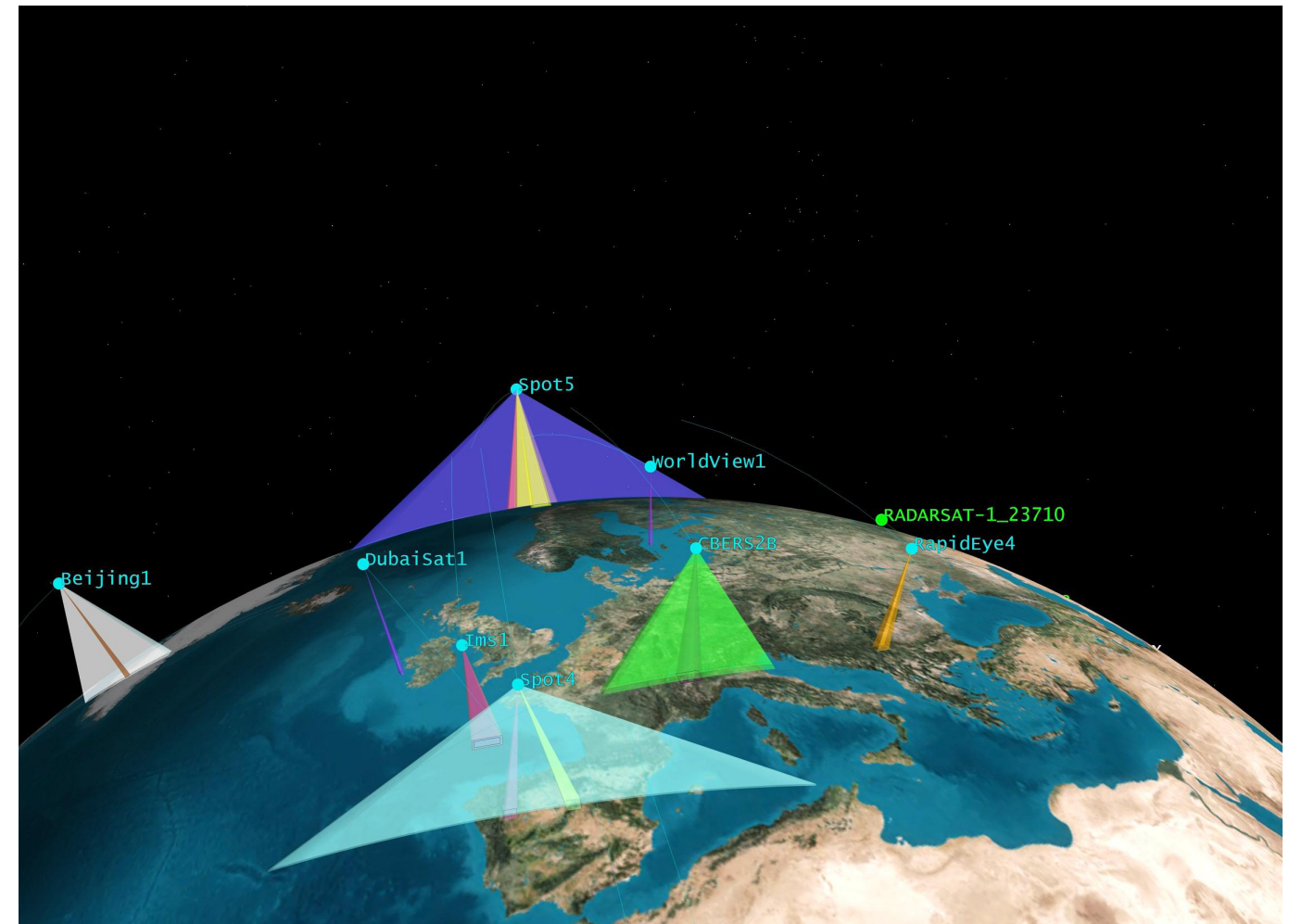


DANIEL FARIA, CHRISTER ANDERSSON OCH EVA BERNHARDSDOTTER



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Förvarsdepartementet. 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.

Daniel Faria, Christer Andersson
och Eva Bernhardsdotter

Svensk militär rymdlägesförmåga

Titel	Svensk militär rymlägesförmåga
Title	Recognised Space Picture
Rapportnr/Report no	FOI- R--3548--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2012
Antal sidor/Pages	46 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Försvarsmakten
FoT område	Sensorer och Signaturanpassning
Projektnr/Project no	E20687
Godkänd av/Approved by	Torgny Carlsson
Ansvarig avdelning	Försvars- och säkerhetssystem

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

Inom ramen för FoT-projektet MilRymd genomför FOI studier av och kompetensuppbyggnad inom området rymdlägesbild. I denna rapport avrapporteras arbetet som har utförts under 2012 där FOI har undersökt förutsättningarna för en svensk militär rymdlägesbild eller en så kallad *Recognised Space Picture* (RSP). Bakgrunden till studien är att såväl antalet rymdaktörer som mångfalden av rymdobjekt ökar, vilket medför att det har blivit allt viktigare med en relevant, aktuell och gemensam lägesbild av rymddomänen. Begreppet militär rymdlägesbild innebär, till skillnad från den civila motsvarigheten, att också informationen om en satellits uppbyggnad och uppgift inhämtas förutom kunskapen om dess uppträdande i rymden.

I rapporten beskrivs konceptet militär rymdlägesbild och hur en sådan förmåga kan komma Försvarsmakten tillgodo. Vidare ges en första skiss på arkitekturen för en svensk RSP-funktion utifrån olika ambitionsnivåer och tänkbara samarbeten. Den föreslagna arkitekturen beaktar det faktum att RSP-arbetet bör bedrivas i internationell miljö samtidigt som de integritetskritiska delarna ska skyddas av säkerhetsskäl. Slutligen ges en översikt av de anläggningar som skulle kunna utgöra en del av en svensk infrastruktur för rymdlägesbild. Resultatet från inventeringen av de svenska anläggningarna indikerar att det finns möjligheter för svenska forskare att bedriva experimentell verksamhet för att bygga upp en kompetens för baninmätningar. I rapportens två bilagor finns också en matematisk introduktion till hur inmätningar av rymdobjekt för att bestämma deras omloppsbanor kan genomföras med hjälp av optiska teleskop.

Sammanfattningsvis görs bedömningen att det finns goda förutsättningar för att bygga upp en svensk förmåga för militär rymdlägesbild och att arbetet därför bör fortsätta inom ramen för FoT-programmet.

Nyckelord: militär rymdlägesbild, SSA, RSP, rymdobjekt, baninmätning, teleskop, Gauss metod

Summary

As part of the Swedish Defence R&E programme, FOI is acquiring a competence within space situational awareness. The purpose of this report is to highlight the efforts to investigate the possibilities for a Swedish *Recognised Space Picture* (RSP) capability. The report describes the concept of RSP and how it may be applicable to the Swedish Armed Forces. The architecture of a possible Swedish RSP-capability is delineated, given different levels of ambition and potential international collaboration. Two basic elements of a potential RSP capability are presented, namely Gauss' theoretical method for orbit determination of space objects and an inventory of national facilities that may be useful for the experimental aspects of the capability.

Based on the conclusion that there are viable resources and possibilities for a national RSP-capability, the efforts will be continued.

Keywords: space situational awareness, recognised space picture, SSA, RSP, space object, orbit determination, telescope, Gauss' method

Förkortningar

AFRL	Air Force Research Laboratory
CCD	Charged Coupled Device
COTS	Commercial Off The Shelf
DEC	Deklination
EDA	European Defence Agency
EISCAT	European Incoherent SCATter
ESA	European Space Agency
EUSC	European Union Satellite Centre
EXA	Ecuadorian Civil Space Agency
GNSS	Global Navigation Satellite System
IMINT	IMagery INTelligence
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NEO	Near Earth Object
ODB	Object Data Base
PPP	Public Private Partnership
RA	Rektascension
R&E	Research & Engineering
RSP	Recognised Space Picture
SAAF	Svensk Amatör Astronomisk Förening
SAR	Syntetisk AperturRadar
SIGINT	SIGnals INTelligence
SSA	Space Situational Awareness
SST	Space Surveillance and Tracking
SWE	Space WEather
TLE	Two Line Element

Innehållsförteckning

1	Inledning	8
1.1	Syftet med arbetet.....	8
1.2	Arbetsmetod.....	8
1.3	Utformning.....	8
2	Beskrivning av militär rymdlägesbild	10
2.1	Rymdlägesbild och rymdövervakning	10
2.1.1	Militär rymdlägesbild och <i>Recognised Space Picture</i>	10
2.2	Behov av en militär rymdlägesbild	12
2.2.1	Grundläggande syfte.....	12
2.2.2	Informationsöverläge	12
2.2.3	Internationell trend	15
3	Svenska förutsättningar	16
3.1	En svensk militär rymdlägesbild.....	16
3.1.1	Grundläggande delar	16
3.1.2	Indata och analysförmåga	16
3.2	Utvecklingsförslag och ambitionsnivåer.....	18
3.2.1	Ambitionsnivåer	19
3.2.2	Förmågeeffekter.....	20
3.3	Struktur på en svensk RSP-funktion.....	20
3.3.1	Huvudsaklig inriktning	20
3.3.2	Grundläggande principer och sekretess	21
3.3.3	Tänkbar teknisk arkitektur och dataflöde	22
3.4	Inventering av några sensorresurser	24
3.4.1	Förutsättningar	24
3.4.2	Svenska akademiska anläggningar	24
3.4.3	Andra potentiella resurser.....	27
3.4.4	Sammanfattning	29
4	Slutsatser och rekommendationer	30
4.1	Slutsatser	30
4.2	Plan för arbetet framåt	30
	Bilaga 1 Introduktion till inmätning av satellitbanor	32
	Bilaga 2 Bestämning av banelement	41

1 Inledning

Hotbilden från rymden har förändrats på ett radikalt sätt under de senaste decennierna och det finns därför ett tilltagande behov av en förbättrad lägesbild av rymden. Detta behov förstärks ytterligare av att verksamheten i rymden med tiden har blivit alltmer komplex och mångfacetterad. Till exempel utgör den ökande mängden rymdskrot en allvarlig fara för all närvaro i rymden. Även en kollision med mycket små fragment kan få förödande konsekvenser för ett enskilt satellitsystem. Samtidigt innebär ett ökat beroende av rymdbaserade tjänster att naturliga störningar, som en följd av rymdväder, får allt större konsekvenser. Detta leder till ett behov av en gemensam, aktuell och relevant bild av situationen i rymden. En sådan gemensam rymdlägesbild brukar gå under benämningen *Space Situational Awareness* (SSA) och har diskuterats utförligt i tidigare FOI-rapporter.¹

Förutom övervakningen av de naturliga hoten från exempelvis rymdväder finns det även ett militärt behov av att kunna identifiera och karakterisera andra aktörers operativa satelliter. Detta är speciellt fallet när det gäller högteknologiska stater som har god förmåga att utnyttja egna rymdbaserade resurser som till exempel spaningssatelliter. Denna delmängd av SSA kallas militär rymdlägesbild, eller på engelska *Recognised Space Picture* (RSP), och är numera en förutsättning för att upprätthålla ett informationsöverläge.

En svensk RSP-förmåga skulle öka vår kunskap om de aktörer och satelliter som har möjlighet att övervaka svenska intressen från rymddomänen. En kunskap som ger oss möjligheten att agera proaktivt för att sätta in motåtgärder. Exempel på svenska förhållanden som är intressanta för andra aktörer att bevaka med rymdförmågor är våra truppers ageranden i utlandsmissioner, ytlägen av våra ubåtar och vår utprovning av ny teknisk materiel i fält.

1.1 Syftet med arbetet

Det främsta syftet med FOI:s arbete inom ramen för FoT-projektet MilRymd 2012 är att påbörja en grundläggande kompetensuppbyggnad kring militär rymdlägesbild för Försvarsmakten. Arbetet tar sin utgångspunkt i frågeställningen: Vad är möjligt, och vad skulle krävas för att bygga upp en svensk oberoende RSP-förmåga?

Ett annat viktigt syfte med arbetet är att börja delta i de nationella och internationella nätverk som finns på SSA-området. Dessa nätverk är ett nödvändigt komplement till FOI:s forskning för att kunna skapa en kapacitetsuppbyggnad i form av en svensk militär rymdlägesförmåga.

1.2 Arbetsmetod

Under arbetets gång har FOI genomfört en inventering av befintliga svenska anläggningar vilka kan tänkas vara potentiella element i en nationell rymdövervakningsförmåga. Vidare har en studie utförts rörande teoretiska metoder för att utföra baninmätningar och beräkna banelement för rymdobjekt. I arbetet har det också gjorts en enkel jämförelse av hur några andra länder har organiserat sina respektive nationella RSP-förmågor i syfte att skissa på en svensk liknande förmåga.

1.3 Utformning

I kapitel 2 förklaras bakgrunden till militär rymdlägesbild och behovet av denna typ av funktion. I följande kapitel 3 beskrivs förutsättningarna för en svensk RSP-förmåga samt

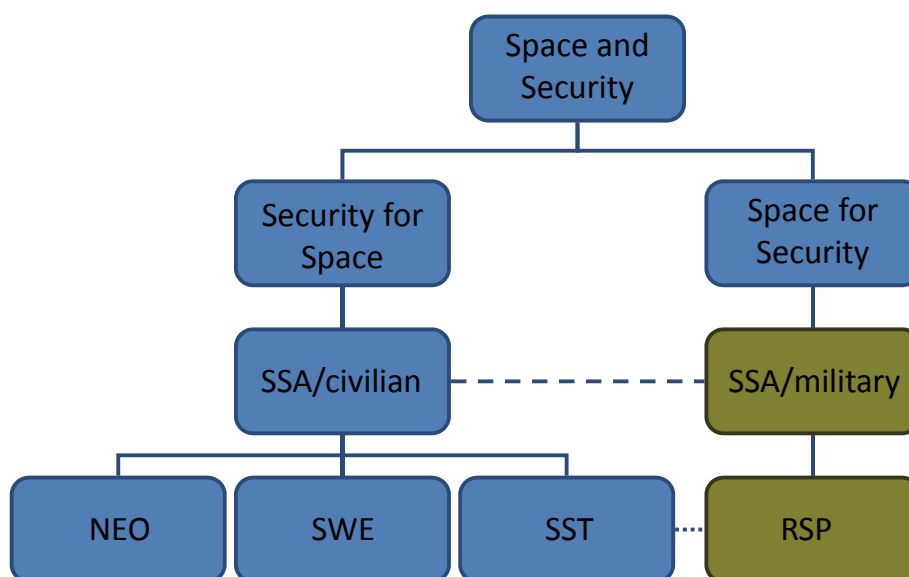
¹ Christer Andersson, Lisa Rosenqvist, Eva Bernhardsdotter och Maths Persson. *SSA-Behöver Sverige en rymdlägesbild?*, FOI-R--3087--SE. (Stockholm: Totalförsvarets forskningsinstitut, 2011).

hur den skulle kunna byggas upp. Slutligen i kapitel 4 presenteras slutsatser och förslag på framtida planer. I rapportens två bilagor ges en kort introduktion till principen för baninmätning av objekt i rymden, samt den matematiska bakgrunden. Baninmätning och bestämningen av rymdobjekts omloppsbanor utgör grunden för alla SSA-system.

2 Beskrivning av militär rymdlägesbild

2.1 Rymdlägesbild och rymdövervakning

Rymdlägesbild eller *Space Situational Awareness* (SSA) kan beskrivas som en gemensam lägesbild av rymddomänen. Rymdlägesbilden ger en uppdaterad överblick och uppfattning om situationen i rymddomänen samt av förekommande hot mot rymdinfrastrukturen. Exempel på dessa hot kan vara rymdskrot och intensivt rymdväder. Vad som normalt ingår i begreppet SSA varierar dock mellan olika aktörer, bland annat beroende på deras primära roll och om aktören är en civil eller en militär organisation. Se Figur 1 nedan. Begreppet rymdövervakning eller *Space Surveillance and Tracking* (SST) är en delmängd av SSA, och innebär att man spårar och följer föremål i deras omloppsbana runt jorden. Exempelvis för att kunna förvarna om potentiella kollisioner. Rymdväder eller *Space Weather* (SWE) innebär att man har kunskap om väderförhållandena i rymden vilka kan påverka satelliter och astronauter men som också kan ha en inverkan på till exempel elnät på jorden. En lägesbild av *Near Earth Objects* (NEO) innebär att man upptäcker och följer naturliga föremål såsom asteroider vars banor är sådana att de kan komma nära eller kollidera med jorden. De data som inhämtas och bearbetas inom ett SSA-system används sedan för att skapa en så korrekt lägesbild som möjligt som i sin tur används som underlag för preventiva åtgärder.



