



Överflygningsanalys

Avbildande jordobservationssatelliter

Victor Jungnell

Victor Jungnell

Överflygningsanalys

Avbildande jordobservationssatelliter

Bild/Cover: Anton Balazh/shutterstock.com

Titel	Överflygningsanalys
Title	Overflight analysis
Rapportnr/Report no	FOI-R--4320--SE
Månad/Month	November
Utgivningsår/Year	2016
Antal sidor/Pages	30
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Försvarsmakten
Forskningsområde	2. CBRN-frågor och icke-spridning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E60808
Godkänd av/Approved by	Johan Söderström
Ansvarig avdelning	Försvars och säkerhetssystem

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

Som en del av pågående FoT-projekt har en studie inom ämnet överflygningsanalys utförts. Överflygningsanalys är ett centralt ämne inom det större området rymdlägesbild. Huvudsyftet med överflygningsanalyserna i denna studie är att ge en uppfattning om hur ofta typiska jordobservationssatelliter med optiska eller SAR-sensorer kan avbilda ett utvalt område på jorden.

Öppna datakällor om satelliters banegenskaper och sensorer har använts för att generera typiska överflygningsscenarier. Dessa har i sin tur använts för att få fram en statistisk överflygningsfrekvens för olika fall från enstaka satelliter och existerande konstellationer, samt även till en möjlig framtida rysk satellitflotta.

Analysresultaten visar att överflygningsfrekvensen ökar med fler tillgängliga satelliter, men att denna fördel tappas till viss del efter ett visst antal satelliter på grund av samtida och överlappande överflygningar. Överflygningsfrekvensen ökar också med områdets latitud och med satellitens höjd. Resultaten visar också att SAR-satelliter kan avbilda områden cirka 3,5 gånger oftare än optiska satelliter. Detta beror på dels SAR-sensorernas oberoende från lokala ljusförhållanden, dels på att sensorerna har en större möjlig betraktningvinkel.

Det statistiska underlaget visar att en typisk jordobservationssatellit kan avbilda ett område i Sverige i snitt en till två gånger per dygn, beroende på sensortyp.

De jordobservationssatelliter som idag finns i bana kan avbilda ett område i Sverige flera gånger per dygn. Dessa satelliter är antingen statliga (militära eller civila) eller kommersiella, de kommersiella levererar data som finns tillgängligt att köpa på marknaden.

Nyckelord: Överflygningsanalys, satellit, sensor, satellitbana, konstellation, jordobservation, optisk, SAR, överflygningsfrekvens, återkomsttid

Summary

As part of ongoing research in the area of Space Situational Awareness (SSA) for the Swedish Defence Research Agency this study has focused on overflight analysis. Overflight analysis is an essential part of the larger subject of SSA. The main purpose of the overflight analyses in this study is to give an idea of how often typical Earth observation satellites have the opportunity to image a given area on the ground.

Open sources providing satellite orbital parameters and sensor data are used to design a general overflight model consisting of typical Earth observation satellites and sensors. Analyses of both typical and real-world satellites have provided a statistical overflight frequency for different cases, including a possible future scenario for a Russian satellite fleet.

The results show that the overflight frequency increases with constellation size, but that this increase is not as high after a certain number of satellites due to overlapping and simultaneous overflights in large constellations. The overflight frequency also increases with latitude and altitude. Results also demonstrate that satellites with SAR sensors can image areas around 3.5 times more frequently than satellites with optical sensors. This is because of SAR sensors' ability to image regardless of lighting conditions and because the sensor's field of regard is larger.

A single typical Earth observation satellite can image an area in Sweden once or twice a day on average, depending on the type of imaging sensor used.

The study has also looked at existing and future satellite constellations. These satellites are both government-owned (civilian or military) or commercial, the commercial ones providing data to an open market.

Keywords: Overflight analysis, satellite, sensor, orbit, constellation, Earth observation, optical, SAR, overflight frequency, revisit time

Innehållsförteckning

1	Inledning	8
1.1	Syfte	8
1.2	Avgränsningar	9
1.3	Disposition	9
2	Satellitbanor och sensorer	10
2.1	Satellitbanor	10
2.2	Marknadstrender inom jordobservation	11
2.3	Sensorer	12
2.3.1	Stråkbredd	12
2.3.2	Betraktningens vinkel	13
2.3.3	Klimat och väderbegränsningar	14
3	Överflygningsanalys	15
3.1	Överflygningsfrekvens	15
3.1.1	Simuleringsmetodik	15
3.1.2	Typisk betraktningens vinkel	16
4	Resultat	18
4.1	En ensam satellit	18
4.1.1	Betydelsen av inklinations	18
4.1.2	Latitudberoende	19
4.1.3	Höjdberoende	20
4.1.4	Typisk banhöjd	21
4.2	Flera satelliter i konstellation	21
4.2.1	Konstellationsstorlek	21
4.2.2	Överflygningsfrekvens för konstellationer	23
4.2.3	Återkomsttid	24
4.3	Exempel på riktiga satellitkonstellationer	25
4.3.1	Ryska militära och civila satelliter	25
4.3.2	Kinesiska militära och civila satelliter	26
4.3.3	Kommersiella satelliter	27
4.4	Några framtida konstellationer	27

4.5	Sammanfattning	29
5	Slutsats	30

1 Inledning

I en rymdlägesbild ingår bland annat förmågan att följa, identifiera och förutse rymdobjekts positioner. Rymdlägesbilden ger därmed en uppdaterad lägesuppfattning om situationen i rymddomänen.

Överflygningsanalys kan sägas vara en del av denna rymdlägesbild. Syftet med en överflygningsanalys är huvudsakligen att utreda vilka satelliter som passerar över ett område, när dessa gör det och hur ofta för att exempelvis värdera eventuella risker med att bli upptäckt på marken. I den här rapporten presenteras resultat från övningsflygningsanalyser som fokuserar på hur ofta satelliter passerar över ett givet område beroende på olika faktorer såsom exempelvis höjd och typ av sensor.

Studien utförs som en del av det pågående FoT-projektet *Rymdrelaterad förmågeutveckling*. FoT-projektet syftar bland annat till att bygga upp kunskap om vad som skulle krävas av Sverige och Försvarsmakten för att bygga upp en Rymdlägesbild. Analyserna som presenteras grundar sig delvis i tidigare långsiktig kunskapsuppbyggnad av bland annat aktuella rymdsystems förmågor, samt i form av utveckling av verktyg för analyser och prediktering av satellitbanor.

1.1 Syfte

Studien syftar till att ge läsaren en introduktion till ämnet överflygningsanalys och att ge en uppfattning om hur ofta satelliter av en viss typ passerar över och kan observera ett område på jorden, samt hur detta beror på satellitsensors och satellitbanans egenskaper. Analyserna utgår både från verkliga fall med existerande satelliter och satellitkonstellationer, samt från generella resonemang och analyser med fiktiva men typiska satelliter.

Nytan för Försvarsmakten är att få en tumregel för hur ofta avbildande jordobservationssatelliter har möjlighet att avbilda ett område i Sverige, och hur detta påverkas av olika faktorer. Resultaten från studien kan också användas som ingångsvärden till den långsiktiga studie- och planeringsverksamheten.

En del av överflygningsanalys, som inte behandlas i den här rapporten, är att studera exakta tidpunkter för överflygning av specifika satelliter över givna områden. Satelliters positioner, och därmed passagetider, kan med god noggrannhet förutses en tid i förväg. Det är alltså möjligt att förbereda sig för passager av till exempel jordobservationssatelliter med hjälp av denna typ av analys. För Försvarsmaktens del kan överflygningsanalys bistå till planering av aktiviteter som på något sätt kan övervakas från rymden. Detta kan vara övningar, försök eller skarp verksamhet.

Arbetet som ligger till grund för rapporten har också syftat till att stödja andra delar av FoT-verksamheten inom rymdområdet. Exempelvis har de olika kartläggningarna av satellitens sensoregenskaper och banans egenskaper (se kapitel 3.1.2 respektive 4.1.4) även bidragit till att bygga upp den satellitdatabas som används i andra sammanhang inom FoT-projektet.

