



Rymdbaserad radaravbildning

Resultat från avskanning

ANDERS GUSTAVSSON, TOMMY JOHANSSON,
VICTOR JUNGNELL, MATTI NYLUND, THOMAS SJÖGREN

Anders Gustavsson, Tommy Johansson,
Victor Jungnell, Matti Nylund, Thomas Sjögren

Rymdbaserad radaravbildning

Resultat från avskanning

Titel	Rymdbaserad radaravbildning
Title	Space-based imaging radar
Rapportnr/Report no	FOI-R--4201--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2015
Antal sidor/Pages	32 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FOI
Forskningsområde	7. Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	I501301
Godkänd av/Approved by	Martin Rantzer
Ansvarig avdelning	Sensor- och TK-system

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk. All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden.

This work is protected under the Act on Copyright in Literary and Artistic Works (SFS 1960:729). Any form of reproduction, translation or modification without permission is prohibited.

Sammanfattning

Tekniken med radaravbildning från rymden är inte ny men tillmäts idag ett allt större intresse. De rymdbaserade radarsystemens förmågor har förbättrats, t ex genom bättre upplösning. Kostnaderna har även sjunkit vilket inneburit att antalet stater med egna radarsatelliter har blivit fler. Stora nationer som USA, Ryssland och Kina, men även mindre länder som Italien och Israel, har aktiva satellitradarsystem.

Den militära nyttan av rymdbaserad radaravbildning handlar dels om övervakning av stora områden och dels om tillgång till högupplösta bilder, även om dessa två förmågor inte kan uppfyllas samtidigt. Till skillnad från optiska system, tillåter radarsystem övervakning oberoende av ljusförhållanden och molnsituation.

I militära system går utvecklingen mot en upplösning på decimeternivå. Civila system har sämre upplösning men kan ändå vara av intresse ur ett militärt underrättelseperspektiv. Den högsta upplösningen i civila system är idag någon eller några få meter, vilket för många militära tillämpningar uppfyller minimikraven. Radarsystem med såväl militär som civil användning (*dual-use*) förekommer.

I detta avskännande projekt har en studie över idag operativa och framtida satellitradarsystem genomförts. Såväl satelliternas tekniska prestanda som banval är av intresse. Möjligheten att realisera radarsensorer med små satelliter har också beaktats.

I rapporten redovisas intressanta utvecklingstrender inom satellitbaserad radar som påverkar möjlig prestanda. Typiska och intressanta satellitbanor för radarsatelliter diskuteras också. Här redovisas även vissa utvalda exempel på radarsatellitssystem som bedöms som särskilt intressanta.

Nyckelord: radar, SAR, fjärrspaning, satellit, rymd

Summary

The technology for space-based imaging radar is not new but is currently attracting an increasing interest. The capabilities of the space-based radar systems have improved, e.g., with higher image resolution. The costs have also decreased, which enables more states to operate their own radar satellites. Not only nations such as USA, Russia and China, but also Italy and Israel, have operating radar satellites.

The military use of space-based imaging radar includes surveillance over large areas and access to high-resolution images, although these two capabilities cannot be achieved simultaneously. Radar systems allow, in contrast to electro-optical systems, surveillance independent of light conditions and cloud coverage.

The development of military systems are approaching a resolution at the decimeter level. Civilian systems have coarser resolution but may still be of interest for military intelligence gathering purposes. The highest resolution in civilian systems is of the order of one or a few meters, which is often a minimum requirement in military applications. Dual-use systems, with both military and civilian application, are rather common.

A study of current and planned space-based radar systems have been undertaken within this project. Both the technical performance of the radar satellites and the satellite orbits have been of interest. The possibility of implementing radar systems on small satellites have been addressed.

This report presents interesting trends in space-based radar imaging, with implications for radar performance. Typical and interesting orbits for radar satellites are also discussed. Some particularly interesting examples of radar satellites are mentioned.

Keywords: radar, SAR, remote sensing, satellite, space

Innehållsförteckning

1	Inledning	6
2	Radaravbildning	7
2.1	Syntetisk aperturradar.....	7
2.2	Avancerade SAR-metoder	10
2.3	Radarfrekvensband.....	11
3	Lämpliga radarsatellitbanor	12
3.1	Bakgrund.....	12
3.2	Avbildande radarsatelliter	13
3.3	Banor för de aktiva avbildande radarsatelliterna	13
3.4	Exempel: TOPAZ	15
4	System i omvärlden	18
4.1	Civila system.....	18
4.1.1	Historisk tillbakablick.....	18
4.1.2	Operativa och framtida civila system	21
4.2	Militära system	21
4.2.1	Historisk tillbakablick.....	21
4.2.2	Operativa och framtida militära system	22
4.3	System av särskilt intresse	24
4.3.1	TOPAZ	24
4.3.2	NovaSAR-S.....	25
5	Nya möjligheter	26
5.1	Nya regleringar från ITU	26
5.2	Framtida små satelliter.....	26
5.3	Lätta reflektorer	26
5.4	Multistatiska system: GEO-SAR system.....	27
6	Sammanfattning	28
7	Referenser	29

1 Inledning

Med hjälp av avbildning från satellit kan man snabbt övervaka olika områden på jorden. Radar, till skillnad mot optiska sensorer, tillåter övervakning oberoende av såväl ljusförhållanden som rådande molnsituation (24/7-kapacitet).

Radarsatelliter har övervakat jorden i 50 år. Dessa radarsatellitssystem har genom den tekniska utvecklingen, t ex inom dator- och antennområdet, fått en högre upplösning och en större täckningsförmåga. Den förbättrade upplösningen, och även nya metoder för detektion av rörliga mål, har breddat och ökat förmågan för dessa system. Idag är även civila radarsatelliter av intresse ur ett militärt underrättelseperspektiv. Den högsta bildupplösningen som nu erbjuds från civila system ligger på någon eller några få meter, vilket för många militära tillämpningar är ett minsta krav. Upplösningen hos de bästa militära systemen närmar sig decimeternivå. Radarsystem med *dual-use*, dvs. både militär och civil användning, är vanliga. Antalet stater som opererar egna radarsatelliter har också blivit fler. Idag finns denna kapacitet militärt och/eller civilt i USA, Kanada, Ryssland, Tyskland, Italien, Israel, Indien, Japan, Kina, Korea samt Sydafrika. Dessutom som en gemensamt framtagen resurs under ESAs (*European Space Agency*) kontroll. Bland länder som närmast står på tur märks Spanien, Storbritannien liksom Argentina.

I detta avskännande projekt har en genomgång gjorts av idag operativa samt planerade satellitradarsystem, baserade på enstaka satelliter eller konstellationer. Såväl systemens tekniska prestanda som valda satellitbanor är här av intresse. Utvecklingstrender inom satellitradar med påverkan på framtida prestanda redovisas. Här ingår förutom ren teknikutveckling även förändringar gällande tillåtna frekvensband för radaravbildning från rymden. Typiska och intressanta satellitbanor för radarsatelliter diskuteras också. Några få utvalda exempel på radarsatellitssystem som bedöms som representativa eller särskilt intressanta beskrivs mer ingående. Möjligheten att realisera radarsensorer med små satelliter har också beaktats. Med sin egen belysningskälla och behov av tillgång till en tillräckligt stor effektiv antennyta blir krav på effekt, vikt och volym utmanande att tillgodose med en mindre satellitplattform.

Målsättningen har varit att kartlägga system, teknik, metoder och möjliga prestanda för avbildning från rymden nu och i framtiden med olika konstellationer av satellitradar. Detta har gett FOI en utökad kunskapsbas inom rymdbaserad avbildande radar. Dessutom har det bidragit till kunskapsbreddning hos och fördjupning av samarbetet mellan de i projektet ingående avdelningarna. Arbetet har lett till bättre förutsättningar för nya samarbeten och framtida externa uppdrag.

En större sammanställning av tidigare, nuvarande och planerade radarsatellitprojekt finns presenterad i en parallell rapport [1.1] som delvis tagits fram inom detta projekt och delvis inom det av FMV under 2015 finansierade uppdraget Geoinformatik.

2 Radaravbildning

2.1 Syntetisk aperturradar

En radars grundläggande funktion är att mäta avstånd till något objekt genom att sända ut en elektromagnetisk (EM) våg, som reflekteras i objektet, ta emot svaret och sedan mäta den tid som förflutit. En grundläggande radaravbildning består därmed av avståndsprofiler, som är endimensionella avbildningar. I avståndsled bestäms upplösningen, δ_r , av vågformens bandbredd, B ,

$$\delta_r = \frac{c}{2B},$$

där c är ljushastigheten. Den ekvidistanta avståndsupplösningen, δ_r , gäller i det aktuella avbildningsplanet som i fallet för ett avbildande radarsystem som regel är snedtitande relativt det horisontella markplanet som belyses av den utsända radarsignalen. Om avståndsupplösningen istället skall hänföras till ett värde i markplanet tillkommer därmed en projektfaktor som funktion av infallsvinkeln, α , vid aktuell markpunkt, dvs

$$\delta_r = \frac{c}{2B \sin \alpha}.$$

För flacka infall, dvs strykande belysning där α närmar sig 90° , blir projektfaktorns inverkan liten medan vid branta infall fås en betydande skillnad mellan en avståndsupplösning definierad i det ursprungliga avbildningsplanet och motsvarande värden i markplanet.

I vinkelled bestäms upplösningen av huvudlobens bredd (fotavtrycket) på aktuellt spaningsavstånd. Lobbredden hos antennen ges av antennstorleken för en given våglängd hos utsänd signal. Ju större antenn och därmed smalare huvudlob, desto bättre blir upplösningen i vinkelled. På stort avstånd kan upplösningen i vinkelled, δ_a , approximeras som

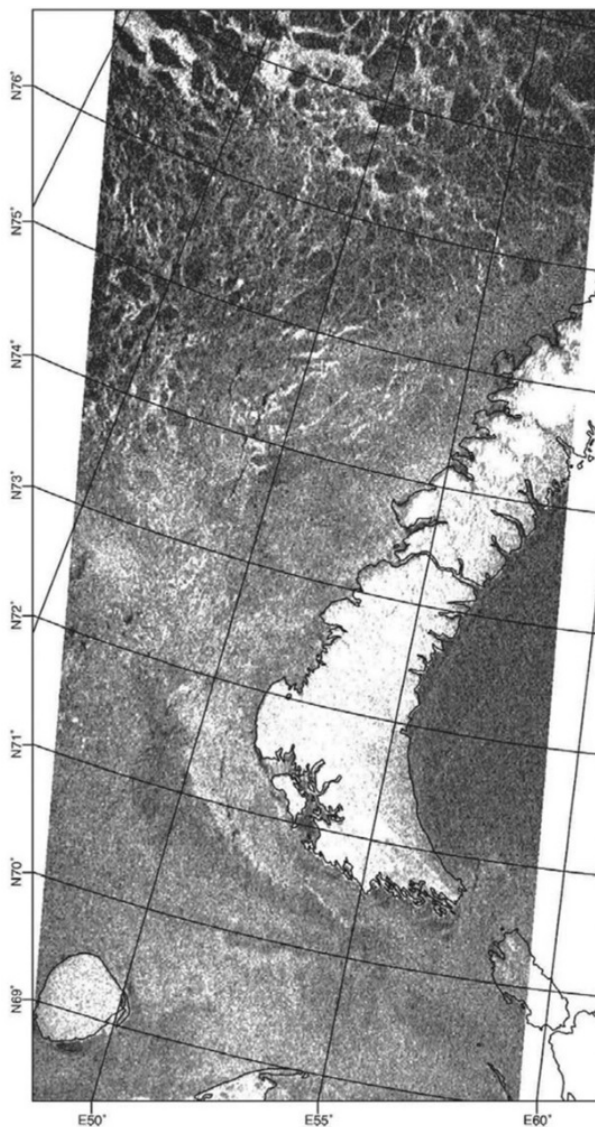
$$\delta_a = \frac{R\lambda}{D} = \frac{(h/\cos(\alpha))\lambda}{D},$$

där λ är våglängden hos utsänd signal, R är avståndet till marken, h är plattformens höjd över marken, α är infallsvinkeln och D är antennens bredd. Tekniken där huvudlobens bredd får avgöra upplösningen i vinkelled (sidled) vid den tvådimensionella avbildningen brukar kallas för SLR (*Side-Looking Radar*), eller SLAR (*Side-Looking Airborne Radar*) i det flygburna fallet.

