



Inmätning av rymdobjekt

Rymdlägesbild med egen rådighet

Matti Nylund (red.), Per Hägg, Björn Jakobsson,
Ramin Farid, Rolf Ragnarsson, Ola Rasmusson,
Seméli Papadogiannakis, Axel Tryblom

Matti Nylund (red.), Per Hägg, Björn Jakobsson,
Ramin Farid, Seméli Papadogiannakis,
Rolf Ragnarsson, Ola Rasmusson, Axel Tryblom

Inmätning av rymdobjekt

Rymdlägesbild med egen rådighet

Titel	Inmätning av rymdobjekt – Rymdlägesbild med egen
Title	rådighet Surveillance and Tracking of Space Objects
Rapportnr/Report no	FOI-R--5325--SE
Månad/Month	November
Utgivningsår/Year	2022
Antal sidor/Pages	58
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	Försvarsmakten
Forskningsområde	Flygsystem och rymdfrågor
FoT-område	Rymdsystem
Projektnr/Project no	E85064
Godkänd av/Approved by	Lars Höstbeck
Ansvarig avdelning	Försvarsteknik
Exportkontroll	Innehållet är granskat och omfattar ingen information som är underställd exportkontrollagstiftningen

Bild/Cover: Ramin Farid, FOI

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

Försvarsmakten har pekat ut rymddomänen som en operativ domän, en domän för militära operationer, vilket ställer krav på tillgången till en tillförlitlig militär rymdlägesbild. En militär rymdlägesbild ger viktiga informationsunderlag för beslutsfattare i andra operativa domäner och bidrar till att upprätthålla Försvarsmaktens handlingsfrihet.

Avsikten med rapporten är att kartlägga vilka funktioner som krävs för att upprätthålla en militär rymdlägesbild med viss egen rådighet över tid, vilka krav som ställs på de olika funktionerna och hur de integreras tillsammans. Detta innefattar sensorsystem, analysverktyg, upprätthållandet av en satellitkatalog, samt planering av inmätningar.

Grunden till en rymdlägesbild kan byggas upp genom inköp av tjänster från en kommersiell aktör, genom samarbeten med andra organisationer eller myndigheter, både nationellt och internationellt. Det finns dessutom möjlighet att den till del införskaffas genom egen rådighet, vilket innebär att satelliter mäts in av en sensor som Försvarsmakten äger och kontrollerar. En egen inmätningsskapacitet ger möjlighet till kvalitetssäkring av data, en ökad militär underrättelseförmåga och en större handlingsfrihet.

Denna rapport ska ses som en sammanfattning och påbyggnad av tidigare arbeten inom FoT-projektet, vilket innebär att det finns rikligt med referenser till tidigare rapporter som kan ge mera information för den intresserade läsaren.

Nyckelord: rymd, rymdlägesbild, militär rymdlägesbild, SDA, SSA, SST, sensor, radar, teleskop, satellit, katalog, databas

Summary

The Swedish Armed Forces' declaration of space as an operative domain further stresses the need for a space domain awareness (SDA) capability. An SDA is not only a prerequisite for military operations in space, but it is also an essential information component for decisions in other operative domains that contributes to a military freedom of action.

The ambition of this report is to provide an overview of the functions needed to enable an SDA at own disposition. The report discusses the requirements on the different function included, and how they can be integrated. This includes sensor systems, analysis tools, scheduling of observations and derived services.

The initial components of an SDA may be acquired through commercial actors or organizations, both national and international, that can deliver basic SSA functionalities. However, the addition of sensors, owned and operated by the Swedish Armed Forces, is an important extension that enables the possibility of verifying and refining third-party data and that can contribute to an improved military intelligence.

This report should be considered as a summary and continuation of previous work on space situational awareness, and further details on many of the concepts described here are available in the references listed.

Keywords: SDA, SSA, SST, Sensors, Radar, Telescope, Satellite, Catalogue, Database

Innehållsförteckning

Förkortningar	6
1 Inledning - militär rymdlägesbild	8
2 Rymdlägesbild och inmätning förmåga	12
2.1 Satellitbanor och typiskt användningsområde	13
2.2 Inmätningssensor	14
2.2.1 Radarsystem	16
2.2.2 Optik	17
2.2.3 Laser	17
3 Metod	18
3.1 Allmän kunskapsuppbyggnad	18
3.2 Upprätthållande av rymdlägesbild	19
3.2.1 Inmätningar av rymdobjekt	19
3.2.2 Dataanalys	21
3.2.3 Databas	21
3.2.4 Observationsplanering	21
3.2.5 Tjänster	21
4 Resultat	23
4.1 Kunskapshöjande aktiviteter	23
4.1.1 Studier	24
4.2 Upprätthållande av rymdlägesbild	27
4.2.1 Inmätningar	31
4.2.2 Experimentella inmätning metoder	33
4.2.3 Dataanalys	36
4.2.4 Databas	45
4.2.5 Observationsplanering	47
4.2.6 Militära rymdlägesbildstjänster	48
5 Slutsatser och framtida arbete	50
5.1 Framtida arbete	51
6 Referenser	53

Förkortningar

AESA *Active Electronically Scanned Array*

AMOS *The Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies*

DISCOS *Database and Information System Characterising Objects in Space*

EISCAT *European Incoherent Scatter Scientific Association*

ESA *European Space Agency*

ESOC *European Space Operations Centre*

GEO *Geostationary Earth Orbit*

GNSS *Global Navigation Satellite System*

GPS *Global Positioning System*

IRF *Institutet för Rymdfysik*

ISO *International Organization for Standardization*

LCO *Las Cumbres Observatory*

LEO *Low Earth Orbit*

MEO *Medium Earth Orbit*

MSB *Myndigheten för samhällsskydd och beredskap.*

NASA *National Aeronautics and Space Administration*

NEO *Near Earth Object*

OMM *Orbit Mean-elements Message*

ORM *Object-Relational Mapping*

RSO *Resident Space Objects*

SAMN *Swedish Allsky Meteor Network*

SAR *Syntetisk aperturradar*

SDA *Space Domain Awareness*

SORTS++ *Next-generation Space Object Radar Tracking Simulator*

SQL *Structured Query Language*

SSA *Space Situational Awareness*

SSC *Swedish Space Corporation*

SST *Space Surveillance and Tracking*

SST-CSW SST core software

STK Systems Tool Kit

SWE Space Weather

TLE Two-Line Element set

UCS Union of Concerned Scientists

UHF Ultra High Frequency

UNOOSA United Nations Office for Outer Space Affairs

XML eXtensible Markup Language

1 Inledning - militär rymdlägesbild

Denna rapport är skriven med ambitionen att ge läsaren en övergripande förståelse av de funktioner som krävs för inmätning av rymdobjekt¹. Förfogandet av en inmätningfunktion är en av de grundläggande förutsättningarna för att kunna upprätthålla en militär rymdlägesbild (*eng. Space Domain Awareness, SDA*) med egen rådighet.

Rapportens innehåll är en sammanfattning av den kunskapsuppbyggnad FOI bedrivit i olika forsknings- och teknikutvecklingsprojekt (FoT-projekt) i ämnet i över tio år. Referenser till tidigare arbeten ges löpande i texten. Rapporten kan användas av den läsare som vill lära sig mer om inmätning av rymdobjekt. Vidare avser rapporten att ge en övergripande förståelse av den komplexitet och de funktioner som krävs för att bygga upp en militär rymdlägesbild med egen inmätningsskapacitet.

En lägesbild är en nödvändighet för en aktör för att kunna förstå och korrekt bedöma en situation, att kunna ta väl underbyggda beslut och att kunna agera i och påverka förloppet i en uppkommen situation i en specifik miljö. Hur ofta en lägesbild behöver uppdateras beror på hur snabba förlopp som behöver hanteras och vilka aspekter i lägesbilden som är centrala och viktiga för aktören i fråga.

Försvarsmakten har pekat ut rymden som en operativ domän [1]. Det finns således ett grundläggande militärt behov av tillgång till en innehållsrik och tydlig rymdlägesbild som svarar på frågorna: hur ser det ut nu, vad händer, hur ser konsekvenserna ut, samt finns några risker och hot? En rymdlägesbild ger aktören goda förutsättningar för att förstå, bedöma och agera på pågående rymdrelaterade aktiviteter. Vad gäller behov av information och kunskap skiljer sig följaktligen inte rymddomänen från de övriga operativa domänerna. Rapporten kommer genomgående att använda begreppet militär rymdlägesbildsförmåga för ovanstående kapacitet.

Uppbyggnaden av en militär rymdlägesbildsförmåga vilar på tjänsterna: inmätning och övervakning av rymdobjekt (*eng. Space Surveillance and Tracking, SST*) och rymdväder (*eng. Space Weather, SWE*). Dessa två funktioner utgör grundplattformen. Utformningen av en aktörs militära rymdlägesbildsförmåga måste spegla och relatera till aktörens egen agenda, det vill säga till aktörens behov.

För att bygga upp och upprätthålla en militär rymdlägesbildsförmåga behövs, utöver ovan nämnda grundplattform, naturligtvis även annan teknisk och taktisk

¹ Med rymdobjekt avses alla tillverkade föremål som ligger i omloppsbana runt jorden. Där ingår alla satelliter (aktiva som icke aktiva), bärraketer, rymdskrot som lämnats med flit i bana eller oavsiktligt hamnat där genom exempelvis genom: egen explosion, kollision med annat objekt eller förstörts genom kinetiska antisatellit-tester (ASAT).

information för de satellitsystem som är av primärt intresse. En del av detta kan vara militär underrättelse om rymddomänen (*eng. Space Intelligence*)². När militär underrättelse om rymddomänen och beslutstödsfunktioner läggs till den civila rymdlägesbilden uppnås en militär rymdlägesbildsförmåga. I denna rapport går vi inte in på specifika detaljer kring detta men det kan exempelvis handla om olika aspekter kring andra aktörers satellitsystem så som:

- Sensorkapacitet.
- Ändamål.
- Tillämpning.
- Uppträdande och intentioner.

En viktig skillnad mellan civil och militär rymdlägesbild är att den militära bilden fokuserar nästan uteslutande på följning av satelliter som är av militärt intresse, medan den civila rymdlägesbilden behöver följa alla typer av rymdobjekt, RSO (*eng. Resident Space Object*)³. Därav kommer rapporten att fokusera på inmätningen av satelliter om det inte uttryckligen finns ett behov av att i texten göra distinktioner mot andra rymdobjekt.

Syfte och problemformulering

Rapporten ska svara på vad som krävs för att bygga upp en egen operativ militär rymdlägesbild med hjälp av en egen inmätningförmåga och därmed uppnå en viss nivå av rådighet. Rapporten syftar till att beskriva vilka funktioner som krävs och hur dessa funktioner behöver knytas ihop logiskt och i tiden för att sedan förädlas till en militär rymdlägesbildsförmåga.

Innehåll och avgränsning

Upprättandet och underhållet av en objektskatalog, innehållande information om satelliters banor, är en förutsättning för att kunna bygga en militär rymdlägesbildsförmåga. Men det är viktigt att klargöra att militär rymdlägesbildsförmåga inte är liktydigt med och inte kan byggas upp av enbart en inmätningförmåga. Denna rapport begränsar sig till de grundläggande funktioner som krävs för att kunna mäta in satelliter av intresse och för att kunna upprätthålla en objektskatalog.

Definitionen av en rymdlägesbild är den samlade förmågan att hantera:

- Inmätning och övervakning av tillverkade föremål i banor runt jorden, SST.

² Militär rymdunderrättelse kan innehålla all typ av underrättelseinhämtning, från öppna och klassificerade källor men även annan typ av inmätning, exempelvis karakteriseringsmätningar, skild från banbestämmande inmätning.

³ Med RSO avses alla tillverkade föremål i omloppsbanor kring jorden (satelliter, raketsteg och rymdskrot).

- Övervakning av naturliga rymdobjekt som asteroider och kometer som kan kollidera med jorden, (eng. *Near Earth Object* eller *NEO*).
- Rymdväderprognoser, SWE.

Rapportens innehåll har således huvudsaklig bäring på inmätning och övervakning av rymdobjekt.

Att kunna hantera rymdväderprognoser är definitivt en funktion som ett militär rymdlägesbildssystem bör innehålla. Exempelvis bör information om sol- och magnetfältaktivitet vara en integrerad del i en militär rymdlägesbild. Informationen behövs exempelvis för att upprätthålla noggrannheten i bandynamikmodeller för att beräkna satelliternas positioner i framförallt de lägre jordbanorna (eng. *Low Earth Orbit*, *LEO*). Den kan också vara relevant för att bedöma risker och effekter av potentiella eller pågående solstormar. Både rymdburen elektronik⁴ och markbundna system⁵ är sårbara för solstormar, de kan resultera i utslagning eller störning av system och funktioner. Det kan vara system och funktioner som aktören själv är beroende av och det kan vara system eller funktioner som aktören av andra anledningar kan vara intresserad att känna till status på. Mer information finns i FOI-rapporten, *En rymdvärdertjänst åt Försvarsmakten - Ett förslag till utformning* [2].

NEO kan vara av intresse för Sverige men bedöms inte tillhöra en militär rymdlägesbild. NEO bedöms av författarna att falla på MSB att hantera.

Karakterisering av satelliters kapacitet utifrån optiska eller radar observationer kan vara användbar information för en militär rymdlägesbild, av denna anledning har FOI påbörjat arbete med karakterisering av satelliter. Genom karakteriseringsobservationer fås mer information om de satelliter som observeras. Detta är en i förhållande till *inmätning av rymdobjekt* fristående aktivitet. Men kopplingen finns där och det finns planer för att resultatet från karakteriseringsarbetet kommer att beskrivas i en kommande FOI-rapport.

Läsaren bör notera att redovisningen av de olika rymdlägesbildsfunktionerna görs till olika tekniskt djup i resultatkapitlet. Anledningen är att vissa funktioner har undersökts mer än andra. Detta har varit en medveten prioritering där identifierade nyckelområden varit viktigast att starta upp ett arbete kring. Dessutom behöver de undersökas till tillräckligt djup för att förstå hela militära rymdlägesbildskedjan.

⁴ Med rymdburen elektronik avses den elektronik som satelliten innehåller för att utföra sitt uppdrag i rymden, exempelvis styrdator, orienteringssensorer, nyttolast och framdrivningssystem.

⁵ Med markbundna system avses exempelvis, kommunikation mellan markbundna noder, elkraftsdistribution och kommunikationskablar för internet.

Läsanvisning

- I kapitel 2 beskrivs grundläggande funktioner som behövs när en rymdlägesbild tas fram genom inmätningar av rymdobjekt.
- I kapitel 3 redovisas metoden för arbetet, med underkapitel för de olika funktionerna.
- I kapitel 4 finns arbetets resultat redovisat, med underkapitel för de olika funktionerna.
- I kapitel 5 presenteras slutsatserna med förslag på fortsatt arbete.
- Rapporten avslutas med en utförlig referenslista.

Rapporten är en sammanställning av underlag från tekniska experter inom olika ämnesområden:

- Rymdteknik och -system samt rymdlägesbild: Matti Nylund, Per Hägg, Björn Jakobsson, Ramin Farid Moghaddam, Seméli Papadogiannakis och Ola Rasmusson.
- Radarsensorteknik: Rolf Ragnarsson och Axel Tryblom.

2 Rymdlägesbild och inmätningförmåga

En rymdlägesbild baseras på förmågan att övervaka tillverkade föremål i banor runt jorden. En grundförutsättning är att mäta in rymdobjekt och utföra en banbestämning⁶ (eng. *Orbit Determination* eller *OD*).

Information om tillverkade föremål i banor runt jorden kan med fördel delas mellan de civila och militära aktörerna och därmed kan även de grundläggande militära behoven täckas av de civila övervakningsaktiviteterna. I den svenska rymdstrategin framhålls det att: *"De civila och militära grundbehoven är ibland desamma och möjliga att samordna"*. I strategin framhålls dessutom att: *"Sverige ska delta i internationella samarbeten för framtagande av och uppdateringar av en rymdlägesbild med beaktande av försvars och säkerhetsaspekter"* [3].

Rymdstyrelsen har fått ett regeringsuppdrag där de ska leda arbetet med att etablera en nationell rymdlägesbild. Detta ska ske i samverkan med ett antal utpekade myndigheter för att säkerställa såväl civila som försvars- och säkerhetsbehov [4].

