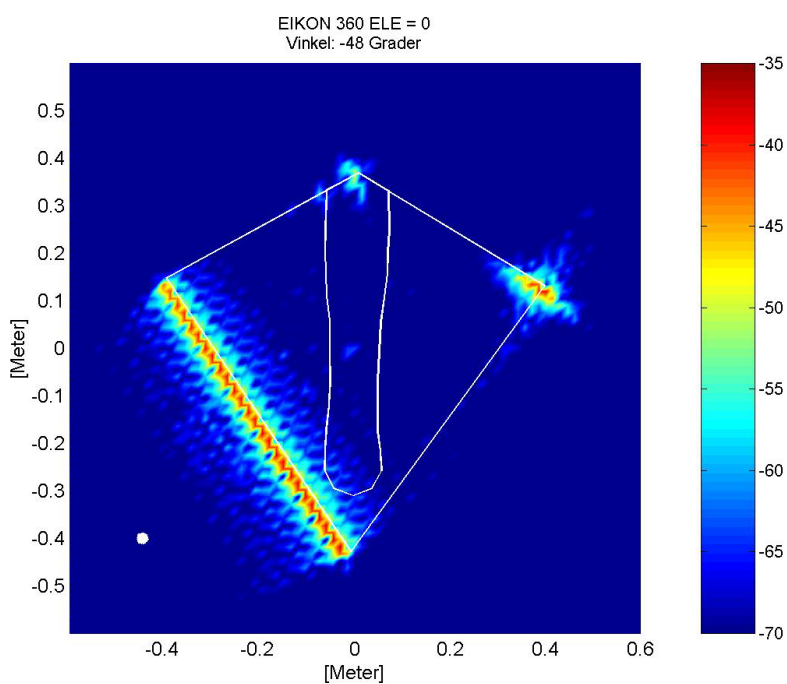
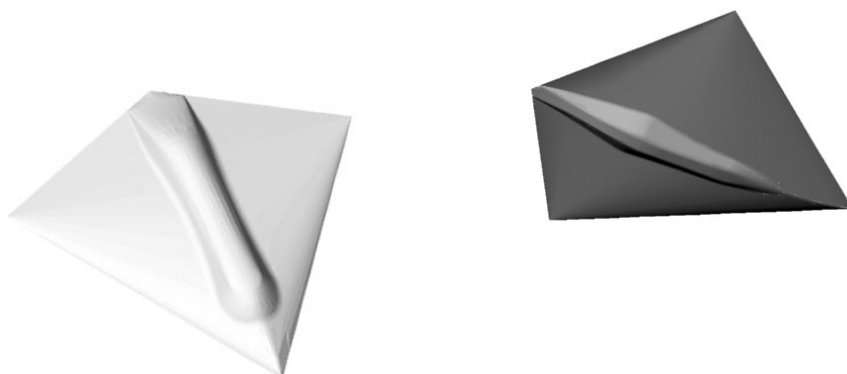


Radarmålareamätningar på Eikon

Jonas Rahm, Olof Lundén,
Anders Örbom, Stefan Nilsson



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



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
Sensorteknik
Box 1165
581 11 Linköping

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

www.foi.se

Radarmålareamätningar på Eikon

Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1717--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 6. Telekrig och vilseledning	
	Månad, år Augusti 2005	Projektnummer E3072, E61109
	Delområde 62 Signaturanpassning	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Jonas Rahm Olof Lundén Anders Örbom Stefan Nilsson	Projektledare Claes Nelsson, Staffan Meijer	
	Godkänd av Johan Söderström	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM, FMV	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Jonas Rahm	
Rapportens titel Radarmålareamätningar på Eikon		
Sammanfattning (högst 200 ord) Radarmålareamätningar har utförts på den generiska UAV-modellen Eikon. Mätningarna har utförts vid FOIs stora inomhusmätplats (X-band) och FOIs utomhusmätplats "Lilla Gåra" (W-band). Resultaten indikerar att X-bandsdata är frirymdslika och kan användas som referensdata vid jämförelser med beräknade data i frirymd. De erhållna W-bandsdata visar att bakgrunden ger signifikant bidrag till Eikons målarea vilket begränsar möjligheten att använda data som referensdata.		
Nyckelord Radarmålarea, RCS, UAV, Radarmålareamätning,		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 19 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--1717--SE	Report type Technical report
	Programme Areas 6. Electronic Warfare and deceptive measures	
	Month year August 2005	Project no. E3072, E61109
	Subcategories 62 Low Observables	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Jonas Rahm Olof Lundén Anders Örbom Stefan Nilsson	Project manager Claes Nelsson, Staffan Meijer	
	Approved by Johan Söderström	
	Sponsoring agency FM, FMV	
	Scientifically and technically responsible Jonas Rahm	
Report title (In translation) Radar cross section measurement of Eikon		
Abstract (not more than 200 words) Radar cross section measurements have been performed on the generic UAV model Eikon. The measurements were performed at the large anechoic chamber (X-band), located at FOI Linköping, and at FOI's outdoor range "Lilla Gåra" (W-band). The results indicate that the X-band data is very similar to free space data and can therefore be used as reference data in the comparison to calculated free space data. The data obtained at W-band shows that the background gives significant contribution to the total radar cross-section of Eikon. Thus, the W-band data will be of limited use as reference data.		
Keywords Radar cross section, RCS, UAV, Radar cross section measurement		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 19 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehållsförteckning

Innehållsförteckning	4
Inledning	5
Använda parametrar vid mätningarna	5
Objektparametrar	5
Mätparametrar och mätuppställning i Stora mäthallen (X-band)	6
Mätparametrar och mätuppställning vid Lilla Gåra (W-band)	8
Mät- och kalibreringsmetodik	10
Mätosäkerhet	11
Resultat	12
X-band	12
W-band	15
Slutsatser	18
Referenser	19

Inledning

Denna rapport presenterar de monostatiska (kvasimonostatiska) radarmålareamätningar som utförts på den generiska flygfarkostmodellen (skalmodell 1:10) Eikon. Arbetet har finansierats av projekten ”Multidisciplinär optimering av lågsignatur flygfarkost” och ”Utformning lågsignaturfarkost”. Mätningarna utfördes vid X-band i FOIs stora mätbalk [1] och vid W-band på FOIs utomhusmätplats ”Lilla Gåra” [2].