Figur 1 Schematisk struktur på de fyra förmågor som ingår i SSA så som det ofta beskrivs i den europeiska debatten. Fokus i denna rapport ligger på SST (*Space Surveillance and Tracking*) och RSP (*Recognised Space Picture*) som beskrivs i nästa kapitel 2.1.1

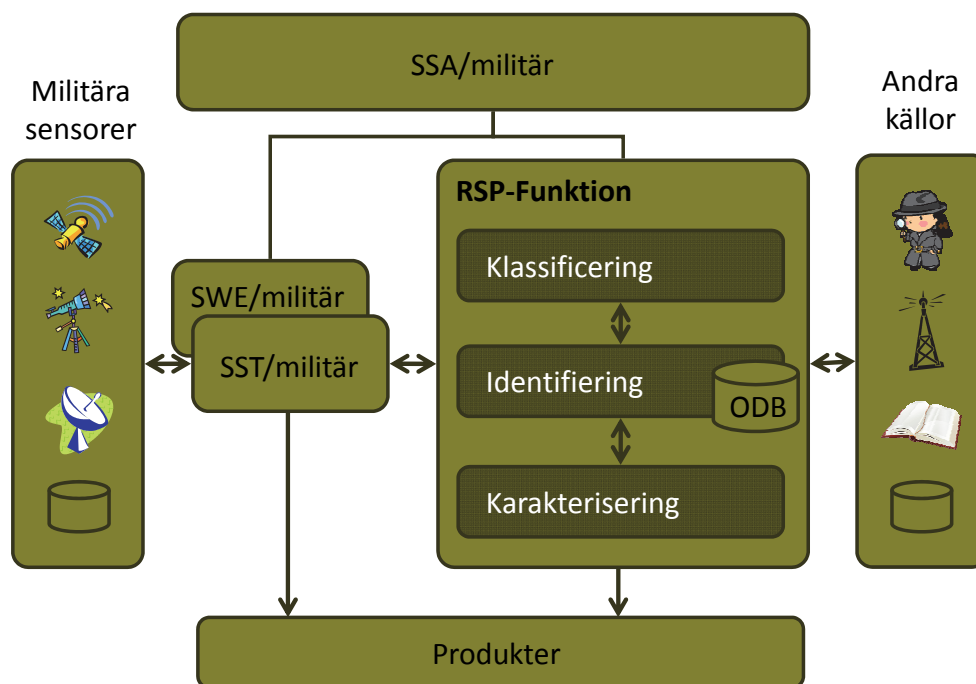
Rymdövervakning eller SST utförs framförallt med markbaserade radaranläggningar och optiska teleskop. Rymdbaserade sensorer används än så länge i begränsad utsträckning. Radarsystem har den fördelen att de kan användas under alla väderförhållanden, medan optiska system har längre räckvidd och används därför ofta för att övervaka det geostationära bältet.

2.1.1 Militär rymdlägesbild och *Recognised Space Picture*

Såväl statliga civila och militära som kommersiella rymdaktörer är idag beroende av att de rymdsystem och den infrastruktur som byggs upp i rymddomänen fungerar väl.

Spridningen av rymdteknologin har medfört att allt fler aktörer har tillgång till allt mer komplicerade rymdsystem och rymdtjänster. I och med att såväl antalet som mångfalden av rymdobjekt ökar så blir det också viktigt att kunna identifiera och karakterisera dessa objekt. *Recognised Space Picture* (RSP) är en militärt inriktad del av rymdlägesbilden med denna uppgift. RSP betraktas ofta som en utökad funktion av *Space Surveillance and Tracking* (SST). RSP-funktionen innebär att särskild information om rymdobjektets ”karaktär” inhämtas förutom att dess banelement beräknas. Beroende på typ och placering av de SSA-sensorer som används kan informationen om en främmande satellits struktur såsom storlek och utseende på dess satellitplattform, samt nyttolast i form av sensorer avgöras. Med kompletterande information om satellitens nationella eller organisatoriska tillhörighet samt typ av verksamhet kan hotbilden ytterligare klargöras. I detta avseende utgör RSP-delen en underrättelsefunktion i den militära rymdlägesbilden medan SST-delen ur militär synvinkel är att betrakta som en ledningsfunktion för rymdverksamheten.

I Figur 2 åskådliggörs de generiska delarna i en militär rymdlägesbild med inriktning på RSP. Figuren visar också vilka grundläggande bearbetningssteg som finns i en RSP-funktion samt förhållandet till SST-delen. I denna studie har det genomgående förutsatts att det svenska begreppet militär rymdlägesbild inkluderar såväl en SST- som en RSP-förmåga.



Figur 2 Generisk bild av en militär rymdlägesbild med inriktning på RSP. Skissen är en mer detaljerad beskrivning av boxen betecknad RSP i Figur 1 från föregående sida. De tre bearbetningsstegen är mer i detalj förklarade i kapitel 3.1.2 nedan.

Några viktiga produkter från en militär rymdlägesbild är förvarningar om kommande överflygningar av antagonistiska aktörer och förvarningar om medvetet skapade kollisioner mellan rymdobjekt. Produkterna kan också inkludera prognoser för rymdväder som kan påverka viktig infrastruktur i rymden, exempelvis satelliter för navigation och telekommunikation. Andra produkter är befarade återinträden av rymdobjekt som skulle kunna innebära en fara på jorden. Den viktigaste produkten är dock själva objektkatalogen (*Object Data Base*, ODB i Figur 2 ovan) som innehåller information om varje satellit inklusive dess banelement och funktion. Sammanfattningsvis brukar man säga att RSP-förmågan ger oss satelliters uppträdande, uppbyggnad och uppgift.

2.2 Behov av en militär rymdlägesbild

2.2.1 Grundläggande syfte

Modern krigföring utnyttjar i allt högre grad rymdtjänster. Svenska Försvarsmakten använder idag flera tjänster som utnyttjar rymdsystem speciellt som stöd och förstärkning för våra förbands förmågor. Dessa rymdtjänster brukar benämnas *Force Enhancement Services*. Satellitbaserade navigeringssystem (GNSS) är typexempel på sådana stödjande rymdtjänster och används av alla våra truppslag på land, till sjöss eller i luften. Beroendet av väl fungerande rymdtjänster ökar i sin tur kraven på åtgärder för att dels skydda egen infrastruktur i rymden, och dels kontrollera motståndarens satelliter och rymdverksamhet. Funktionerna hos en militär rymdlägesbild ger oss denna militärt specificerade förmåga - att både skydda och övervaka. Detta gör RSP-funktionen genom att ge oss rymdobjektens position, färdriktning och ”karaktär”.

Det grundläggande syftet med en militär rymdlägesbild är alltså att ge oss rymdobjektens:

- **Uppträdande**; en aktuell och detaljerad bild av var andras, och egna, satelliter befinner sig, samt eventuella förändringar i omloppsbanorna,
- **Uppbyggnad**; en relevant bild av rymdobjektens struktur i form av storlek och utseende på dess satellitplattform samt nyttolast i form av sensorer eller instrument, eller med andra ord satelliternas förmågor och kapacitet,
- **Uppgift**; en bedömning av hur motståndarens satelliter och rymdinfrastruktur används samt med vilken förmåga och för vilket syfte.

För Försvarsmakten skulle en militär rymdlägesbild vara ett instrument för övervakning och kontroll av rymden men också ett operativt beslutstöd. I Sveriges militärstrategiska doktrin slås det fast att en väl fungerande underrättelsetjänst och en gemensam lägesinformation är en förutsättning för att genomföra manöverkrigföring med högt tempo och stor initiativförmåga.² Ett informationsöverläge skapar en handlingsfrihet för den strategiska och operativa ledningen som kan vara avgörande för utfallet vid militära operationer. Internationellt beaktas den militära lägesinformationen hos totalt fyra operationsmiljöer samt inom informationsmiljön. En gemensam lägesinformation består således i detta fall av en: luftlägesbild, sjölägesbild, marklägesbild, IT-infrastruktur-lägesbild samt även en rymdlägesbild.

Idag är produktionen av luft- och sjölägesbild väl utvecklade funktioner i Sverige. Båda dessa operationsmiljöer bevakas av en omfattande infrastruktur av sensorer som täcker Sveriges yta och bevakar våra gränser. Förståelsen för att ha en väl utvecklad bevakning av informationsmiljön har ökat starkt de senaste åren. Den gemensamma lägesbilden av cyberdomänen produceras av driftscentraler och via IT-försvarsenheter som övervakar informationsnäten dygnet runt. Däremot finns idag inte någon produktion inom insatsorganisationen av en militärt specificerad rymdlägesbild eller en RSP-funktion.

I grunden är en militär rymdlägesbild ett verktyg för övervakningen av rymden och utgör som sådant ett operativt beslutsstöd. En nationell svensk rymdlägesbild skulle därför ge Försvarsmakten en möjlighet att upprätthålla ett informationsöverläge och samtidigt skapa förutsättningar för egen handlingsfrihet i enlighet med vår militärstrategiska doktrin.

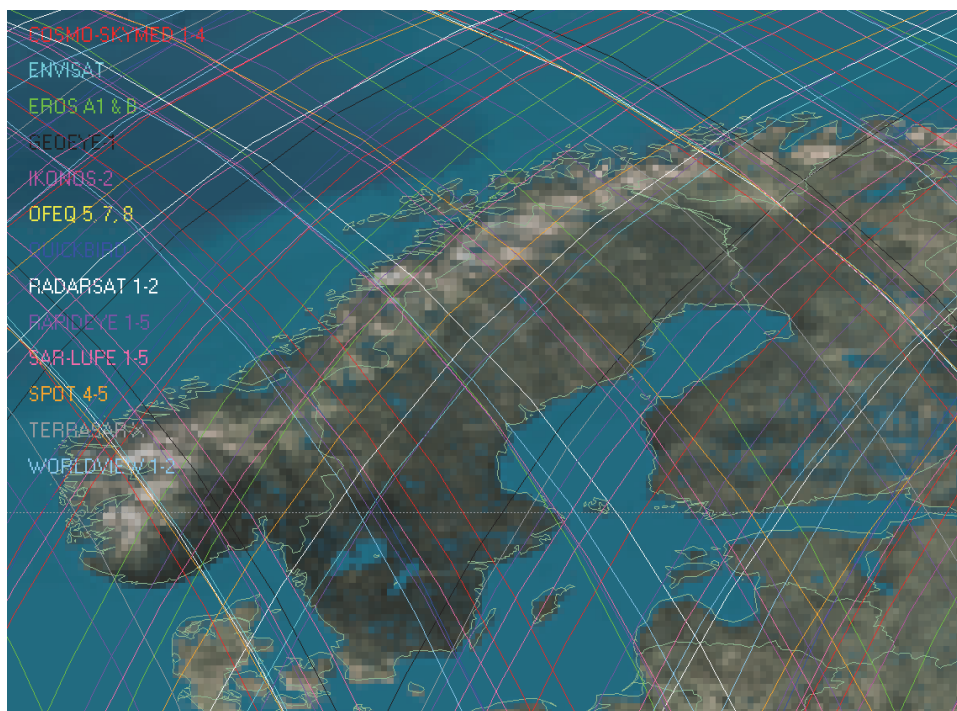
2.2.2 Informationsöverläge

Tillgången till en avancerad RSP-förmåga kan ge Försvarsmakten ett informationsöverläge genom att satelliters uppträdande blir möjliga att förutsäga. Om

² Militärstrategisk doktrin med doktrinära grunder (MSD 12), 2011, tex s. 126, ” 5.3.5. Manövertänkande”.

dessutom RSP-funktionen bidrar med satelliternas uppbyggnad genom kunskaper om deras sensorsystem kan motståndarens förmåga till underrättelseinhämtning från rymddomänen delvis bedömas. Genom denna kunskap om överflygningar av satelliter över svenskt territorium och svenska intressen kan Försvarmakten värdera och agera på förekommande hot.

Bildalstrande spaningssatelliter³ registrerar jordytan och levererar högupplösta bilder, optiska såväl som radarbilder, på exempelvis militära installationer, truppers förflyttningar, militära övningar eller teknisk utprovning av materiel.⁴ Likaså kan signalspaningssatelliter⁵ inhämta information om radio- och radaranvändningen i såväl internationella insatsområden som över svenskt territorium. Dagligen sker ett stort antal satellitpassager över svenskt territorium av dessa satelliter. Figur 3 nedan visar några bildalstrande satelliter som under ett dygn passerar Sverige samt deras banmönster på jordytan. Några av dessa satelliter har både civila och militära användare, så kallade *dual-use* satelliter, medan andra är rena underrättelsesatelliter. I figuren redovisas enbart satelliter som förekommer i öppna rymdobjektkataloger. Därutöver finns ett stort antal underrättelsesatelliter som är oredovisade i de publika registren.



Figur 3 Några satellitpassager över Sverige under ett dygn. Samtliga satelliter passerar i låg bana och har bildalstrande optiska eller radarsensorer. Bild: FOI.

I Tabell 1 nedan ges en kort beskrivning av de från Figur 3 redovisade satelliterna. Som synes är det en blandning av kommersiella, statliga och militära bildalstrande satelliter. Sensortechniken är baserad både på optik och radar, och upplösningen är så detaljerad som ner till en halv meter. Förkortningen PPP i tabellen står för *Public-Private-Partnership* och innebär att satelliterna är finansierade med en kombination av statligt och privat kapital. I de fall satellitens finansiering har noterats som "statlig" betyder det vanligen både en civil och militär statlig finansiering.

³ Också kallat IMINT-satelliter - IMagery INTelligence.

⁴ En detaljerad analys av olika överflygningsscenarier finns i Christer Andersson, Lisa Rosenqvist, Eva Bernhardsdotter och Maths Persson. *SSA-Behöver Sverige en rymdlägesbild?*, FOI-R--3087--SE. (Stockholm: Totalförsvarets forskningsinstitut, 2011).

⁵ Också kallat SIGINT-satelliter – SIGNals INTelligence.

Tabell 1 Några bildalstrande satelliter som passerar över Sverige. Ett mycket enkelt exempel på en "karaktärisering" av en satellitdatabas.

Satellitesystem	Sensorteknik	Upplösning (m)	Ägare	Finansiering
SAR-Lupe ⁶ 1-5	SAR ⁷	< 0.8	Tyskland	Militär
COSMO-SkyMed ⁸	SAR	< 1	Italian Space Agency/Ministries of Research and Defence (Italien)	Statlig
Helios-2	Optisk	< 1 (sannolikt)	Frankrike	Militär
TerraSAR-X ⁹	SAR	1	German Space Agency/Astrium (Tyskland)	PPP
RADARSAT-2 ¹⁰	SAR	3	MacDonald, Dettwiler and Associates /Canadian Space Agency (Kanada)	PPP
IKONOS ¹¹	Optisk	0.8	GeoEye (USA)	Kommersiell
RapidEye-5 ¹²	Optisk	5	RapidEye (Kanada)	Kommersiell
WorldView-2 ¹³	Optisk	0.5	DigitalGlobe (USA)	Kommersiell
Yaogan-serien ¹⁴	SAR/optisk	~ 1-3 (sannolikt)	People's Liberation Army (Kina)	Statlig

Trenden inom satellitbaserad spaning visar tydligt på ett närmande i upplösning mellan militära (uppskattat 10 cm) och kommersiella (40 cm) observationsförmågor. Detta gäller även för radarsatelliterna.¹⁵ Dessutom ökar antalet nationer/organisationer som skjuter upp och opererar *dual-use* satelliter där data säljs fritt på världsmarknaden. Därför kan även vissa kommersiella satelliter vara av värde att övervaka för en RSP-funktion.

⁶ http://www.swp-berlin.org/fileadmin/contents/products/fachpublikationen/SAR_Lupe_ks.pdf Kontrollerad 2012-10-31.

⁷ SAR – Syntetisk AperturRadar ger väderoberoende bildalstrande spaning.

⁸ L. Bianchi "COSMO-SkyMed program", Presentation på konferensen Military Satellites 2010 London, 12-13 juli 2010.

⁹ http://www.dlr.de/eo/en/desktopdefault.aspx/tabid-5725/9296_read-15979/ Kontrollerad 2012-10-31.

¹⁰ http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat2/inf_data.asp Kontrollerad 2012-10-31.

¹¹ <http://www.geoeeye.com/CorpSite/products/earth-imagery/geoeeye-satellites.aspx> Kontrollerad 2012-10-31.

¹² <http://www.mapmart.com/Products/SatelliteImagery/WorldView2.aspx> Kontrollerad 2012-10-31.

¹³ <http://www.digitalglobe.com/resources> Kontrollerad 2012-12-11.

¹⁴ Kina har skjutit upp en serie jordobservationssatelliter varav flera i inklinerade polära banor. Se UCS databas: http://www.ucsusa.org/nuclear_weapons_and_global_security/space_weapons/technical_issues/ucs-satellite-database.html Kontrollerad 2012-10-31.

¹⁵ Eva Bernhardsdotter. *Reserapport från konferensen Military Satellites 2010 i London, FOI Memo 3255*. (Stockholm: Totalförsvarets forskningsinstitut, 2010).