1.2 Avgränsningar

Studien är begränsad till satelliter som används för avbildning av jordytan, så kallade jordobservationssatelliter. Det finns andra typer av satelliter av militärt intresse och för vilka det är relevant att genomföra överflygningsanalyser, som exempelvis signalspanande satelliter. Dessa analyseras emellertid inte i denna studie.

Vidare utgår analyserna endast från huruvida en överflygning sker eller inte, inte under hur lång tid ett område kan avbildas vid en passage. Inte heller informationskvaliteten, så som sensorupplösning och betraktningsvinklar (se kapitel 2.3.2), på eventuella observationer har beaktas. Detta är givetvis en viktig aspekt, men ligger utanför syftet med denna studie.

Vissa sensorer kan också ha en gräns på hur lång tid de kan användas under ett banvarv, vilket oftast är fallet för Syntetisk aperturradar (SAR). Sådana begränsningar har inte tagits med i analyserna, utan fokus ligger istället på antalet möjligheter att avbilda ett område.

I studien analyseras satelliter och konstellationer från två av de största rymdaktörerna, Ryssland och Kina, men också kommersiella satelliter. Amerikanska och NATO-jordobservationssatelliter har utelämnats då studien baseras på öppet data vilken inte inkluderar dessa (se kapitel 3.1.1).

1.3 Disposition

Rapporten inleds med ett bakgrundskapitel (kapitel 2) som beskriver egenskaper i satelliters banor och sensorer som är relevanta för resten av rapporten. Därefter (kapitel 3) beskrivs överflygningsanalys och den metod som använts för att genomföra den. Resultaten sammanfattas, jämförs och diskuteras sedan i ett resultatkapitel (kapitel 4). Slutsatser från resultaten summeras slutligen i ett eget kapitel (kapitel 5).

2 Satellitbanor och sensorer

I detta kapitel introduceras grundläggande begrepp kring satelliter och satellitsensorer. Rapporten kan läsas utan förkunskaper om banelement eller rymdteknik. För en mer utförlig beskrivning av satellitbanors egenskaper, och en översikt av rymdsystem i allmänhet hänvisas till tidigare FOI-rapporter¹ samt Lärobok i Militärteknik².

2.1 Satellitbanor

Satelliter används idag inom ett stort antal tillämpningsområden. Några av alla tillämpningar är:

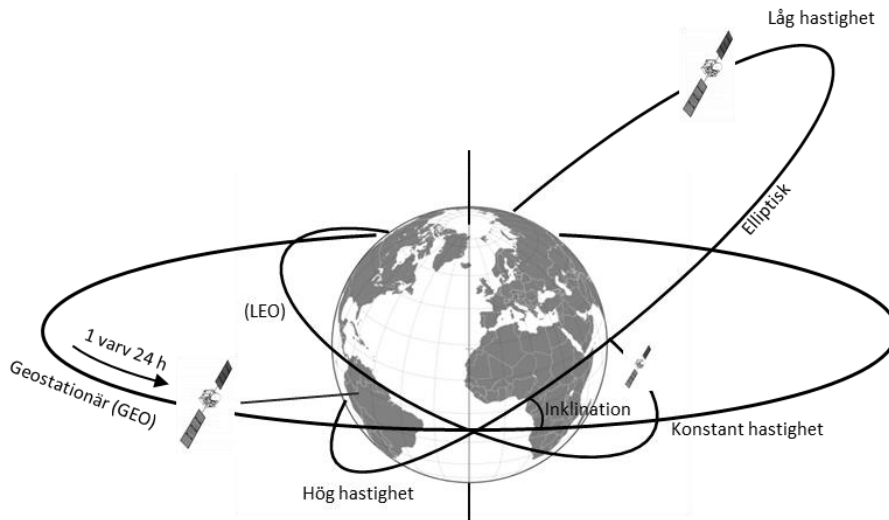
- Kommunikation (telefoni, TV, internet, data, osv.)
- Navigering och positionering
- Forskning (astronomi, klimatforskning, atmosfärsforskning, rymdväder, osv.)
- Säkerhet (övervakning av naturkatastrofer, oljeutsläpp, föroreningar, flyktingströmmar, osv.)
- Väder samt observation av jorden (mark, hav, atmosfär, osv.)

Den sista punkten brukar inom civila tillämpningar benämnas fjärranalys och i militära sammanhang spaning. En mer neutral beteckning är jordobservation.

Satellitbanan väljs utifrån tillämpningsområde. Avbildande jordobservations-satelliter ligger framförallt i låga banor, eller *Low Earth Orbit* (LEO) på engelska med en höjd på mellan ca 200 – 2000 km över marken. Allmänt gäller att vid lägre banhöjder har satelliter en högre hastighet, en kortare omloppssträcka och därmed en kortare omloppstid. I LEO är hastigheten för en satellit typiskt över 25000 km/h och omloppstiden mellan 90 och 120 minuter.

¹ U. Ekblad, "Elementa om rymdteknik (FOI-R--1594--SE)", FOI, Stockholm, 2005.

² S. Grahn och K. Pålsson, Lärobok i Militärteknik, vol. 7: Rymdteknik, Försvarshögskolan, 2007.



Figur 1. Schematisk bild över olika typer av satellitbanor. Vid låga höjder är satellitens hastighet hög. Vid höga höjder är hastigheten lägre.

Förutom höjden på satellitbanan anges även banans lutning relativt ekvatorsplanet. Denna lutning, eller vinkel, benämns inklination (se Figur 1) och definieras som 0 grader om satelliten rör sig parallellt med ekvatorn (ekvatoriell bana) och 90 grader om den rör sig över polerna (polär bana).

Satelliter placeras ibland ut i konstellationer, det vill säga att satelliternas banor samordnas på ett sådant sätt så att satelliternas funktioner synkroniseras. Exempelvis kan syftet med en konstellation vara att maximera global täckning. Konstellationer kan bestå av flera olika typer av satelliter med olika egenskaper och banor. Ett exempel på konstellationer med syfte att täcka in hela jordytan är GPS-konstellationen som består av ett trettioital satelliter i olika banor.

2.2 Marknadstrender inom jordobservation

Under de senaste decennierna har mängden civila jordobservationssatelliter ökat kraftigt och det finns idag en mängd aktörer som erbjuder satellitbilder av jordytan med varierande kvalitet. Huvuddelen av leverantörerna har idag endast enstaka satelliter till sitt förfogande vilket medför att ledtiden, fördröjning mellan när beställningen läggs till när bilden levereras, kan bli lång. Trenden är dock att detta håller på att förändras i och med att fler företag skickar upp allt fler satelliter. Företaget *Planet Labs* planerar exempelvis att skicka upp en konstellation med över hundra satelliter som kontinuerligt ska avbilda jordytan med en upplösning av 3 - 5 meter, vilket ger möjlighet till mycket högre uppdateringsfrekvens av ett område. Det kommer förmodligen ske en ökad

konkurrens inom området med fler aktörer och ett ökat utbud av tjänster. Inte bara vad det gäller bilder inom det visuella området utan även andra frekvensband. Detta kommer med säkerhet påverka både den civila och militära sektorn då flera av de civila kommersiella jordobservationssystemen även har militära kunder, inklusive den svenska Försvarsmakten.