Givet en satellit i en omloppsbanan på höjden 500 km, med en 5 meter bred antenn, en våglängd på 3 cm och en infallsvinkel på 35° , blir upplösningen i vinkelled på marken ca 3.7 km för ett SLR-system. En sådan upplösning har begränsad användning varför antalet rymdbaserade system varit få och under åren endast tagits i bruk av Ryssland. Den primära användningen civilt har då varit att få tillgång till ett instrument som storskaligt kan kartlägga den rådande situationen inom den arktiska bassängen och göra detta även under de delar av året då solen inte når upp till aktuella latituder. Militärt utnyttjande har främst rört möjligheten till upptäckt av större fartygsgrupperingar ute på oceanerna, typ hangarfartyg med tillhörande skydds- och stödjeenheter. Som regel har det krävts att rådande sjötilstånd varit relativt modest för att kunna bibehålla en tillräcklig kontrast i bilderna för upptäckt av en konvoj mot en mörkare bakgrund från havsytan själv, givet SLR-systemets grova upplösning. I Figur 2.1 ges ett exempel på en rysk SLR-bild registrerad från rymden över ett område i Arktis.

I en flygburen installation blir spaningsavstånden betydligt kortare och därmed fås en förbättrad upplösning i vinkelled vilket öppnar upp för fler praktiska tillämpningar. Konfigurationen SLAR har därför under åren funnits i drift i en betydligt större omfattning. Ett svenskt exempel är här Kustbevakningens sensorbestyckade

spaningsflygplan där en SLAR främst utnyttjas för upptäckt av större sammanhängande oljeutsläpp. Med typiska operativa höjder fås en vinkelupplösning av storleksordningen 50 till 100 m vilket som regel är tillräckligt för att lösa denna uppgift.



Figur 2.1. SLR-bild från den ryska satelliten Okean i området kring Novaja Zemlja. (Okean-bild © NPO Planeta).

För att förbättra upplösningen kan man syntetiskt skapa en större antenn, en teknik som kallas syntetisk aperturradar (SAR). Figur 2.2 visar en schematisk bild över geometrin för ett SAR-system, där antennen riktas i en fix riktning relativ plattformen. Den syntetiska antennen skapas genom att man skickar ut och registrerar pulser under det att plattformen förflyttas motsvarande sträcka. Den registrerade datamängden måste därefter bearbetas för att kunna generera en slutlig bild med en förbättrad upplösning i förflytningsriktningen (sidled). Den ökade vinkelupplösningen som på detta sätt kan erhållas blir oberoende av spaningsavståndet och ges allmänt av

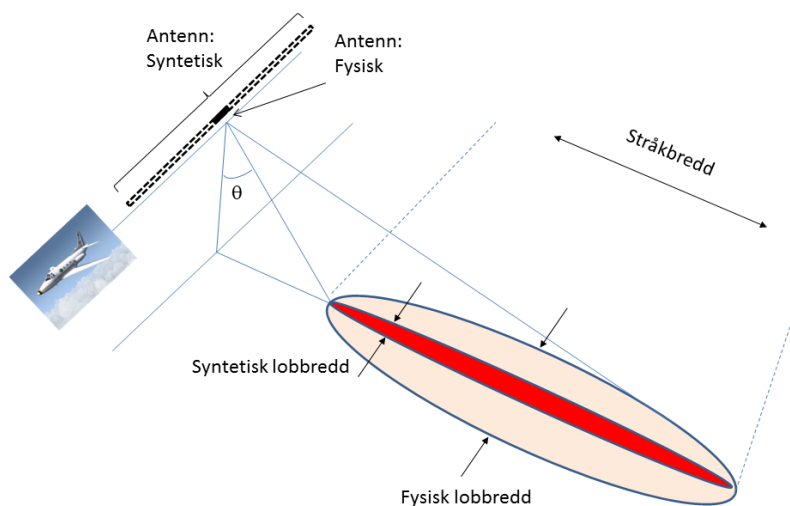
$$\delta_a = \frac{\lambda}{2\Delta\theta},$$

där λ är våglängden hos utsänd signal och $\Delta\theta$ är den variation i aspektvinkel för radarbelysningen som uppnås under aktuellt registreringsintervall. Med en fixt pekande

antenn där data registreras under hela det intervall som huvudloben förmår belysa varje enskild markpunkt motsvarar den erhållna variationen i aspektvinkel därmed antennens lobbredd ($\sim \lambda/D$), dvs

$$\delta_a = \frac{D}{2},$$

där D är den fysiska antennens storlek i förflytningsriktningen (sidled). Genom att på detta sätt utnyttja hela huvudlobens bredd kan denna vinkelupplösning upprätthållas för ett kontinuerligt stråk på marken med en viss stråkbredd i avståndsled. Markavsnittet som täcks in kan liknas vid en utlagd filmremsa och avbildningsmoden går därför ofta under namnet *strip-map SAR*. Om man mekaniskt eller elektriskt kan styra huvudloben mot ett visst markavsnitt så att aspektvinkelvariationen (belystingstiden), $\Delta\theta$, ökas ytterligare kan vinkelupplösningen förbättras än mer. Genom detta förfarande begränsar man dock avbildningen med den högre upplösningen till ett avgränsat markområde och tappar därmed en kontinuerlig registrering längs ett stråk. Denna avbildningsmod brukar benämnas *spotlight SAR*.



Figur 2.1. Schematisk beskrivning av geometrin för ett SAR-system.

För den idag operativa civila satelliten TerraSAR-X (radarvåglängd kring 3 cm) kan en vinkelupplösning på 20 cm uppnås med moden *spotlight* genom att kontinuerligt sända och ta emot radarpulser under ca 7 s [2.1]. Detta innebär att SAR-tekniken i detta fall förbättrar upplösningen i vinkel (sida) med 18 000 gånger jämfört med tidigare redovisade SLR-exempel. Den höga upplösningen tillsammans med radarns förmåga till att kunna avbilda oavsett ljus- och väderförhållanden, gör satellit-SAR till ett viktigt bidrag i t ex underrättelsesammanhang.

Viktiga tillämpningar är övervakning av naturkatastrofer och för militära syften, både strategiska och taktiska. Den höga upplösningen ger möjligheter till måligenkänning och den stora stråkbredden som kan uppnås ger möjlighet till att övervaka stora områden med täta mellanrum, t ex övervakning av havsis på vintern.

En begränsning i dagens rymdbaserade SAR-system är att för fallen med den högsta upplösningen, såsom i t ex *spotlight-SAR*, täcker bilderna väldigt små områden. Om man vill ha större stråkbredder och vidsträckt täckning, såsom i *ScanSAR* där antennen styrs till att belysa olika områden, blir upplösningen sämre. För att motverka detta motsatsförhållande utvecklas nya signalbehandlingsmetoder, ett exempel på det är *HRWS (High Resolution Wide Swath)* [2.2].

Det som hittills beskrivits är enkelpolariserad och monostatisk SAR. Nedan finns en genomgång av mer avancerade SAR-metoder, vissa som finns idag på satelliter, medan vissa fortfarande är i utvecklingsstadiet även på flygburen SAR.

2.2 Avancerade SAR-metoder

Ovan introducerades hur upplösningen i en monostatisk SAR-bild (sändar- och mottagarsystem samlokaliserade) har kan förbättras i vinkel (azimut) och i avståndsled. För att förbättra upplösningen i elevationsled, vilket krävs för att skapa SAR-bilder med bra upplösning i höjd, finns tre alternativ.

- Det första alternativet använder separerade antenner på samma plattform.
- Det andra alternativet innebär att två SAR-system flyger nära varandra men med olika infallsvinklar mot det avbildade området.
- Det tredje alternativet innebär att satelliten efter ett antal dagar passerar samma plats med en liten förskjutning i infallsvinkel mot marken. Genom att kombinera ett sådant bildpar kan en höjdprofil tas fram. Denna metod kallas interferometrisk SAR.

Nämnas bör att TerraSAR-X och TanDEM-X, som användes för att generera WorldDEM (en global digital höjddatamodell) [2.3] via interferometri, utnyttjade bistatisk SAR, men satelliterna var nära varandra, vilket ledde till att även variationen i aspektvinkel mot avbildningsområdet var liten.

Man kan gå ytterligare ett steg och avbilda samma område på marken med flera passager med allt större förändring i infallsvinkel. Ju större intervall av infallsvinklar som används då man avbildar en scen, desto bättre 3D-avbildning kan skapas. Denna metod kallas tomografisk SAR-avbildning.

Både interferometrisk och tomografisk SAR bygger oftast på att två eller fler monostatiska SAR-bilder kombineras. Monostatisk SAR innebär att sändar- och mottagarantenn är på samma satellit. Detta innebär att den reflekterade EM-vågen bara beskriver spridningen direkt mot sändaren, man mäter inte hur en spridare på marken reflekterar i andra riktningar. Med hjälp av bistatisk eller multistatisk SAR kan man mäta hur spridare på marken reflekterar i olika riktningar, vilket dels kan ge ökad information om ett objekt och kan dels undertrycka starka, oönskade direktreflexer. FOI har tidigare genomfört framgångsrika experiment på detta område, där bistatisk flygburen SAR har använts för att separera mål från klotter via variation av bistatisk vinkel [2.4].

Ett objekt på marken beskrivs inte bara av den reflekterade signalstyrkan eller fördelningen av reflexernas signalstyrka över olika riktningar, utan även av dess polarimetriska egenskaper. Genom att sända och ta emot i både horisontellt och vertikalt polariserad signal på SAR-plattformen, eller plattformarna i det bistatiska/multistatiska fallet, kan ytterligare parametrar uppmätas. Att sända och ta emot i både horisontell och vertikal polarisation gör att man får en fullpolariserad SAR, även kallad *Quad-pol*. Om man sänder i en polarisation och tar emot i två polarisationer, eller omvänt, får man *Dual-pol*. Polarisation brukar betecknas med bokstäver; H för horisontell polarisation och V för vertikal polarisation. Kombinationen av utsänd och mottagen polarisation blir då HH, HV, VH eller VV. Polarimetrisk SAR har visat sig väldigt kraftfullt, bland annat för klassificering av olika typer av vegetation och för inmätning av t ex vilka skogstyper som finns i ett område [2.5].

En kombination av polarimetrisk och interferometrisk SAR, så kallad *POLInSAR*, har föreslagits att användas för bland annat för kartläggningen av jordens biomassa i ESAs satellitprojekt BIOMASS [2.6]. Polarimetri kan på samma sätt som bistatisk SAR användas för att förbättra förmågan för att detektera och klassificera mål i SAR-bilder [2.7].

I de ovan beskrivna metoderna är det stationära mål som framhävs. En metod som kan användas för att detektera och positionera rörliga objekt är GMTI (*Ground Moving Target Indication*). Genom att utnyttja den förändring i mottagen fas som ett rörligt objekt orsakar i radardata, kan skillnader mellan två registreringar framhävas. Metoden har bland annat testats på satelliten TerraSAR-X [2.8].

2.3 Radarfrekvensband

Radarsystem kan indelas efter vilka frekvenser de använder. Tabell 2.1 listar de traditionella beteckningarna för olika radarband. Bland radarsatelliter i operativ drift idag finns system på såväl L-, S-, C- som X-band. Utnyttjandet av frekvensspektrum för olika typer av tjänster är internationellt reglerat genom ITU (*International Telecommunication Union*). Som framgår ur tabellen är frekvensintervallen för rymdbaserade radarsystem begränsade [2.9]. Frekvensallokeringen på P-band (bandbredd 6 MHz) är dessutom sekundär, dvs. får användas om den inte stör de tjänster som har primär allokering. Ingen SAR-satellit har ännu opererats på P-band. Först i tur står ESAs BIOMASS, den sjunde satelliten som utvecklas inom programmet *Earth Explorer*, med en planerad uppskjutning 2020 [2.10].