2.2.3 Internationell trend

USA, och i viss mån Ryssland, har idag en omfattande rymdövervakningsförmåga vilken tillåter en detaljerad rymdlägesbild och RSP-förmåga, se Figur 4. För Europas del är motsvarande förmåga idag under diskussion. *European Defence Agency* (EDA) fastslog i sin *Common Staff Target - SSA*¹⁶ att en gemensam europeisk rymdlägesbild även borde etablera en militärt specificerad förmåga. Funktionen föreslås leverera information om rymdobjekt ungefär som för den civila ESA-delen, och därtill även ha en förmåga som benämns *Imaging*. Denna del avses fokusera på identifiering och karakterisering av rymdobjekten, och rekommenderas ligga innanför en militär del av ett europeiskt SSA på grund av sekretessskäl. I och med det svenska deltagandet i ESA:s civila SSA-program har våra möjligheter att även få ta del av en eventuell europeisk militär RSP-utveckling ökat. De två dominerande nationerna i denna utveckling är Tyskland och Frankrike, men även Spanien har höga ambitioner motiverat av anläggningarna ESAC¹⁷ och EUSC i Madrid.

Sammanfattningsvis är tillgången till en militär rymdlägesbild ett viktigt verktyg för att skydda infrastruktur i rymden, men framför allt för att skydda svenska intressen från de hot som antagonistisk rymdverksamhet skapar. Sammantaget skulle en militär rymdlägesbild ge Försvarmakten en gemensam, aktuell och relevant bild av situationen i rymden eller med andra ord ett informationsöverblick.



Figur 4 Ett futuristiskt exempel på hur en ledningscentral för ett avancerat SSA-system skulle kunna se ut. Bilden visar en demonstration av en prototyp framtagen av Lockheed Martin för US Air Force tänkt att komplettera det existerande amerikanska Space Surveillance Network. Bild: Lockheed Martin.

¹⁶ ”CST Space Situational Awareness – SSA” godkändes av EDA:s Styrelse den 25 mars 2010.

¹⁷ http://www.esa.int/About_Us/ESAC/Space_Situational_Awareness_-_SSA European Space Astronomy Centre (ESAC) and SSA. Kontrollerad 2012-12-21.

3 Svenska förutsättningar

3.1 En svensk militär rymdlägesbild

3.1.1 Grundläggande delar

En svensk rymdlägesbild med inriktning mot militära behov måste bestå av tre grundläggande delar: indata, analysförmåga samt kunskap. Samtliga tre delar krävs oavsett ambitionsnivå eller andra krav på rymdlägesbilden. Varje enskild del är beroende av de övriga två delarna och är sammantaget lika viktiga för att åstadkomma de produkter och tjänster som är relevanta för att stärka Försvarmaktens förmåga på området. De tre delarna i en rymdlägesbild kan beskrivas enligt det följande:

- **Indata** om rymdobjekten med den noggrannhet och aktualitet som krävs för att producera resultat med relevans. Indata kan fås genom egen kapacitet för inmätning och/eller via internationell samverkan.
- **Analysförmåga** och bearbetningssystem med den kapacitet och funktionalitet som behövs för att proaktivt kunna analysera och skapa ett mervärde i form av information för den strategiska och operativa ledningen.
- **Vetenskaplig kunskapsbas** för att kunna förstå, hantera, bearbeta och analysera informationen på ett korrekt och effektivt sätt. En tillräckligt vetenskaplig höjd på kunskapen är också avgörande för att bli en intressant internationell samarbetspartner.

Det ska också poängteras att det bör råda en viss balans mellan de tre grundläggande delarna. I många sammanhang är det alltför lätt att enbart fokusera på de ”hårda” och konkreta delarna såsom optiska teleskop och andra sensorer, och samtidigt underskatta behovet av mer ”mjuka” kunskapsbaserade värden. Det är enkelt att upphandla ett datorsystem för till exempel *Collision Analysis* (CA) som ger imponerande resultat i form av färgglada tabeller, men det kan ta år att bygga upp erfarenheter för att på ett korrekt sätt utvärdera resultatet.

3.1.2 Indata och analysförmåga

3.1.2.1 SST-funktionen

En SST-funktion inhämtar huvudsakligen sin information från markbaserade inmätningssystem, men också från satellitbaserade sensorer. Oavsett var sensorerna är placerade används optiska teleskop i kombination med radar- och radiosystem. Det är antalet tillgängliga sensorer och deras precision i kombination med den globala spridning som i slutändan sätter gränsen för en SST-funktions kapacitet. Ett komplement till aktiv inmätning är att samarbeta med satellitoperatörerna genom att använda deras egna positionsangivelser från fungerande satelliter. Dessa banelement utgår vanligen från GPS-mätningar och är därför ofta av högre kvalitet än vad en aktiv inmätning kan ge. Detta förutsätter naturligtvis ett väl organiserat och framförallt förtroendefullt samarbete.

I samtliga ambitionsnivåer beskrivna nedan gäller för svenskt vidkommande att våra eventuella egna inmätningssystem enbart är en del i ett större globalt sensorsystem med allierade nationer och internationella organisationer. Detta gäller även för stormakternas sensorsystem.

3.1.2.2 RSP-funktionen

Både radar och optiska teleskop kan beroende på upplösning även ge viss information om satelliternas plattformstruktur samt nyttolaster, och kan därmed avslöja dess troliga syfte.

Om avbildningen kombineras med annan kompletterande information, såsom banförändringar, kan exempelvis spaningssatelliters agerande mot svenskt territorium kartläggas ytterligare med en RSP-funktion. Om dessutom tekniska underrättelser inhämtas om satelliternas utformning i kombination med signalunderrättelser mot dess radio- och radar-system kan deras sensortäckning och teoretiska markspår simuleras. För radarbaserade spaningssatelliter kan både en faktisk inmätning och teoretisk simulering göras. För optiska och andra icke-emitterande system kan ett bedömt markspår simuleras.

En RSP-förmåga kräver också avancerad kunskap om hur inmätta data ska bearbetas och analyseras. Tillgången till externa och publika objektskataloger ger Försvarmakten grundläggande information om positionen för ”öppna” satelliter vid givna tidpunkter samt en initial förmåga till prediktionsanalyser. Genom att komplettera denna information med egen inmätning kan den publika kataloginformationen dessutom verifieras, valideras och kvalitetssäkras. Det innebär att den egna nationella objektkatalogen blir allt bättre över tiden. Via förfinade simuleringsmetoder av satelliterna i deras banor, och genom bättre rymdmiljömodeller, ökar också vår förmåga till allt mer exakta prediktionsanalyser av satelliternas uppträdande.

Med hjälp av denna typ av bearbetningar och andra analyser kan Försvarmakten öka förståelsen för exempelvis vilka satelliter, tider och positioner som är mest gynnsamma för inhämtning av svensk skyddsvärd verksamhet och andra nationella intressen. Hotbilden blir därmed hanterbar och motåtgärder kan vidtas.

Karakteriseringen

Den bearbetning och de analyser som beskrivits ovan för att få ytterligare information om ”intressanta” satelliter förutom deras banelement brukar kallas ”karakterisering”.

Karakteriseringen ger oss en samlad bild av satelliters uppträdande, uppbyggnad samt uppgift. I princip sker karakteriseringen av ett rymdobjekt i följande fyra steg:

- **Detektering och baninmätning** av ett objekt i bana. Exempelvis enligt metodiken såsom den beskrivs i Bilaga 1 och 2. Detta sker i SST-delen och inkluderar vanligen en beräkning av banans framtida utveckling, en så kallad perturbationsanalys.
- **Klassificering** av objektet. Detta steg bedömer om objektet är en satellit, en större infrastruktur (t.ex. ISS), ett kvarlämnat slutsteg eller någon annan obestämd rymdskrotsbit. En första gallring sker av objekt som har nationstillhörighet - vilket även gäller rymdskrot.
- **Identifiering** av objektet. I detta steg avgörs om objektet är nytt eller om det finns upptaget i objektskatalogen. Om objektet kan matchas till ett existerande objekt med hjälp av information i katalogen ansätts detta namn/ID på objektet samtidigt som katalogen uppdateras med ny information.
- **Karakterisering** av objektet. Detta analyssteg sker både genom att jämföra med agerandet hos kända objekt/banelement i katalogen, och genom teknisk analys i kombination med kompletterande underrättelser. Ofta är karakteriseringen begränsad till ett fåtal ”intressanta” satelliter. Detta steg sker i en separat och säker miljö inom RSP-funktionen.

FOI har under de senaste åren genomfört ett antal enklare demonstrationer som visar hur banomloppsanalyser och satellitsimuleringar kan användas som ett verktyg för att skapa en nationell förmåga avseende militär rymdlägesbild.¹⁸ Två exempel på förmågor som provats är överflygningsanalyser, samt möjligheten att upptäcka satelliter och andra rymdobjekt från satellitbaserade sensorer. Dessa prov och FOI:s investering i

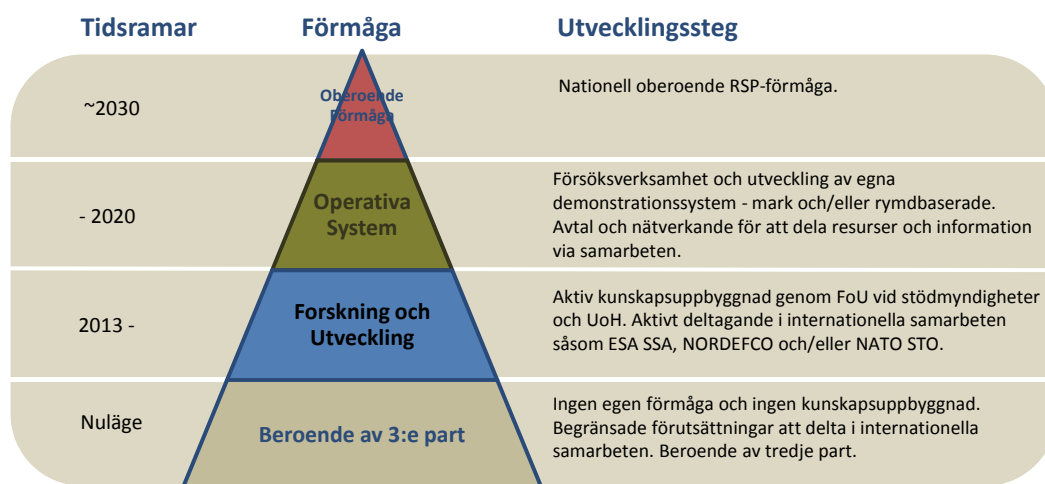
¹⁸ Lisa Rosenqvist. *Satellite ToolKit – rymdlägesbild och andra tillämpningar*, FOI MEMO 4173. (Stockholm: Totalförsvarets Forskningsinstitut 2012).

mjukvaruresurser för liknande och andra analyser kan ses som ett första steg för att skapa en kunskapsbas och en grundläggande analyskapacitet på området.

3.2 Utvecklingsförslag och ambitionsnivåer

Mot bakgrund av internationella erfarenheter och studier¹⁹, samt baserat på FOI:s kunskapsuppbyggnad från prov och demonstrationer, har ett konceptuellt förslag tagits fram för hur en svensk förmåga till militär rymdlägesbild skulle kunna utvecklas. I Figur 5 nedan ges en sammanställning av detta förslag. Förslaget utgår från att förmågan ska utvecklas i två steg utgående från dagens läge. Utvecklingen förutsätter ett initialt kunskapslyft i form av en riktad FoU-satsning (blå box), och därefter en uppbyggnad av egen operativ provverksamhet (grön box). Det senare steget förutsätter ett aktivt deltagande i internationella SSA-sammanhang i form av avtal eller andra överenskommelser för att få tillgång till relevanta objektkataloger. En helt oberoende nationell RSP-förmåga, troligen med inriktning mot viss underrättelseinformation (röd triangel), skulle därefter också kunna byggas upp men har i dagsläget ansetts orealistiskt kostsam.

FOI har uppskattat att förmågan till en militär rymdlägesbild med en begränsad RSP-funktion kan uppnås på ca 5 - 10 år beroende på ambitionsnivå. Tidsuppskattningen hos denna kapacitetsuppbyggnad är därtill starkt kopplad till den internationella utvecklingen, och inte minst till hur ESA:s SSA-program fortskrider.²⁰ Det ska betonas att de olika ”byggstenarna” i konceptförslaget bör genomföras i den ordning som beskrivs i Figur 5 nedan. Det vill säga kunskapsuppbyggnad före operativ verksamhet och internationell samverkan före en eventuell egen oberoende förmåga. Däremot kan respektive utvecklingssteg genomföras med olika ambitionsnivåer och med olika ekonomiska ramar. Detta utvecklas vidare i den kommande beskrivningen.



Figur 5 Konceptuell sammanställning av hur en svensk förmåga för RSP skulle kunna utvecklas i två steg utifrån dagens läge.

¹⁹ Personlig diskussion med personal på EUSC som genomfört en omfattande implementeringsstudie kallad ”SPA – Support to Precursor SSA Services”.

²⁰ Vid ESA:s ministerrådsmöte 21-22 november, 2012, tog Sverige beslutet att delta i ESA:s fortsatta SSA-program. Detta beslut togs med ett finansiellt stöd från Försvarsmakten och MSB.

3.2.1 Ambitionsnivåer

I följande text beskrivs tre ambitionsnivåer för en svensk förmåga till militär rymdlägesbild, med andra ord en RSP-funktion. Ambitionsnivåerna är baserade på ovanstående koncept med två utvecklingssteg och har en stor spännvidd avseende förmåga, resurser och kostnader. Den stora spännvidden i ambitionerna avspeglar i viss mån den osäkerhet som rymddomänen i Sverige befinner sig i. Det vill säga oavsett i vilken riktning de svenska militära satsningarna i rymddomänen utvecklas, kommer någon av de tre ambitionsnivåerna bli lämplig att utreda vidare. De redovisade ambitionsnivåerna innehåller samtliga de tre grundläggande delarna i en militär rymdlägesbild: indata, analysförmåga och kunskap – om än i starkt varierande omfattning. Ambitionsnivåerna har lagts inom en ram för vad en mindre rymdnation som Sverige realistiskt sett kan anses ha behov av.

3.2.1.1 Låg ambitionsnivå

På denna ambitionsnivå följer och deltar försvarsmyndigheterna aktivt i det internationella arbetet runt SSA. Det innebär att vi deltar i EDA:s diskussioner om RSP och kanske i den ”strukturerade dialogen” inom ramen för ESA:s *Users Representative Group*. Ett sådant deltagande underlättas betydligt nu när Sverige medverkar i de olika faserna av ESA:s SSA-program via Rymdstyrelsen. Ett aktivt deltagande i den pågående europeiska debatten kräver att en viss kunskapsbas om rymdlägesbild byggs upp hos Försvarsmakten och dess stödmyndigheter. Grundläggande kunskaper och vissa begränsade praktiska färdigheter för att kunna operera en minimal men elementär förmåga för rymdlägesbild skulle då behöva byggas upp. Som indata till denna förmåga nyttjas tillgänglig och öppen information.

Sverige har på denna nivå en viss beredskap på rymdlägesområdet.

3.2.1.2 Ambitionsnivå medel

Förutom aktiviteterna i den lägsta ambitionsnivån kan försvarsmyndigheterna eller andra relevanta myndigheter starta bi- eller multilaterala förhandlingar med USA och ESA/EDA för att långsiktigt tillförsäkra Sverige bästa tänkbara kvalitet på SSA-informationen. Hög kvalitet och aktualitet på data krävs för att utföra mer avancerade analyser. För att tillgodogöra sig dessa data krävs det att Försvarsmakten och framför allt FOI etablerar vetenskaplig kompetens, kunskaper och praktiska färdigheter för att utvärdera och hantera informationen. För att Sverige som nation ska kunna nyttja denna information krävs det att en grundläggande förmåga med vissa operativa analysfunktioner byggs upp inom ramen för en begränsad RSP-funktion. Funktionaliteten byggs upp genom att kombinera inköp av COTS med viss prioriterad egenproducerad mjukvara.

Sverige har därmed en förmåga på rymdlägesområdet som motsvarar vår plats som högteknologisk rymdnation.

3.2.1.3 Hög ambitionsnivå

I tillägg till aktiviteterna på medelnivå etablerar Sverige och Försvarsmakten på hög ambitionsnivå ett väl utvecklat internationellt samarbete på SSA-området exempelvis inom ramen för ett nationellt deltagande inom globala säkerhetsprogram på SSA-området. Här kan Sverige bidra med exempelvis inhämtningen av kvalitetssäkrade data till den gemensamma katalogen. Sverige utnyttjar vårt läge i norr, och använder på ett effektivt sätt synergier mellan civil och militär infrastruktur. Detta kan ske via egna eller nordiska resurser. Samtidigt och parallellt bygger Sverige upp en egen delvis oberoende analyskapacitet för rymdlägesbild med full RSP-kapacitet. Det innebär uppbyggnaden av en objektkatalog under nationell kontroll och med egen oberoende information över objekten i rymden. Här krävs tillgång till nationella resurser i form av markbaserade och/eller rymdbaserade system som kan övervaka objekten i rymden, samt avancerade resurser som kan producera och underhålla informationen om rymdobjekten i katalogen.