Med egen rådighet avses i denna rapport, en oberoende förmåga att upprätthålla en egen begränsad inmätningkapacitet. Det är viktigt att poängtera att en fullständig militär rymdlägesbildsförmåga kräver en global inmätningkapacitet vilket är svårt att uppnå av en nation allena. För att nå en förmåga som uppfyller en aktörs militära rymdlägesbildsbehov krävs ofta samarbeten mellan olika länder och organisationer. Egen rådighet innebär därför en begränsad men ändå viktig förmåga att själv kunna mäta in satelliter i rymden. Både för att kunna verifiera att annan tillgänglig information är korrekt, samt för att kunna dela med sig av information och data till samarbetspartners. Med egen rådighet avses dessutom förmågan att kunna mäta in de satelliter som bedöms vara av stort militärt intresse att följa mer noggrant eller som saknas i andra aktörers tillgängliga kataloger.

⁶ Banbestämning är en matematisk metod att från sensordata ta fram ett rymdobjekts banparametrar.

Det finns olika sätt en rymdlägesbild kan uppnås:

- Anskaffa egen kapacitet.
- Köpa tjänster via kommersiella företag.^{7,8}
- Delta i internationella militära samarbeten där datadelningsavtalet mellan Försvarmakten och det amerikanska rymdkommandot är ett exempel [5].
- Delta i multilaterala internationella samarbeten så som via EU-SST [6].

Balansen mellan egen förmåga och information införskaffad från tredje part är ett val av hur stor integritetskritisk uppfyllnad som eftersträvas.

2.1 Satellitbanor och typiskt användningsområde

Satellitbanor delas normalt upp i ett antal typer beroende på deras höjd över jordytan men även dess excentricitet (hur elliptisk banan är).

FOI upprätthåller en databas, kallad El Corazon, som i dagsläget innehåller cirka 27 000 registrerade rymdobjekt i omloppsbana kring jorden. Figur 1 visar distributionen av rymdobjekt i omloppsbana kring jorden för olika höjder i låg jordbana. I figuren framkommer det tydligt att större delen av de aktiva rymdobjekten befinner sig mellan 400-600 kilometers höjd.

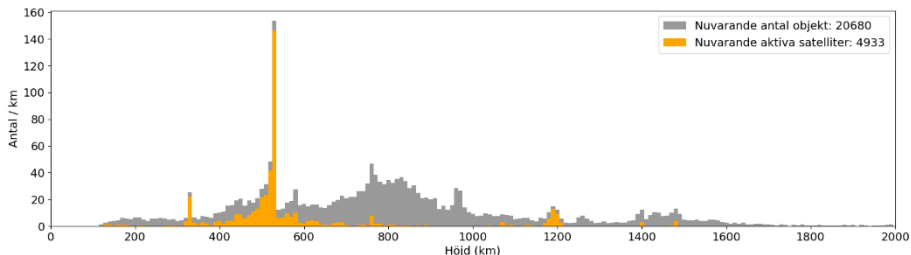
Satelliter placeras i olika banor beroende på deras användningsområde och uppdrag. I Tabell 1 nedan definieras de olika bantyperna och deras typiska användningsområden: låga jordbanor (*eng. Low Earth Orbit, LEO*), mellanhöga jordbanor (*eng. Medium Earth Orbit, MEO*), högelliptiska jordbanor (*eng. Highly Elliptical Orbit, HEO*), geostationära jordbanor (*eng. GEO Stationary Orbit, GEO*) och begravningsbana (*eng. Graveyard orbit*)⁹. Notera att det finns undantag från det normala användningsområdet, exempelvis jordobservation från geostationära jordbanor.

⁷ För satelliter i låga jordbanor är exempelvis LeoLab en aktör. För övervakning av geostationära banor är ExoAnalytics aktiva. Även svenska SSC satsar på en kommersiell inmätningkapacitet med tillhörande tjänster för att mäta in objekt från låga upp till geostationära banor.

⁸ Space News, Japan Air Self Defense Force awards contract to LeoLabs, <https://spacenews.com/leolabs-contract-japan-ministry-of-defense/>. [Använd 7 juni 2022].

⁹ Begravningsbana är ett samlingsnamn på de banor som operatörerna använder för att pensionera satelliter i när de antingen har för lite bränsle kvar för att kunna utföra en så kallade *station-keeping*-manöver (vilka säkerställer satellitens position i den tilldelade positionen i geostationära jordbana), eller när satelliten av andra anledningar ska tas ur drift. Denna bana ligger utanför, på ett större avstånd från jorden, för att på så sätt inte påverka den aktiva och viktiga geostationära banan.

För typisk militär användning av de olika bantyperna hänvisas läsaren till FOI-rapporten, *Inmätning av satelliter – En studie av radarsensortillämpning* [7].



Figur 1. Visualisering av distributionen av rymdobjekt i omloppsbana kring jorden för olika höjder i låg jordbana (LEO). Data taget från FOI:s databas (El Corazon, 23 maj 2022).

Tabell 1 Sammanfattning av de olika bantyperna och deras användningsområden.

BANTYP	BANHÖJD	TYPISKT ANVÄNDNINGSMRÅDE
LEO	Upp till 2000 km	Jordobservation och kommunikation ¹⁰
MEO	Mellan 2000 – 35 786 km	Position, navigation och tidssynkronisering
HEO ¹¹	-	Kommunikation
GEO	35 786 km	Kommunikation
Graveyard	>36 200 km	Förbrukade satelliter

2.2 Inmätningssensor

För egen rådighet krävs tillgång till egna sensorer som har kapacitet att mäta in satelliter. För närvarande används vanligtvis två olika typer av system för att mäta in rymdobjekt. Det är system som antingen använder optiska sensorer eller radarsensorer. De används vanligtvis för:

¹⁰ På senare år placeras allt fler kommunikationssatelliter i låga jordbanor, ofta som en del av de nya megakonstellationerna som exempelvis Starlink-konstellationen.

¹¹ Elliptiska banor med hög eccentricitet som befinner sig långt från jorden i en del av banan och närmare i en annan del av banan, exempelvis Molnijabanor.

- Följning (*eng. tracking*) innebär att man regelbundet mäter in satelliter med kända satellitbanor för att förbättra noggrannheterna av banparametrarna. En noggrannare banbestämning kan utföras med denna typ av inmätning.
- Övervakning (*eng. survey*) innebär inmätning där man eftersträvar att finna nya satelliter, eller hitta satelliter som inte längre kan följas på grund av att deras banparametrar inte är tillräckligt noggranna. Detta kan exempelvis behövas efter att en satellit genomfört en större bankorrigerings. En mindre noggrann banbestämning kan utföras med denna typ av inmätning, men den möjliggör att satelliten kan följas och mätas in enligt metoden ovan.

Vissa sensorer är skräddarsydda för antingen följning eller övervakning, medan andra kan växla mellan dessa uppgifter.

Tabell 2 presenterar vilken bantyp som lämpligen mäts in med de olika sensortyperna och var dessa sensorer med fördel placeras på jorden, under vilka tidpunkter de kan användas, deras begränsningar, samt deras lämplighet för följning eller övervakning.

Tabell 2 Sammanfattning av den typiska användningen av olika sensorer för inmätning av olika bantyper och användningsområde, sensorns begränsningar och lämplig placering.

SENSOR	BANTYP	PLACERING	BEGRENSNINGAR I TID	ANVÄNDNINGSMOMRÅDE
Radar	LEO ¹²	Höga latituder	Inga	Följa och övervaka
Passiv radar ¹³	LEO	Höga latituder	Inga	Följa ¹⁴ och övervaka
Optik	LEO	Höga latituder	Skymning och gryning	Följa och övervaka
	MEO	Undvik polerna	Mörker	Följa och övervaka
	HEO	Höga latituder	Mörker	Följa och övervaka
	GEO	Runt ekvatorn	Mörker	Följa och övervaka
	Graveyard	Runt ekvatorn	Mörker	Följa och övervaka
Laser ¹⁵	LEO	Höga latituder	Mörker	Följa

2.2.1 Radarsystem

Radarsystem riktade mot rymdobjekt kan med fördel användas för att ge högkvalitativ indata till banbestämningen, se även avsnitt 4.2.3.1. Radarsystem bedöms vara det i särklass vanligaste systemet för inmätning av rymdobjekt i låga jordbanor. De står för merparten av de inmätningar som görs av aktörer runt om i världen. Radarsystem kan användas dygnet runt, är väl fungerande i alla väderlekar och täcker snabbt och effektivt stora observationsvolymmer. Rådata från radarsystem behöver bearbetas i ett första steg för att få fram användbar indata för banbestämningen. Förbearbetningen tar fram avstånd och hastighet som funktion av tid av de inmätta satelliterna relativt radarsystemet. Avståndet till satelliten erhålls från tidsförskjutningen från utsänd signal till dess ett

¹² För låga jordbanor gäller generellt att de höga latituderna är fördelaktiga för polära och nära-polära banor. För exempelvis Starlinksatelliterna är en position på lägre latitud att föredra.

¹³ Passiv radar är i experimentfasen och studeras i forskningsändamål och används ännu inte operativt för inmätning.

¹⁴ Följning kräver multistatisk konfiguration där data från flera bistatiska par fusioneras för bättre inmätningprecision.

¹⁵ Lasersensorer används för närvarande i begränsad omfattning. Fördelen är att de ger noggrann avståndsinformation men det krävs god kännedom om satellitens bana innan en observation utförs.

radareko tas emot. Satellitens hastighet i avståndsled kan beräknas från dopplerskiftet i frekvens hos det mottagna ekot relativt utsänd frekvens.

2.2.2 Optik

För inmätning av satelliter med passiv optik används teleskop. Teleskopen nyttjar satellitens reflekterade solljus som källa för att mäta in satelliter mot en i övrigt mörk stjärnhimmel.¹⁶ De har därför möjlighet att studera satelliter längre ut från jorden jämfört med radarsystem som skulle behöva sända med höga effektnivåer för att nå satelliter i höga banor. Teleskop som används för övervakning och inmätning kan vara byggda för klassisk astronomi, med hög ljuskänslighet. Dessa teleskop används lämpligen för att mäta in satelliter i mellanhöga jordbanor, geostationära jordbanor eller begravningsbana. Ett av problemen med klassiska astronomiteleskop är att de optimerats för att utföra astronomiobservationer och har därmed en begränsning i att följa satelliter med högre vinkelhastighet (satellitens hastighet relativt observatören). De är i normalfallet byggda för att följa objekt med betydligt långsammare rörelse över himlen (exempelvis planeter och kometer) än satelliter i låga jordbanor.

Det har på senare år börjat produceras mindre teleskop skräddarsydda för inmätning och övervakning av rymdobjekt med betydligt snabbare följningshastigheter och med större observationsarea (*eng. Field Of View*). Dessa teleskop kan därmed vara mer lämpliga att använda för övervakningsuppgifter.

2.2.3 Laser

Med en laser kan en satellit mätas in med hög noggrannhet. Lasersystemet sänder en laserpuls mot en satellit och mäter tidsskillnaden från att pulsen skickades tills den reflekterade pulsen (av satellitytan) mottas i ett optiskt teleskop. Produkten av tidsdifferensen och ljushastigheten motsvarar dubbla avståndet mellan satelliten och lasersystemet.

En möjlig realisering av ett lasersystem är att använda en passiv optisk sensor med vidvinkelobjektiv för att först grovt bestämma satellitens bana under en kort tid, för att sedan låta lasern mäta in satelliten under samma passage, baserad på den första bredvinkligna sensors inmätningssinformation.

Lasersystem används i en begränsad omfattning för inmätning av rymdobjekt, och då främst för satellitmissioner där satellitens bana behöver bestämmas med väldigt hög noggrannhet. Denna teknik används exempelvis för satelliter där man mäter istjocklek och snödjup samt där satellitnavigationsdata inte ger tillräcklig hög noggrannhet. Tekniken med laser används även vid inmätningssök av rymdskrot.

¹⁶ Det finns även experimentsystem där man mäter in satelliter på dagen med optiska sensorer.

3 Metod

Kapitlet redovisar metodiken och hur kunskapsuppbyggnaden inom rymdlägesbild genomförts. Resultaten från dessa aktiviteter redovisas i kapitel 4. Kunskapsuppbyggnad har genomförts genom litteraturstudier av relevanta vetenskapliga artiklar och genom publikationer av egna konferensbidrag. FOI har dessutom deltagit i ett flertal konferenser relaterade till rymdlägesbild och inmätningar av rymdobjekt. Ett antal prototypmjukvaror och simulatorer har tagits fram för att kunna verifiera resultat från andras arbete och för att skapa en lärandemiljö med praktiskt arbete. Vidare har inmätningar utförts av satelliter både med optiska sensorer och med radarsensorer. Dessa data har därefter analyserats och banbestämning har utförts. För referenser till genomförda arbeten hänvisas läsaren till resultatkapitlet.

3.1 Allmän kunskapsuppbyggnad

Kunskapsuppbyggnaden kring rymdlägesbild påbörjades på FOI redan för över tio år sedan. I FOI-rapporterna *SSA – Behöver Sverige en rymdlägesbild?* (2011) [8] och *Svensk militär rymdlägesförmåga* (2012) [9] beskrivs behoven av en militär rymdlägesbild.

En rymdobjektsdatabas med mjukvara för automatiserad informationsinhämtning har sedan dess tagits fram. Öppen tillgänglig information inhämtas regelbundet och fyller automatiskt databasen med relevant information. Denna databas är och har varit ett värdefullt verktyg att utgå från i våra olika forskningsfrågor. Ett antal analysverktyg som behandlar information från denna databas har tagits fram, exempelvis funktioner som identifierar och sorterar fram de för Försvarsmakten intressanta satelliterna för vidare bearbetning och analyser.

För att bygga upp kunskap kring inmätning, de processer och funktioner som behöver behärskas, har mestadels simulatorer använts. Dels för att simulera satellitbanor för olika typer av satelliter, dels för att generera simulerade mätdata från olika typer av inmätningssystem. Utifrån detta har olika typer av banbestämningssystem studerats, analyserats och testats. Detta har varit ett naturligt och effektivt arbetssätt vad gäller förståelsen för militär rymdlägesbild. Det har inte funnits egna inmätningssystem att arbeta med och tillgången till extern inmätningssystem har varit begränsad.

Emellertid har det funnits viss möjlighet att genomföra experiment där inmätningssystem från (externa) operativa sensorsystem har nyttjats. Här valdes att mäta in objekt där:

- Det fanns god kännedom om exakta banor, exempelvis GPS-satelliter. Dessa kan då utgöra facit för våra banbestämningsanalyser.
- Det saknas noggrann information om de faktiska banorna. Där har istället TLE-data (eng. *Two-Line Element set*)¹⁷ använts.

Då en TLE endast ger en grov uppskattning av banan kan dessa inte utgöra något exakt facit för analyserna och kan därför inte användas för att utvärdera prestandan. Däremot kan de användas för att bedöma rimligheten, robustheten och stabiliteten i de studerade banbestämningsmetoderna. TLE-data som använts kommer från den öppet tillgängliga amerikanska objektkatalogen SpaceTrack [10].

3.2 Upprätthållande av rymdlägesbild

Metoden har innefattat att identifiera vilka funktioner som behövs och hur de olika funktionerna kopplas samman för att en rymdlägesbild ska kunna upprätthållas över tid. Det är därför både den samlade kunskapen om hur de olika funktionerna integreras tillsammans, men även vad som ingår i varje funktion, som behöver behärskas. Kapitlet beskriver genomförd kunskapsuppbyggnad av respektive funktion.

3.2.1 Inmätningar av rymdobjekt

Genom att använda externa sensorer så som EISCAT:s (eng. *European Incoherent Scatter Scientific Association*)¹⁸ UHF-radar för radarinmätningar och de optiska teleskopen från LCO (eng. *Las Cumbres Observatory*)¹⁹, har praktisk kunskap om inmätning byggts upp. Data från dessa inmätningar möjliggjorde även dataanalys. Framtida möjliga lågkostnadssensorer har studerats för att följa deras tekniska utveckling och lämplighet för just inmätning av rymdobjekt.

3.2.1.1 Optiska sensorer

LCO-teleskopen identifierades som lämpliga optiska sensorer och därefter startades en dialog med LCO för att undersöka möjligheterna med att använda deras teleskop för inmätning av satelliter. FOI köpte in 100 timmar observationstid på sex teleskop placerade på olika platser på jorden, från Maui på Hawaii i väster till New South Wales Australien i öster.

¹⁷ TLE är ett format för att beskriva banelement för ett objekt i jordbana.

