

Överflygningsfrekvensdiagram

Fördjupning inom satellitöverflygningsanalys

OLA RASMUSSEN, KRISTOFER HALLGREN, JONATAN WESTMAN



Ola Rasmusson, Kristofer Hallgren, Jonatan
Westman

Överflygningsfrekvensdiagram

Fördjupning inom satellitöverflygningsanalys

Titel	Överflygningsfrekvensdiagram – Fördjupning inom satellitöverflygningsanalys
Title	Overflight frequency diagram – Extended work on satellite overflight analysis
Rapportnr/Report no	FOI-R--5296--SE
Månad/Month	Maj
Utgivningsår/Year	2022
Antal sidor/Pages	36
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	Försvarsmakten
Forskningsområde	Flygsystem och rymdfrågor
FoT-område	Inget FoT-område
Projektnr/Project no	E64133
Godkänd av/Approved by	Lars Höstbeck
Ansvarig avdelning	Försvarsteknik

Bild/Cover: Exempel på Överflygningsfrekvensdiagram, FOI

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

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

Sammanfattning

Sedan 2020 pekar Försvarsmakten ut rymddomänen som en operativ domän jämte mark-, sjö-, luft- och cyberdomänerna. Det innebär att behovet av att förstå och ta hänsyn till den vid operativ planering har ökat väsentligt.

Denna rapport bygger vidare på tidigare arbeten vid Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI) gällande analys av satellitöverflygningar, det vill säga de tillfällen en eller flera satelliter kan observera en vald plats. Baserat på öppen banddata för satelliter samt generiska sensormodeller används en kommersiell mjukvara för att ta fram överflygningsdata. Rapporten redogör sedan för två metoder för analys av dessa data samt vilka för- och nackdelar det finns med metoderna. De olika metoderna som presenteras ska ses som kompletterande med olika användningsområden och tidshorisonter. Den ena metoden innebär direkt analys av överflygningsdata baserad på aktuell banddata medan den andra är ett sätt att visualisera en större mängd data fördelat över ett helt år. Detta diagram har vi valt att kalla överflygningsfrekvensdiagram (ÖFD).

Genom att grafiskt presentera hur överflygningsfrekvensen för enskilda satelliter och satellitkonstellationer fördelas över ett år i ett ÖFD syftar denna rapport till att bidra med ytterligare dimensioner i förståelsen för rymddomänen.

Nyckelord: Rymdlägesbild, överflygningsanalys, rymddomän, SÖR, militär rymd, rymd, tillämpad rymdförmåga

Summary

Since 2020, the Swedish Armed Forces recognize space as an operational domain, alongside the ground, sea, air, and cyber domains. This means that there is an increasing need to understand and include the space domain in operational planning.

This study expands on previous work done at FOI concerning the analysis of overflight data. Based on open-source satellite data, commercial software is used to calculate overflights for a chosen location. This report details two methods of analyzing overflight data, along with the strengths and weaknesses of these methods. The methods are complementary with different areas of use. The first method constitutes a direct analysis of overflight data based on current satellite data, while the other is a way of visualizing a larger set of overflight data from an entire year. This visualization or diagram we have chosen to call Overflight Frequency Diagram (OFD).

By visualizing single satellites as well as constellations in OFDs the intention is to contribute to a deeper understanding of the space domain.

Keywords: Space, Space Situational Awareness, Space Domain Awareness, Overflight analysis, Space-based ISR

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
1.1	Syfte	7
1.2	Avgränsning	7
2	Bakgrund.....	8
2.1	Omloppsbanor	8
2.2	Tidigare arbete.....	10
3	Överflygningsberäkningar	11
3.1	Banpropagering	11
3.2	Sensortyper.....	11
3.3	Metod 1: Direkt beräkning	13
3.4	Metod 2: Statistisk sammanvägning.....	14
4	Analys.....	15
4.1	Satelliturval för analysen.....	15
4.2	Överflygningsfrekvensdiagram	15
4.3	Latitud- och longitudjämförelse.....	19
4.4	Metodjämförelse	21
5	Diskussion	23
5.1	Framåtblick	23
5.2	Fortsatt arbete.....	24
6	Referenser.....	25
	Bilaga A – Överflygningsfrekvensdiagram.....	26
	Bilaga B – Satelliturval.....	35
	ICEYE.....	35
	Hawkeye360.....	35
	Worldview.....	35
	Planet	36

Nomenklatur

AGI	Analytical Graphics, Inc.
CSpOC	Combined Space Operations Center
LEO	Låg jordbana (engelska <i>Low Earth Orbit</i>)
SAR	Syntetisk aperturradar (engelska <i>Synthetic-Aperture Radar</i>)
STK	Systems Tool Kit
SÖR	Spaning och Övervakning från Rymden
TLE	Two Line Element sets
UTC	Coordinated Universal Time
ÖFD	Överflygningsfrekvensdiagram

1 Inledning

FOI fick 2019 ett uppdrag från HKV LEDS INRI om att stötta Försvarmakten inom förmågeutveckling på operativ och strategisk nivå [1]. Rymd var ett av flera utpekade delområden där stöd efterfrågades.

Utöver en direktstödsfunktion på plats hos Försvarmakten påbörjades ett arbete som syftade till att tillämpa och tillgängliggöra den kunskap FOI genom FoT-projekten byggt upp om rymdområdet. Inom ramen för dessa projekt har FOI bland annat beforskat och skrivit om överflygningsanalys ur ett generellt perspektiv [2] samt mer tillämpat i sekretessklassificerade rapporter. Arbetet som denna rapport grundas på bygger vidare på dessa tidigare rapporter och vidareutvecklar och nyanserar resonemangen däri. Bland annat presenteras ett sätt att visualisera fördelningen av ett urval av satelliters överflygningar vid en vald plats fördelat över året. Detta diagram har vi valt att kalla överflygningsfrekvensdiagram (ÖFD).

1.1 Syfte

Syftet med denna rapport är att bredda och fördjupa tidigare arbete kring överflygningsanalys. Rapporten kommer att redogöra för två metoder att analysera överflygningar samt vilka för- och nackdelar det finns med dessa. De olika metoderna som presenteras ska ses som kompletterande med olika användningsområden och tidshorisonter.

Utifrån kunskapen som förmedlas är förhoppningen att Försvarmakten förstärker sin förmåga att ta tillvara möjligheter, begränsa risker och planera egen verksamhet utifrån en bättre förståelse för rymddomänen.

1.2 Avgränsning

Överflygningsanalys är en delmängd av en militär rymdlägesbild. Detta arbete behandlar endast denna delmängd och kommer inte diskutera frågor som rör rymdlägesbild på en övergripande nivå. Syftet är att ge en inblick i hur olika metoder kan användas för att arbeta vidare med överflygningsdata samt förslag på hur metoderna skulle kunna användas i en större kontext.

En viktig del i den militära rymdlägesbilden är en förståelse för motståndaren, dess förmåga och kapacitet. I den kontexten är kunskap om motståndarens rymdbaserade sensorer en viktig del i bedömningen av dennes förmåga till observation av egen verksamhet. Utöver detaljkunskap om sensorer är länkbudgetar och ombordkapacitet för lagring och förbehandling av observationer parametrar som kan omhändertas. I analysen som ligger till grund för denna rapport används banparametrar som representerar faktiska satelliter. Sensorerna som satelliterna är utrustade med i analysen är dock generiska sensorer. Rapporten behandlar heller inte analys och bedömning av en bakomliggande underrättelsecykel då fokus ligger på beskrivning av metoder för en överflygningsanalys utifrån ett principiellt perspektiv.

För en djupare och mer detaljerad analys krävs detaljkunskap om alla dessa områden och denna rapport ska därför ses som ett steg i att bygga förståelse för hur bandynamik begränsar och påverkar möjligheten att observera verksamhet på jorden.

2 Bakgrund

I Försvarsmaktens Doktrin för Gemensamma operationer från 2020 pekas rymddomänen ut som en operativ och fysisk domän i likhet med mark-, sjö- och luftdomänen [3]. Även om det är nyligen som rymden fick status som en separat domän har Försvarsmakten länge nyttjat rymdbaserade tjänster. Att rymden nu pekas ut som en egen domän innebär däremot att behovet av att förstå och ta hänsyn till den vid operativ planering har förtydligats.