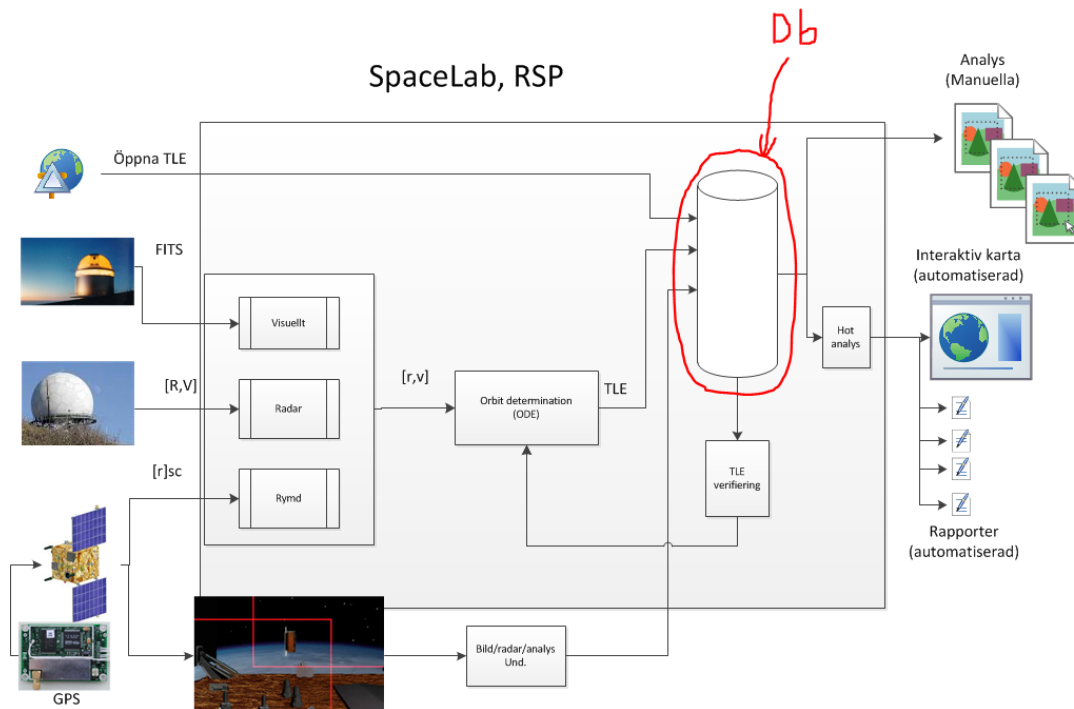
Radarband	Frekvenser, f (GHz)	Våglängder, λ (cm)	Allokerade frekvenser för rymdbaserad radar, f (GHz)
HF	0.003-0.03	1000–10000	-
VHF	0.03-0.3	100-1000	-
UHF	0.3-1	30-100	-
P	0.2-0.45	67-150	0.432–0.438
L	1-2	15-30	1.215–1.300
S	2-4	7.5–15	3.100–3.300
C	4-8	3.75–7.5	5.250–5.570
X	8-12	2.5–3.75	8.550–8.650 9.300–9.900
Ku	12-18	1.67–2.5	-
K	18-27	1.11–1.67	-
Ka	27-40	0.75–1.11	-
V	40-75	0.40–0.75	-
W	75-110	0.27–0.40	-

Tabell 2.1. Beteckningar för olika radarband med tillhörande frekvens- respektive våglängdsintervall, samt de begränsningar som idag finns av frekvenser allokerade för rymdbaserade radarsystem enligt ITU.

3 Lämpliga radarsatellitbanor

3.1 Bakgrund

Kartläggningen av rymdbaserade SAR-systems egenskaper kompletterar det arbete som utförs inom FoT-projektet Rymdrelaterad förmågeutveckling. Inom detta projekt utvecklas en forskningsplattform kallad *SpaceLab*, se illustration i Figur 3.1. *SpaceLabs* infrastruktur var redan framtagen men en databas för att hämta och lagra relevant data saknades. Eftersom en del i det avskannande projektet var att kartlägga befintliga SAR-system påbörjades arbetet med att driftsätta och ”designa” en SQL-databas.



Figur 3.1. Den principiella utformningen av forskningsplattformen *SpaceLab*.

Databasen är uppbyggd av tre olika datakällor:

1. *SATCAT*: En dagsaktuell datakatalog där banparametrarna för alla öppna satelliter finns tillgängliga. Från denna katalog kan datainhämtningen göras automatiskt eftersom man tillhandahåller en web-applikation med användargränssnitt (API). Denna katalog underhålls av *Joint Space Operations Center (JSpOC)* och ger förutom information om aktuella banparametrar dessutom möjligheten att propagera banorna in i framtiden med några kilometers noggrannhet.
2. *Union of Concerned Scientists (UCS)*: En datakälla som uppdateras några gånger per år och måste importeras halv-automatiskt; data hämtas manuellt i Excel- eller CSV-format och importeras sedan till databasen automatiskt av ett SQL-script.
3. *Launchcat (LCAT)*: En databas som innehåller detaljerad uppskjutningsinformation om satelliterna. Detta data är hämtat från *Jonathan's Space page* [3.1]. Denna web-sida dokumenterar alla uppskjutningar. Import av detta data utförs på samma sätt som för UCS-katalogen.

Med hjälp av den framtagna databasen i *SpaceLab* finns nu möjligheten att ställa SQL-frågor för att hämta ut data för bl a de avbildande radarsatelliterna.

3.2 Avbildande radarsatelliter

När en SQL-förfrågan görs i databasen angående aktiva avbildande radarsatelliter, fås 32 stycken satelliter som resultat, se Tabell 3.1. Efter en detaljstudie noteras att tre av satelliterna är felkonfigurerade i UCS-katalogen. Objekten FORTE, CLOUDSAT och CRYOSAT är inga avbildande radarsatelliter. CRYOSAT inkluderar förvisso ett SAR-system men det används inte för avbildning utan för avståndsmätning (höjdmätning över hav samt detaljerad profilering över områden med havs- eller landis).

Bantypen för satelliten KONDOR E är också felaktigt specificerad som solsynkron. Sålunda bör en viss försiktighet beaktas i användningen av informationen, som om möjligt bör valideras mot en annan källa.

NORAD_CAT_ID	SATNAME	ORBIT_CLASS	DET_PURPOSE	Launch_Date	ORBIT_TYPE	APOGEE	PERIGEE	PERIOD	INCLINATION	ECCENTRICITY
24920	FORTE	LEO	Radar Imaging	1997-08-29	Intermediate	823	790	101.00	70.00	0.0023
25017	USA 133	LEO	Radar Imaging	1997-10-24	Intermediate	675	671	98.20	57.00	0.000284
26473	USA 152	LEO	Radar Imaging	2000-08-17	Intermediate	676	574	97.21	68.00	0.00729
28646	USA 182	LEO	Radar Imaging	2005-04-30	Intermediate	716	713	99.08	57.01	0.000212
29107	CLOUDSAT	LEO	Radar Imaging	2006-04-28	Sun-Synchronous	703	702	98.80	98.20	0.0000707
29658	SAR LUPE 1	LEO	Radar Imaging	2006-12-19		505	468	94.30	98.20	0.0027
31598	SKYMED 1	LEO	Radar Imaging	2007-06-08	Sun-Synchronous	623	622	97.20	97.90	0.0000715
31698	TERRA SAR X	LEO	Radar Imaging	2007-06-15		509	507	94.80	97.50	0.000145
31797	SAR LUPE 2	LEO	Radar Imaging	2007-07-02		503	470	94.34	98.19	0.00241
32283	SAR LUPE 3	LEO	Radar Imaging	2007-11-01		496	473	94.30	98.17	0.00168
32376	SKYMED 2	LEO	Radar Imaging	2007-12-09	Sun-Synchronous	623	622	97.20	97.90	0.0000715
32382	RADARSAT 2	LEO	Radar Imaging	2007-12-14	Sun-Synchronous	793	791	100.70	98.60	0.00014
32476	TECSAR	LEO	Radar Imaging	2008-01-21		580	405	94.50	41.03	0.0128
32750	SAR LUPE 4	LEO	Radar Imaging	2008-03-27		486	448	94.40	98.16	0.00278
33244	SAR LUPE 5	LEO	Radar Imaging	2008-07-22		502	474	94.37	98.16	0.00204
33412	SKYMED 3	LEO	Radar Imaging	2008-10-25	Sun-Synchronous	623	622	97.20	97.90	0.0000715
34807	RISAT-2	LEO	Radar Imaging	2009-04-20		427	415	41.20	41.22	0.000884
36508	CRYOSAT 2	LEO	Radar Imaging	2010-04-08		724	713	99.20	92.00	0.000776
36605	TANDEM X	LEO	Radar Imaging	2010-06-21	Sun-Synchronous	510	507	94.80	97.40	0.000218
37162	USA 215	LEO	Radar Imaging	2010-09-21		1	1	107.35	122.99	0.000401
37216	SKYMED 4	LEO	Radar Imaging	2010-11-06	Sun-Synchronous	623	622	97.20	97.90	0.0000715
37813	IGS 6A	LEO	Radar Imaging	2011-09-23	Sun-Synchronous	591	588	96.47	97.69	0.000216
37954	IGS 7A	LEO	Radar Imaging	2011-12-12	Sun-Synchronous	514	512	94.89	97.46	0.000145
38109	USA 234	LEO	Radar Imaging	2012-04-03		1	1	107.00	123.00	0.00261
38248	RISAT 1	LEO	Radar Imaging	2012-04-25	Sun-Synchronous	541	538	95.40	97.60	0.000217
38997	HJ-1C	LEO	Radar Imaging	2012-11-18		438	420	94.53	97.33	0.00132
39061	IGS 8A	LEO	Radar Imaging	2013-01-27	Sun-Synchronous	514	509	94.85	97.50	0.000363
39194	COSMOS 2487	LEO	Radar Imaging	2013-06-27		501	497	94.60	74.73	0.000291
39227	KOMPASAT 5	LEO	Radar Imaging	2013-08-22	Sun-Synchronous	552	535	95.50	97.60	0.00123
39462	USA 247	LEO	Radar Imaging	2013-12-06		1	1	106.70	123.00	0.00101
39766	ALOS 2	LEO	Radar Imaging	2014-05-24	Sun-Synchronous	635	630	97.36	97.88	0.000357
40353	KONDOR E	LEO	Radar Imaging	2014-12-19	Sun-Synchronous	501	499	94.62	74.75	0.000146

Tabell 3.1. Avbildande radarsatelliter enligt SQL-databasen.

3.3 Banor för de aktiva avbildande radarsatelliterna

Banorna för alla SAR-system i Tabell 3.1 är av typen *Low Earth Orbit* (LEO), mellan 410-800 km höjd och med en inklinering i intervallet 41-123°. Av de 29 som klassats som avbildande radarsatelliter är 12 stycken solsynkrona, dvs. satelliternas banplan vrider sig ett varv under ett år. Banor som har inklinering över 90° kallas retrograda. För att en bana skall kunna vara solsynkron måste dess inklinering vara över 90°, se Figur 3.2.

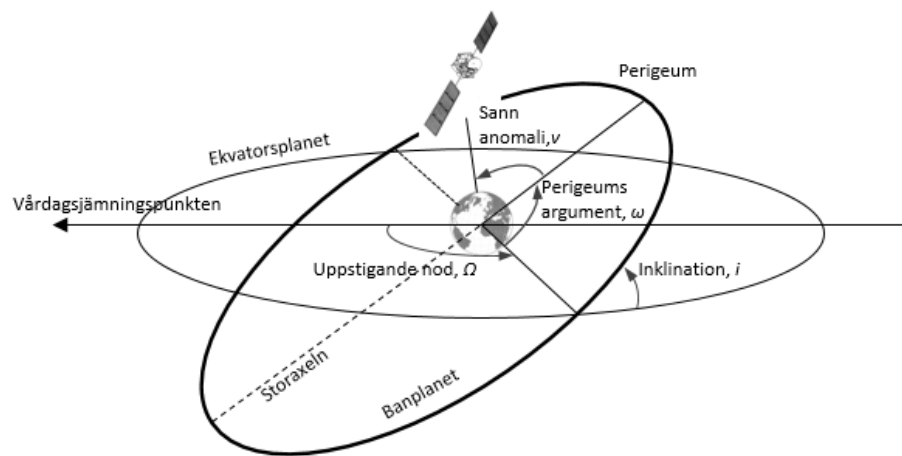
Om en satellit medför en nyttolast som drar mycket energi är det lämpligt att placera satelliten i en solsynkron bana med en uppstigande nod (passage över ekvatorn) kring 06:00 eller kring 18:00 lokal tid för att därmed få maximal solbelysning under banvarvet.