¹⁸ EISCAT, EISCAT Radar Sites, <https://eiscat.se/about/sites/>. [Använd 7 juni 2022].

¹⁹ LCO, Las Cumbres Observatory, <https://lco.global/>. [Använd 7 juni 2022].

3.2.1.2 Radarsensorer

För praktiska erfarenheter kring radarinmätningar utförde FOI ett inmätningstillsammans med EISCAT och OHB Sweden under 2014.

FMV har under 2020 och 2021 finansierat två studier där FOI har undersökt hur en radar skulle kunna konstrueras och vilken prestanda som skulle krävas för att utföra inmätningar av för Försvarsmakten intressanta satelliter. I arbetet ingick även att undersöka sensorprestanda för radarn och radarmålarea för inmätta objekt. Genomförda litteraturstudier har syftat till att studera befintliga radarsensorers funktion och konstruktion, samt hur de har realiserats.

FOI har sedan 2020 deltagit i Nato-studiegruppen SET-293 TG *RF Sensing for Space Situational Awareness*. Arbetet har bedrivits genom periodiska möten där deltagarländerna har genomfört gemensamma aktiviteter. Huvudteman inom Nato-gruppen är bistatiska mätningar för detektion och följning av rymdobjekt i geostationär bana, karaktärisering av objekt i låg bana, samt studier av radarnätverk för övervakning och inmätning av rymdobjekt.

3.2.1.3 Experimentella inmätningmetoder

En intressant teknik som FOI påbörjat studier av är passiv radar. I ovanstående Nato-grupp (SET-293 TG) bedrivs ett arbete där man studerar möjligheterna att använda en så kallad passiv radar för inmätning av objekt i låga jordbanor. FOI har i detta arbete skrivit ett sekretessavtal med *Silentium Defence*²⁰ för att kunna utbyta idéer och erfarenheter kring denna teknik.

Under 2019 utfördes ett examensarbete på Uppsala Universitet på uppdrag av FOI. Arbetet syftade till att studera om och hur det svenska nätverket av så kallade *all-sky* kameror²¹ skulle kunna användas och nyttjas för inmätning av satelliter. Dessa kamerasystem är primärt utvecklade för detektion av meteoriter och för bestämning av meteoriters nedfallsbanor samt producera en prediktion av möjlig nedslagsplats.

En annan möjlig lågkostnadsteknik för att göra banbestämning av satelliter är att använda sig av öppen tillgänglig astronomidata. För att undersöka denna teknik genomfördes ett examensarbete vid Kungliga Tekniska Högskolan på uppdrag av FOI under 2022.

²⁰ Silentium Defence, Situational Awareness. Anytime, anywhere to protect what matters, <https://www.silentiumdefence.com.au/>. [Använd 7 juni 2022].

²¹ All-sky kameror är kameror med stort synfält (hela synliga himmelssfären).

3.2.2 Dataanalys

För att kunna gå från sensordata till användbar information behöver en dataanalys utföras. FOI har deltagit som svensk representant i ett ESA-initiativ (eng. *European Space Agency*) för att ta fram en europeisk gemensam mjukvara för analys av inmättningsdata. Arbetet genomförs i form av ett öppen-källkodsprojekt *SST core software (SST-CSW)*. I detta projekt samarbetar tolv europeiska länder och ESA. I detta samarbete har ett användarforum påbörjats som har ansvaret för att ta fram och granska processen för gemensam mjukvaruutveckling och stödja arbetet med den initiala kravställningen för mjukvaran.

FOI har även utvecklat egna simulatorer för dataanalys, samt nyttjat och utvärderat kommersiella verktyg, så som *STK* (eng. *Systems Tool Kit*) [11] och *SORTS++* (eng. *Next-generation Space Object Radar Tracking Simulator*) [12].

3.2.3 Databas

För att hantera en objektkatalog med information som kan användas för att generera användbara tjänster för en militär rymdlägesbild är det lämpligt att använda en relationsdatabas. På så vis samlas och sparas data på ett strukturerat sätt som möjliggör snabba sökningar, kopplingar till relaterad data samt automatiserad läsning och skrivning. FOI har under många år arbetat med en satellitobjektsdatabas (relationsdatabas). När nya intressanta och användbara datakällor identifieras inkluderas dessa för att utöka informationsinnehållet i databasen.

3.2.4 Observationsplanering

Observationsplanering syftar till att prioritera vilka objekt som ska mätas in, när, och med vilken sensor. FOI har påbörjat initiala studier i ämnet och utökad verksamhet planeras framöver. Viktiga frågeställningar har identifierats och en litteraturstudie ha påbörjats om hur observationsplanering utförs av olika aktörer.

3.2.5 Tjänster

För de civila aktörerna är det främst tre tjänster som efterfrågas från en rymdlägesbild, fragmenteringsdetektering och -följning, återinträdesanalys samt kollisionsriskanalyser. FOI har inte utförligt studerat hur dessa i huvudsak civila tjänster tas fram. Dessa tjänster finns däremot tillgängliga i *SST-CSW* och kan med fördel studeras med hjälp av denna mjukvara.

För de militära behoven finns det tjänster som inte täcks av *SST-CSW*. Överflygningsanalys är en sådan tjänst, att för en given position och tidpunkt göra en analys av vilka satelliter som kan övervaka denna position från rymden.

FOI har tagit fram en överflygningsdemonstrator åt Försvarsmakten. De har därmed möjlighet att utvärdera denna i deras övnings- och planeringsverksamhet.

4 Resultat

Kapitlet redovisar resultaten från den verksamhet och forskning som har bedrivits på FOI kring vad som krävs för att upprätthålla en rymdlägesbild med hjälp av egen tillgänglig mätningssinformation. Först presenteras kunskapshöjande aktiviteter och de studier som genomförts. I det efterföljande avsnittet presenteras hur en rymdlägesbild upprätthålls ur ett systemperspektiv. Där ingår information om vilka funktioner som behövs och hur de samarbetar för att upprätthålla en rymdlägesbild över tid. Avsnittet syftar till att ge stöd för vilka funktioner som är viktiga samt hur de hör ihop och samverkar.

4.1 Kunskapshöjande aktiviteter

Den grundläggande kunskapen som behövs för förståelse av satelliter och deras banor är bandynamik. De teoretiska grunderna i bandynamik finns väl beskrivna i litteraturen. För teoretisk inhämtning i allmän bandynamik nyttjas framförallt tre böcker på FOI: *Satellite Orbits* [13], *Orbital Mechanics for Engineering Students* [14] och *Fundamentals of Astrodynamics and Application* [15]. Dessa referenser har använts vid framtagning av prototypmjukvara.

En årligt återkommande konferens är *The Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference* (AMOS). Det är den största och mest relevanta konferensen på temat rymdlägesbild och den växer i omfattning varje år. Konferensen har deltagande från både den civila och militära intressesfären och belyser rymdlägesbild från policynivå till detaljerade tekniska forskningsresultat. FOI har deltagit i denna konferens vid ett antal tillfällen och under konferensen 2021 presenterade FOI ett bidrag om Sveriges nationella satsning på rymdlägesbild [16]. FOI har återrapporterat skriftligen från fyra tidigare konferenstillfällen, se referenserna [17], [18], [19] och [20].

För en mer renodlad militär aspekt på rymdlägesbild har FOI följt den årliga militära SSA-konferensen *Military SSA* i London, även detta har återrapporterats skriftligen i referenserna [21], [22], [23] och [24].

En annan konferens som FOI deltagit i är den av ESA anordnade *8'th Space debris conference*, 2021. Tillsammans med ESA författades ett konferensbidrag om status och tillvägagångssätt för utvecklingen av SST-CSW [25]. Det går dessutom att ta del av en skriftlig återrapportering från konferensen [26].

För mer praktisk kunskap och erfarenhet inom området har FOI utvecklat och använt externa mjukvaror. En internationellt etablerad mjukvara för grundläggande kunskaper om satelliter och deras banor är STK [11]. För att utveckla egen prototypmjukvara har programmeringsbiblioteket *Orekit* [27] använts. Orekit har stöd för bandynamik men även för initial banbestämning (eng. *Initial Orbit Determination* eller *IOD*) och förfinad banbestämning.

FOI har under projektets gång dokumenterat de aktiviteter som genomförts i rymdlägesbildsprojektet i ett antal FOI-Memon [28], [29] och [30].

4.1.1 Studier

Ett antal tillämpade studier har genomförts inom rymdlägesbild.

4.1.1.1 Optik

Aktiva optiska system (laser) har studerats. Med hjälp av laserpulser och dess satellitreflektion kan resulterande tidsinformation användas för att bestämma satellitens bana med en hög noggrannhet (precision på enstaka meter). Detta arbete finns dokumenterat i FOI-rapporten: *Laserinmätning av satelliter – En förstudie* [31]. Rapporten beskriver översiktligt hur ett lasersystem kan användas för inmätning av satelliter. Det har även utförts arbete med att bestämma och förfina banan med öppet tillgängligt laserdata, dokumenterat i rapporten: *Banbestämning av rymdobjekt – Orbit Determination (OD)* [32].

För passiva elektrooptiska system har FOI utfört en förstudie: *Elektrooptisk inmätning av satelliter - En förstudie av passiv teknik* [33]. Rapporten går igenom de tekniska aspekterna kring att mäta in satelliter och rymdskrot med astronomiska teleskop samt hur detta skulle kunna genomföras med mindre, kommersiella teleskop.

4.1.1.2 Radar

FOI-rapporten *Inmätning av satelliter – En studie av radarsensortillämpning* [7] beskriver hur ett radarsystem skulle kunna utvecklas. Kvaliteten och kvantiteten på inmätningarna ska vara sådana att tillräcklig noggrannhet och robusthet uppnås i banbestämningssystemet och andra banbestämningssystem. Syftet med ett radarsystem skulle vara att upprätta och underhålla en satellitkatalog för operativ militär rymdlägesbild. Rapporten beskriver bland annat de fundamentala storheterna för design av ett radarsystem, bedömt intressanta satelliter, nödvändig banparameternoggrannhet och radarsimuleringar (den geografiska positionens effekt på dess observationsmöjligheter). Även frågor kring radarsystemet som ett materielsystem behandlas översiktligt.

Ett radarsystems räckvidd avgörs av utsänd signals effekttäthet vid satelliten, av målobjektets effektiva yta, även kallat radartvärnsytta (*eng. Radar Cross Section* eller *RCS*) och mottagar-systemets egenskaper (exempelvis egenbrus och mottagarantennens effektiva yta). Traditionellt har tillräcklig räckvidd för inmätning av objekt i omloppsbana erhållits med monostatiska radarsystem med stora parabler, ofta flera tiotal meter i diameter [34]. Dessa har potential att mäta in små objekt på stora avstånd. Denna traditionella typ av radarsystem har dock vissa nackdelar kopplade till hur systemen är utformade. Exempelvis att ett

pulsat system med hög momentan uteffekt krävs på sändsidan och att den stora parabolen tar tid att rikta om.

Dessa egenskaper leder till att systemen är bäst lämpade för att följa enstaka kända objekt och mindre lämpade för att avsöka större delar av himlavalvet. En fördel med monostatiska system är att de ofta har hög vinkelupplösning (smal lob) vilket exempelvis kan utnyttjas för radaravbildning av enskilda objekt med hjälp av ISAR-teknik (*eng. Inverse Synthetic Aperture Radar*) [35].

Bi- och multistatiska radarsystem bygger i grunden på att systemets sändar- respektive mottagardelar är fysiskt separerade, detta avstånd benämns systemets baslinje. Detta arrangemang ger bättre möjligheter att sända med en kontinuerlig signal (lägre momentan sändeffekt) men ställer högre krav på synkroniseringen mellan de fysiskt separerade delsystemen.

Bistatiska radarsystem har funnits sedan man började studera radarsystem, dess popularitet har däremot varierat över tiden. I dagsläget så har intresset för bistatiska system ökat, både med kooperativa sändare (aktiva) eller icke-kooperativa sändare (passiva). För rymdövervakning har fokus börjat skifta mer mot bistatiska system [36], [37]. Detta intresse drivs dels av den teknologiska utvecklingen som gett bättre möjligheter att synkronisera delsystem, dels av den utveckling som möjliggör radarsystem med elektroniskt styrda lober. Elektroniskt styrda lober medför ett system som snabbt kan riktas om. Dessa elektroniskt styrda system, så kallade AESA-system, realiseras med gruppantenn-teknik som innebär att radarsystemets antenner består av ett stort antal antennelement vilka kombineras och synkroniseras för att uppnå hög riktverkan i givna bäringar.

För bi- och multistatiska system finns ur militär synvinkel taktiska fördelar då man har möjlighet att använda flera olika signalkällor och att man inte tvingas röja mottagarens position. Detta bidrar till att systemet påverkas mindre av störning och är svårare att attackera med direkta angrepp.

Dagens antennsystem bestående av gruppantenner med elektronisk styrning möjliggör hög flexibilitet. Exempelvis att söka av områden samtidigt som man följer ett eller flera objekt [38]. Denna kapacitet att utföra flera uppgifter samtidigt kan erhållas antingen genom att olika undergrupper av antennelement bildar lober i olika riktningar eller genom att observationstiden delas upp i korta periodiska tidsintervall under vilka alla antennelement används för att rikta antennsystemet i en viss riktning (tidsdelning). En annan fördel är möjligheten att undertrycka störare i vissa riktningar från gruppantennen. För att realisera ett sådant system krävs dock en omfattande infrastruktur som kan hantera alla nödvändiga beräkningar efter digitalisering, vilket är en begränsande faktor för denna typ av system.

Nya rymdövervakande system, exempelvis det tyska GESTRA-systemet [39] eller det franska GRAVES-systemet [40], [41], baseras i allt högre grad på

gruppantenner istället för parabolantenner [42]. Båda dessa system är bistatiska. I dagsläget är det dock inte möjligt att med gruppantennbaserade system nå samma antennvinst som för traditionella system. De gruppantennbaserade systemen tenderar därför i nuläget att vara begränsade till inmätning av större objekt i låga jordbanor. Framtida, avancerade signalbehandlingsalgoritmer förmodas dock leda till en ökad kapacitet för denna typ av system [43].

Globalt kommer det att finnas ett behov av, och nytta med, båda sortens system (de smal-lobiga och de multi/bred-lobiga). Detta för att kunna upprätthålla både täckning och effektiv inmätningkapacitet för alla de banbestämningsprodukter som kan tänkas behövas för den ökande mängden av satelliter i låga jordbanor. Gruppantenner kommer att användas för satellitinmätningar av flera objekt samtidigt och sökning efter nya satelliter, medan parabolbaserade system kommer vara mer fokuserade på högupplöst avbildning och för inmätning av specifika objekt för specifika syften. För sökning av objekt ut mot geostationära jordbanor kommer parabolbaserade system fortsatt vara de dominerande radarsystemen.

Givet att en svensk militär rymdlägesbild i första hand är inriktad på satelliter i låga jordbanor förmodas gruppantennbaserade systemen vara mest relevant.

Sverige saknar idag egen radarinmätningkapacitet för satelliter i omloppsbana. Det nya gruppantennbaserade systemet EISCAT-3D [44] kommer att kunna användas för denna typ av mätningar, det är dock huvudsakligen avsett för vetenskapliga studier av jonosfären. Då det är ett internationellt projekt med flera länder lämpar det sig för inmätning av rymdskrot, däremot är det inte tillåtet att nyttjas för militära intressen.

Bistatisk radar med lång baslinje

Deltagandet i Nato (SET-293), se avsnitt 3.2.1.2, har varit bra för att fånga upp de internationella trenderna, identifiera aktuella forskningsproblem och få kännedom om hur andra aktörer angriper radarinmätningproblematiken. De bistatiska mätningarna med lång baslinje som har genomförts och studerats i Nato SET (SET-293) är av begränsat intresse för den nationella militära rymdlägesbildningen. Dessa mätningar använder huvudsakligen större radioteleskop som kräver en separation mellan sändare och mottagare på tusentals kilometer. Att realisera denna typ av mätningar inom ramen för ett nationellt program är idag ej realistiskt.

4.1.1.3 Civil rymdlägesbild

Under 2017 beställde Rymdstyrelsen en FOI-rapport [45] som studerade möjligheterna att delta i EU-SST-konsortiet²². Vid den tiden var inte Sverige redo att delta i brist på lämpliga sensorer och analysförmågor. Detta är på nytt en aktuell fråga och Sverige har förklarat sin avsikt att delta med en analysförmåga till EU-SST vid årets slut (2022). Under hösten 2022 har det inkommit ett Regeringsuppdrag till Rymdstyrelsen att ansvara för samarbete och mandat att teckna avtal med EU-SST [46].

