



Karakterisering av satelliter

En komponent i den militära rymdlägesbilden

Seméli Papadogiannakis (red.), Kenny Andersson,
Mathias Dahlman, Ramin Farid, Erik Gröndahl, Linn Mattsson,
Matti Nylund, Ola Rasmusson och Rolf Ragnarsson.

Seméli Papadogiannakis (red.), Kenny Andersson,
Mathias Dahlman, Ramin Farid, Erik Gröndahl,
Linn Mattsson, Matti Nylund, Ola Rasmusson
och Rolf Ragnarsson.

Karakterisering av satelliter

En komponent i den militära rymdlägesbilden

Titel	Karakterisering av satelliter – En komponent i den militära rymdlägesbilden
Title	Characterizing satellites- a component in space domain awareness
Rapportnr	FOI-R--5507--SE
Månad	November
Utgivningsår	2023
Antal sidor	65
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare	Försvarsmakten
Forskningsområde	Flygsystem och rymdfrågor
FoT-område	Rymdsystem
Projektnr	E85081
Godkänd av	Lars Höstbeck
Ansvarig avdelning	Försvarsteknik

Bild: Ramin Farid, FOI

Alla bilder, grafer och figurer i rapporten är från FOI om inte annat anges.

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

Tillgången till en tillförlitlig militär rymdlägesbild är en viktig del för att upprätthålla Försvarsmaktens handlingsfrihet i rymddomänen. En stor del av den militära rymdlägesbilden innefattar karakterisering av satelliter. Karakteriseringen avser att utvärdera satelliters situationsberoende parametrar, fysiska attribut och beteende. Det kan ge underlag för kvalificerade bedömningar av satelliters förmågor och utifrån det göra en hotanalys mot egna satelliter eller verksamhet i andra domäner.

Avsikten med rapporten är att ge en överblick av de metoder som idag används och utvecklas för karakterisering av satelliter. Metoder som utvärderas innefattar radar-, laser- och optiska system samt öppen information. Mindre etablerade metoder går också igenom exempelvis nedläns- och fragmenteringsanalys. Resultaten sammanställer vilka metoder som är lämpliga att använda för att mäta in olika karakteriseringsparametrar och presenteras på matrisform.

Denna rapport utgör en sammanfattning och påbyggnad av tidigare arbeten inom FoT-projektet rymdlägesbild, främst till *Inmätning av rymdobjekt – Rymdlägesbild med egen rådighet* (2022). Det finns även rikligt med referenser till andra tidigare rapporter som kan ge mera information för den intresserade läsaren.

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

Summary

Access to a reliable space domain awareness is an important part of maintaining the Swedish Armed Forces' freedom of action in the space domain. A large part of the military space domain awareness involves the characterization of satellites. The characterization aims to evaluate satellites' situation-dependent parameters, physical attributes and behaviour. It can provide a basis for qualified assessments of satellites' capabilities and, based on that, make a threat analysis against satellites or activities in other domains.

The purpose of the report is to provide an overview of the methods that are currently used and developed for the characterization of satellites. Methods evaluated include radar, optical and laser systems as well as open information. Less established methods are also reviewed, for example downlink and fragment analysis. The results summarise which methods are suitable to use to measure different characterization parameters in a matrix form.

This report should be seen as a summary and build-up of previous work within the research and development project in space situational awareness (*Swe. FoT rymdlägesbild*), and a direct successor to the report *Inmätning av rymdobjekt – Rymdlägesbild med egen råddighet* (2022). There are also plenty of references to other previous reports that can provide more information to the interested reader.

Keywords: space, space situational awareness, space domain awareness, characterisation, SDA, SSA, SST, radar, optics, laser, telescope, satellite, catalogue, database

Innehåll

Förkortningslista	7
1 Inledning	9
1.1 Syfte.....	10
1.2 Avgränsningar och definitioner.....	10
1.3 Läsanvisningar.....	11
2 Karakterisering av satelliters och satellitsystems förmåga	12
2.1 Förmågemodell.....	12
2.1.1 Karakteriseringsparametrar	13
2.1.2 Osäkerhetsanalys	15
2.2 Satellitbanor och typiska användningsområden	15
3 Metoder för karakterisering	19
3.1 Radarmätningar	19
3.1.1 Karakterisering med radar	20
3.2 Optiska mätningar	25
3.2.1 Fotometri.....	26
3.2.2 Polarimetri.....	28
3.2.3 Spektroskopi	29
3.3 Lasermätningar.....	31
3.4 Karakterisering med öppen information	33
3.4.1 Öppen astronomisk data.....	34
3.5 Övriga metoder	36
3.5.1 Nedlänksanalys.....	36
3.5.2 Fragmenteringsanalys	37
3.5.3 Optisk avbildning.....	42
3.5.4 Ockultationsavbildning av satelliter	42
3.5.5 Manövreringshistorik.....	44

forts. nästa sida

4	Sammanställning av metoder	47
4.1	Metodmatris	47
4.2	Metodfusion	50
4.3	Maskininlärning.....	52
5	Diskussion	53
6	Slutsatser	55
6.1	Framtida arbete	56
	Referenser	57

Förkortningslista

AESA	<i>Active Electronically Scanned Array</i>
AMOS	<i>Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies</i>
ASAT	<i>Antisatellitvapen</i>
CCR	<i>Cube Corner Reflector</i>
DLR	<i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</i>
EISCAT	<i>European Incoherent Scatter Scientific Association</i>
GEO	<i>Geostationary Earth Orbit</i>
GESTRA	<i>German Experimental Space Surveillance and Tracking Radar</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HEO	<i>Highly Elliptical Orbit</i>
HRRP	<i>High Resolution Range Profile</i>
IOD	<i>Initial Orbit Determination</i>
ISAR	<i>Inverse Synthetic Aperture Radar</i>
ISS	<i>International Space Station</i>
LCO	<i>Los Cumbres Observatory</i>
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PNT	<i>Positioning, Navigation and Timing</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SatKom	<i>Satellitkommunikation</i>
SIGINT	<i>Signal Intelligence</i>
SLR	<i>Satellite Laser Ranging</i>
SPASE	<i>Small payload access to space experiments</i>
SSA	<i>Space Situational Awareness</i>

SSC	<i>Swedish Space Corporation</i>
SST	<i>Space Surveillance and Tracking</i>
SWE	<i>Rymdväder</i>
SÖR	<i>Spaning och Övervakning från Rymden</i>
TIRA	<i>Tracking and Imaging Radar</i>
TLE	<i>Two-line Element set</i>
TNO	<i>Nederlandse organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek</i>

1 Inledning

Rymddomänen befinner sig i snabb förändring. Intressesfären för rymdbaserade aktiviteter och tjänster har vidgats från huvudsakligen militära användningsområden till en bred kommersialisering där privata bolag gör stora investeringar. Antalet rymdnationer har också vuxit snabbt, från att USA och Ryssland i slutet på 1950 och i början på 1960-talet var ensamma rymdnationer till att det nu är över 90 nationer som innehar och kontrollerar egna satelliter [1]. Den snabba utvecklingen av aktiviteter i rymddomänen har lett till en förhöjd risk för konflikt gällande militära förmågor, förutsättningar och intressen, men även för den kommersiella marknaden [2]. Kriget i Ukraina har dessutom på flera sätt belyst rymdens växande betydelse för att upprätthålla en lägesbild över mark-, sjö- och luftdomänen men också för att kunna bibehålla kommunikationen inom landet. Med hjälp av jordövervakade satelliter har krigsbrott utförda av Ryssland också kunnat dokumenteras och kommersiella rymdsystem har spelat en signifikant roll i en krigssituation [3].

I Försvarsmaktens doktrin för gemensamma operationer pekas rymden ut som en operativ domän och Försvarsmakten belyser att ”varje strategisk aktör i rymddomänen måste försäkra sig om att inte bli utsatt för någon annans aktörs rymdmakt” [4]. Detta innebär att dessa aktörer måste försäkra sig om att inte förnekas förmågan att använda rymddomänen för militära, civila eller kommersiella syften. Det finns därför ett behov av en militär rymdlägesbild (eng. *space domain awareness*) för att ge både strategiskt och operativt beslutsunderlag. Den militära rymdlägesbilden bör innefatta en situationsmedvetenhet om vad som finns i omloppsbana, anskaffad via övervakning och inmätning av rymdobjekt, SST (eng. *space surveillance and tracking*), kunskap om och prognoser för rymdväder (eng. *space weather*) samt förmågan att kunna identifiera och karakterisera satelliter [5]. Det sistnämnda är viktigt för att kunna utvärdera andra aktörers rymdsystems förmågor och därmed ha tillgång till en aktuell lägesbild av möjliga hot i och från rymden.

En viktig del i den militära rymdlägesbilden är information om satelliters position över tid som en del av situationsmedvetenheten. I FOI-rapporten *Inmätning av rymdobjekt – Inmätning med egen rådighet* [5] beskrivs vad som krävs för att med egen rådighet bygga upp och upprätthålla en sådan objektkatalog. Den här rapporten har istället huvudsaklig bäring på hur satelliter kan karakteriseras och kan ses som ett komplement till ovan nämnda rapport [5], tillsammans ger de en god överblick över vad som tekniskt krävs för att kunna uppnå och bibehålla stora delar av en militär rymdlägesbildsförmåga.

1.1 Syfte

Den här rapporten är en del av den kunskapsuppbyggnad FOI bedriver inom ramen för Försvarsmaktens forsknings- och teknikutvecklingsverksamhet (FoT) inom militär rymdlägesbild. Den syftar till att ge läsaren en grundläggande förståelse av karakterisering av satelliter och satellitsystem samt en övergripande bild av vilka metoder som lämpar sig för detta. Rapporten visar på vad som är möjligt att göra idag samt ger en utsikt för hur karakterisering kan genomföras inom en snar framtid med utgång i framväxande teknik.

1.2 Avgränsningar och definitioner

All information som sammanställts i denna rapport är uteslutande hämtad från öppna källor samt eget arbete. Som grund till rapporten ligger det kunskapsuppbyggande arbetet som genomförts på FOI mellan 2020 och 2023, där viktiga komponenter är tidigare FOI-rapporter [5]–[7], memon [8] [9] och rapportering från konferensdeltagande, främst på rymdlägesbildskonferenserna AMOS¹ [10] [11] samt Military SSA² [12] [13]. En stor influens till rapportens inriktning kommer från det nederländska forskningsinstitutet TNO:s (eng. *Netherlands organisation for applied scientific research*) forskning om förmågeutvärdering av satelliter [14].

Metoderna som presenteras för karakterisering av satelliters och satellitsystems förmågor är avsedda att representera ett brett urval av relevanta metoder; några är välbeprövade medan andra är relativt nya. De skall inte betraktas som en uttömmande redogörelse av alla metoder lämpliga för karakterisering. Varje metod utvärderas efter samma frågeställningar:

- Hur karakteriserar metoden satelliter?
- Vilka för- och nackdelar finns med metoden?
- Krävs högutbildad personal för att använda metoden?
- Är metoden beroende av vissa förutsättningar, till exempel väderlek och tid på dygnet?

Källor som används för att besvara dessa frågor är rapporter och artiklar, både interna och externa samt läroböcker inom relevanta områden. För framväxande tekniker och metoder har konferensrapporter från AMOS studerats. Endast metoder som är jordbaserade utvärderas i denna rapport.

¹ AMOS, eng. *advanced Maui optical and space surveillance technologies*

² Military SSA, eng. *space situational awareness*

För tydlighet görs även vissa definitioner och begränsningar:

- Det görs skillnad på en militär rymdlägesbild, SDA, och en civil rymdlägesbild, SSA (eng. *space situational awareness*). SDA fokuserar på just militär användning av satelliter för att få en antagonistisk hotbild medan SSA behövs för hanteringen av oavsiktliga och naturliga hot för att förebygga kollisioner, hantera återinträden och effekter från rymdväder. I den här rapporten avser begreppet rymdlägesbild specifikt den militära rymdlägesbilden, då den typ av karakterisering som berörs i denna rapport i första hand är av militärt intresse.
- För varje metod ges en övergripande teknisk översikt för att läsaren ska förstå hur metoderna kan nyttjas för karakterisering.
- En distinktion görs mellan begreppen röd satellit och blå satellit. Till röd satellit finns ingen tillgång eller direkt kännedom medan till en blå satellit finns både tillgång och kännedom. Tillgången kan säkerställas genom egen operationell verksamhet eller att det finns tillgång till satellitens nyttolastdata, det vill säga att någon annan opererar satelliten. Generellt avser karakterisering tillämpning på röd satellit men metodutveckling sker i regel på blå satelliter.
- Begreppet satellitsystem avser en eller flera satelliter och dess marksegment som används var för sig eller tillsammans för att uppnå önskad förmåga.
- Rapporten avser inte att dra några slutsatser om vilka karakteriseringsparametrar som bidrar till att upptäcka en viss förmåga, även om exempel ges på vad som skulle kunna vara möjligt.

1.3 Läsanvisningar

I kapitel 2 presenteras hur karakterisering av satelliter och satellitsystem skulle kunna utföras för att uppskatta en röd satellits förmåga. En möjlig förmågemodell beskrivs med potentiellt viktiga karakteriseringsparametrar och osäkerhetsanalys. För den intresserade läsaren återfinns även här en kort beskrivning av olika satellitbanor och dess typiska användningsområden. De utvalda metoderna för karakterisering beskrivs i kapitel 3. Varje metod presenteras på en grundläggande teknisk nivå följt av en beskrivning av vilka karakteriseringsparametrar den är lämpad för. Exempel på aktiva system beskrivs också här. I kapitel 4 redovisas en sammanställning av metoderna i matrisform för att enkelt ge läsaren en överblick över vilka metoder som passar för att mäta in specifika parametrar. Här presenteras också hur metodfusion och maskininlärning kan förbättra analysen. Avslutningsvis förs diskussion om för- och nackdelar med de olika metoderna i kapitel 5, tillsammans med en diskussion om relevans för Försvarsmakten. I kapitel 6 presenteras slutsatser och förslag på fortsatt arbete.

2 Karakterisering av satelliters och satellitsystems förmåga

Karakterisering av en satellit eller ett satellitsystem görs för att skaffa sig information om dess användningsområde och förmågor. Denna inhämtning kan göras på olika sätt, bland annat genom att skaffa sig tillgång till underrättelseinformation, men även genom att studera satelliten med en så kallad karakteriseringsmätning från marken eller rymden.

2.1 Förmågemodell

Genom att kartlägga satelliternas karakteristik kan deras förmågor härledas. I forskning utförd av TNO beskrivs metoder och verktyg för att från utpekade karakteriseringsparametrar avgöra en satellits förmågor [14]. I sin forskning har de tagit fram både en metod och ett verktyg för att ta fram en så kallad förmågemodell (eng. *space capability matrix*). TNO framhåller behovet av att kunna identifiera nyckelparametrar hos satelliten för att från dessa kunna härleda vilken förmåga som satelliten har och satellitoperatörens eventuella intentioner. Vikt läggs också vid hur dessa utmärkande parametrar kan observeras genom karakteriseringsmätningar.

En sådan informationsmodell, i rapporten kallad Förmågemodell, kan tas fram genom att identifiera och mäta in nyckelparametrar, vikta dess innebörd för en viss typ av förmåga och sedan summera de viktande parametrarna. Varje uppskattad eller uppmätt parameter kommer med en osäkerhet som också behöver beskrivas av modellen. Med information om nyckelparametrar kan den militära förmågan med tillhörande osäkerhet utvärderas genom förmågemodellen. Förmågemodellen kan ge information om troliga användningsområden, till exempel spaning och övervakning från rymden (SÖR) eller satellitkommunikation (SatKom), och den tekniska kapaciteten, exempelvis manövreringsförmåga. Andra relevanta teknologier inkluderar antisatellitvapen (ASAT).

Exempelvis skulle identifikation av nedan listade olika tekniska förmågor vara viktiga för karaktäriseringen för att kunna uppskatta det militära användningsområdet på följande sätt:

- **Stabilisering:** Många användningsområden ställer krav på att satelliten är stabiliserad (spinn eller treaxligt), till exempel kommunikation eller jordobservation. Hur den är stabiliserad och hur väl den bedöms kunna upprätthålla pekriktningen påverkar den militära förmågan, och är därmed lämpliga karakteriseringsparametrar.
- **Energiförsörjning:** Beroende på användningsområde ställs olika krav på energiförsörjningen, där exempelvis avbildning med syntetisk apertur-radar (SAR) från rymden typiskt kräver stora solpaneler. Storleken på solpanelerna är därmed en viktig karakteriseringsparameter.
- **Antenntyp:** Olika användningsområden nyttjar olika typer av antenner, allt från mindre elektroniska antenner vid jordobservation till större parabol-er vid kommunikation. Därför är det viktigt att kunna avgöra vilken typ av antenn som satelliten har.

I Figur 1 illustreras en övergripande förmågemedell och hur den skulle kunna realiseras, från inhämtade karakteriseringsparametrar till utvärdering av möjlig militär förmåga.



Figur 1. Ett illustrativt användarflöde av en förmågemedell från inhämtade karakteriseringsparametrar till härledning av en satellits eller ett satellitsystems militära förmåga.

2.1.1 Karakteriseringsparametrar

Forskarna vid TNO delar in karakteriseringsparametrarna i tre olika grupper: situationsberoende, fysiska attribut och beteende. Exempel på karakteriseringsparametrar som skulle kunna ingå i dessa kategorier finns i Tabell 1.

Tabell 1. Karaktiseringsparametrar som skulle kunna mätas in för att ingå i en förmågemodell, uppdelade efter kategorierna ur TNO:s forskning.

SITUATIONSBEROENDE	FYSISKA ATTRIBUT	BETEENDE
Satellitens bana	Material	Manövrering
Del av konstellation eller formation	Form/geometri och storlek	Satellitens frekvensanvändning ³
Karaktär på uppskjutningen	Typ av sensorer på satelliten	Satellitens orientering
	Elektromagnetiska signaturer ⁴	Orienteringsstabilitet
	Framdrivning	

Nedan följer en kort beskrivning av de olika kategorierna och karaktiseringsparametrarna samt vad de skulle kunna identifiera i form av förmåga.

Situationsberoende

Till de situationsberoende parametrarna hör de som beskriver i vilken rymdmiljö som satelliten eller satellitsystemet befinner sig i (eller har befunnits sig i). Av särskild vikt här är vilken typ av bana satelliten har, detta kan säga mycket om vilken typ av förmåga satelliten kan ha då olika banor är mer eller mindre gynnsamma för olika aktiviteter. Beskrivning av satellitbanor och typiska användningsområden finns i kapitel 2.2. Att undersöka om satelliten tillhör en konstellation⁵ är också av intresse, även vilka andra typer av satelliter och markstationer som ingår i systemet kan säga något om dess syfte. Att studera uppskjutningen av en satellit kan också ge indikationer på satellitens karaktär. Uppskjutningsplatsens latitud kan begränsa vilka banor som satelliten kan nå (utan att spendera stora mängder bränsle). Därutöver sätter bärraketens övre gränser för satellitens vikt, volym samt höjd på omloppsbanan. Är det flera satelliter ombord så begränsar detta ytterligare hur tung och stor varje individuell satellit kan vara.