2.3 Sensorer

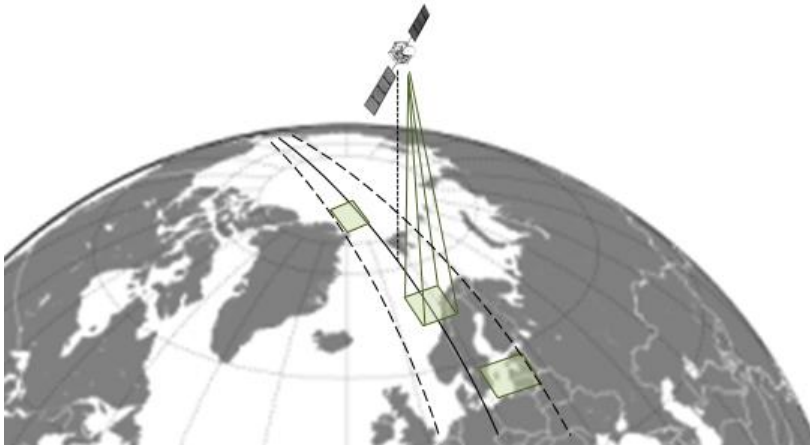
Satelliter är utrustade med olika typer av sensorer. Dessa kan ha många olika funktioner, som mätning av ett tillstånd i satelliten eller en yttre egenskap i satellitens miljö. Av intresse i den här rapporten är avbildande sensorer, som används för jordobservation.

Sensorer för jordobservation kan delas upp i två kategorier. Optiska satelliter använder sig av, som namnet antyder, fotografisk utrustning för att ta bilder av jordytan. Fram till 1980-talet var det vanligt att lagra bilder på film som sedan sköts ned tillbaka till jorden i kapslar. Syntetisk aperturradar (SAR) är istället en elektronisk avbildningsmetod som med hjälp av radarsignaler tar bilder av jordytan. Metoden är till stor del väder- och ljusoberoende. SAR-satelliter har blivit vanligare från och med 2000-talet, och det finns även ett antal kommersiella satelliter i bana. SAR-satelliter har å andra sidan större energikrav än optiska satelliter, är fysiskt större och kan kräva mer avancerad bildtolkning.

2.3.1 Stråkbredd

Med bildstorlek, eller *stråkbredd* (*swath width* på engelska), menas storleken på det markområde en satellit kan observera ”i en registrerad bild”. Ofta anges bildstorleken som bredden på bilden vinkelrätt mot satellitens markspår gånger längden på stråket (se Figur 2). Vissa SAR- och optiska satelliter har möjlighet att observera långa stråk under en och samma passage över ett område, vilket medfört att man ofta använder begreppet stråkbredd snarare än bildstorlek.

Stråkbredden för en given satellit beror på sensorns egenskaper, satellitens banhöjd och även betraktningvinkeln (se Figur 2 nedan).



Figur 2. Markspåret (heldragen linje) är projiceringen av satellitens bana på marken. Stråkbredden, eller bildstorleken, (rutor i figuren) anger storleken på en enskild bild eller bildstråk. Möjlig betraktningssvinkel (streckad linje) anger storleken på området på vardera sidan om markspåret som satelliten kan observera.

2.3.2 Betraktningssvinkel

Förutom stråkbredden är det också av intresse att beakta satellitens möjliga synfält, eller *betraktningssvinkel* (*field of regard* på engelska). Ofta kan jordobservationssatelliter eller sensorn vinklas i sidled, framåt eller bakåt och göra observationer inom ett visst avstånd från satellitens markspår (se Figur 2). Detta område definierar betraktningssvinkeln och kan anges antingen som en vinkel (grader) eller ett relaterat avstånd längs marken (kilometer). I denna rapport anges betraktningssvinkeln konsekvent som en vinkel.

SAR-antennerna avbildar av tekniska skäl inte ett område rakt nedanför, vilket gör att sensormarkspåret är förskjutet åt ena sidan.³ SAR-satelliter kan dock ofta avbilda antingen till höger eller till vänster om banans riktning genom att hela satelliten roteras.^{4,5,6} Sammanlagd betraktningssvinkel för en SAR-satellit liknar alltså den för motsvarande optisk sensor. En SAR-antenn har ofta flera lägen som

³ A. Gustavsson, T. Johansson, V. Jungnell, M. Nylund och T. Sjögren, *Rymdbaserad radaravbildning*, FOI-R--4201--SE, FOI, Linköping, 2015.

⁴ EO Portal, "EO Portal - Radarsat-2", <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/r/radarsat-2>. [Använd 2016-06-08].

⁵ EO Portal, "EO Portal - TSX (TerraSAR-X)", <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/terrasar-x>. [Använd 2016-06-08].

⁶ EO Portal, "EO Portal - COSMO-SkyMed", <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cosmo-skymed>. [Använd 2016-06-08].

motsvarar olika betraktningssvinklar och upplösning. I regel gäller att lägen med högre upplösning ger mindre betraktningssvinkel, oberoende av höjd.

2.3.3 Klimat och väderbegränsningar

Optisk spaning är beroende av ljus och klart väder. Spaning i det visuella optiska området kan alltså bara ske dagtid utan hindrande moln. Viss typ av optisk spaning i det termiskt infraröda (IR) området, det vill säga registrering av värmekällor, kan genomföras både dag- och nattetid förutsatt att sensorerna är tillräckligt känsliga.

På höga latituder blir det under vintertid få ljusa timmar per dygn vilket kan kraftigt begränsa eller till och med omöjliggöra optisk spaning från satelliter.

Vissa områden, som tropiska regnskogar och regioner med längre regn- och monsunperioder, är ofta täckta av moln och observationstillfällena kan under vissa perioder vara mycket begränsade och oförutsägbara.

Till skillnad från optiska spaningssatelliter erbjuder radarspaningssatelliter avbildning av marken under alla väder- och ljusförhållanden. Detta eftersom radarspaningen inte är beroende av extern belysning (strålkällan som belyser spaningsobjektet finns på satelliten). Det finns därmed förutsättningar för att observera samma plats på jorden dubbelt så ofta som för motsvarande optiska satellitsystem. Radarsignalerna hindras inte heller av normal molnbildning varför radarspaning kan anses vara väderoberoende.

3 Överflygningsanalys

Överflygningsanalys är samlingsnamnet för en rad olika frågeställningar relaterade till när satelliter passerar över ett område eller över en plats på jorden. Som nämndes i inledningen kan en överflygningsanalys syfta till att bestämma en satellits exakta tidpunkter för passage över en specifik plats på jorden. En sådan överflygningsanalys kan exempelvis utgöra beslutsunderlag vid planläggning av känslig verksamhet eller vid operativ planering.

Arbetet som ligger till grund för den här rapporten syftar emellertid inte till att bestämma exakta satellitpassager. Istället är avsikten att undersöka hur ofta en eller flera satelliter i snitt kan förväntas passerar över ett visst område och hur detta beror på olika förutsättningar, så som val av satellitbana, plats på jorden, satellitens egenskaper eller antal satelliter. Denna typ av överflygningsanalys ger en mer allmän uppfattning om överflygningskapacitet för ett satellitsystem och ökar förhoppningsvis förståelsen för hur olika parametrar påverkar denna kapacitet. Sådan kunskap kan i sin tur utgöra ingångsvärden för långsiktig planering och studieverksamhet.

3.1 Överflygningsfrekvens

En nyckelparameter vid överflygningsanalys är den så kallade överflygningsfrekvensen, som definieras som det genomsnittliga antalet möjliga observationer av en viss plats per dygn. Eftersom överflygningsfrekvensen är ett genomsnitt räknat över en längre tid, behöver den inte vara ett heltal. Till exempel innebär en överflygningsfrekvens på 0,25 överflygningar per dygn att satelliten i snitt passerar över ett område var fjärde dygn.

3.1.1 Simuleringsmetodik

För att undersöka hur överflygningsfrekvensen varierar med olika parametrar har satelliter och dess satellitbanor modellerats med hjälp av en kommersiell programvara, *AGI Systems Toolkit* (STK). I programvaran kan både aktuella och fiktiva satellitbanor propageras efter vissa banparametrar och förutsättningar. För aktuella satelliter används banparametrar som levereras i dataformatet *Two-line element*⁷ (TLE). Med hjälp av dessa kan en satellits position propageras framåt i tiden och på så sätt ge en komplett bild av satellitens bana under en period. Med propagering menas alltså att satellitens position kan beräknas en tid i förväg.

⁷ National Aeronautics and Space Administration (NASA), *Definition of Two-line Element Set Coordinate System*, 2011-09-23:
http://spaceflight.nasa.gov/realdata/sightings/SSApplications/Post/JavaSSOP/SSOP_Help/tle_def.tml. [Använd 2016-06-21].