”Militära förband verkar i hela operationsmiljön och vi behöver därför ta hänsyn till alla krav den ställer på oss vid förberedelse inför och under genomförande av operationer.”

Doktrin för Gemensamma operationer, 2020

Rymddomänen utvecklas idag snabbt [4]. Parallellt med att ny teknik tillkommer skapas nya användningsområden för den etablerade tekniken. Ett område som utvecklas väldigt snabbt är jordobservation. Historiskt har jordobservationssatelliter, eller spaningssatelliter, använts för strategisk övervakning och i huvudsak varit ett verktyg för ett fåtal nationella aktörer. Kommersiell tillgång till högupplösta bilder var under många år begränsad och endast USA hade tillgång till bilder från optiska sensorer med extremt hög upplösning (< 10 cm)^{1,2}. Det var inte förrän 1986 när Frankrike sände upp Spot-1 som den kommersiella marknaden öppnades för satellitbilder [5].

Idag är situationen annorlunda. USA har inte längre samma informationsöverläge då det är sannolikt att även Kina har tillgång till optisk spaning med extremt hög upplösning [6]. Detta exklusiva informationsöverläge som kalla krigets supermakter hade tillgång till tack vare sina spaningssatelliter har därmed sakta eroderat. Den stora förändringen har skett i den kommersiella sektorn där det finns flera aktörer som antingen tillhandahåller plattformar direkt för jordövervakning eller färdiga analyser, så kallade nedströmslösningar. Även om det kommersiella utbudet på bilder med väldigt hög upplösning sakta förbättras är det framförallt konstellationer med flera satelliter och kort återbesöksdagar som medför den stora skillnaden.³ Kommersiell jordövervakning är också ett skolboksexempel på en produkt med dubbla användningsområden, det vill säga en satellit kan leverera information till både kommersiella och militära aktörer. Information från jordövervakningssatelliter är tillgänglig för de flesta som vill och kan betala för det. Både mer eller mindre kvalificerade motståndare kan därmed skaffa sig värdefull information om militär verksamhet och infrastruktur som annars varit mycket svår att få tillgång till.

Det är däremot viktigt att komma ihåg att flertalet stora landvinningar inom satellitteknik till trots så är möjligheten till observation av jorden via satellit fortfarande begränsad av bland annat fysikens lagar i form av banddynamik. För att förekomma de effekter en förändrad hotbild från satellitövervakning innebär, är det viktigt att förstå såväl hot som begränsningar.

2.1 Omloppsbanor

Banddynamik är ett komplext kunskapsområde men för att tillgodogöra sig denna rapport krävs endast en grundläggande förståelse av ett antal begrepp som är relevanta för en överflygningsanalys. Dessa grundläggande begrepp sammanfattas nedan. För den som är intresserad av fördjupad kunskap så finns det mycket bra litteratur på ämnet, exempelvis

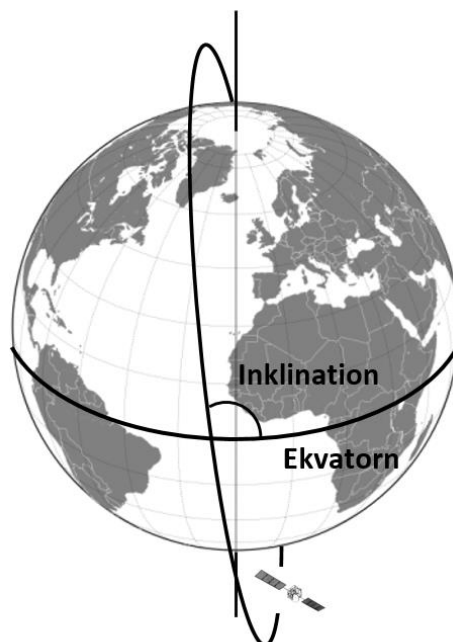
¹ Upplösningen för en jordobservationssatellit på 250 km höjd, som observerar inom det optiska området, är på grund av diffraktion begränsad till ca 6 cm.

² Det finns idag ingen generell definition om vilken typ av upplösning som kan kallas ”hög”, ”väldigt hög”, ”extremt hög” osv. En bättre beskrivning är att nyttja NIIRS-skalan. <https://irp.fas.org/imint/niirs.htm> (hämtad 2021-11-24).

³ Det finns åtminstone en operativ (Airbus Neo-Pleiades-konstellation) och två planerade kommersiella konstellationer som sägs ha minst 30 cm upplösning på sina bilder (Albedo Space samt Maxar Legion-satelliterna som ägs av Maxar).

McClain, *Fundamentals of Astrodynamics and Applications* [7]. Notera att nedanstående beskrivning i vissa avseenden är en förenkling av bakomliggande fysik i syfte att förtydliga och förklara.

Alla satelliter rör sig i elliptiska banor kring jordens centrum. Generellt brukar banans form anges med lägsta punkten på banan, kallat perigeum, och högsta punkten på banan, kallat apogeum. När dessa punkter är lika högt över marken så blir banan cirkulär. För att beskriva hur banan är orienterad i förhållande till jorden används vinkeln mellan banan och ekvatorn, kallad inklinations (se Figur 1), samt longitud för uppstigande nod. Uppstigande nod är där satelliten passerar ekvatorn från södra halvklotet på väg norrut. För att fullt ut bestämma en satellits bana krävs två parametrar till samt tidpunkten för vilken de 6 parametrarna är giltiga. En av dessa sista två parametrar beskriver var i sin bana satelliten befinner sig, vilket är viktigt för beräkning av tidpunkten för överflygningar. Slutligen finns det en parameter som beskriver hur den lägsta delen av banan är orienterad, men då alla satelliter som behandlas i denna rapport har cirkulära banor är inte denna parameter nödvändig för förståelsen, se nästa stycke. Slutligen genomför de flesta satelliter med framdrivning banunderhåll (*eng. station keeping*) för att kompensera för diverse störningar av omloppsbanan. Att utföra större förändringar av en satellits omlopps bana är däremot generellt bränsleintensivt och därav ovanligt.



Figur 1 - Satellit i sin bana kring jordens centrum med inklinations markerat.

Samtliga satelliter som behandlas i denna rapport är jordobservationssatelliter, av vilka det finns ca 770 aktiva idag.⁴ Huvuddelen av dessa satelliter ligger i låga cirkulära omloppsbanor (ca 90 %). Låga jordbanor sägs ligga mellan 200 och 2000 km höjd, även kallat LEO (*eng. Low Earth Orbit*). För jordobservationssatelliter är höjder mellan 400-700 km vanligast. Ungefär tre fjärdedelar av jordobservationssatelliterna har solsynkrona banor, vilket innebär en inklinations runt 97-98°, beroende på höjd. Med denna inklinations så vrider sig banan på grund av gravitationseffekter i samma takt som jorden färdas runt solen, därav kallat solsynkron bana. Detta innebär att en satellit i en bana av denna typ alltid passerar över samma punkt på jorden vid samma lokala tid. Detta är fördelaktigt när bilder från olika tillfällen skall jämföras för att upptäcka förändringar eller för att få så mycket sol på satellitens solpaneler som möjligt. Longitud för uppstigande nod bestämmer vilken lokal tid som satelliten kommer att passera över en punkt på marken. Av de 770

⁴ Statistik från FOI:s databas El Corazon, 2021-11-18.

aktiva jordobservationssatelliterna är det endast 9 % som inte ligger i solsynkron bana men ändå har en inklinations hög nog att passera över Sverige.

När det kommer till överflygningar så är det fördelaktigt att utifrån Figur 1 tänka sig satellitens bana som fix medan jorden roterar. En plats på jorden, exempelvis Sverige, kommer då att passera under satellitens bana en gång när satelliten är på väg söderut och ungefär ett halvt dygn senare när den är på väg norrut. För jorden tar det 24 timmar att rotera ett varv medan satelliter i LEO rör sig ett varv på cirka 90 minuter. Detta innebär att om sensortäckningen på marken är tillräckligt stor så kan en satellit göra fler än en överflygning av samma plats under flera av varandra påföljande banvarv, vid varje tillfälle som platsen passerar under dess bana. En LEO-satellit med hög inklinations har med andra ord grupper av överflygningar med ca tolv timmars mellanrum, inom dessa grupper sker en eller flera överflygningar i sin tur cirka 90 minuter efter varandra. Är satellitens bana dessutom solsynkron så sker dessa grupper med överflygningar vid samma lokala tid varje dygn.