Fysiska attribut

Satellitens fysiska attribut kan på olika sätt indikera dess förmåga och intentioner. Geometriska egenskaper så som storlek och form kan visa på vilken typ av satellit det är, likaså kan slutsatser dras om förmågor från vilken typ av material den är gjord av eller vilken typ av sensorer den har. Framdrivningen kan säga något om dess manövreringsförmågor och dess intentioner. Elektromagnetiska signaturer skulle kunna vara unika för vissa typer av satelliter, eller hela vägen ner på individnivå, vilket i så fall skulle kunna nyttjas som en relativt enkel identifiering.

³ Frekvensanvändningen kan beskriva ned-, upp-, och korslänk samt de frekvenser eventuella aktiva sensorer använder.

⁴ Till elektromagnetiska signaturer hör radar-, spektral-, fotometrisk och polarimetrisk signatur.

⁵ En konstellation definieras här som två eller fler satelliter som tillsammans jobbar för ett gemensamt syfte.

Beteende

Beteenderelaterade parametrar är sådana som kan beskriva satellitens, eller systemets, beteende eller vilka handlingar den kan utföra så som manövrering, orientering och att hålla sig stabil. Dessa kan också studeras för att kunna uppskatta om satelliten är aktiv eller inaktiv. Utöver det kan frekvensanalys ge möjlighet att uppskatta hur mycket data systemet kan skicka och ta emot vilket kan utgöra ytterligare en pusselbit i analysen av satellitens syfte.

2.1.2 Osäkerhetsanalys

Osäkerhetsanalysen i modellen är viktig för att ge en uppfattning på hur säkert en satellits förmåga kan fastställas. Från den kan information fås gällande vad som behövs för en tydligare karakterisering så som vilken typ av sensor eller mätmetod som krävs för att komplettera datamängden, till vilken noggrannhet karakteriseringsparametern behöver mätas in samt hur dessa (metod och noggrannhet) kan kombineras på ett optimalt sätt.

För att avgöra den övergripande osäkerheten i förmågemodellen behövs osäkerheterna från de olika underliggande mätningarna, det vill säga mätfelen som direkt påverkar mätningarna. Detta kan vara systematiska fel som ger samma fel i varje mätning, till exempel fel på instrumentering; eller stokastiska mätfel som atmosfärsstörningar vid optiska mätningar eller mät- och bakgrundsbrus vid mätning med radar. Genom kalibrering av mätinstrumenten kan de systematiska mätfelen minimeras och genom att göra upprepade mätningar kan de slumpmässiga felen uppskattas statistiskt och även de minimeras. För att uppskatta osäkerheten i förmågemodellen är det därför viktigt att kvantifiera felet för varje mätning och karakteriseringsparameter.

2.2 Satellitbanor och typiska användningsområden

Följande avsnitt är delvis anpassat från motsvarande kapitel i *Inmätning av rymdobjekt – Inmätning med egen råddighet* [5] med syfte att ge en kort beskrivning av satellitbanor och vilka typiska användningsområden satelliter i specifika banor har. Det ska tilläggas att detta speglar hur situationen ser ut idag och att den kan förändras över tid allt eftersom nya tekniker och tillämpningar tas fram.

Satelliter placeras i olika banor beroende på deras användningsområde och uppdrag. Satellitbanorna delas normalt upp i ett antal typer som beror på deras höjd över jordytan, men även dess excentricitet⁶. I Tabell 2 nedan definieras de olika bantyperna och deras typiska användningsområden: låga jordbanor, LEO (eng. *low earth orbit*), mellanhöga jordbanor, MEO (eng. *medium earth orbit*), högelliptiska

⁶ Excentriciteten är ett mått på hur cirkulär en satellitbana är.

jordbanor, HEO (eng. *highly elliptical orbit*), geostationära jordbanor, GEO (eng. *geo stationary orbit*) och kyrkogårdsbana (eng. *graveyard orbit*)⁷. I Figur 2 återfinns även en illustration av de olika typerna av satellitbanor. Notera att det finns undantag från det normala användningsområdet, exempelvis jordobservation från geostationära jordbanor.

Tabell 2. Beskrivning av satellitbanor och olika typiska användningsområden.

BANTYP	BANHÖJD	TYPISKT ANVÄNDNINGSMRÅDE
LEO	Upp till 2000 km	Jordobservation och kommunikation ⁸
MEO	Mellan 2000 - 35 786 km	Position, navigation och tidssynkronisering
HEO ⁹	-	Kommunikation
GEO	35 786 km	Kommunikation
Graveyard	>36 200 km	Förbrukade satelliter

Utöver kategoriseringen ovan finns också olika typer av banor som beror på inklinationen¹⁰, som styr var över jorden som satelliten passerar. Dessa kan delas in som polära och solsynkrona för vilka inklinationen är 85°-95°, icke-polära banor, som har inklinations 50°-85° och slutligen Molnijabanor som är en HEO orienterad med apogeum¹¹ över norra halvklotet.

Baninformation om en satellit kan sparas i ett format som kallas TLE (eng. *two-line element set*). TLE innehåller parametrar om satellitens bana så som dess inklinations och excentricitet men också satellitens katalognummer och vid vilken epok. Satellitens framtida positioner kan fås genom propagering¹² av banparametrarna från satellitens TLE. Felet i propageringen, vid användning av data från Space-Track (se kapitel 3.4), är vanligen litet nog för att de förutspådda positionerna ska kunna användas upp till en vecka efter epoken [7].

⁷ Kyrkogårdsbana är ett samlingsnamn på de banor som operatörerna använder för att placera satelliter i när de antingen har för lite bränsle kvar för att kunna utföra en så kallad *station-keeping*-manöver (vilka säkerställer satellitens position i den tilldelade positionen i geostationära jordbanor), 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.

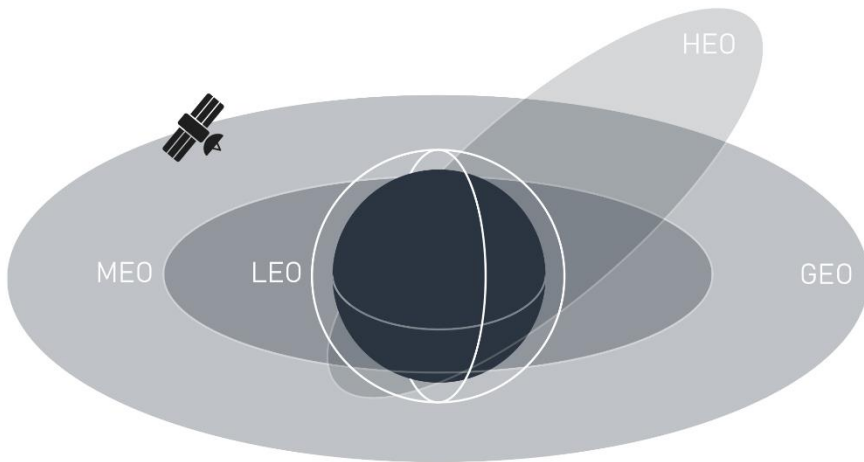
⁸ På senare år placeras allt fler kommunikationssatelliter i låga jordbanor, ofta som en del av de nya megakonstellationerna som exempelvis Starlink-konstellationen.

⁹ Elliptiska banor med hög excentricitet som befinner sig långt från jorden i en del av banan och närmare i en annan del av banan, exempelvis Molnijabanor.

¹⁰ Inklinations beskriver banplanetets lutning i förhållande till ekvatorn.

¹¹ Apogeum är den punkt på satellitbanan som har störst avstånd till jorden, punkten på satellitbanan som är närmast jorden kallas perigeum.

¹² Propagering innebär att matematiskt och fysikaliskt förutse var satelliten kommer att befinna sig genom att titta på tidigare mätdata.



Figur 2. En illustration av de vanligaste typerna av satellitbanor.

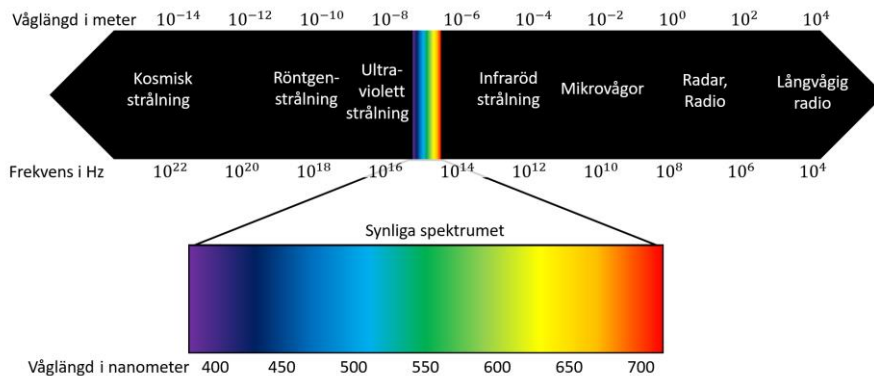
Det är vanligt att jordobservationssatelliter med optiska sensorer ligger i LEO och har en solsynchron bana, detta för att få konstanta ljusförhållanden och god spatial upplösning vid avbildning. I en solsynchron bana passerar satelliten över samma position på marken samma lokala soltid varje dag. Kommunikationssatelliter i LEO har däremot vanligtvis en icke-polär bana och för att få global täckning behöver satellitsystemet distribueras över flera banplan och bilda stora konstellationer. Ju högre bana kommunikationssatelliterna har desto större täckning får de och desto färre satelliter behövs för global täckning; därför ligger de flesta äldre kommunikationssystemen i GEO, men också i HEO. I HEO ter sig satelliten näst intill stationär när den passerar apogeum, vilket gör det möjligt att täcka in väldigt nordliga eller sydliga latituder beroende på banans orientering. Satelliter i HEO kan fungera som ett komplement till satelliterna i GEO som har svårt att täcka in polerna. Det ryska systemet för tidig förvarning (eng. *missile early warning system*) nyttjar satelliter som är i Molnijabanor. De flesta PNT-tjänster (eng. *positioning, navigation and timing*) fås från GNSS-satelliter (eng. *global navigation satellite system*) som ligger i MEO så som det amerikanska systemet GPS (eng. *global positioning system*) och det ryska GLONASS (eng. *global navigation satellite system*). Detta är en sorts kompromiss mellan att få snabbare kommunikation till och från jorden än vad som är möjligt från inmätning av GEO men större täckning per satellit än från LEO. Typisk militär användning av de olika banorna beror också på den önskade tillämpningen. Gällande inmätning för en militär rymdlägesbild står det i Försvarsmaktens doktrin för gemensamma operationer [4] att ur ett militärt perspektiv är det främst, men inte uteslutande, spaningsatelliter som är av intresse. Redogörelse av vad som bör klassas som en spaningsatellit är inte en del

av denna rapport men för en diskussion om militära satelliter, främst i LEO, hänvisas läsaren till FOI-rapporten *Inmätning av satelliter – En studie av radarsensor-tillämpning* [6].

3 Metoder för karakterisering

I följande kapitel redovisas olika metoder som kan användas vid karakterisering av satelliter. För varje metod beskrivs den bakomliggande tekniken i korthet och vilka karakteriseringsparametrar i Tabell 1 som metoden är lämplig för. Exempel på aktiva system eller nyligen utförda experiment inom området ges för vissa metoder. Urvalet är inte heltäckande utan anses representera tekniken idag. För varje metod förs även kort diskussion om dess för- och nackdelar löpande i texten. Till den som är intresserad av en djupare beskrivning av tekniken rekommenderas referenserna i varje avsnitt.

Flera av metoderna nedan nyttjar det elektromagnetiska spektrumet. En vanlig indelning av spektrumet ses i Figur 3.



Figur 3. En översikt av det elektromagnetiska spektrumet inklusive våglängd och korresponderande frekvens.

3.1 Radarmätningar

Här presenteras karakteriseringsmetoder utförda med radarsystem, dessa system nyttjar radiovågor i frekvensområdet MHz till GHz i det elektromagnetiska spektrumet. Radar kan delas in i aktiva och passiva system, den tekniska bakgrunden beskrivs nedan, följt av en översikt av vilka karakteriseringsparametrar som kan mätas in med radarsystem.

Aktiv radar

Det aktiva radarsystemet sänder ut elektromagnetiska vågor och mäter avståndet till satelliten genom att ta tiden från att utsignalen skickas tills att radioekot tas emot. Satellitens hastighet i avståndsled fås genom observation av dopplerskiftet i frekvensen hos det mottagna ekot relativt utsignalen. För att kunna särskilja radioekot mot bakgrundsbruset på längre avstånd krävs en större sändareffekt eller andra förbättringar av radarsystemet. Signal-till-brusförhållandet för det uppmätta

radioekot förhåller sig mot avståndet R som R^{-4} vilket gör det mer energikrävande för mätningar av objekt i högre omloppsbanor [6].

Det finns olika systemgeometrier¹³ för radarsystem och de har olika för- och nackdelar, både ekonomiskt och tekniskt. Monostatisk konfiguration är just nu vanligast för aktiv radar och mest utforskat vilket ger en god teknisk mognad på befintliga system. Det kräver dock i allmänhet en pulsad signal vilket kan medföra att mål på långt håll kan vara svårare att upptäcka. En bistatisk systemgeometri kan sända kontinuerligt vilket kräver lägre toppeffekt och kan underlätta att upptäcka mål på långt håll. Dock ställs högre krav på fas- och tidssynkronisering av signalen mellan delsystemen. Den tekniska utvecklingen pekar på att bistatiska system blir allt vanligare. För en djupare rapportering om mätning av satelliter med radarsystem, se FOI-rapport: *Inmätning av satelliter – en studie av radarsensortillämpning* [6].

Passiv radar

Passiv radar bygger på samma principer som en bi- eller multistatisk radar, med skillnaden att utsänd vågform inte kan kontrolleras. Sändare vid passiv radar kallas för icke-kooperativa sändare (eng. *illuminator of opportunity*) och har ofta andra användningsområden som kommunikation, radio och digital-TV [15]. Vanligtvis sänder den icke-kooperativa sändaren kontinuerligt och i flera riktningar. Mottagaren konstrueras med möjlighet att detektera referenssignalen direkt från sändaren och signalekot från satelliten. Genom signalbehandling korreleras de två uppmätta signalerna och ekots tidsförskjutning kan bestämmas. Distansen till satelliten och dess hastighet (relativt någon punkt i mottagningssystemet) kan där efter härledas ur mätdata [5].

Med passiv radar kan materialkostnaderna hållas nere då befintliga sändare nyttjas och användaren endast behöver mottagare. Med passiv radar kan också flera frekvensområden användas som annars inte är tillåtna för aktiv radar. Dessa är dock inte nödvändigtvis optimala för radar och kan resultera i att upplösningen i avståndsled varierar stort beroende på sändarens frekvens [15].

3.1.1 Karakterisering med radar

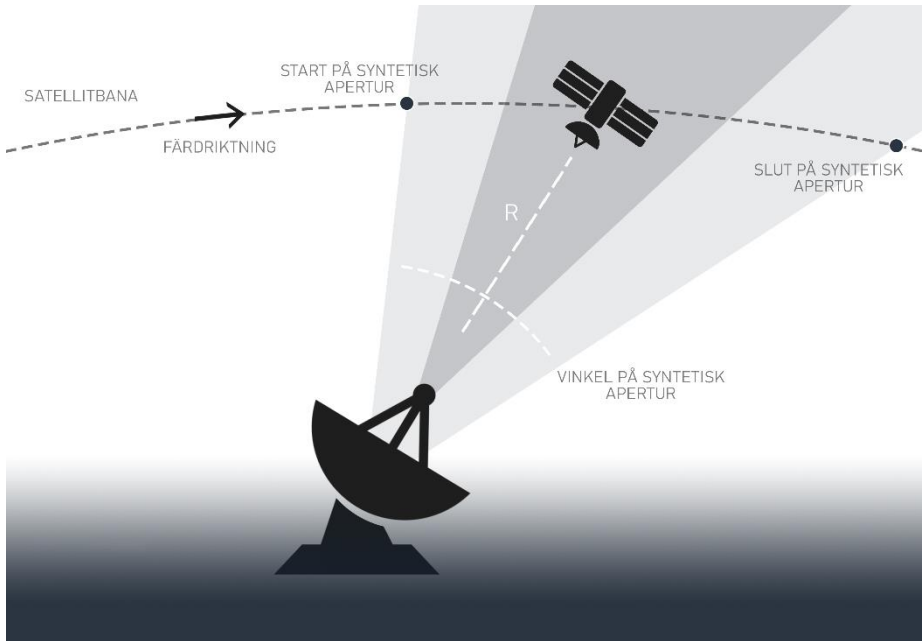
För att karakterisera satelliter med radar finns olika tillvägagångssätt, notera att dessa kan skilja sig mellan aktiv och passiv radar. Nedan följer en beskrivning av hur fysiska attribut kan karakteriseras genom avbildning och hur banbestämning (en situationsberoende karakteriseringsparameter) kan genomföras med radar. Det redogörs för några aktuella experiment och metoder samt aktiva system.

¹³ Systemgeometrier för radarsystem delas in i monostatiska eller bi- och multistatiska. Monostatiska system har en sändare och mottagardel på samma plats medan bistatiska system består av fysiskt separerade sändar- och mottagardelar. Ett bistatiskt system där sändaren och mottagaren är placerade intill varandra kallas för kvasi-monostatiskt. Ett multistatiskt radarsystem består av fler än en sändare eller mottagare och kan ses som en kombination av flera bistatiska par.