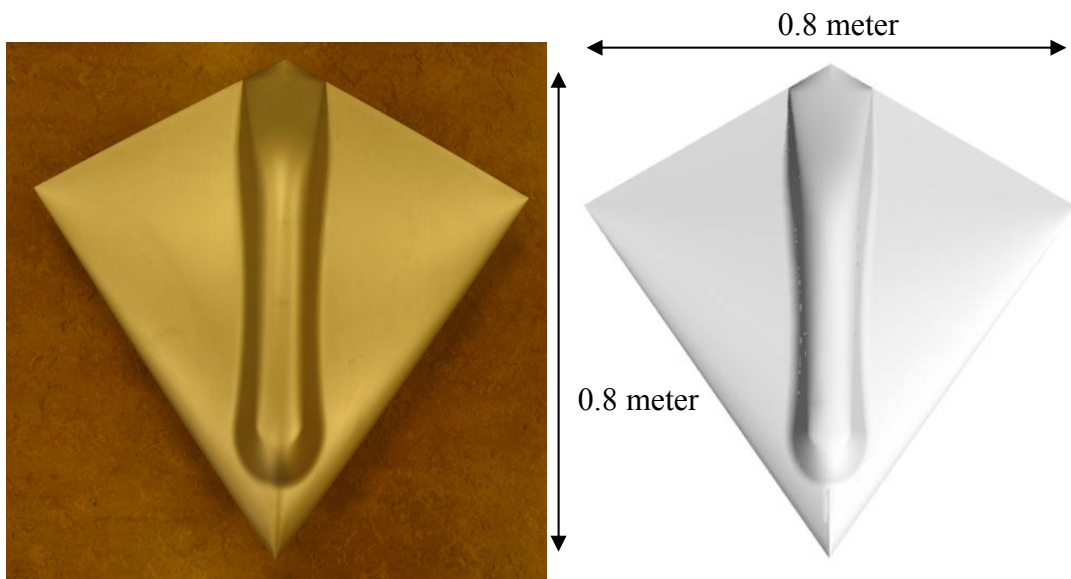
Rapporten syftar till att presentera använd mät- och kalibreringsmetodik, använda parametrar samt att presentera data från de utförda mätningarna. Rapporten kommer dock inte innehålla någon djupdykande analys av mätdata eftersom projektens ekonomiska omslutning tyvärr ej medger detta. Av samma anledning presenteras inte heller någon detaljerad mätosäkerhetsanalys. Läsaren hänvisas därför till referenserna [3-5] där mätosäkerheten för radarmålareamätningar uppskattas.

Använda parametrar vid mätningarna

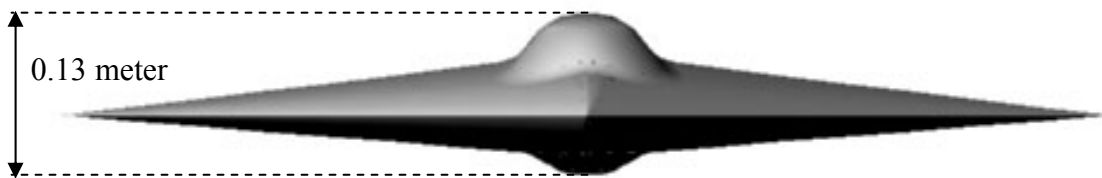
Eikon-modellen är formgjuten i en glasfiber-epoxy blandning (Ciba-Geigy Araldit 5052). Modellen är ihållig och har målats med silverfärg för att erhålla en ledande yta, se figur 1. Vi bedömer att CAD-geometrin har en mycket god överensstämmelse med den fysiska modellen.

Objektparametrar

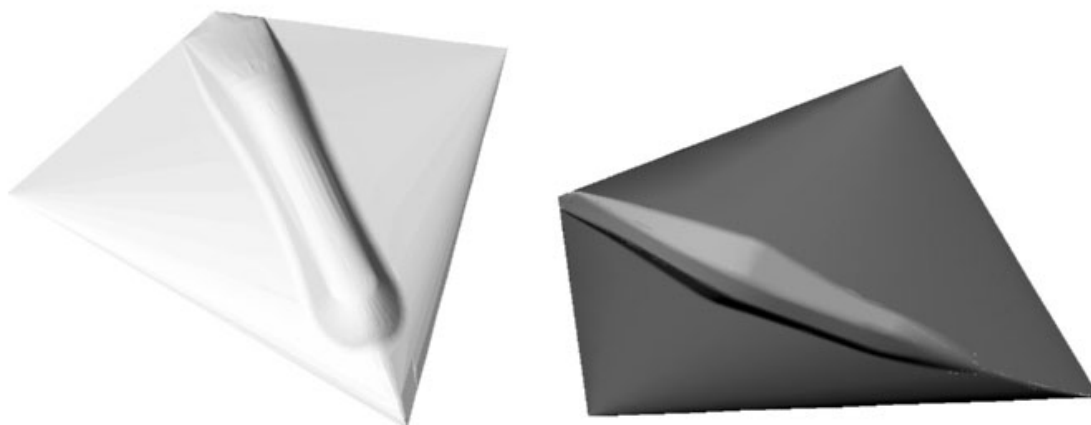
Objekt:	Eikon (se fig. 1 - 3)
Ytmaterial:	Silverfärg (betraktas här som perfekt ledande)
Dimensioner:	Se fig. 1, 2 och 3.



Figur 1. Till vänster visas foto av den tillverkade modellen och till höger CAD modellen.



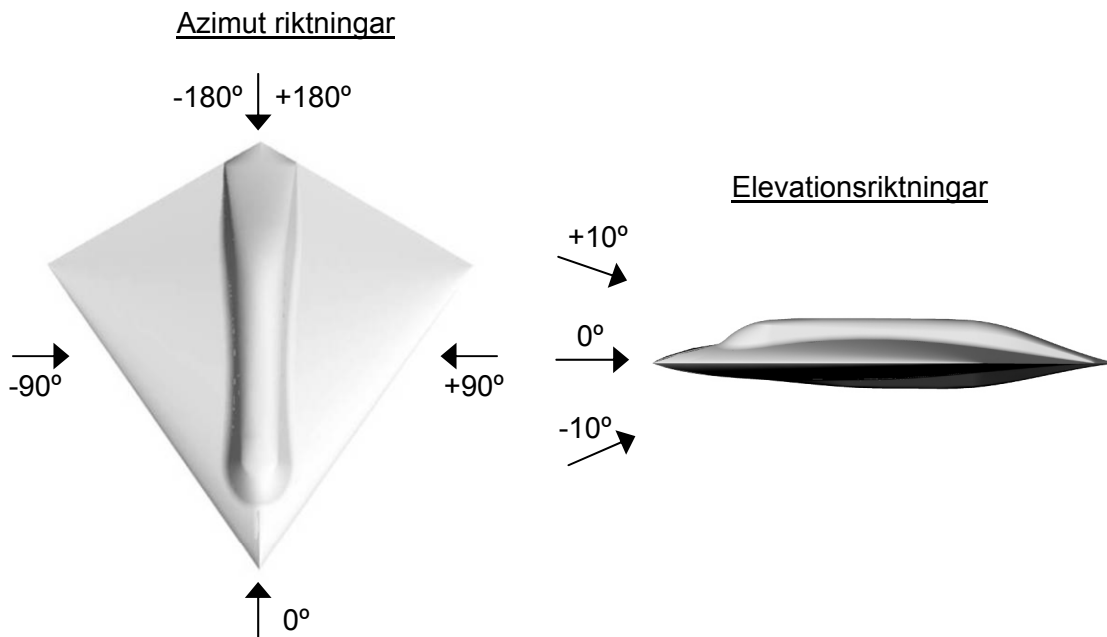
Figur 2. Eikon betraktad rakt framifrån.