TLE är baserat på inmätt data. I denna studie används TLE från en öppen och fritt tillgänglig databas, *Space Track*⁸, som tillhandahålls av amerikanska försvarsmakten.

3.1.2 Typisk betraktningssvinkel

Eftersom överflygningsfrekvensen definieras som möjliga observationstillfällen kommer satellitsensors egenskaper påverka resultatet av överflygningsanalysen. Detta gäller speciellt betraktningssvinkeln (se kapitel 2.3.2 ovan) som kommer att avgöra huruvida satelliten kan se en viss plats vid en passage. Det är med andra ord avgörande för resultatet av överflygningsanalysen vilka sensoregenskaper man utgår från.

Notera att själva avbildningsområdet, stråkbredden enligt Figur 2, ofta är betydligt mindre än betraktningssvinkeln. I verkligheten betyder alltså inte en överflygning av ett område baserad på sensors betraktningssvinkel att hela området kan avbildas, utan endast en liten del av området. Operatören kan dock generellt välja att avbilda vilken stråkbredd som helst inom sensors betraktningssvinkel vid passage.

För att få representativa värden på överflygningsfrekvensen i STK-simuleringarna genomfördes en kartläggning av jordobservationssatelliter med syfte att bestämma en typisk betraktningssvinkel för optiska- respektive SAR-sensorer. Resultatet från den kartläggningen användes sedan genomgående för samtliga överflygningsanalyser. Kartläggningen baserades på ett trettiotal jordobservationssatelliter vars uppgifter till stora delar hämtades från *World Meteorological Organization (WMO)*.⁹

Optiska sensorer

För optiska sensorer visade kartläggningen att en genomsnittlig optisk sensor har en betraktningssvinkel på cirka 35 grader åt vardera hållet, alltså totalt 70 grader (se Figur 3, vänstra bilden).

SAR-sensorer

På grund av att SAR-satelliter inte avbildar ett område rakt nedanför satelliten, förskjuts det avbildade området till höger respektive vänster om satelliten. Enligt kartläggningen av det mest högupplösta sensorläget för olika SAR-sensorer avbildas ett område som ligger utvinklat mellan cirka 16 och 53 grader på vardera sidan av markspåret. Sammanlagt är betraktningssvinkeln alltså 74 grader fördelat på båda sidor om satelliten (Figur 3, högra bilden). Betraktningssvinklar för de två sensortyperna är alltså snarlika, men eftersom området som avbildas av

⁸ Joint Space Operations Center, Space-track.org, <https://www.space-track.org/>. [Använd 2016-06-07].

⁹ WMO Oscar, World Meteorological Organization, <https://www.wmo-sat.info/oscar/> [Använd 2016-11-08]

SAR-satelliternas sensorer är förskjutet i sidled blir området som täcks av den möjliga betraktningens vinkel cirka 1,6 gånger större än för en optisk sensor.



Figur 3. Illustration av betraktningens vinklar för typiska sensorer. Till vänster: optisk sensor med en betraktningens vinkel på 70 grader. Till höger: SAR-sensor som kan avbilda åt antingen höger eller vänster om satelliten och med en sammantagen betraktningens vinkel på 74 grader.

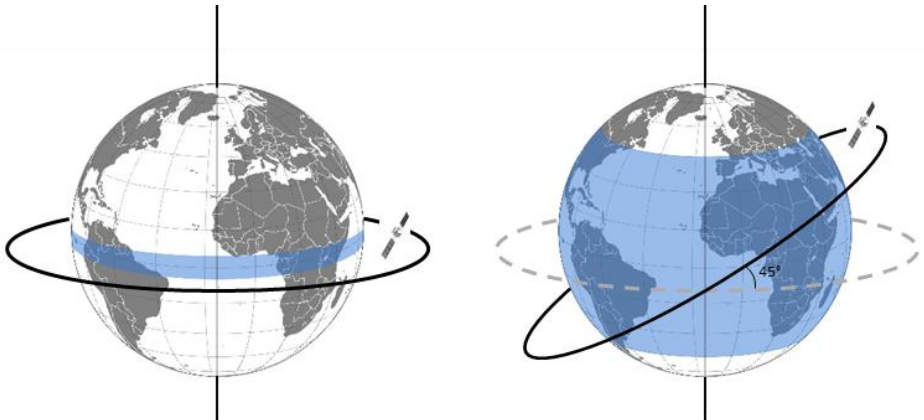
4 Resultat

I detta kapitel presenteras några av resultaten från de överflygningsanalyser som genomförts. Dels för enstaka, och konstellationer av, typiska modellerade satelliter, och dels för några utvalda existerande ryska, kinesiska och kommersiella satellitkonstellationer. Slutligen presenteras resultatet av simuleringar från en möjlig framtida konstellation av optiska spaningsatelliter.

4.1 En ensam satellit

Det enklaste typfallet att studera i överflygningssammanhang är en ensam jordobservationssatellit med betraktningssvinklar enligt kapitel 3.1.2 ovan. Som beskrevs i kapitel 2.1 kan man välja att lägga en satellit i en av flera olika typer av banor. Valet av bana kommer i sin tur påverka både överflygningsfrekvensen och om satelliten över huvud taget kan observera ett visst område på jorden.

4.1.1 Betydelsen av inklinations



Figur 4. Täckningsgraden (blå) för satelliter i satellitbanor med varierande baninklination. *Vänster:* Satellit i en låg jordbana, LEO, rakt över ekvatorn (inklination = 0 grader). *Höger:* Satellit i en låg jordbana, LEO, med en inklinations = 45 grader.

Om en satellit placeras i en låg jordbana, LEO, rakt ovanför ekvatorn kommer den endast kunna observera platser i ett smalt band runt ekvatorn som motsvarar betraktningssvinkelns storlek (se Figur 4, vänstra bilden). Vid varje banvarv ges en möjlighet för observation, det vill säga att det sker en överflygning. Som visades i kapitel 2.1 är omloppstiden för en satellit i LEO mellan ca 90 och 120

minuter. Under ett dygn kommer således satelliten kunna observera samma område längs ekvatorn mellan 12 och 16 gånger.¹⁰

Om man istället placerar satelliten i en bana med en inklinations, det vill säga en lutning mot ekvatorn, (se kapitel 2.1) så kommer satelliten efter en tid passera över alla platser på jorden upp och ner till motsvarande latitud.¹¹ Med en typisk omloppstid på 90 minuter kommer jorden hunnit rotera motsvarande en sextondels varv eller 22,5 grader under satellitens omloppstid. Satelliten passerar därför över ett nytt område på jorden vid varje varv och kommer med tiden täcka in alla platser därunder (se Figur 4, högra bilden). Däremot kommer den aldrig passera över områden på en högre¹² latitud än banans inklinations. Dessutom kommer den passera över en given punkt vid ekvatorn mer sällan än satelliten i exemplet ovan med inklinations 0 grader.

För att säkerställa att en satellit, förr eller senare, kan observera de flesta platser på jorden placeras de som regel i polära banor med en inklinations i närheten av 90 grader. I praktiken är det dessutom så att nästan alla jordobservationssatelliter har en inklinations runt ca 95,7 grader. Detta gör att banan är anpassad till solens position och ljusförhållanden efter sensorns och satellitens krav. Även satellitens banhöjd måste väljas så att omloppstiden blir den rätta för att uppnå denna effekt. En sådan bana kallas *solsynkron* då den är synkroniserad mot solen.

Sammanfattningsvis avgör satellitbanans inklinations vilka platser på jorden en satellit över huvud taget kan observera men också hur ofta den passerar över ett visst område, det vill säga överflygningsfrekvensen. En satellit i polär bana (exempelvis en solsynkron satellit) kommer förr eller senare kunna observera nästan alla områden på jorden. Den kommer emellertid passera områden på höga latituder mer frekvent än områden vid låga latituder. Vilken latitud området befinner sig på jorden påverkar alltså också överflygningsfrekvensen.