Fysiska attribut

Karakterisering av fysiska attribut kan göras med radaravbildning. För detta nyttjas metoden invers syntetisk aperturradar, ISAR (eng. *inverse synthetic aperture radar*). ISAR bygger på att satelliten under en passage kan observeras från olika vinklar, se Figur 4. Satelliten är i princip uppbyggd av flera spridningscentra som beror på satellitens konstruktionsgeometri och material. Placeringen av dessa spridningscentrum relativt varandra förändras inte över tiden sett från satellitens axlar. Från radarn utgår en linje mot målets (satellitens) rotationscentrum och radarn sänder ut pulser längs denna axel, radarstrålningen reflekteras mot flera olika spridningscentrum på satelliten och dess hastighet erhålls genom att kombinera resultaten från successiva pulsekon från satelliten. För att kombinera resultat från längre tidsintervall används så kallad rörelsekompensering för att hantera förändringar i avståndet mellan radarn och satelliten. Kombinerat med antaganden om satellitens rotation används därefter dessa delresultat för att rekonstruera en tvådimensionell bild av målet (rotationer kring axeln längs radarns utbredningsriktning kommer inte att bidra). Vid karakterisering av fysiska attribut är det värdefullt att kunna observera satelliten från flera perspektiv vilket gör att olika detaljer som endast är synliga från vissa riktningar kan observeras [16]. Högre bildupplösning fås då radarn följer satelliten över en bredare vinkelintervall vilket ger en större syntetisk apertur [17]. Bättre upplösning i avståndsled kan erhållas med högre bandbredd i sändpuls, upplösningen är omvänt proportionell mot bandbredden [18].

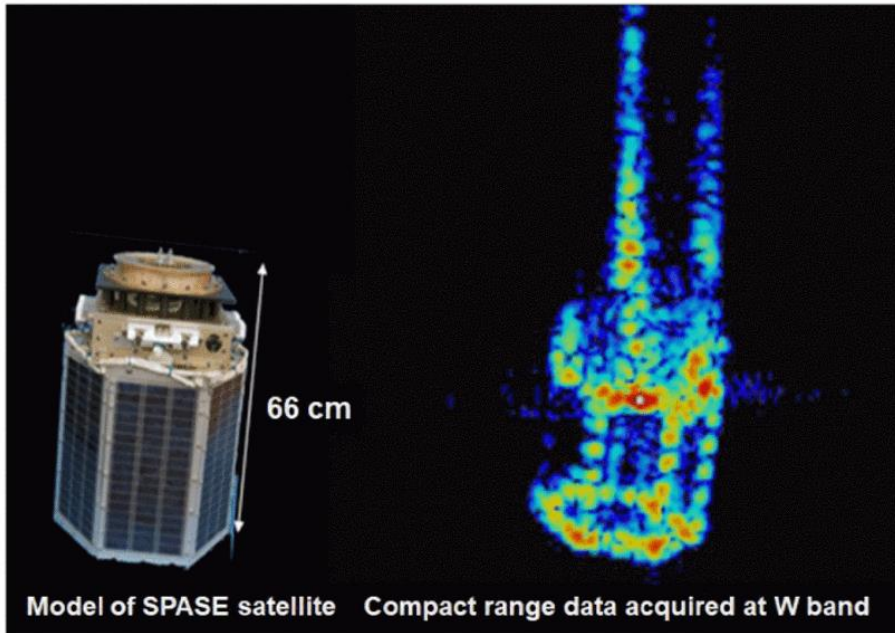
Ett projekt vid tyska forskningscentret German Aerospace Center DLR, Microwaves and Radar Institute [19] har tagit fram ett experimentellt radarsystem, IoSiS (eng. *imaging of satellites in space*) för avbildning av satelliter i rymden. Tester utförda med den internationella rymdstationen ISS som mål har uppnått en upplösning på 6 centimeter i avståndsled och på 4 centimeter i azimutled, för bilder se artikeln *challenges in very high resolution imaging of satellites and objects in space* [19]. Teoretiskt kan avståndsupplösningen uppgå till 3,4 centimeter om utsignalens bandbredd ligger på maxvärdet 4,4 GHz [17]. En annan tysk radarstation som övervakar rymdobjekt är TIRA (eng. *tracking and imaging radar*) som drivs av Fraunhofer Institute for High-Frequency Physics and Radar Techniques, FHR. Med TIRA kan ett flertal parametrar för satelliten karakteriseras, så som: banelement [20]; orientering och orienteringshastighet [21]; ballistiska koefficienten [22]; storlek och form på satelliten [23]; samt massa och material för satelliten [24].



Figur 4. Illustrering över ett markbaserat radarsystem. R är avståndet till satelliten och den syntetiska aperturen är den sträckan satelliten färdas från start till slut av mätningen.

Ett annat exempel är HUSIR (eng. *haystack ultra-wideband satellite imaging radar*) som är ett radarsystem vid MIT Lincoln Laboratory i USA. Radarsystemet används för satellitavbildning och är en del av USA:s nätverk för rymdövervakning. HUSIR är ett ISAR system som kan göra avbildningar av satelliter i LEO med en upplösning på 3 centimeter. Efter planerad uppgradering av sändaren förväntas systemet kunna mäta in objekt i GEO med samma upplösning [25]. Radarbilder från HUSIR är hemliga men Figur 5 illustrerar med vilken upplösning systemet kan avbilda objekt i LEO och efter uppgraderingen även objekt i GEO. Avbildningen är gjord på en modell av en NASA SPASE-satellit med öppen *compact range data*.

Teknik för avbildning med passiv ISAR är under utveckling. I ett experiment utfört i januari 2019 av forskare bland annat från Tohoku University har ett civilt flygplan på cirka 300 meters avstånd avbildats med passiv ISAR. I detta experiment användes GNSS-satelliter som belysare och flygplanets längd och hastighet kunde uppskattas till viss noggrannhet [26]. EDA-projektet RING är ett annat exempel där signaler från digital-TV används som belysare för avbildning av marina mål. Begränsningen med passiv ISAR ligger främst i tillgången på lämpliga sändare, då stor bandbredd krävs hög rumslig upplösning mot små mål.



Figur 5. Till höger ses en avbildning av en NASA small payload access to space experiment (SPASE) satellitmodell som ses till vänster. Avbildningen är skapad med öppen compact-range data i W-frekvensband. Bild: [18].

Avbildning med radar kan ge en god uppfattning av satellitens geometri, vissa yttre fysiska attribut samt orientering. Radarsystemet behöver följa satelliten under mätningen vilket kräver att satellitens bana är känd. För framtiden kan utvecklingen av passiv ISAR vara värd att observera. Passiv ISAR kan jämfört med aktiv ISAR vara billigare, både ur ett material- och energiperspektiv. Att använda signaler från GNSS-satelliter som sändare ger fördelar mot andra typer av sändare då dess tidsangivelser underlättar för den bistastiska synkroniseringen som krävs. Dock kräver passiv ISAR med GNSS avancerad signalbehandling, dels på grund av att kontinuerlig sändning ger upphov till interferens, men även då GNSS-baserad passiv ISAR kräver längre syntetisk aperturtid [26]. GNSS har dessutom väldigt svaga signaler och det finns andra metoder för tidssynkronisering.

Författarna till denna rapport har inte hittat några studier där passiv ISAR nyttjas för avbildning av satelliter.

Situationsberoende parametrar

Den situationsberoende parametern som mäts med radar är satellitens bana. För att bestämma en satellits bana med ett radarsystem krävs flera mätningar över en passage som är av tillräcklig längd i förhållande till banans storlek, form och orientering. Detta för att skapa en tillräcklig datamängd bestående av tidpunkt, banele-

ment (position och hastighet) samt osäkerheter i dessa mätningar. Genom data-analys kan datamängden kombineras och satellitens bana kan beräknas. Noggrannhetsgraden av banbestämningen beror på osäkerheter i datat och i använd analysmodell. En djupare beskrivning av olika metoder och modeller för banbestämning återfinns i FOI-rapporten: *Banbestämning av rymdobjekt – Orbit Determination* [7].

Tyska GESTRA (eng. *German experimental space surveillance and tracking radar*) är ett mobilt markbaserat radarsystem som används för banbestämning av satelliter (och andra rymdobjekt) i LEO, samt detektion av nya rymdobjekt. GESTRA är ett kvasi-monostatiskt system som använder AESA-teknik (eng. *active electronically scanned array*) där radarloberna styrs elektroniskt [6], detta för att snabbt kunna svepa över observationsfältet för att detektera nya satelliter, det kan också följa kända satelliter [27]. Det Franska systemet GRAVES (fra. *grand réseau adapté à la veille spatiale*) har bistatisk systemgeometri och nyttjar kontinuerlig sändning för att övervaka de satelliter som passerar observationsfältet [28]. Till skillnad från GESTRA, som använder avstånds-, hastighets- och accelerationsmätningar för att göra banbestämning, använder GRAVES vinkelinformation från mätningarna för att göra banbestämning [6].

Förutom statliga aktörer finns det även flera kommersiella företag som mäter in satelliter och säljer data eller tjänster relaterade till upprätthållande av rymdlägesbild, både militär och civil. Det amerikanska företaget LeoLabs är ett sådant. Deras nätverk består idag av sju markradarstationer spridda över fyra kontinenter, vilket ger en global täckning av objekt i LEO [29]. De erbjuder diverse analyser för bland annat banbestämning, varning för kollisioner och uppmärksammande av icke-kooperativa satelliters manövrering [30]. Det australienska företaget Silentium Defence är också verksamma inom övervakning och följning av satelliter i LEO, men med passiv radar. Deras anläggning Oculus Observatory i södra Australien har en stor observationsvolym vilket möjliggör att mätningar från en passage räcker för att kunna göra en banbestämning och katalogisering av kända och okända rymdobjekt [31].

Forskare vid University of Warsaw och Space Research Centre of Polish Academy of Science har undersökt hur radioteleskop avsedda för astronomiska observationer kan nyttjas som mottagare i passiva radarsystem. Initiala experiment är utförda med en polsk station för radioteleskopet LOFAR (eng. *low-frequency array*) som mottagare tillsammans med två belysare. Goda resultat redovisas för ett flygplan som mättes in på 80 kilometers avstånd och teoretiskt bör systemet kunna mäta in satelliter. Då LOFAR har ett nätverk av antenner över stora delar av Europa finns potential för ett lågkostnadssystem för övervakning av satelliter ovanför hela Europa [32]. För att nyttja detta krävs tillgång till lämpliga sändare med huvudsyftet att agera som sändare för digital radio eller television [33].

Banbestämning med radar är vanligast för satelliter i LEO, för satelliter längre utnyttjas ofta optiska sensorer. Radarmätningar, både för avbildning och banbestämning, är inte beroende av specifika väderförhållanden och kan mäta in satelliter

dag som natt. Genom upprepad mätning kan objektkataloger upprätthållas och framtida banor kan predikteras för satelliter. Satelliters manövreringar kan detekteras genom att jämföra satellitens förväntade bana med uppmätt data för specifika passager. Vid avbildning följer radarsystemet satelliten väldigt noggrant, detta gör att nya data för banbestämning kan mätas in parallellt med avbildningen och objektkataloger uppdateras.

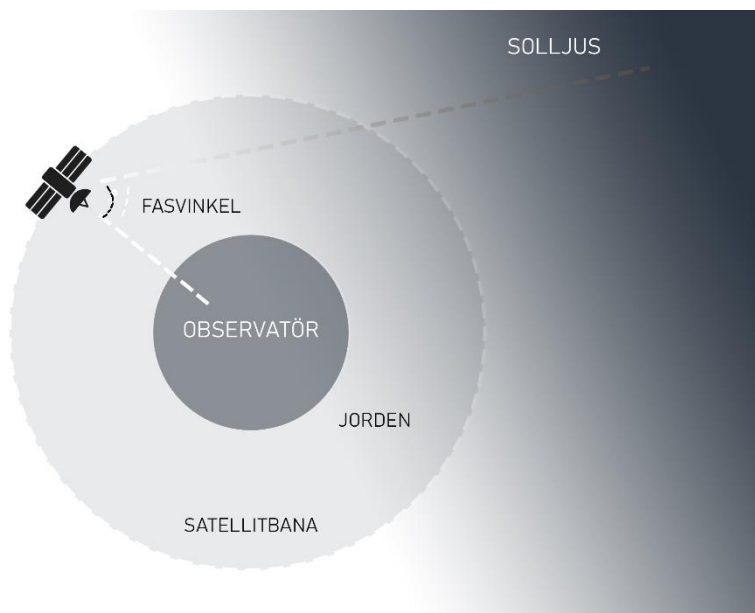
Tidigare arbeten med karakterisering med radar på FOI

- På FOI finns kompetens inom radar för rymdtillämpning, se exempelvis FOI rapporten *Inmätning av satelliter – en studie av radarsensor tillämpning* [6].
- Tester har utförts av passiv bistatisk radar på luftburna mål [34] och på satelliter (memo kommer inom kort).
- FOI deltog i NATO SET 293 radiofrekvensinmätning för rymdlägesbild (eng. *RF sensing for space situational awareness*).

3.2 Optiska mätningar

Optiska mätningar omfattar mätning av ljus inom det synliga spektrumet, alltså ljus med våglängden 400-700 nm. Metoderna som presenteras nedan (fotometri, polarimetri och spektroskopi) nyttjar huvudsakligen just det optiska spektrumet men kan även tillämpas på våglängder utanför. Fotometri, polarimetri och spektroskopi är alla passiva metoder och bygger på att solljus reflekteras mot satelliten och mäts in på jorden. Detta ställer vissa krav på fasvinkeln mellan observatören, satelliten och solen, se Figur 6, samt belysningsvinkeln relativt reflektionsytorna på satelliten [35]. Dessa metoder används i stor utsträckning inom astronomin och det finns därför en uppsjö lämpliga instrument som är i bruk vid olika teleskop och observatorier. Astronomiteleskop är dock optimerade för att mäta in händelser på mycket större avstånd och är ofta konstruerade för att följa objekt som rör sig sakta över himlen. Det är därför vanligast att med befintliga astronomiteleskop mäta in satelliter i höga omloppsbanor då det lättare går att följa satelliten. För mätning av satelliter i LEO med astronomiteleskop krävs att teleskopet mekaniskt kan följa satellitbanan med rätt hastighet, alternativt att exponeringstiden kan justeras för avbildning av satelliters rörelse över bildytan. Det sker också utveckling för att ta fram teleskop specifikt för inmätning av satelliter [5].

För att kunna genomföra optiska mätningar krävs goda väderförhållanden då moln eller andra störningar i atmosfären försämrar sikten. En annan utmaning med dessa metoder är kalibrering av data. Datakalibreringen kan bli mycket komplex och kräver viss expertis, som visas i studien FOI genomförd med NOT-teleskopet [36], se kapitel 3.2.2 och 3.2.3.



Figur 6. En illustration av fasvinkeln mellan solen, satelliten och observatören.

3.2.1 Fotometri

Med fotometri mäts den utstrålade ljusstyrkan från ett objekt. För satelliter innebär detta styrkan i det reflekterade solljuset. Genom att göra flera mätningar under samma passage kan ljusstyrkans variation över tiden sammanställas till en ljuskurva [37]. Fotometri görs ofta med speciella bandpassfilter som släpper igenom vissa frekvensområden, vilket kan användas för att ge viss information om det reflekterande materialet. Upplösningen på bandpassfiltrena är typiskt betydligt grövre än den frekvensupplösning som kan fås med spektroskopi där frekvensupplösningen är mycket finare och sträcker sig utanför det synliga spektrumet [38], se kapitel 3.2.3. Med fotometri fås därför ett lägre upplöst frekvensspektrum än vid spektroskopi. Från analys av ljuskurvorna och dess frekvensinnehåll kan satellitens rotation, orientering och material uppskattas.

Beteendeparametrar

Genom att mäta periodiciteten i ljuskurvan kan satellitens rotationstid tas fram. Dess orientering kan uppskattas genom att undersöka hur många toppar varje period i ljuskurvan innehåller, varje topp i ljuskurvan representerar en kraftig reflektion vilket kan kopplas till en specifik yta på satelliten. För att med säkerhet kunna avgöra orientering kan viss förkunskap om satelliten behövas [39].

Genom att sammanfoga flera ljuskurvor från samma satellit, uppmätta över flera passager, skulle det generella livsmönstret för satelliten kunna bestämmas. Från detta mönster kan avvikelser detekteras, som kan säga något om förändringar i satellitens tillstånd. Forskare från den kinesiska vetenskapsakademien har under flera års tid mätt in ljuskurvor från den inaktiva satelliten BeiDou-G2. Från dessa har de kunnat identifiera förändringar i satellitens rotationshastighet och genom att kombinera det med historisk baninformation har de kunnat identifiera tydliga förändringar i beteendet vid specifika kända händelser, så som kollision, läckage av bränsle och fragmentering [40].

Fysiska attribut

Genom att analysera frekvensinnehållet i ljuskurvorna kan materialet på de reflekterande ytorna uppskattas. Studier utförda av forskare vid universitetet i Arizona, USA, visar lovande resultat för möjligheten att skilja på rymdskrot och satelliter med solpaneler genom observationer med flerfärgsfilter för frekvenser nära det infraröda spektrumet. De har även förhoppningar om att denna teknik ska kunna identifiera olika generationer av satelliter baserat på att solpanelerna ändras mellan generationer [39]. Teoretiskt skulle det också vara möjligt att avgöra innehållet i drivmedlet om mätningen sker samtidigt som en manövrering. Från det skulle det även vara möjligt dra vissa slutsatser om framdrivningssystemet.

En annan studie, också gjord vid universitetet i Arizona, använder fotometridata för att ta fram vad de kallar för effektivt albedo, alltså en typ av reflektionsparameter som inkluderar fasvinkeln och det uppmätta avståndet (eng. *apparent range*). Detta gör det möjligt att jämföra olika satelliter uppmätta vid olika tillfällen. Med denna metod kan de skapa en signatur för en viss typ av satellit. De gör mätningar av både Starlink- och OneWebsatelliter och visar på hur de kan skilja dem åt med hjälp av dess fotometriska signatur (eng. *all-sky photometric signature*) och även särskilja vissa undergrupper av Starlinksatelliterna [41].

Situationsberoende

Banbestämning kan göras ihop med astrometri, vilket innebär att pixlarna i den fotometriska avbildningen tilldelas koordinater motsvarande dess position på himlen. Från bilden kan satellitens koordinater (i azimut och deklination) avläsas samt vid vilken tid satelliten passerat och genom att upprepa mätningarna under samma passage kan satellitens bana beräknas.

En möjlig datakälla för att göra banbestämning är bilder från nätverket ALIS4D (eng. *the auroral large imaging system*). Det består av vidvinkelkameror placerade i Sverige, Finland och Norge som primärt används för att studera norrsken. Bilderna tas med kort exponeringstid och med en frekvens på 25 Hz vilket möjliggör banbestämning av satelliter som passerar observationsfältet [5] [42].

Det amerikanska företaget ExoAnalytic har ett nätverk med fler än 350 optiska teleskop på olika platser nära ekvatorn med vilka de kan observera i stort sett alla

satelliter i MEO och GEO [43]. De använder fotometri och astrometri för att bland annat beräkna satelliters banor, orientering och hur de manövrerar.

FOI har i rapporten *Elektrooptisk inmätning av satelliter* [44] bland annat tittat på hur kommersiellt inköpt data kan användas för banbestämning av satelliter. Där gjordes banbestämning på ett flertal satelliter med hjälp av data från flera av LCO:s (eng. *Las Cumbres Observatory*) observatorier.