Sverige är i och med den högre nivån en viktig spelare i rymdfrågor generellt och SSA-frågor speciellt och tillhör kärnan av nationer på den europeiska arenan.

3.2.2 Förmågeeffekter

Ambitionsnivån ”**Låg**” innebär att Försvarsmyndigheterna deltar i det internationella arbetet runt SSA, till exempel i ESA:s användargrupper. Därtill har Sverige byggt upp grundläggande kunskaper och färdigheter för att operera en elementär rymdlägesbild med indata från öppna källor. Ambitionsnivån innebär att Sverige får förmågan att inhämta och ta emot, värdera och till del förädla rymdlägesinformation för att på så sätt skydda svenska fasta markmål mot viss satellitbaserad informationsinhämtning. Vad gäller omvärldsbevakningen har Försvarsmakten på denna nivå möjlighet att följa och värdera teknikområdet.

Ambitionsnivån ”**Medel**” innebär att Sverige förhandlar med internationella partners för att få en användbar och relevant kvalitet på rymdlägesinformationen. Dessutom har Försvarsmyndigheterna byggt upp en aktiv och grundläggande förmåga med operativa analysfunktioner för rymdlägesbild via inköp kombinerat med egen utveckling av mjukvara. Ambitionen innebär att Sverige får full förmåga att ta egna oberoende beslut för att skydda känslig militär verksamhet och strategisk infrastruktur på marken samt i rymden med hjälp av en utbyggd SST-funktion. Försvarsmakten får även viss förmåga till informationsinhämtning gentemot motståndare som använder satellitbaserade resurser. Försvarsmaktens handlingsfrihet ökar substantiellt.

Ambitionsnivån ”**Hög**” innebär att Sverige och Försvarsmakten har väl utvecklade samarbeten och bidrar aktivt till det internationella arbetet inom hela SSA-området i form av inmätning, klassificering och identifiering av objekt till den gemensamma katalogen. Samtidigt har Sverige en egen oberoende och avancerad analyskapacitet för rymdlägesbild med en objektkatalog under svensk kontroll via nationella resurser i form av markbaserade och/eller rymdbaserade system. Ambitionen innebär att Sverige får full förmåga att bevaka och analysera rymdbaserad verksamhet, händelser och hot - såväl civila som militära med hjälp av en avancerad RSP-funktion. Försvarsmakten får även förmågan att övervaka andra nationers förhållanden och kapacitet på rymdområdet samt en utökad kapacitet att bedöma framtida utveckling på området.

3.3 Struktur på en svensk RSP-funktion

Följande kapitel ska ses som ett sätt att starta en diskussion runt en tänkbar svensk RSP-funktion. Kapitlet ska inte läsas som ett fastlagt förslag, utan mer som en skissartad redovisning av idéer och viktiga principer. Utvecklingen av en svensk RSP-funktion är starkt länkat till både ambitionsnivå och i vilken grad Sverige avser att delta i olika internationella samarbeten. Det är därför vanskligt, och rent av kontraproduktivt, att redan i detta läge fastställa en detaljerad teknisk arkitektur.

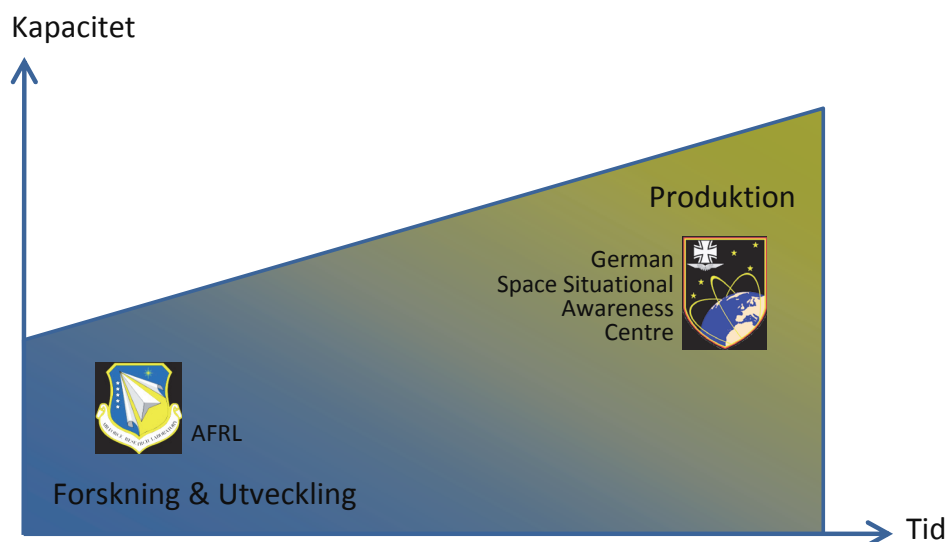
3.3.1 Huvudsaklig inriktning

Ett sätt att se på RSP-funktionen är som en produktionsenhet där indata flödar in till en enhet som sorterar, organiserar och analyserar informationen för att producera ett antal väl definierade underrättelseprodukter som kontinuerligt levereras till definierade mottagare. En av dessa produkter skulle kunna bestå av tabeller eller enkla varningar när det i tid är olämpligt att till exempel genomföra känsliga prov och försök öppet i fält. En annan produkt skulle kunna vara tid och plats för nedslaget av en större satellit som kan innehålla farligt material. Den tyska *German Space Situational Awareness Centre* är till del uppbyggd enligt detta koncept med en stark produktinriktning.

Ett annat sätt att se på RSP-funktionen är att definiera funktionen som en bredare teknisk och kunskapsmässig försvarsmaktsresurs som kan användas på uppdragsbasis för

underrättelseuppgifter, expertstöd, studie- och utbildningsuppdrag eller som ett forskningsorgan. Arbetet kommer då att bedrivas som samarbeten i dialogform med uppdragsgivarna. Utvecklingen för rymdlägesbild på *US Air Force Research Lab (AFRL)* genomförs delvis enligt detta arbetssätt med en hög grad av internationell samverkan och med FoU-satsningar av mycket hög kvalitet.

En blandning av de två strukturerna bedöms som en lämplig ansats för den svenska RSP-funktionen. En blandning som enligt konceptförslaget ovan i kapitel 3.2 börjar med en dominerande FoU-del för att senare alltmer överförs till produktion enligt illustrationen i Figur 6 nedan.



Figur 6 Illustration av hur RSP-funktionen kan utvecklas över tid från ett fokus på forskning och utveckling för att senare övergå mot allt mer produktion.

3.3.2 Grundläggande principer och sekretess

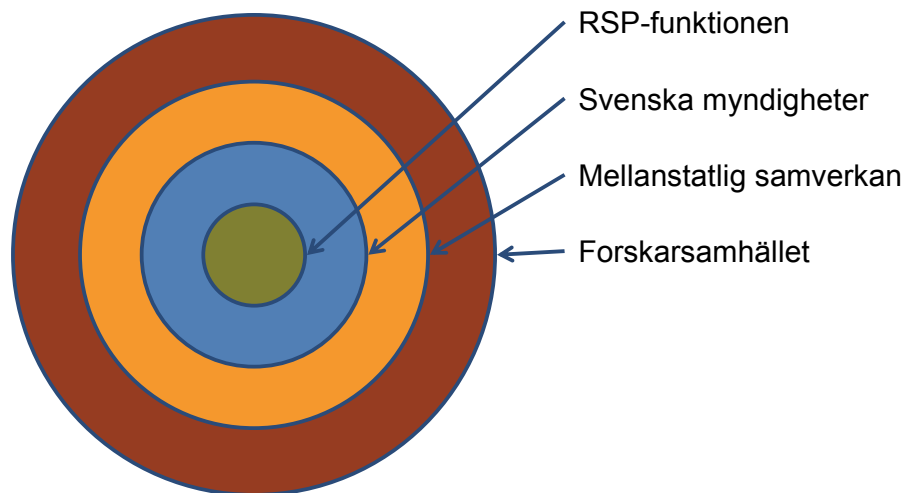
Oavsett ambitionsnivå kommer en svensk RSP-funktion att ha ett behov av många gränssnitt som har antytts tidigare. Dessa gränssnitt kommer att innehålla fysiska ”kopplingar” bestående av datautbyten inklusive delade objektkataloger, men också organisatoriska ”kopplingar” i form av avtal och överenskommelse med såväl externa forskningsorgan som olika nationella försvarsorganisationer. RSP-funktionen kommer troligen också att innehålla såväl egen utrustning som externa instrument i form av rymdinfrastrukturer, markbaserade sensorer, datorer och databaser. Förutom den fysiska infrastrukturen kommer funktionen även att inrymma mer mjuka värden i form av egenutvecklade programvaror samt kunskap om SSA-processer och specifika forskningsområden som celest mekanik.

Arkitekturen för hur denna infrastruktur och kunskapsmassa bäst ska hanteras bör utgå från några grundläggande principer för internationellt SSA-arbete:

- RSP-funktionens arkitektur ska utgå ifrån att SSA-arbetet genomförs i en mellanstatlig till internationell miljö med väl integrerade datasystem. Delar av denna miljö kommer att i Europa ske inom ramen för ESA och eventuellt lämpliga EU-organ.
- En europeisk datapolicy bestående av en kompromiss av olika nationella säkerhetskrav kombinerat med överstatliga direktiv via EU-Kommissionen kommer sannolikt att ligga till grund för samarbetet.

- Även tredjepartssamverkan, av typen amatörastronomer, kan komma att få access med speciella avtal till det internationella SSA-systemet.

Av säkerhetsskäl innebär detta att strukturen för den militära rymdlägesbilden bör bestå av flera separata men samverkande ”skal”, och att integritetskritiska delar av den egna oberoende nationella RSP-funktionen bör vara en fysiskt sett helt avskild del. Figur 7 nedan ger en principskiss för detta tankesätt.

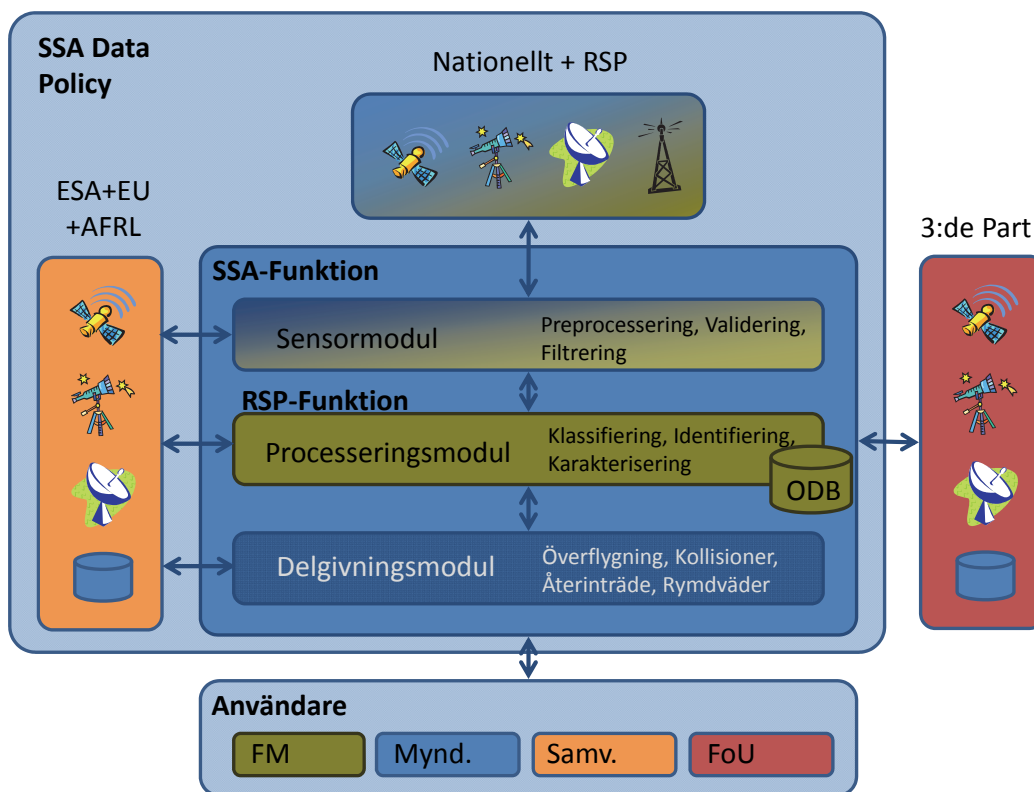


Figur 7 Principskiss på hur samverkan och hantering av data i en nationell RSP-funktion kan byggas ur sekretessynpunkt.

3.3.3 Tänkbar teknisk arkitektur och dataflöde

En svensk nationell RSP-funktion bör till att börja med utformas så att redan tillgängliga och användbara resurser kan nyttjas i form av ett så kallat ”system av system”. Exempelvis skulle redan existerande astronomisk infrastruktur hos svenska universitet och högskolor kunna användas. Inventeringen av dessa sensorer redovisas därför i nästa kapitel 3.4.

Utformningen av själva RSP-funktionen bör, förutom de säkerhetsinriktade delarna, bestå av ett antal bearbetnings- och processeringsmoduler som tillsammans skapar ett informations- och dataflöde som resulterar i ett antal produkter. Dessa moduler är i sin tur integrerade med, eller samverkar med, externa sensorer och objektkataloger. I de fall säkerhetskraven kan tillgodoses är vissa moduler direkt ”kopplade” till motsvarande RSP-funktion hos exempelvis några andra medlemsländer i EU. Inte minst utbytet av informationen mellan de olika nationella objektkatalogerna är en avgörande fråga som måste kunna hanteras säkert.



Figur 8 En tänkbar teknisk arkitektur för hur dataflödet i en svensk RSP-funktion skulle kunna utformas och "kopplas" mot andra SSA-system samt systemets kunder.²¹

Baserat på bland annat det utredningsarbete som *EU Satellite Centre* (EUSC) har genomfört²² kan man förutse att SST- och RSP-funktionen behöver delas in i minst tre moduler integrerade enligt Figur 8 ovan. Den första modulen – Sensormodulen – är det direkta gränssnittet mot egna och "godkända" sensorer till exempel inom ramen för ESA:s utvecklingsarbete. Modulen kontrollerar, sorterar, filtrerar, validerar och lagrar indata så att den fortsatta bearbetningen blir effektiv.

I nästa modul – Processeringsmodulen – som är kärnan i RSP-funktionen sker de viktiga beräkningarna från sensor till banelement som beskrivits i tidigare kapitel. I denna modul sker också en klassificering, identifiering och eventuellt en karakterisering av rymdobjekten. I de diskussioner som har förts i EDA och inom EU-rådets säkerhets-kommitté har det föreslagits att alla nya okända objekt som detekteras ska förbli klassade som *Restricted* tills deras tillhörighet har konstaterats. Av detta skäl och på grund av att den nationella objektkatalogen (ODB) hanteras i denna modul föreslås denna del av arkitekturen få högst säkerhetsklass.

Slutligen i nästa modul – Delgivningsmodulen – sker produktionen av de produkter, och underrättelserapporter, som kan tas fram utifrån den aktuella och uppdaterade objektkatalogen i förra modulen.

²¹ Delar av arkitekturen som redovisas i detta kapitel har diskuterats med personal från EUSC.

²² EUSC har genomfört en studie inom ramen för FP7 projektet som kallas *SPA – Support to Precursor SSA Services*.

3.4 Inventering av några sensorresurser

3.4.1 Förutsättningar

Nedan följer en inventering av några sensorresurser som eventuellt skulle kunna nyttjas som element i uppbyggnaden av en svensk SSA-förmåga. Inventeringen baseras i huvudsak på de teleskop i anläggningar som idag är kopplade till svenska universitet och högskolor. Anläggningarna skulle framför allt kunna användas för forskningsarbeten och de prov och försök som behöver göras inför uppbyggnaden av en svensk RSP-kompetens.

Utgångspunkten för inventeringen är den centrala frågeställningen: Kan denna anläggning nyttjas för att få fram banparametrar för objekt i omloppsbana? Till detta har ett antal relevanta delfrågor ställts till kontaktpersonerna för anläggningarna. Frågorna har besvarats i olika grad.

Tekniska förutsättningar

- Är det möjligt att följa och ta digitala bilder av ett rymdobjekt i bana av typen rymdskrot och satelliter? Vilka möjligheter finns för mobil visavi stationär positionering?
- Vad skulle det krävas för extra utrustning i form av digitala kameror, motordrift, mjukvara, etc för att nyttja anläggningen?

Organisatoriska förutsättningar

- Finns det någon möjlighet för FOI att nyttja anläggningen utanför den nominella teleskoptiden?
- Hur skulle ett forskningssamarbete med FOI kunna se ut finansiellt, och finns det begränsningar för att samarbeta med en försvarsmyndighet?