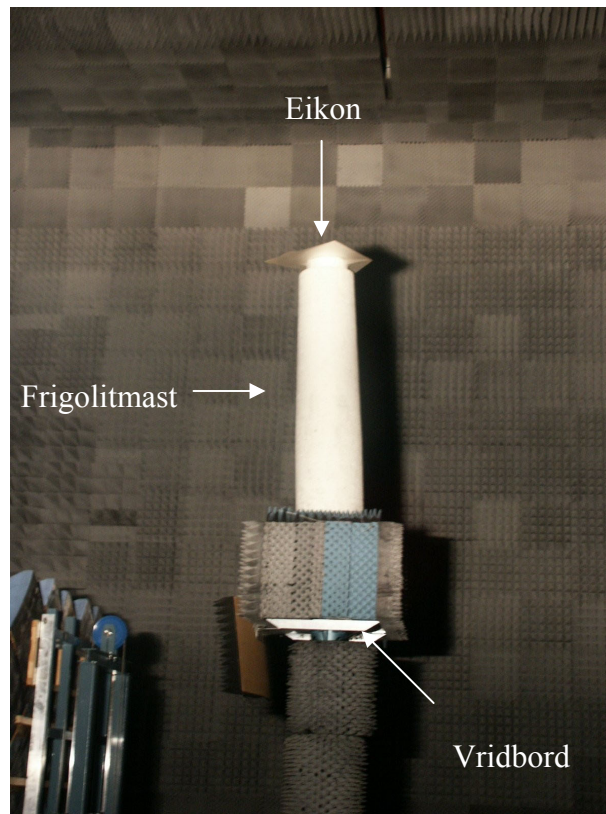
Figur 3. Perspektivbilder av Eikon ovanifrån (vänster) och underifrån (höger).

Mätparametrar och mätuppställning i Stora mäthallen (X-band)

Kalibreringsobjekt:	Aluminiumsfär. Diameter = 304.8 mm → $\sigma_{\text{HF}} = -11.4 \text{ dBsm}$.
Frekvenser:	6 – 16 GHz i steg om 25 MHz → $\#f = 401$
Azimutvinklar:	-180° – +180° i steg om 0.25° → $\#azimut = 1441$ (se orienteringsdefinition i figur 4)
Elevationsvinklar:	-10° – +10° i steg om 1° → $\#elev = 21$ (se figur 4 för definition)
Polarisation:	HH
Mätavstånd:	25 meter
Antal pulser/mät:	128 vid alla mätningar.
Lobbredd (3dB):	~ 6 meter vid avståndet 25 meter.
Hårdvarugrind:	Tx = 40 ns, Rx = 60 ns, Rx delay är satt till 210 ns som motsvarar 25 meters mätavstånd då systemets kabelfördröjningar är inräknade. Dessa parametrar motsvarar en grind som har full känslighet inom området 25 ± 1.5 meter.
Uteffekt:	100 mW (20 dBm)
Antenner:	Diagonal horn (FR6414)



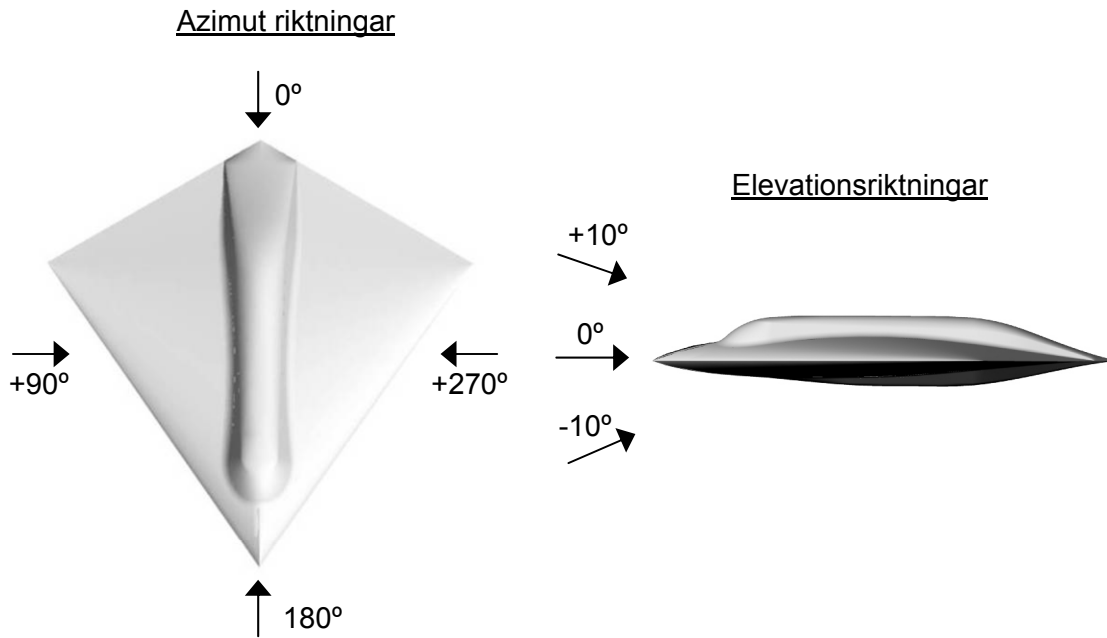
Figur 4. Definition av vinkelriktningarna vid mätningarna utförda i Stora mäthallen.



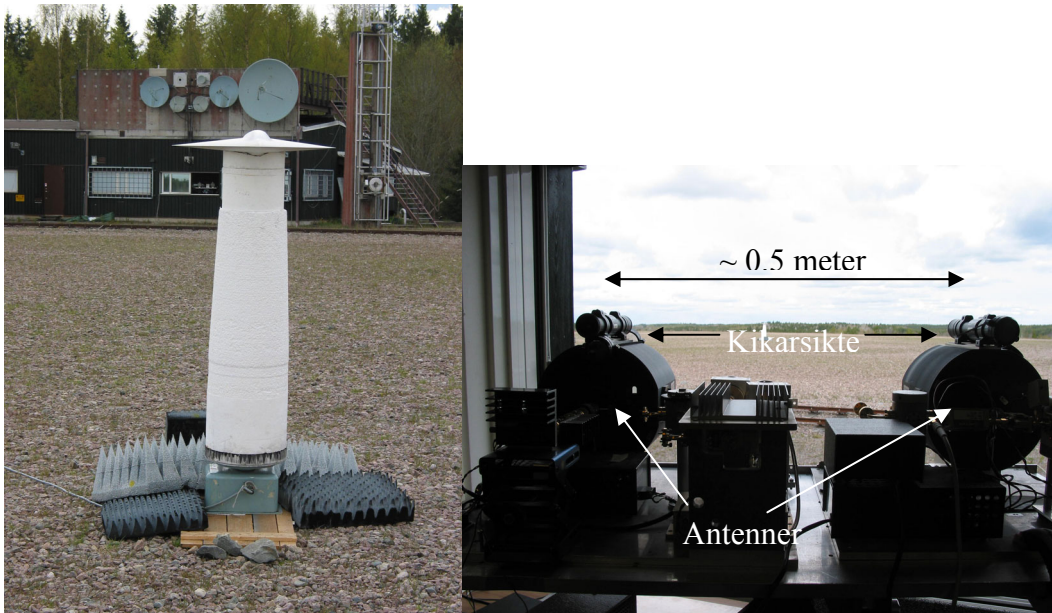
Figur 5. Bild, tagen tvärs belysningsriktningen, på mätupställningen i Stora mäthallen.