Under 2021 genomfördes ett arbete åt Rymdstyrelsen för att ge förslag på hur en svensk nationell rymdlägesbild skulle kunna realiseras. FOI gav expertstöd i form av skriftliga underlag och deltog i diskussionsmöten. Regeringsuppdraget avrapporterades av Rymdstyrelsen i rapporten: *En operationell rymdlägesbild – förslag till hur en nationell förmåga kan etableras* [47]. Rapporten föreslår att den nationella rymdlägesbildens ska byggas upp stegvis med en utökad kapacitet och förmåga i varje steg. Dessutom föreslås att de civila och militära grundfunktionerna kan nyttjas gemensamt där det är möjligt

4.2 Upprätthållande av rymdlägesbild

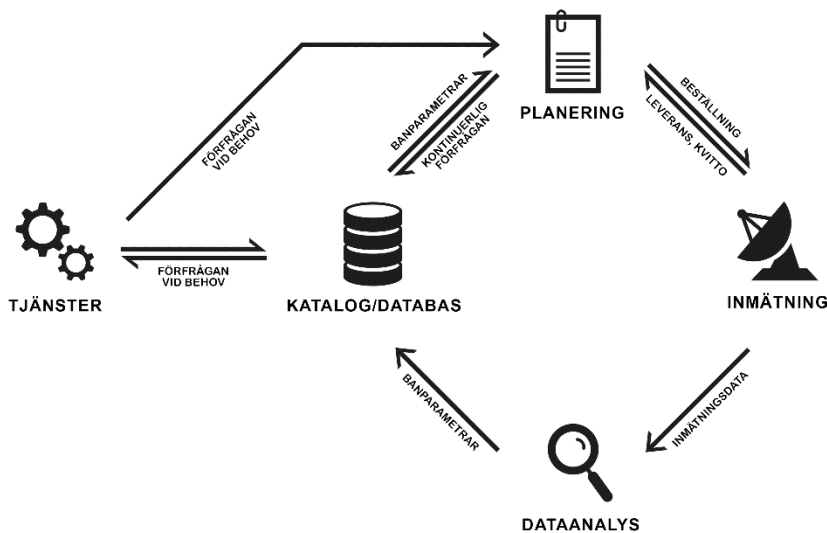
I detta avsnitt beskrivs de aktiviteter och funktioner som krävs för att etablera och upprätthålla en rymdlägesbild med egen rådighet. Exakt vad egen rådighet kan tänkas bestå av är ännu en öppen fråga. Grundidén är att en rymdobjektskatalog ska innehålla specifik information om de satelliter som är av intresse för Försvarsmakten. Den egna rådigheten består i att banparametrar för dessa satelliter ska hållas aktuella och kontinuerligt vara av tillräcklig noggrannhet för samtliga för Sverige relevanta militära rymdlägesbildstjänster. Fortsatt i rapporten kommer termen *banparametrar* användas vilket inkluderar såväl banelementen, som osäkerheter och tiden då dessa är giltiga. Banparametrar är denna kompakta datamängd som, i de olika militära rymdlägesbildstjänsterna, representerar satelliternas bana.

I Figur 2 nedan presenteras hur de olika funktionerna logiskt är sammankopplade. Vissa mindre viktiga kopplingar har utelämnats ur figuren. Det finns normalt en gränsyta mellan tjänster och observationsplanering där en användare kan begära att en inmätning av en specifik satellit ska ske oberoende av vad den automatiska planeringen har planlagt för observationer.

För att kunna utveckla en operativ rymdlägesbild behövs det en inmätningförmåga. Detta kan göras på olika sätt men kräver tillgång till sensorer

²² EU-SST är en EU-gemensam SST-förmåga som hanterar upp till 270 europeiska satelliter. Operatörerna för dessa satelliter får nu SST-tjänster från denna organisation, <https://www.eusst.eu/>. [Använd 7 juni 2022].

med kapacitet att mäta in hela eller delar av satelliternas tillstånd (position och hastighet) över tid. *Inmätningfunktionen* beskrivs i avsnitt 4.2.1 och 4.2.2.



Figur 2 Illustration av rymdlägesbildskretsloppet. I figuren finns de olika rymdlägesbildsfunktioner som krävs för att uppnå en rymdlägesbild med egen rådighet.

Dataanalysfunktionen bearbetar inmättningsdata för att omvandla den till användbar information i form av banparametrar. *Dataanalysfunktionen* beskrivs i avsnitt 4.2.3.

Dessa banparametrar, tillsammans med inmättningsdata från sensorer, behöver sparas och tillgängliggöras på ett lämpligt sätt för att underlätta den efterföljande hanteringen. Detta görs lämpligen av en *Databasfunktion* och finns beskrivet i avsnitt 4.2.4.

I samband med att banparametrar genereras i *Dataanalysfunktionen* genereras och upprätthålls dessutom viktig information om osäkerheter i banparametrarna kontinuerligt över tid. Baserad på uppdaterad information om osäkerheter från *Dataanalysfunktionen* som sparas i databasen kan beslut om nya inmätningar göras av *Observationsplaneringsfunktionen*. Denna funktion finns beskriven i avsnitt 4.2.5.

Det är tjänsterna i en militär rymdlägesbildsförmåga som är slutprodukten för en användare. Ett exempel på en militär rymdlägesbildstjänst är en överflygningsanalys som beskrivs i avsnitt 4.2.6.

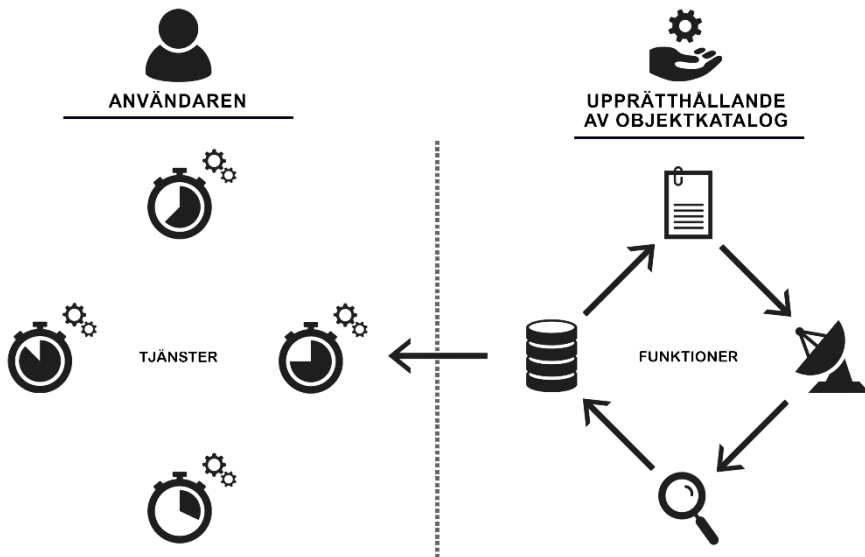
För att etablera en egen rymdlägesbild med egen rådhighet är *osäkerhetsinformation* en viktig parameter att hantera. Om rymdlägesbilden saknar osäkerhetsinformation finns det inget sätt att ge kvalitetsindikation kring de tjänster som tas fram. Detta leder till en begränsning både i användandet av tjänsterna men även i vilka militär rymdlägesbildsförmågor och tjänster som kan utvinnas ur informationen.

Osäkerhetsinformationen är den information som anger hur väl man skattat satellitens position och hastighet. Osäkerhetsinformationen behöver hanteras i alla funktioner av en rymdlägesbild. Exempelvis:

- Inmättningsaktiviteter påverkas av osäkerheter i var satelliten som ska mätas in befinner sig.
- Osäkerheter i sensorns inmätning (brus och bias) måste hanteras i dataanalysen tillsammans med osäkerheter i de teoretiska modellerna, exempelvis osäkerheten i vald banmodell.
- Från dataanalysen kommer de samlade osäkerheterna ingå i banparametrarna. Osäkerheten växer med tiden och kan endast justeras med nya inmätningar.

Observationsplaneringen måste därför kontinuerligt planera in nya inmätningar av satelliterna, annars kommer kunskapen om satellitens bana minska, och risken ökar för att satelliten inte kan återfinnas utan en bredare sökinsats.

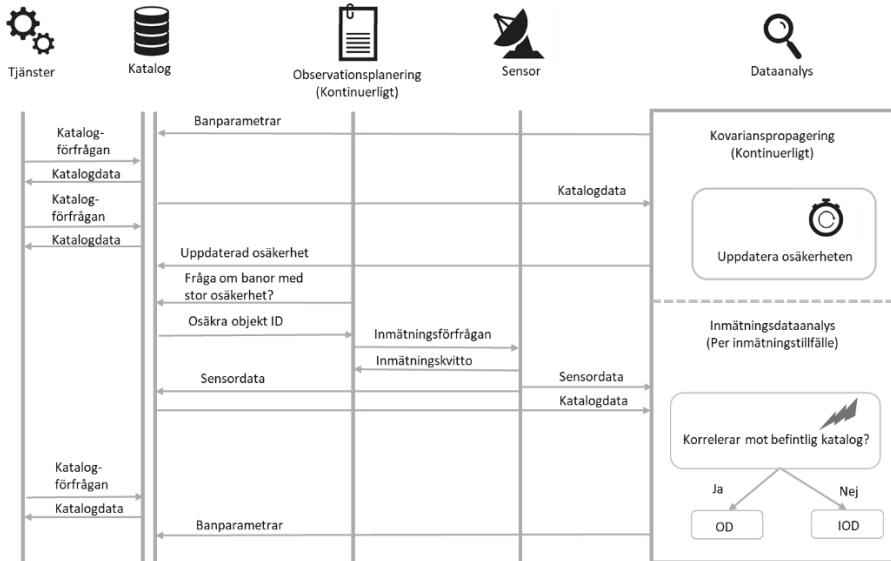
I Figur 3 presenteras en generisk delning mellan hur skapandet av rymdlägesbildsfunktionen (till höger) är fränkopplad från användaren (till vänster). Funktionerna för upprätthållande av objektkatalogen är uppbyggd som ett eget kretslopp. Respektive tjänst kan hämta relevant information från rymdobjektskatalogen och kan aktiveras efter användarens behov. Olika tjänster har olika databehov för att lösa sina specifika uppgifter.



Figur 3 Illustration av funktions- och tjänsteuppdelningen. De olika tjänster (vänster i figuren) som aktiveras av användaren har egna tidslinjer som är oberoende av varandra och från funktionerna för upprätthållande av objektkatalogen (höger i figuren).

I Figur 4 illustreras ett förenklat sekvensdiagram kring de aktiviteter och transaktioner som sker mellan de olika funktionerna. Figuren läses uppifrån och ned och vertikallinjen motsvarar tidsaxeln. Då läsaren kommit längst ned i diagrammet återstartas aktiviteten från början i ett ständigt pågående kretslopp. Dataanalysen har två funktioner, i den övre delen i figuren illustreras kovarianspropageringen²³, det är en oberoende process där tiden sedan den senaste inmätningen kontinuerligt avgör om det är dags att uppdatera osäkerhetsinformationen för banparametrarna (då inga nya inmätningar finns tillgängliga). Dessa nya uppdaterade osäkerheter uppdateras därför regelbundet i databasen för att kännedom om satelliternas aktuella osäkerhet ska finnas tillgänglig för både observationsplaneringen men även för tjänsterna. När osäkerheten är för stor kommer observationsplaneringen initiera nya inmätningar av dessa satelliter. När inmätningen är utförd kommer inmätningarna att trigga inmätningens analys genom att processen får tillgång till nya inmätningensdata.

²³ Med kovarianspropagering avses funktionen som uppdaterar osäkerheterna i satellitens banparametrar vid avsaknad av nya inmätningar.



Figur 4 Illustration av ett förenklat sekvensdiagram med ett möjligt dataflöde mellan de olika funktionerna i en rymdlägesbild. Notera att sista och första sekvensen är identiska och åskådliggör att hela sekvensen startas om på nytt. Sekvensdiagrammets tidsaxel är de vertikala linjerna, där tiden löper uppifrån och ned. Pilarna representerar dataflöde mellan de olika funktionerna. Processerna i Dataanalysen är representerade av boxarna. Det finns både tidsstyrda processer, den övre uppdateringen av osäkerheten och händelsestyrda processer som hanterar nya inmätningsskivitor (nedre processen i dataanalysen).

Korrelationsfunktionen avgör om mätningarna överensstämmer med en redan katalogiserad satellit eller om det ska anses tillhöra ett nytt objekt. Utifrån detta utförs antingen en förfinad banbestämning eller initial banbestämning. Banbestämningens produkt kommer därefter levereras med uppdaterade banelement och banosäkerheter till katalogen. Sekvensen kan utföras på lite olika sätt men är ändå medtagen i rapporten för att läsaren ska få en uppfattning om problemets komplexitet.

4.2.1 Inmätningar

Två experiment har genomförts för att mäta in satelliter, dels genom att använda EISCAT-radarn, dels med LCO:s teleskop. Med EISCAT genomfördes inmätningar av satelliter med kända banor, det var de svenska satelliterna Odin och Mango. Med LCO genomfördes observationer mot tio olika satelliter i geostationära jordbanor, tre i begravningsbana, tio satelliter i mellanhöga jordbanor (GPS-satelliter) och en satellit i en högelliptisk jordbana (Molnija).

4.2.1.1 Radarinmätningar

Under 2014, initierades ett samarbete mellan FOI, EISCAT och OHB Sweden där syftet, för FOI:s del, var att studera banbestämning baserat på EISCAT-mätningar. Ett försök planerades och utfördes med de svenska satelliterna Mango (PRISMA-projektet) och Odin som testobjekt. Båda dessa satelliter var vid tiden för försöket aktiva och opererades båda nominellt. Båda satelliterna var utrustade med GPS-mottagare ombord och OHB Sweden utförde sin nominella förfinade banbestämning baserad på satelliternas nedladdade GNSS-navigationsdata (eng. *Global Navigation Satellite System*). Därmed fanns bra kännedom om var satelliterna befann sig i bana vid tidpunkterna för EISCAT-mätningarna. De GPS-baserade banbestämningarna kunde alltså användas som referens för experimentet. Slutsatserna från detta arbete finns dokumenterade i en FOI-rapport: *Orbit determination of the MANGO satellite based on synthetic EISCAT observations* [48].

Dessutom utfördes ett examensarbete på KTH kring dessa observationer, *Orbit Determination Analysis for SSA Purposes* [49]. Examensarbetet jämförde det inmätta avståndet mellan sensor och satellit med beräknat avstånd från banbestämd position, baserad från satelliternas GNSS. Dessutom presenteras en känslighetsanalys av Lamberts initiala banbestämningsmetod. Rapporten redovisar utmaningarna med att kunna genomföra en initial banbestämning baserad på data från EISCAT-UHF-radarn. Vidare diskuteras möjligheterna för att använda det kommande EISCAT-3D systemet för inmätning och övervakning av rymdobjekt.

4.2.1.2 Optiska inmätningar

För de optiska inmätningförsöken var ambitionen att med sex av LCO:s teleskop, spridda över världen, från Maui på Hawaii i väster till New South Wales Australien i öster, kunna mäta in rymdobjekt i alla typer av banor. Men begränsningar i deras sensorplanering innebar dock att objekt i låga jordbanor inte kunde mätas in. Däremot kunde inmätningar utföras för rymdobjekt i mellanhöga, högelliptiska, geostationära och begravningsbanor.

Ett flertal GPS-satelliter kunde mätas in, de utgör bra referensobjekt eftersom noggranna positioner (och hela bantrajektorier) finns tillgängligt för dem.

Inom ramen för de optiska inmätningarna gjordes experiment av typen sensorfusion, det betyder samtidig inmätning från två olika geografiskt åtskilda LCO-teleskop, mot en och samma satellit i geostationära jordbana.

Det utfördes många olika typer av inmätningar med LCO:s teleskop. Objekt har studerats med olika observationsgeometrier och vid olika tidpunkter under

kvällen/natten/gryningen. Både satelliter som har aktiv manövrering²⁴ och objekt som klassas som rymdskrot studerades. Detta arbete finns dokumenterat i ett Memo *AF.9220418 Statusrapport rymdlägesbild – inmätningar 2018* [50] och en rapport *Banbestämning av rymdobjekt– Orbit Determination (OD)* [32]. LCO delade även med sig av både deras observationsplaneringsmjukvara samt mjukvaran som tog fram koordinater och de inmätta objektens ljusstyrka ur de optiska bilderna.