2.2 Tidigare arbete

Överflygningsanalyser är ett ämne som har varit av intresse under flera år, och sedan 2014 har rymdgruppen vid FOI varit med och tagit fram ett antal rapporter som på olika sätt berör ämnet. De flesta av dessa rapporter är hemliga, men rapporten FOI-R--4320--SE [2] "Överflygningsanalys – Avbildande jordobservationssatelliter" från 2016 är öppen och beskrivs här ytligt.

Rapporten ger en översiktlig introduktion till ämnet överflygningsanalys. Den presenterar resultat från flertalet statistiska analyser av satellitöverflygningar av en bestämd plats. Analyserna är genomförda med ökande komplexitet, från enstaka satelliter upp till konstellationer. Syftet med rapporten var att kunna bidra med en generell bedömning för hur ofta jordobservationssatelliter har möjlighet att avbilda ett område i Sverige, och vilka faktorer som påverkar tätheten mellan observationstillfällen. Analysen gav resultatet i form av skattningar av antal överflygningar per dygn, utslaget över ett år, för ett antal typkonstellationer av satelliter och för ett antal faktiska satellitkonstellationer.

3 Överflygningsberäkningar

Detta kapitel beskriver två metoder för att arbeta med och analysera överflygningsdata: en metod som bygger på överflygningsdata från propagering av aktuella banparametrar, se avsnitt 3.3, och en metod som bygger på statistisk sammanvägning av en större mängd överflygningsdata, se avsnitt 3.4.

Propagering är en form av extrapolering av en satellits position framåt (eller bakåt) i tiden. Med överflygningsdata menas i denna rapport tidsintervall (starttidpunkter samt sluttidpunkter för överflygningar) under vilka en satellits sensor har möjlighet att observera en specifik plats på marken.

För att bygga upp ett underlag till den statistiska metoden används i denna rapport överflygningsdata baserat på historiska banparametrar. Den statistiska metoden kan även appliceras på överflygningsdata från en propagering framåt i tiden, mer om det i kapitel 5.

3.1 Banpropagering

För att ta fram den överflygningsdata som båda metoderna bygger på har mjukvaran STK (*Systems Tool Kit*) tillhandahållen av AGI (*Analytical Graphics, Inc.*) använts. I STK skapas ett scenario för den tidsperiod som är av intresse. Satelliter som skall propageras väljs ut och tilldelas var sin sensormodell, se avsnitt 3.2 nedan. Banparametrar importeras sedan från CSpOC⁵ (*Combined Space Operations Center*) via AGI för alla satelliter och deras banor kan därmed propageras över tidsperioden. Dessa banparametrar är i detta fall så kallade TLE:er⁶, vilka skapas från satelliternas faktiska inmätta positioner och uppdateras ungefär en gång per dygn. Slutligen definieras den plats på marken för vilken överflygningar skall beräknas. Beräkningen startas och resultaten ges i form av överflygningsdata.

3.2 Sensortyper

Det finns ett flertal olika typer av sensorer för jordobservation. De klassificeras huvudsakligen utifrån om de är aktiva eller passiva samt vilket frekvensområde de är känsliga för, och i vissa fall även hur de nyttjas.⁷

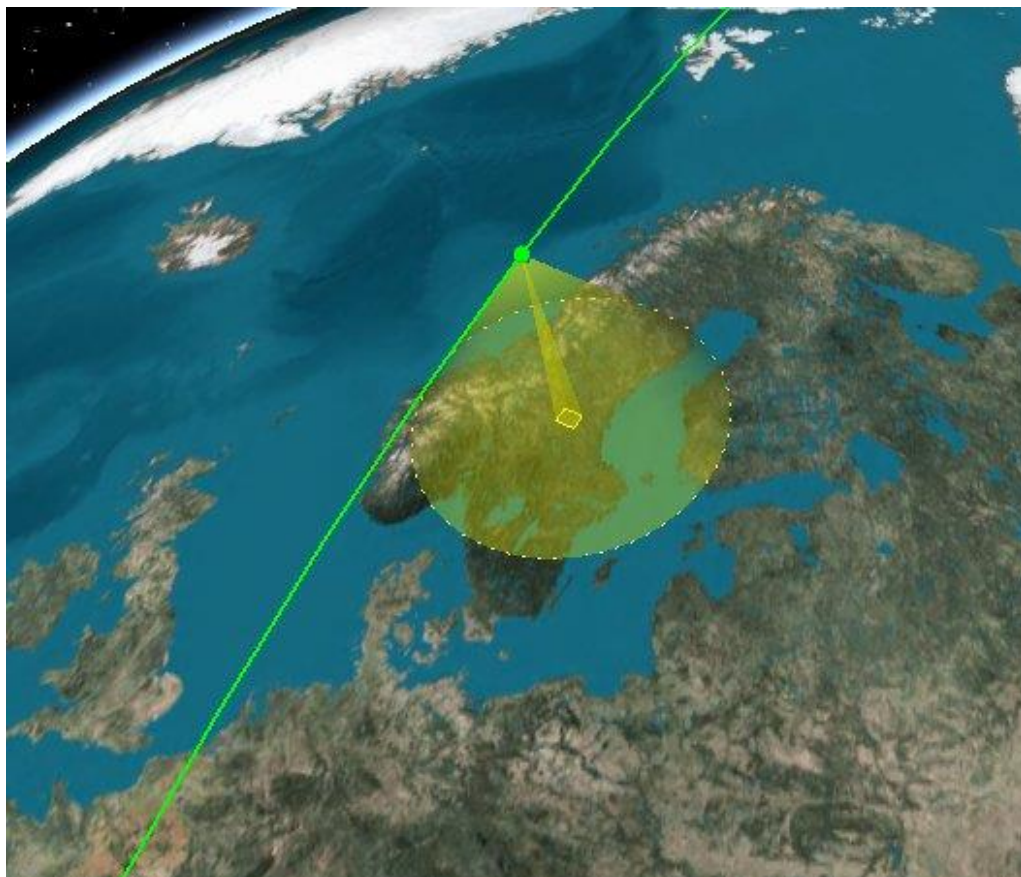
I de beräkningar som genomförts inom ramen för detta arbete används två passiva sensortyper och en aktiv. De passiva typerna är dels optiska sensorer och dels radiosensorer, även kallade signalspanande sensorer. De optiska sensorerna antas inte vara känsliga för infrarött ljus och kräver därmed att marken är solbelyst. Den aktiva sensortypen som används vid beräkningarna är bildalstrande radar (SAR).

⁵ Den del av amerikanska försvarsmakten som bland annat tillhandahåller satellitpositionsdata.

⁶ Eng. *Two Line Element sets*

⁷ För en grundläggande introduktion se <https://business.esa.int/newcomers-earth-observation-guide> (hämtad 2021-11-24).

Analysen bygger på att varje satellit endast är utrustad med en sensortyp. Sensorns teoretiskt möjliga observationsområde, även kallat dess betraktningssvinkel⁸, är mycket större än det område som kan observeras av sensorn vid varje givet tillfälle, vilket ges av dess synfältsvinkel⁹ (ibland även kallad stråkbredd), se Figur 2. Då det inte går att säga vilken del av det möjliga observationsområdet som faktiskt observeras (förutom för aktiva sensorer) bygger analyserna på hela det möjliga observationsområdet när överflygningarna beräknas. Resultaten från beräkningen ger därmed en form av extremscenario där området av intresse på marken observeras vid varje överflygning.



Figur 2 – Visualisering av sensormodell för satelliten Spot 6, stor kon indikerar betraktningssvinkel medan liten rektangel i mitten indikerar synfältsvinkel. Synfältsvinkel kan riktas inom den betydligt större betraktningssvinkeln.

De parametrar som modellerar sensorernas observationsområde bygger på interna rimlighetsbedömningar och diskussioner med experter på FOI inom respektive sensorområde, se Tabell 1. De olika sensorerna antas också ha olika fotavtryck på marken, nedan kallat formfaktor, se Figur 3.

Tabell 1 – Sammanfattning av modellerade sensorparametrar. Observationsområde angivet i halvvinklar.

SENSORTYP	FORMFAKTOR	OBSERVATIONSOMRÅDE
OPTISK	Rektangel	45° x 15°
SAR	2 x Rundad rektangel	20-60° x 20°
SIGNALSPANING	Cirkel (kon)	50°

⁸ Eng. *Field of regard*.