3.2.2 Polarimetri

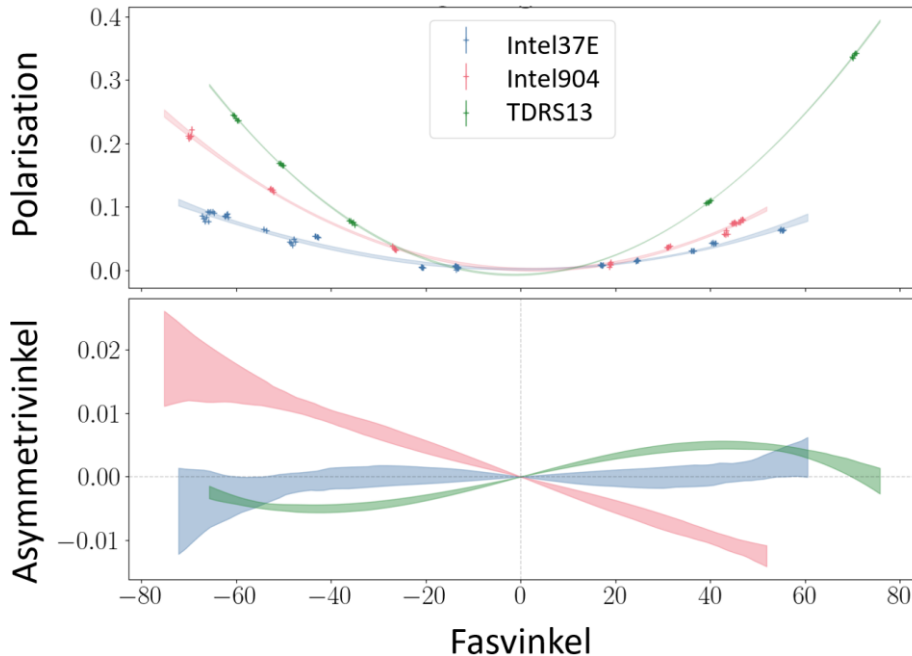
Med optisk polarimetri menas uppmätning av polarisationsriktningen i det synliga ljuset. Typiskt mäts 4-8 vinklar av satelliten och sen används dessa bilder i kalibreringen för att räkna ut polariseringen.

Observationer med hjälp av polarimetri för karakterisering är relativt nytt. På FOI gjordes en studie som observerade tre geostationära satelliter. Studien, som presenterades på AMOS 2022 [36], visade att de tre satelliterna hade en unik signatur och att polarisationen varierar beroende på fasvinkeln. Figur 7 visar resultaten från studien för de tre observerade satelliterna. Observationerna gjordes mellan 2019-2022 och det observerades att de tre satelliterna hade unika polarisationssignaturer där polarisationen varierade kraftigt mellan olika fasvinklar.

Det finns ett antal studier som har observerat geostationära satelliter med hjälp av polarimetri [45] [46] [47], som alla visar på att polarisationen varierar kraftigt beroende på vinkel i förhållande till solen, samt att varje satellit har en unik polarisationssignatur.

Den största fördelen med karakterisering med polarisation är att det kan ge en signatur på satelliten genom relativt få observationer och kort observationstid eller lite insamlat ljus. Denna metod kräver mer forskning till dess att den kan användas för karakterisering i större uträkning men visar potential att kunna identifiera satelliter utifrån deras polarisationsmönster. I nuläget kan den användas till att identifiera satelliter genom glintar¹⁴ och har visat att olika satelliter har unika signaturer vid observation över ett stort spann av vinklar.

¹⁴ Glintar är ljusstarka reflektioner från satelliter vid vissa specifika fasvinklar [48].



Figur 7. Polarisationsmätningarna från tre geostationära satelliter observerade under 2019-2022 [36]. Grafen ovan visar mätningarna och en anpassad linje. Den nedre grafen visar att polarisationssignaturerna är unika för de tre observerade satelliterna.

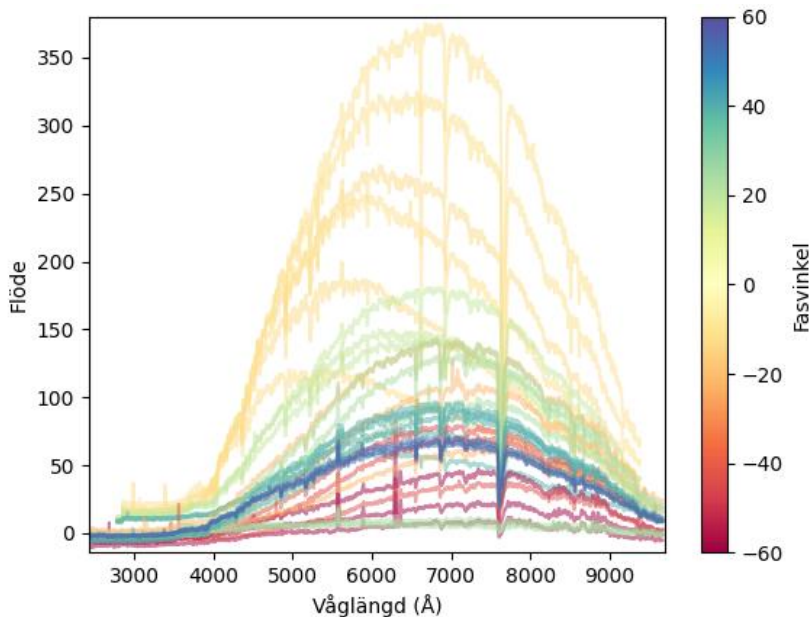
3.2.3 Spektroskopi

Spektroskopi för karakterisering av satelliter innebär att ett eller flera spektrum i ett brett våglängdsspann tas. Våglängdsspannet varierar med instrumentet men sträcker sig normalt från infrarött till ultraviolett. Denna teknik används mycket inom astronomin och är därför mycket vanlig i framförallt optiska teleskop av alla storlekar. Det finns därför stor variation av instrumenten, dess upplösning och kostnad. Forskare från USA har i [49] visat hur spektrum används för karakterisering i spannet 300-350 MHz med Arecibo-teleskopet, vilket har en diameter på 305 meter. Men, det är även möjligt att göra spektroskopi på satelliter med mindre teleskop, exempelvis visar forskningen bakom [50] hur de med ett 0.61 meters-teleskop etablerar en databas av geostationära satelliters spektrum. Databasen avses att användas till att träna maskininlärningsalgoritmer för framtida klassificering.

På FOI har försök gjorts med spektroskopi med nordiska optiska teleskopet (NOT) som presenterades på AMOS-konferensen 2022 [46]. I den studien togs flera spektrum av tre geostationära satelliter. Det observerades att maxintensiteten varierade kraftigt mellan observationstillfällena, men utan tydlig koppling till fasvinkeln, det vill säga vinkeln mellan solen, satelliten och jorden. Ytterligare analys krävs för

att kunna använda spektrumerna för karakterisering och förstå de observerade fluktuationerna. Figur 8 visar exempel på de spektrum som togs från NOT för karakteriseringsförsök på FOI. De olika färgerna visar spektrum från olika fasvinklar och det syns att förutom att ljusstyrkan varierar mellan vinklarna så varierar också våglängden där mest ljus skickas ut.

Våglängdsinformationen i signalen för det reflekterade ljuset är beroende av materialet på satelliten och behöver jämföras med en sollik stjärna för ett referensspektrum (då det är solljuset som reflekteras på satelliten). I mätningar med NOT kunde det konstateras att spektrum förändras utifrån fasvinkeln men att det inte följer ett linjärt samband. Det går därför inte att utesluta att fler faktorer spelar in. Från försöken sågs att sambandet mellan vilken färg satelliten har och dess material inte är rättfram utan kräver ytterligare observationsdata och analys.



Figur 8. Ett exempel på en serie av spektrum i olika fasvinklar som togs på satelliten IntelSat 37e med nordiska optiska teleskopet, NOT som del av studien [24]. Flödet har godtyckliga enheter, skalade till solliknande stjärnspektrum.

Fysiska attribut

Spektroskopi är ett effektivt sätt att i en enda observation få information i flera våglängder från infrarött till ultraviolett, våglängdsspannet beror på instrumentet som används. Det gör att det med hjälp av en databas skulle vara möjligt att korrelera materialet på rymdobjektet. Denna kartläggning och kalibrering av data kräver expertis och experiment på olika material för att ta fram en fysikalisk beskrivning och materialmodell. I nuläget finns inte en sådan databas uppbyggd på FOI och

det krävs därför vidare forskning för att kunna karakterisera material. Vissa forskargrupper [51], som har en mindre databas av material, har lyckats identifiera material och storlek av rymdobjekt till viss precision vilket visar på potentialen av denna metod. Det finns också potential för att upptäcka ändringar i materialet som rymdobjektet är gjort av exempelvis till följd av strålningspåverkan. Utöver det finns det också skäl att tro att det går att karakterisera framdrivningssystem genom att analysera sammansättningen av bränslet. Vissa forskargrupper [52] har börjat göra kataloger med spektrum för olika material i olika vinklar för att användas i karakteriseringssyfte.

För att utföra spektroskopi krävs ett teleskop med en spektrograf, vilket är dyrare än en fotometrisk optisk sensor. Dessutom är det vanligt att dessa instrument behöver vara kylda för att minska brusets vilket gör systemet mer komplext. Det kan dessutom vara svårt att följa rymdobjektet tillräckligt bra för att få ett bra spektrum, speciellt för teleskop som inte är ämnade för uppföljning av rymdobjekt (exempelvis NOT).

Tidigare arbeten med optisk karakterisering på FOI

- Mätningar gjorda med NOT 2019-2022 inkluderar fotometri, spektroskopi och polarimetri, se [53] [36].
- Försök gjorda med Las Cumbres Observatoriet genomförda 2018 testade passiv elektrooptisk mätning (fotometri) för banbestämning, se [44] [54].
- Examensarbete på Uppsala universitet 2019 i samarbete med FOI där bilder från all-sky kamerorna i nätverket *Swedish allsky meteor network* utvärderades för banbestämning [55] [5].

3.3 Lasermätningar

Mätning av satelliter med laserteknik, SLR, (eng. *satellite laser ranging*), bygger på samma grundprinciper som mätning med radar med bistatisk systemgeometri, närmare bestämt kvasimonostatiskt, det vill säga separat sändare och mottagare placerade på samma ställe. Metoden kan också liknas vid en aktiv variant av fotometri då systemet själv lyser upp satelliten med en laser och mäter in det reflekterade ljuset, notera dock att det är från det reflekterade ljuset som det relativa avståndet mäts. Till skillnad från fotometri krävs noggrannare kännedom om satellitens position. Korta laserpulser skickas iväg via ett sändartteleskop (strålvågare) och reflekteras mot satelliten. Tiden det tar till dess att det reflekterade ljuset kommer tillbaka mäts och avståndet till satelliten beräknas som produkten av ljusets hastighet och halva den uppmätta tiden. Då den reflekterade ljussignalen kan vara väldigt svag krävs en mycket ljuskänslig detektor. För att minimera bakgrundsbruset appliceras framför detektorn ett våglängdsfilter med

smalt passband som matchar den utsända våglängden. Den typiska våglängden för mätning av satelliter är runt 1064 nm, det är i det nära-infraröda spektrumet och inkluderas därför inte i optiska mätningar. Laser i det nära-infraröda spektrumet kan penetrera jordens atmosfär med minimal absorption och spridning vilket gör det lämpligt för mer noggrann mätning av satelliter [56].

Flera satelliter har installerade hörnreflektorer, CCR (eng. *corner cube reflectors*), för att lättare kunna mätas in med laser. Upplösningen i avståndet kan i dessa mätningar ha en felmarginal på bara några millimeter, för satelliter ända ut i GEO. För satelliter (eller rymdskrot) utan CCR sprids det reflekterade ljuset mer diffust och blir mycket svagare vid mottagaren, felmarginalen är då av storleksordning en meter [57]. För högre noggrannhet krävs högre pulsfrekvens med vilken laserpulserna sänds ut, högre effekt på lasern samt att instrumenten som mäter tiden mellan sändning och mottagning är mycket exakta.

När det gäller mätning av satelliter och rymdskrot utan reflektorer är det främst satelliter i LEO som mäts in med SLR [56]. Generellt krävs en laser med högre effekt för att mäta in satelliter i högre omloppsbanor, detsamma gäller för satelliter utan reflektorer i låga omloppsbanor [58]. SLR nyttjas med fördel under natten men kan också användas dagtid. Vid mätningar under dagen ger satelliter med reflektorer bäst resultat [59] men en studie från 2020 visar att det finns potential för att noggrannare mäta in rymdskrot utan reflektorer även under dagtid [58].

Situationsberoende

Satellitens bana kan bestämmas noggrant med avståndsmätningar från SLR och vinkelinformation från astrometri [57], det är därför vanligt att kombinera SLR med optisk mätning. Genom att använda ett bredvinkligt optiskt teleskop som mottagare kan satellitens position mätas in under en kort tid i början av passagen. En grov uppskattning av banan kan därefter göras med den initiala mätningen och sedan kan SLR genomföras för resterande delar av samma passage [5]. Att kombinera SLR-data med ljuskurvor har också gjorts. Synergier mellan variationer i uppmätt ljusstyrka och avstånd kan ge en bättre uppfattning om satellitens orientering, rotation och storlek än metoderna var och en för sig [60].

Forskare från tyska DLR har visat att speciella typer av CCR kan påverka polariseringen av det reflekterade laserljuset och på så sätt användas som en unik identifikation för satelliten [61]. I sin rapport beskriver de också en prototyp av en mobil mätstation för SLR som skulle kunna realiserars för en lägre budget. Österrikiska forskare från Space Research Institute vid Austrian Academy of Sciences har även gjort försök med multistatisk SLR där en aktiv station sänder ut laserpulser mot en raketkropp (rymdskrot) och flera passiva stationer mätt in reflektionen [62].

SLR används primärt för banbestämning, i kombination med andra datatyper finns möjlighet att utläsa vissa beteendeparametrar så som orientering, se ovan. Författarna till denna rapport har inte hittat några experiment där SLR används för någon annan typ av karakterisering.

3.4 Karakterisering med öppen information

Att använda öppna källor för att samla underrättelser är inget nytt koncept utan används flitigt, se exempelvis Natos handbok (eng. *open source intelligence handbook*) [63]. Stora mängder data och information samlas in från många olika öppna källor, oftast på internet. Denna datamängd och information filtreras, behandlas och kan korskorreleras för att producera användbara underrättelser.

Information från öppna källor kan, när det används systematisk, bidra med en robust grund för andra underrättelser och även reducera trycket på källorna till dessa mer kvalificerade underrättelser. På så vis kan de mer kvalificerade källorna användas mer effektivt för att svara på frågor endast de kan besvara. Detta kan leda till kostnadsbesparingar för hela underrättelseverksamheten. Som källa till kommersiell information är internet oslagbart. Däremot måste internet hanteras med stor försiktighet och all information därifrån måste utvärderas för sin källa, bias och trovärdighet. Information från öppna källor kommer aldrig att ersätta mer kvalificerade underrättelser men de kan bidra med kontext, indikatorer och validering.

I Tabell 3 listas några öppna internetbaserade källor som har information om satelliter. Denna skall inte betraktas som en uttömmande lista utan som en utgångspunkt. Källorna är listade utan inbördes ordning och de flesta innehåller ofta mer information än det som anges här, dock sällan utan behov av behandling. Notera även att listan sammanställdes i april 2023 och förändringar kan ske dagligen.

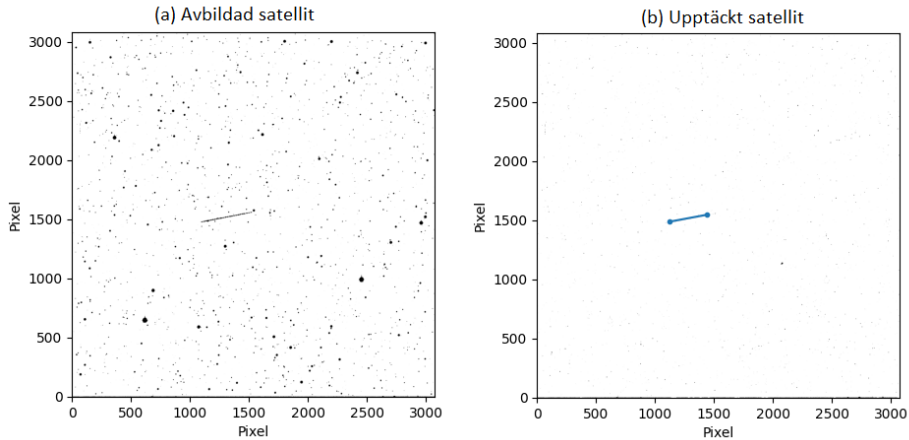
Tabell 3. En kort lista med öppna internetbaserade källor tillsammans med information relevant för karakterisering som källan innehåller (kolumn två) och dess webbadress (kolumn 3). Alla hemsidor i tabellen öppnades 2023-11-24.

KÄLLA	INFORMATION	ÅTKOMST
Space-Track, CelesTrak och N2YO	Satellitbanor, storlek, manövrering och framdrivningssystem	https://www.space-track.org/ https://celestrak.org https://www.n2yo.com
Jonathan's GCAT och UCS	Uppskjutningsmetod, sensorer och framdrivningssystem	https://planet4589.org/space/gcat/ https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database
DISCOS	Storlek, form och orienteringsprofil	https://discosweb.esoc.esa.int
SatNOGS	Kommunikationsprofil	https://satnogs.org
UNOOSA	FN-registrering av satelliter	https://www.unoosa.org/oosa/osoindex/index.jsp?If_id=

3.4.1 Öppen astronomisk data

En annan, idag undernyttjad, källa till öppen data om satelliter är observationer gjorda med jordbaserade astronomiska teleskop. Den är ofta avsedd för analys av händelser på större avstånd än satelliters omloppsbanor, men i dagsläget är det nästan oundvikligt att få med information om satelliter i astronomiska mätningar.

Ett examensarbete genomfördes vid FOI 2022 för att undersöka huruvida öppen astronomisk data var lämplig för initial banbestämning, IOD (eng. *initial orbit determination*) [64]. Resultaten visade att satelliter som fångats på teleskopbilder kan identifieras, men att IOD kräver en högre upplösning i astrometrin än vad teleskopet som nyttjades kunde leverera. Identifiering av de avbildade satelliterna gjordes genom att ta fram koordinaterna för strecken som satelliterna skapat i avbildningen, se Figur 9, och jämföra dessa passager mot kända satelliters passager under samma epok. Koordinaterna för referenssatelliternas passager räknades fram från objektskataloger. Trots att teleskopbilderna i fråga var för lågupplösta för IOD kan denna metod ge en möjlighet att verifiera objektskataloger utan att själv behöva mäta in data.