3.4.2 Svenska akademiska anläggningar

3.4.2.1 Onsala rymdobservatorium, Chalmers

Onsala rymdobservatorium är den dominerande svenska anläggningen för radioastronomi och drivs av Institutionen för rymd- och geovetenskap på Chalmers tekniska högskola. I anläggningen ingår flera radioteleskop vilka används för radioastronomisk och geovetenskaplig forskning på uppdrag av Vetenskapsrådet.²³

Möjligen skulle radioteleskopen kunna användas för att spåra satelliter och andra aktiva objekt i omloppsbana om teleskopen utrustades med rätt typ av mottagare. Dock finns ett antal begränsningar. Radioteleskopen kräver exempelvis en någorlunda god positionsbestämning redan från början av inmätningen på grund av dess smala ”synfält”. Radioteleskopen kan dessutom inte följa objekt på himlen som ligger i alltför låga banor då teleskopet inte hinner följa objektets höga vinkelhastighet. Det bör observeras att radioteleskop enbart används för passiva observationer genom att ta emot den strålning som objekten emitterar, exempelvis en bärvåg från en satellit. Med andra ord kan objekt som inte utsänder radiovågor, såsom rymdskrot, inte följas.

Förutsatt att det finns ett finansiellt driftstöd och utrymme i tid för annan verksamhet än radioastronomi så finns det i princip inte något som hindrar att teleskoptiden används för till exempel SSA.

²³ <http://www.chalmers.se/rss/oso-sv> Kontrollerad 2012-10-19.

3.4.2.2 Westerlundteleskopet, Uppsala

Westerlundteleskopet vid Uppsala universitet är ett optiskt teleskop som används främst i utbildningssyfte men även för olika forskningsprojekt. Teleskopet har en så kallad Cassegrainreflektor, ca 350-950 nm med nuvarande kamera. Rent tidsmässigt är teleskopet idag använt i ganska liten omfattning.

Teleskopet kan ur teknisk synvinkel följa objekt i bana och hålla hastigheten med nuvarande motorer. Rörliga objekt, relativt stjärnorna, kan följas med en konstant hastighet i rektascension och deklination. Dock är inte själva styrprogramvaran anpassad för denna typ av hastigheter eller för att göra de nödvändiga hastighetskorrektioner som krävs för att följa objekten i sin bana. Stabiliteten i synfältet vid sådana hastigheter är också en osäker faktor. Teleskopets positionsenkodrar ger absoluta koordinater och bör därför inte vara något problem. När det gäller storleken på de rymdobjekt som skulle kunna observeras kan man räkna med att på exponeringstider runt en minut se objekt mellan 17:e och 18:e magnituden. Att ta flera bilder med teleskopet i en stationär position innebär en del utmaningar då utläsningshastigheten och exponeringstiden inte är anpassade för SSA-behovet och skulle kräva en snabb kamera och mjukvarusimuleringar. Tyvärr förfogar inte Uppsala universitet över sådan utrustning.

Uppsala universitet har viss erfarenhet av att följa satelliter med teleskopet. Tidigare har exempelvis teleskopet följt ESA-satelliten Rosetta. Satellit rörelsen relativt stjärnorna lades in vid en viss tidpunkt och fotograferades under en kort stund. Detta återupprepades efter en stund då man hade repositionerat teleskopet efter kända banelement.

Ett minimikrav för att kunna använda Westerlundteleskopet är alltså en anpassad kamera och ett nytt styrprogram. Huruvida det fungerar rent organisatoriskt är ej ännu utrett. Grundprincipen för forskningen på anläggningen är dock att insamlat material skall vara tillgängligt för alla som frågar i vetenskapligt syfte och så länge som teleskopet och observatören anges som källa.

3.4.2.3 Alba Nova-teleskopet, Stockholm

Institutionen för astronomi vid Stockholms universitet och Institutionen för tillämpad fysik vid Kungliga tekniska högskolan förfogar över ett teleskop i AlbaNovas kupol. Teleskopet är ett av Sveriges största optiska teleskop och har en spegeldiameter på ca en meter och en brännvidd på elva meter.

Dess primära astronomiska användningsområde är utveckling och utprovning av instrument och kamerautrustning. På grund av placeringen i Stockholms innerstad, med ogynnsamma ljusförhållanden, används teleskopet däremot inte av institutionens forskare i någon större utsträckning för observationer av astronomiska forskningsobjekt.

För närvarande är teleskopet utrustat med en digital CCD-kamera som skulle kunna användas för att avbilda och mäta in satelliter. Liksom andra typiska astronomiska teleskop har Alba Nova-teleskopet ett relativt litet synfält vilket får anses vara den största begränsningen i SSA-sammanhang.

På samma sätt som Westerlundteleskopet är det möjligt att följa objekt som rör sig relativt stjärnorna, men det är i dagsläget oklart med vilken hastighet detta kan göras, det vill säga om samtliga typer av satellitbanor kan följas.

Samantaget är bedömningen att Alba Nova-teleskopet inte har några signifikanta tekniska begränsningar som förhindrar att det används för kompetensupbyggnad inom ramen för SSA och RSP. Organisatoriska och praktiska frågor är dock inte utredda.

3.4.2.4 Institutionen för astronomi, Lund

Vid Lunds universitet bedrivs omfattande forskning riktad mot observationell astronomi. För närvarande saknar dock institutionen såväl infrastruktur som personal för att kunna bidra inom SSA-området. Institutionen förfogar över ett par mindre

undervisningsteleskop²⁴ som används i begränsad omfattning för visuella observationer. På universitetet finns kompetens som skulle kunna bearbeta digitala CCD-bilder. Teleskopen är emellertid inte utrustade med digitala kameror vilket gör dem olämpliga för observationer av satelliter.

Den sammantagna bedömningen är att det i dag inte finns förutsättningar för Lunds Universitet att bidra inom SSA-området.

3.4.2.5 EISCAT, IRF, Kiruna

EISCAT (*European Incoherent SCATter*)²⁵ är ett radarsystem i norra Skandinavien vilket används för att studera interaktionen mellan solen och jorden. Radarsystemet ägs av en internationell forskningsorganisation i vilken Norge, Sverige, Finland, Japan, Kina, Storbritannien och Tyskland ingår. EISCAT har redan ingått i försök som drivits inom ramen för ESAs *SSA Preparatory programme* med syftet att se hur väl europeiska anläggningar kan samarbeta för rymdövervakning.²⁶ Under försöken följdes utvalda kandidatsatelliter i bana.

Rymdobjekt i omloppsbana, som exempelvis rymdskrot, kan idag tydligt ses i radarstrålen. Objekten ses dock med relativt låg upplösning om en halv grads noggrannhet i synvinkeln och med en precision på någon km. EISCAT ger sammanfattningsvis snarare statistik på förekomsten av objektet i omloppsbanan än en uppskattning av deras banelement.

EISCAT-3D (E3D), se Figur 9, är ett nytt nordiskt projektförslag för att bygga en tredimensionell bildalstrande bi-statisk phased-array radar. Radarn kommer eventuellt att placeras någonstans i norra Skandinavien troligen i samtliga de tre länderna Finland, Norge och Sverige. Den nya radarn beräknas vara operativ runt 2018 beroende på finansieringssituationen. E3D kommer att drivas i så kallat lågintensivt läge och fungera som rymdväderstation då inga forskningsbaserade experiment genomförs. Det kommer under denna tid att finnas möjligheter till dels objektstatistik, och dels uppskattningar av objektens banelement. Tillgången till de data som E3D kommer att generera är något som för närvarande förhandlas i EISCAT Council.

²⁴ Som exempel finns ett MEADE LX200, 30mm, Schmidt-Cassegrain teleskop som får anses vara av klassen avancerat amatörastronomutrustning. <http://www.meade.com/lx200> Kontrollerad 2012-11-12.

²⁵ <http://www.eiscat.se/> Kontrollerad 2012-10-19.

²⁶ http://www.esa.int/SPECIALS/SSA/SEMALXFMTGG_2.html Kontrollerad 2012-10-19.



Figur 9 Konstnärs bild av framtida EISCAT-3D. Källa: EISCAT.

FOI:s möjligheter att få ta del av dessa data och ingå i EISCAT-3D:s forskning har ökat betydligt under hösten 2012 genom att FOI nu är inbjudna att ingå i det breda forskningskonsortium som kommer att motivera en infrastruktursatsning i E3D från svensk sida.

3.4.3 Andra potentiella resurser

3.4.3.1 FOI, Linköping

På enheten för Telekrig vid FOI Linköping finns vissa tekniska resurser, kunskaper såväl som erfarenhet för att genomföra inmätningar av satellitbaserade radio- och radaremittrar. Dessa resurser skulle på ett kostnadseffektivt sätt kunna utökas och ingå som ett komplement i ett Försvarsmaktsbaserat system för satellitinmätning.

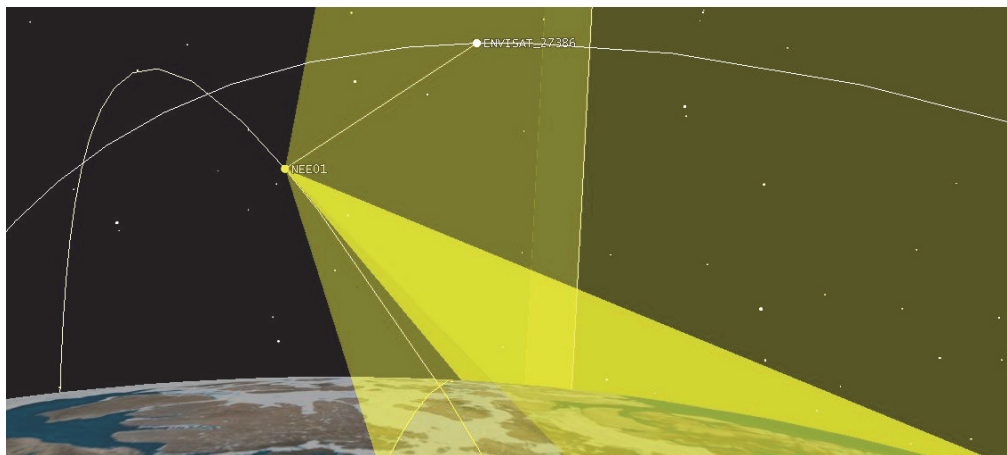
3.4.3.2 EXA, Ecuador

FOI har slutit ett utvecklingsavtal med *Ecuadorian Civil Space Agency* (EXA)²⁷ för att få praktisk erfarenhet och för att börja prova på de konkreta problem och utmaningar som ett internationellt samarbete runt ett satellitbaserat inmätningssystem kan bjuda på. EXA kommer att under nästa år 2013 skicka upp en mindre CubeSat-satellit kallad NEE-01 Pegasus med en videokamera ombord som nyttolast. EXA har erbjudit FOI att utan finansiell kompensation få ta del av kamerans videodata mot att man delges forskningsresultaten.

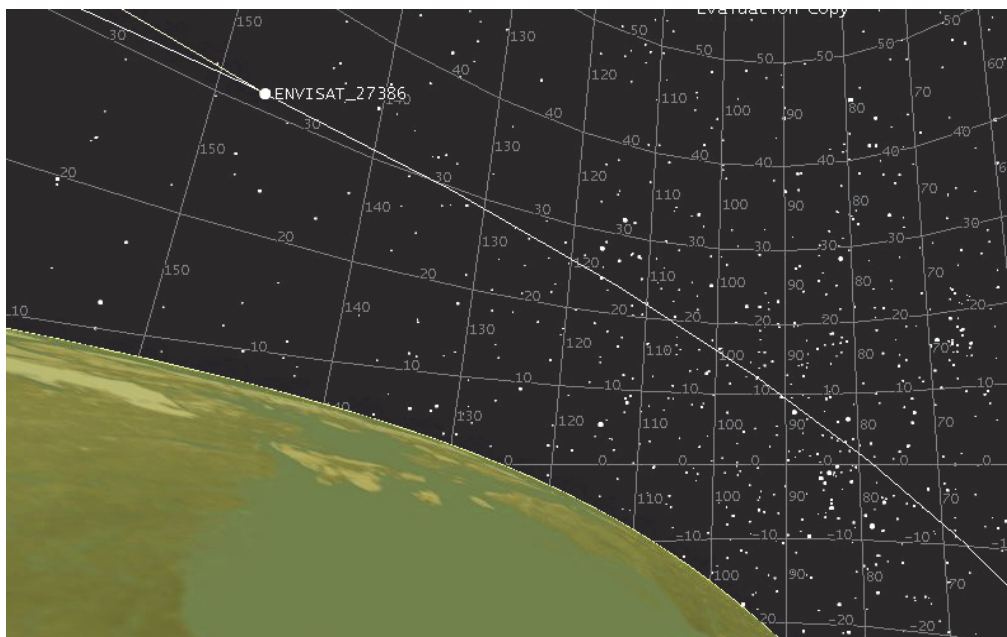
Då upplösningen hos kameran är begränsad och våra möjligheter att styra satelliten är små förväntas inte forskningsresultaten med avseende på SSA bli revolutionerande. Utan det är snarare möjligheten till att få praktiska erfarenheter, och kunna inventera FOI:s egna resurser, som lockar i detta projekt. Hittills har olika stötestenar på områden såsom datakommunikation, bildformat och prediktering av satellitens bana förstärkt vår erfarenhetsbas.

²⁷ Avtalet mellan EXA och FOI har vederbörligen genomgått yttrande av ISP via beslut enligt brev den 12 juli 2012, Dnr: 2012-2.3-0021, av GD J-E Lövgren.

En erfarenhet som blivit uppenbar från samarbetet, redan innan uppskjutningen av satelliten, är att detaljerade simuleringar av tänkbara uppgifter för satelliten är en mycket bra samarbetsform. Oklarheter i banelement, sensorplacering och dataflöden för datanedtagning avslöjas obönhörligen vid en simulering av satellitmissionen. Följande två figurer är exempel på den diskussion FOI har haft med EXA.



Figur 10 Simulering av upptäckt respektive detektering av ENVISAT med hjälp av videokameran på EXA:s satellit NEE-01. Gul "tratt" visar kamerans mycket stora synfält. Strecket mellan de två satelliterna redovisar en möjlig tidpunkt för upptäckt. Bild: FOI.



Figur 11 Simulering av synfältet från videokameran (synfält = 130°) på NEE-01. ENVISAT syns uppe i vänstra hörnet av bilden. Kamerans extrema synfält och därmed begränsade upplösning blir uppenbar i figuren. Bild: FOI.

3.4.3.3 Amatörföreningar, Sverige

Utöver den infrastruktur som finns i form av forsknings- och undervisningsanläggningar vid landets universitet och högskolor finns ett antal amatörastronomiska föreningar. Även om dessa föreningars huvudfokus ligger på astronomi så finns det bland enskilda medlemmar i vissa fall ett intresse av så kallad *satellite spotting*. *Satellite spotting* innebär att man hittar, banbestämmer och följer satelliter som en hobby. Av särskilt intresse tycks

vara att hitta och följa den typ av satelliter som normalt inte förekommer i öppna källor, det vill säga satelliter med militär eller säkerhetspolitisk anknytning.

I många fall är den utrustning som dessa amatörer förfogar över, främst teleskop och sensorer, av enklare slag än den som återfinns vid professionella observatorier. Detta innebär dock paradoxalt nog att de i många avseenden är bättre lämpad för satellitobservationer. Till exempel är synfältet på mindre teleskop typiskt större än på de professionella vilket medger att man kan avbilda en större del av stjärnhimlen.

Man kan också anta att det finns en hel del ackumulerad praktisk erfarenhet inom denna hobbyverksamhet. Internationellt förekommer det till exempel stora amatörnätverk som delar erfarenheter och information över internet. Ett sådant exempel är forumet SeeSat-L som på daglig basis distribuerar ett nyhetsbrev och banelementdata.²⁸

På svensk nationell nivå fungerar Svensk Amatör Astronomisk Förening (SAAF)²⁹ i många fall som kontaktyta mot lokala amatörastronomiska föreningar. Inom ramen för den här rapporten har dock ingen kontakt tagits med vare sig SAAF eller någon lokal enskild förening.

3.4.4 Sammanfattning

Inventeringen av de potentiella anläggningarna visar sammantaget att praktisk kompetensuppbyggnad för FOI rörande baninmätning och banelementberäkning till del är möjlig inom ramen för anläggningarnas forskning och normala verksamhet. Dessutom utgör de astronomiska institutionerna i sig en nationell kunskapsresurs varför ett utökat forskningssamarbete borde inledas. Det bör dock noteras att de akademiska anläggningarna som har inventerats inte lämpar sig för direkt operativ verksamhet för en militär rymdlägesbild, utan kan sannolikt enbart användas för experimentell provverksamhet.