Mätparametrar och mätupställning vid Lilla Gåra (W-band)

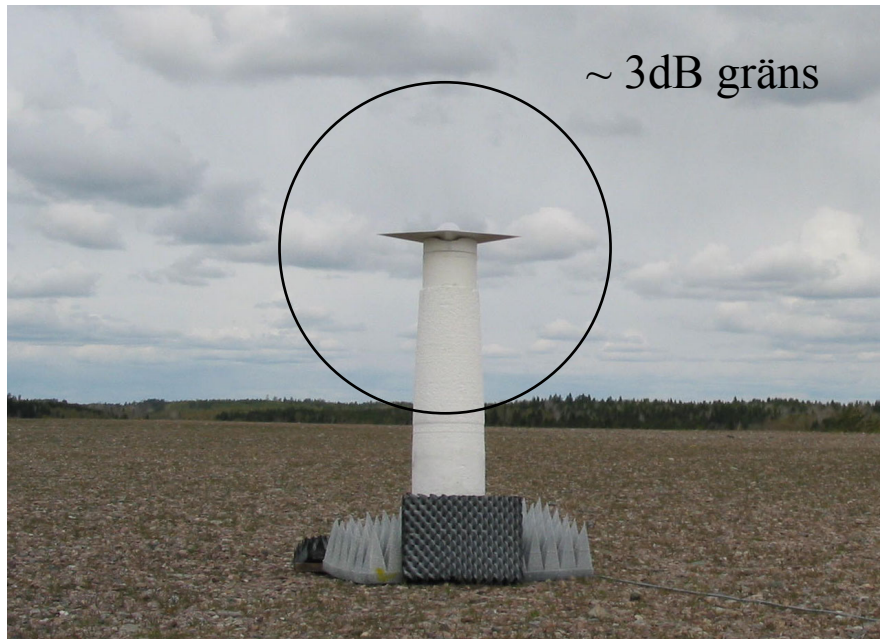
Kalibreringsobjekt:	Triangulär trihedral med kantsidlängd = 70 mm → $\sigma_{\text{HF}} = 10.0 \text{ dBsm}$ vid 95 GHz
Frekvenser:	90 – 97.5 GHz i steg om 25 MHz → #f = 301
Azimutvinklar:	-180° – +180° i steg om ~0.022° → #azimut = 16384 (se orienteringsdefinition i figur 6)
Elevationsvinklar:	-10° – +10° i steg om 1° → #elev = 21 (se figur 6 för definition)
Polarisation:	HH
Mätavstånd:	65 meter
Antal pulser/mät:	64 för kalibreringsmätningarna och 1 för objektmätningarna
Lobbredd (3dB):	~ 1.7 meter vid avståndet 65 meter (se figur 8)
Uteffekt:	70 mW (18.5 dBm)
Antenner:	Linsantenner (Millitech 10-STP-6-DP)



Figur 6. Definition av vinkelriktningarna vid mätningarna utförda vid Lilla Gåra.



Figur 7. Den vänstra bilden visar Eikon riktad mot antennerna och den högra bilden visar Eikon sedd från antennerna.



Figur 8. Illustration av den ungefärliga 3dB lobbreden för mätningarna på Eikon vid Lilla Gåra.

Mät- och kalibreringsmetodik

För samtliga mätningar (objekt och kalibrering) utfördes bakgrundsmätningar för att i analysarbetet ha möjlighet att utföra bakgrundssubtraktion. Den stödpelare som använts vid mätning av kalibreringsobjekt och Eikon är tillverkad i skumplast (frigolit), se figur 5, 7 och 8. Alla mätningarna är upptagna i koniska snitt, dvs för varje ny elevationsvinkel har vridbordet lutats (eleverats) en specifik vinkel. För att få den kalibrerade radarmålarean för Eikon utfördes fyra oberoende mätningar. De fyra mätningarna består av: 1) $V_{\text{kalobj}}(f)$ = mätning av kalibreringsobjektet vid en vinkel och alla frekvenser. 2) $V_{\text{bkg1}}(f)$ = mätning av bakgrunden vid samma vinkel som vid mätning 1 och för alla frekvenser. 3) $V_{\text{Eikon}}(\theta, \varphi, f)$ = mätning av Eikon som funktion av alla frekvenser och alla vinklar. 4) $V_{\text{bkg2}}(\theta, \varphi, f)$ = mätning av bakgrunden som funktion av alla frekvenser och alla vinklar. Samtliga storheter ovan är komplexa, dvs de innehåller både amplitud och fas. Den kalibrerade radarmålarean för Eikon fås av,

$$\sigma_{\text{Eikon}} = \left[\left[\sqrt{\sigma_{\text{Kalobj}}(f)} / (V_{\text{Kalobj}}(f) - V_{\text{bkg1}}(f)) \right] \times [V_{\text{Eikon}}(\theta, \varphi, f) - V_{\text{bkg2}}(\theta, \varphi, f)] \right]^2$$

där φ avser azimutvinkeln, θ är elevationsvinkeln (se figurer 4 och 6) och f är frekvensen. Genom att fasinformationen är känd vid varje vinkel och frekvens kan ISAR- bilder genereras, och användas vid analysarbetet.

Upplinjeringen av Eikon utfördes i båda fallen med ett digitalt vattenpass. Elevationsvinkel 0° motsvaras av att flygkroppens övre del ligger parallellt med antennernas pekriktning. I mäthallen motsvarar detta helt horisontellt läge medan för Gårafallet motsvarar detta en ca 0.4° avvikelse från helt horisontellt läge, dvs Eikons nos riktades ned 0.4° . Detta beroende på att objektet var placerat ca 2 meter över mark och antennerna var placerade ca 1.6 meter över markplanet. Denna höjdskillnad motsvarar ca

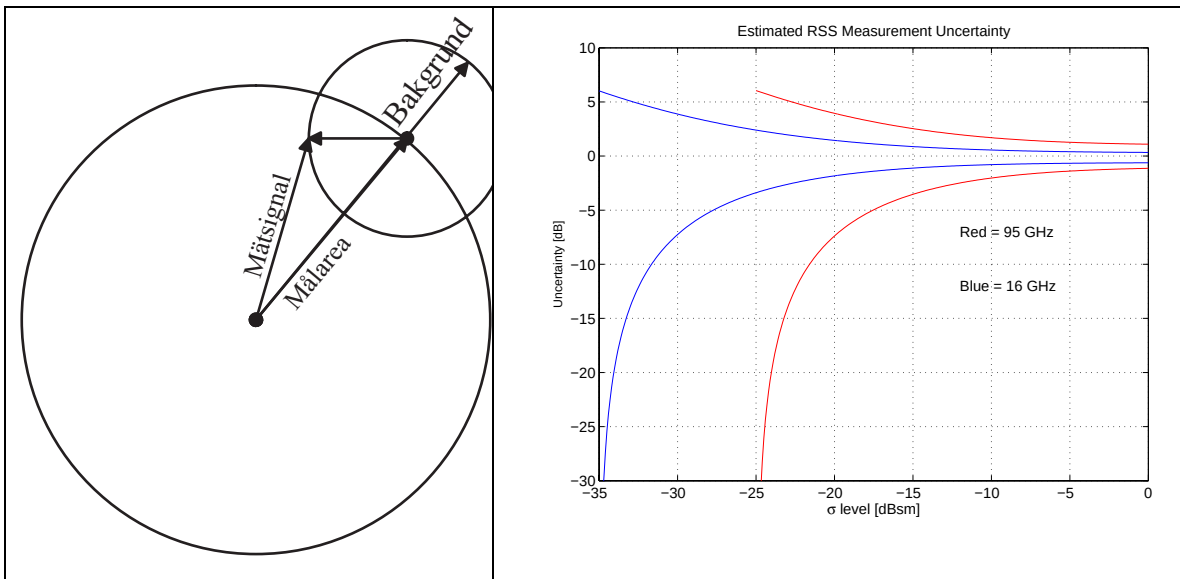
0.4° på mätavståndet 65 meter. Antennernas inriktning vid W-bandsmätningarna utfördes med hjälp av kikarsikte (se figur 7).