⁹ Eng. *Field of view*.



Figur 3 - Alla tre sensortyper och deras respektive formfaktorer. Från vänster: Signalspanning, SAR, Optisk.

3.3 Metod 1: Direkt beräkning

Ligger den efterfrågade tidsperioden i relativt nära framtid, enstaka veckor, kan med fördel en propagering av satellitbanorna med hjälp av aktuella banparametrar utföras.

Tidsperioden läggs då in i scenariot i STK, enligt avsnitt 3.1, och de senaste banparametrarna importeras. Denna beräkning genererar då en lista med överflygningar för de valda satelliterna över den valda platsen på jorden under tidsperioden, med andra ord överflygningsdata. Denna typ av beräkning är den som används i Försvarmaktens överflygningsdemonstrator [8].

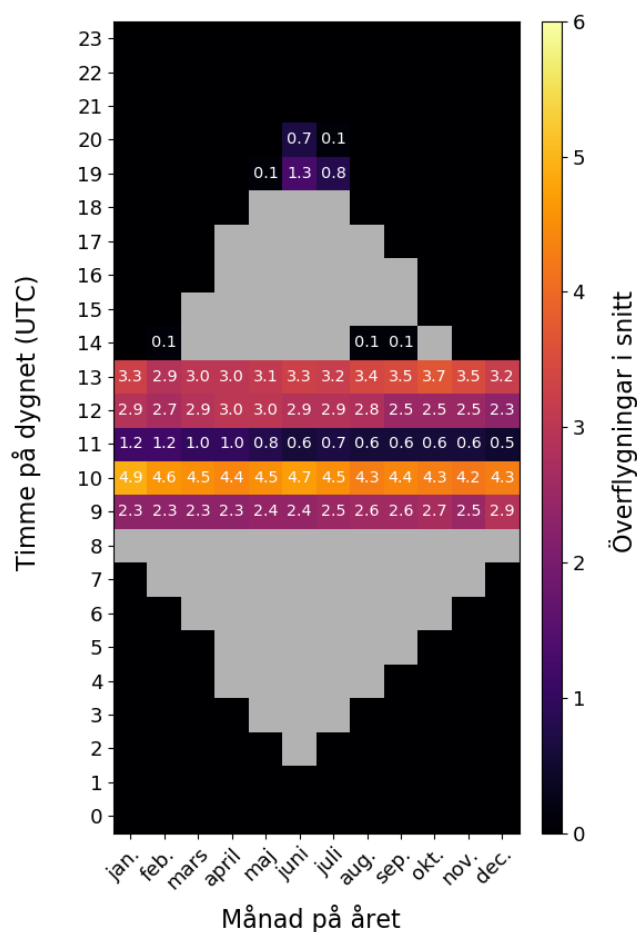
Till följd av de antaganden och förenklingar som görs vid propagering av TLE:er så bör de inte propageras mer än en till fyra veckor framåt i tiden. Hur långt det i praktiken går att propagera och hur stort felet blir beror på flertalet variabler. Bland annat noggrannheten i inmätningarna som användes för att skapa TLE:n, satellitens form och vikt, satellitens omloppsbana, atmosfärens påverkan, solaktivitet med mera. Inom dessa upp till fyra veckor så medför dock denna metod med direkt beräkning av överflygningar en mer precis bild av läget under tidsperioden än vad statistiska metoder kan erbjuda.

3.4 Metod 2: Statistisk sammanvägning

Som nämndes i avsnitt 3.1 ovan publiceras uppdaterade TLE:er ungefär en gång per dygn för de flesta satelliter. Det innebär att det finns tillräckligt med banparametrar för att kunna göra en beräkning där tidsperioden är ett helt år. Propagering sker då likt beskrivningen i avsnitt 3.1 med tillägget att en TLE propageras fram till nästa, cirka ett dygn senare, därefter propageras den TLE:n och så vidare. Överflygningsdata från dessa beräkningar kan därefter maskinläsas och behandlas. Till exempel kan genomsnittligt antal överflygningar per dygn beräknas, vilket är det som används i tidigare arbeten.

Ett annat sätt att presentera dessa resultat är med Överflygningsfrekvensdiagram (ÖFD). Genom att sortera överflygningarna med avseende på tid på dygnet och månad kan diagrammet i Figur 4 skapas. Den vertikala axeln visar timme på dygnet och den horisontella axeln visar vilken månad. Färgen och siffrorna i diagrammet indikerar med vilken frekvens det sker överflygningar. Med andra ord hur många överflygningar det sker i snitt per dygn under en månad, vid den tiden på dygnet. Till exempel så sker det i snitt 4,7

överflygningar mellan 10.00 och 11.00 varje dygn i juni månad. I de rutor som inte har några överflygningar så representerar grå färg att platsen är solbelyst medan svart färg representerar mörker. Notera att just detta diagram visualiserar genomförd beräkning för optiska satelliter (se bilaga B) över Mellansverige (latitud 60, longitud 15, något norr om Kopparberg) samt att alla tider är angivna i koordinerad universell tid (UTC).



Figur 4 - Exempel på Överflygningsfrekvensdiagram.

4 Analys

I detta kapitel ges en fördjupad beskrivning av överflygningsfrekvensdiagrammen samt en beskrivning av hur antalet överflygningar förändras beroende på vilken plats på marken som analyseras. Detta kan jämföras med tidigare analyser som fokuserade på hur antalet överflygningar varierar med latitud [2]. Det som är nytt i denna analys är framförallt samverkan mellan plats på marken, inklinations, solbelysning och sensorer, vilka diskuteras separat i tidigare arbeten. Det är viktigt att komma ihåg att diagrammen i detta kapitel är baserade på verkliga satellitdata från 2020, det innebär att vissa avvikelser från hur det skulle sett ut för ett annat år kan förekomma.

4.1 Satelliturval för analysen

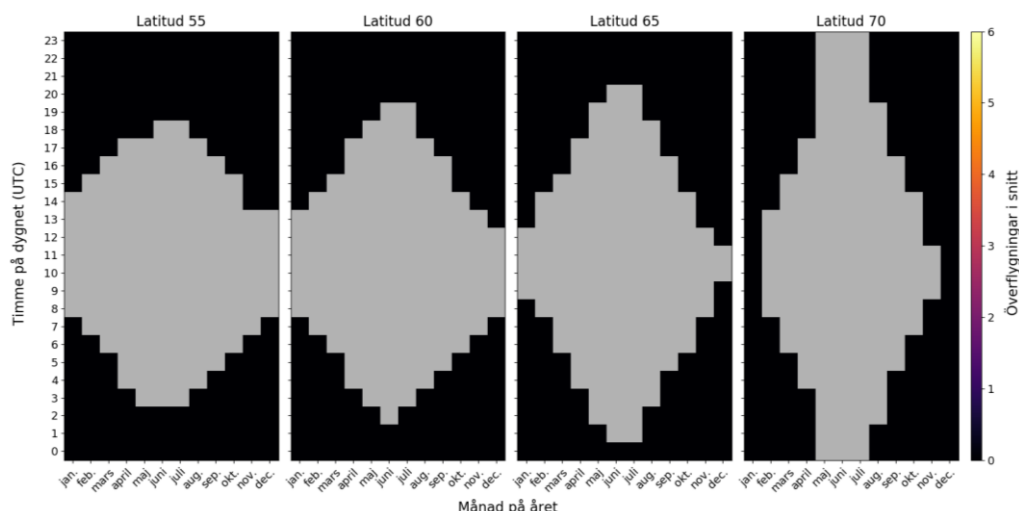
De satelliter som valts ut för att demonstrera ÖFD är existerande kommersiella konstellationer av jordobservationssatelliter. Konstellationerna valdes utifrån ett antal parametrar:

- att bidra med ett urval som täcker de flesta sensortyper,
- att inkludera konstellationer som hunnit bli väl utbyggda,
- att satelliterna i konstellationen kan anses vara typiska för den sortens sensorer avseende banplan, banhöjd och inklinations.

Fyra konstellationer valdes ut baserat på ovan urvalsparametrar. Dessa var: ICEYE (SAR), Hawkeye360 (signalspaning) samt WorldView och Planet:s SkySat (optik). Konstellationerna beskrivs närmare i Bilaga B – Satelliturval. Det ska noteras att samtliga dessa konstellationer förändras över tid, främst genom att de byggs ut med fler satelliter, och analysen bygger på hur dessa konstellationer såg ut 1:a januari 2021.