Figur 9. (a) Visar en avbildad satellit i en bild från Zwicky Transient Facility. (b) Visar hur algoritmen upptäckt satelliten och markerat dess start- och slutpunkt. Efter konvertering med astrometri fås pixelkoordinaterna som himmelskoordinater vilka kan jämföras med objekt i katalogen.

En studie genomförd av forskare i Indonesien har tagit fram en bildbehandlingsalgoritm som kan hitta satelliter i teleskopbilder (i FITS-format) och sedan göra en initial banbestämning. De har själva verifierat metoden genom att använda data från ett optiskt teleskop i Indonesien och lyckats identifiera flera satelliter, främst i GEO, samt göra IOD för dessa [65].

Tidigare arbeten med karakterisering med öppen information på FOI

- Databasen "El Corazon" har bedrivits under en lång tid på FOI och beskrivs i mer detalj i rapporten *Inmätning av rymdobjekt – Rymdlägesbild med egen rådgighet* [5]. Databasen samlar information så som banparametrar, syfte, landstillhörighet med mera.
- Under våren 2022 utfördes ett examensarbete, med examination vid KTH, där möjligheten för banbestämning med öppen astronomisk data för verifiering undersöktes [64].

3.5 Övriga metoder

Det finns fler metoder som kan tillämpas för karakterisering. I kapitlet nedan beskrivs i korthet ett urval av andra inte lika väletablerade metoder som kan användas i karakteriseringssyfte.

3.5.1 Nedlänksanalys

Det är möjligt att avlyssna satellitens nedlänk, det vill säga kommunikationskanalen mellan satelliten och dess markstation, som satelliten normalt sänder sitt nyttolastdata eller omborddata till [66]. Nedlänksanalys kan användas på två sätt:

1. Detektera signalen eller sändningsmönster.
2. Avlyssning (dekryptering) av information.

Genom att utföra signalspaning, SIGINT (eng. *signal intelligence*), mot denna kommunikationslänk kan indikationer om satellitfunktion påvisas. Det finns däremot en begränsning i denna möjlighet eftersom det krävs att signalspaningen görs i närheten av markstationsantennen. Detta skulle även vara möjligt genom att utföra SIGINT mot röda satelliter i rymden, men det innebär att blå satellit måste vara i närhet av den undersökta röda satelliten när den röda satelliten är i närheten av dess markstation.

Att avlyssna utsända radiosignaler från satelliter och nyttja informationen för rymdlägesbild har skett sedan en lång tid tillbaka. Denna passiva mätning av radiosignaler från satelliter innebär att antenner används för att avlyssna den kommunikation som sker från satellit till markstation. Denna nedlänk kan innehålla information så som positions- och attityddata, mätningar från sensorer, systemstatus etcetera, men kan behöva avkrypteras först. I första hand avser karakteriseringen bland annat att identifiera vilka frekvenser som satelliten sänder på samt signalstyrkan och sändningsmönster.

Med hjälp av denna teknik kan rymdlägesbildsförmågan potentiellt förstärkas då den används i samspel med andra typer av spårningstekniker. Fördelar med denna teknik inkluderar bland annat möjligheten att avlyssna satelliter i alla omloppsbånar och dess egenskap att inte påverkas av väder eller tillgång till dagsljus. Detta betyder att avlyssning teoretiskt sett kan pågå kontinuerligt givet att antenner är lämpligt fördelade över jordytan.

Det finns flera olika sätt som en analys av nedlänksdata mellan satellit och markstation kan användas för att karakterisera satelliten i fråga. Nedan följer en kort sammanfattning av dessa.

Situationsberoende

För att bestämma omloppsbanan genom nedlänken från satelliten krävs mätningar av radiosignaler från en eller flera mottagarantennerna. Antalet antenner, avståndet däremellan och eventuell tillämpning av interferometri styr hur snabbt och noggrant satellitens omlopps bana kan bestämmas. Vanligtvis krävs flera mätningar under flertalet passager för att samla en tillräcklig mängd data för en korrekt banbestämning [67] [68].

Beteendeparametrar

Den uppmätta nedlänksfrekvensen påverkas av ett dopplerskift på grund av satellitens radiella hastighet relativt observatören. Satellitens faktiska hastighet går att härleda om frekvensen på signalen är känd sen tidigare. Satelliten följer ett naturligt dopplermönster i sin bana och förändringar i karakteristiken i detta kan påvisa hastighetsförändring. Under ett banvarv förändras den relativa hastigheten kontinuerligt i relation till en markbaserad mottagare, det är därför naturligt att se en frekvensförändring över passagen.

När en satellit utför en manöver för att bibehålla altitud (eng. *station-keeping*) eller byta orbitalplan krävs en acceleration (eller retardation) det vill säga en ändring i hastighet (delta-v). Det kan därför vara möjligt att detektera om en satellit utför en manöver där hastigheten ändras [68]. Sker en manöver så kommer det att innebära att frekvensförändringen följer ett annat mönster än det tidigare. För en impulsförändring bör detta vara synonymt med mönstret för den nya banan.

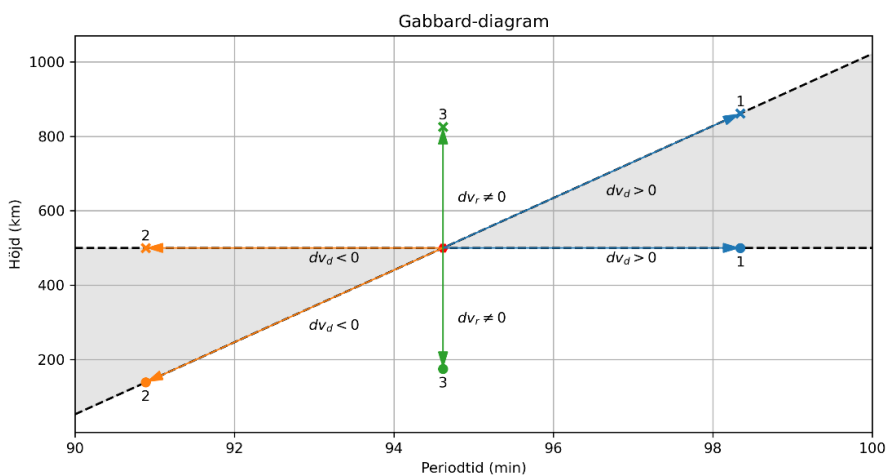
Med stora mängder nedlänksdata kan en normallägesbild av förväntat beteende för en satellit fastställas. Kommunikationsmönster som när och hur ofta satelliten sänder kan fastställas genom exempelvis maskininlärning och mönsterigenkänningsalgoritmer. Analys av denna typ av data kan användas för att upptäcka avvikelser från detta beteende, något som kan tyda på att satelliten inte fungerar som förväntat (med avseende på normallägesbilden) på grund av problem med elektronik ombord eller andra externa faktorer som exempelvis trasig antenn eller dålig attitydkontroll [68].

3.5.2 Fragmenteringsanalys

För att förstå vår rymdmiljö, både ur ett allmänt perspektiv och ett säkerhetsperspektiv, är det av stor vikt att kunna förstå, analysera och särskilja mellan olika fragmenteringshändelser. Som fragmenteringshändelse i rymden räknas till exempel explosioner (så som av gamla raketsteg), antisatellitvapentest och större kollisioner mellan satelliter eller skrotobjekt [69]. Kollisioner med mindre skrotobjekt sker med viss regelbundenhet men räknas inte som fragmenteringshändelser i de fall objekten inte fragmenterar. Fragment kan definieras som de fristående objekt som bildas till följd av fragmenteringshändelser [69].

En fragmenteringsanalys kan ge insikter om detaljerna kring fragmenteringshändelsen och svara på frågor som: hur skedde fragmenteringen, vilka objekt var inblandade, när skedde den och under vilka förutsättningar?

Ett verktyg som ofta används för att beskriva fragmenteringar och snabbt kunna utvärdera fragmenteringshändelser är Gabbard-diagram [70]. Genom Gabbard-diagram går det att snabbt få en förståelse för en fragmenteringshändelse och till exempel bestämma om den var på grund av en explosion eller en kollision. Figur 10 visar ett exempel på ett teoretiskt Gabbard-diagram för ett objekt som ursprungligen befinner sig i en cirkulär bana. Punkterna 1, 2 och 3 representerar fragment som har fått olika hastighetsförändringar. Vid en kraftig fragmenteringshändelse finns fler punkter/fragment och dess spridning i ett Gabbard-diagram kan då användas för att få en överblick av händelsen. Mer detaljer och en utökning till icke-cirkulära banor ges i [71]. För icke-cirkulära banor är visualiseringen mindre tydlig men fortfarande användbar. Om tiden mellan mätningarna av ursprungsobjekt och fragmenten är stor behöver hastighetsändringar som inte kan härledas till fragmenteringshändelsen tas med i analysen. Ett sätt att förbättra fragmenteringsanalys och öka den allmänna förståelsen av rymdmiljön efter en fragmenteringshändelse är att minska osäkerheten i mätningarna.



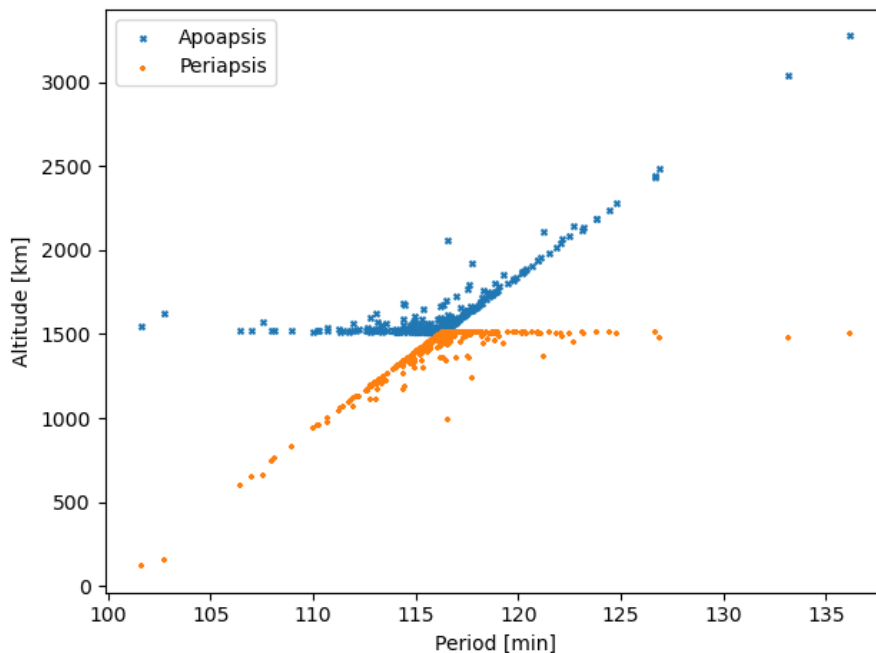
Figur 10. Exempel på ett idealiserat Gabbard-diagram. Ett objekt i cirkulär bana med höjd 500 kilometer och periodtid 94,6 minuter (röd cirkel) fragmenteras i tre delar (1, 2, 3) med olika hastighetsriktningar. De tre fragmentens apogeum (kryss) och perigeum (cirkel) visas i figuren. Objekt 1 (blå) har fått en hastighetsförändring längs med banan och ökar sin apogeumhöjd men har samma perigeumhöjd som det ursprungliga objektets höjd. Objekt 2 (orange) har fått en hastighetsförändring i negativ riktning längs med banan och minskar sin perigeumhöjd medan apogeumhöjden är oförändrad. Objekt 3 (grön) har fått en hastighetsförändring i radiell riktning, vilket leder till att apogeumhöjden ökar medan perigeumhöjden minskar. I de gråmarkerade områdena ska idealt inga objekt kunna ha vare sitt apogeum eller perigeum. Bild: [70].

Matematiska metoder för att genomföra fragmenteringsanalyser beskrivs i FOI-Memot *Metoder för analys av fragmenteringshändelser i rymden* [70], som baseras på en analys av öppen data från 2021 då ett ryska ASAT-test förstörde den ryska kommunikationssatelliten Kosmos 1408. Den öppna datamängden som används i analysen är främst TLE-information för fragmentens banor. Spridningen på fragmenten utifrån det ursprungliga objektets omloppsbanan kan ge indikation på kollisionsriktningen. Osäkerheter i banorna och glesa samt oregelbundna mät-tidpunkter (epoktider i TLE:n) leder till begränsningar i de slutsatser som går att dra. Dock kan riktningar för kollisionen utvärderas och med viss tolkning av data kan även funktion och förmåga av ASAT-vapen analyseras [70].

Forskare från institut i Sverige och Norge [72] har använt EISCAT (eng. *European incoherent scatter scientific association*), som är ett radarsystem med stationer ovanför polcirken (i Finland, Norge och Sverige), för att analysera fragmenteringsmolnet efter Kosmos-1408. De lyckas identifiera flera hittills okända fragment genom en blandning av mätningar och matematiska metoder. Möjligheten att analysera storleken på fragmenten undersöks också, vilket skulle kunna bidra till förståelsen för fragmentmolnets framtida inverkan på rymdmiljön.

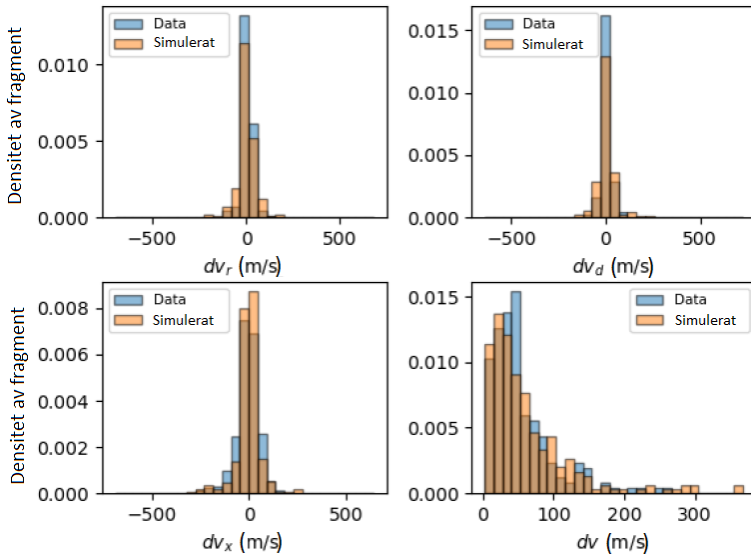
Under 2023 utfördes ett examensarbete på FOI för att få en bättre förståelse av riskerna till följd av diverse fragmenteringshändelser, samt för att kunna karakterisera fragmenteringar [73]. I arbetet simuleras fragmenteringar med hjälp av stokastiska modeller för att få en bättre förståelse kring hur rymdmiljön och de långsiktiga kollisionsriskerna påverkas. I Figur 11 visas ett Gabbard-diagram från en simulerad explosion där metoder som utvecklats i arbetet implementeras. I Gabbard-diagrammet visas bland annat spridning av skrotet vilket kan ge indikationer på vilka objekt som befinner sig i riskzonen redan innan alla fragment hunnits mätas in samt underlätta i sökningen efter ytterligare fragment. I arbetet diskuteras även möjligheten att efter simulering ta fram en uppskattning av mängden objekt som skapats i fragmenteringen (ett väntevärde), detta skulle kunna användas vid detektion av fragmenten.

Risikanalyser är också ett viktigt koncept när det gäller fragmentering i rymden, då skrotet ofta är kvar i många år och därför riskerar att kollidera med andra satelliter. Under examensarbetet utvecklades metoder för att kvantifiera denna risk i ett långsiktigt perspektiv med hjälp av metoder som används av bland annat ESA.

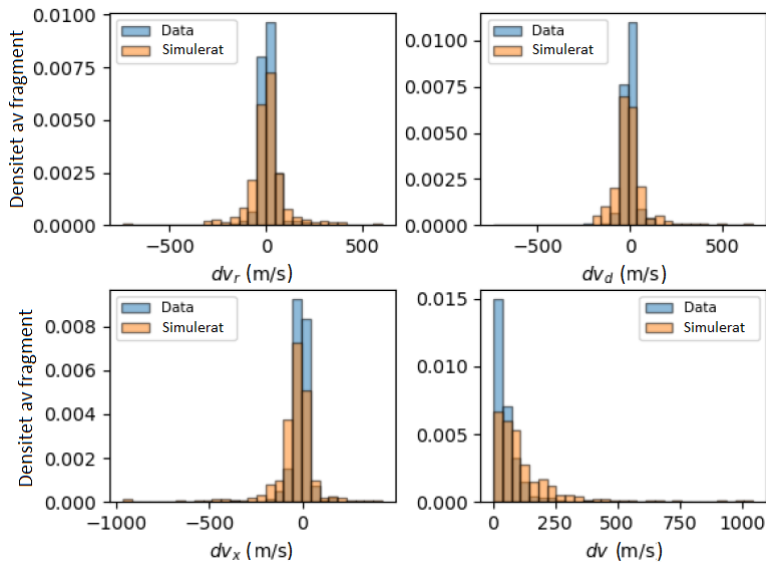


Figur 11. Gabbard-diagram av en simulerad explosion av ett raketsteg i en cirkulär bana på 600 kilometer höjd.

Resultaten från examensarbetet kan även bidra till karakterisering av satelliten som fragmenterats. Detta kan göras genom att bland annat studera storleks- och riktningfördelningarna av fragmenten eftersom fragmentens olika material och geometrier påverkar dess fysiska egenskaper, såsom area och massa. Detta pekas ut i rapporten, i synnerhet när modellen för fragmentens hastigheter valideras. När data från explosionen av den amerikanska vädersatelliten NOAA-16 [74] jämförs med en simulerad explosion baserad på NOAA-16 så ger detta väldigt lovande resultat som kan ses i Figur 12. Däremot, när samma analys görs på fragmenten som bildades när två kommunikationssatelliter, Iridium-33 och Kosmos-2251 kolliderade så syns en avvikelse mellan de observerade värdena och modellen, som visas i Figur 13. Avvikelser som dessa diskuteras i andra rapporter, se exempelvis [75] [76], och slutsatsen är att de bland annat beror på material, och storleken på solpanelerna hos den fragmenterande satelliten.



Figur 12. Jämförelse mellan uppmätt data och simulerad data för fragmentens hastighet från NOAA-16 explosionen. Figuren visar bland annat att modellen ger resultat som stämmer väl överens med det som observerats.