Mätosäkerhet

Mätosäkerheten för 95 % konfidensintervallet beräknas som medelvärdet plus/minus två gånger standardavvikelsen. För frekvensområdet 6 – 16 GHz har ur tidigare mätningar standardavvikelsen bedöms till ± 0.3 dBsm för HH-polarisation [5]. Om denna mätosäkerhet och bakgrunds-nivån i det aktuella frekvensområdet, -35 dBsm, kombineras kan mätosäkerheten hos mätsignalen som funktion av signalnivå beräknas som:

$$er = 20 * \log_{10} \left(1 \pm \frac{E}{S} \right) \quad (1)$$

där S = nyttsignalen, dvs i detta fall radarmålarean, och E = interfererande signal, dvs i detta fall bakgrunds-nivån. Figur 9 illustrerar de interfererande signalerna och figur 10 visar i blått mätosäkerheten i mätsignalen vid 16 GHz som funktion av radarmålareanivån respektive i rött mätosäkerheten vid 95 GHz.



Figur 9. Interferens mellan olika signaler

Figur 10. Mätosäkerheten i mätsignalen som funktion av radarmålareanivån.

Medelvärdet av bakgrunden har bedömts ur mätdata att vara -25 dBsm vid 95 GHz. Osäkerheten vid mätning av kalibreringsreferensen bedöms vara ± 1 dB vid 95 GHz.

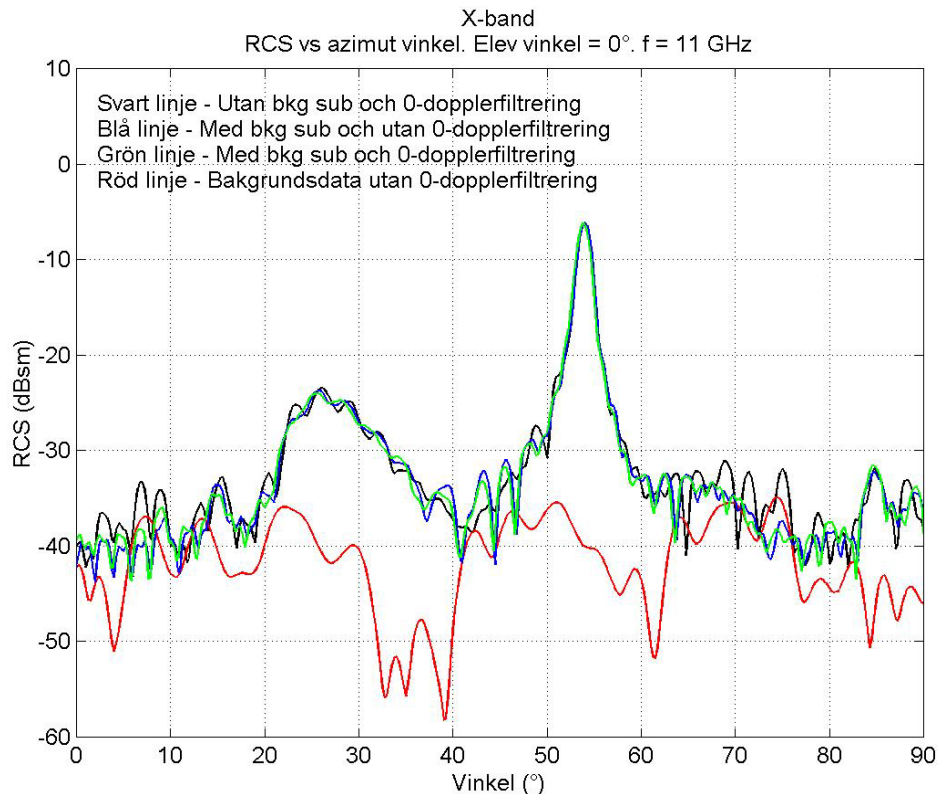
Naturligtvis förekommer, förutom radarmålareans interferens med bakgrunden och mätosäkerheten hos kalibreringsobjektet, många mätosäkerhetsfaktorer se [3] och [4], men i detta sammanhang har dessa bedömts som försumbara.

Resultat

Resultaten presenteras dels i diagram där radarmålarean uttrycks som funktion av azimuthvinkel och dels som ISAR-bilder. Som tidigare nämnts görs i denna rapport ingen detaljanalys av data. Det insamlade datat ligger på Matlab-format. Som utvärderingsverktyg har Columbus använts.

