller åtminstone förstå dessa avvikelser skulle man behöva studera vilka effekterna skulle bli av resultaten om man utförde beräkningarna med t.ex. olika typer facetteringsnät (t.ex. oregelbundna), finare indelning mellan de utsända strålarna, en högre ordningens antialiasing osv.

På grund av de osäkerheter som finns i de beräknade och uppmätta data vid W-band är det svårt att dra några kvantitativa slutsatser. Slutsatsen man kan dra, med ett sådant lågsignatur-objekt som EIKON, är att det krävs god kontroll på dels bakgrundsnivåer vid mätningar och dels på hur olika beräkningsinställningar (t.ex. facetteringsnät, PTD-bidrag, strålinde-ning, mm) påverkar resultatet.

## 11 UTVÄRDERING OPTISK SIGNATUR

Som underlag för utvärdering av den optiska signaturen hos EIKON har endast resultat från simuleringar använts eftersom inga mätningar genomförts. En kommenterande diskussion fördes i avsnitt 7 så detta avsnitt begränsas till att redovisa kravuppfyllelsen samt en räckviddsberäkning i framifrån-fallet. Bakifrån-fallet, som innebär en än högre utmaning i IR-signaturhänseende, har inte analyserats m.a.p. krav och räckvidd.

### 11.1 KRAVUPPFYLLELSE

Både vid avståndet 1,5 km som anges i de befintliga kraven och för avståndet 5 km är EIKON upplöst för de utvalda hotsensorerna. (För 5 km nätt och jämnt upplöst). Därför är det relevant att göra en jämförelse mellan resultat och krav i form av radiansdifferens. I Tabell 7 redovisas detta för dagfallet för de fyra studerade färgerna. I denna aspekt visade sig strålningen från avgasplymen försumbar. Det framgår ur tabellen att kraven endast uppfylls för den spekulära lågemissiva färgen. I avsnitt 7.5.2 framgår det att den låga totala kontrasten uppnås genom en balans mellan en positiv och en negativ kontrast på undersidan respektive översidan. För ett upplöst mål är det knappast en acceptabel lösning. Slutsatsen måste därför vara att de studerade färgerna inte uppfyller kraven för framifrån-fallet. Att välja olika färg på över och under-sida skulle kunna förbättra resultaten men måste utvärderas i alla aspekter.

Tabell 7. Jämförelse av beräkningsresultat och krav för några exempel på hotsensorer i framifrån-aspekten och för de 4 studerade färgerna. Dagtid 5km.

Kategori	Modellexempel	Ldiff	Ldiff	Ldiff	Ldiff	Ldiff
		krav	d $\epsilon=0,95$	d $\epsilon=0,5$	s $\epsilon=0,95$	s $\epsilon=0,5$
		W/m <sup>2</sup> /sr	W/m <sup>2</sup> /sr	W/m <sup>2</sup> /sr	W/m <sup>2</sup> /sr	W/m <sup>2</sup> /sr
Äldre scannande IRV LWIR	Thermovision 900 LW	0,3	11	3,2	4,5	0,16
Modernare stirrande IRV LWIR	ThermaCam SC3000	0,075	2,8	0,80	1,1	0,041
Äldre scannande IRV MWIR	Thermovision 900 SW	0,065	0,60	0,31	0,37	0,16
Modern stirrande IRV MWIR	Emerald LR	0,03	0,60	0,31	0,37	0,16

d=diffus, s=spekulär

## 11.2 RÄCKVIDDSBERÄKNING

För att värdera signaturen hos EIKON kan en uppskattning av räckvidden mot några olika sensorsystem göras. Här har scenariot rakt framifrån valts och beräkningen har gjorts för sensorerna i Tabell 1. Beräkningen som är överslagsmässig har följt följande procedur för varje sensor:

- Simulering av EIKON på 5 km avstånd för dagfall med diffus färg med  $\epsilon=0,95$ . Den använda modellen saknar intag.
- Beräkning av irradianskontrast  $E_{diff}$  (se avsnitt 4.1) för EIKON relativt bakgrunden. Det antas att EIKON inte är upplöst.
- Beräkning av atmosfärs effekter som funktion av avstånd m.h.a. Modtran (horisontell sträcka).
- Bestäm NEI för aktuella sensorer.
- Sätt tröskeln  $\Lambda=5$ .
- Beräkna det avstånd för vilket  $E_{diff}=\Lambda*NEI$ . Förenklad representation av atmosfärs effekterna användes för att beräkna irradianskontrasten för andra avstånd än 5 km.