4.2.2 Experimentella inmätningmetoder

Möjliga framtida inmätningmetoder har studerats för både optiska system och radarsystem. Av speciellt intresse är kostnadseffektiva system eller användning av data från befintliga system som i nuläget används för andra ändamål.

4.2.2.1 Bredvinkliga optiska sensorer

Under 2019 utfördes ett examensarbete på Uppsala Universitet som handlade om hur det svenska optiska all-sky network skulle kunna användas för inmätning och banbestämning [51]. Rapporten redovisade hur Gauss-algoritmen kunde användas för att lösa det initiala banbestämningsproblemet men föreslår användning av andra mer stabila metoder (Double-R och Goodings). Arbetet behandlar problemet med att skaffa sig tillräckligt med inmätningdata för att kunna göra en användbar initial banbestämning. Rapporten pekade dessutom ut fördelarna med att använda flera sensorer på olika platser. Eftersom ett system med flera spridda sensorer möjliggör större observationsvolym men även där den relativ geometri från olika sensorer kan nyttjas för inmätningen av ett objekt. I ovan nämnda rapport behandlas också begränsningarna i ljuskänslighet och ströljus (när himlen är tillräckligt mörk). Det studerade systemet, *Swedish Allsky Meteor Network (SAMN)* visade sig inte ha tillräckligt hög noggrannhet i mätningarna för att kunna generera tillräckligt bra banbestämningar för att kunna ingå som komponent i ett operativt rymdlägesbildssystem.

De optiska sensorerna i det studerade systemet skulle emellertid kunna vara användbara i system avsedda för att komplettera och tillföra kapacitet i vissa specifika aspekter. Exempelvis för att samköra observationerna mot existerande katalogobjekt (i en global katalog) med syftet att kunna flagga upp för nya okända objekt. Den grova banbestämning som ändå kan göras skulle kunna duga som invisning för andra mer precisa sensorer nedströms längs banan. Dessa skulle då stå för förfinad inmätning, kategorisering och katalogisering av objekten i fråga.

²⁴ Den engelska termen för banunderhåll i geostationär jordbana (att behålla sin position i geostationära bältet) är *Station Keeping*.

Några utav dessa kameror ingick i ett annat nätverk med vidvinkelkameror, ALIS, som uppdaterades till nätverket ALIS4D med bättre sensorer under 2019. ALIS4D har ett ökande antal stationer i Sverige, Norge och Finland och är först och främst tänkt för att studera norrsken och har därför korta exponeringstider. Den förbättrade tids- och sensorupplösningen möjliggör banbestämning av satelliter mer noggrant än tidigare systemet ALIS.

Sammantaget är författarnas bedömning att med fortsatt teknisk utveckling inom optik och detektorsidan, tillsammans med mer avancerade bildbehandlingsalgoritmer så kommer vidvinkliga optiska sensorsystem troligen komma att bli brett använda som viktiga inmättningsnoder för rymdlägesbildsändamål.

En annan lågkostnadsteknik för att göra banbestämning på satelliter är att använda sig av öppen astronomisk data. Under 2022 har ett examensarbete på Kungliga Tekniska Högskolan på uppdrag av FOI studerat hur det skulle kunna gå till och vilka begränsningar som finns med att använda sig av öppen astronomisk data. Slutsatsen var att det går att använda tekniken för att bekräfta satellitbanor av kända satelliter men upplösningen för det teleskop och med vidvinkelkamera som användes i detta arbete inte är tillräcklig för banbestämning [52].

4.2.2.2 Passiv radar

Passiva radarsystem är system där radarn använder en sändarsignal från ett annat system och därmed ersätter behovet av en egen sändarsignal. Dessa system är av naturen bistatiska eftersom mottagaren typiskt placeras på en annan plats än sändaren. Det senaste decenniet har forskning gjorts på teknikområden relaterat till passiv radar. Upplägget för denna teknik är ofta att en kommersiell sändare nyttjas som belysare. Vanliga kommersiella signaler som används är digital-TV och radio, men även andra system baserade på exempelvis 4G och GNSS-satelliter har använts [53].

Principen för att skapa de användbara inmätningarna bygger på att skapa en mottagare som registrerar både den utsända externa referenssignalen och de reflekterade signalerna från satelliten i ett område av intresse. Mottagningssystemet kan utgöras av en enskild mottagare eller av ett system av mottagare utplacerade för att uppnå en önskad geometri. Genom avancerad signalbehandling är det möjligt att korrelera de individuella mottagna signalerna med referenssignalen och härleda fram mätdata kopplade till individuella satelliter. Efter vidare bearbetning kan indata till en banbestämning skapas bestående av avstånd och hastighet (närmande/fjärmande) av de inmätta satelliterna relativt någon vald punkt i mottagningssystemet [35].

Två likartade men tidsförskjutna signaler tas emot kontinuerligt: en referenssignal direkt från sändaren till mottagaren (direktsignal) och en ekosignal

som är mycket svagare och tidsförskjuten jämfört med direktsignalen. Skillnaden i signalnivåer ställer höga krav på mottagarsystemets dynamik. Vissa strategier för att dämpa denna har studerats för att förbättra möjligheterna till satellitdetektion och för att få en större dynamik i inmätningssystemet. Detta är en problematik som inte behöver hanteras i samma utsträckning för aktiva system.

Ett multistatiskt system kan uppnås genom att flera sändare och mottagare används. Exempelvis kan ett passivt radarsystem skapas genom att använda flera olika FM-radiosändare, vid olika frekvenser och lokaliserade på olika geografiska platser. Mottagare kan därmed ta emot och korrelera ekosignalerna med signalerna från samtliga sändare. System av denna typ gör det möjligt att exempelvis positionera flygplan med en avståndsupplösning på någon kilometer till följd av signalens bandbredd. Även om passiv radar baserad på FM-radio främst har använts för detektion av flygplan har det även visat sig vara möjligt att användas för följning av större objekt i låga jordbanor [54]. Denna typ av system bedöms av författarna som relativt kostnadseffektiv och som ett användbart komplement till aktiva system med egen sändförmåga och blir särskilt kraftfull när noderna kommunicerar med varandra och data fusioneras från ett nätverk av radarnoder.

Ett intressant system baserat på rundradiosändare är under uppbyggnad i Australien [55]. Det utvecklas av företaget Silentium Defence och FOI för diskussioner med denna part för att ta del av analyser och resultat från deras nyligen etablerade anläggning utanför Adelaide. Systemet använder sändare som liknar svenska rundradiostationer och använder systemgeometrier som är relevanta för svenska förhållanden. En viktig egenskap hos systemet är användningen av flera sändare på olika platser och olika frekvenser för att förbättra precisionen i inmätningen av satelliter. Principen är att resultaten från flera bistatiska sändar- och mottagarpar vägs samman. Av intresse är även de försök [56], [57] som utförts i Polen med hjälp av DAB-radio och LOFAR-teleskop. Hittills genomförda försök har dock inte använt en mottagarstation optimerad för uppgiften.

En alternativ systemlösning som skulle kunna komplettera ett radarsystem baserat på många sändare och en passiv mottagare bygger på att satelliter som själva sänder ut någon form av signal (exempelvis SAR-satelliter, kommunikationssatelliter) positionsbestäms genom skillnader i tidsfördröjning (*eng. Time-Difference of Arrival*, TDOA) till olika mottagare i ett flerkanaligt fysiskt distribuerat mottagarsystem [58]. I detta fall korreleras de signaler som mottagits på flera olika platser och tidsförskjutningen till respektive plats ger villkor samt indata för beräkning av de emitterande objektens position. Metoden har likheter med det omvända fallet till den metod som används för att mäta in position på marken med hjälp av GPS-satelliter. Metoden används även för positionering av flygplan, ofta kallat multilateration (MLAT). Kraven på

antennsystemen är lägre än för passiv radar då signalvägarna är kortare, dock krävs god tidssynkronisering och dataöverföringsförmåga mellan noderna vid utveckling av ett sådant system. Dessutom måste satelliternas egna emitterade signaler kunna nå det område över vilket mottagarna är utspridda, vilket ger en begränsning i den praktiska användningen av ett sådant system.

4.2.3 Dataanalys

Det är ett antal steg som måste genomgå för att från sensors utdata få fram relevant information om ett rymdobjekts position.

Det första steget är att ta fram de fysikaliska enheterna ur det data som har samlats in, exempelvis avstånd till satelliten, vinklar från sensor till satelliten, om möjligt uppmätta hastigheter på satelliten i relation till sensorplacering, etc. Vilken information som finns tillgänglig beror på sensorn. När all mätdata är insamlat behöver det korreleras mot redan kända satelliter. Om det är en okänd satellit behöver satellitens bana bestämmas genom initial banbestämning. Om satelliten däremot redan är känd väljer man istället att genomföra en förfinad banbestämning för att uppdatera banparametrarna. Dessa olika metoder och resultat finns dokumenterade i FOI rapporten: *Banbestämning av rymdobjekt – Orbit Determination (OD)* [32].

Som beskrivs i kapitel 3 har FOI deltagit i användarforum²⁵ för SST-CSW. Det återrapporterades från denna aktivitet efter första mötet 2017 [59] och samarbetet har fortsatt med regelbundna arbetsmöten och telefonkonferenser. Samarbetet i detta forum har bekräftat att de kunskaper FOI har byggt upp kring dataanalys är relevanta och nödvändiga för att utveckla en rymdlägesbild. FOI har tillgång till en testversion av mjukvaran för att använda i utvärderingsändamål. Denna mjukvara bedöms av författarna bli ett utmärkt verktyg för våra fortsatta arbeten med rymdlägesbild. Mjukvaran kan användas som ett referensverktyg för att validera egna dataanalysmetoder och eftersom det är en öppen källkod kan nya funktioner utprovas. Operationella procedurer kan testas med mjukvaran, där även sensortyp och sensorlokalisering kan utvärderas med avseende på kvalitén i den inmätta banan. Mjukvaran skulle även kunna vara en del i ett framtida operationellt militärt rymdlägesbildssystem.

4.2.3.1 Banbestämning

Banbestämning kan förenklat beskrivas som problemet att bestämma en satellits position och hastighet vid en given tidpunkt (också kallat satellitens tillstånd) i dess omloppsbanan runt jorden.

²⁵ Användarforumet är ett initiativ som ESA påbörjade med sitt Space Safety program: *SST common software User Forum*. Detta är ett forum bemannat av tolv europeiska länder som ansvarar för utvecklingen av den gemensamma SST-CSW.

Satellitens banelement beräknas för en vald epok (tidpunkt). För varje satellit vill man alltså skapa en kompakt datamängd (*eng. dataset*) bestående av epok, banelement och osäkerheter.

För att kunna göra en banbestämning krävs att satelliten mäts in. En satellits rörelse runt jorden kan beskrivas av ett antal rörelseekvationer. I banbestämningen anpassas banparametrarna så att den resulterande banan så bra som möjligt svarar mot de inmätningar som har utförts.

Syftet med banbestämningen är att bygga upp och underhålla en katalog som innehåller banelementen för alla de intressanta satelliterna, se avsnitt 4.2.4. Katalogen kan sedan användas för olika tillämpningar, se avsnitt 4.2.6.

Underhåll av katalogen behövs då banparametrar är en färskvara vars användbarhet klingar av med tiden. Banparametrarna upphör helt enkelt att vara representativa för satellitens verkliga banutveckling. Hur snabbt precisionen avklingar beror dels på med vilken precision banparametrarna blev skattade, dels felen som uppstår i banpropageringen. Hur hög noggrannhet som behövs beror på behov och syfte hos den specifika militära rymdlägesbildstjänsten som använder banparametrarna.

Viktigt att notera är att både radarmätningar och optiska inmätningar har lägre dimension än tillståndsvektorn. I radarfallet mäts avståndet till satelliten, ofta kompletterat med dopplerskiftet i signalen, vilket ger tidsförändringen av avståndet. En optisk inmätning ger två vinklar som beskriver satellitens riktning i förhållande till teleskopet, men inte avstånd. I båda dessa fall är inmätningen tvådimensionell. Då dimensionen på tillståndsvektorn och de extra parametrar som ska skattas är minst sex (satellitens positionsvektor och hastighetsvektor plus eventuella andra storheter i bandynamikmodellen eller i mätmodellen, se även nedan) så inses att informationen i varje enskild observation inte är tillräcklig för att skatta hela tillståndsvektorn. Tillståndet är helt enkelt inte observerbart via individuella mätningar av den här typen. För att bestämma banan för en satellit med denna typ av inmätningar behöver ett flertal mätningar kombineras. Vidare, för att en initial banbestämning ska ha rimliga förutsättningar för att nå en användbar noggrannhet i de framräknade banelementen krävs att dessa mätningar dessutom är utspridda i tiden. Mätningarna behöver vara tagna över en båge som är av tillräcklig längd och relevant i förhållande till banans storlek, form och orientering.

Objektkorrelering

När en ny mätning är tillgänglig och den ska korreleras mot de tillgängliga satelliterna i katalogen kan processen för detta se ut på lite olika sätt. Det beror dels på status i kataloguppyggnaden, dels på använt sensorsystem.

Objektkorrelering har ännu inte behandlats i någon vidare utsträckning i de genomförda studierna. Denna och andra liknande, låt oss kalla dem andra

ordningens delproblem, är viktiga för att skapa ett operativt militärt rymdlägesbildssystem.

Initial banbestämning

För att kunna bestämma en satellits bana behövs minst lika många oberoende inmätningar som antalet parametrar, eller banelement, som används för att beskriva banan. En initial banbestämning kan göras när antalet okända parametrar är lika med antalet mätningar. För att en initial banbestämning ska kunna vara användbar får de framräknade banparametrarna inte avvika alltför mycket från den sanna situationen. Med användbara banparametrar avses att satellitens bana kan propageras åtminstone till nästa passage med en noggrannhet som gör det möjligt att åter observera satelliten med sensorsystemet. För att säkerställa detta räcker det inte med att samla ett visst antal mätningar. De enskilda mätningarnas noggrannhet och deras spridning i tiden avgör den initiala banbestämningens noggrannhet. Med spridning i tiden avses den båge över vilken mätningarna är genomförda. Allt noggrannare mätningar gör att man klarar sig med allt kortare mätbåge. Tumregler för bågens längd kan ges för olika typer av banor givet prestandan för ett visst inmätningssystem.

Metoderna för initial banbestämning löser ett olinjärt ekvationssystem och ger lösningar som återskapar de observerade mätningarna. Ofta använder metoderna enkla banmodeller som till exempel ideala Keplerbanor som kan beskrivas av sex parametrar (positions- och hastighetsvektorer vid en viss tidpunkt). Alltså behövs sex mätningar för att utföra en initial banbestämning. Ett flertal metoder existerar för att göra en initial banbestämning med olika antaganden om vilka mätningar som finns tillgängliga, där vissa använder optiska vinkelmätningar och andra använder satellitens position. Se *Fundamentals of Astrodynamics and Applications* [15] för en genomgång av de olika metoderna. Eftersom antalet mätningar är lika med antalet parametrar sker ingen medelvärdebildning och resultatet kan vara känsligt för mätfel.

Om fler inmätningar finns tillgängliga för en satellit som ännu inte finns i katalogen kan en initial banbestämning göras från en delmängd av mätningarna. Alla mätningar kan sedan användas i en förfinad banbestämning för att förbättra den initialt estimerade banan.

Förfinad banbestämning

Om satelliten som observerats redan finns i katalogen, eller dess bana har bestämts med en initial banbestämning, så kan en förfinad banbestämning användas för att förbättra de tidigare banparametrarna. Banbestämningmetoderna delas ofta in i två undergrupper: batchmetoder och sekventiella metoder. De vanligaste metoderna inom de två grupperna är minstakvadratmetoden respektive Kalmanfiltrering.

En batchmetod använder en uppsättning av mätdata för att skatta banparametrarna. Mätdata måste därför samlas in och sparas över en period för att kunna utföra en banbestämning. Sekventiella metoder arbetar, som namnet antyder, sekventiellt på mätdata. Den tidigare skattningen av banparametrarna uppdateras varje gång ny mätdata blir tillgänglig. Båda metoderna presenteras i detalj i FOI-rapporten: *Banbestämning av rymdobjekt– Orbit Determination (OD)* [32].