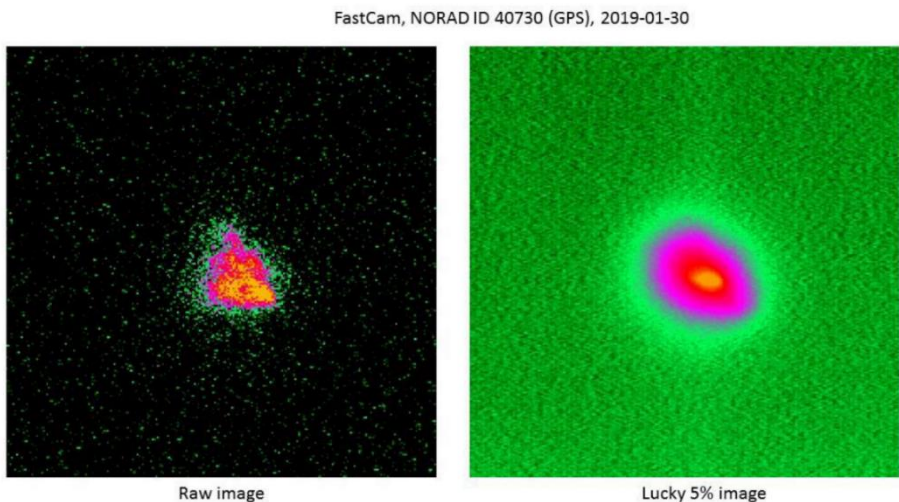


Figur 13. Jämförelse mellan uppmätt data och simulerad data för fragmentens hastighet från fragmenteringen av Iridium-33. Figuren visar bland annat att modellen ger fragmenten högre hastigheter vilket inte stämmer överens med det som observerats, något som visar på materialberoendet i fragmenteringar.

3.5.3 Optisk avbildning

Optisk avbildning, även kallad direkt avbildning, är en metod i vilken objektet upplöses med hjälp av optiska mätningar. Detta kräver typiskt stora teleskop då satelliterna är ljussvaga och att teleskopet kan uppnå en vinkelhastighet upp till 1 grad per sekund samtidigt som objektet hålls i fokus. Optisk avbildning har inte använts i större utsträckning för att karakterisera satelliter då det kan vara enklare att använda andra metoder, exempelvis avbildning med radar. Precis som andra optiska metoder krävs specifika förhållanden såsom klart väder och en belyst satellit för att observationen ska kunna ske.

Under 2019 gjorde FOI försök med optisk avbildning med NOT-teleskopet [53]. Figur 14 visar resultaten av dessa försök där 1500 bilder togs av en GPS satellit. Med hjälp av en teknik som kallas "lucky imaging" uppnåddes resultatet till höger i figuren, där bilderna med bäst skärpa kombineras. Syftet bakom tekniken är att kompensera bort turbulensen från atmosfären som försämrar skärpan och åstadkomma en högre upplösning.

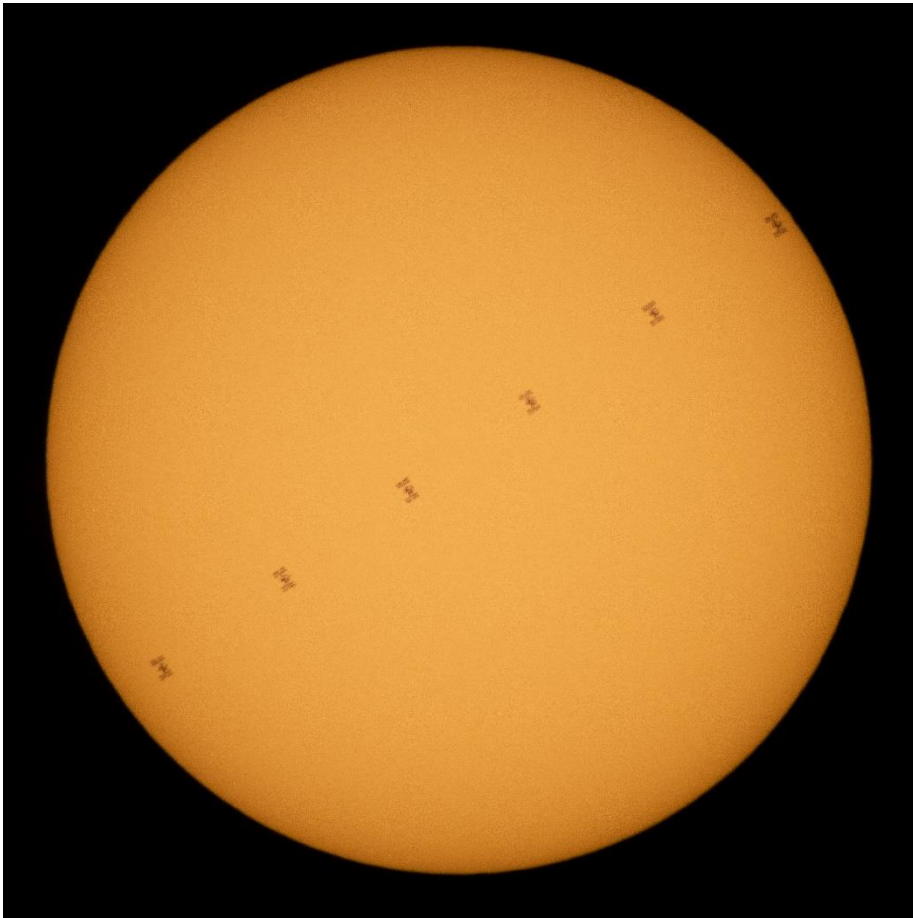


Figur 14. Resultaten av försöken med optisk avbildning med NOT som gjordes 2019. Vänsterbild: En GPS-satellit tagen med FastCam instrumentet på NOT. Höger: Sammansatta "lucky imager"-bilden av de 5% bästa bilderna tagna under försöken (av totalt 1500 bilder).

3.5.4 Ockultationsavbildning av satelliter

Alternativ till den optiska avbildningen är att studera ockultationen, eller skuggan, av satelliter när de passerar framför ett ljus objekt såsom solen eller månen, vilket ger förutsättningar att karakterisera formen och storleken på en satellit [77]. Grundförutsättningarna är desamma som för optisk avbildning, men med ett par fördelar och begränsningar.

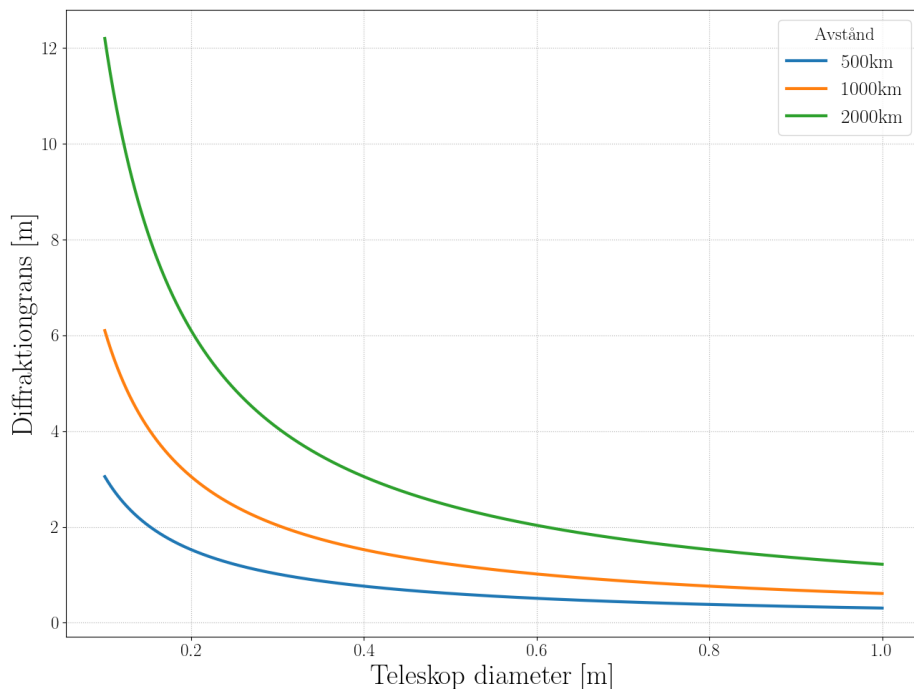
I Figur 15 ses den internationella rymdstationen ISS passera framför solen. Bilden är en kompositbild av sex bilder tagna över en 0,54 sekunder lång passage [78].



Figur 15. Internationella rymdstationen, ISS passerar solen och genom att studera skuggan kan formen karakteriseras. Källa: NASA/Joel Kowsky via NASA's Earth Observatory [78].

Den största fördelen med denna metod är att den kan utföras med relativt enkla teleskop och korta exponeringstider förutsatt att en stark ljuskälla används som bakgrund. Ytterligare en fördel med att titta på till exempel solen är att det går att karakterisera satelliter på dagtid. Det som behövs är en sensor med tillräckligt bra upplösning och ett speciellt solfilter på teleskopet. Med en kommersiellt tillgänglig systemkamera och ett relativt litet teleskop kan meterstora strukturer i LEO upplösas (exempelvis krävs ett 60 centimeter teleskop för 2 meters upplösning på 2000 kilometer avstånd från jorden). Figur 16 visar den teoretiska upplösningen som kan uppnås på en satellit för olika teleskopdiametrar och avstånd till satelliten.

Denna beräkning baserar sig på Airy disk-ekvationen [38]. Den faktiska upplösningen förväntas ligga nära den teoretiska, i och med att atmosfäreffekterna inte är dominanta i korta exponeringstider (under Greenwood-frekvensen) [38].



Figur 16. Här syns den teoretiska upplösningen, diffraktionsgränsen på satelliten för olika teleskopdiametrar och tre olika avstånd i LEO. Här visas teleskopstorlekar mellan 10 centimeter och 1 meter.

Den största begränsningen är att objekt bara är observerbara vid vissa specifika förhållanden. Satelliten behöver passera mellan det belysta objektet och observationsplatsen och inte alla satelliter ligger i banor som orsakar ockultationer från en given observationsplats. Bra väderförhållanden krävs också då både molnfritt och låg turbulens i atmosfären behövs för att uppnå adekvata resultat på bilderna.

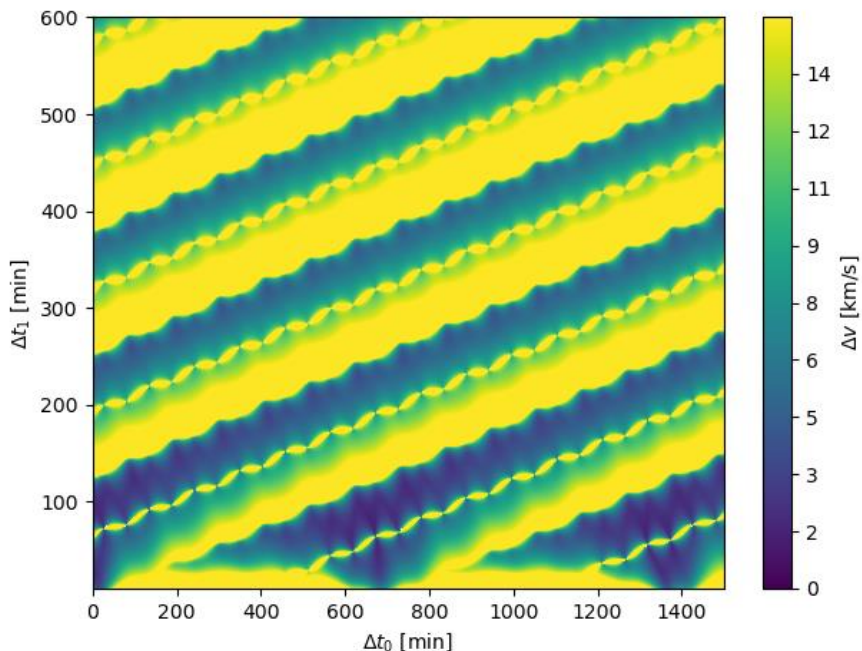
3.5.5 Manövreringshistorik

Hur en satellit är tänkt att brukas, vad den har för uppgifter och ändamål, kan vara svårt att avgöra eftersom det inte är brukligt att denna typ av information är öppet tillgänglig för militära tillämpningar. En indikation på detta kan gå att få genom att kartlägga satelliternas manövreringshistorik, det vill säga hur den historiskt har förändrat sin omloppsbana. Detta kan göras med alla olika mätmetoder där banbestämning är möjligt.

Manövreringshistoriken kan ge karakteriseringsinformation om vilken typ av framdrivning satelliten har, hur stora hastighetsförändringar som den genomfört (delta-v) och hur mycket bränsle den kan tänkas ha kvar (kvarvarande delta-v-budget). Detta ger i sin tur indikationer på vilka manövreringsmöjligheter satelliten kan ha i framtiden och därigenom ett utfallsrum av möjliga banor som satelliten kan ta sig till, alternativt en uppskattning på den kvarvarande livslängden. Detta kan också vara av värde att studera för att förstå huruvida en röd satellit kan utgöra ett hot mot en värdefull blå satellit.

Det finns ett intresse av att kunna dölja delar av sin verksamhet i rymden, ett tänkbart scenario är att en satellitoperatör har för avsikt att inte visa satellitens operationella förmåga. Operatören kan då vilseleda omvärlden genom att registrera ett rymdobjekt som rymdskrot och låta objektet ligga helt passivt i bana, för att aktivera objektet som en fungerande satellit när det finns behov för dess dolda funktion. En liknande situation uppstod när Ryssland sköt upp en satellit som liknats vid en ”rysk docka” (Matrijojska, eng. *nesting doll*), alltså en satellit innehållande mindre satelliter dolda i olika nivåer [79]. Dessa gömda satelliter är svåra att övervaka eftersom de i normala fall beter sig som ett vanligt rymdskrot eller att de inte syns då de fortfarande är inneslutna i den större satelliten. För att upptäcka ett sådant här fall krävs konstant övervakning och god kunskap om satellitens manövreringshistorik.

Satelliter med precisionsmanöverförmåga blir allt vanligare, därför är det viktigt att förstå deras förmåga, tilltänkta (möjliga) användningsområde samt vilka möjliga hot dessa satelliter kan utgöra. Under 2023 utfördes ett examensarbete på FOI i syfte att studera metoder för hotbedömning i rymden med ett fokus på satelliter med manövreringsförmåga [80]. Arbetet syftade till att undersöka problemformuleringen, vilka parametrar som kan vara intressanta och vilka metoder som finns att tillgå. I arbetet implementerades en algoritm för att beräkna möjliga banmanövrar som en röd satellit kan utföra för att justera dess bana mot en blå satellit. Figur 17 visar exempel på ett beräkningsresultat från algoritmen där delta-v-kravet för röd satellit att nå blå satellit visas som funktion av tid. I figuren representerar färgskalan delta-v-kravet, x-axeln visar starttiden för manövern och y-axeln visar flygtiden, det vill säga tiden från att manövern utträttas till den tidpunkt satelliterna möts. Utifrån en karakterisering av röd satellits bränsle och framdrivning (delta-v-budget) kan resultatet användas för att uppskatta när röd satellit skulle kunna utgöra ett hot mot blå satellit. I praktiken kan det utföras genom att jämföra röd satellits delta-v-budget mot beräknat delta-v-krav för att uppskatta när manövern kan utträttas.



Figur 17. Delta-v-krav för röd satellit att nå blå satellit som funktion av tid. Färgskalan representerar delta-v-kravet där värden större än 15 kilometer/sekund visas i gult, x-axeln visar starttiden för manövern och y-axeln visar flygtiden. Mörkblå områden visar tidpunkter då satelliten kan förflytta sig mellan banorna med lägst bränsleförbrukning.

Tidigare arbeten med övriga metoder för karakterisering på FOI

- En förstudie på simulerad nedlänksanalys har genomförts under hösten 2023 och presenteras i ett kommande memo.
- Försök till optisk avbildning med NOT genomfördes 2019 [53].
- Pågående studier sker för karakterisering med hjälp av ockultationer av solen.
- Två examensarbeten genomfördes under våren 2023, med examination vid KTH, som berörde följande:
 - a. möjligheten att skapa en modell för att bedöma risker till följd av fragmentering i rymden [73],
 - b. metoder för hotbedömning av satelliter med precisionsmanöverförmåga [80].

4 Sammanställning av metoder

I detta kapitel presenteras en sammanställning av metoderna på matrisform. Efter det följer en beskrivning av hur metodfusion kan nyttjas för bättre resultat följt av en kort genomgång av några maskininlärningsmetoder som skulle kunna appliceras på karakteriseringsdata.

4.1 Metodmatris

En metodmatris som sammanfattar vilka metoder som är lämpliga att använda för att mäta in de olika karakteriseringsparametrarna visas i Figur 18. Metoderna är desamma som presenterats i kapitel 3 och karakteriseringsparametrarna är samma som beskrivits i kapitel 2.1.1. Det är viktigt att poängtera att en X-markering i matrisen indikerar att en metod kan nyttjas för att mäta eller hämta in data för en specifik karakteriseringsparameter, även fast det ännu inte finns sådana system i bruk än.

Även om öppen information kan användas för att karakterisera i stort sett alla parametrar bör man vara försiktig och källkritisk vid användande av öppna källor. Felmarginaler publiceras ofta inte och det är svårt att verifiera mätningarna som står till grund för informationen.

Situationsberoende parametrar

Det finns flera olika mätmetoder för att få data till banbestämning. Mätning med radar, fotometri och laser är alla vanliga och välbeprövade metoder. Övriga metoder som kan hämta bandata är främst nedlänksanalys men också fragmentanalys. Baninformation kan också fås från öppen information. För att avgöra om satelliten ingår i en konstellation hämtas med fördel data från öppen information, där finns möjlighet att ta reda på satellitens konstellationstillhörighet direkt. Annars finns möjligheten att hämta information om satellitens syfte, konstruktör eller ägare och komplettera detta med en bananalys. Med optiska mätningar finns potential för att känna igen konstellationstillhörighet på speciella reflektionsegenskaper. Information om uppskjutningen hämtas från öppen information.

Fysiska attribut

Med fotometri, spektroskopi och aktiv radar är det teoretiskt möjligt att detektera materialet på satellitens yta genom att analysera frekvensinnehållet i signalen, men det är inte genomfört i stor skala än. Genom avbildning med radar kan satellitens form och storlek avgöras. Avbildning sker med aktiv radar, och från den finns också möjlighet att uppskatta vilka sensorer och annan teknisk utrustning som satelliten är utrustad med. Att göra avbildning med passiv radar är teoretiskt möjligt, men inte tillämpat i praktiken än. Likaså är det möjligt att studera skuggan av satelliter för att uppskatta form och storlek. Den elektromagnetiska signaturen ser olika ut för de olika metoderna, för radar och laser skulle denna parameter kunna likställas med satellitens radar- eller lasermålyta, medan den för spektroskopi och fotometri kan liknas vid en färg. Att uppskatta framdrivningen (drivmedel) av en satellit görs bäst med öppen data och med manövreringshistorik (övriga metoder). Detta kan också göras med fotometri och spektroskopi, men det skulle kräva övervakning under lång tid för att vara säker på att observation sker samtidigt som framdrivning.