En konsekvens med att välja en solsynkron bana är att satelliten alltid passerar över samma lokala tid ± 12 timmar för varje given latitud. Detta innebär att observationer av ett specifikt område inte kan göras vid andra tidpunkter. Önskar man göra

tidsserieobservationer så skall inte en solsynkron bana användas. Vid jordobservationer med optiska sensorer brukar man dock eftersträva en konstant lokal tid eftersom en bana kring 01:30, 10:30, 13:30 eller 22:30 ger lagom stora skuggor; alla dessa banor ger samma optimala skugga.

En icke solsynkron bana ger observationer vid olika tidpunkter på dygnet. En stor del av tiden i banan är då belägen i mörker, på jordens nattsida. Under denna passage måste en annan kraftkälla än solljuset och solpaneler användas, t ex batterier. Detta gäller även för solsynkrona banor med uppstigande noder skilda från 06:00 och 18:00.

I Tabell 3.2 presenteras de tolv aktiva SAR-satelliterna som ligger i solsynkrona banor och deras uppstigande noder. Av dessa tolv satelliter har åtta stycken en 06:00 eller 18:00 bana, dvs. maximal solbelysning. ALOS 2 har en middag-midnattsbana och IGS-6A, -7A och -8A har 01:30- eller 22:30-banor. IGS-banorna ligger i typisk optisk jordobservationsbana. Det finns därför anledning att utgå ifrån att de antingen har en optisk sensor ombord eller formationsflyger med en eller flera optiska satelliter.



Figur 3.2. Illustration av banparametrar.

Satellitnamn	NORAD ID	Uppstigande nod	Militär/Civil	NATION
SKYMED 1	31598	05:43	Civil/Militär	Italien
SKYMED 2	32376	05:43	Civil/Militär	Italien
SKYMED 3	33412	05:43	Civil/Militär	Italien
SKYMED 4	37216	05:43	Civil/Militär	Italien
RADARSAT 2	32382	17:56	Civil	Kanada
TANDEM X	36605	17:56	Civil	Tyskland
IGS6A	37813	01:24	Militär	Japan
IGS7A	37954	22:25	Militär	Japan
IGS8A	39061	01:23	Militär	Japan
RISAT 1	38248	17:55	Civil	Indien
KOMPSAT 5	39227	05:50	Civil	Sydkorea
ALOS 2	39766	23:55	Civil	Japan

Tabell 3.2. Satelliter med solsynkrona banors och deras uppstigande nod. (NORAD = North American Aerospace Defense Command)

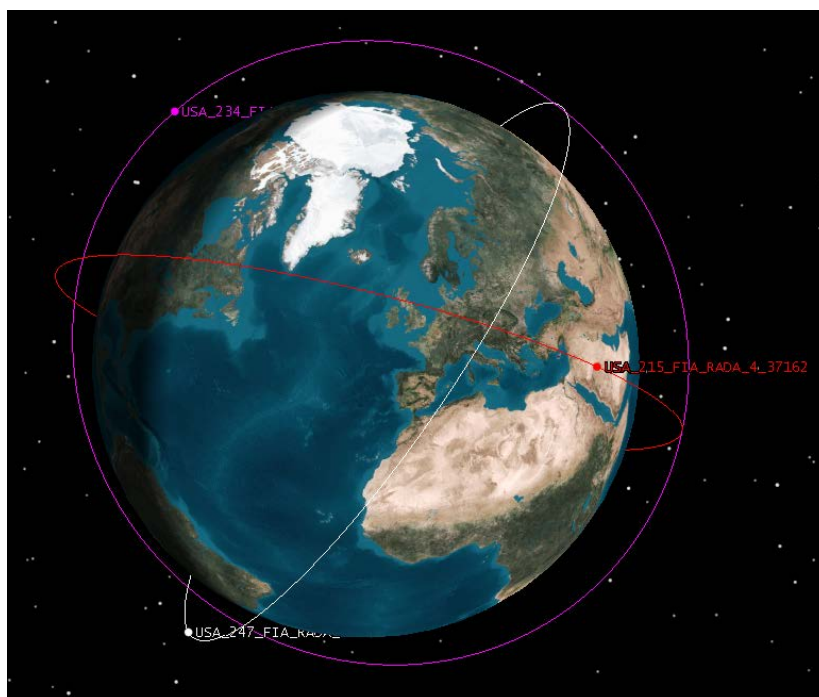
3.4 Exempel: TOPAZ

Det finns ett antal satelliter som SATCAT inte preciserar banparametrar för. Dessa objekt är oftast hemliga/militära satelliter som JSpOC inte vill offentliggöra banparametrar eller positioner för. Det är därför det saknas information om dessa objekt i Tabell 3.1, se kolumnerna *apogee* och *perigee* för TOPAZ-satelliterna USA 215, USA 234 och USA 247.

Det finns ett antal web-sidor där amatörobservatörer lägger upp data även för dessa hemliga objekt. Det finns däremot ingen möjlighet att med säkerhet veta hur pålitliga dessa data är, de kan vara avsiktligt felaktiga eller felaktiga på grund av felmätning. För att inte dra felaktiga slutsatser angående studier av dessa satelliter bör man ha dessa osäkerhetsfaktorer i åtanke. Den länk som används för att studera de militära TOPAZ-satelliterna har hämtats från web-sidan CalSky [3.2]. Figur 3.3 visar banan och banparametrar för TOPAZ-satelliten USA 247. Förhållandet mellan banor för de tre TOPAZ-satelliterna visas i Figur 3.4.



Figur 3.3. Vänster: Banan för TOPAZ-satelliten USA 247 under ett dygn sett från en observatör på jorden. Höger: Banparametrar för USA 247.



Figur 3.4. STK-scenario med de tre TOPAZ-satelliternas banor, dvs USA 215, USA 234 respektive USA 247.

Den största störningen som påverkar LEO-satelliter på höjder över 800 km är J_2 -effekten; dess effekt på banan är flera magnituder större än de övriga störningarna [3.3]. J_2 -effektens påverkan på medelvärdena av banparametrarna beskrivs av [3.4]:

$$\begin{aligned}\dot{e} &= 0, \\ \dot{a} &= 0, \\ \dot{\Omega} &= -\frac{3}{2}J_2n\left(\frac{R_{\oplus}}{a}\right)^2(1-e^2)^{-2}(\cos i)\end{aligned}$$

där

$$\mu = GM_{\oplus}, \quad n_0 = \sqrt{\mu/a^3}, \quad n \equiv \frac{dM}{dt} = n_0 \left[\left(1 + \frac{3}{2}J_2\right) \left(\frac{R_{\oplus}}{a}\right)^2 (1-e^2)^{-3/2} \left(1 - \frac{3}{2}\sin^2 i\right) \right]$$

I ekvationerna ovan är:

- e , banans excentricitet.
- a , banans storaxel.
- Ω , banans uppstigande nod, där banan korsar jordens ekvatorplan, se Figur 3.2.
- n_0 , satellitens nominella medelvinkelhastighet.
- n , satellitens medelvinkelhastighet, lika med tidsderivatan hos medelvinkeln M .
- J_2 , gravitationspåverkan utav effekten att jorden inte är en perfekt sfär, utan tillplattad vid polerna.
- M , medelvinkel från banans närmaste punkt till jorden till medelpositionen av satelliten.
- R_{\oplus} , jordens medelradie kring ekvatorn.
- i , banplanets vinkel mot jordens ekvatorplan, se Figur 3.2.
- M_{\oplus} , jordens massa.
- G , gravitationskonstanten.

Punkter ovan tillhörande variabelnamn i ekvationerna motsvarar deras tidsderivata.

Notera att J_2 inte påverkar medelvärdet av excentriciteten (e) eller storaxeln (a), eftersom J_2 är en konservativ kraft som därmed inte ändrar banans energiinnehåll.

Inklinationen för TOPAZ-satelliterna är 123° och banhöjden är 1104 km, vilket ger följande drift på grund av J_2 :

- $\Delta\Omega = 3.1^\circ/\text{dygn}$. Uppstigande nod (Ω) ökar med 6.2° under två dygn.
- Banan utför 13.414 varv/dygn. Under två dygn gör satelliten 26.828 varv.

Skillnaden mellan 27 kompletta varv under två dygn motsvarar en delta-tid av 18.3 minuter. Denna tid (2 dygn + 18.3 minuter) motsvarar en rotation av jorden på 726.6° .

Jorden hinner, pga de extra 18 minuterna, vrida sig 2 varv plus ytterligare 6.6° . (Notera att jorden inte vrider sig 360° under 24 timmar utan 361° på grund av jordens rotation kring solen, *sidereal day*).

Eftersom J_2 -effekten på 6.2° nästan kompenserar för den extra 18 minutersvridningen (6.6°) resulterar detta i en periodicitet på 2 dygn. Satelliten får "samma" markspår efter 2 dygn med en liten tidsdrift på 18 minuter.

Vilka är då anledningarna till att lägga en SAR-satellit i en 123° inklination på 1100 km höjd? Det finns tre tänkbara förklaringar:

- Man får en väldigt god täckning av jorden eftersom man har tre stycken satelliter med liknande bankonfiguration men med olika uppstigande noder (Ω), se Figur 3.2 och Figur 3.4.
- Eftersom satelliterna rör sig i en retrograd bana med 123° inklinering (banlutning) "möter" de jorden. Det innebär att jorden roterar under dem i mötande riktning och en satellit i denna bana får högre relativhastighet jämfört med en lägre inklinering, t ex solsynkronbana.
- En annan tänkbar fördel med tvådagars repeterbarhet är att de flyger över samma område vid samma tidpunkt vilket gör att klimat och temperatur är liknande vid de olika observationstillfällena. Denna kunskap kan användas för att kompensera för jonosfär- och atmsfärstörningar.

4 System i omvärlden

En mer utförlig sammanställning av radarsatellitssystem finns i den tidigare nämnda rapporten [1.1] som skrivits parallellt med denna rapport. Här ges exempel på särskilt intressanta system. Många system idag är *dual-use*, med både militär och civil användning. Uppdelningen nedan är således något konstlad i vissa fall. System har redovisats som civila eller militära efter bedömd huvudsaklig uppgift.

4.1 Civila system

Här ges först en kort historisk tillbakablick. Sedan redovisas några idag aktiva och framtida civila system.

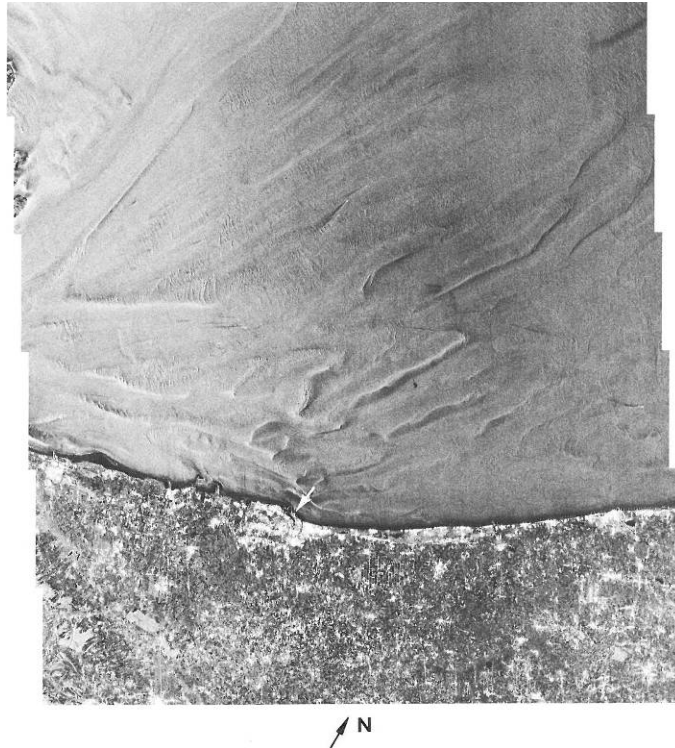
4.1.1 Historisk tillbakablick

Satelliten Seasat var det första SAR-systemet i rymden från vilken bilder har publicerats öppet. NASA-projektet leddes internt av JPL (*Jet Propulsion Laboratory*). Med en totalvikt på 2.3 ton placerades satelliten i en bana 27 juni 1978, på höjden 800 km med en inklination på 108°. Seasat var främst utformad för oceanografisk fjärranalys och hade en rad kompletterande sensorer ombord vid sidan om SAR. Trots att den bara fungerade under drygt tre månader hann den generera en stor mängd data. Dock begränsades täckningen till områden på jorden där en markstation fanns tillgänglig för att direkt länka ner rådataströmmen då ingen lagringskapacitet fanns ombord för SAR-instrumentet.