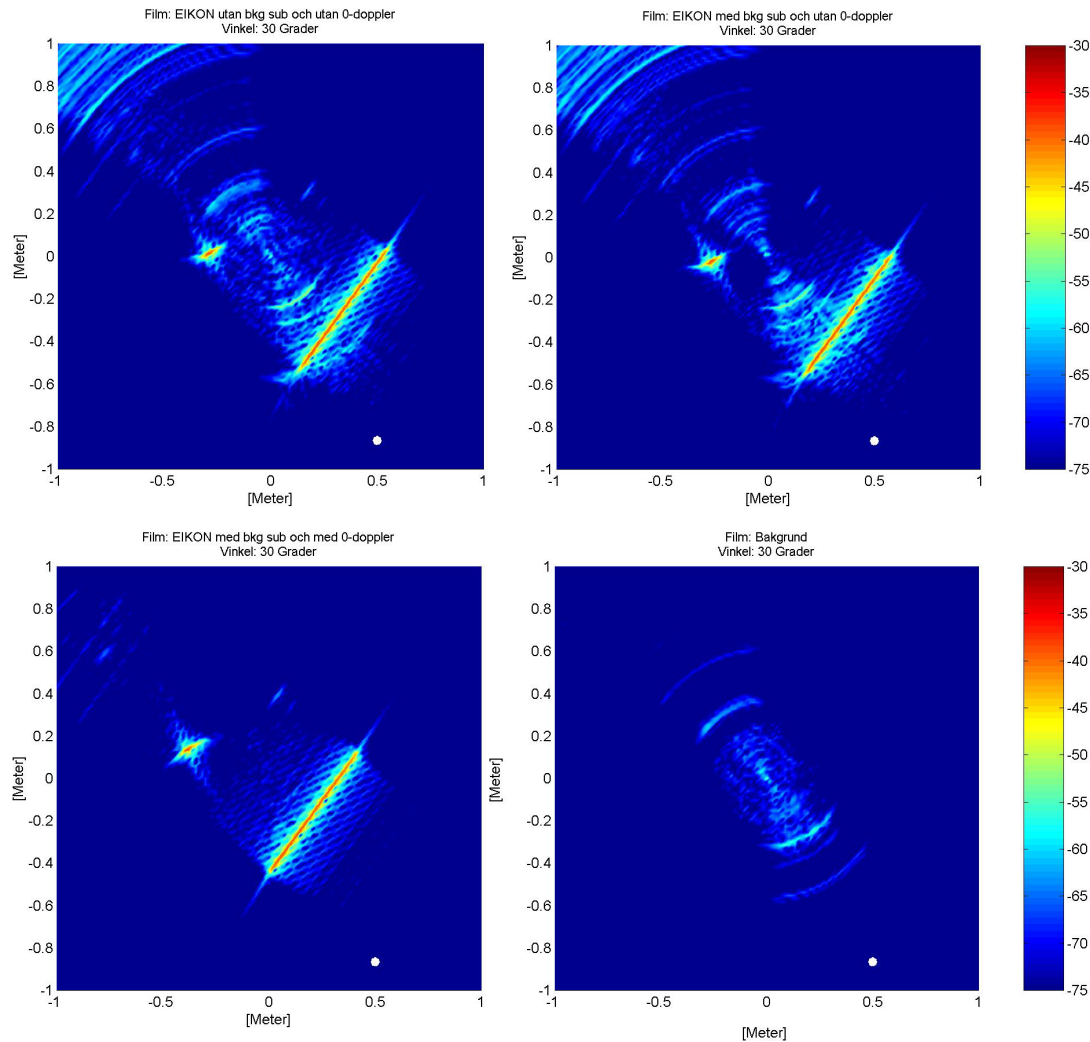
X-band

Figur 11 visar radarmålarean som funktion av azimuthvinkel vid frekvensen 11 GHz och elevationsvinkeln 0° för några olika kombinationer av filtrering. Utifrån ett dylikt diagram kan det vara svårt att avgöra om bakgrundssubtraktion och 0-dopplerfiltrering har påverkat data till det bättre, dvs gjort data mer frirymdslikt. För att undersöka detta genereras ISAR-bilder med olika filtrering, se de olika bilderna i figur 12.



Figur 11. Radarmålarean för Eikon vid frekvensen 11 GHz och elevationsvinkeln 0° som funktion av azimuthvinkeln. De olika kurvorna representerar olika filtreringar av data.

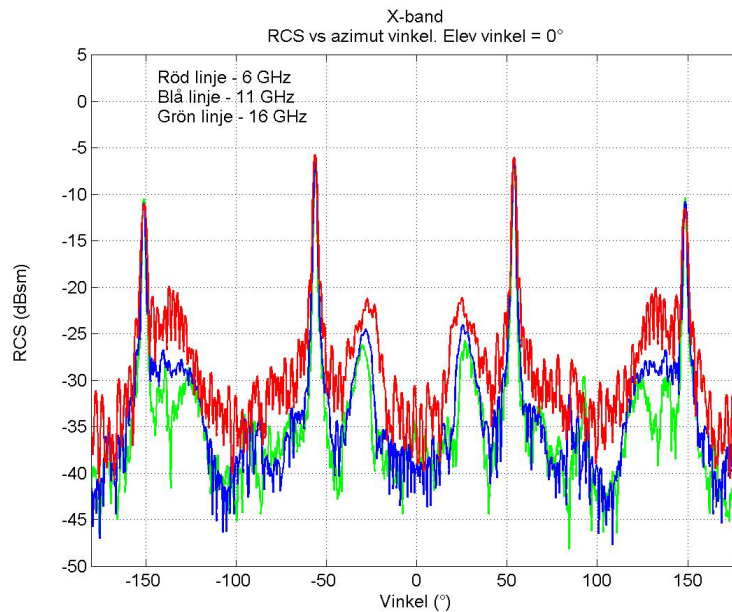
ISAR-bilderna nedan har en upplösning på ca 1.5 cm. För att uppnå denna upplösning i tvärsled krävs ett vinkelsegment på 54.5° . Invikningsavståndet i sidled är ca ± 1.6 m och i avståndsled ca ± 3 m.



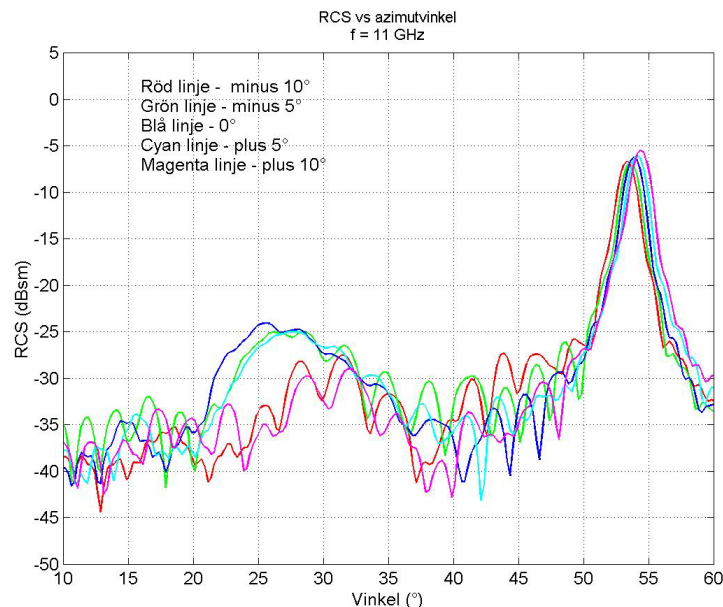
Figur 12. ISAR-bilder på Eikon och bakgrund med och utan filtrering vid X-band. Övre vänstra ISAR-bilden är genererad utan bakgrundssubtraktion och 0-dopplerfiltrering. Övre högra bilden är bakgrundssubtraherad men utan 0-dopplerfiltrering. Nedre vänstra bilden är bakgrundssubtraherad och 0-dopplerfiltrerad. Nedre högra ISAR-bilden visar bakgrunden.

Figureerna ovan ger en stark indikation på att både bakgrundssubtraktion och framförallt 0-dopplerfiltrering gör datat mer frirymdslikt. Man bör dock vara försiktig med att utföra dessa typer av filtreringar alltför rutinmässigt i tron att ISAR-bilderna förbättras. Anledningen till att det i det aktuella fallet blir mer frirymdslikt är en kombination av stabila mätförhållanden i mäthallen och att våglängderna är relativt långa i förhållande till de vibrationer och den åverkan man utsätter frigolitstödet för, vid varje borttagning av objektet för att mäta bakgrunden. För att kunna utföra en god koherent bakgrundssubtraktion och/eller 0-dopplerfiltrering är tumregeln att bakgrunden inte får vibrera eller förflyttats mellan mätningarna mer än $\sim \lambda/8$. Vid 16 GHz ($\lambda = 1.875$ cm) innebär detta en lägesförändring på ca 2.3 mm. Denna stabilitet är fullt rimligt att ha i en mätshall vilket också figureerna ovan indikerar. Det är dock viktigt att erinra att dessa filtreringsmetoder endast kan användas för att reducera stationära ekon samt de direktreflexer som härrör från frigolitmasten. Multipelreflektioner som härrör från interaktion mellan objekt och bakgrund kan inte filtreras bort med hjälp av dessa filtreringsmetoder.

Data presenterade i figurerna 13-15 är bakgrundssubtraherade och 0-dopplerfilterade. Figur 13 visar radarmålarean som funktion av azimuthvinkeln för några olika frekvenser då elevationsvinkeln är 0° .