4.1.2 Latitudberoende

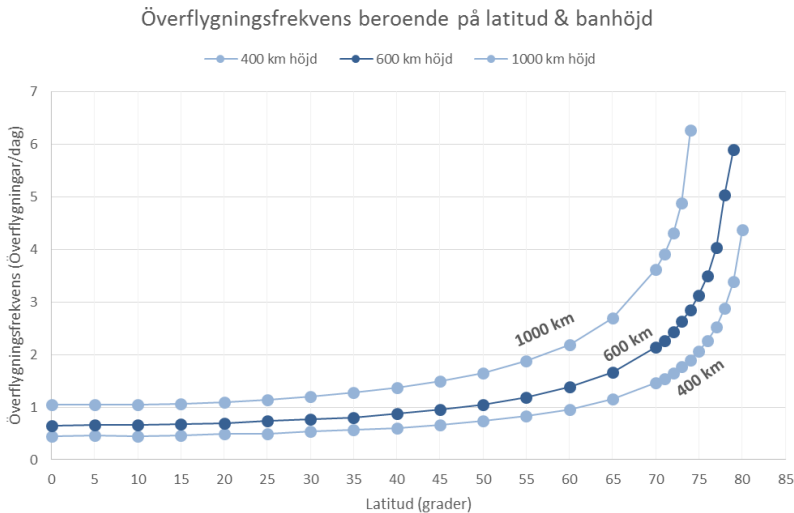
I Figur 5 (mellersta kurvan) visas överflygningsfrekvensen som funktion av latituden för en typisk satellit i solsynkron bana med betraktningssvinkel enligt kapitel 3.1.2. Resultatet av STK-analysen visar hur överflygningsfrekvensen ökar från knappt en överflygning per dygn vid låga latituder (ekvatorn) till nästan det

¹⁰ Beroende på om satelliten färdas i samma eller motsatt riktning som jordens rotation kommer överflygningsfrekvensen variera något.

¹¹ Plus/minus eventuellt lite till beroende på betraktningssvinkel.

¹² Det vill säga ju högre latitud, desto längre bort från ekvatorn befinner man sig. Samma förhållande gäller alltså på södra halvklotet.

dubbla vid latituder motsvarande Sverige (cirka 55 - 70 grader).
Överflygningsfrekvensen ökar sedan snabbare vid ännu högre latituder.¹³



Figur 5. Överflygningsfrekvensen som funktion av latitud för satelliter i polära banor på tre olika höjder: 400 km, 600 km och 1000 km.

4.1.3 Höjdberoende

En parameter som ännu inte diskuterats men som nämnts vid flera tillfällen ovan, och som påverkar överflygningsfrekvensen, är satellitens banhöjd. En optisk sensors projektion på marken, med andra ord storleken på det området som kan avbildas, ökar med satellitens höjd. Samtidigt som projektionen blir större minskar emellertid satellitens hastighet med höjden (se Figur 1), vilket betyder att omloppstiden ökar.¹⁴ Omloppstiden ökar emellertid långsammare än ökningen av sensors projektion. Det sammantagna resultatet blir därför att överflygningsfrekvensen ökar när satelliten placeras i en högre bana. Exempelvis kommer en satellit med en banhöjd på 1000 km kunna observera en plats i Sverige dubbelt så ofta som motsvarande satellit på 400 km. I ett verkligt fall kommer emellertid en optisk spaningssatellit få sämre upplösning om den placeras på ett större avstånd. Man måste därför göra ett avvägande mellan återkomstfrekvens och bildupplösning. Samtidigt kan en satellit på högre höjd

¹³ I exemplet som presenteras i Figur 5 räknades också överflygningar natttid för att bättre kunna urskilja påverkan av områdets latitud.

¹⁴ Den intresserade läsaren hänvisas till en allmän lärobok om fysik och de så kallade Keplers lagar.

men med samma optik avbilda ett större område, också med avkall på bildupplösningen.

4.1.4 Typisk banhöjd

På samma sätt som för sensoregenskaperna ovan genomfördes en kartläggning av typisk banhöjd för jordobservationssatelliter. I kartläggningen används samtliga verkliga och aktiva jordobservationssatelliter med öppet TLE-data, både militära, civila och kommersiella, och som har en av tillverkaren eller operatören angiven sensorupplösning på minst tio meter. Resultatet av kartläggningen visar att den genomsnittliga höjden för en jordobservationssatellit, oavsett typ av sensor (optisk eller SAR), är cirka 600 km, vilket är den höjd som använts vid samtliga simuleringar för både optiska och SAR-satelliter om inget annat anges. På så sätt är resultaten av dessa överflygningsanalyser inte höjdberoende, och skillnader mellan sensortyperna blir tydligare.

4.2 Flera satelliter i konstellation

Som nämnts tidigare placeras satelliter ibland ut i konstellationer, det vill säga att satelliternas banor samordnas på ett sådant sätt så att satelliternas funktioner synkroniseras. Exempelvis kan syftet med en konstellation vara att maximera global täckning. Konstellationer kan bestå av flera olika typer av satelliter med olika egenskaper och banor. Ett exempel på konstellationer med syfte att täcka in hela jordytan är GPS-konstellationen som består av ett trettiotal satelliter i olika banor.

4.2.1 Konstellationsstorlek

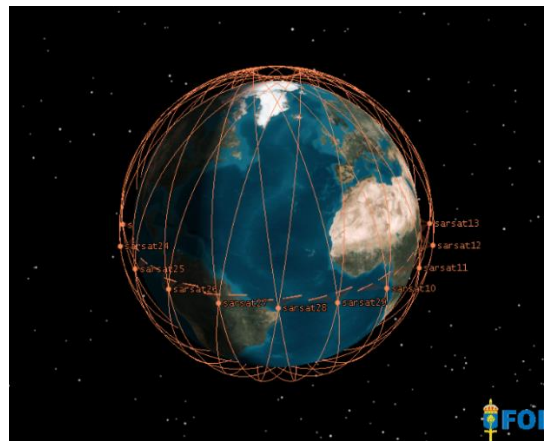
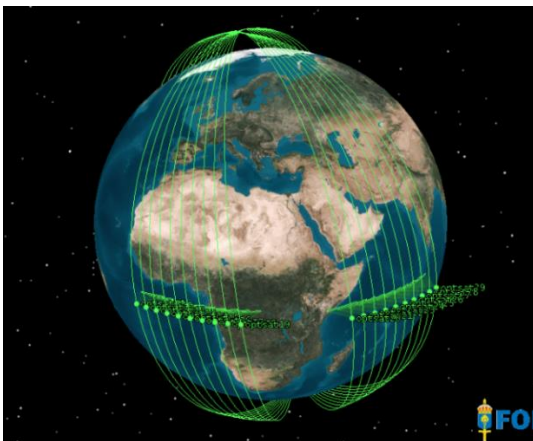
Antalet satelliter påverkar givetvis överflygningsfrekvensen, eftersom fler satelliter ger möjlighet till tätare passager. För att undersöka överflygningsfrekvensen för satellitkonstellationer valdes En latitud motsvarande Stockholm. Optiska och SAR-konstellationer analyserades i STK var för sig och konstellationernas storlekar varierades från en till 20 satelliter. Den övre gränsen baserades på en rimlig konstellationsstorlek inom närmaste framtiden.¹⁵ Eventuella simultana överflygningar med två eller fler satelliter över området samtidigt räknades för det här syftet som en enda överflygning, för att utreda i vilken utsträckning simultana överflygningar kan ske för stora konstellationer.

¹⁵Företaget Urthecast planerar till exempel för att konstruera en jordobservationskonstellation bestående av 16 optiska och SAR-satelliter, Urthecast.”Urthecast – The OptiSAR constellation”, <https://www.urthecast.com/constellation>. [Använd 2016-08-24].