4.2 Överflygningsfrekvensdiagram

Var och en av Figur 5 - Figur 10 nedan visar ett ÖFD för fyra olika platser i och omkring Sverige. Dessa platser har alla samma longitud men är utspridda i latitud. Att platsen flyttas längre norrut påverkar både antalet överflygningar i sig och dessutom påverkar det ljusförhållandena vilket påverkar observationsmöjligheterna för de optiska sensorerna, se Figur 5. Ökad latitud ger fler solbelysta timmar under sommaren men färre under vintern, vilket motsvaras av att det gråa området (som motsvarar solbelysningen) sträcks ut. Notera att mörkaste dagen på året (vintersolståndet) inte är den 31 december, istället inträffade vintersolståndet den 21 december år 2020. Detta innebär att total solbelysning för en plats inte är symmetriskt fördelad för året, vilket syns i Figur 5.

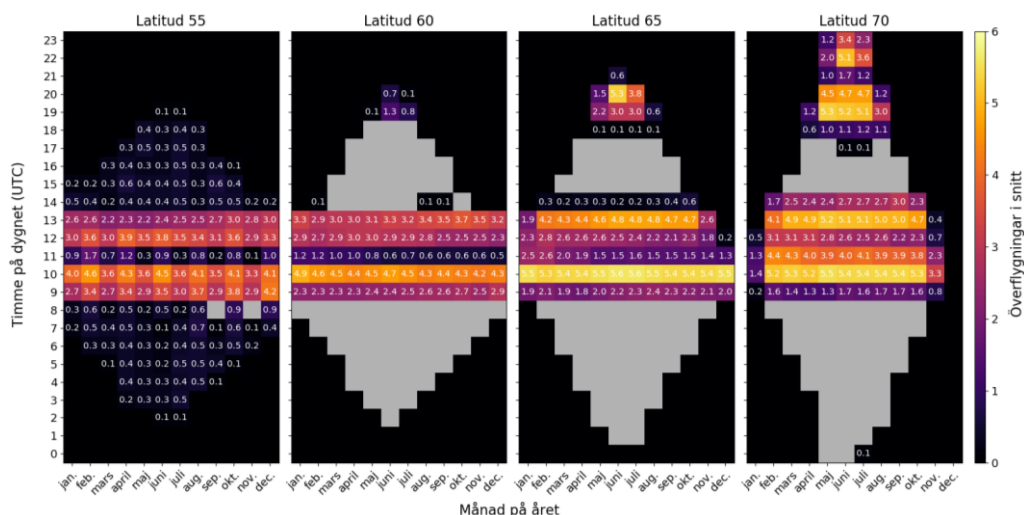


Figur 5 - Överflygningsfrekvensdiagram utan överflygningsdata som visar hur ljusförhållandena förändras med latitud. Longitud: 15°.

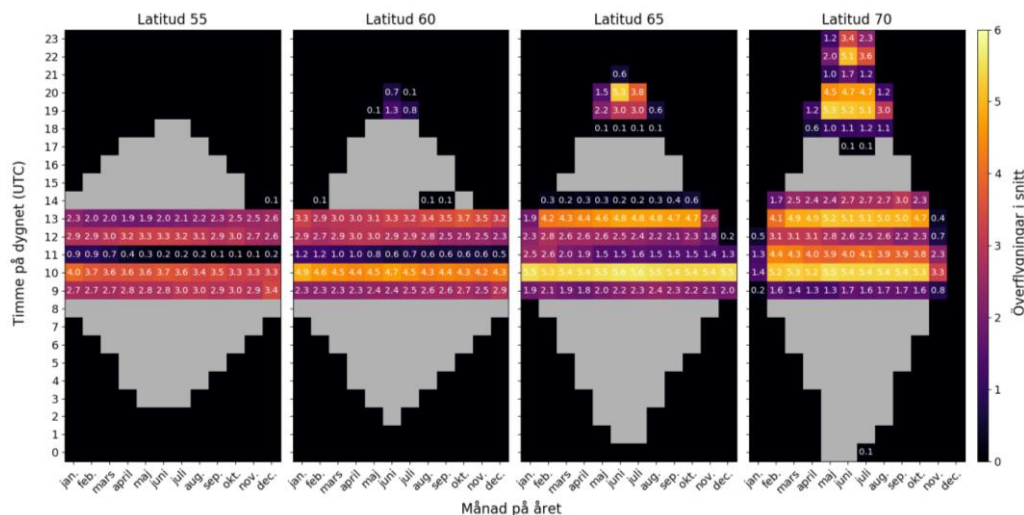
Figur 6 visar ÖFD för de valda satellitkonstellationerna med optiska sensorer över de fyra platserna. Det första diagrammet (längst till vänster) visar den sydligaste platsen, på 55° latitud. Här syns effekten av att analysen omfattar ett antal satelliter som inte ligger i solsynkron bana. Dessa satelliter ligger i en bana med en inklinering av 53° och kan därför, på grund av sin sensortäckning, emellanåt observera den utvalda platsen på 55° latitud. Detta visar sig genom att satelliterna får täckning, men infrekvent, under nästan alla solbelysta timmar under året. Jämför även med Figur 7, där endast de solsynkrona optiska satelliternas överflygningar har tagits med.

Nästa diagram i samma figur är för platsen på 60° latitud, den sydligaste analyserade platsen som inte kan observeras av satelliterna i bana med låg inklinering. Kvarstår gör då det typiska utseendet för satelliter i solsynkron bana med ett "band" över hela året. Bandet inleds med att första överflygningen för dessa satelliter sker omkring klockan 9-10 och ett varv, ca 90 min, senare gör de ytterligare en överflygning. Nästa varv för satelliterna har jorden hunnit rotera tillräckligt för att satelliterna inte längre skall kunna observera platsen. Dessa två överflygningar motsvarar en grupp av överflygningar enligt beskrivningen i avsnitt 2.1. Likt den beskrivningen så sker det cirka ett halvt dygn senare en ny grupp av överflygningar när platsen på jorden har roterat till "andra sidan" av satelliternas banor. De optiska satelliterna kräver dock att platsen är solbelyst, vilket innebär att observationer i denna grupp av överflygningar endast är möjliga under sommarmånadernas längsta dagar.

För platser längre norrut (65 och 70° latitud), de två diagrammen längst till höger i Figur 6, blir denna effekt ännu tydligare när det andra bandet är lättare att se, i form av den "ö" med överflygningar i den övre delen av diagrammen. En annan effekt vid nordligare latituder är att fler satelliter kan observera platsen vid en tredje passage runt mitten på dygnet, vilket ger ett mer utspritt band med något högre överflygningsfrekvenser. Dessa effekter tillsammans ger en stor ökning i totalt antal överflygningar med ökad latitud, för optiska satelliter med hög inklinering.

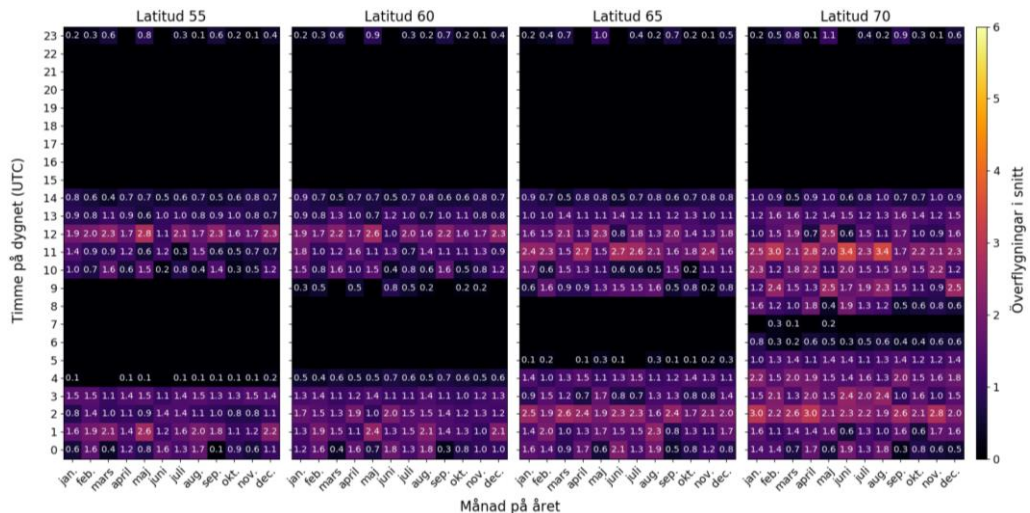


Figur 6 - ÖFD för satelliter med optiska sensorer över fyra olika latituder i Sverige. Longitud: 15°.