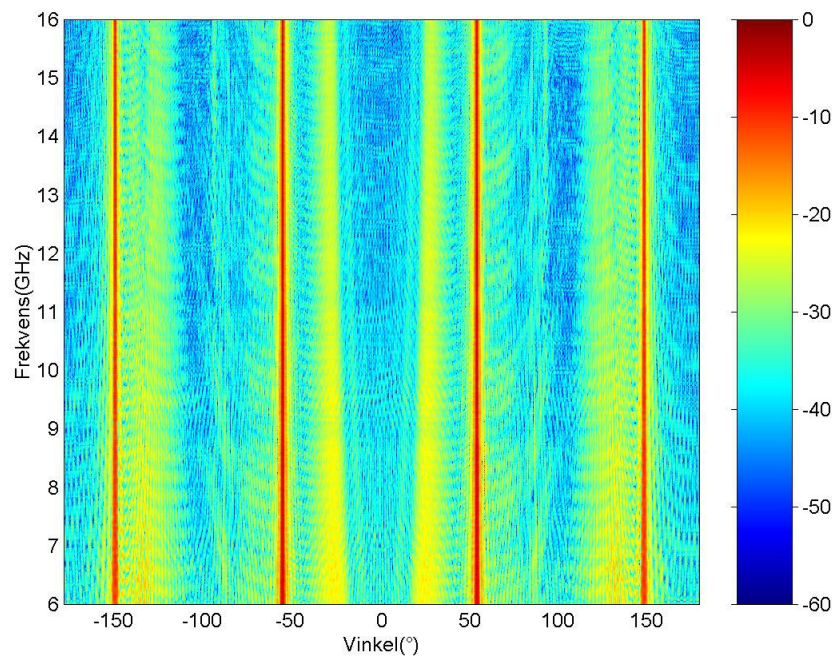


Figur 13. Diagrammet visar radarmålarean som funktion av azimuthvinkel vid elevationsvinkeln 0° för Eikon. För att undvika alltför taggiga kurvor används här 1° flytande medelvärde, dvs varje data punkt är ett medelvärde av data punkten + fyra intilliggande datapunkter.



Figur 14. Radarmålarean som funktion av azimuthvinkel vid några olika elevationer. För att undvika alltför taggiga kurvor har radarmålarean endast plottats inom ett begränsat vinkelintervall samt med 1° flytande medelvärde.

Diagrammen ovan visar att elevationsvinkelberoendet är relativt litet.

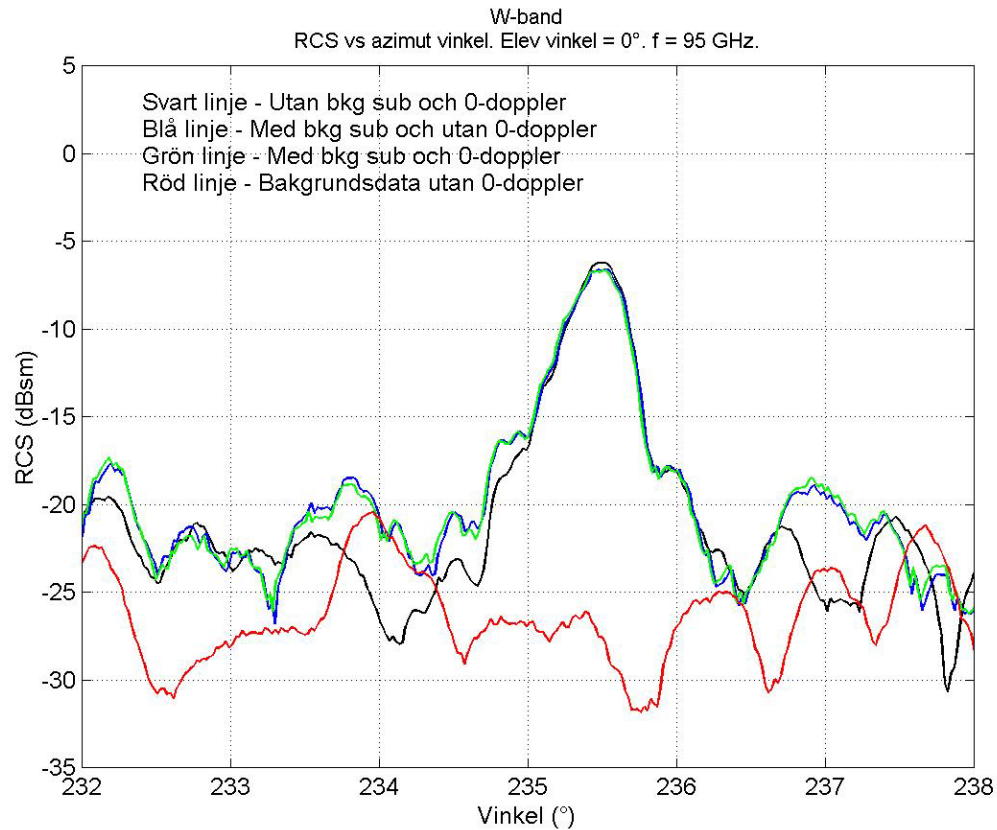


Figur 15. Radarmålarean som funktion av frekvens och azimutvinkel vid elevationsvinkel 0° .

W-band

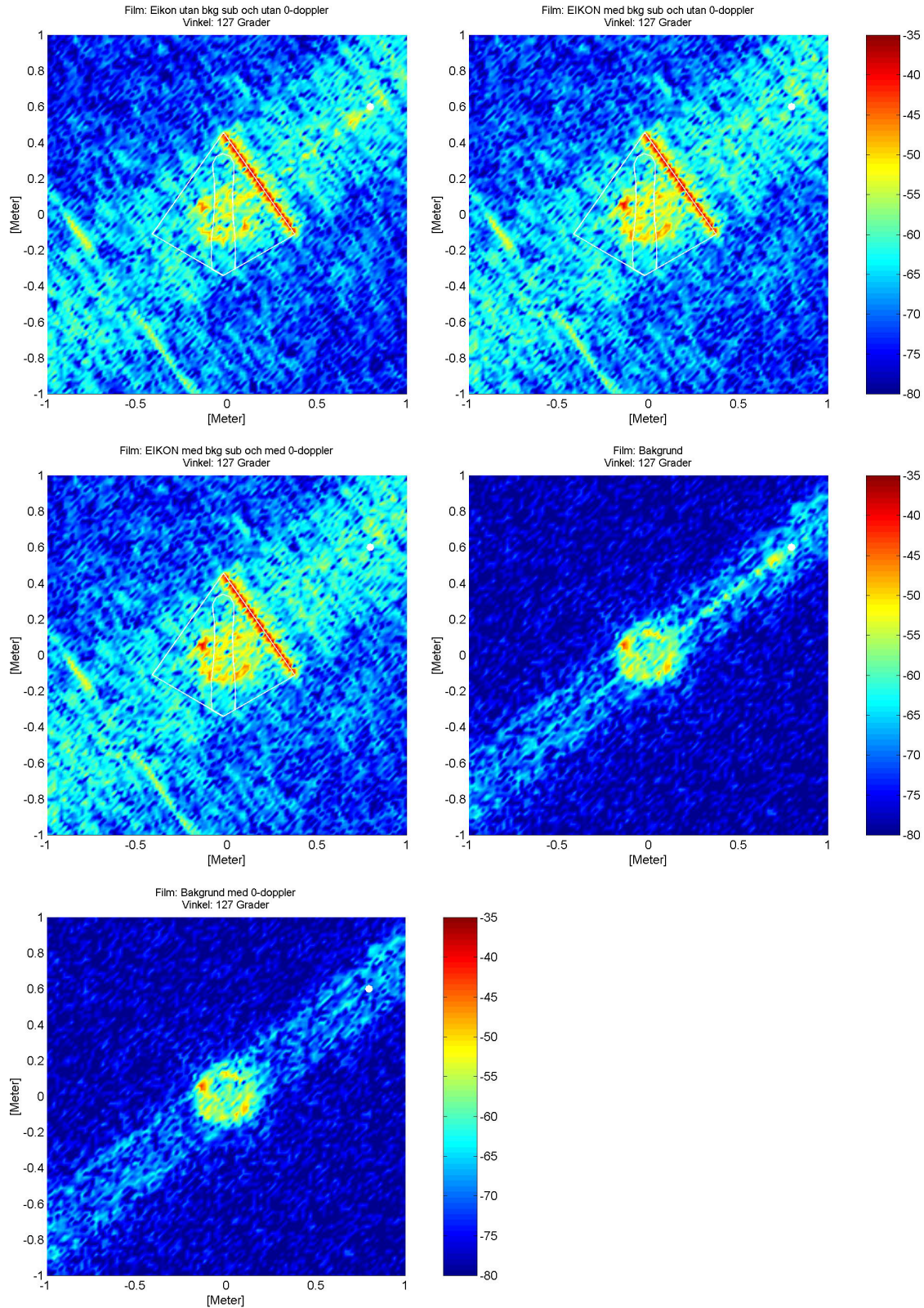
Mätningarna i W-bandet genomfördes utomhus och vindrörelser i kombination med den korta våglängden, ca 3 mm, ger inte tillräckligt stabila mätförhållanden för att de tidigare beskrivna filtreringarna ska kunna användas. Man får istället finna andra lösningar till att sänka bakgrundsbidragen. Vid mätningarna har bakgrunden reducerats genom att objektet belysts med en smalare huvudlob än vad som är brukligt (se fig. 8). Detta har åstadkommit med hjälp av linsantennor samt nedkortat mätavstånd. En annan fördel med dessa åtgärder är att S/N ökar då mätavståndet minskar. Vid dessa mätningar har S/N-förhållandet dock ej varit en kritisk faktor. En nackdel med den aktuella mätkonfigurationen är att närfältseffekterna blir mer uttalade samt att antenntaperingen över objektet kan bli signifikant.