Via en station, Oakhanger, i England kunde områden i de västliga delarna av Norrland avbildas vid tre banpassager. Radarrådata från ett av dessa stråk, i området kring Arjeplog, utnyttjades senare när dåvarande FOA, i ett projekt finansierat av Rymdstyrelsen, utvecklade en SAR-processor baserad på digital bearbetning [4.1]. Redan på 70-talet hade FOA studerat principerna för optisk bearbetning av SAR-data där rådata vid registreringen istället lagras genom att exponera en film som framkallas och utgör ingångsdata i en optisk bänk. Signalbehandlingen realiseras via ett linssystem fram till ett bildplan där en film ånyo exponeras och utgör slutresultatet. Uppdraget från Rymdstyrelsen var en del i en svensk kunskapsuppbyggnad inför den kommande första europeiska SAR-satelliten ERS-1, framtagen i ESAs (*European Space Agency*) regi.

Seasat arbetade på L-bandet med horisontell polarisation vid såväl sändning som mottagning (HH-polarisation). Upplösningen i de genererade SAR-bilderna var 25 m x 25 m [4.2]. Bland det mer uppmärksammade resultaten var att bottenpografien i många fall fanns modularad på SAR-bilder över hav. Då radarsignalen på aktuellt frekvensband inte förmår tränga in i saltvatten är det istället frågan om en indirekt effekt där informationen förmedlas med hjälp av ett oceanografiskt fenomen kallat interna vågor. Vid rätta betingelser, såsom tidvattensströmmar i kombination med stabila skiktningar i vattnet, kan vertikala oscillationer i vattenmassan uppkomma vid passage över bottenvariationer. Dessa fortplantar sig ända upp till ytan och leder till konstruktiv och destruktiv interferens i radarbilden. Figur 4.1 ger ett exempel från engelska kanalen.

En naturlig fråga ur ett militärt perspektiv blev därmed om interna vågor också kan alstras via störningar i vattenvolymen från ubåtar och således möjliggöra upptäckt då rätta betingelser föreligger. En rad modellarbeten kring detta har gjorts genom åren, så även i Sverige [4.3]. Flera mätningar har också gjorts internationellt av olika grupper kring interna vågor med såväl rymd- som flygburna SAR-instrument. I det som publicerats i öppna källor har ingen information getts där detekterade mönster på ytan under kontrollerade försök påstås vara genererade av en verklig ubåt. Istället har störningar alstrats från fartyg på ytan eller möjligen genom att man drar något efter fartyg.



Figur 4.1. SAR-bild registrerad med Seasat över engelska kanalen 19 augusti 1978 [4.4]. Den fransk-belgiska kustlinjen syns längst ner med området kring staden Dunkerque markerat med en vit pil. Delar av strukturerna som syns ute till havs kan hänföras till bottenpogografen och genereras indirekt via en modulation av havsyntans skrovlighet (kapillärvågor) genom påverkan av interna vågor som alstras inom vattenmassan.

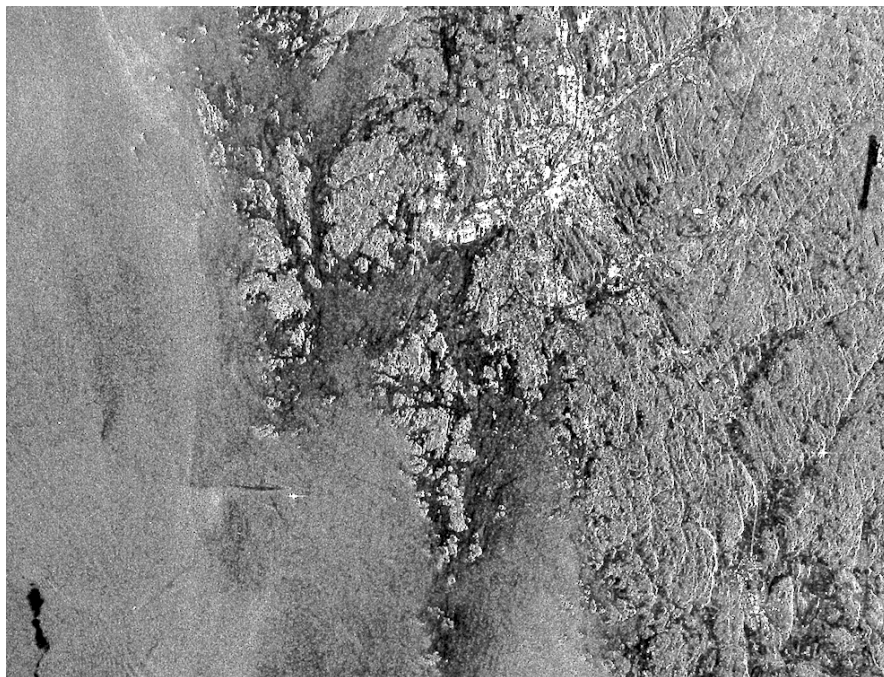
Baserat delvis på reservdelar från utvecklingen av Seasat byggdes ett nytt SAR-system som denna gång istället monterades ombord på rymdfärjan Columbia. Systemet kallades SIR-A (*Shuttle Imaging Radar*) och avbildade delar av jorden mellan latituderna 40°N - 35°S under två dagar i november 1981, från höjden 257 km. Data lagrades denna gång på film med efterföljande optisk bearbetning. Lagringen tillät inte samma datatakt varför bandbredden fick sänkas och SAR-bilderna fick därför den lägre upplösningen 40 m x 40 m jämfört med Seasat. Bland de mer spektakulära resultaten från denna mission märks avbildningen över Sahara där strukturer under sanden kunde identifieras, pga. radarsignalen på L-band under vissa betingelser förmår tränga ner i mark, se Figur 4.2.

Europas första SAR-satellit ERS-1 sköts upp den 17 juli 1991, i en bana med höjden 785 km och en inklinering på 98.5°. SAR-sensorn arbetade på C-band med vertikal polarisation vid såväl sändning som mottagning (VV-polarisation). Upplösningen i framtagna SAR-bilder är 30 m x 30 m och ett exempel ges i Figur 4.3. Med satelliten väl på plats inleddes en rad fleråriga forskningsprojekt i Sverige med stöd från Rymdstyrelsen. Fokus var på att utnyttja SAR-bilder för att få mer detaljerad informationen om den aktuella issituationen i Östersjön. Informationen användes sedan för att skapa prognoser för kommande dagar, som stöd till isbrytartjänsten. Arbetet genomfördes gemensamt av SMHI, Chalmers, dåvarande FOA samt Rymdbolaget och i samverkan med forskargrupper i såväl Finland som Tyskland.

De tre satellitexemplen var typiska för tillgängliga civila SAR-system under åren fram till millennieskiftet. Med en högsta upplösning omkring 20 m eller mer var de för flertalet militära tillämpningar otillräckliga som resurs i perspektivet *dual-use*.



Figur 4.2. Ökenområde i Egypten nära gränsen mot Sudan avbildat med optiska satelliten Landsat och SIR-A, dock inte samtidigt. Landsatbilden täcker en större yta och på den övre bilden har stråket för SIR-A markerats [4.5]. På den undre bilden är radardata överlagrat och ett mönster träder fram som inte syns optiskt. Merparten av detta mönster har sitt ursprung från strukturer belägna under markytan då radarstrålningen på L-band förmår tränga in i den torra ökensanden.



Figur 4.3. SAR-bild från ERS-1 registrerad 1992 över svenska västkusten kring Göteborg. Stadsbebyggelsen återfinns som det ljusa partiet i bildens övre del, något till höger om mitten. I det större mörka området ute till havs i bildens nedre vänstra hörn har vattenytans småskrovlighet orsakad av kapillärvågorna dämpats kraftigt. En anledning skulle kunna vara ett sammanhängande oljeutsläpp. Det långsmala mörka området uppe till höger är Landvetters flygplats. Bilden täcker omkring 55 km x 30 km men är återgiven i SAR-sensorns snedvridna bildplan och är därför inte kartriktig. (ERS-1 bild © ESA).

Rymdfärjorna kom att utnyttjas under ytterligare fyra missioner med tre olika avbildande radarinstrument ombord där ny SAR-teknik kunde provas för första gången i rymden. Under två Endeavour-missioner 1994 med instrumentet SIR-C registrerades för första gången fullpolarimetriska data (HH-, HV-, VH-, VV-polarisation) och datainsamlingen kunde i denna mod ske samtidigt på såväl L- som C-band. Ytterligare ett system, X-SAR, fanns installerat ombord som kunde opereras parallellt men begränsat till polarisationen VV. Det var första gången X-band utnyttjades i ett civilt rymdburet system [4.6].

Sista gången en rymdfärja utnyttjades för en SAR-mätning var år 2000 och då för en elva dagar lång mission benämnd SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) [4.7]. SAR-systemet ombord arbetade på C- och X-band, med syftet att genomföra interferometriska mätningar för att kunna generera en höjddatamodell. För att uppnå en tillräcklig vinkelskillnad utnyttjades en 60 m lång, teleskopiskt utskjutbar, bom i vars ände de radarantennerna som endast skulle ta emot de återspridda signalerna fanns monterade. Huvudantennen för sändning liksom mottagning i den andra registreringskanalen per frekvensband fanns monterade i lastutrymmet på rymdfärjan. Ur datavolymen kunde den dittills noggrannaste digitala höjddatamodellen genereras med en global täckning inom latitudintervallet 60°N - 57°S.

4.1.2 Operativa och framtida civila system

De senaste tio åren har utbudet av civila SAR-satelliter ökat. Likaså har den högsta upplösning som finns att tillgå förbättrats avsevärt. Idag erbjuds någon eller några meter som bästa upplösning vilket är ett minsta krav för många militära tillämpningar. En ökande marknad för *dual-use* har därmed öppnats för civila aktörer. För flera av de utnyttjade radarbanden närmar sig civila system de maximala bandbredder som enligt ITU är tillåtna för avbildning från rymden, se Tabell 2.1. Möjligheter till andra mätgeometrier, som exempelvis interferometri, liksom fullt polarimetriska avbildningar blir allt vanligare bland produkter som kan tillhandahållas av olika civila operatörer.

Civilt tillgängliga system opereras idag av Indien, Italien, Japan, Kanada, Sydkorea och Tyskland. Etablerade rutiner finns för beställning av nya eller arkiverade SAR-bilder från dessa system. Till detta kommer en gemensamt framtagen SAR-resurs, Sentinel-1A/B, som ingår i ESAs satellitprogram Copernicus, tidigare benämnt GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*). ESA har antagit en datapolicy vad gäller Copernicus där alla typer av data som registreras av nuvarande och kommande satelliter inom detta program skall vara öppna och fritt tillgängliga.

Vid sidan av de uppgraderingar som planeras hos redan etablerade aktörer, investerar nu nya länder som Argentina, Spanien och Storbritannien i SAR-satelliter för att tas i operativ drift de närmaste åren. Med en något längre tidshorisont men inom tio år finns Nigeria och Ghana [4.8, 4.9]. Under 2015 har två privata konsortier, amerikanska XpressSAR och kanadensiska Urthecast, annonserat att man har för avsikt att sända upp konstellationer av SAR-satelliter, i båda fallen bestående av fyra SAR-system och för Urthecasts del även kompletterat med fyra optiska satelliter [4.10, 4.11].

4.2 Militära system

Här ges först en kort historisk tillbakablick. Sedan redovisas några aktiva och framtida militära system.