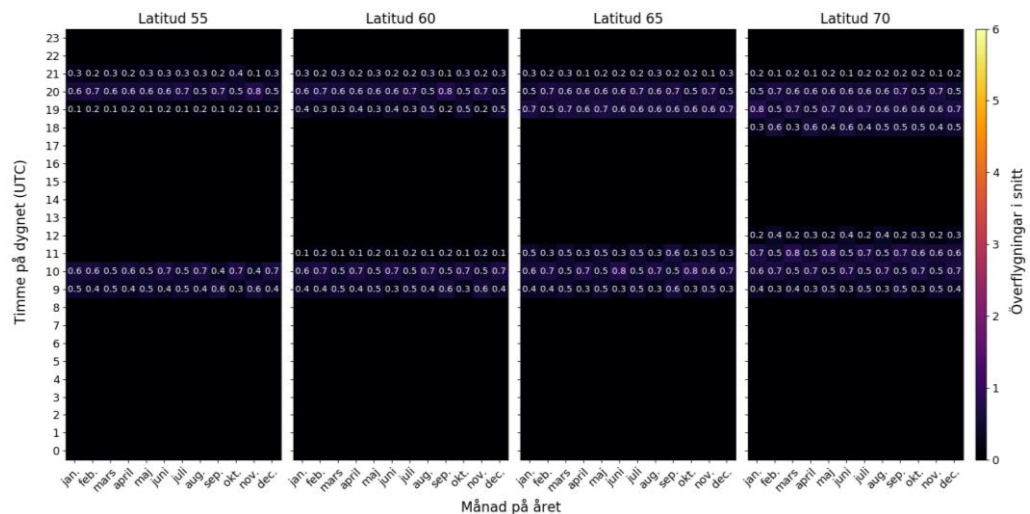
Figur 7 - ÖFD för enbart solsynkrona satelliter med optiska sensorer över fyra olika latituder i Sverige. Longitud: 15°.

Figur 8 är uppbyggd på samma sätt men visar resultatet för satelliterna utrustade med SAR-sensor. Till följd av SAR-sensors bredare marktäckning kan dessa band utgöras av så många som fyra på varandra efterföljande överflygningar per satellit. Detta resulterar i ÖFD med mer utspridda band. Att behovet av solbelysning av platsen inte finns för dessa sensorer kan utläsas då båda banden framkommer tydligt även vid lägre latituder och alltså inte begränsas av mörker i januari respektive december för högre latituder som för de optiska satelliterna. Det syns också tydligare i dessa diagram hur de två banden breddas och närmar sig varandra i tid med ökad latitud. Detta till följd av att överflygningarna på vardera sidan av satelliternas banor närmar sig varandra då platsen är längre norrut. Den lägre överflygningsfrekvensen är en konsekvens av att analysen omfattar färre SAR-satelliter än optiska, se bilaga B.



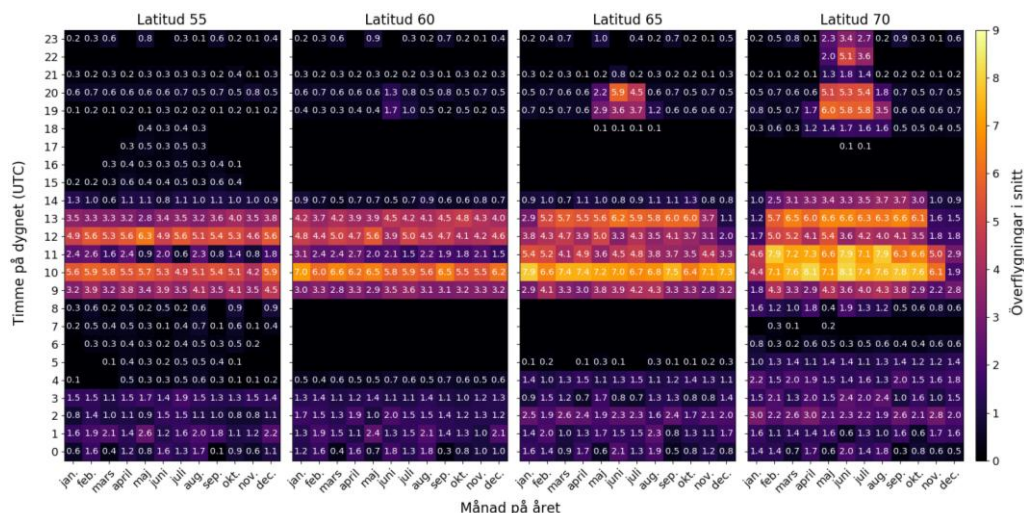
Figur 8 - ÖFD för SAR sensorer över fyra olika latituder i Sverige. Longitud: 15°.

Figur 9 visar motsvarande ÖFD för satelliterna med signalspaningssensorer. I likhet med ÖFD för SAR-satelliterna återfinns två tydliga band vilka blir bredare och kryper närmare varandra med ökad latitud. Signalspaningssensorerna har däremot inte lika bred marktäckning vilket innebär att banden inte är lika utspridda i tid på dygnet. Det är tre signalspaningssatelliter med i denna analys och de ligger i formation relativt nära varandra. Detta får som effekt att dessa ÖFD kan betraktas som exempel på ÖFD för en enskild solsynkron satellit med en sensor som kan observera platser även utan solbelysning.



Figur 9 - ÖFD för signalspaningssensorer över fyra olika latituder i Sverige. Longitud: 15°.

De sista diagrammen, Figur 10, visar en sammanslagning av all data från de tre föregående figurerna (optik, SAR, signalspaning). Trots att samtliga satelliter i analysen är representerade i dessa diagram så finns det fortfarande delar av dygnet då det inte sker överflygningar. Å andra sidan finns det timmar med över en överflygning var tionde minut. Det bör dock noteras att de konstellationer som analysen bygger på endast utgör en bråkdel av alla jordobserverande satelliter som är aktiva i skrivande stund.

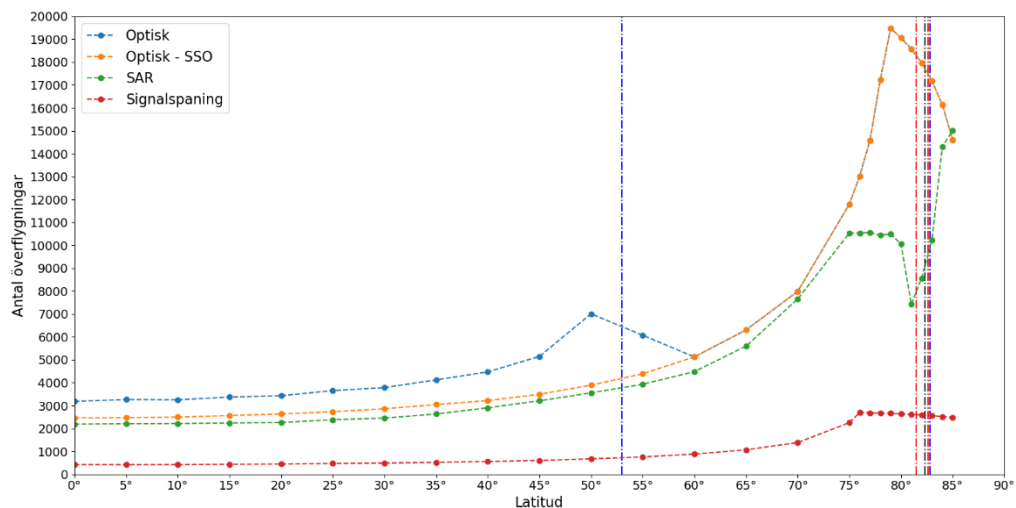


Figur 10 - ÖFD för alla tre typer av sensorer över fyra olika latituder i Sverige. Longitud: 15°.