Innan en banbestämning kan göras måste dock en dynamikmodell som beskriver satellitens bana väljas och parametreras.

Val av banmodell

En ideal bana under ett tvåkroppsantagande, alltså att satelliten inte påverkas av några andra krafter än gravitationskraften från jorden, kan beskrivas perfekt av sex parametrar. Vanligen väljs parametrarna position och hastighet vid en viss tidpunkt eller Keplerelementen [13]. En satellit påverkas dock av ett flertal andra krafter som atmosfärfriktion, jordens icke-uniforma gravitationsfält och gravitation från andra himlakroppar. I de flesta applikationer ger den ideala modellen inte tillräcklig noggrannhet och en mer komplex modell för bandynamiken måste användas.

Bandynamiken beskrivs istället ofta med hjälp av differentialekvationer som beskriver hur satellitens position och hastighet utvecklas över tiden och inkluderar de krafter som påverkar satelliten. Vid val av en banmodell med hög noggrannhet beskrivs alla krafter som påverkar satelliten och i teorin räcker det därför att skatta positionen och hastigheten vid en viss tidpunkt, för att sedan kunna beräkna dess positions- och hastighetsutveckling över tid. I praktiken är detta inte fallet eftersom vissa faktorer som påverkar krafterna är mer eller mindre okända. Dessa kan då inkluderas som parametrar i modellen och skattas från mätdata. Exempel på sådana parametrar kan vara satellitens massa och dess tvärsnittsyta som påverkar atmosfärfriktionen.

Parametrarna som skattas är alltså:

- Position och hastighet för satelliten vid en viss tidpunkt.
- Parametrar relaterade till okända storheter i de krafter som påverkar satelliten.

Hur noggrant banan måste modelleras (vilken fysik och vilka krafter som måste inkluderas i modellen) bestäms av dess användning. I princip handlar det om att känna till relevanta krafter som anbringas på och påverkar satelliten över tid. Vilken kraft som är den dominerande beror bland annat på banhöjd och satellitens storlek. I många fall kan det finnas en totalt dominerande kraft, då kan vissa uppenbart irrelevanta krafter ignoreras. Ibland finns flera krafter som är uppenbart signifikanta, och ibland är det svårt att säkert veta om något är signifikant eller inte. Därför kan det behövas olika banmodeller inom en och

samma katalog. Globala parametrar som atmosfärens densitet kan också innehålla osäkerheter. Dessa kan också skattas, men då vanligtvis från inmätningar av ett flertal satelliter [60], [61].

Som för all parameterskattning gäller att modellen och antalet parametrar måste väljas med omsorg. Om för många parametrar skattas, i förhållande till antalet tillgängliga datapunkter, sker en överanpassning [62] där modellen även fångar upp variationer som beror på brus och mätfel. En överanpassad modell beskriver uppmätt data väldigt bra men är dålig på att prediktera satellitens framtida tillstånd. Om antalet parametrar istället är för få sker en underanpassning och modellen är inte tillräcklig för att beskriva den underliggande dynamiken. Även här blir modellens prediktionsförmåga dålig.

Mätningar

För att bestämma en satellits bana måste den mätas in. Utöver optiska och radarinmätningar, som beskrivs i avsnitt 2.2 och 4.2.1, kan även GNSS-data eller satellitens radiolänk användas för inmätning. De senare metoderna kräver normalt samverkan och kommunikation med satelliten och kommer därför inte att studeras i denna rapport.

Då banbestämningen försöker att minimera felet mellan faktiska inmätningar och mätningar som predikteras av modellen behövs en mätmodell. Mätmodellen beskriver hur mätningarna relaterar till satellitens position och hastighet. Även här kan det finnas osäkerheter eller okända faktorer som påverkar mätningen. Dessa kan, på samma sätt som i banmodellen, skattas som en del av banbestämningsproblemet.

4.2.3.2 Kvalitet på estimerade banparametrar

För att upprätthålla, och ha praktisk användning av, en rymdlägesbild krävs inte bara kunskap om satelliters position och hastighet utan också osäkerheten i dessa storheter. Osäkerheten i tillståndsskattningen är ett mått på felet i det skattade tillståndet, se även avsnitt 4.2 ovan. Osäkerheten behövs bland annat i konjunktionsanalyser för att kunna beräkna sannolikheten för att två objekt ska kollidera och om en undanmanöver därmed måste planeras. För att planera när ett objekt måste mätas in på nytt krävs kunskap om osäkerheten och hur osäkerheten utvecklas med tiden. För att kunna bedöma och klassificera formationsflygningar och inspektioner är det också viktigt att känna till felen i de inblandade objektens position.

Ett första steg i att kvantifiera osäkerheten i de skattade tillstånden är att studera de källor som bidrar till felet i de estimerade banparametrarna.

Felkällor

Felkällorna som påverkar felet i de skattade banparametrarna delas in i två huvudgrupper: modellfel och mätfel. Banmodellen, med tillhörande parametrar som ska skattas, är alltid just en modell av verkligheten och kan aldrig perfekt beskriva satellitens bana. Modellen ska innehålla all relevant dynamik för att kunna beskriva banan tillräckligt noggrant för dess tilltänkta användningsområde. Vad som är relevant avgörs av den precision och kvalitet som krävs eller önskas av banbestämningen, och därav härledda produkter. De felen som modellen ger upphov till jämfört med den verkliga satellitens bana benämns *modellfel*. De fel som beror på inmätningen av satellitens bana benämns *mätfel*.

Felen kan ytterligare kategoriserats efter vilken tidsskala de förändras över, där brus och bias är de två extremerna. Brus betecknar de fel som är okorrelerade mellan två mätningar, alltså att felet vid nuvarande mätning inte beror på felet vid förra tidpunkten, medan biasfel är de fel som kan anses vara konstanta under hela mätperioden. Däremellan finns fel med andra tidsskalor som till exempel filtrerat brus och slumpvandringar. Hur felen ska betraktas och kategoriseras beror på hur ofta en satellit mäts in, under hur lång tid inmätningen sker och hur långt in i framtiden modellen ska användas. Fel med olika tidsskalor påverkar kvaliteten på skattningen på olika sätt, detta studeras närmare senare i detta kapitel.

Modellfel

Ingen modell kan helt perfekt beskriva ett verkligt system. Modellfel kan komma från faktorer som inte tagits med i modellen då de inte bedömts vara nödvändiga för den noggrannhet som behövs och delvis på faktorer som inte är kända.

Några exempel på modellfel och modellosäkerheter är:

- Fel i atmosfärsdensiteten. Densiteten är en viktig faktor i den atmosfärsmotståndskraft som påverkar satelliten. Densiteten är inte bara höjdberoende utan beror också på andra faktorer som aktuell sol- och magnetaktivitet samt lokal tid.
- Solaktivitet vilket påverkar främst atmosfärsdensitet, speciellt för satelliter i de lägre jordbanorna.
- Variationer i storleken på den soltryckskraft som uppstår när en satellit belyses av solen.
- Osäkerheten i satellitens rumsorientering relativt dess bana. En satellit kan till exempel vara tumlande, ha en fast orientering eller ha en betydande koppling mellan satellitens orienteringsdynamik och bandynamik, alltså att satellitens orientering beror på var över jorden den befinner sig. Orienteringen påverkar den tvärsnittsytan som bestämmer storleken på atmosfärfriktionen och soltrycket.

- Satellitens egenskaper som massa, geometri, optiska eller aerodynamiska egenskaper är oftast okända eller osäkra.
- En satellit kan utföra banmanövrar för att ändra sin bana. Om dessa manövrar är okända och inte tas med i modellen, ger detta ett fel i den med modellen predikterade banan. Om satelliten däremot utför banjusteringar för att rätta till sin bana skulle det kunna leda till mindre modellfel. Detta då satelliten kompenserar för störkrafter för att hålla en mer ideal bana.

Då fokus här är inmätning av icke-kooperativa satelliter, alltså satelliter som varken aktivt medverkar i mätprocessen eller där dess egenskaper, orientering eller banmanövrarna är kända, måste dessa egenskaper antingen inkluderas i skattningen eller modelleras. Om felen bedöms som små kan de helt ignoreras.

Mätfel

De fel som endast påverkar inmätningen benämns här som mätfel. Mätfelen kan hanteras som fel i mätmodellen i stället för i dynamikekvationerna.

Nedan följer några exempel på felkällor i optiska- och radarinmätningssystem. För radarsystem kan mer information hittas i referens [7] och för optiska system i referens [63].

Radar:

- Mätbrus såsom bakgrundsbrus eller förstärkarbrus.
- Osäkerhet i tidstagningen av pulser.
- Klockdrift.
- Atmosfärs- eller jonosfärsfördröjningar i radiovågsutbredningen.
- Masscentrum för satelliten skiljer sig från den yta där radarvågorna reflekteras.

Optiskt:

- Mätbrus i form av till exempel CCD-brus och kvantiseringsbrus.
- Optiska ofullständigheter.
- Atmosfärsstörningar.
- Ljuspunktens centrum är skilt från satellitens masscentrum.

Det är viktigt att känna till vilka felkällor som finns i, och hur de påverkar ett inmätningssystem, dels för att kunna uttala sig om felet i de skattade banparametrarna, dels för att vet hur och hur ofta instrumentet måste kalibreras om.

Kalibrering

Många av felkällorna som påverkar mätningarna ovan kan kalibreras. Om kalibreringen är tillräckligt bra behöver de inte skattas som extra parametrar. I

annat fall kan kunskap kring mätfelet förbättra initialgissningen på parametervärdet, något som kan ge snabbare konvergens och bättre resultat i estimeringen.

Hur bra en felkälla kan kalibreras beror på när kalibreringen görs i förhållande till inmätningarna och på vilken tidsskala felet förändras. Ju långsammare felet förändras desto lättare är det att kalibrera. Om felet istället är ett vitt brus, det vill säga att det inte finns någon information om mätfelet i den aktuella mätningen ifrån föregående mätningar, kan det inte kalibreras. Däremot är det möjligt att bestämma vissa statistiska egenskaper för bruset genom kalibrering. Detta kan användas för att välja viktningen i minstakvadratproblemet eller brusmatriserna i Kalmanfiltret [13].

Hur radarsystem och optiska teleskop kalibreras är stora ämnen i sig och studeras inte närmare i den här rapporten. För en introduktion till ämnena se referens [64], [65] och [66]. I det specifika problemet att kalibrera radarsystem eller teleskop för inmätning av satelliter kan nämnas att egna eller kända satelliter kan användas. Det kan vara egna eller andras satelliter med kända banor som antingen själva mäter in sin bana med satellitnavigationssystem (GNSS) eller som banbestäms med andra sensorer. I fallet med tillgång till en egen satellit har man ofta kontroll på orienteringen och satellitens fysiska egenskaper vilket gör att kalibreringen kan utföras med högre precision. I radarfallet finns det också ett antal radarkalibreringssatelliter i bana med känd geometri och materialegenskaper. Ett exempel är *Lincoln Calibration Sphere 1*, som är en stor sfär av aluminium vars enda syfte är just radarkalibrering. Satelliter i kända banor kan också mätas in med jämna mellanrum för att övervaka status och prestanda för inmätningssystemet.

Kvaliteten på banbestämningen

Modellfelet och mätfelet kommer att introducera fel i skattningen av banparametrarna. Men det finns även andra faktorer som kommer att påverka kvaliteten på den estimerade banan.

Verktyget för att analysera hur modellfelet och mätfelet påverkar kvaliteten på skattningen är vanligtvis bias- och kovariansanalys. Felkällorna modelleras som stokastiska processer och en statistisk analys görs för att få fram påverkan på de estimerade parametrarna. Felet beskrivs delvis som ett biasfel, det vill säga hur mycket de skattade parametrarna avviker i medel från de verkliga parametrarna samt variansen, det vill säga hur mycket de statistiskt är utspridda runt medelvärdet. För att kunna göra en pålitlig analys av felet krävs god kännedom om både mätfelets och modellfelets statistiska egenskaper. En mer detaljerad och matematisk genomgång av bias- och kovariansanalys fås i [15] och [64].

Även om satellitens tillstånd skulle vara perfekt känt vid en tidpunkt kommer modellosäkerheterna göra att en prediktering av tillståndet vid andra tidpunkter

kommer att innehålla fel. Om till exempel satellitens position och hastighet är känd vid en tidpunkt, men atmosfärens antagna densitet är felaktig, kommer skattningen av satellitens tillstånd vid en annan tidpunkt att skilja sig från dess riktiga position. Modellfelen gör alltså att felet i modellens prediktering av ett framtida tillstånd blir allt större ju längre tiden går. Detta betyder också att tidigare skattade banparametrar och mätningar innehåller allt mindre information om satellitens aktuella tillstånd. Stora modellosäkerheter innebär därför att mindre information kan utvinnas ur historiska mätningar och den skattade modellen kommer även bli sämre på att prediktera framtida tillstånd. För att kunna utvärdera kvaliteten på de estimerade parametrarna är det därför viktigt att känna till vilka modellfel och modellosäkerheter som modellen innehåller och kunna kvantifiera dessa, se FOI-rapport: *Inmätning av satelliter - En studie av radarsensortillämpning* [7] och [64].

Mätfelen är däremot direkt kopplade till felet i inmätningen av satelliten. Påverkan på de skattade banparametrarna beror på tidsskalan på felet. Om felkällan är ett brus kan det medelvärdesbildas bort genom att inkludera fler mätpunkter. Påverkan av ett biasfel kommer däremot inte att bli bättre av fler mätningar och kommer att leda till ett biasfel i de estimerade parametrarna. Däremot kan biasfel ibland inkluderas i skattningen eller kalibreras bort.

Som tidigare nämnts är dimensionen på mätningarna, med både radar och optisk, lägre än dimensionen på de parametrar som ska skattas (minst sex). Det är därför nödvändigt att använda ett flertal mätningar för att kunna bestämma en satellits bana. Geometrin mellan markstationen och satelliten bestämmer vilka banparametrar som kan observeras av mätningen. Om en satellit passerar rakt över en radarstation som endast mäter avståndet kan endast satellitens radiella position mätas in. Det är alltså inte mängden av mätpunkter som avgör om satellitens bana kan bestämmas utan mätningarna måste även innehålla information om hela parameterrummet för banparametrarna. Rent generellt betyder detta att satelliten alltså måste observeras vid olika geometrier eller över längre tider så att geometrin förändras. Varje enskild mätning bidrar alltså bara till att förbättra parameterskattningen i vissa riktningar. I FOI-rapporten: *Inmätning av satelliter - En studie av radarsensortillämpning* [7] diskuteras hur geometrin under inmätningen påverkar kvaliteten på banskattningen när inmätningen sker med en radar. Resonemangen kan dock relativt enkelt överföras på optiska inmätningar.

Residualanalys

När en förfinad banbestämning gjorts används ofta residualanalys för att analysera och bedöma pålitligheten i resultaten. Residualen är skillnaden mellan de mätningar som modellen predikterar och de faktiska mätningarna. Genom

statistiska analyser av residualen, så som vithetstest²⁶, kan kvaliteten på modellen och de antaganden som gjorts studerats. Genom att följa mätesidualernas förlopp och utseende under längre tid kan förändringar i både mätfelen och modellfelen övervakas.

Felpropagering

I många tillämpningar är det nödvändigt att kunna avgöra hur osäkerheten i banparametrarna utvecklar sig över tiden. Det kan vara för att planera för när satelliten måste mätas in igen för att reducera osäkerheten eller för att kunna prediktera sannolikheter för kollisioner i framtiden.

Hur kovariansen, eller felet i banparametrarna utvecklas beror både på bandynamiken och på osäkerheterna i modellen. I det fall banbestämningen bygger på ett Kalmanfilter, är ett av stegen att propagera osäkerheten i tillståndet från förra tidpunkten till nuvarande tidpunkt. Oavsett om banbestämningen har utgått från en minstakvadratmetod eller ett kalmanfilter så kan denna metod användas för att propagera osäkerheten till en godtycklig tidpunkt i framtiden. Kalmanfiltret använder dock en linjäriserad banmodell för att propagera kovariansen. Om tidsstegen är för stora eller propageringen sker långt fram i tiden kan linjäriseringsfelet göra att skattningen av kovariansen blir dålig. Detta kan även inträffa om felet inte har en gaussisk fördelning. I sådana fall kan till exempel Monte-Carlo metoder [64], [67] användas för att skatta hur kovariansen utvecklas över tid.