Av de aktiva satelliterna ligger cirka 90 procent i banor som är optimala ur belysningssynpunkt, antingen i solljus (för optiska satelliter) eller på så sätt att själva satelliten får kontinuerlig belysning på sina solpaneler (för SAR-satelliter). Detta motsvarar att satelliten passerar ekvatorn mellan 9:30 - 14:30 lokal tid för optiska satelliter, eller cirka 18:00 alternativt 06:00 för SAR-satelliter. För de optiska satelliterna som undersökts i kartläggningen (se kapitel 4.1.4) undviks i allmänhet timmarna runt middag för passager över ekvatorn, när solen ligger rakt ovanför området. En förklaring till detta är att det då bildas mindre skuggor än annars, vilket gör inmätning av avstånd och storleksförhållanden svårare. Satelliter i optiska konstellationer placerades därför ut jämnt för passager över ekvatorn under förmiddagen och eftermiddagen.

Att placera en satellit i dessa banor gör också att satelliten efter en tid återvänder till samma område vid samma ljusförhållande. En fördel med detta är att satellitägaren kan skapa en tidsserie över avbildningsområdet och analysera förändringar i området.

Varje satellit gavs sedan en genomsnittlig betraktningsvinkel enligt kartläggningen ovan. Figur 6 visar en optisk konstellation och en SAR-konstellation med 20 satelliter vardera.



Figur 6. Konstellationer bestående av 20 typiska satelliter. Till vänster: optisk konstellation. Till höger: SAR-konstellation. Satellitbanorna i de optiska konstellationerna fördelades enligt ljusförhållanden, medan banorna i SAR-konstellationerna fördelades fritt över jorden.

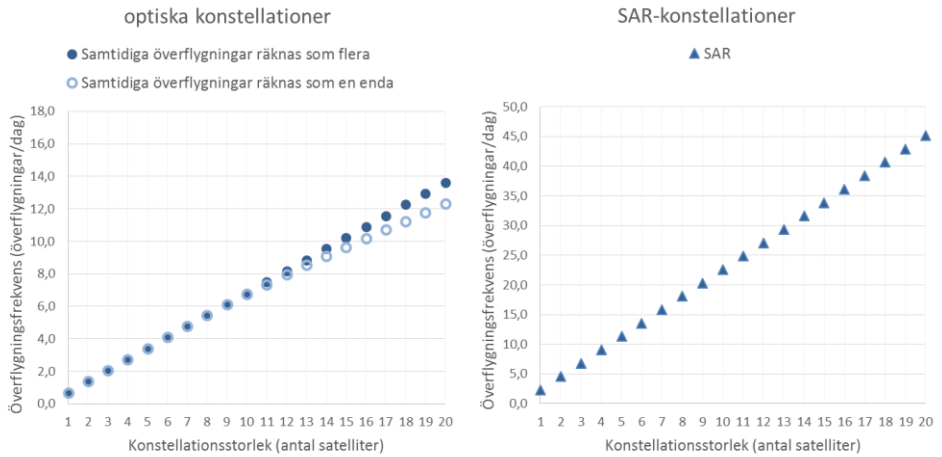
SAR-satelliter antogs inte ha någon begränsning med avseende på solens position relativt satelliten (i verkligheten kan dock en sådan satellits bana begränsas av sensorns energikrav, som i sin tur ställer krav på hur ofta satellitens solpaneler måste belysas och därmed val av bana). SAR-satelliternas banor i en konstellation fördelades därför fritt längs ekvatorn, från 0 till 360 grader. SAR-

konstellationen anordnades parvis, det vill säga att vid ökning av konstellationens storlek speglades föregående satellits bana 180 grader och så vidare. Förutom banparametrarna begränsades optiska sensorer på så sätt att endast överflygningar under dagsljus räknades. Även om en överflygning skedde, räknades den inte ifall den skedde nattetid.

4.2.2 Överflygningsfrekvens för konstellationer

Figur 7 visar överflygningsfrekvenserna för optiska respektive SAR-satelliter som funktion av konstellationsstorlek. Det är tydligt att överflygningsfrekvensen genomgående är drygt tre gånger högre för SAR-konstellationer. Exempelvis kan en SAR-konstellation med 20 satelliter avbilda ett område cirka 45 gånger per dygn. Motsvarande siffra för en optisk konstellation på 20 satelliter är cirka 13 överflygningar per dygn. Anledningen till att SAR-konstellationer förefaller så pass mycket effektivare är att SAR-satelliter inte är beroende av ljusförhållandena, och att de möjliga betraktningvinklarna är något större och förskjutna i sidled.

För optiska satellitkonstellationer definierade enligt ovan kan man också notera att ökningen i överflygningsfrekvens avtar något för konstellationer med fler än tio satelliter. Detta beror på att vissa överflygningar sker simultant, det vill säga att två eller fler satelliter i konstellationen passerar, och kan avbilda området samtidigt. Som nämnts i metodkapitlet räknas detta då som en enda överflygning. Det uppstår med andra ord en "mättnadseffekt" efter tio satelliter, och den optiska konstellationen kan sägas bli mindre effektiv. Denna utveckling sker inte för SAR-konstellationer med de konstellationsstorlekarna som simulerats. Detta beror på att satelliterna i SAR-konstellationerna är mer spridda över jorden, eftersom banornas utformning inte begränsas av lokala ljusförhållanden. Simultana överflygningar skulle ske även för SAR-konstellationer om de blir tillräckligt stora. Denna gräns har dock inte undersökts i analyserna. Det är värt att notera att även om flera överlappande överflygningar inte ökar överflygningsfrekvensen så kan givetvis informationskvaliteten öka med flera simultana överflygningar.



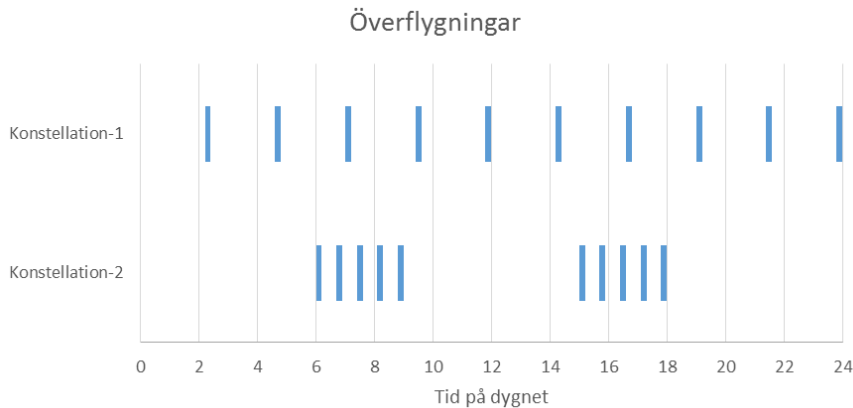
Figur 7. Överflygningsfrekvens som funktion av konstellationens storlek, för typiska satelliter (optisk eller SAR). Efter 10 satelliter i den optiska konstellationen uppstår en "mättnadseffekt". Notera skillnaden i skala på y-axeln.

4.2.3 Återkomsttid

I analysen som presenteras ovan finns det anledning att vara försiktig när man tolkar resultaten. Som noterades skiljer sig typiska optiska- och SAR-konstellationer åt vad gäller hur man sprider ut satelliterna i sina banor. Även om antalet överflygningar (överflygningsfrekvensen) för två olika konstellationer är densamma är inte nödvändigtvis överflygningarna jämt utspridda över dygnet. Detta kan även gälla två olika konstellationer. Ett begrepp som kan användas för att beskriva denna skillnad är återkomsttid (*revisit time* på engelska), vilket beskriver tiden mellan efterföljande överflygningar. För satellitkonstellationer med många jämnt utspridda satelliter, exempelvis SAR-konstellationerna som analyserades ovan, kommer återkomsttiden vara ungefär inversen av överflygningsfrekvensen, det vill säga en överflygningsfrekvens på 24 överflygningar per dygn motsvarar en återkomsttid på en 24-dels dygn eller ungefär en passage varje timme.