²⁸ <http://www.satobs.org/seesat/seesatindex.html> Kontrollerad 2012-11-20

²⁹ <http://www.saaf.se> Kontrollerad 2012-11-20

4 Slutsatser och rekommendationer

Inom ramen för FoT-projektet MilRymd har FOI under ett par år fokuserat sin forskning och kompetensuppbyggnad mot de tre grundläggande delarna i en militär rymdlägesbild: indata, analysförmåga samt kunskap. Dels har FOI bistått Försvarmakten, Rymdstyrelsen och UD i de svenska ansträngningarna för att få ta del av de indata som sannolikt kommer att produceras av ett framtida europeiskt SSA. Dels har FOI investerat i speciellt anpassad mjukvara för att bygga upp en första initial simulerings- och analyskapacitet. Samtidigt har vi inventerat vilka anläggningar som skulle kunna bistå med svenska oberoende SSA-data. Slutligen arbetar FOI idag med att knyta till sig nationella såväl som internationella forskare inom området rymdlägesbild för att öka den svenska kunskapsbasen. FOI har därigenom lagt en första grundsten för att kunna bygga upp en svensk militär rymdlägesbild.

4.1 Slutsatser

I och med det arbete som genomförts i årets FoT-projekt, 2012, har det påvisats att det finns realistiska förutsättningar för Sverige och Försvarmakten att utveckla en grundläggande militär rymdlägesbild med fokus mot en RSP-funktion. Omfattning och ambitionsnivåer för en sådan funktion är flexibel och skulle kunna rymmas inom ramen för flera olika budgetalternativ.

De internationella initiativ som idag tas på SSA-området stakar ut både möjliga samarbetsformer och konkret systemarkitektur för den operativa samverkan. FOI:s studie har pekat på hur en tänkbar svensk arkitektur skulle kunna utformas och integreras i dessa internationella sammanhang. Det svenska deltagandet i ESA:s fortsatta SSA-utveckling bör särskilt framhållas. Inventeringen av de potentiella anläggningarna har visat att praktisk kompetensuppbyggnad för FOI till del är möjlig inom ramen för anläggningarnas normala verksamhet. Dessutom utgör de astronomiska institutionerna i sig en nationell kunskapsresurs. Slutligen har FOI:s uppbyggnad av en nationell beräknings- och simuleringskapacitet genom förfogandet av *System ToolKit*, samt genom att initiera en möjlig metod för banelementberäkning via optiska sensorer visat att relativt små resurser fordras för att ta det första steget mot en nationell rymdlägesbild.

4.2 Plan för arbetet framåt

Ett viktigt första steg i arbetet framåt är att säkerställa att den kunskapsuppbyggnad som nu påbörjats inom FOI fortgår och drivs i synergi med Rymdstyrelsens ESA-engagemang. Oavsett Försvarmaktens val av framtida ambitionsnivå inom rymddomänen är det FOI:s bedömning att en grundläggande kapacitet för militär rymdlägesbild är nödvändig för både Sverige och Försvarmakten.

Följande punkter och aktiviteter bör därför beaktas i det fortsatta arbetet:

1. *Fokusera den fortsatta forskningen och kunskapsuppbyggnaden på baninmätning och kombinera detta med praktiska försök.* Det arbete som inletts vid FOI, i och med denna studie, bör med fördel fortgå och fokuseras på praktiska försök kopplat till baninmätning av satelliter med hjälp av i första hand optiska teleskop – såväl markbaserade som från satellit.
2. *Ta till vara den erfarenhet som redan finns i de europeiska organisationer som redan har eller avser att bygga upp någon form av RSP-funktion.* Ett flertal europeiska organisationer (främst ESA och EUSC) har under längre tid byggt upp både teoretiska och praktiska erfarenhet inom SSA-området. Ett aktivt deltagande i de aktiviteter som pågår inom dessa organisationer säkerställer att Sverige och Försvarmakten får tillgång till relevanta erfarenheter inom området. Det ger också Försvarmakten möjlighet att påverka den framtida utvecklingen så att den gynnar svenska intressen.

3. *Delta i forskningsnätverk på internationell och mellanstatlig nivå.* Förutom engagemanget inom ramen för det större europeiska SSA-samarbetet bör även andra forskningsnätverk genom internationella och mellanstatliga SSA-samarbeten uppmuntras. Här kan speciellt EDA, NATO STO, NORDEFECO och de internationella nätverk som AFRL bygger upp nämnas.
4. *Samarbeta och koordinera verksamheten med civila myndigheter och andra aktörer.* SSA har till skillnad från RSP ett brett engagemang i den civila sektorn. *Dual use*-aspekten av SSA lyfts till exempel ofta fram i internationella sammanhang. Samarbeten och koordination med civila aktörer, som till exempel Rymdstyrelsen, IRF och MSB, kan därför med fördel prioriteras så att synergieffekter uppnås.

Bilaga 1 Introduktion till inmätning av satellitbanor

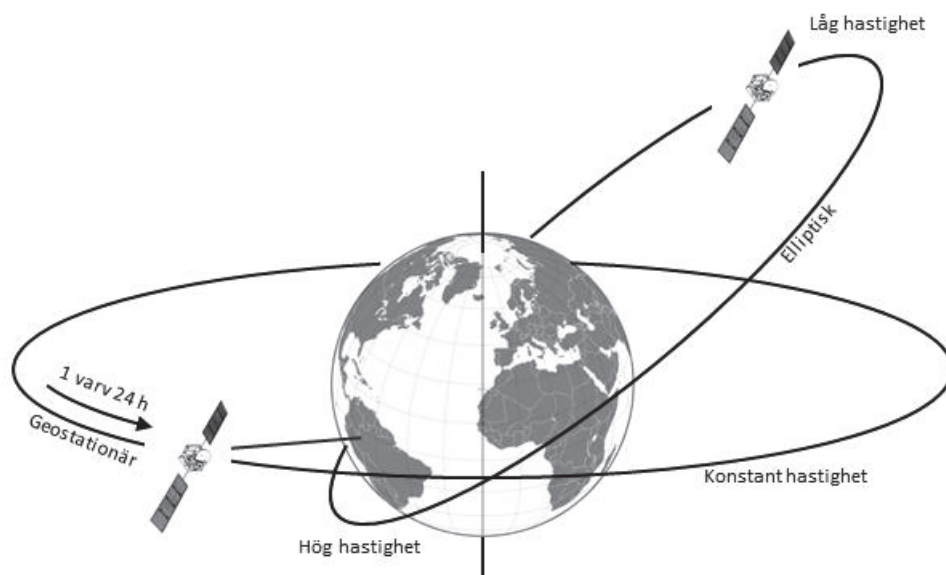
Att kunna bestämma och förstå satelliters rörelse i omloppsbanor är en grundläggande del i alla SSA-system och speciellt för en RSP-förmåga. I denna bilaga ges en översiktlig introduktion till satellitbanor och hur man kan bestämma dessa från observationer av en satellits rörelse över himlen.

I Bilaga 2 vidareutvecklas resonemanget ytterligare med en mer matematiskt stringent beskrivning.

Satellitbanor och Keplers lagar

Satelliter kan endast gå i vissa bestämda banor som definieras av jordens gravitation och såsom de beskrivs av Keplers lagar. De två första lagarna är relativt enkla att förstå intuitivt och de har viktiga implikationer för hur satelliter rör sig.

Keplers första lag säger att satelliter rör sig i elliptiska banor med centralkroppens, d.v.s. jordens, masscentrum i ena brännpunkten. Notera att en cirkel är ett specialfall av en ellips och att många satelliter har cirkulära eller nästan cirkulära banor med jorden i centrum (se Figur A1). Valet av excentricitet, d.v.s. hur mycket ellipsen skiljer sig från en cirkel, bestäms av hur uppskjutningen genomförs och hur styrraketerna placerar satelliten i sin bana. När satelliten väl är i sin bana kan excentriciteten återigen ändras genom att satelliters egna styrraketer påverkar banan. Hur ofta och hur mycket en satellit kan påverka sin bana beror till stor del på hur mycket bränsle den bär med sig, vilket i sin tur beror på typ och uppgift för satelliten. Vissa satelliter utformas på så sätt att de kan justera sin bana med jämna mellanrum medan andra helt saknar denna förmåga och förblir i samma bana under hela sin livstid.



Figur A1 Illustration av två olika typer av satellitbanor; dels en elliptisk bana med hög inklination dels en geostationär bana.

Keplers andra lag säger, något förenklat, att satellitens hastighet är högre när den är nära jorden och lägre när den är längre bort. För en elliptisk bana betyder det att satelliten hela tiden ändrar sin hastighet (då avståndet till jorden varierar). För en cirkulär bana däremot betyder det att satellitens hastighet är konstant och att ju längre ut från jorden banan är

desto lägre är hastigheten. Satellitens omloppstid, d.v.s. den tid det tar för satelliten att snurra ett varv runt jorden, kommer därmed att bero på avståndet till jorden.

Detta medför att det finns precis ett avstånd (ca 35 800 km) då satellitens hastighet är sådan att ett varv runt jorden tar exakt 24 timmar. Om en sådan bana placeras rakt över jordens ekvator kommer satelliten alltid befinna sig på exakt samma plats över jordytan. Satelliten och jorden roterar då med samma vinkelhastighet. En sådan bana kallas geostationär och har en stor praktisk betydelse i flera tillämpningar, bland annat inom telekommunikation. Det är värt att betona att detta endast gäller banor som ligger parallellt med ekvatorn.

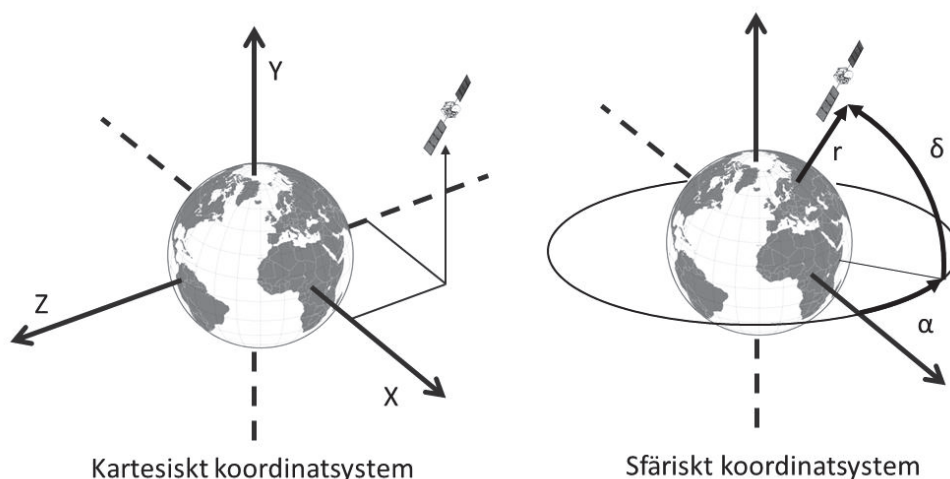
Allmänt om banelement

För att entydigt beskriva en satellits position och rörelse behövs sex stycken parametrar eller så kallade banelement. Dessa kan till exempel vara lägeskoordinaterna x , y och z samt hastigheterna i respektive riktning, v_x , v_y och v_z . Alternativt skulle man kunna använda så kallade sfäriska koordinater och vinkelhastigheter. De två olika koordinatsystemen är beskrivna i Figur A2 nedan.

Koordinatsystem

Sfäriska koordinater, till skillnad från de vanligare kartesiska eller rektangulära koordinaterna, beskriver inte en punkts position med hjälp av höjd, längd och bredd. Se Figur A2, där koordinaterna kallas x , y , och z . I stället använder man två vinklar och ett avstånd. En satellits position kan till exempel beskrivas med hjälp av ett avstånd, vinkeln från söder längs horisonten (ofta kallat azimut) samt höjden över horisonten. Ett sådant sfäriskt koordinatsystem är lokalt, eftersom det beror på var observatören befinner sig (vilken horisont), och topocentriskt eftersom observatören står på jordens yta.

För att undvika att olika observatörer anger olika koordinater för samma objekt kan man därför definiera gemensamma referenspunkter och referensplan. Ett exempel på detta är ett geocentriskt koordinatsystem. Detta utgår från jordens centrum och i stället för att utgå från horisonten och "söder" väljer man ekvatorsplanet och vårdagsjämningspunkten (skärningspunkten mellan jordekvatorn och solens rörelse över himlen när den går från södra till norra hemisfären) som referensplan. Dessa är desamma för alla observatörer på jorden och man får därför ett koordinatsystem som är oberoende av observatörens position. Vinkeln från vårdagsjämningspunkten, längs ekvatorsplanet, mot öster brukar kallas rektascension (RA), α , och mäts i grader. Av tradition uttrycks dessa ofta i timmar, minuter och sekunder där en timme är lika med 15° . Vinkeln över ekvatorsplanet kallas normalt deklination (DEC), δ , och mäts positivt från 0° till 90° norrut och 0° till -90° söderut.



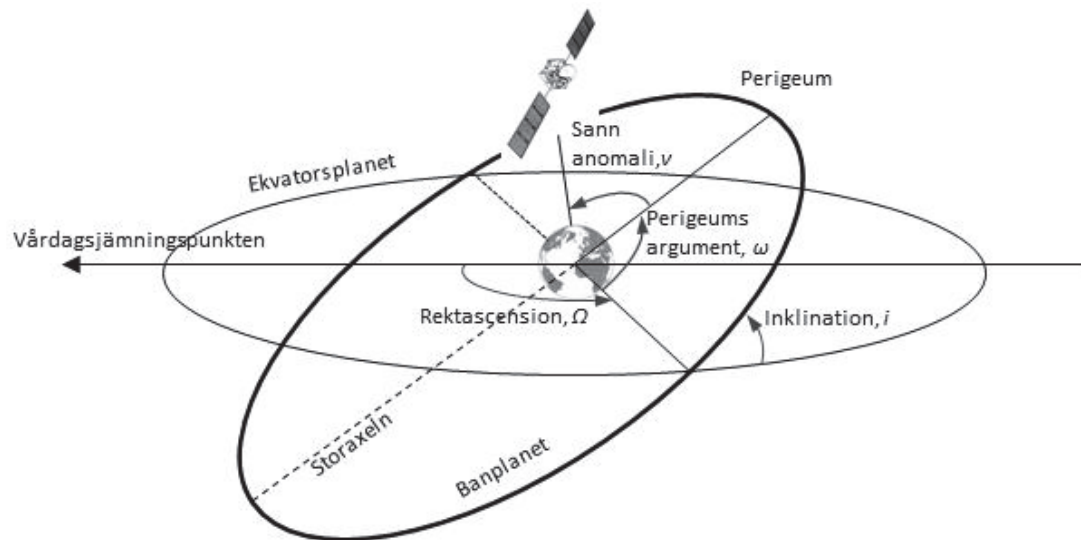
Figur A2 *Vänster*: ett kartesiskt koordinatsystem där satellitens position uttrycks som positionen längs respektive axel, x , y och z . *Höger*: ett sfäriskt koordinatsystem där satellitens position uttrycks i två vinklar, α och δ , samt ett avstånd från koordinatsystemets centrum, r .

Elliptiskt banplan

Av olika skäl är det inte praktiskt att använda vare sig kartesiska eller sfäriska koordinater samt hastigheter för att beskriva satellitbanor. Främst för att de inte på ett enkelt sätt låter en observatör förutsäga en satellits position under inverkan av jordens gravitation. I stället kan vi utnyttja det faktum att alla satelliter, på grund av gravitation, rör sig i elliptiska banor enligt Keplers första lag. Det betyder att om vi känner formen på ellipsen så vet vi precis vilken bana satelliten följer. Vi kan alltså uttrycka de sex nödvändiga parametrarna i form av en ellips och på så sätt beskriva både satellitens position och rörelse. Oavsett vilka banparametrar man väljer att använda för att beskriva en satellitbana, kan man med hjälp av koordinattransformationer sedan räkna om dem till en annan uppsättning parametrar. Till exempel är det praktiskt att göra observationer av satelliter med hjälp av lokala sfäriska koordinater för att sedan transformera dem till banelement som beskriver en ellips för att beskriva satellitbanan.

Keplers klassiska banelement

De sex vanligaste banelementen, som normalt används för satellitbanor, och som går under namnet Keplers klassiska banelement, beskriver storlek (halva storaxeln, a), form (excentricitet, e) och orientering (inklination, i , rektascension, Ω och perigeums argument, ω) av satellitbanan samt satellitens position längs denna (sann anomal, v) vid en given tidpunkt (se Figur A3).



Figur A3 Illustration av Keplers klassiska banelement.

De två första banelementen beskriver satellitbanans utseende:

- Ellipsens **halva storaxel**, a , beskriver storleken på ellipsen. I fallet då satellitbanan är en cirkel är a helt enkelt cirkelns radie.
- **Excentricitet**, e , beskriver ellipsens form eller utdragenhet. Excentriciteten definieras som avståndet mellan ellipsens centrum och jorden (som befinner sig i ellipsens ena brännpunkt) dividerat med halva storaxeln, a . För en cirkel är följaktligen excentriciteten, e , lika med noll. Om banan blir så utdragen att excentriciteten är lika med ett är satelliten inte längre bunden i bana runt jorden utan kommer följa en så kallad parabel.