4.2.1 Historisk tillbakablick

Den första SAR-satelliten, amerikanska P-40 Quill, sköts upp 1964 [4.12]. Uppdragets syfte var en konceptutvärdering av rymdbaserad SAR för strategiskt bruk. Upplösningen (24 meter i avstånd hänfört till det snedtittande bildplanet respektive 2.3 meter i vinkel (azimut)) ansågs vara för låg för att vara användbar. Satelliten var batteridrivna och

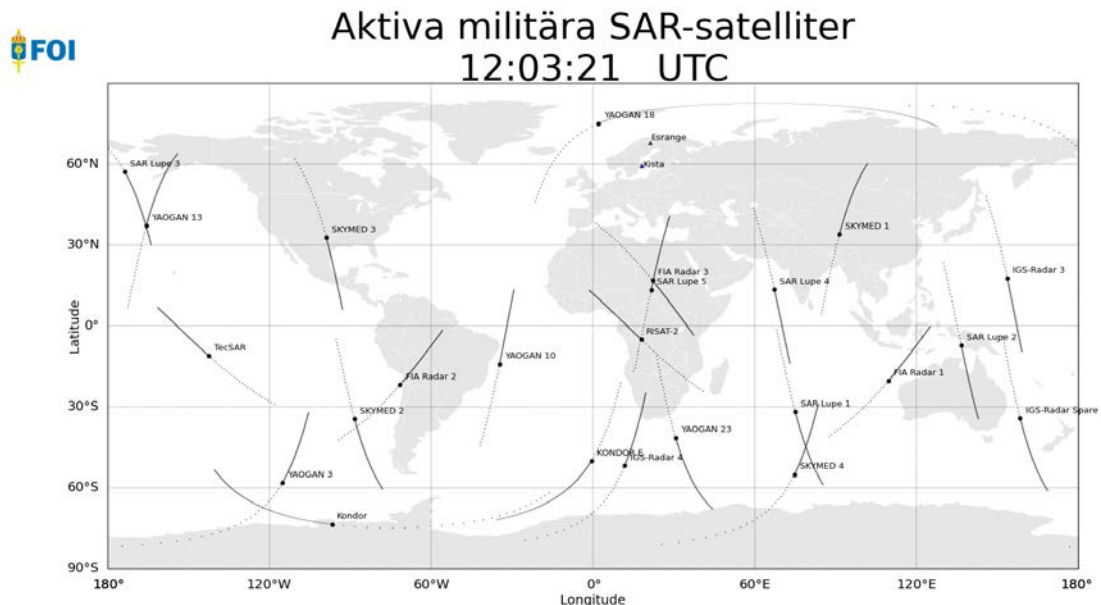
uppdraget varade i fem dagar. USAs nästa militära SAR-uppdrag i rymden dröjde till sent 1980-tal i och med Lacrosse-programmet, som sedan varade fram till 2005 [4.13].

Sovjets försök inom rymdbaserad radar började 1964, och det första operativa SLR-systemet, US-A (benämnt RORSAT i väst), sköts upp 1971 [4.14, 4.15]. Eftersom batterier inte uppfyllde effektkraven för det avbildande radarsystemet och dåtidens solpaneler gav tillräcklig effekt, användes därför kärnreaktorer som effektkälla. Den första sovjetiska SAR-satelliten, civila Cosmos 1870, sköts upp 1987. Uppdraget varade i 18 månader och följdes av Almaz-1, även det ett civilt uppdrag, som varade fram till 1992 [4.15]. Ryssland tycks därefter ha saknat egen militär rymdbaserad SAR-förmåga fram till uppskjutningen av Kondor 2013 [4.16].

Först under 2000-talet började andra länder anskaffa militära SAR-satelliter. Först ut var Kina med Yaogan 1 (april 2006) [4.17], följt av Tyskland med den första av fem satelliter i konstellationen SAR Lupe (december 2006) [4.18], och därefter Italien med den första av fyra satelliter i konstellationen COSMO-SkyMed (juni 2007) [4.19] samt Israel med TecSAR (januari 2008) [4.20, 4.21].

4.2.2 Operativa och framtida militära system

Det är okänt exakt hur många aktiva militära SAR-satelliter som finns i bana idag, eftersom sådana projekt ofta hålls hemliga i varierande grad, beroende på land och syfte. En kombination av officiella och inofficiella källor [4.22] kan dock användas för att få fram en uppskattning; 24 satelliter, fördelade bland 9 olika länder: Indien, Israel, Italien, Japan, Kina, Ryssland, Sydafrika, Tyskland och USA. En ögonblicksbild av satelliternas positioner över jorden, representerat av deras markspår, visas i Figur 4.4.



Figur 4.4. Aktiva militära SAR-satelliters positioner över jorden den 16 november 2015 kl. 13:03 svensk tid. Banparametrar för satelliterna har tagits från både officiella och inofficiella källor. På grund av stor osäkerhet kring de amerikanska Lacrosse-satelliternas (föregångare till TOPAZ/FIA) aktivitet har de inte tagits med i bilden.

Information om *dual-use*-system, det vill säga sådana med både civila och militära användare, är ofta offentliggjorda. Ett exempel på *dual-use*-uppdrag är den italienska satellitkonstellationen COSMO-SkyMed [4.19], som samfinansierats av italienska utbildnings- och försvarsdepartementet. Projektet drivs av Telespazio tillsammans med italienska rymdstyrelsen ASI. Konstellationen av fyra satelliter befinner sig i en solsynkron *dawn-dusk* bana på cirka 600 kilometers höjd. Delar av satellitens funktioner

har kommersialiserats, medan en sensormod är förbehållet militära ändamål där tillhörande prestandauppgifter är belagda med sekretess. Satellitserien är därmed inkluderad bland de idag militärt operativa systemen som visas i Figur 4.4. Den högsta upplösningen som kan fås med de kommersiella sensorlägena är en meter över ett markområde av 10 x 10 km. De fyra satelliterna sköts upp 2007-2010 och är tänkta att ersättas av en andra generation med två satelliter från och med 2016, instrumenterade med en förbättrad SAR-sensor.

Även rent militära uppdrag kan vara delvis offentliga; exempel på detta är den tyska konstellationen SAR Lupe [4.18] liksom israeliska TecSAR [4.20, 4.21]. Detaljer om satelliterna kan vara tillgängliga, såsom yttre form, ungefärlig massa, banparametrar samt översiktliga beskrivningar av radarinstrumenten. Satelliternas operativa kapacitet vad gäller själva avbildningen är dock sekretessbelagd. I fallet TECSAR finns även några exempel på SAR-bilder registrerade med systemet enligt vad som uppges och öppet publicerade i konferensartiklar, se Figur 4.5. Flera skäl kan finnas till varför man väljer att offentliggöra information om uppdragen, t ex kan det finnas en avsikt att sälja teknologin vidare. Detta är fallet med TecSAR som, om möjligt något modifierad, såldes till Indien 2009 (RISAT 2) [1.1]. En indisk bäraket utnyttjades för övrigt för att placera Israels egen enhet i omloppsbanan. Även ryska Kondor har i någon variant levererats till Sydafrika 2014 (Kondor-E) [4.16].



Figur 4.5. SAR-bild över ett hamnområde, utan närmare geografisk precisering, registrerad med satellitsystemet TECSAR [4.21].

En annan anledning kan vara samarbetsvilja med andra nationer. Tyska SAR Lupe ingår i ett samarbete med Frankrike, som i sin tur bidrar med data från de optiska spanings satelliterna i Helios-serien. SAR Lupes efterföljare, konstellationen SARah [4.22, 4.23, 4.24], kommer ingå i det europeiska samarbetet kring spanings satellitdata, MUSIS [4.25].

Amerikanska militära SAR-projekt har sedan början varit sekretessbelagda. Det amerikanska flygvapnet betecknar de flesta satelliterna "USA", och det gäller även deras navigations-, väder- och kommunikationssatelliter. På samma sätt ges uppskjutningarna beteckningen "NROL" av den ansvariga myndigheten för underrättelsesatelliter, *National Reconnaissance Office*. Som exempel har de tre förmodade SAR-satelliterna i

konstellationen *Future Imagery Architecture* (FIA, också känt som TOPAZ, se Kapitel 3.4 och 4.3) beteckningarna USA-215, USA-234 respektive USA-247, och uppskjutningarna har beteckningarna NROL-41, NROL-25 respektive NROL-39 [4.26].

De ryska och kinesiska försvarsdepartementen betecknar på samma sätt alla militära spaningssatelliter med intetsägande namn; *Kosmos* ("rymd" på ryska) respektive *Yaogan* ("fjärranalysatellit" på mandarin), vilket gör identifieringen av SAR-satelliter svårare.

Ryssland har i dagsläget en dedikerad SAR-satellit, Kondor [4.16]. Uppgifter om satellitens banparametrar pekar dock på att den har slutat fungera, och att den har flyttats till en låg bana för att förstöras i ett återinträde i atmosfären. De marina ELINT-satelliterna Pion-NKS/Liana ska också ha en aktiv radar ombord utöver elektronisk spaningsutrustning [4.27]. Den första Pion-NKS är tänkt att skjutas upp i år, men den officiella informationen om projektet är motsägelsefull.

De kinesiska Yaogan-satelliternas syften beskrivs ofta från officiellt håll som jordbruksoptimering och katastrofstöd. Programmet har pågått sedan 2006 och tros omfatta optisk spaning, SAR och ELINT (*electronic intelligence*). Identifiering av Yaogan-uppskjutningar med SAR som nyttolast grundas till stor del på objektets slutliga banparametrar, som motsvarar en typisk SAR-bana. Grunden för en sådan identifiering medelst banparametrar beskrivs i Kapitel 3. Idag tros Kina ha fem aktiva SAR-satelliter: Yaogan 3, 10, 13, 18 och 23. Dessutom driver *China Centre for Resources Satellite Data and Application* (CRESDA) SAR-satelliten Huan Jing 1C vars officiella syfte är övervakning av naturkatastrofer [4.28]. Det är oklart huruvida satelliten används för militärt eller civilt bruk, eller om den är *dual-use*, men den utvecklades i samarbete med ryska NPO Mashinostroyenia, som ligger bakom Kondor [4.16].

Japans spaningssatellitsprogram *Information Gathering Satellite* (IGS) har precis som Yaogan både en optisk och en SAR-komponent, där båda delar samma beteckning [4.29]. En ändring i Japans rymdlagar 2008 tog bort förbudet mot militär aktivitet i rymden [4.30], vilket ledde till att syftet med satelliterna inte längre behöver döljas. Japan har skjutit upp totalt 12 IGS, varav tre SAR-satelliter (IGS-Radar 3, 4 och Spare som agerar backup), antagligen är aktiva. Upplösningen tros vara runt 1 meter. Det finns i övrigt ingen officiell information om satellitens förmågor eller banparametrar.

Fler länder har visat avsikter att anskaffa radarspaningssatelliter, ofta i samarbete med ett av de stora, etablerade rymdländerna. De flesta uppdrag är rent civila eller *dual-use*. Samtidigt finns möjligheten att överföra kunskaper och teknologi till framtida militära projekt.

4.3 System av särskilt intresse

4.3.1 TOPAZ

FIA var ett amerikanskt program för att ta fram nästa generation av spaningssatelliter med optik eller radar som nyttolast. Kontraktet vanns av Boeing men efter en rad tekniska problem och kraftiga kostnadsfördyringar avbröts det 2005. Konceptet antas dock till stora delar ha överlevt vad gäller radarsensorerna och har utvecklats vidare i en satellitserie under kodnamnet TOPAZ. Avsikten är att på sikt ersätta samtliga äldre enheter av de amerikanska militära SAR-satelliterna Lacrosse. Då TOPAZ förmodas härstamma från programmet FIA, ses ibland även beteckning FIA Radar.

Det har antagits att fem satelliter planeras, samma antal som för Lacrosse. De tre som nu bedöms finnas i bana sköts upp från Vandenberg AFB den 21 juni 2010, den 3 april 2012 och den 6 december 2013. Bäraraketer av såväl typen Atlas som Delta skall ha använts. Liksom för Lacrosse finns för TOPAZ inga öppna uppgifter kring operativa moder, teknisk prestanda eller förbättringar som införts. Samma två baninklinationer som för Lacrosse-serien verkar också användas för TOPAZ men med den högre höjden 1000 km.

Den officiella informationen om TOPAZ är knapphändig, men en analys av objektens banparametrar, uppmätta av amatörastronomer, tyder på SAR-satelliter. Denna analys presenteras i Kapitel 3.4. Förutom TOPAZ befinner sig tre satelliter från det tidigare Lacrosse/Onyx-programmet fortfarande i bana, varav en möjligtvis ännu är aktiv.