För en enskild satellit, eller i fallet med de optiska konstellationerna ovan, kommer återkomsttiden inte vara regelbunden även om överflygningsfrekvensen är densamma. I stället kommer det typiskt flera täta överflygningar efter varandra följt av längre perioder utan överflygningar. Ett exempel på detta är de två tyska SAR-satelliterna TanDEM-X och TerraSAR-X som formationsflyger på så sätt att den ena passerar kort efter den andra för att ta bilder av ett område med en liten tidsfördröjning.

I figur 8 illustreras schematiskt hur återkomsttiden kan variera för två olika möjliga konstellationer med *samma* överflygningsfrekvens men där man valt att i det ena fallet sprida ut överflygningarna och i det andra att koncentrera dem till ett par tillfällen.



Figur 8. Schematisk bild som visar tidpunkt för överflygningar för två olika möjliga konstellationer. I båda fallen är överflygningsfrekvensen 10 överflygningar per dygn. För konstellation-1 är återkomsttiden jämnt utspridd över dygnet och cirka en timme. För konstellation-2 är återkomsttiden mycket kort under gryning och skymning för att däremellan ha långa perioder utan några överflygningar.

4.3 Exempel på riktiga satellitkonstellationer

I följande kapitel redovisas resultaten av överflygningsanalyserna med verkliga satelliter och konstellationer: ryska och kinesiska satelliter (civila och militära), samt vissa kommersiella satelliter. Slutligen diskuteras fallet med en framtida rysk konstellation.

4.3.1 Ryska militära och civila satelliter

Militära

Den ryska militära satellitflottan bedöms i dagsläget bestå av både optiska och SAR-satelliter. Två optiska satelliter av typen Persona¹⁶ och två optiska kartografi-satelliter av typen Bars-M¹⁷ befinner sig i bana. Utöver detta har Ryssland tillgång till två SAR-satelliter av typen Kondor. En

¹⁶ A. Zak, *Russian Space Web - Persona*, [Online]: <http://www.russianspaceweb.com/persona.html>. [Använd 2016-06-08].

¹⁷ Spaceflight 101, *Bars-M Satellite Overview*, [Online]: <http://spaceflight101.com/spacecraft/bars-m/>. [Använd 2016-06-08].

överflygningsanalys över ett område i Sverige visar att hela konstellationen med fyra ryska militära optiska satelliter (Bars-M och Persona) har en överflygningsfrekvens på cirka fem överflygningar per dygn, och de båda SAR-satelliterna har tillsammans cirka fyra överflygningar per dygn. Detta betyder att ryska militära satelliter i snitt kan avbilda ett område i Sverige totalt nio gånger per dygn. Att de ryska optiska satelliternas sammanlagda överflygningsfrekvens skiljer sig från typsatelliternas i den optiska konstellationen (se kapitel 4.2.1), beror på att två av de ryska satelliterna ligger på högre höjd (cirka 750 km), och att de ryska sensorerna har större möjlig betraktningssvinkel än de typiska värden som användes för de optiska sensorerna i de tidigare analyserna. Detta ger alltså upphov till ett annat resultat.

Civila

Dagens ryska civila satelliter ägs och drivs av det statliga rymdbolaget Roskosmos. I dagsläget finns endast optiska jordobservationssatelliter i den civila ryska satellitflottan. De avbildande satelliterna som identifierats är Resurs-P (tre stycken) och Kanopus-V (en satellit), alltså totalt fyra satelliter. Överflygningsfrekvensen över ett område i Sverige för ryska civila satelliter är cirka tre överflygningar per dygn. Sammanlagt med de militära satelliterna ger det en överflygningsfrekvens över ett område i Sverige på 12 överflygningar per dygn.

4.3.2 Kinesiska militära och civila satelliter

Militära

Kina bedöms ha 11 aktiva militära jordobservationssatelliter i bana, med fördelningen sju SAR och fyra optiska. Det är dock oklart om dessa siffror stämmer, eftersom uppgifterna om satelliternas funktionalitet och syfte är osäkra. Konstellationen bestående av fyra optiska kinesiska militära satelliter har en överflygningsfrekvens över ett område i Sverige på cirka två överflygningar per dygn. SAR-satelliterna har tillsammans en överflygningsfrekvens på cirka 15 överflygningar per dygn.

Civila

Det finns tio aktiva kinesiska civila avbildande satelliter i bana, samtliga optiska: Gaofen-serien, CBERS-4 (*China-Brazil Earth Resource Satellite*, samägs av Brasilien), Jilin-1, Ziyuan-102C och ZiYuan-3. Gaofen ägs och drivs av kinesiska rymdstyrelsen *China National Space Administration* (CNSA). CBERS-satelliterna är som namnet antyder ett samarbete mellan Brasilien och *Chinese Academy of Space Technology* (CAST), en avdelning av statligt ägda *China Aerospace Science and Technology Corporation* (CASC). ZiYuan-satelliterna

ägs och drivs av CNSA, och ZiYuan-102C bygger på tidigare CBERS-satelliter.¹⁸

De tio kinesiska civila satelliterna har sammanlagt en överflygningsfrekvens över ett område i Sverige på cirka sex överflygningar per dygn. Tillsammans med de militära satelliterna kan kinesiska satelliter avbilda ett område i Sverige 23 gånger per dygn.

4.3.3 Kommersiella satelliter

Ett trettio-tal kommersiella satelliter antas vara styrbara antingen direkt via satellitens ägare eller via en mellanhand. Åtta stycken är SAR-satelliter och resten är optiska. Dessa satelliter är i princip åtkomliga för alla aktörer och utgör ett komplement till nationella resurser. Tillgång till alla dessa tillsammans skulle ge en användare förmågan att avbilda ett område i Sverige i genomsnitt cirka 32 gånger per dygn.

En förutsättning för detta är dock att en användare har obegränsad tillgång till de kommersiella jordobservationssatelliterna. I verkligheten ägs satelliterna av flera oberoende operatörer. Ledtider, köer och politiska restriktioner kan också begränsa tillgången.

4.4 Några framtida konstellationer

Det är svårt att bedöma exakt hur en framtida rysk satellitflotta kommer att se ut, men grundat på en kombination av officiella pressreleaser och andra analyser, samt en rimlighetsbedömning, är följande satellitflotta möjlig runt 2020:

- Det militära kartografiprogrammet Bars-M fortsätter, och fyra satelliter är planerade att skjutas upp mellan 2018 och 2021 för att komplettera de två som finns i bana idag (som sköts upp 2015 respektive 2016)¹⁹. Bars-M har en planerad livstid på fem år, vilket gör att Ryssland 2020 kan ha fyra fungerande Bars-M-satelliter i bana.
- Det civila optiska programmet Resurs-P med idag tre satelliter (sköts upp 2013, 2014 och 2016) kompletteras med två satelliter, och ersätts på sikt av programmet Resurs-PM som antagligen också utgörs av totalt fem satelliter (hittills är två planerade, men dessa är redan försenade). Baserad på en uppskjutningstakt på två år mellan satelliterna och en

¹⁸ EO Portal, *EO Portal - ZY-1-02C*, [Online]; <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/zy-1-02c>. [Använd 2016-06-08].

¹⁹ A. Zak, *Russian Space Web - Bars-M: Russia's first digital cartographer*, Available: <http://www.russianspaceweb.com/bars-m.html>. [Använd 2016-06-08].

planerad livstid på fem år²⁰ antogs det att det kommer finnas tre aktiva Resurs-P-satelliter i bana runt 2020.

- Nästa generations militära optiska satelliter av typen Persona kommer ersätta de tre som finns i bana idag. Antagligen kommer en förmåga med tre satelliter vilja bibehållas, eftersom de två senaste (digitala) militära optiska satellitprogrammen haft tre satelliter²¹. Analysen utgick därför från tre aktiva satelliter i bana, som år 2020 kan vara en kombination av nuvarande Persona-satelliter och nästa generations satelliter.
- Kanopus-V-programmet^{22,23}, civila optiska satelliter för bland annat jordbruksplanering, kommer kompletteras till sex satelliter 2018 (den som finns i bana idag sköts upp 2012). Även denna typ har en planerad livstid på fem år (en rysk källa anger dock sju år²⁴). 2020 kan det alltså finnas fem aktiva Kanopus-V-satelliter i bana.
- Inget öppet data som kunnat hittas antyder en fortsättning på eller en uppföljare till militära SAR-programmet Kondor (som inkluderar Kondor-E som byggdes och sköts upp för Sydafrika 2014) i låg bana. Båda Kondor-satelliterna byggdes med en livstid på fem år, vilket ger ett slut på programmet senast 2019. Det ska finnas planer på att bygga en stor (48 meters-antenn) SAR-satellit som ska placeras i geostationär bana²⁵. Denna satellit utelämnades ur analysen, som endast berör satelliter i låg bana.