Resultaten av räckviddsuppskattningen redovisas i Tabell 8.

Tabell 8. Uppskattad räckvidd mot EIKON för några olika sensorsystem

Kategori	Modellexempel	synfält	Upplös- ningsgräns	Räckvidd
		°	km	km
Äldre scannande IRV LWIR	Thermovision 900 LW	5	2,5	16
Modernare stirrande IRV LWIR	ThermaCam SC3000	7,5x5	2,5	16
Äldre scannande IRV MWIR	Thermovision 900 SW	5	2,5	13
Modern stirrande IRV MWIR	Emerald LR	22x17 (wide) 6,6x5,5 (medium) 1,7x1,4 (narrow)	1,7 5,5 22	14 29 55

Slutsatsen blir att EIKON kommer att detekteras på betydligt längre avstånd än det specificerade avståndskravet för denna konfiguration. Det ska påpekas att uppskattningarna för SC3000 och Emerald LR är osäkra.

För att få en säkrare räckviddsuppskattning behöver framför allt följande moment förbättras:

- Inkludera luftintaget hos EIKON
- Analysera flera aspekter och elevationer
- Förbättra klotterbeskrivningen
- Inkludera sensormodeller med algoritmer för detektion, klassificering, identifiering och målföljning i simuleringen
- Genomföra fullständig simulering för flera avstånd

## 12 REFERENSER

- [1] C Nelsson, m.fl., "Multidisciplinär optimering av lågsignaturfarkost", FOI-R--1465--SE, december 2004.

- [2] J Rahm, O Lundén, A Örbom och S Nilsson, "Radarmålareamätningar på Eikon", FOI-R--1717--SE, augusti 2005.
- [3] M Johansson och T Winzell, "Benchmarking av SIGGE och McCavity", *manuskript till FOI-rapport*.
- [4] C. Nelsson, m.fl., "Multidisciplinär optimering av lågsignaturfarkost - slutrapport", FOI-R--1811--SE, 2005.
- [5] <http://www.saabaerosystems.com/4.d90453fedf4722d47fff454.html>
- [6] Bernhard Gustafsson; "FoT25 nyckelteknologiprojekt TVC-LO Intag och Utlopp - AP 2.5 Analys CFD", 2005VAC001418, *FÖRETAGSINTERN*.
- [7] R. L. Keeney och H. Raiffa, "Decisions with Multiple Objectives", Cambridge University Press, Cambridge, Storbritannien, 1993.
- [8] T.W. Simpson, A.J. Booker, D. Ghosh, A.A. Giunta, P.N. Koc, and R.-J. Yang., "Approximation Methods in Multidisciplinary Analysis and Optimization: A Panel Discussion," *3rd ISSMO/AIAA Internet Conference on Approximations in Optimization*, Oct. 14-18, 2000
- [9] Web page: <http://endo.sandia.gov/DAKOTA>
- [10] Web page: <http://www.engineous.com/products.htm>
- [11] D.P. Bertsekas, "Nonlinear Programming, Second Edition", Athena Scientific, 1999.
- [12] G.L. Nemhauser, A.H.G. Rinnooy Kan and M.J. Todd, Eds., "Handbook in Operations Research Management Science, Vol. 1, Optimization", Elsevier Science Publishers (North-Holland), Amsterdam, Nederländerna 1989.
- [13] R. Fletcher, "Practical methods of Optimization, second edition", John Wiley and Sons, Tiptree, Great Britain, 1987.
- [14] D.G. Luenberger, "Linear and nonlinear programming, second edition", Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1984.
- [15] Goldberg, David E (1989), "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Kluwer Academic Publishers, Boston, MA.
- [16] L. Ingber, "Simulated annealing: Practice versus theory", *Mathl. Comput. Modelling*, vol. 18, no. 11, pp. 29-57, 1993.
- [17] P. Hermansson, S. Nyberg, E. Andersson and D. Börjesson, "Methods for validating optical signature simulations – progress report", FOI teknisk rapport FOI-R--1421--SE, 2004.