Hur kovariansen utvecklas över tid beror till stor del på osäkerheterna i modellen. Det är därför viktigt att kunna modellera och kvantifiera modellfelen för att få en bra uppskattning av kovariansen och hur den utvecklas.

4.2.4 Databas

Att använda en databas ger möjligheter att strukturerat organisera stora mängder data. Dessutom innebär användandet av en databas ett sätt att snabbt kunna få tillgång till den insamlade informationen. För ändamålet att upprätta en militär rymlägesbild med egen rådighet behövs det sparas information från sensorernas inmättningsdata och metadata kring inmätningstillfället. Insamlingen av inmättningsinformation behövs som indata till Dataanalysfunktionerna som beskrivs i avsnitt 4.2.3 ovan. Efter att Dataanalysfunktionerna är utförd behöver de resulterade banparametrarna göras tillgängliga för de tjänster som behöver dem för att generera den militära rymlägesbild, se avsnitt 4.2.6. Förutom banparametrar finns det dessutom ett behov av att spara undan annan typ av information, exempelvis:

²⁶ Vithetstest är en matematisk metod för att bestämma hur sannolikt det är att residualen är en realisering av vitt brus.

- Satellitens användningsändamål.
- Vem som äger satelliten, och vem som sköter dess drift.
- Typ av sensorer som satelliten är bestyckad med.
- Satelliternas sensorkapacitet.

Ovanstående typ av information kan då lämpligen sparas i samma databas.

För att samla satellitinformation och göra den tillgänglig för forskningen var det därför lämpligt för FOI att utveckla en databas. Valet av en relationsdatabas gav oss möjligheten att organisera de olika datakällorna i egna tabeller med regler kring relationerna mellan data i dem. På detta sätt får användaren tillgång till ett kraftfullt verktyg där tabeller från flera källor kan slås samman för att få svar på specifika frågor som är viktiga för vår forskning. En annan fördel med detta upplägg som FOI nyttjat är att frågorna till databasen kan formaliseras och återanvändas för framtida analyser. FOI:s relationsdatabas, El Corazon, har en struktur i form av XML-kod (*eng. Extensible Markup Language*). Strukturen kan därmed översättas automatiskt till SQL (*eng. Structured Query Language*) oavsett vilken implementation som föredras. För tillfället körs El Corazon i MySQL men även SQLite har förberetts. Därefter används en ORM (*eng. Object-Relational Mapping*) för att skapa ett enklare interface mot databasen för automatisering. När strukturen är översatt och interfacet skapat körs ytterligare skript som hämtar all arkiverad rådata, utför databehandling och fyller på med data och information i databasen. På detta sätt kan El Corazon lättare hantera förändringar i den IT-miljö där den körs och dessutom enklare migreras till helt andra IT-miljöer.

Utöver de skript som bygger och fyller databasen har det även tagits fram skript som hämtar och arkiverar data från öppna källor där vi eftersträvar automatisk insamling av öppen tillgänglig information. Den viktigaste av dessa källor är SpaceTrack [10], varifrån alla banelement hämtas. Dessa banelement har historiskt varit i formatet TLE, men har sedan en tid tillbaka delgetts på det moderna och mer framtidssäkra formatet OMM (*eng. Orbit Mean-elements Message*). Utöver banelement hämtas även information om rymdobjekten såsom namn, typ, landstillhörighet, med mera. Från *Jonathan's Space Home Page* [68] hämtas information om uppskjutningar såsom uppskjutningsplats och bärraket. UCS (*eng. Union of Concerned Scientists*) [69] tillhandahåller information om vilka satelliter som är aktiva, vad de har för användare, syfte, med mera. FN:s rymdkontor (*eng. United Nations Office for Outer Space Affairs, UNOOSA*) [70] tillhandahåller information om vilka länder som har registrerat vilka satelliter. Från ESA:s databas DISCOS (*eng. Database and Information System Characterising Objects in Space*) [71] hämtas information om rymdobjekts form (sfär, cylinder, kon eller likande), dimensioner samt maximalt, minimalt och genomsnittligt radartvärsnitt.

Då de arkiverade datamängderna är stora²⁷ och förväntas öka allt snabbare har det varit stort fokus på att automatisera databehandlingen i så stor utsträckning som möjligt. Redan idag korrigeras en stor mängd skrivfel och felformatering. Dessutom sker en automatisk översättning till standardiserade format och nomenklatur, exempelvis ISO-koder (*eng. International Organization for Standardization*). Därutöver sker automatisk korrelation mellan de öppna källorna för att identifiera avvikelser. Detta arbete är en del av det generella underhåll- och utvecklingsarbete som har pågått kontinuerligt sedan databasens skapades 2015. Arbetet med databasen har också bidragit med en kunskapsuppbyggnad kring datakvalitet och uppdateringshastighet (i betydelsen av uppdateringsfrekvens av objektdata) för de olika källorna.

4.2.5 Observationsplanering

Som diskuterades i avsnitt 4.2.3.2 växer osäkerheten i satelliternas position och tillstånd med tiden. För att upprätthålla en aktuell rymdlägesbild krävs därför att satelliterna i en katalog mäts in med jämna mellanrum. Observationsplanering innebär att prioritera och schemalägga inmätningar, alltså bestämma vilka satelliter som ska mätas in, vid vilka tidpunkter och med vilka sensorer. Planeringen baseras i första hand på osäkerheten i banparametrarna för satelliten i katalogen, den noggrannhet som krävs för att upprätthålla de tjänster som använder data från katalogen och de tillgängliga inmättningsresurserna. En bra introduktion till ämnet ges i [64] och referenserna däri.

Eftersom FOI alldeles nyligen påbörjat studier kring observationsplanering var ett första steg i processen att identifiera några frågor som har bäring på problemet:

- Om endast begränsade inmättningsresurser finns tillgängliga, vid vilka tillfällen ska då en satellit mätas in?
- Hur mycket mätdata behövs för att bestämma en satellits bana? Denna fråga påverkar exempelvis hur många datapunkter som bör mätas in under en passage.
- Vilka satelliter och vilka banor är intressanta?
- Vilka satelliter ska man prioritera att mäta in vid begränsningar av sensorkapacitet?
- Hur prioriteras inmätning för en sensor med fler användningsområden? Om sensorerna har dubbel användning, hur bör sensoranvändningen optimeras för att nyttja den på bästa sätt?
- Ska nyligen uppskjutna satelliter även spåras och i så fall hur? Vid uppskjutning från Esrange kan det vara önskvärt att prioritera nya uppskjutna svenskflaggade satelliter.

²⁷ Över 17 GB. [19 maj 2022].

Som en del i detta har FOI under 2022 påbörjat ett arbete för att söka svaren på den första frågan, alltså vid vilka tillfällen satelliterna ska mätas in om endast begränsade inmättningsresurser finns att tillgå. Problemet har matematiskt formulerats som ett optimeringsproblem där inmättningskostnaden minimeras men under villkoret att de skattade banparametrarna blir tillräckligt bra till vad de ska användas till. Inmättningskostnaden kan bland annat vara inmätningstid eller en finansiell kostnad kopplad till de olika inmätningarna. Detta skiljer sig från tidigare angreppssätt där man givet ett antal inmätningstillfällen försöker planera att noggrannheten blir så hög som möjligt, utan att ta hänsyn till att det kan finnas olika krav på noggrannheten för olika satelliter. Resultaten från detta arbete har presenterats och publicerats i samband med konferensen AMOS 2022 [72].

4.2.6 Militära rymdlägesbildstjänster

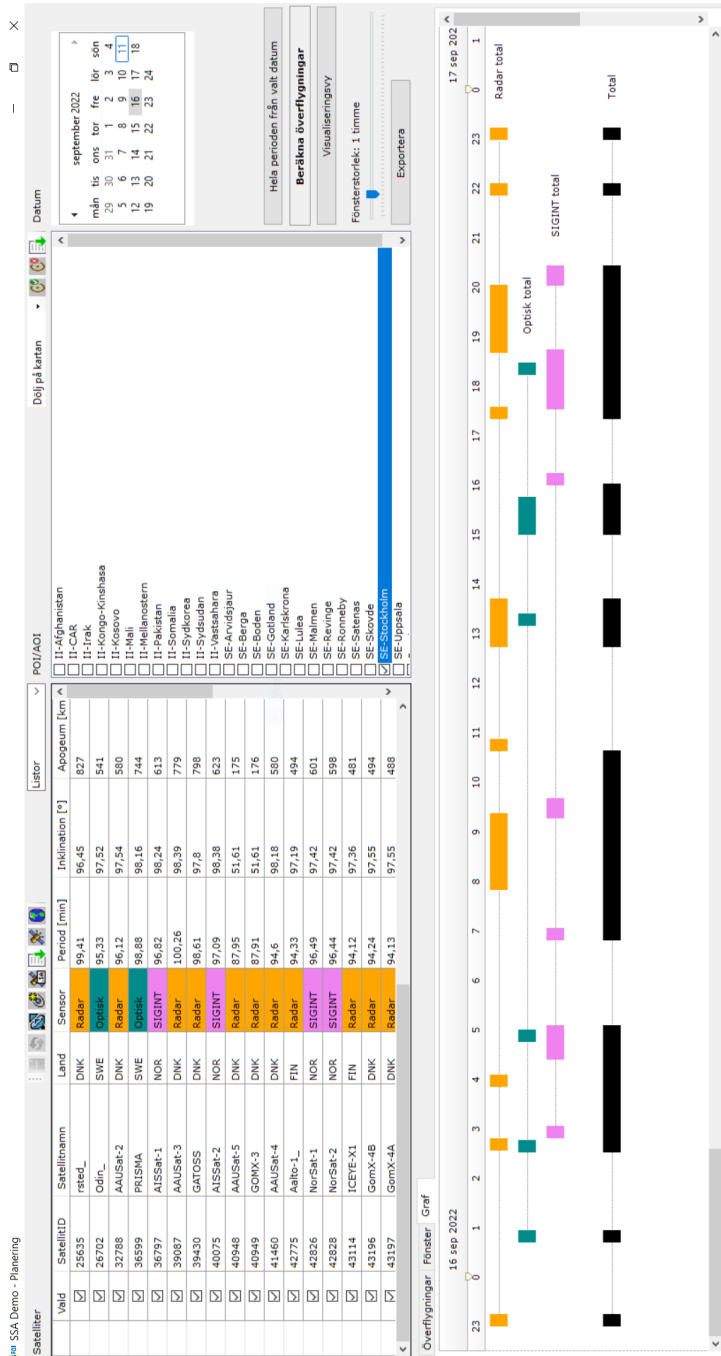
FOI har ambitionen att framöver studera de tjänster som kan realiseras med hjälp av en militär rymdlägesbildsförmåga.

Under åren 2018-2020²⁸ utvecklade FOI en överflygningsdemonstrator [73]. Demonstratorns syfte var att introducera överflygningsanalys till Försvarsmakten samt bidra till ökad förståelse för rymdmiljön.²⁹ I Figur 5 nedan visas ett exempel på en tidtabell genererad av överflygningsdemonstratorn.

Användaren specificerar vilka satelliter som ska ingå i analysen, geografiskt område eller plats och önskad tidperiod. Demonstratorn presenterar då en tidtabell av överflygningar i önskat format. Det är dessutom möjligt att gå bakåt i tiden och undersöka en historisk tidpunkt. Det möjliggör för användaren att analysera om det fanns risk att någon känslig aktivitet kan ha röjts genom att en satellit kan ha insamlat information från den tidpunkten och platsen. Denna demonstrator har levererats till Försvarsmakten och det har från projektet givits support under de senaste åren. Demonstratorn togs fram som ett FoT-transferprojekt och utgör ett bra exempel på tillämpning av den kunskap som byggts upp under åren i FoT-projektet. Att utveckla en demonstrator har dessutom visat sig vara ett utmärkt sätt att fånga upp Försvarsmaktens behov och frågeställningar, samt för att kunna anpassa våra studier mot dessa behov.

²⁸ Rymd – SSA Demo FOI 18 AF.9235151 (2018) och Rymd-SSA Demo FOI 19-20 AF.9235152.

²⁹ Överflygning definieras som att en eller flera satellit(er) har möjlighet att observera ett specificerat område med sin sensor, beroende på bana, och ljusförhållanden med mera.



Figur 5 Ett exempel från överflygningsdemonstratorn, där en tidtabell illustrerar överflygningar för satelliter med fiktiva sensorer för en viss definierad tidsperiod och plats.

5 Slutsatser och framtida arbete

En militär rymdlägesbildsförmåga behövs för att kunna ta välinformerade beslut. Aktiviteter i rymden påverkar i mycket hög grad de övriga militära domänerna. Tillgång till en bra militär rymdlägesbildsförmåga är därmed också användbart, kanske till och med en förutsättning, för att upprätthålla handlingsfrihet, det vill säga en förutsättning för att fritt kunna taktisera, planera och genomföra önskade militära aktiviteter i de övriga operativa domänerna.

Detta kan i förlängningen åstadkommas i en begränsad omfattning med hjälp av egna inmätningssystem placerade inom landet, hanterade av inhemska operatörer.

Det är viktigt att understryka att även om Försvarmakten har tillgång till egen sensor kommer inte detta vara en tillräcklig resurs för att få en heltäckande militär rymdlägesbildsförmåga. Det krävs ett samarbete med andra partners för att uppnå detta. Egen sensor kapacitet ger följande förutsättningar:

- Kvalitetssäkring - andras tillgängliga banparametrar verifieras mot egna inmätningar.
- Ökad generell förmåga - med tillgång till egen sensordata kan man samarbeta med andra partners för att dela information, så att den totala informationsmängden blir mer komplett.
- Ökad militär underrättelseförmåga - förmåga att mäta in vissa satelliter som inte öppet delas av partners.
- Ökad handlingsfrihet - självständighet i val av satellitobservationer.

Den stora majoriteten av antalet objekt kommer att mäts in av andras inmätningssystem. En viktig fråga som därför behöver hanteras är hur man bygger upp en militär rymdlägesbildsförmåga med en kombination av egna inmätningar och andras data. Som diskuterades kapitel 4.2.3 krävs god kännedom om inmätningssystemet (exempelvis sensorernas kapacitet, brusnivåer, kalibreringsinformation, hur sensorn har opererats under inmätningen med mera) för att utföra en banbestämning med tillhörande osäkerhet. Vår bedömning är att andras inmätningar, utan ovanstående information inte bör användas för egen banbestämning [23]. Däremot kan någon annans banbestämningssystem vara en tillgång. Kvaliteten kan förbättras på en egen banbestämning genom att kombinera banbestämningssystemet med egen sensordata.

Även data från en egen enklare sensor, som i sig inte är tillräckligt bra för att göra en egen banbestämningssystem, kan användas för att verifiera någon annans baninformation. Verifikationen av den externa banbestämningssystemet kan då göras genom att bekräfta att sensorns mätdata överensstämmer med banbestämningssystemets predikterade position.

Med egen mer kapabel inmätningssensor skulle däremot Försvarsmakten kunna mäta in och katalogisera en begränsad mängd prioriterade satelliter som de vill ha god kännedom om. Dessa satelliter skulle därmed hanteras med egen rådighet.

I Tabell 3 identifieras ett antal alternativa vägar mot en framtida nationell militär inmätningförmåga med radar mot satelliter i låga jordbanor.

Tabell 3 Möjliga alternativa vägar mot en framtida nationell militär inmätningförmåga med radar mot satelliter i låga jordbanor.

RADAR ALTERNATIV	MÖJLIGHETER	HINDER
Modern rymdradar (typ GESTRA).	God förmåga att upptäcka och följa relevanta satelliter i LEO.	Kräver en tämligen omfattande nationell satsning [7].
Användning av moderna radarsystem primärt avsedda för luftlägesbild [74].	God kännedom om systemet, osäkerhet kring dess förmåga att mäta in satelliter.	Lösningen är avhängig den förmåga som upphandlas för den primära tillämpningen. Tillgänglighet och prioritering mellan uppgifter.
Utveckling och anskaffning av passiva mottagarssystem vilka utnyttjar befintliga signaler.³⁰	Viss förmåga kan troligen realiseras till begränsad kostnad.	I dagsläget saknas erfarenhet och förståelse för teknikområdet vad gäller tillämpbarhet mot aktuell måltyp.