Spektroskopi kräver noggrannare följning av satelliten än fotometri vilket förutsätter att banbestämningen är tillförlitlig. För att göra mätningar med polarimetri och laser behövs även information om satellitens bana i förväg, detta förutsätter att det antingen finns möjlighet att göra egen mätning eller att den informationen kan hämtas från öppna källor.

Beteendeparametrar

För att mäta in en satellits beteendeparametrar krävs generellt observationer över en längre tid, oavsett metod. För att avgöra om manövrering har skett förutsätts att satellitens bana har bestämts för flera passager och att avvikelser från denna sedan detekterats, därför gäller samma metoder för mätning av satellitens bana även för manövrering. Orienteringsstabiliteten, eller rotationen, kan mätas in under en och samma passage om passagen är tillräckligt lång för att täcka in flera perioder av rotationen. För att se förändringar i orienteringsstabiliteten jämförs data över tiden, vanligen insamlad med aktiv radar (avbildning) och fotometri (ljuskurvor). Från dessa metoder kan även orienteringen på satelliten tas fram. Information om frekvensanvändningen hämtas från öppen information och från nedlänksanalysen (övriga metoder).

Karakteriseringsparameter	Metod		Optiska mätningar							
	Aktiv	Passiv	Radar	Fotometri	Polarimetri	Spektroskopi	Lasermätningar	Öppna mätningar		
Situationsberoende	Satellitens bana	X	X	X				X	X	X
	Del av konstellation			X					X	
	Uppskjutning									X
Fysiska attribut	Material	X		X			X		X	
	Form och storlek	X	X						X	X
	Satellitens sensorer	X							X	
	Elektromagnetisk signatur	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Framdrivning			X			X		X	X
Beteende	Manövrering	X	X	X				X	X	X
	Orientering	X		X	X	X			X	
	Orienteringsstabilitet	X		X	X	X			X	
	Frekvensanvändning									X

Figur 18. En metodmatris för överblick av vilka mätmetoder som lämpas för de olika karakteriseringsparametrarna. Notera att en X-markering innebär att det minst är teoretiskt möjligt att mäta in specifik parameter med angiven metod.

4.2 Metodfusion

Metodfusion innebär att data från flera mätningar utförda med olika metoder sammanställs för analys. Det är nödvändigt för en mer detaljerad bild av objektet och karakteriseringen blir också mer övergripande. Med metodfusion kan även noggrannheten öka då olika typer av data kan komplettera varandra [81]. Till exempel fås noggranna avståndsmätningar och hastigheter i avståndsled med radar, som tillsammans med uppmätta koordinater (vinkelmått) från optiska mätningar kan ge bättre banbestämning än om radar och optiska mätning nyttjas var för sig. Alternativt att information från öppen data behöver verifieras med egna mätningar eller annan kompletterande data. Det kan också via öppna källor finnas generell information om vilket användningsområde en satellit har som tillsammans med manövreringshistorik skulle kunna leda till slutsatser om i vilka riktningar satelliten pekat (och därigenom dess orienteringsstabilitet) och eventuellt hur systemet används. Slutsatserna kan gälla både interaktion med andra satelliter i omloppsbanan och förändrade förutsättningar för observationer, exempelvis täckning och sensorupplösning. Nedan följer några exempel på aktiva system och studier som nyttjar olika typer av metodfusion, urvalet är ett axplock som är tänkt att representera en bred bild av tillämpningar.

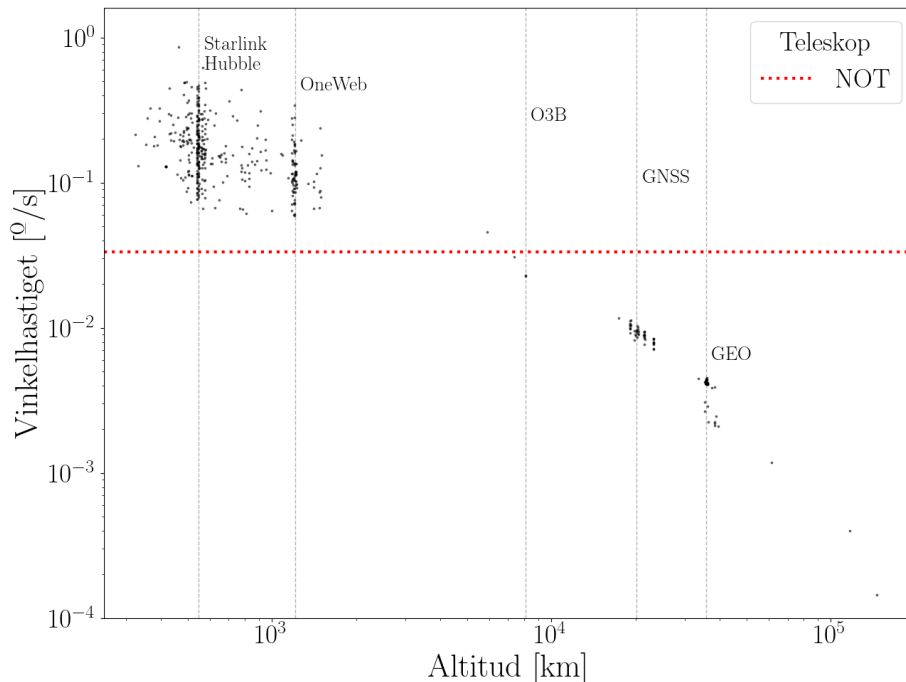
En studie, som presenterades vid europeiska konferensen om rymdskrot 2021 [81], visar att det är möjligt att öka noggrannheten vid bestämning av ett objekts position genom att kombinera data från olika inmätningsmetoder. Genom ett experiment där teamet fått olika typer av data (optisk, radar, information etcetera) för 17 utvalda satelliter i LEO, MEO och GEO lyckades de förbättra osäkerheten av objektets position med 10-15% för objekt i LEO och med en faktor tio eller mer för objekt i GEO, vilket är en markant skillnad och ger goda utsikter för vidareutveckling. För studien delades data från olika kommersiella, statliga och civila aktörer inom rymdlägesbild med syftet att se hur fusion av data från flera olika källor tillsammans med avancerade analyser kan bidra till noggrann rymdlägesbild för trafikledning i rymden.

Den kinesiska studien gjord på BeiDou-G2-satelliten [40], som presenterades i kapitel 3.2.1, ger ett tydligt exempel där forskarna sammanfogat fotometridata med information om banan (längd på huvudaxeln och banans excentricitet), för att kunna dra fler slutsatser om beteendet. Fotometridata mättes in med två olika system, övervakningsnätverket Purple Mountain Observatory med över 20 optiska teleskop i Kina och med fotonräknare (eng. *single-photon counter*) i Graz SLR-station i Österrike. Banberäkningarna gjordes genom att propagera äldre TLE-data. Målet med studien var att få en mycket noggrann analys av BeiDou-G2:s rotation för att senare låta den dockas av en annan satellit för att bli omplacerad till en kyrkogårdsbana.

Som en del i sitt nationella SST-program har Portugal nyligen installerat ett radar-system tillsammans med ett optiskt teleskop på Pampilhosa da Serra Space Observatory (PASO) [82]. Radarn kommer användas för att följa rymdskrot i LEO,

upp till 1000 kilometer, samtidigt som det optiska teleskopet ska kunna följa samma objekt. På PASO finns redan optiska sensorer för övervakning av objekt i MEO och GEO. Genom att ha dessa system installerade på samma plats kan informationen från radarmätningarna korreleras med den informationen från de optiska mätningarna i realtid. Därmed finns det hopp om att kunna utveckla nya lösningar för att göra bättre karakterisering av objekt och testa nya datafusionsalgoritmer och tekniker för övervakning av rymdskrot.

I de olika metodbeskrivningarna nämns flera befintliga tekniska system och sensorer. För att kunna följa en satellit behöver sensorn kunna följa den med en viss vinkelhastighet. Figur 19 visar hur vinkelhastigheten varierar med altituden för olika satelliter. Simuleringen som grafen baseras på antar ett teleskop i Stockholm som observerat under en natt. De satelliter som syns varierar från dag till dag. Alla teleskop som klarar att observera i en vinkelhastighet över 1 grad per sekund kan observera satelliter i alla banor. Notera att NOT är markerat i figuren och trots möjligheten att flytta teleskopet i 2 grader per sekund är snabbaste vinkelhastigheten för observation 0.03 grader per sekund då teleskopet måste kunna fokusera på objektet. Detta är framförallt en begränsning för optiska och laser-mätningar men inte i samma utsträckning för radar då de ofta styrs elektroniskt och därför inte begränsas lika mycket av att följa objekt med snabb vinkelhastighet.



Figur 19. Här visas hur vinkelhastigheten varierar med altituden för olika satelliter. Markerat i figuren är även den maximala hastigheten som teleskopet NOT kan följa objekt med.

4.3 Maskininlärning

Maskininlärning används inom många fält, bland annat inom flera av ovan nämnda metoder, och är i sig ett eget forskningsområde. Med en ökande mängd data och bättre beräkningskraft blir möjligheterna för att nyttja maskininlärning för karakterisering av satelliter bättre. Som tidigare beskrivet så används i regel inte mätdata från en metod fristående utan i kombination med andra typer av data. Genom att använda maskininlärning i samband med metodfusion kan mer information utvinnas på ett effektivare sätt.

Maskininlärning bör ses som ett verktyg för att analysera data och beroende på tillämpning och typ av data lämpar sig olika typer av maskininlärningsmetoder. Gemensamt för alla maskininlärningsmetoder är att de måste tränas på en datamängd innan de sätts i bruk. Vissa algoritmer behöver övervakad inlärning där träningsdatamängden är annoterad medan andra är designade för självinlärning med icke-annoterad data. Vid självinlärning kan gömda mönster i datamängden upptäckas och kluster med liknande data kan skapas. Övervakad inlärning är till exempel vanligt för bildigenkänning där specifika attribut är uppmärksamma i träningsdatamängden [83]. En typ av maskininlärning är *convolutional neural network* som ofta användas vid bildbehandling och kan klassificera bilder efter innehåll genom att identifiera specifika egenskaper. Denna metod skulle kunna vara lämplig för att klassificera fysiska attribut från radaravbildningar. En annan typ är *recurrent neural networks* som är bra för tidsserieanalyser, så som analys av ljuskurvor. Utöver dessa finns flera andra maskininlärningsmetoder som lämpar sig för olika typer av data och analyser.

I kapitel 3.2.1 omnämns en studie gjord vid University of Arizona där det tagits fram en fotometrisk signatur för ett antal observerade satelliter, främst Starlink men också några OneWeb. Här används maskininlärning för att klassificera signaturerna och på så sätt kunna avgöra vilken typ av signatur som är unik för de olika konstellationerna.

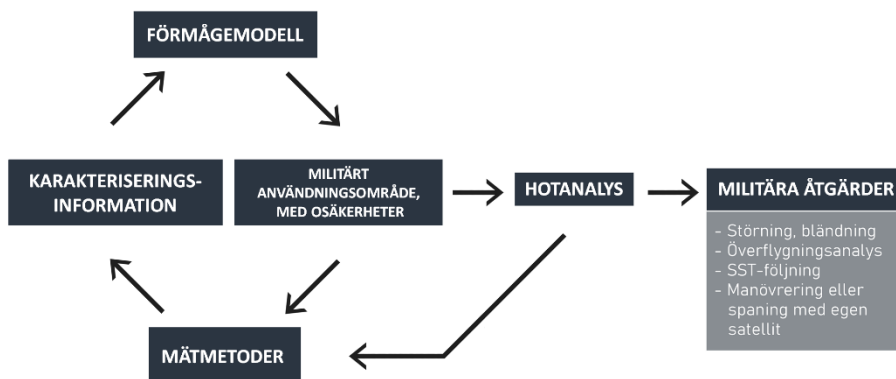
I en studie gjord på brittiska Defence Science and Technology Laboratory [84] används bland annat en maskininlärningsmetod som heter *random forest* och en som heter *long short-term memory neural network* och lyckas få fram sannolikheter för att satelliten är tillverkad med en viss satellitbuss samt om den är aktiv eller ej från ljuskurvor av både radar och optiska sensorer.

5 Diskussion

Karakterisering av satelliter är en viktig del för att kunna härleda vilken förmåga en satellit har och hur den är tänkt att nyttjas. Från enskilda karakteriserade satelliter kan övergripande slutsatser dras kring de fysiska parametrarna hos satelliter i samma serie eller konstellation genom att observera en eller flera satelliter av samma typ. De övergripande slutsatserna kan sedan ge en fingervisning om vad som kan förväntas av nästa satellit i samma serie eller konstellation (till exempel manövreringsförmåga och bränsletillgång). Avsteg från normalbilden kan därför vara relevanta, exempelvis om en satellit i konstellationen följer ett avvikande mönster.

Metodmatrisen som presenteras i kapitel 4.1 ger en överblick över vilka karakteriseringsparametrar som är möjliga att mäta in med de olika metoderna. Den är tänkt att ge en uppfattning om vad som kan mätas in med befintliga sensorer och system, samt vilken typ av sensor, system eller information som en mätning av en specifik parameter kan behöva kompletteras med. Processen för att välja vilken metod som ska användas för karakterisering bör också inkludera en analys av eventuella begränsningar i sensorns geografiska läge, projektets budget och metodens krav på teknisk expertis.

Metodmatrisen är tänkt att underlätta för insamlingen av karakteriseringsinformation som skall ingå i förmågemodellen. Nästa steg är att med förmågemodellen ta fram den militära förmågan. Vidare kan den möjliga hotbilden från satelliternas respektive militära förmåga också analyseras. Från eventuella informationsluckor i hotanalysen bör behovet av nya mätningar av både tidigare uppmätta och nya karakteriseringsparametrar bli tydligt. Detta gör att ytterligare en nivå kan läggas till förmågeanalysen för att ge en högre abstraktionsnivå som kan ge underlag till den militära beslutsfattaren om eventuella åtgärder. En illustration av denna högre nivå samt den iterativa karakteriseringsprocessen visas i Figur 20. Genom att samla in karakteriseringsinformation kan kvalificerade bedömningar göras för att uppskatta hur satelliterna nyttjas, vad de har för förmågor och hur de kan nyttjas militärt.



Figur 20. Illustration på hur en hotbildsanalys kan föreslå möjliga militära åtgärder på en identifierad hotbild, samt hur den iterativa processen för att ta fram militär förmåga genom karakterisering ser ut.

Vid samtida metodfusion så blir den mest restriktiva metoden begränsande, innefattas exempelvis en optisk mätningssätt kan mätningen endast ske under specifika väder- och ljusförhållanden vilket begränsar hela systemet. Även om metodfusion har potential för att förbättra mätningarna innebär det inte nödvändigtvis en förbättring av osäkerheten i mätningarna. Om systemen är frikopplade kan de mäta oberoende eller användas som komplement till varandra. Exempelvis skulle det kunna innebära att fusionera data från en radaravbildning med polarisationsmätningar för att förstå vilka delar av satelliten som reflekterar med olika signaturer.

Förutom metodfusion kan maskininlärningsmetoder som diskuterats kombineras med en eller flertal av karakteriseringsmetoderna och bidra med bättre data- och senare förmågeanalys. Maskininläring är ett verktyg som används mer och mer i karakteriseringssyfte och utvecklas i snabb takt och är särskilt bra lämpat för de stora datamängderna som genereras i en rymdmiljö med fler och fler objekt.

6 Slutsatser

Rapporten presenterar en överblick av de metoder som idag används och utvecklas för karakterisering av satelliter. Denna karakterisering innefattar situationsberoende parametrar, fysiska attribut och beteende hos satelliten. Karakteriseringsinformation är en avgörande del i den militära rymdlägesbilden för att kunna skapa en förmågemodell för att utvärdera röd satellits militära förmågor. Detta i sin tur möjliggör en hotanalys som kan utgöra beslutsunderlag för militära åtgärder.

Det finns flera mätmetoder som är lämpliga för karakterisering av satelliter. Dessa har olika styrkor och svagheter när det gäller lämplighet för olika karakteriseringsparametrar, tillgänglighet vid användning och mognad i teknologi samt vilka ekonomiska förutsättningar som krävs. Metodmatrisen som presenteras i rapporten, se Figur 18, ger en överblick över vilka metoder som möjliggör mätning av de olika karakteriseringsparametrarna. En markering i metodmatrisen indikerar att metoden är möjlig att använda för mätning men ger ingen information hur noggranna resultat som kan förväntas eller hur mogen tekniken är. Ingen metod kan på egen hand ge fullständig information om en röd satellits användningsområden. Metodfusion är därför viktigt för att få så en komplett bild som möjligt där maskininläring är ett av de mest använda verktygen.

Vid första anblick av metodmatrisen ger öppen information intrycket av att kunna fylla alla informationsbehov. Det stämmer i viss mån, men som tidigare nämnt är det viktigt att vara försiktig och källkritisk gällande öppen information. Öppen information bygger till stora delar också på någon form av mätning vilket ger anledning att vara varsam och ta höjd för felmarginaler som inte redovisats och att verifiera informationen med egna mätningar.

De metoder som kan mäta in flest karakteriseringsparametrar är aktiv radar och fotometri. Båda metoderna är lämpliga för att mäta satellitbanan, elektromagnetisk signatur, upptäcka manövrering, orientering och orienteringsstabilitet, men även där kompletterar de varandra. Till exempel fås en högre noggrannhet i avståndsled med radar och bättre vinkelmått med fotometrimätning. Även om materialegenskaper teoretiskt kan mätas upp med både aktiv radar och fotometri är spektroskopi bättre lämpat.

Karakterisering genom ockultationsavbildning kan erbjuda ett lågkostandsalternativ till avbildning med radar eller större optiska system då endast en mindre sensor är nödvändig. Manövreringshistorik är ytterligare exempel på en mindre etablerad metod för karakterisering, men potentialen för att kunna bidra med information till hotanalysen är stor.

6.1 Framtida arbete

FoT Rymdlägesbild har till uppgift att stötta Försvarmakten i införandet av en militär rymdlägesbild i vilken karakterisering av satelliter ingår. Den här rapporten står till grund för fortsatt arbete inom karakterisering för att tillgodose Försvarmaktens behov av att kunna utföra en hotanalys. Inom karakterisering av satelliter finns många utveckling- och forskningsområden som är relevanta för Försvarmakten.