4.3 Latitud- och longitudjämförelse

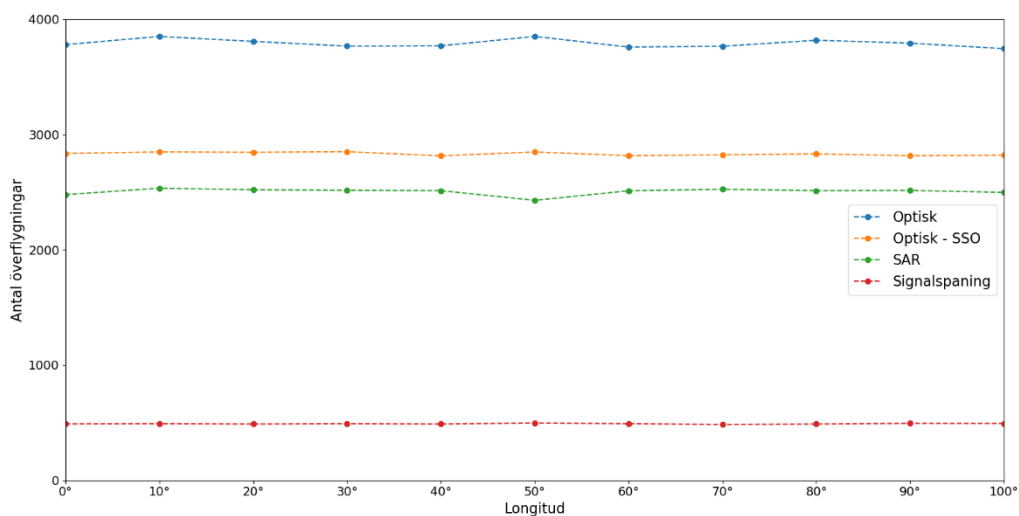
Utförs överflygningsberäkningar för ännu fler platser än de fyra från föregående avsnitt kan påverkan av latitud och även longitud studeras ytterligare. Platserna som används i detta avsnitt är utspridda med fem graders mellanrum från ekvatorn och norrut samt med tio graders mellanrum från nollmeridianen och drygt ett kvarts varv österut. Samma satelliter används här som i föregående avsnitt, se Bilaga B – Satelliturval. Notera att det finns olika många satelliter med var och en av de olika sensortyperna, dessutom har de olika sensortyperna olika stor betraktningssvinkel. Det är således inte den absoluta skillnaden i antalet överflygningar mellan de olika sensortyperna utan den individuella formen på de fyra kurvorna som är av intresse i detta fall.

Figur 11 visar hur antalet överflygningar varierar med latitud. De vertikala linjerna visar inklinationerna för urvalet av satelliter. De solsynkrona satelliternas linjer hamnar på omkring 82° då de i praktiken kan speglas symmetriskt kring 90°. Det generella utseendet på kurvorna för de olika sensortyperna visar att ju längre norrut desto fler överflygningar, precis som indikerades i föregående avsnitt. Den blå kurvan visar optiska överflygningar medan den orangea visar överflygningar av endast de solsynkrona optiska satelliterna. Den vertikala blå linjen längst till vänster samt den tydliga dippen i den blå kurvan visar effekten av satelliter med lägre inklination, i detta fall 53°. Vid de högre latituderna, 75° och uppåt, så börjar samtliga kurvor avvika från rena exponentiella kurvor. När platsen är så här långt norrut så gör satelliterna överflygningar varje gång de passerar upp över polen givet att banplanet är på samma sida om polen som platsen. I och med att satelliterna har en inklination något över 90° så är det endast satelliter med väldigt bred marktäckning som kan avbilda polen. SAR-sensorer har ett gap i mitten på sin marktäckning vilket ger en dipp i den kurvan när platsens latitud matchar banornas inklination.

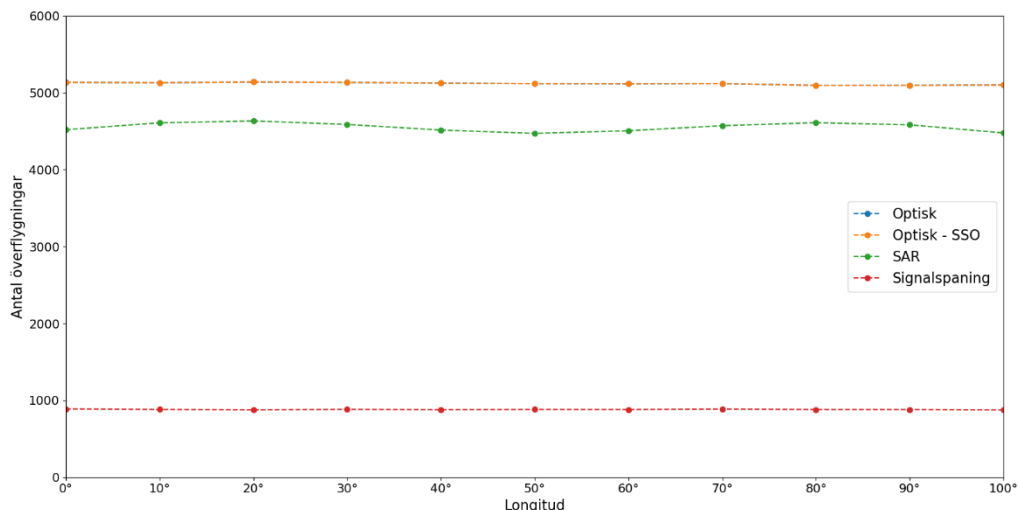


Figur 11 - Antal överflygningar vid olika latituder. Vertikala linjer visar inklinationen för satelliterna. Longitud: 15°.

Motsvarande analys för variationer i longitud ger Figur 12 och Figur 13 nedan. Figurerna visar samma variation över longitud vid 30° respektive 60° i latitud. För båda dessa latituder är skillnaden i antalet överflygningar väldigt små med varierad longitud. Antalet överflygningar för dessa typer av satelliter påverkas med andra ord inte av longituden för platsen.



Figur 12 - Antal överflygningar vid olika longituder. Latitud = 30° N.



Figur 13 - Antal överflygningar vid olika longituder. Latitud = 60° N.

4.4 Metodjämförelse

Tabell 2 - Överflygning av optiska satelliter den 10 juni över latitud 60, longitud 15.

#	start	stopp
1	09:36:22	09:36:58
2	09:38:36	09:39:15
3	09:42:32	09:43:37
4	09:54:28	09:55:03
5	10:15:18	10:15:53
6	10:35:42	10:36:30
7	10:40:38	10:41:15
8	11:01:34	11:02:09
9	11:21:33	11:22:38
10	12:33:34	12:34:09
11	12:50:03	12:50:38
12	12:53:38	12:54:12
13	13:04:41	13:05:15
14	13:19:56	13:20:31
15	13:30:59	13:31:37
16	13:32:56	13:33:32
17	19:28:11	19:29:16
18	19:57:59	19:58:34
19	20:02:35	20:03:25

För att jämföra de två metoderna så kan resultatet i Figur 4, det vill säga latitud 60, longitud 15 och optiska sensorer, användas som exempel. Med detta urval blir den årliga genomsnittliga överflygningsfrekvensen 14 överflygningar per dygn, vilket motsvarar drygt en överflygning varannan timme. Denna siffra är i sig statistiskt korrekt, men blir missvisande för enskilda dagar då antalet överflygningar per dygn egentligen varierar mellan 10 och 19. En annan viktig skillnad är att överflygningarna inte är jämnt fördelade över dygnet, vilket Figur 4 tydligt visar. En detaljerad lista över alla överflygningar (totalt 19 stycken) för den 10 juni 2020 listas i Tabell 2.

Är endast den genomsnittliga överflygningsfrekvensen om 14 överflygningar per dygn känd finns det risk att felaktigt dra slutsatsen att en verksamhet som pågår i mer än två timmar inte går att genomföra utan att riskera att verksamheten observeras av en optisk satellit enligt satelliturvalet. Används istället en ÖFD såsom Figur 4 så framgår det att det finns tre möjliga tidsintervall att utföra verksamheten. På morgonen innan 09.00 kan verksamheten utföras i dagsljus. På eftermiddagen mellan 14.00 och 18.00 finns det gott om tid för verksamheten och slutligen går verksamheten att utföra i mörker från 21.00. Detta gäller alla dagar i juni månad. Det visar sig därmed att en fördjupad förståelse och något mer nyanserad bild över hur överflygningar är fördelade på dygnet utökar handlingsutrymmet väsentligt.