De tre följande banelementen beskriver orienteringen av ellipsen, eller satellitbanan, d.v.s. hur banan lutar och är vriden:

- **Inklination**, i , anger ellipsens lutning mot jordens ekvatorsplan. När inklinationen är lika med noll betyder det att banan ligger längs ekvatorn och när inklinationen är lika med 90 grader så innebär det att banan är polär, d.v.s. satelliten passerar rakt över polerna.
- **Rektascension**, Ω , är vinkeln mätt österut längs ekvatorsplanet, från vårdagsjämningspunkten till satellitbanans uppstigande nod, d.v.s. den punkt där satelliten passerar ekvatorsplanet från söder till norr.
- **Perigeums argument**, ω , är vinkeln längs satellitbanan, mellan den uppstigande noden och banans perigeum – den punkt där satelliten är som närmast jorden. ω mäts i satellitens rörelseriktning.

Det sjätte och sista banelementet används för att specificera var satelliten befinner sig längs sin bana vid en given tidpunkt:

- **Sann anomali**, v , mäts som vinkeln längs banplanet från perigeum och satellitens position.

Two line elements

Av praktiska och historiska skäl anger man ofta banelement för satelliter i ett speciellt format som kallas *Two Line Element* eller TLE. Formatet har blivit en standard och många

programpaket som används för att beräkna och visualisera satellitbanor accepterar TLE-data.

Figur A4 visar ett exempel på ett TLE med beskrivning av de olika fälten. Förutom banelementen, som redovisas på rad två, innehåller ett TLE en hel del annan viktig information om satelliten. Till exempel den unika internationella beteckningen på satelliten samt ett antal koefficienter som rör störningar av banan på grund av friktion mot jordatmosfären.

	Satellitnummer & klassifikation	Internationell beteckning	Epok	Friktions-/luftmotståndskoefficienter			Elementnummer Checksumma (Mod10)	
1	25544U	98067A	02166.25000000	.00022749	00000-0	30765-3	0 5637	
2	25544	51.6332	62.6174	0006804	238.6710	31.2451	15.57611327 203721	
	Satellitnummer & klassifikation	Inklination	Rektascension	Eccentricitet	Perigeums argument	Medelanomali	Varv per dag	varv vid epok Checksumma (Mod10)

Figur A4 Exempel på ett så kallat *Two Line Element* (TLE) vilket är standardformatet för att beskriva och dokumentera satellitbanor.

Initial baninmätning

En central del i en RSP-förmåga är möjligheten att kunna bestämma en satellits bana genom att göra inmätningar av dess rörelse över himlavalvet. Som vi såg ovan krävs det att sex oberoende parametrar bestäms för att entydigt bestämma en satellits bana. Eftersom banan i sin tur endast beror på jordens gravitation kommer den i teorin vara helt förutsägbar och med relativt enkla metoder kan man beräkna exakt var satelliten kommer befina sig vid en given tidpunkt, både framåt och bakåt i tiden.³⁰ Till exempel skulle man kunna mäta den exakta positionen, x , y och z , samt hastigheten i respektive riktning, v_x , v_y och v_z vid en viss tid. Ur dessa parametrar kan vi sedan entydigt beräkna Keplers klassiska banelement. Det är vanligen på detta sätt nya satelliter först banbestäms vid uppskjutningen. Att göra detta brukar kallas initial baninmätning (eng: *initial orbital determination*) och är ett viktigt första steg för att kunna katalogisera och följa okända satelliter och rymdskrot.

I praktiken är det tyvärr inte helt trivialt att bestämma en exakt position (riktning och avstånd) samt hastigheten. Detta gäller speciellt om man observerar okända satelliter eller rymdskrot som saknar retro-reflektorer och inte heller sänder ut egna signaler som kan användas för att mäta avstånd eller hastigheter. Detta är också fallet om man använder passiva optiska sensorer (inklusive observationer med det nakna ögat). Då kan man endast bestämma en riktning (till exempel deklination och rektascension) men inget avstånd till satelliten. I stället får man förlita sig på att göra flera sådana riktningsobservationer. Eftersom man behöver minst sex parametrar räcker det i teorin med tre stycken riktningsobservationer, vardera med två parametrar: α_1 , δ_1 , α_2 , δ_2 , α_3 och δ_3 (se Figur A2).

³⁰ I praktiken gör man en uppskattning av banan och denna kommer ha en rad osäkerheter förknippade med sig. Beroende på hur stora dessa osäkerheter är kommer förutsägelserna att vara mer eller mindre bra.

Problemet med initial baninmätning rör inte bara artificiella satelliter och rymdskrot i bana runt jorden, utan problemet har sina rötter inom astronomin. Kepler var till exempel intresserad av planeternas och asteroidernas banor runt solen, men eftersom det är samma grundläggande fysikaliska processer som styr planetbanorna och satellitbanorna kan metoderna tillämpas på båda problemen. Under årtionden har ett stort antal analytiska metoder med utgångspunkt från det klassiska tvåkropparsproblemet³¹ tagits fram för att göra just den här typen av initiala baninmätningar. I stort kan dessa delas in i två klasser: Laplace och Gauss³² metod som fått sina namn från de vetenskapsmän som arbetade fram metoderna.

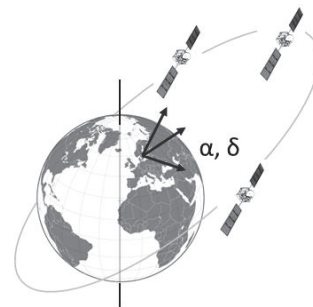
Gauss metod

Det är viktigt att komma ihåg att vilken metod man slutligen väljer för baninmätningen beror på vilken typ av observationsdata man har tillgång till. Till exempel avstånd, hastigheter, eller separation på himlen. I de fall då man endast har tillgång till riktningsobservationer är det framförallt Gauss metod som är av intresse eftersom den är speciellt lämplig för att bestämma banelement från tre ”väl separerade” riktningsobservationer där man saknar avstånd och hastighetsinformation. Laplace metod kan med fördel användas om man har tillgång till stora mängder inmätningar av olika karaktär, men passar sämre för rena riktningsobservationer där man måste uppskatta hastigheterna från de enskilda positionerna. Gauss metod har därför valts för denna RSP-studie eftersom metoden är ett lämpligt första ”inlägg” för banberäkningar som endast kräver enklare teleskop för inmätning. Samtliga metoder, och varianter av metoder, kräver emellertid avancerad matematik och syftet med den här rapporten är inte att i detalj återge eller värdera de olika metoderna.

I det följande avsnittet beskrivs ett schematiskt tillvägagångssätt för att göra en initial baninmätning med Gauss metod. Flera av stegen kan förefalla triviala men innehåller i verkligheten avancerade matematiska beräkningar. I Bilaga 2 presenteras initial baninmätning på ett något mer utförligt sätt så att den intresserade läsaren kan följa det matematiska resonemanget.

Steg 1 – Observation av satelliten

Minst tre väl separerade riktningsobservationer (till exempel rektascension, α , och deklination, δ) görs av satelliten vid tre olika tidpunkter t_1 , t_2 och t_3 . Notera att det i dessa observationer inte finns någon avståndsinformation, endast en riktning, eller riktningsvektor, från observatören till satelliten. Observatörens position måste också vara känd. Eftersom riktningsvektorn utgår från observatören, och inte jordens centrum, görs observationerna i ett lokalt koordinatsystem. I normalfallet, då observatören befinner sig någonstans på jordytan, kallas det även för ett topocentriskt koordinatsystem.



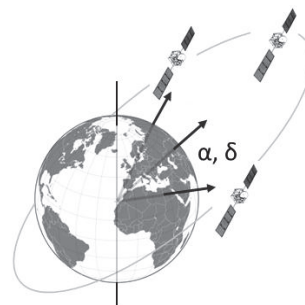
³¹ Se valfri lärobok i bandynamik, till exempel Montenbruck, O. & Gill, E., (2005), Satellite Orbits: Models, Methods and Applications, Berlin: New York, Springer.

³² Pierre Simon de Laplace och Johann Carl Friedrich Gauss var matematiker och vetenskapsmän under slutet på 1700- och början på 1800 talet och lade grunden till de metoder som ännu idag används för banbestämning.

Steg 2 – Geocentriska koordinater

Satelliten kretsar inte runt observatören utan kring jordens centrum. För att förenkla baninmätningen räknar man som regel om riktningsvektorer så att de anger riktningen till satelliten från jordens centrum istället för från observatören. Detta kan göras om vi vet observatörens exakta position på jordytan, d.v.s. longitud, latitud samt höjd.

När omräkningen är gjord har vi tre riktningsvektorer i ett geocentriskt koordinatsystem med utgångspunkt från jordens centrum istället för ett topocentriskt med utgångspunkt från jordytan.

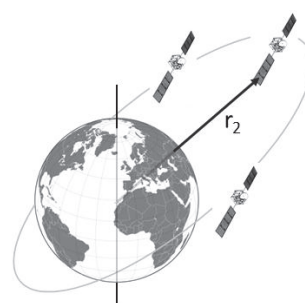


Steg 3 – Uppskatta avståndet: Gauss metod

Från Keplers lagar vet vi att satelliter rör sig i elliptiska banor runt jordens centrum. Ett annat sätt att uttrycka detta på är att satelliter rör sig i ett plan som skär genom jordens centrum. Vi kan också utnyttja att vi har tre olika observationer och att vinkelförändringen som funktion av tiden mellan dessa är känd.

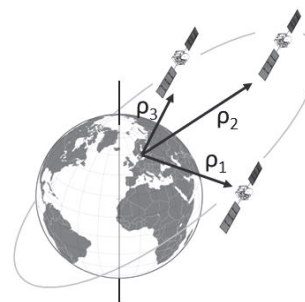
Gauss metod utnyttjar detta faktum och gör det möjligt att uppskatta avståndet, r , till en av de tre observationerna (normalt väljer man att göra detta för den mittersta av de tre, d.v.s. den som gjordes vid tidpunkten t_2).

I praktiken innebär detta steg att man löser en avancerad högre ordningens ekvation med hjälp av en numerisk datormodell.



Steg 4 – Beräkna topocentriska avstånd

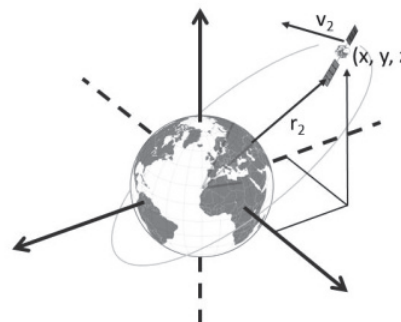
Med uppskattningen av ett av de geocentriska avstånden, r_2 , till satelliten kan man nu gå tillbaka till det topocentriska koordinatsystemet och beräkna topocentriska avstånd, $\rho_{1,2}$ och ρ_3 till alla tre observationerna. Dessa behövs eftersom vi förutom den exakta positionen, d.v.s. både riktning och avstånd, även måste känna till hastigheten vid minst en observation.



Steg 5 – Beräkna hastigheten

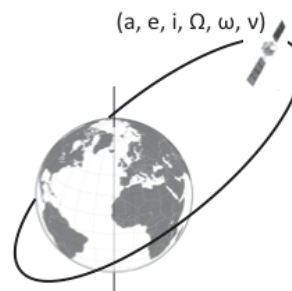
Med kända topocentriska avstånd, ρ , och riktningar, α och δ , kan man beräkna de geocentriska positionerna. Dessa och tidpunkterna för de tre observationerna gör det också möjligt att beräkna satellitens hastighet, v .

Sammanlagt ger detta oss allt vi behöver för att entydigt ha bestämt satellitbanan: positionen, α , δ och r (eller uttryckt i kartesiska koordinater, x , y och z) samt hastigheten, v .

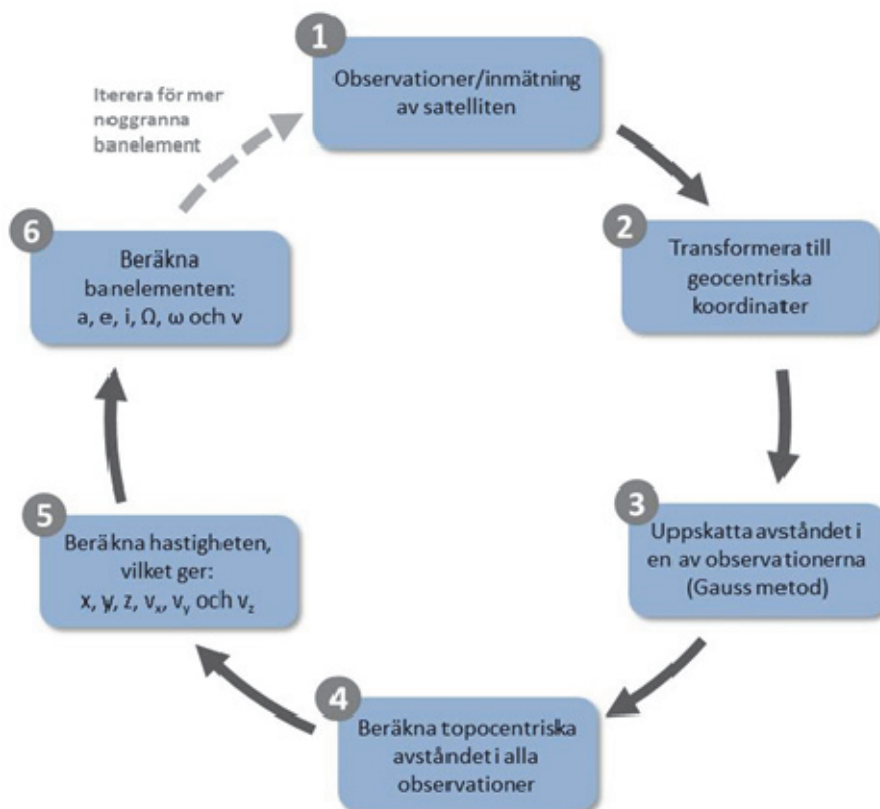


Steg 6 – Keplers banelement

Sista steget är att räkna om hastigheten och positionen till Keplers klassiska banelement: a , e , i , Ω , ω och v . Därefter har satellitens bana bestämts.



Figur A5 visar en schematisk bild över hur steg 1 till 6 ovan utgör den initiala baninmätningen som ger initiala banparametrar för satelliten. För att förbättra dessa kan man sedan återupprepa förfarandet och på så sätt iterera sig fram till allt mer noggranna resultat.



Figur A5 Schematisk skiss över de olika stegen i en initial baninmätning med Gauss metod och tre riktningsobservationer. Steg 1 till 6 utgör den initiala baninmätningen och ger initiala banparametrar för satelliten. För att förbättra dessa kan man sedan återupprepa förfarandet och på så sätt iterera sig fram till allt mer noggranna resultat.

Förbättring av banelementen genom iteration

Utöver det faktum att initial baninmätning är matematiskt avancerat tillkommer det också ett stort antal felkällor som man inte kan bortse ifrån. Även om det i teorin är möjligt att följa stegen som beskrivits ovan, och utföra beräkningarna enligt Bilaga 2, för att på så sätt göra en initial baninmätning kan de fel man får vara så stora att den uppmätta banan långt ifrån överensstämmer med den verkliga. Det kommer därför nästan alltid att krävas att man gör fler inmätningar av satelliten för att förfina baninmätningen och minska felen.

I verkligheten följer vare sig satelliter eller andra rymdobjekt de perfekta elliptiska banor som Keplers lagar beskriver. Till exempel kan friktion mot de övre delarna av atmosfären göra att ett objekt långsamt tappar höjd och därmed ändras banans form. En annan faktor som är synnerligen intressant i ett RSP-sammanhang är de förändringar som sker när satelliter medvetet ges nya banor med hjälp av deras framdrivningssystem. Eftersom dessa och en rad andra faktorer påverkar banans utseende över tiden räcker det inte med att mäta in ett objekt med önskad noggrannhet utan det finns ett behov av att kontinuerligt följa objekten.

När noggrannhetenskraven på rymdobjektens banelement är mycket höga, exempelvis vid analyser av krockar mellan objekt, är behovet speciellt stort av att använda många sensorer med en utbredd spridning runt jorden. Fler sensorer i form av teleskop eller radarsystem gör det möjligt att uppdatera banelement med större noggrannhet och oftare. Detta är bakgrunden till många av de diplomatiska och övriga samarbetsinitiativ som idag tas på det internationella planet för att förbättra kapaciteten för den gemensamma rymdlägesbilden. Det är också delvis bakgrunden till de stora vetenskapliga och teknologiska satsningarna som nu görs på området. Ett exempel på detta är Kanadas satsning på en ny militär satellit, kallad Sapphire, för optisk inmätning av objekt. Ett annat exempel är ESA:s fortsatta program för att bygga ett europeiskt SSA.