Sammanfattningsvis kan en rysk satellitflotta för jordobservation runt 2020 alltså bestå av 15 (sju militära och åtta civila) optiska satelliter och inga SAR-satelliter (i låg bana). Ett framtida ryskt scenario med 15 optiska satelliter ger en överflygningsfrekvens som är jämförbar med dagens sammanlagda ryska förmåga (civilt och militärt): 10 överflygningar per dygn år 2020 jämfört med totalt 12 överflygningar per dygn idag.

²⁰ A. Zak, *Russian Space Web - Resurs-P*, http://www.russianspaceweb.com/resurs_p.html. [Använd 2016-06-08].

²¹ A. Zak, *Russian Space Web - Araks*, <http://www.russianspaceweb.com/araks.html>. [Använd 2016-06-08].

²² EO Portal, "EO Portal - Kanopus-V", <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/k/kanopus-v-1#spacecraft>. [Använd 2016-06-08].

²³ A. Zak, "Russian Space Web - Kanopus", <http://www.russianspaceweb.com/kanopus.html>. [Använd 2016-06-08].

²⁴ State Research Center "Planeta", "Kanopus-V" satellite", <http://planet.iitp.ru/english/spacecraft/kanopus-v.htm>. [Använd 2016-06-08].

²⁵ A. Zak, "Russian Space Web - Russia builds giant satellite antenna", <http://www.russianspaceweb.com/ska.html>. [Använd 2016-06-08].

4.5 Sammanfattning

Generellt sker fler överflygningar med SAR-satelliter än optiska. Detta kan härledas till större frihet i val av bana och inga begränsningar med avseende på ljusförhållanden (vilket i sin tur är grunden till valet av bana), samt storleken på sensorns markprojektion. De ryska och kinesiska optiska (militära eller civila) satelliterna har ungefär samma överflygningsfrekvens, vilket förklaras av samma antal satelliter i respektive konstellation. Flest överflygningar per dygn görs av kommersiella satelliter. Det bör dock understrykas att dessa satelliter inte har en och samma ägare, en ägare kan ha allt från en till fem satelliter.

Det är oklart huruvida alla kinesiska militära satelliter är i funktion eller vilken typ av sensor dessa bär på, på grund av bristen på officiell information. Det är med andra ord möjligt att vissa av de sju SAR-satelliterna eller fyra optiska i bana inte längre fungerar eller har ett annat syfte.

USA:s satellitflotta analyserades inte i studien, på grund av bristen på officiell information gällande satelliterna och deras banor. Givet mer information om de amerikanska satelliterna hade en jämförelse mellan dessa och kinesiska respektive ryska satelliter kunnat göras.

I Tabell 1 visas en sammanställning av överflygningsfrekvenserna som presenterats ovan för ett område vid en latitud motsvarande Stockholm, både för enskilda satelliter och satellitkonstellationer.

	Överflygningsfrekvens	
	[antal/dygn]	
	Optiska	SAR
En satellit	0,6	2,3
Konstellation 5	3,5	11
Konstellation 10	7	23
Konstellation 20	13	45
Ryska militära	5	4
Ryska civila	3	-
Kinesiska militära	2	15
Kinesiska civila	6	-
Kommersiella	20	12
Ryssland 2020	10	-

Tabell 1. Överflygningsfrekvens för generella och aktuella scenarier. Optiska och SAR-satelliter är åtskilda i analyserna.

5 Slutsats

Överflygningsanalyserna som presenterats i den här rapporten ger en överblick över hur ofta en satellit har möjlighet att avbilda ett område. Detta är beroende av satellitens banegenskaper och sensoregenskaper. Överflygningsfrekvensen är högre för en typisk SAR-satellit jämfört med en optisk satellit, på grund av att SAR-sensorer inte begränsas av ljusförhållanden. Överflygningsfrekvensen ökar också betydligt med områdets latitud, i synnerhet långt från ekvatorn, och ökar också med satellitens banhöjd.

Analyser av flera satelliter illustrerar hur förmågan ökar med antalet satelliter i en konstellation. På grund av ljusberoendet hos optiska konstellationer sker denna ökning inte lika snabbt som för SAR-konstellationer. Detta då det efter ett visst antal satelliter i optiska konstellationer sker simultana överflygningar.

Både Ryssland, Kina, och kommersiella satellitägare kan avbilda ett område i Sverige flera gånger per dygn med både optiska och SAR-satelliter. I nuläget har Kina större förmåga än Ryssland, dock är det oklart vilka satelliter som faktiskt fortfarande är aktiva. Analyserna förutsätter att de civila, statliga satelliterna som ingår i överflygningsanalyserna för Kina och Ryssland även kan användas i militärt syfte. Tillgång till kommersiella satelliter ger en stor ökning i förmåga, och det är sannolikt att statliga aktörer använder sig av kommersiellt data för att komplettera sina egna resurser.

Överflygningsanalysen av en möjlig framtida rysk satellitflotta ger en överflygningsfrekvens på totalt 10 överflygningar per dygn. Detta givet att analysen av en framtida flotta stämmer. Det kan naturligtvis skjutas upp fler eller färre satelliter än analysen visar, och aktuella satelliters livstider kan också variera. Analyserna utgick också från antagandet att civila satelliter även används militärt, vilket är osäkert.

Sammanfattningsvis ger analyserna en uppfattning om hur ofta ett område i Sverige kan avbildas av en typisk jordobservationssatellit: mellan cirka en till två gånger per dygn, beroende på sensortyp. Detta bekräftar den allmänna uppfattningen om hur ofta en satellit kan passera ett område i Sverige. Det finns ett stort antal jordobservationssatelliter i bana idag. Man bör alltså ha i åtanke att ett flertal jordobservationssatelliter passerar över Sverige varje dygn.

Som en del av pågående FoT-projekt har en studie inom ämnet överflygningsanalys utförts. Överflygningsanalys är ett centralt ämne inom det större området rymdlägesbild. Huvudsyftet med överflygningsanalyserna i denna studie är att ge en uppfattning om hur ofta typiska jordobservationssatelliter med optiska eller SAR-sensorer kan avbilda ett utvalt område på jorden.

Öppna datakällor om satelliters banegenskaper och sensorer har använts för att generera typiska överflygningsscenarier. Dessa har i sin tur använts för att få fram en statistisk överflygningsfrekvens för olika fall från enstaka satelliter och existerande konstellationer, samt även till en möjlig framtida rysk satellitflotta.

Analysresultaten visar att överflygningsfrekvensen ökar med fler tillgängliga satelliter, men att denna fördel tappas till viss del efter ett visst antal satelliter på grund av samtida och överlappande överflygningar. Överflygningsfrekvensen ökar också med områdets latitud och med satellitens höjd. Resultaten visar också att SAR-satelliter kan avbilda områden cirka 3,5 gånger oftare än optiska satelliter. Detta beror på dels SAR-sensorernas oberoende från lokala ljusförhållanden, dels på att sensorerna har en större möjlig betraktningssvinkel.

Det statistiska underlaget visar att en typisk jordobservationssatellit kan avbilda ett område i Sverige i snitt en till två gånger per dygn, beroende på sensortyp.

De jordobservationssatelliter som idag finns i bana kan avbilda ett område i Sverige flera gånger per dygn. Dessa satelliter är antingen statliga (militära eller civila) eller kommersiella, de kommersiella levererar data som finns tillgängligt att köpa på marknaden.