För optiska sensorer är förutsättningarna för väder- och ljusförhållanden inte optimala för en placering inom Sveriges gränser. Sverige har mycket moln och ljusa sommarmånader. Däremot kan en sensor som placeras i närheten av traditionella astronomiska teleskop med mer optimala atmosfärs- och väderförhållanden var tänkbart alternativ. Om man dessutom väljer att använda lågkostnadssensorer som exempelvis *all-sky* kameranätverk som komplement och stödjande funktion (och inte som en fullgod banbestämningssensor) kan man på ett relativt billigt sätt få tillgång till en verifierande förmåga. Ett sådant sensorsystem skulle kunna vara användbar för verifiering av annans data men även användas för en övervakningsuppgift. Det vill säga för att hitta nya eller icke-publicerade satelliter eller för att återupptäcka satelliter med otillräcklig baninformation.

5.1 Framtida arbete

Arbete som utförts av FOI inom rymdlägesbild under åren, har haft ett helhetsperspektiv för att bygga upp en grundläggande förståelse för ämnet rymdlägesbild samt studera vilka delar som krävs för att bygga upp en förmåga

³⁰ Signaler som rundradio ("FM-radio"), DAB-radio eller andra radarsignaler.

att skapa en egen rymdlägesbild. Denna typ av övergripande frågeställningar anses till stora delar vara besvarade. Framöver finns ett behov av att fokusera mer mot militära rymdlägesbildstjänster. Exempelvis vilka militära tjänster kan man få ut från en rymdlägesbild och hur kan de tas fram? Det finns fortfarande intressanta frågeställningar inom rymdlägesbild som kommer att studeras vidare men med ökat forskningsdjup. Exempel på studier som föreslås fortsätta är att studera hur användbara lågkostnadssensorer kan vara för att bidra in i rymdlägesbilden och hur vi kan planlägga observationerna på ett optimalt sätt, särskilt för en sensor som används för andra uppgifter. Vid tillgång till en dedikerad sensor, hur bör inmätningarna planeras för att studera de satelliter som behöver mer fokus, samt hur identifieras satelliter med ett avvikande beteende från normalbilden eller som utgör ett hot mot Försvarsmaktens intressen?

Andra intressanta frågor som kan behövas studeras framöver, förutom fördjupade studier i redan identifierade inmätningssensorer är:

- Hur integreras egen begränsad inmätning med data från andra källor?
- Datafusion mellan optiska inmätningar och radarinmätningar.
- Kan *Tone ranging*³¹ tekniken användas för banbestämning för satelliter i låga jordbanor med hjälp av radiosystemet i egen satellit.
- Inmätning av satelliter från satellitbaserade sensorer (exempelvis stjärnsensorer).
- Kalibreringstekniker av inmätningssensorer.

Möjligt framtida frågor att studera med fokus kring militära rymdlägesbildstjänster är:

- Karakteriseringsinmätningar av satelliter.
- Metodik för teknisk underrättelseanalys kring satelliternas sensorer, konstellationer och användning samt hur denna information lämpligen integreras till den övriga banparameterinformationen.

³¹ *Tone ranging* är en teknik där man bestämmer avståndet till en satellit. Från sin markstation sänds en signal med bestämt frekvensinnehåll till en satellit som återsänder den mottagna signalen tillbaka till marken. Genom att studera fasskillnaden mellan den från marken uppsända och mottagna signalen kan tvåvägs skillnaden i avståndet bestämmas med hjälp av frekvensskiftet [14].

6 Referenser

- [1] Försvarsmakten, "Försvarsmaktens Doktrin för gemensamma operationer (DGO 2020)," M7739-354030, Stockholm, 2020.
- [2] S. Lindström, "En rymdvärdertjänst åt Försvarsmakten - Ett förslag till utformning," FOI-R--2569--SE, Stockholm, 2008.
- [3] Regeringen, "Regeringens skrivelse - En strategi för svensk rymdverksamhet," 2017/18:259, Stockholm, 2018.
- [4] Regeringen, "Regeringsbeslut: Uppdrag att föreslå etablering av en funktion för operationell rymdlägesbild," Regeringen, Stockholm, 2020.
- [5] Försvarsmakten, "Avtal om utbyte av rymddata med USA," 7 april 2022. [Online]. Available: <https://www.forsvarsmakten.se/sv/aktuellt/2022/04/avtal-om-utbyte-av-rymddata-med-usa/>. [Använd 7 juni 2022].
- [6] EU-SST, "EUSST," [Online]. Available: <https://www.eusst.eu/>. [Använd 9 maj 2022].
- [7] M. Nylund, P. Hägg, J.-O. Hall, R. Ragnarsson, A. Tryblom och M. Tomas, "Inmätning av satelliter - En studie av radarsensortillämpning," FOI-R--5270--SE, Stockholm, 2022.
- [8] C. Andersson, L. Rosenqvist, E. Bernhardsdotter och M. Persson, "SSA – Behöver Sverige en rymdlägesbild?," FOI-R--3087--SE, Stockholm, 2011.
- [9] D. Faria, C. Andersson och E. Bernhardsdotter, "Svensk militär rymdlägesförmåga," FOI-R--3548--SE, Stockholm, 2012.
- [10] SpaceTrack, "SpaceTrack.org," [Online]. Available: <https://www.space-track.org>. [Använd 7 juni 2022].
- [11] AGI, "Systems Tool Kit (STK)," AGI, [Online]. Available: <https://www.agi.com/products/stk>. [Använd 11 maj 2022].
- [12] D. Kastinen och J. Vierinen, "SORTS++ Documentation, Release 3.0.0," Institute for Space Physics, University of Tromsø, 25 april 2019.
- [13] O. Montenbruck och E. Gill, Satellite Orbits: Models, Methods and Applications, Springer-Verlag, 2012.

- [14] H. D. Curtis, *Orbital Mechanics for Engineering Students*, Daytona Beach: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [15] D. A. Vallado, *Fundamentals of Astrodynamics and Application*, Hawthorne: Microcosm Press, 2013.
- [16] T. Sundberg, M. Nylund och O. Rasmusson, "Swedish National Interests in Space Situational Awareness," i *AMOS*, Maui, 2021.
- [17] M. Nylund, "Reserapport från konferensen AMOS 2014," FOI Memo 5067, Stockholm, 2014.
- [18] M. Nylund, "Reserapport från konferensen AMOS 2016," FOI Memo 5822, Stockholm, 2016.
- [19] M. Nylund, S. Papadogiannakis och O. Rasmusson, "Konferensrapport AMOS 2020," FOI Memo 7364, Stockholm, 2020.
- [20] M. Nylund, P. Hägg och T. Sundberg, "Konferensrapport AMOS 2021," FOI Memo 7762, Stockholm, 2021.
- [21] C. Andersson, "Reserapport från konferensen Military SSA London 18 – 19 April 2016," FOI Memo 5805, Stockholm, 2016.
- [22] K. Hallgren och O. Rasmusson, "Reserapport från Military Space Situational Awareness konferens London 2018-04-24 – 2018-04-26," FOI Memo 6507, Stockholm, 2018.
- [23] B. Jakobsson och M. Nylund, "Konferensrapport Military SSA 2021," FOI Memo 7659, Stockholm, 2021.
- [24] P. Hägg, "Konferensrapport Military SSA 2022," FOI Memo 7896, Stockholm, 2022.
- [25] J. Klug, H. Ma, T. Flohrer, E. Brendel, E. Villanueva, J. Tirado, A. M. Garay, C. Unfried, M. Nylund och SST-UF, "Establishing a Community Approach to SST Core Software through a User Forum," i *8th European Conference on Space Debris*, Darmstadt, 2021.
- [26] M. Nylund, "Konferensrapport 8th European Conference on Space Debris," FOI Memo 7658, Stockholm, 2021.
- [27] Orekit, "An accurate and efficient core layer for space flight dynamics applications," [Online]. Available: <https://www.orekit.org/>. [Använd 24 november 2021].

- [28] M. Nylund, "Militär rymdlägesbild (RSP) - Lägesrapport 2014," FOI Memo 5133, Stockholm, 2014.
- [29] M. Nylund och D. Faria, "AF.9220417 Statusrapport rymdlägesbild - period 2015-17," FOI Memo 6266, Stockholm, 2017.
- [30] M. Nylund, O. Rasmusson, P. Hägg och S. Papadogiannakis, "Statusrapport - genomfört arbete inom rymdlägesbild 2021," FOI Memo 7723, Stockholm, 2021.
- [31] L. Sjöqvist, "Lasereinmätningar av satelliter," FOI-D--0921--SE, Linköping, 2020.
- [32] M. Nylund, "Banbestämning av rymdobjekt," FOI-D--1010--SE, Stockholm, 2020.
- [33] T. Svensson och M. Sebastian, "Elektrooptisk inmätning av satelliter - En förstudie av passiv teknik," FOI-D--0928--SE, Linköping, 2020.
- [34] C. L. Stokely, J. L. J. Foster, E. G. Stansbery, J. R. Benbrook och Q. Juarez, "Haystack and HAX Radar Measurements of the Orbital Debris Environment, report Orbital Debris Program Office," NASA, 2003.
- [35] M. A. Richards, J. A. Scheer och W. A. Holm, *Principles of Modern Radar, Basic Principles*, Scitech Publishing, 2015.
- [36] H. Wilden, C. Kirchner, O. Peters, N. Ben Bekhti, A. Brenner och T. Eversberg, "GESTRA – A Phased-Array based surveillance and tracking Radar for Space Situational Awareness.," *EEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (PAST)*, 2016.
- [37] S. Saillant, "European Space Surveillance Bistatic Breadboard Radar," *2016 IEEE Radar Conference (RadarConf)*, 2016.
- [38] H. Wilden, N. B. Bekhti, R. Hoffmann, C. Kirchner, R. Kohlleppele, C. Reising, A. Brenner och T. Eversberg, "GESTRA - Recent Progress, Mode Design and Signal Processing," i *IEEE International Symposium on Phased Array System & Technology (PAST)*, Waltham, 2019.
- [39] Fraunhofer, "GESTRA – Radar Networks for Space Surveillance and Tracking," [Online]. Available: https://www.fhr.fraunhofer.de/content/dam/fhr/de/images/E_Veranstaltungen/2021/Fraunhofer_FHR_GESTRA_DE_web.pdf.
- [40] "The 143.050MHz GRAVES Radar a VHF Beacon for Amateur Radio," [Online]. Available: <http://pe1itr.com/graves/>. [Använd 17 maj 2022].

- [41] ONERA, "GRAVES, the 1st European space surveillance system," 2019. [Online]. Available: <https://www.onera.fr/en/news/graves-the-1st-european-space-surveillance-system>. [Använd 16 maj 2022].
- [42] Eoportat, "Space Service for SSA Services," [Online]. Available: <https://directory.eoportat.org/web/eoportat/satellite-missions/s/space-fence>. [Använd 9 juni 2021].
- [43] R. Awadhiya, "Particle Filter Based Track Before Detect Method for Space Surveillance Radars," i *2022 IEEE Radar Conference (RadarConf22)*, New York, 2022.
- [44] EISCAT, "EISCAT Scientific Association," [Online]. Available: <https://eiscat.se/eiscat3d-information/>. [Använd 17 maj 2022].
- [45] C. Andersson och M. Nylund, "Underlag till beslut avseende EU:s SST-konsortium," FOI-R-4426--SE, Stockholm, 2017.
- [46] Regeringen, "Regeringsbeslut: Uppdrag att vara ansvarig nationell enhet för Europeiska unionens program för rymdövervakning och spårning samt bemyndigande att ingå partnerskapsavtal," Regeringen, Stockholm, 2022.
- [47] Rymdstyrelsen, "En operationell rymdlägesbild – förslag till hur en nationell förmåga kan etableras," Dnr 2021-00014, Stockholm, 2021.
- [48] L. Rosenqvist, "Orbit determination of the MANGO satellite based on synthetic EISCAT observations," FOI-D--0642--SE, Stockholm, 2015.
- [49] M. Crimella, "Orbit Determination Analysis for SSA Purposes," KTH, Stockholm, 2015.
- [50] H. Sundberg, D. Faria, S. Möller, L. Sjökvist, T. Svensson och M. Nylund, "AF.9220418 Statusrapport rymdlägesbild – inmätningar 2018," FOI Memo 6551, Stockholm, 2018.
- [51] S. Alinder, "Space Situational Awareness with the Swedish Allsky Meteor Network," Uppsala Universitet, Uppsala, 2019.
- [52] L. Matsson, "Feasibility Study Of Initial Orbit Determination With Open Astronomical Data," KTH, Stockholm, 2022.
- [53] M. Malanowski, "Signal Processing for Passive Bistatic Radar," Artech House Publishers, 2019.

- [54] J. Palmer och et al, "Surveillance of Space using Passive Radar and the Murchison Widefield Array," i *2017 IEEE Radar Conference (RadarConf17)*, 2017.
- [55] SpaceNews, "South Australia's Oculus Observatory hosts passive radar to track space objects," 2021. [Online]. Available: <https://spacenews.com/oculus-observatory-passive-radar/>. [Använd 17 maj 2022].
- [56] K. Jędrzejewski, K. Kulpa, M. Malanowski och M. Pożoga, "Experimental Trials of Space Object Detection using LOFAR Radio Telescope as a Receiver in Passive Radar," i *2022 IEEE Radar Conference (RadarConf22)*, 2022.
- [57] J. Kłos, A. Droszcz, K. Jędrzejewski, K. Kulpa och M. Pożoga, "On the Possibility of Using LOFAR Radio Telescope for Passive Radiolocation," i *2020 21st International Radar Symposium (IRS)*, 2020.
- [58] P. Marzioli, F. Santoni och F. Piergentili, "Evaluation of Time Difference of Arrival (TDOA)," *MDPI Aeospace*, 2020.
- [59] M. Nylund, "Reserapport från ESA SST-UF möte ESOC Darmstadt 2017-11-06," FOI Memo 6240, Stockholm, 2017.
- [60] M. F. Storz, B. R. Bowman, M. J. I. Branson, S. J. Casali och W. K. Tobiska, "High accuracy satellite drag model (HASDM)," *Advances in Space Research*, vol. 36, nr 12, pp. 2497-2505, 2005.
- [61] S. Mutschler, P. Axelrad och E. Sutton, "Application of SoleiTool for Density Estimation using CubeSat GPS Data," i *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, 2021.
- [62] D. M. Hawkins, "The Problem of Overfitting," *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, vol. 44, nr 1, pp. 1-12, 2004.
- [63] K. U. Ratnatunga, R. E. Griffiths, S. Casertano, L. W. Neuschaefer och E. E. Wyckoff, "Calibration of HST wide field camera for quantitative analysis of faint galaxy images," *Astronomical Journal*, vol. 108, nr 6, pp. 2362-2372, 1994.
- [64] A. B. Poore, J. M. Aristoff och J. T. Horwood, "Covariance and Uncertainty Realism in Space Surveillance and Tracking," 2016.
- [65] N. Sánchez-Ortiz, J. Nomen och N. Guijarro, "Calibration and Analysis of Orbital Accuracy Through SST," i *8th European Conference on Space Debris*, Darmstadt, 2021.

- [66] T. Johnson, "SSA Sensor Calibration Best Practices," i *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui, 2015.
- [67] J. M. Hammersley och D. C. Handscomb, *Monte Carlo Methods*, London: Methuen & Co. Ltd., 1964.
- [68] JonathanSpace, "Jonathan's Space Home Page," [Online]. Available: <https://www.planet4589.org/space/>. [Använd 7 juni 2022].
- [69] UCS, "Union of Concerned Scientists," [Online]. Available: <https://www.ucsusa.org/>. [Använd 7 juni 2022].
- [70] UNOOSA, "United Nations Office for Outer Space Affairs," [Online]. Available: <https://www.unoosa.org/oosa/osoindex/search-ng.jspx>. [Använd 7 juni 2022].
- [71] ESOC, "Database and Information Systems Characterising Objects in Space," [Online]. Available: <https://discosweb.esoc.esa.int/>. [Använd 7 juni 2022].
- [72] P. Hägg, "Optimal Sensor Planning for SSA using System Identification Concepts," *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui, 2022.
- [73] K. Hallgren, "Försvarmaktens SSA-demonstrator – En systembeskrivning," FOI-D--0995--SE, Stockholm, 2020.
- [74] Naval News, "Thales SMART-L MM Radar Installed On HNLMS De Zeven Provinciën Frigate," [Online]. Available: <https://www.navalnews.com/naval-news/2019/03/thales-smart-l-mm-radar-installed-on-hnlms-de-zeven-provincien-fragate/>. [Använd 17 maj 2022].



ISSN 1650-1942

www.foi.se