4.3.2 NovaSAR-S

NovaSAR-S från *Surrey Satellite Technology* (SSTL) är en brittisk teknologidemonstrator med syfte att visa genomförbarheten av rymdbaserad SAR till en låg kostnad. SAR-produkter skulle därmed kunna användas av en bredare kundkrets till ett mer överkomligt pris. Projektets utgångspunkt är utvecklingen av optiska jordobservationssatelliter (EO), som gått mot större kommersialisering och tillgänglighet för fler aktörer. SSTL nämner sin egen konstellation av optiska EO-satelliter, *Disaster Monitoring Constellation*, som exempel på en sådan utveckling [4.31].

Istället för att satsa på att nå bästa prestanda har SSTL valt att utgå från ett lågkostnadsperspektiv, och se vilken prestanda som är möjlig att uppnå. Radarsystemet, som byggs av Airbus Defence and Space, kan använda fyra olika metoder (ScanSAR, Maritime, Stripmap, ScanSAR Wide) med en upplösning från 6 till 30 meter för olika stråkbredder mellan 13 och 750 km, och sänder inom S-bandet (3.2 GHz) [4.32]. Med denna typ av prestanda utgörs kundbasen framför allt av organisationer som arbetar med övervakning av naturkatastrofer, jordbruk och skeppstrafik (kombinerat med en AIS-sensor, systemet för följning av fartyg). Utvecklingsländer som tidigare endast haft tillgång till optiskt satellitdata kommer alltså kunna nyttja allväders-SAR. Flera utvecklingsländer finns runt ekvatorn, med tidvis hög molnighet, och har därför stort behov av SAR-data. NovaSAR-S utvecklas för att kunna placeras i en bana runt ekvatorn (ca 15° inklinering).

Kostnaden för att bygga satelliten byggs till en kostnad som anges vara cirka 20 % av kostnaden för en konventionell SAR-satellit. Den är delfinansierad av brittiska regeringen med 21 miljoner pund. Om pilotprojekt lyckas kommer de att bidra med ytterligare 150 miljoner pund för att finansiera en SAR-konstellation. I utbyte erhåller regeringen 15 % nyttjanderätt [4.33, 4.34]. Den låga kostnaden möjliggörs till en mindre del genom användningen av COTS-produkter. Den stora kostnadsbesparingen kommer från användning av effektförstärkare byggda med galliumnitrid, GaN, som kan leverera mer effekt än tidigare använda halvledarmaterial. Detta betyder att antennen med bibehållen uteffekt kan konstrueras med färre element, vilket drar ner kostnaderna [4.35]. Satelliten är också utformad kring SSTLs optiska jordobservationsplattform, vilket gör den relativt liten (under 400 kg). Detta gör det möjligt att skjuta upp satelliten tillsammans med andra satelliter i en så kallad *shared launch*, vilket ytterligare drar ned kostnaderna.

5 Nya möjligheter

I detta kapitel ges några exempel på olika nya möjligheter som kan ge bättre prestanda hos avbildande radarsatelliter.

5.1 Nya regleringar från ITU

Airbus Defence and Space försöker få ITU att besluta om nya regler som bland annat möjliggör för att på X-band sända med större bandbredd än vad som nu är tillåtet [5.1]. Om ITU genomför en sådan förändring kommer Airbus att i deras kommande satellit TerraSAR-NG [5.2] att sända med en bandbredd på 1.2 GHz. Det innebär en teoretisk avståndsupplösning på 13 cm, vilket motsvarande omkring 20 cm i markkoordinater. Airbus anger dock en upplösning på 25 cm och anledningen till att en sämre upplösning uppges är troligen för att med marginal klara specifikationen. Den nya större bandbredden gör troligt att en ny antenn är under utveckling för detta system. Rimligtvis kommer den klara samma upplösning i vinkel (azimut) som i avstånd. Med en upplösning på under 30 cm, ökar möjligheterna för automatisk måligenkänning av markmål.

5.2 Framtida små satelliter

Utveckling av små satelliter sker i flera länder, bland annat i Sydostasien. Indonesien, Japan och Malaysia har gemensamt arbetat med projektet LAPAN-CHIBA microsatellite, eller ibland kallat CP-SAR. Projektets uppgift är miljö- och naturkatastrofövervakning med hjälp av höghöjds-UAV-SAR-system. Samtidigt anpassas SAR-systemet för att kunna användas på en mikrosatellit. Predikerad vikt på satelliten är ca 95 kg [5.3, 5.4].

Vidare utvecklar japanska rymdorganisationen JAXA en satellit på under 100 kg och med en storlek under $0.7 \times 0.7 \times 0.7 \text{ m}^3$, när antennerna är hopfällda, vilket gör att satelliten ska passa in som *piggy-back* [5.5], dvs. inte vara den primära nyttolast vid en uppskjutning. Det var tänkt att den satelliten skulle vara *piggy-back* vid uppskjutningen av ALOS-3 2017. Dock är ALOS-3 försenad och det är okänt när uppskjutning kan bli av.

Även i Taiwan pågår arbete med att utveckla små SAR-satelliter, både på C- och X-band, med syftet att övervaka naturkatastrofer [5.6, 5.7]. Dessa kommer dock inte att klassas som mikrosatelliter, då deras vikt troligen kommer att överstiga 100 kg.

Även i Sydafrika finns ett program med små satelliter för, som de skriver, Sydafrikas säkerhets- och strategiska vy [5.8]. I detta program, som täcker ett 20 års perspektiv, kommer även små SAR-satelliter ingå.

5.3 Lätta reflektorer

Ett viktigt steg i utveckling av små SAR-satelliter är att öka storleken på reflektorn. Ju större reflektor hos antennen, desto lägre effekt behöver en radar sända med på ett givet avstånd. En fördubbling av en reflektors yta, gör att kravet på utsänd effekt minskar med en faktor 4. Inom detta område pågår just nu mycket forskning, bland annat är NASA aktiva. Ett intressant koncept som NASA försöker ta fram är att konstruera en väldigt liten men uppblåsbar reflektor. Prototypen är hopvikbar för att passa in i en *cubesat*, dvs. en miniatyriserad satellit byggd av kubiska enheter med måtten $10 \times 10 \times 11.35 \text{ cm}$. Principen, som redan testats på flygplan, innebär att ett pulver sublimeras och därmed spänner ut reflektorn. En antennvinst på 34 dB har uppmätts på X-band. Dock finns svårigheter då reflektorn ofta får veck som leder till kraftigt försämrad förmåga [5.9, 5.10]. Om dessa problem kan övervinnas så öppnar det möjligheten till att använda SAR-teknik på satelliter med liten storlek. Dock är det en utmaning att utveckla en SAR-*cubesat*, med tanke på att det därutöver krävs såväl omborddator, sändare och tillräckligt med solpaneler för att få en SAR-satellit operativ.

5.4 Multistatiska system: GEO-SAR system

De banor som SAR-satelliter använder idag är uteslutande av LEO-typ (se Kapitel 3). Flera publikationer har under senaste åren pekat på möjligheten med SAR-system i geosynkron bana, betecknat GEO-SAR. Det skulle kunna handla om att man har en uppsättning av SAR-system som agerar monostatiska på dessa stora avstånd från belysta markområden, men kan även handla om att kombinera satelliter i GEO-bana med en stor mängd passiva SAR-satelliter i LEO-bana som endast registrerar den återspridda signalen, dvs. en bistatisk konfiguration.

NASAs projekt *Global Earth Satellite System* (GESS) presenterade i en rapport från 2003 ett förslag på ett system bestående av upp till tio SAR-satelliter på geosynkron bana med 60° inklinationsvinkel och ge en global täckning på väldigt kort tid [5.11]. Satelliterna skulle generera interferometriska SAR-bilder för att kunna följa rörelser i jordskorpan och bättre kunna varna när en jordbävning kan vara nära förestående. Kostnaden för de tio GEO-SAR satelliterna skulle ligga på omkring åtta till tio miljarder dollar. Den höga kostnaden är troligen anledningen till att det inte finns något sådant operativt system projekt idag.

Flera ytterligare studier har gjorts på området, bland en där en konstellation, eller en svärm, av ett flertal minisatelliter ligger i geosynkron bana [5.12]. Samtliga satelliter sänder och mottar reflexen av pulsen från övriga satelliter. Detta är en typ av MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) GEO-SAR. I och med att alla satelliters skickade pulser tas emot av samtliga satelliter och att det kombinerade data används för att skapa en SAR-bild, så kan både en stor vinst i upplösning och signaleffekt fås. Att skapa en sådan bild på L-band skulle dock ta ca 40 minuter, men med en *revisit-time* på 40 minuter. Man kan alltså kontinuerligt avbilda samma område på marken. Att det tar 40 minuter att göra en SAR-bild ger dock uppenbara problem då det kräver att de objekt eller strukturer som man vill avbilda ska vara stationära över den tiden. Allt som rör sig kommer att defokuseras och smetas ut över SAR-bilden. Att avbilda havsytor kommer alltså inte vara möjligt med svärskonceptet. Kontinuerlig övervakning till havs, vad gäller större fartyg vars rörelse är väldigt stabilt, kan dock inte uteslutas. En djupare studie har analyserat effekterna av atmosfären för olika våglängder och hur detta påverkar bland annat SAR-processningen [5.13].

Det kan påpekas att akronymen GEO-SAR inte ska blandas samman med GeoSAR, vilket är ett flygburet SAR-system utvecklat av JPL som idag opereras av det nederländska företaget Fugro.

6 Sammanfattning

Avbildande rymdbaserade radarsystem använder SAR-teknik. Det finns en motsättning mellan hög upplösning, t ex spotlight SAR, och stor täckning, t ex ScanSAR. Utveckling av mer avancerade SAR-metoder pågår, i vissa fall ännu bara för flygburna system men de kan komma att överföras till satelliter. Exempel på mer avancerade tekniker inkluderar polarimetrisk SAR, interferometrisk SAR och multistatisk SAR.

I den SQL-databas som skapats på FOI har 29 aktiva avbildande radarsatelliter hittats. Samtliga identifierade SAR-system befinner sig i LEO-banor. Radarsatelliter i geosynkron bana finns än så länge bara på idéstadiet. Både solsynkrona och icke-solsynkrona banor förekommer. I det senare fallet krävs andra kraftkällor än solpaneler då stora delar av banan befinner sig i mörker, vilket kan skapa bekymmer för en effektkrävande radar. En solsynkron bana innebär att satelliten alltid passerar över samma lokala tid ± 12 timmar för varje given latitud.

Om övervakning av en specifik plats önskas med en hög repetitionstakt, krävs flera radarsatelliter. Ett exempel på en konfiguration som ger god täckning av stora delar av jorden är de tre amerikanska TOPAZ-satelliterna. Var och en av satelliterna har en tvådagars repeterbarhet men då de har något skilda banparametrar fås ändå en god täckning.

Gränsen mellan militär och civil användning är i viss mening diffus, då ett antal system förekommer som utformats och kan opereras för *dual-use* där vissa moder endast kan utnyttjas för militära tillämpningar. Ett exempel är den italienska konstellationen COSMO-SkyMed med fyra satelliter i omloppsbana. Renodlat militära, egenutvecklade radarsatelliter har sänts upp av Israel, Japan, Kina, Ryssland, Tyskland och USA. Tillgång till SAR-satelliter för militärt bruk sprids till andra länder genom försäljningar, i dagsläget är Indien och Sydafrika exempel på detta.

Den högsta bildupplösningen som idag erbjuds från civila system ligger på någon eller några få meter, vilket uppfyller minimikraven för många militära tillämpningar. Militära system har högre upplösning, förmodligen ner mot decimeternivå. Majoriteten av de militära satelliterna opererar på X-band (8-12 GHz). Andra frekvenser som används av idag existerande SAR-satelliter är L-, S- och C-band. Bland rent civila system är utnyttjandet av lägre frekvenser vanligare. Regleringar av frekvensanvändning ger bandbredds begränsningar. Förändringar av dessa regler skulle kunna ge radarsystem med större bandbredd och därmed högre upplösning.