Figur 16 visar radarmålarean som funktion av azimutvinkel vid frekvensen 95 GHz och elevationsvinkeln 0° för några olika kombinationer av filtrering.



Figur 16. Radarmålarean för Eikon vid frekvensen 95 GHz och elevationsvinkeln 0° som funktion av azimuthvinkeln. De olika kurvorna representerar olika filtreringar av data. För att undvika alltför taggiga grafer visas radarmålarean inom ett begränsat vinkelintervall och har där plottats med 0.22° flytande medelvärde.

ISAR-bilderna nedan har en upplösning på ca 2 cm. För att uppnå denna upplösning i sidled krävs ett vinkelsegment på ca 4.6°. Invikningsavståndet i tvärsled är ca ± 2 meter och i avståndsled ca ± 3 meter.

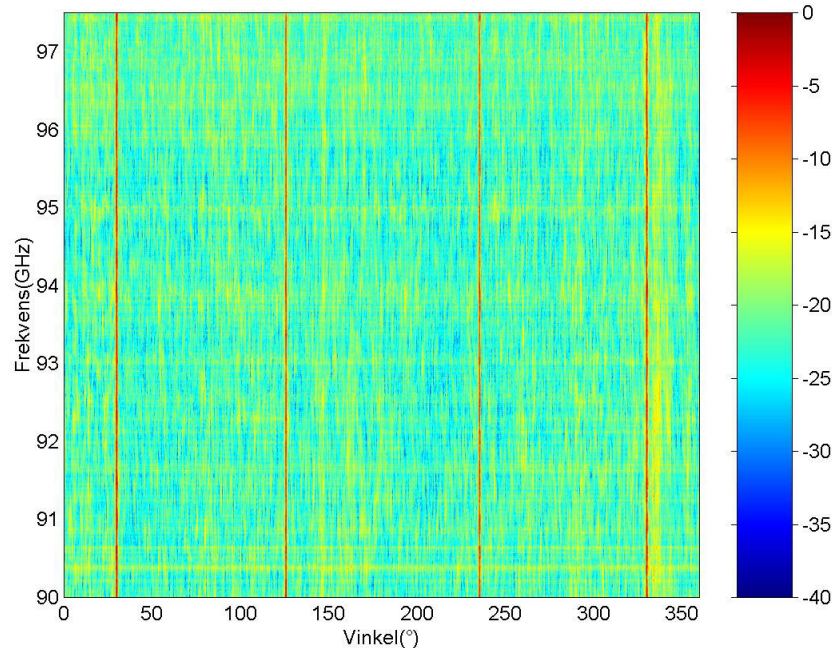


Figur 17. ISAR-bilder på Eikon vid W-band. Den vita pricken motsvarar aperturens bisektrisposition.

Ovanstående ISAR-bilder visar att de olika filtreringarna har en marginell inverkan på resultatet. Man ser tydligt att frigolitmasten ger ett signifikant bidrag som vi inte lyckats

subtrahera bort på grund av instabiliteter (> 0.4 mm) under och mellan mätningarna. För att komma till rätta med denna relativt höga bakgrundsnivå krävs dels att man använder en annan typ av lågsignaturstöd och dels att man utför mätningarna under mycket stabila väderförhållanden.

Figuren nedan visar att man endast kan urskilja de spekulärreflexer som härrör från fram- och bakkanten på vingarna. Övriga bidrag från objektet ligger dolt i bakgrunden.



Figur 18. Målareran som funktion av frekvens och azimuthvinkel vid elevationsvinkel 0° .

Slutsatser

Mätningarna på Eikon vid X-band visar att man med hjälp av bakgrundssubtraktion och 0-dopplerfiltrering kan erhålla relativt frirymdslika data. Man kan också se att elevationsvinkelberoendet i området -10° - $+10^\circ$ är relativt litet. De stora bidragen härrör från retroreflexerna från vingkanterna.

Resultaten från W-bandsmätningarna visar att filtreringsmetoderna som använts för X-band data inte ger mer frirymdslika data. För att åstadkomma en mer frirymdslik mätsituation krävs ett bättre lågsignaturstöd samt stabilare väderförhållanden.

Referenser

- [1] Olof Lundén, "Mätsystemet i Stora Mäthallen. Dokumentation version 1.1", FOA-D--00-00508-408--SE, December 2000.
- [2] Johan R Rasmusson, Nils Gustavsson & Jonas Rahm, "Outdoor broadband RCS measurements of model scale aircraft", Conference Proceedings AMTA, Cleveland, OH, November 2002.
- [3] Olof Lundén, "Bedömning av mätosäkerhet vid mätning av antenner i Stora Mäthallen", FOA-D--99-00426-504--SE, januari 1999.
- [4] Johanna Lötegård, "Mätosäkerhet vid radarmålareamätningar i Stora Mäthallen vid FOA", FOA-R--00-01415-615--SE, mars 2000.
- [5] Olof Lundén och Jonas Rahm, "Radarmålareamätning av flygfarkostmodellen IKPUAVn", ges ut som FOI-rapport under hösten 2005.