Exempel på dessa områden är:

1. Optimering av data från befintliga och framtida sensorer i karakteriseringssyfte.
2. Uppbyggnad av en databas för olika material som är vanligt förekommande på satelliter för att kunna utveckla metoder att karakterisera satelliter i omloppsbana.
3. Skapa en satellitdatabas med karakteriseringsinformation från olika källor. Från databasen kan sen samband och samhörigheter mellan olika parametrar upptäckas.
4. Kalibreringstekniker av sensorer för karakteriseringsmätningar.
5. Utveckling av maskininlärningsmetoder för användning med befintliga och framtida sensorer för metodfusion och detektion av manövreringsavvikelser.
6. Uppföljning av samma objekt i ett längre tidsperspektiv för att utveckla metoder för att få fram en normalbild för beteendeparametrar och därmed möjlighet att upptäcka avvikande beteende.
7. Uppbyggnad av förmågemodell kopplat till karakteriseringsparametrar.

Forskning inom dessa områden kan möjliggöras med egen eller inköpt sensorkapacitet eller öppna källor.

Referenser

- [1] J. Westman, F. Guldstrand, A. Johlander, S. Lindström, L. Mattsson, N. Normelli, O. Rasmusson, N. Wingborg och A.M. Wårlind, "Omvärldsanalys Rymd 2023 - Fokus på försvar och säkerhet", FOI--R-5516--SE, FOI, Stockholm, 2023.
- [2] S. Lindström, K. Hallgren, S. Papadogiannakis, O. Rasmusson, J. Rydqvist, och J. Westman, "Omvärldsanalys Rymd 2020 - Fokus på försvar och säkerhet", FOI-R--5077--SE, Stockholm, 2021.
- [3] J. Beale, "Space, the unseen frontier in the war in Ukraine - BBC News". Åtkomstdatum: 20 juli 2023. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.bbc.com/news/technology-63109532>
- [4] Försvarsmakten, "Doktrin för Gemensamma operationer (DGO 2020)", M7739-354030, Stockholm, 2020.
- [5] M. Nylund, P. Hägg, B. Jakobsson, R. Farid, R. Ragnarsson, O. Rasmusson, S. Papadogiannakis och A. Tyrblom, "Inmätning av rymdobjekt - rymdlägesbild med egen rådighet", FOI-R--5325--SE, Stockholm, 2022.
- [6] M. Nylund, P. Hägg, J.-O. Hall, R. Ragnarsson, A. Tryblom och T. Melin, "Inmätning av satelliter - En studie av radarsensortillämpning", FOI-R--5270--SE, Stockholm, 2022.
- [7] M. Nylund, "Banbestämning av rymdobjekt", FOI-D--1010--SE, Stockholm, 2020.
- [8] M. Nylund, O. Rasmusson, P. Hägg, och S. Papadogiannakis, "Statusrapport - genomfört arbete inom rymdlägesbild 2021", Memo FOI Memo 7723, Stockholm, 2021.
- [9] M. Nylund och S. Papadogiannakis, "Statusrapport - genomfört arbete inom rymdlägesbild 2022", Memo FOI Memo 8030, Stockholm, 2022.
- [10] M. Nylund, S. Papadogiannakis, och O. Rasmusson, "Konferensrapport AMOS 2020", Konferensrapport FOI Memo 7364, Stockholm, 2020.
- [11] M. Nylund, P. Hägg, och T. Sundberg, "Konferensrapport AMOS 2021", Konferensrapport FOI Memo 7762, Stockholm, 2021.

- [12] M. Nylund och B. Jakobsson, "Konferensrapport Military SSA 2021", Konferensrapport FOI Memo 7659, Stockholm, 2021.
- [13] P. Hägg, "Konferensrapport Military SSA 2022", Konferensrapport FOI Memo 7896, Stockholm, 2022.
- [14] S. Buchwaldt och J. Geul, "Space Capability Matrix: Development and application toward the characterisation of satellite capabilities", *NATO-SET-SCI27*, Interlaken, 2022.
- [15] H. D. Griffiths and C. J. Baker, *An Introduction to Passive Radar*. Norwood: Artech House, 2016.
- [16] S. Anger, M. Jirousek, S. Dill, och M. Peichl, "ISAR imaging of space objects using large observation angles", i *2021 21st International Radar Symposium (IRS)*, Berlin, 2021.
- [17] S. Anger, M. Jirousek, S. Dill, och M. Peichl, "IoSiS – A high performance experimental imaging radar for space surveillance", i *2019 IEEE Radar Conference (RadarConf)*, Boston, 2019.
- [18] M. G. Czerwinski och J. M. Usoff, "Development of the Haystack Ultrawideband Satellite Imaging Radar", *Lincon Laboratory Journal* vol. 21, nr. 1, s.28-44, 2014
- [19] M. Jirousek, S. Anger, S. Dill, och M. Peichl, "Challenges in very high resolution imaging of satellites and objects in space", i *Radar Sensor Technology XXIII*, Baltimore, 2019.
- [20] M. Budoni, C. Carloni, D. Cerutti-maori, och F. Piergentili, "Autonomous tracking mode with space observation radar: Initial Orbit Determination and Tracking | ESA Proceedings Database". Åtkomstdatum: 10 oktober 2023. [Online]. Tillgänglig vid: <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/neosst1/paper/463>
- [21] V. Karamanavis *m.fl.*, "Characterization of deorbiting satellites and space debris with radar", *Adv. Space Res.*, vol. 72, nr 8, s. 3269–3281, 2023.
- [22] S. Cicalò och S. Lemmesns, "Radar-based Re-Entry Predictions with very limited tracking capabilities: the GOCE case study", maj 2018. [Online]. Tillgänglig vid: <https://arxiv.org/pdf/1805.09171.pdf>

- [23] D. Mehrholz, L. Leushacke, W. Flury, R. Jehn, H. Klinkrad och M. Landgraf, "Detecting, Tracking and Imaging Space Debris", *ESA Bulletin 109*, 2002.
- [24] J. Rosebrock, L. Leushacke och D. Banka, "Radar Signal Processing for Space Debris Observation", *Frequenz*, vol. 56, nr. 11-12, s. 249-25, 2022, Åtkomstdatum: 10 oktober 2023. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/FREQ.2002.56.11-12.249/html>
- [25] M. D. Abouzahra, M. E. MackDonald, R.K. Lee, D. L. Grimes, B. H. Simakauskas, N. D. Lopez, C. Eckert och J. M. Usoff,, "Upgrading the HUSIR Radar for Deep-space Satellite Imaging", i *2022 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS 2022*, Denver, 2022.
- [26] P. Wang, X. Zhou, Y. Fang, H. Zeng, och J. Chen, "GNSS-Based Passive Inverse SAR Imaging", *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 16, s. 508–521, 2023.
- [27] "GESTRA (German Experimental Space Surveillance and Tracking Radar)". Åtkomstdatum: 04 juli 2023. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.eoportal.org/other-space-activities/gestra>
- [28] T. Michal, J.-P. Eglizeaud, och J. Bouchard, "GRAVES: The new French System for Space Surveillance" i *The Fourth European Conference on Space Debris*, Darmstadt, 2005
- [29] "Our Radars - LeoLabs". Åtkomstdatum: 04 juli 2023. [Online]. Tillgänglig vid: <https://leolabs.space/radars/>
- [30] "Defense - LeoLabs". Åtkomstdatum: 04 juli 2023. [Online]. Tillgänglig vid: <https://leolabs.space/defense/>
- [31] D. Finch, J. Palmer, J. Cooper, D. Oltrogge, och T. Johnson, "Assessing passive radar for LEO SSA", i *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui, 2022.
- [32] J. Kłos, K. Jędrzejewski, A. Droszcz, K. Kulpa, M. Pożoga, och J. Misiurewicz, "Experimental Verification of the Concept of Using LOFAR Radio-Telescopes as Receivers in Passive Radiolocation Systems", *Sensors*, vol. 21, nr 6, s. 2043, 2021.

- [33] M. Malanowski, K. Jędrzejewski, J. Misiurewicz, K. Kulpa, A. Gromek, J. Kłos och A. Droszcz, "Passive Radar Based on LOFAR Radio Telescope for Air and Space Target Detection", i *2021 IEEE Radar Conference (RadarConf21)*, Atlanta, 2021.
- [34] R. Ragnarsson, Å. Andersson, J. Fagerström, P.-O. Frörlind, T. Sjögren, och A. Tryblom, "Bistatiska metoder för luftmålsradar. Slutrapport", FOI-R--5082--SE, Linköping, 2020
- [35] J. Africano, P. Kervin, D. Hall, P. Sydeny, J. Ross, T. Payne, S. Gregory, K. Jorgensen, K. Jarvis, T. Parr-Thumm, G. Stansbety och E. Barker, "Understanding Photometric Phase Angle Corrections", i *Fourth European Conference on Space Debris*, Darmstadt, 2005.
- [36] S. Papadogiannakis, "Konferensrapport NOT - a telescope for the future", FOI Memo 8008, Stockholm 2022.
- [37] Ž. Ivezić, A. J. Connolly, J. T. VanderPlas, och A. Gray, *Statistics, Data Mining, and Machine Learning in Astronomy: A Practical Python Guide for the Analysis of Survey Data, Updated Edition*. Princeton University Press, 2020. [Online]. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1515/9780691197050>
- [38] F. R. Chromey, *To Measure the Sky: An Introduction to Observational Astronomy*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [39] E. C. Pearce, H. Krantz, A. Block, B. Sease, M. Kirshner, och K. Rockowitz, "Multicolor and Spectral Characterization of Space Objects in the Near-IR", i *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui, 2020.
- [40] H.-Y. Lin, "BeiDou-G2: Past and Present". arXiv, 25 april 2022. Åtkomstdatum: 04 juli 2023. [Online]. Tillgänglig vid: <http://arxiv.org/abs/2204.09258>
- [41] H. Krantz, E. C. Pearce, och A. Block, "Characterization of LEO Satellites With All-Sky Photometric Signatures", i *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui, 2022.
- [42] "Welcome to ALIS_4D". Åtkomstdatum: 23 augusti 2023. [Online]. Tillgänglig vid: <https://alis4d.irf.se/>

- [43] "Space Domain Awareness – ExoAnalytic Solutions". Åtkomstdatum: 23 augusti 2023. [Online]. Tillgänglig vid: <https://exoanalytic.com/space-domain-awareness/>
- [44] T. Svensson och S. Möller, "Elektrooptisk inmätning av satelliter", FOI-D-0928--SE, Linköping, 2020
- [45] M. C. Polo, A. Alenin, I. Vaughn, och A. Lambert, "GEO Satellite Characterization through Polarimetry using Simultaneous Observations from nearby Optical Sensors", i *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui, 2016.
- [46] S. Papadogiannakis, T. Sundberg, P. Hägg, och H. Sundberg, "Polarimetry and Spectroscopy on Geostationary Satellites with the Nordic Optical Telescope", i *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui, 2022.
- [47] N. Kosaka, Y. Itoh, T. Saito, M. Tozuka, T. Endo, och T. Ando, "Imaging Polarimetry of Geostationary Satellite Express-AM5", *Odessa Astron. Publ.*, vol. 33, s. 115–118, 2020.
- [48] D. Hall och P. Kervin, "Analysis of Faint Glints from Stabilized GEO Satellites", i *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui, 2013.
- [49] D. C. Ferguson, P. Perillat, och B. Vayner, "Spectral Characteristics of GEO Satellite Arcing – 300 To 350 MHz", *J. Astronaut. Sci.*, vol. 69, nr 1, Art. nr 1, 2022.
- [50] A. Battle, V. Reddy, R. Furfaro, T. Campbell, J. Frith, och D. Monet, "Updates on the Visible Spectral Atlas of Geostationary Satellites", i *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui, 2022.
- [51] A. Buzzoni *m.fl.*, "Physical characterization of the deep-space debris WT1190F: A testbed for advanced SSA techniques", *Adv. Space Res.*, vol. 63, nr 1, Art. nr 1, 2019.
- [52] C. H. Lee, C. M. Bachmann, P. Seitzer, och H. M. Cowardin, "Goniometric and Polarized Imaging Spectroscopic Lab Measurements of Spacecraft Materials", i *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui, 2022.

- [53] T. Sundberg och H. Sundberg, ”Statusrapport rymdlägesbild 2019 - inmätningar med Nordiskt Optiskt Teleskop”, FOI Memo 6964, Stockholm, 2019.
- [54] H. Sundberg, D. Faria, S. Möller, L. Sjökvist, T. Svensson, och M. Nylund, ”AF.9220418 Statusrapport rymdlägesbild - inmätningar 2018”, FOI Memo 6551, Stockholm, 2018.
- [55] S. Alinder, ”Space Situational Awareness with the Swedish Allsky Meteor Network”, Uppsala Universitet, 2019.
- [56] L. Sjökvist, ”Laserinmätning av satelliter”, FOI-D--0921--SE, Linköping, 2020.
- [57] M. Shappirio, J. F. McGarry, J. Bufton, J. W. Cheek, D.B. Coyle, P. R. Stysley, X. Gu, R. P. Young och T. Zagwodzki ”Application of satellite laser ranging techniques for space situational awareness efforts”, i *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui, 2016.
- [58] M. A. Steindorfer, G. Kirchner, F. Koidl, P. Wang, B. Jilete, och T. Flohrer, ”Daylight space debris laser ranging”, *Nat. Commun.*, vol. 11, nr 1, s. 3735, 2020.
- [59] ”International Laser Ranging Service”, The Global ILRS Network. Åtkomstdatum: 21 juli 2023. [Online]. Tillgänglig vid: <https://ilrs.gsfc.nasa.gov/network/index.html>
- [60] S. Zhao, M. Steindorfer, G. Kirchner, Y. Zheng, F. Koidl, P. Wang, W. Shang, J. Zhang och T. Li, ”Attitude analysis of space debris using SLR and light curve data measured with single-photon detector”, *Adv. Space Res.*, vol. 65, nr 5, s. 1518-1527, 2019.
- [61] F. Niebler, P. Wagner, D. Hampf, N. Bartels, T. Meyer, E. Scharfer och W. Riede ”Compact Ground Station for Satellite Laser Ranging and Identification”, i *73rd International Astronautical Congress (IAC)*, Paris, 2022.
- [62] M. A. Steindorfer, P. Wang, G. Kirchner, och F. Koidl, ”The future of space debris laser ranging towards high precision MHz daylight space debris laser ranging?”, i *8th European Conference on Space Debris (virtual)*, Darmstadt, 2021.
- [63] NATO, ”NATO Open source intelligence handbook”, 2001.

- [64] L. Mattsson, "Feasibility Study Of Initial Orbit Determination With Open Astronomical Data", KTH, 2022.
- [65] M. D. Danarianto, A. M. Maharani, B. M. Falah, och F. Rohmah, "Prototype of automatic satellite streak detection, identification and initial orbit determination pipeline from optical observation", *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2214, nr 1, s. 012018, 2022.
- [66] R. Farid och S. Papadogiannakis, "Banbestämning med nedlänksanalys", kommande FOI Memo, Stockholm, 2023.
- [67] S. Henault och J.-F. Guimond, "Orbit estimation using passive radio frequency observations", DRDC-RDDC-2021-R102, Ottawa, 2021.
- [68] M. Prechtel, "Passive RF Sensing in support of SSA", i *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui, 2018.
- [69] T. Sundberg och H. Sundberg, "Rymdskrot – nulägesbeskrivning, potentiell utveckling och aktuella forskningsfrågor", FOI Memo 7580, Stockholm, 2021.
- [70] P. Hägg och T. Sundberg, "Metoder för analys av fragmenteringshändelser i rymden", kommande FOI Memo, Stockholm, 2023.
- [71] R. C. Reynolds, A. Tan, och M. Schamschula, "Gabbard Diagram Formation: The General Theory for Elliptical Orbits", *Adv. in Aerospace Science and Applications*, vol. 8, nr 2, s. 99-112, 2018.
- [72] D. Kastinen, J. Vierinen, T. Grydeland, och J. Kero, "Using radar beam-parks to characterize the Kosmos-1408 fragmentation event", *Acta Astronaut.*, vol. 202, s. 341–359, jan. 2023.
- [73] K. Andersson, "Risk Assessment for Space Debris Collisions", KTH, Stockholm, 2023.
- [74] V. Braun, S. Lemmens, B. Reihls, H. Krag, och A. Horstmann, "Analysis of Breakup Events", i *7th European Conference on Space Debris*, Darmstads, 2017.
- [75] N. Cimmino, G. Isoletta, R. Opromolla, G. Fasano, A. Basile, A. Romano, M. Peroni, A. Panico och A. Cecchini, "Tuning of NASA Standard Breakup Model for Fragmentation Events Modelling", *Aerospace*, vol. 8, nr 7, s. 185, 2021.

- [76] T. Wang, "Analysis of Debris from the Collision of the Cosmos 2251 and the Iridium 33 Satellites", *Sci. Glob. Secur.*, vol. 18, nr 2, s. 87–118, 2010.
- [77] H. Labriji, O. Herscovici-Schiller, och F. Cassaing, "Shadow imaging of geostationary satellites: experimental demonstration with accurate polychromatic modelling of diffraction and atmospheric disturbances", i *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui, 2022.
- [78] "Space Station Sails Across the Sun". Åtkomstdatum: 25 augusti 2023. [Online]. Tillgänglig vid: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/146906/space-station-sails-across-the-sun>
- [79] D. Hambling, "U.S. And U.K. Accuse Russia Of In-Orbit Test Of Nesting Doll Anti-Satellite Weapon", *Forbes*. Åtkomstdatum: 17 mars 2023. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.forbes.com/sites/davidhambling/2020/07/24/us-and-uk-accuse-russia-of-testing-in-orbit-anti-satellite-weaponry/>
- [80] M. Dahlman, "Methods for Co-Orbital Threat Assessment in Space", KTH, Stockholm, 2023.
- [81] D. L. Oltrogge, P. Wauthier, D. A. Vallado, S. Alfano, och T. S. Kelso, "Results of comprehensive STCM data fusion experiment", i *8th European Conference on Space Debris*, Darmstadt, 2021.
- [82] J. Pandeirada, M. Bergano, P. Marques, A. Barbosa och B. Coelho, "Development of the First Portuguese Radar Tracking Sensor for Space Debris", *Signals*, vol. 2, nr 1, s. 122–137, 2021.
- [83] A. Russo och G. Lax, "Using Artificial Intelligence for Space Challenges: A Survey", *Appl. Sci.*, vol. 12, nr 10, s. 5106, 2022.
- [84] A. Agathangelou, R. Houghton, J. Collyer, och J. Davis, "Machine Learning for Satellite Characterisation", i *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui, 2022.



ISSN 1650-1942

www.foi.se