Bilaga 2 Bestämning av banelement

Initial baninmätning innebär att man försöker bestämma en satellits bana utifrån ett antal observationer av satelliten. Vilken typ av observationer man har tillgång till kommer avgöra vilken metod man använder och hur bra den initiala baninmätningen i slutändan blir. Texten nedan beskriver hur man med hjälp av endast riktningsobservationer kan använda Gauss metod för att göra en initial baninmätning.

Det minsta antalet observationer som krävs när man endast kan mäta riktningen till satelliten (och inte avstånd) är tre. Dessutom måste man veta sin egen position. För bästa resultat bör de tre observationerna också vara gjorda med så stora inbördes avstånd som möjligt.

Tabell A1 sammanfattar vilka parametrar som krävs.

Tabell A1 Ingångsvärden för initial baninmätning. Observationerna består av observationstider och riktningskoordinater. Utöver dessa behövs även observatörens position samt en fysikalisk parameter som beskriver gravitationen, gravitationsparametern.

Parameter	symbol
Observationstiden	t_i
Rektascension (Ra)	α_i
Deklination (DEC)	δ_i
Observatörens longitud	θ
Observatörens latitud	λ
Observatörens höjd över havet	a
Gravitationsparametern	μ

Vi antar att vi vid tre olika tillfällen, t_1 , t_2 och t_3 gjort riktningsobservationer (Ra och DEC) av en satellit:

$$\begin{aligned} &\delta_1, \alpha_1, t_1 \\ &\delta_2, \alpha_2, t_2 \\ &\delta_3, \alpha_3, t_3 \end{aligned}$$

Det första vi gör är att definiera ett antal nya tidsparametrar som vi kommer behöva senare:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \Delta t_{32} / \Delta t_{31} \\ \tau_2 &= \tau_1 [(\Delta t_{21})(\Delta t_{31} + \Delta t_{32})] / 6 \\ \tau_3 &= \Delta t_{21} / \Delta t_{31} \\ \tau_4 &= \tau_1 [(\Delta t_{21})(\Delta t_{31} + \Delta t_{21})] / 6 \end{aligned}$$

där

$$\begin{aligned} \Delta t_{21} &= t_2 - t_1 \\ \Delta t_{32} &= t_3 - t_2 \\ \Delta t_{31} &= t_3 - t_1 \end{aligned}$$

Transformation till kartesiska egenvektorer

De individuella observationerna av satelliten (Ra och DEC) kan uttryckas som tre enhetsvektorer. Följande ekvationer beskriver transformationen för dessa enhetsvektorer från sfäriska till kartesiska koordinater:

$$\begin{aligned}L_{1i} &= \cos \alpha_i \cos \delta_i \\L_{2i} &= \sin \alpha_i \cos \delta_i \\L_{3i} &= \sin \delta_i\end{aligned}$$

där i = är observationsnumret, eller kolumnen i i enhetsmatrisen $\mathbf{L}$:

$$\mathbf{L} = \begin{vmatrix} \cos \alpha_1 \cos \delta_1 & \cos \alpha_2 \cos \delta_2 & \cos \alpha_3 \cos \delta_3 \\ \sin \alpha_1 \cos \delta_1 & \sin \alpha_2 \cos \delta_2 & \sin \alpha_3 \cos \delta_3 \\ \sin \delta_1 & \sin \delta_2 & \sin \delta_3 \end{vmatrix}$$

Observatörens position

Eftersom satelliten snurrar runt jordens centrum är det lämpligt att använda denna som referensram snarare än observatörens position någonstans på jordytan. Vi vill alltså transformera koordinaterna från jordens yta (topocentriska koordinater) till ett jordcentrerat inertialsystem, även kallat ECI-system (från engelskan *Earth-Centered Inertial system*).

Första steget är att bestämma observatörens position vid de tre observationstillfällena. För att beräkna detta behöver vi beräkna observatörens avstånd från jordens centrum, R_{obs} , samt siderisk tid, α_{si} .³³ Avståndet kan beräknas med hjälp av följande ekvation:

$$R_{\text{obs}} = \{ [\cos \lambda / R_E]^2 + [\sin \lambda / R_P]^2 \}^{-1/2} + A$$

där R_E = jordens radie vid ekvatorn (= 6378.137 km) och R_P = radien vid polerna (= 6356.752 km).

Siderisk tid

För att beräkna den sideriska tiden vid varje observationstillfälle väljer vi den första observationen, t_1 , som referenstidpunkt. Tiden fås lättast från något av de många planetarieprogram som finns för privatbruk.

Sideriska tiden för t_2 and t_3 , som motsvarar den andra och tredje observationen fås sedan från:

$$\alpha_{\text{si}} = 15^\circ/\text{hr} [\alpha_{\text{s0}} + 1.0027379 (t_i - t_1) / 3600]$$

där i = observationsnumret 2, eller 3.

³³ Siderisk tid definieras som timvinkeln (= avståndet längs ekvatorsplanet från meridianen) för vårdagsjämningspunkten.

ECI-matrisen

ECI matrisen, $\mathbf{R}_{\text{ECI}}$, som beskriver observatörens position i ECI-systemet, kan nu bestämmas med hjälp av följande ekvationer:

$$\begin{aligned} R_{\text{ECI}(1i)} &= R_{\text{obs}} \cos\lambda \cos\alpha_{si} \\ R_{\text{ECI}(2i)} &= R_{\text{obs}} \cos\lambda \sin\alpha_{si} \\ R_{\text{ECI}(3i)} &= R_{\text{obs}} \sin\lambda \end{aligned}$$

där i = observationsnumret, eller kolumnen i ECI-matrisen

$$\mathbf{R}_{\text{ECI}} = \begin{vmatrix} R_{\text{obs}} \cos\lambda \cos\alpha_{s1} & R_{\text{obs}} \cos\lambda \cos\alpha_{s2} & R_{\text{obs}} \cos\lambda \cos\alpha_{s3} \\ R_{\text{obs}} \cos\lambda \sin\alpha_{s1} & R_{\text{obs}} \cos\lambda \sin\alpha_{s2} & R_{\text{obs}} \cos\lambda \sin\alpha_{s3} \\ \sin\lambda & \sin\lambda & \sin\lambda \end{vmatrix}$$

Geocentriska avståndet

Vi kan nu ge oss på uppgiften att uppskatta ett första avstånd till satelliten. Detta kräver dock att vi utnyttja vad vi vet om satellitbanor. Till exempel antar vi att satelliten roterar i ett plan med jordens centrum i ena brännpunkten. Detta betyder att riktningsvektorerna, $\mathbf{r}_i$, också ligger i ett plan och att det finns en linjärkombination av dessa sådan att:

$$c_1 \mathbf{r}_1 + c_2 \mathbf{r}_2 + c_3 \mathbf{r}_3 = 0$$

Vi antar också att det finns funktioner, f och g , sådana att satellitens position och hastighet i planet kan beskrivas enligt:

$$\mathbf{r}_1 = f_1 \mathbf{r}_2 + g_1 \mathbf{v}_2 \text{ och } \mathbf{r}_3 = f_3 \mathbf{r}_2 + g_3 \mathbf{v}_2$$

Sammantaget gör dessa antaganden att vi kan sätta upp ett 8:e ordningens polynom som endast beror på r_2 , d.v.s. det geocentriska avståndet till satelliten för observation 2:³⁴

$$A(r_2)^8 + C(r_2)^6 + F(r_2)^3 + K = 0$$

där

$$\begin{aligned} A &= 1 \\ C &= -[d_1^2 + 2Xd_1 + R_{\text{obs}}^2] \\ F &= -2\mu d_2(X + d_1) \\ K &= -(\mu d_2)^2 \end{aligned}$$

koefficienterna d_1 , d_2 och X definieras enligt:

$$\begin{aligned} d_1 &= M_{21} \tau_1 - M_{22} + M_{23} \tau_3 \\ d_2 &= M_{21} \tau_2 + M_{23} \tau_4 \\ X &= L_{12} R_{\text{ECI}12} + L_{22} R_{\text{ECI}22} + L_{32} R_{\text{ECI}32} \end{aligned}$$

och

$$\mathbf{M} = \mathbf{L}^{-1} \mathbf{R}_{\text{ECI}}$$

³⁴ För utförliga detaljer se till exempel Montenbruck, O. & Gill, E., (2005), Satellite Orbits: Models, Methods and Applications, Berlin: New York, Springer.

Problemet blir nu att lösa ekvationen med avseende på r_2 och välja den lösning vi tror är rätt för satellitbanan. Detta kan göras manuellt genom att gissa sig fram till lösningar, men en mer robust metod är att använda någon form av numeriskt verktyg.

Vi känner nu avståndet till satelliten vid observation 2.

Satellitens position och hastighet

För att härleda satellitens banelement räcker det dock inte med att veta avståndet vid endast en observation. Vi behöver även känna satellitens hastighet. För att få denna beräknar vi satellitens topocentriska avstånd (avståndet från observatören till satelliten) för alla tre observationer.

Topocentriska avståndet

Vi definierar:

$$\begin{aligned}c_1 &= \tau_1 + \mu \tau_2 / (r_2)^3 \\c_2 &= -1 \\c_3 &= \tau_3 + \mu \tau_4 / (r_2)^3\end{aligned}$$

De topocentriska avstånden, $\rho_1, 2$ och 3 , kan då beräknas enligt:

$$\begin{aligned}\rho_1 &= (M_{12} - M_{11}c_1 - M_{13}c_3) / c_1 \\ \rho_2 &= (M_{22} - M_{21}c_1 - M_{23}c_3) / c_2 \\ \rho_3 &= (M_{32} - M_{31}c_1 - M_{33}c_3) / c_3\end{aligned}$$

Geocentriska avstånd

Med hjälp av de topocentriska avstånden kan vi definiera den geocentriska avståndsmatrisen, $\mathbf{r}$:

$$\mathbf{r} = \begin{vmatrix} \rho_1 L_{11} + R_{11} & \rho_1 L_{12} + R_{12} & \rho_1 L_{13} + R_{13} \\ \rho_2 L_{21} + R_{21} & \rho_2 L_{22} + R_{22} & \rho_2 L_{23} + R_{23} \\ \rho_3 L_{31} + R_{31} & \rho_3 L_{32} + R_{32} & \rho_3 L_{33} + R_{33} \end{vmatrix}$$

där summan av kvadraten av varje kolumn ger det geocentriska avståndet för varje enskild observation:

$$\begin{aligned}r_1 &= [(r_{11})^2 + (r_{21})^2 + (r_{31})^2]^{1/2} \\ r_2 &= [(r_{12})^2 + (r_{22})^2 + (r_{32})^2]^{1/2} \\ r_3 &= [(r_{13})^2 + (r_{23})^2 + (r_{33})^2]^{1/2}\end{aligned}$$

Hastighetsvektorn

För att slutligen bestämma satellitens hastighet i planet vid observation 2 definierar vi först två nya matriser: $\mathbf{Z}$ -matrisen med hjälp av följande vektorprodukter:

$$\mathbf{Z} = \begin{vmatrix} r_{21}r_{32} - r_{31}r_{22} & r_{22}r_{33} - r_{32}r_{23} & r_{23}r_{31} - r_{33}r_{21} \\ r_{31}r_{12} - r_{11}r_{32} & r_{32}r_{13} - r_{12}r_{33} & r_{33}r_{11} - r_{13}r_{31} \\ r_{11}r_{22} - r_{21}r_{12} & r_{12}r_{23} - r_{22}r_{13} & r_{13}r_{21} - r_{23}r_{11} \end{vmatrix}$$

samt $\mathbf{N}$ -matrisen:

$$\mathbf{N} = \begin{vmatrix} r_1 Z_{12} + r_2 Z_{13} + r_3 Z_{11} & Z_{11} + Z_{21} + Z_{31} & (r_2 - r_3)r_{11} + (r_3 - r_1)r_{12} + (r_1 - r_2)r_{13} \\ r_1 Z_{22} + r_2 Z_{23} + r_3 Z_{21} & Z_{12} + Z_{22} + Z_{32} & (r_2 - r_3)r_{21} + (r_3 - r_1)r_{22} + (r_1 - r_2)r_{23} \\ r_1 Z_{32} + r_2 Z_{33} + r_3 Z_{31} & Z_{13} + Z_{23} + Z_{33} & (r_2 - r_3)r_{31} + (r_3 - r_1)r_{32} + (r_1 - r_2)r_{33} \end{vmatrix}$$

Vi kan nu beräkna:

$$N_1 = [(N_{11})^2 + (N_{21})^2 + (N_{31})^2]^{1/2}$$

$$N_2 = [(N_{12})^2 + (N_{22})^2 + (N_{32})^2]^{1/2}$$

samt

$$Y_x = N_{22}r_{32} - N_{32}r_{22}$$

$$Y_y = N_{32}r_{12} - N_{12}r_{32}$$

$$Y_z = N_{12}r_{22} - N_{22}r_{12}$$

Genom att slutligen definiera W enligt:

$$W = [\mu / (N_1 N_2)]^{1/2}$$

Kan hastigheterna i respektive riktning beräknas:

$$v_x = W [Y_x / r_2 + N_{13}]$$

$$v_y = W [Y_y / r_2 + N_{23}]$$

$$v_z = W [Y_z / r_2 + N_{33}]$$

Banparametrar

Vi har nu alla parametrar som behövs för att entydigt bestämma satellitbanan. Positionen ges av x , y , och z samt hastighetskomponenterna av v_x , v_y och v_z vid epoken t_2 .

Keplers klassiska banparametrar

Keplers klassiska banelement kan nu härledas. Först beräknar vi hastigheten som summan av kvadraten på hastighetskomponenterna:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

Halva storaxeln, a , ges då av:

$$a = [2/r_2 - v^2/\mu]^{-1}$$

Med hjälp av Keplers tredje lag kan vi beräkna satellitens period:

$$T = 2\pi (a^3/\mu)^{1/2}$$

Halva storaxeln ger oss dock bara medelavståndet till satelliten. **Excentriciteten**, e , däremot ges av storleken på excentricitetsvektorena enligt:

$$e_x = (1/r_2 - 1/a) x - (xv_x + yv_y + zv_z) v_x / \mu$$

$$e_y = (1/r_2 - 1/a) y - (xv_x + yv_y + zv_z) v_y / \mu$$

$$e_z = (1/r_2 - 1/a) z - (xv_x + yv_y + zv_z) v_z / \mu$$

$$e = [(e_x)^2 + (e_y)^2 + (e_z)^2]^{1/2}$$

För att bestämma satellitbanans **inklination**, i , beräknar vi först satellitens rörelsemängdsmomentskomponenter:

$$\begin{aligned}h_x &= yv_z - zv_y \\h_y &= zv_x - xv_z \\h_z &= xv_y - yv_x\end{aligned}$$

och rörelsemängdsmomentet:

$$h = [(h_x)^2 + (h_y)^2 + (h_z)^2]^{1/2}$$

Inklinationen ges då av:

$$i = \cos^{-1} (h_z / h)$$

För att beräkna **rektascensionen** av den uppgående noden, Ω , behöver vi först definiera:

$$\begin{aligned}\gamma_x &= -h_y \\ \gamma_y &= h_x \\ \gamma &= [(\gamma_x)^2 + (\gamma_y)^2]^{1/2}\end{aligned}$$

Rektascensionen fås då enligt:

$$\begin{aligned}\text{Om } \gamma_y > 0 \text{ då: } \Omega &= \cos^{-1} (\gamma_x / \gamma) \\ \text{Om } \gamma_y < 0 \text{ då: } \Omega &= 360^\circ - \cos^{-1} (\gamma_x / \gamma)\end{aligned}$$

Perigeums argument, ω , fås på liknande sätt enligt:

$$\begin{aligned}\text{Om } e_k > 0 \text{ då: } \omega &= \cos^{-1} [(\gamma_i e_i + \gamma_j e_j) / \gamma e] \\ \text{Om } e_k < 0 \text{ då: } \omega &= 360^\circ - \cos^{-1} [(\gamma_i e_i + \gamma_j e_j) / \gamma e]\end{aligned}$$

Till slut kan vi beräkna **sann anomali**, v , vid den givna epoken ur följande ekvationer:

$$\begin{aligned}\text{Om } (xv_x + yv_y + zv_z) > 0 \text{ då: } v &= \cos^{-1} [(xe_x + ye_y + ze_z) / er_2] \\ \text{Om } (xv_x + yv_y + zv_z) < 0 \text{ då: } v &= 360^\circ - \cos^{-1} [(xe_x + ye_y + ze_z) / er_2]\end{aligned}$$

Samtliga banelement är nu bestämda och vi har en första uppskattning av satellitens bana.

Tabell A2 Slutlig uppsättning av Keplers klassiska banelement.

Keplerian Orbit Element	Symbol	Kommentar/Enhet
Epok	t_{epoch}	vid t_2
Halva storaxeln	a	km
Period	T	min
Excentricitet	e	
Inklination	i	°
Rektacension	Ω	°
Perigeums argument	ω	°
Sann Anomali	v	°