De trender som kan skönjas handlar till en del om fortsatta kostnadsminskningar. Ett exempel på ett sådant projekt är brittiska NovaSAR-S, som bland annat utnyttjar utvecklingen inom GaN-teknik. Andra länder driver också projekt för små, lätta, och därmed billigare satelliter. Om samma prestanda kan behållas när radarsatelliterna minskar i storlek och kostnad är tveksamt. Beroende på användningsområde kan något lägre prestanda vara godtagbart om fler satelliter, och därmed bättre täckning i tid och rum, är önskvärt, eller om snabb produktion och uppskjutning är av stor vikt. En teknik som kan nyttiggöras på mindre satelliter är lätta reflektorer. Uppblåsbara reflektorer kan möjliggöra SAR-teknik på små satelliter.

Utvecklingen inom rymdbaserad radaravbildning pågår alltså inom flera områden. FOI bör följa utvecklingen för att kunna bedöma hot, men även analysera om och hur Sverige kan få tillgång till radaravbildning. Till hotbilden hör att kunna prediktera när i tid och rum ett område kan avbildas från rymden med SAR. Likaså hur målsignaturer hos egna objekt ser ut på olika radarband för typiska avbildningsgeometrier från rymden och hur dessa kan reduceras genom signaturanpassningsåtgärder eller ett förändrat taktiskt uppträdande. Genom kontakter med Airbus Defence and Space har FOI nyligen fått formulera ett experiment med satelliterna TerraSAR-X och TanDEM-X [6.1]. Utvärdering av mätdata från detta experiment ger en god förståelse för de två systemens förmågor och begränsningar.

7 Referenser

1. Inledning

[1.1] Gustavsson, A., "Radarsatelliter – En översikt anno 2016", FOI-R--4313--SE, 2016.

2. Radaravbildning

[2.1] Mittermayer, J., Wollstadt, S., Prats-Iraola, P., Scheiber, R., "The TerraSAR-X staring spotlight mode concept," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.52, no.6, pp.3695-3706, 2014.

[2.2] Krieger, G., Younis, M., Gebert, N., Huber, S., Bordoni, F., Patyuchenko, A., Moreira, A., "Advanced concepts for high-resolution wide-swath SAR imaging", Proceedings of 8th European conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), 2010.

[2.3] Airbus Space and Defence, <http://www.geo-airbusds.com/worlddem/>

[2.4] Ulander, L. M. H., Frörlind, P.-O., Gustavsson, A., Ragnarsson, R., Stenström, G., "VHF/UHF bistatic and passive SAR ground imaging," Proceedings of 2015 IEEE Radar Conference (RadarCon), pp.0669-0673, 2015.

[2.5] Lee, J.-S. och Pottier, E., "Polarimetric radar imaging", CRC Press, Boca Raton, 2009.

[2.6] Neumann, M., Saatchi, S.S., Ulander, L. M. H., Fransson, J. E., S., "Assessing Performance of L- and P-Band Polarimetric Interferometric SAR Data in Estimating Boreal Forest Above-Ground Biomass," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.50, no.3, pp.714-726, 2012.

[2.7] Touzi, R., Hurley, J., Vachon, P.W., "Optimization of the Degree of Polarization for Enhanced Ship Detection Using Polarimetric RADARSAT-2," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.53, no.10, pp.5403-5424, 2015.

[2.8] Runge, H., Suchandt, S., Kotenkov, A., Palubinskas, G., Steinbrecher, U., Weihing, D., "Traffic monitoring with TerraSAR-X," Proceedings of 3rd TS-X Science Team Meeting, 2008.

[2.9] International Telecommunication Union, Recommendation ITU-R RS.577-7. Frequency bands and required bandwidths used for spaceborne active sensors operating in the Earth exploration satellite (active) and space research (active) services, 2009. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/rs/R-REC-RS.577-7-200902-I!!PDF-E.pdf

[2.10] Report for mission selection: Biomass, ESA SP-1324/1 (3 volume series), European Space Agency, 2012. http://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/SP1324-1_BIOMASSr.pdf

3. Lämpliga radarsatellitbanor

[3.1] Jonathan's Space page, <http://www.planet4589.org/space/>

[3.2] CalSky, <http://www.calsky.com>

[3.3] Montenbruck, O. och Gill, E., Satellite Orbits Models, Methods and Application, Springer, 2012.

[3.4] Wertz, J. R., Spacecraft Attitude Determination and Control, Springer, 1978.

4. System i omvärlden

[4.1] Gustavsson, A., Brusmark, B., Nelander, A., Ottersten, H., "SAR activities at FOA," Proceedings of Radarcon 90, First Australian Radar Conference, pp.103-110, 1990.

[4.2] Jordan, R.L., "The Seasat-A synthetic aperture radar system," IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol.OE-5, no.2, pp.154-164, 1980.

- [4.3] Källén, E., "Surface effects of vertically propagating gravity waves in a stratified fluid," *Journal of Fluid Mechanics*, vol.182, pp.111-125, 1987.
- [4.4] Praydo, S.H., Huneycutt, B., Holt, B.M., Held, D.N., *Seasat synthetic-aperture radar data user's manual*, JPL Publication 82-90, 1983.
- [4.5] <http://southport.jpl.nasa.gov/scienceapps/sira.html>.
- [4.6] Jordan, R.L., Huneycutt, B.L., Werner, M., "The SIR-C/X-SAR synthetic aperture radar system," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 4, pp.829-839, 1995.
- [4.7] Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., Alsdorf, D., "The shuttle radar topography mission," *Reviews of Geophysics*, vol.45, no.2, 33 pages, 2007.
- [4.8] <http://spendergast.blogspot.se/2015/06/nigeria-signs-deal-for-synthetic.html>
- [4.9] <http://spendergast.blogspot.se/2014/12/ghana-to-launch-its-first-satellite-by.html>
- [4.10] <https://blog.urthecast.com/updates/urthecast-announces-worlds-first-commercial-sar-and-optical-16-satellite-constellation/>
- [4.11] <http://www.xpresssar.com>
- [4.12] National Reconnaissance Office, <http://www.nro.gov/foia/declass/QUILL.html>
- [4.13] Federation of American Scientists, <http://fas.org/spp/military/program/imint/lacrosse.htm>
- [4.14] Encyclopedia Astronautica, <http://www.astronautix.com/craft/usa.htm>
- [4.15] Verba, V. S., Neronskiy, L. B., Osipov, I. G., "Russain spaceborne imaging radar: scientific and technical achievements and priority perspectives of development", *Proc. XXVIIIth General Assembly of International Union of Radio Science (URSI)*, 2005.
- [4.16] Russian Space Web, <http://www.russianspaceweb.com/kondor.html>
- [4.17] GlobalSecurity.org, <http://www.globalsecurity.org/space/world/china/radar.htm>
- [4.18] Earth Observation Portal, <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/sar-lupe>
- [4.19] e-GEOS, <http://www.e-geos.it/products/cosmo.html>
- [4.20] Naftaly, U. och Levy-Nathansohn, R., "Overview of the TECSAR satellite hardware and mosaic mode," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 5, no. 3, pp. 423-426, 2008.
- [4.21] Naftaly, U., Oron, O., "TECSAR – Program status," *Proceedings of EUSAR 2014, 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, pp.1247-1250, 2014.
- [4.22] Celestial Observer, <https://www.calsky.com>
- [4.23] Annual Report 2013. OHB System AG, https://www.ohb-system.de/tl_files/system/pdf/OHB_GB_13_E.pdf
- [4.24] OHB System AG, <https://www.ohb-system.de/press-releases-details/ohb-system-ag-awarded-contract-for-the-development-and-integration-of-the-sarah-radar-satellite-reconnaissance-system-for-the-ge.html>
- [4.25] Army-technology.com, <http://www.army-technology.com/projects/multinational-space-based-imaging-system-musis-europe/>
- [4.26] NASAspaceflight.com, <http://www.nasa.gov/news/2012/04/live-ula-delta-iv-launch-nrol-25-military-satellite-vafb/>

- [4.27] Spaceflight101.com, <http://spaceflight101.com/spacecraft/liana-electronic-intelligence-program/>
- [4.28] Earth Observation Portal, <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/h/hj-1>
- [4.29] SpaceNews.com, <http://spacenews.com/japan-launches-spare-igs-radar-recon-satellite-on-h-2a/>
- [4.30] The Nuclear Threat Initiative, <http://www.nti.org/analysis/articles/japans-space-law-revision/>
- [4.31] Surrey Satellite Technologies, <http://www.sstl.co.uk/Divisions/Earth-Observation-Science/EO-Constellations>
- [4.32] Bird, R., Whittaker, P., Stern, B. Angli, N., Cohen, M., Guida, R., "NovaSAR-S: A Low Cost Approach to SAR Applications", Proceedings of 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), p. 84 – 87, 2013.
- [4.33] Surrey Satellite Technologies, <http://www.sstl.co.uk/Press/Government-investment-brings-low-cost-radar-satell>
- [4.34] UK Space Agency, <https://www.gov.uk/government/case-studies/novasar>
- [4.35] Aviation Week, <http://aviationweek.com/paris-air-show-2015/new-british-satellite-puts-sar-reach-0>

5. *Nya möjligheter*

- [5.1] International Telecommunication Union, Resolution 651 (WRC-12). Possible extension of the current worldwide allocation to the Earth exploration-satellite (active) service in the frequency band 9300-9900 MHz by up to 600 MHz within the frequency bands 8700-9300 MHz and/or 9900-10500 MHz, 2012. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/0c/0a/R0C0A00000A0020PDFE.pdf
- [5.2] Janoth, J., Gantert, S., Schrage, T., Kaptein, A., "From TerraSAR-X towards TerraSAR Next Generation," Proceedings of 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), pp.1-4, 2014.
- [5.3] Sumantyo, J.T.S., "Progress on development of synthetic aperture radar onboard UAV and microsatellite," Proceedings of 2014 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), pp.1081-1084, 2014.
- [5.4] Sumantyo, J.T.S., Chet, K.V., Triharjanto, R.H., "Development of circularly polarized Synthetic Aperture Radar onboard unmanned aerial vehicle," Proceedings of 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), pp. 2301-2304, 2013.
- [5.5] Saito, H., Tomiki, A., Akbar, P.R., Ohtani, T., Nishijo, K., Hirokawa, J., Ando, M., "Synthetic aperture radar compatible with 100kg class piggy-back satellite," Proceedings of 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), pp.88-91, 2013.
- [5.6] Yaung, J. Y.-C., Chung, S.-J., Lee, Y.-J., Tarn, I.-Y., Wu, B.-H., Chang, C.-L., Chang, H.-C., Yu, S.-J., "A Low Cost C-band SAR Small Satellite Definition for Disasters Management," Proceedings of 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), pp.1-4, 2014.
- [5.7] Yaung, J. Y.-C., Shie, Mi.-H., Tarn, I.-Y., Wu, B.-H., Chang, C.-L., Chen, C.-R., Yu, S.-H., Tong, P.-Y., Yu, S.-J., Chu, C., "An X-band SAR satellite payload design with low cost approach for disasters management," Proceedings of 5th IEEE Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), pp.174-177, 2015.
- [5.8] Steyn, W.H., van Zyl, R., Inggs, M., Cilliers, P.J., "Current and future small satellite projects in South Africa," Proceedings of 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), pp. 1294-1297, 2013.

[5.9] Babuscia, A., Choi, T., Lee, C., Kar-Ming C., "Inflatable antennas and arrays for interplanetary communication using CubeSats and smallsats," Proceedings of 2015 IEEE Aerospace Conference, pp.1-9, 2015.

[5.10] NASA FISO Presentation: Inflatable Antenna for CubeSats,
<http://spaceref.com/missions-and-programs/nasa/nasa-fiso-presentation-inflatable-antenna-for-cubesats.html>

[5.11] Jet Propulsion Laboratory, 'Global Earthquake Satellite System'.
http://www.solidearth.jpl.nasa.gov/GESS/3123_GESS_Rep_2003.pdf

[5.12] Monti Guarnieri, A., Broquetas, A., Recchia, A., Rocca, F., Ruiz-Rodon, J., "Advanced Radar Geosynchronous Observation System: ARGOS," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol.12, no.7, pp.1406-1410, 2015.

[5.13] Hobbs, S., Mitchell, C., Forte, B., Holley, R., Snapir, B., Whittaker, P., "System Design for Geosynchronous Synthetic Aperture Radar Missions," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.52, no.12, pp.7750-7763, 2014.

6. *Diskussion*

[6.1] Sjögren, T. och Vu, V., "Detection of slow and fast moving targets using hybrid CD-DMTF SAR GMTI mode", *Proceedings of 2015 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, 2015.

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se