- [18] A.A. Giunta, M.S. Eldred, L.P. T.G. Swiler, Trucano, and S.F. Wojtkiewicz Jr., "Perspectives on Optimization Under Uncertainty: Algorithms and Applications" paper AIAA-2004-4451 in Proceedings of the 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, Albany, NY, Aug. 30 - Sept. 1, 2004.
- [19] Johan Carlsson., "Statistisk analys av infraröd bakgrundsstålning", FOI-R--0184--SE, September 2001.
- [20] M. Streetly: "Electronic eyes on wings and rotors: sensors improved for enhanced airborne early warning", Jane's International Defence Review, s. 56-62, November 2005.
- [21] P.E. Houlborn: "The future evolution of airborne radar", Military Technology, MILTECH, no. 8, s. 57-64, 1999.
- [22] <http://www.fas.org/man/dod-101/sys/land/sentinel.htm>
- [23] P. Quaranta: "Modern sensors packages for combat aircraft", Military Technology, no. 2, p. 92-100, 2002.
- [24] J. Roulston: "Future developments in airborne radar", Military Radar Seminar, 7<sup>th</sup> September 2004, Cranfield University. Power Point-bilder, IEE Transport Professional Network, Radar Sonar & Navigation, <http://www.iee.org/oncomms/pn/radar/Roulston.pdf>
- [25] H.D. Griffiths: "Bistatic and Multistatic radar", Military Radar Seminar, 7<sup>th</sup> September 2004, Cranfield University. Publicerad på <http://www.iee.org/oncomms/pn/radar/Griffiths%20Shrivenham.pdf> (där finns även Power Pointbilder, som bra komplement till artikeln).
- [26] M.I. Skolnik: "Introduction to Radar Systems", 3rd edition, McGraw Hill, Boston, 2001.
- [27] R.L. Mitchell: "Radar signal simulation", Artech House, Dedham, 1976.
- [28] M. Karlsson, M. Gustavsson, S. Molin, F. Näsström: "Utvärdering av SPECRAY EM - Ett programpaket för radarsignaturberäkningar och radarsimuleringar", Linköping, FOI--1354--SE, Användarrapport, Oktober 2004.
- [29] Martin Nilsson: "Fast numerical techniques for Electromagnetic Problems in Frequency Domain" ACTA UNIVERSITATIS UPSALIENSIS, Uppsala 2003.
- [30] S. Björklund, P. Brämning, A. Eneroth, P. Johansson, S. Gadd, M. Hansson, J. Rasmusson, M. Wilow: "Utvärdering av SADM, en simulator för duellen mellan krigsfartyg och anfallande robotar", FOI Memo 1219, Utgåva B, 14 Februari 2005.
- [31] B.R. Mahafza: "Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB", Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, 2000. ISBN 1-58488-182-8.
- [32] [http://www.itnu.de/radargrundlagen/kartei/air\\_defense/kart\\_103.html](http://www.itnu.de/radargrundlagen/kartei/air_defense/kart_103.html)



- [33] Swerling, P.: "Detection of fluctuating pulsed signals in the presence of noise", IRE Transactions on Information Theory, vol. IT-3, no. 3, s. 175-178, September 1957.
- [34] Swerling, P.: "Probability of detection for fluctuating targets", IRE Transactions on Information Theory, vol. IT-6, no. 2, s. 269-308, April 1960.
- [35] J. B. Keller, "Geometrical theory of diffraction," *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. 52, 116130, 1962.
- [36] P. Ya. Ufimtsev, "Theory of Edge Diffraction in Electromagnetics", Tech Science Press, Encino, CA, 2003.
- [37] D. Filbee et al., "Modeling of High Fidelity Synthetic Imagery for Defence Applications", Proceedings of SPIE, Vol 4718, 2002, p. 12.
- [38] McCavity, "User Guide for McCavity Version 4.0", March 2005, Insys Ltd, Reddings Wood, Ampthill, Bedford, MK45 2HD, England.
- [39] McCavity, "Test Report McCavity Version 4.0", March 2005, Insys Ltd, Reddings Wood, Ampthill, Bedford, MK45 2HD, England.
- [40] F.X., et al., "MODTRAN report: The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN 7 Model", Ontar Corporation, 9 Village Way, North Andover, MA 01845, USA, 1996.
- [41] L.V. Blake: "Prediction of radar range", kap. 2 i "Radar Handbook", 2<sup>nd</sup> edition, M.I. Skolnik (ed.), McGraw-Hill, New York, 1990.
- [42] A. Nelander, A. Sume, E. Zdansky: "Värderingsprogram för radarmålarea; metodanalys för krav och värdering av radarmålarea", FOI Memo 03-1498:2, 40 s., 2003-06-15.
- [43] Hans-Olof Brelin, Jonas Rahm, Christer Larsson: "Utveckling och implementering av Columbus, ett verktyg för ISAR-analys. Delrapportering inom VU-SAT." Linköping, FOA-R--00-01491-615--SE, April 2000.

## Bilaga 1 Beräknad kontrast relativt bakgrunden för EIKON i det optiska området.