Ett förslag på användarexempel och hur de olika metoderna kompletterar varandra kan ses i rutan nedan.

Anta att en verksamhet planeras. Verksamheten har ett visst skyddsvärde och man bör därmed om möjligt undvika att verksamheten och dess förberedelser kan observeras. Utifrån en ÖFD för platsen ifråga finns det då möjlighet att dra initiala slutsatser kring vilka begränsningar som föreligger före, under och efter verksamheten för att minimera risken att observeras av satellit. När tiden för verksamheten närmar sig och är inom gräns för när direkt beräkning ger tillräcklig precision kan en första beräkning genomföras. Denna beräkning ger sannolikt en bättre precision än den första bedömningen av föreliggande begränsningar då den bygger på färsk indata. Indata till beräkningen bör också ta hänsyn till eventuella nyligen tillkomna (eller inte längre aktiva) satelliter. Beroende på behovet av precision i tid för när överflygningar kommer ske kan man genomföra ytterligare en beräkning så nära verksamhetens start som möjligt.

5 Diskussion

Utgångspunkten för arbetet som ligger till grund för denna rapport var att bredda och nyansera tidigare arbete om överflygningsanalys. Genom att grafiskt presentera hur överflygningsfrekvensen för enskilda satelliter och satellitkonstellationer statistiskt sett fördelas över ett år i ett ÖFD bidrar denna rapport med ytterligare nyanser som kan underlätta uppbyggnad av förståelsen för rymddomänen.

Försvarsmakten har sedan 2020 en teknisk demonstrator för att ta fram överflygningsdata i enlighet med metod 1 beskrivet ovan. Möjligheten för Försvarsmakten att genomföra överflygningsanalys breddas nu med hjälp av ÖFD. Dessa metoder ska ses som kompletterande arbetssätt med olika för- och nackdelar vars applicerbarhet är kopplat till hur långt fram i tiden analysen efterfrågas. För en analys som ligger långt fram i tiden kan man med hjälp av ett ÖFD dra generella slutsatser vad det gäller överflygningar av vissa typer av satelliter. Ligger den efterfrågade analyspunkten i relativt nära framtid kan man med fördel istället göra en ny propagering av satellitbanorna med hjälp av aktuella banparametrar. Se användarexempel i avsnitt 4.4. Utöver nyttjande av ÖFD för långsiktig planering kan det även finnas en pedagogisk nytta av ÖFD då de bidrar med ytterligare ett visualiseringsverktyg för förståelse av rymddomänen.

Under arbetets gång har ett antal antaganden och avgränsningar gjorts, framförallt har fokus legat på bandynamiken och inte de sensorer som kan nyttjas på en satellit, varken vad det gäller sensorernas synfält eller hur olika sensorers upplösning spelar roll för deras värde i en underrättelseprocess. Med kunskap om olika metoder för att ta fram överflygningsdata finns det en möjlighet att välja den metod som passar bäst vid ett givet tillfälle. I en planeringsprocess kan man därefter överlagra kunskap om sensorer och underrättelsecykeln hos en motståndare för en mer nyanserad överflygningsanalys. Resultatet ska därför ses som ett steg i en utvecklingsprocess mot en militär rymdlägesbild.

5.1 Framåtblick

Det finns idag mer än 60 nya satellitkonstellationer för jordobservation som är under uppförande. Om flertalet av dessa slutförs skulle det innebära minst ett tiofaldigande av antalet satelliter som övervakar jorden inom ett fåtal år [9]. Det är dock inte sannolikt att alla dessa satsningar kommer att realiseras, men faktum kvarstår att spaning och övervakning från rymden (SÖR) inte längre är en unik förmåga och högupplösta satellitbilder över jorden är i princip tillgängliga för alla som vill och kan betala för dem. USA försökte tidigt att begränsa spridningen av förmågan i form av export- och försäljningshinder för kommersiella aktörer, men det ökade snarare utvecklingstakten i andra länder [5].

Marknaden för satellitbilder är idag dynamisk och förändras snabbt. Som en följd av detta är det svårt att bedöma exakt hur framtiden kommer se ut. Det finns en hypotetisk framtid om en ”geoint-singularitet”, definierad som den tidpunkt när det finns en global, kontinuerlig övervakning av jorden tillgänglig för allmänheten [10]. Upphovsmakaren till detta scenario är dock tydlig med att det finns stora frågetecken inför en sådan framtid, exempelvis krävs utveckling inom ett antal teknikområden, inte minst inom kommunikation, nedlänkning och hantering av data.¹⁰ Att något är teoretiskt möjligt är inte heller samma sak som att det obönhörligen kommer ske. Mer närliggande scenarier, som bland annat undersöker marknaden för jordobservation, ifrågasätter om efterfrågan som motiverar en sådan singularitet kommer uppstå [5]. En indikation på att så kanske inte är fallet i närtid är de uttalanden som bolaget Maxar gör om sin kommande Worldview Legion-konstellation. Istället för att lägga alla sex satelliter i solsynkron bana som hittills

¹⁰ Hela jorden upplöst i 3 m/pixel motsvarar ca 6 petabyte. För en kontinuerlig uppdatering av denna datamängd krävs en kraftig utbyggnation av marksegmentet och datalagringskapacitet.

varit brukligt har man valt att lägga fyra av dem i en bana med lägre inklinations.¹¹ Orsaken till detta sägs vara att 95 % av jordens befolkning bor inom +/- 50° latitud och att satelliterna därmed bättre täcker upp den delen av jorden med störst kommersiell efterfrågan på jordövervakningsinformation [11]. Validiteten i detta argument nyanseras ytterligare i en avhandling som behandlar frågan närmare [12]. Om detta skulle innebära ett trendbrott med en majoritet av framtida satelliter som fokuserar på övervakning av lägre latituder går idag inte att svara på. Sannolikt kommer det snarare innebära en mer balanserad fördelning av övervakningssatelliter med en större andel övervakningssatelliter med lägre inklinations än vad som finns idag. Det vill säga, även om det finns ett stort antal nya konstellationer för jordövervakning aviserade så kommer de kanske inte alla kunna observera polarområdena och Sverige.

Vad innebär då detta snabbt ökande antal jordövervakningssatelliter för Försvarsmakten? Problematiken som spridd förmåga till kontinuerlig övervakning innebär för militära organisationer är inte ny, redan 2001 skrev US Air Force Academy en rapport om ämnet [13]. Det finns dock ännu idag möjlighet att genom anpassningar av teknik, taktik och uppträdande minska risken för att bli observerad från satellit. Men det förutsätter god förståelse för rymddomänen samt en relevant, militär, rymdlägesbild. Efterhand som marknaden förändras, nya system blir operativa och nya typer av sensorer når kommersiell mognad kommer det krävas fler och större uppträdandeanpassningar. Det är också sannolikt att det finns en omslagspunkt när det anpassade uppträdandet begränsar egen operativ förmåga mer än vad det begränsar motståndarens förmåga att observera verksamheten.¹² Hur långt fram i tiden denna omslagspunkt ligger eller vilka effekter det får för eget uppträdande ligger bortom detta arbete. Vår rekommendation i frågan är däremot att börja analysera det redan idag.

5.2 Fortsatt arbete

Som nämndes i kapitel 3 så kan underlaget – i form av överflygningsdata – till en ÖFD genereras på många olika sätt. I denna rapport valdes propagering av historiska TLE:er. Ett annat alternativ hade varit att välja en annan propagator vilket kan kräva andra banparametrar. Användning av annan propagator kan i dagsläget kräva översättning av banparametrarna till ett annat format, då TLE är det som finns att tillgå. Detta kommer sannolikt se annorlunda ut i framtiden, speciellt om Sverige har en egen nationell rymdlägesbild med tillhörande inmätning av satelliter. Vilket underlag som ger bäst resultat vid planering på 1-12 månaders sikt varierar sannolikt från år till år men hade varit intressant att studera närmare.

En annan intressant aspekt är hur en eventuellt mer balanserad fördelning av jordobservationssatelliter på olika inklinations skulle påverka en ÖFD. Idag ligger majoriteten av dessa satelliter i solsynkron bana och majoriteten av övriga jordobservationssatelliter har för låg inklinations för att kunna observera Sverige. Om denna fördelning ser annorlunda ut i framtiden blir det än mer intressant att studera ÖFD:er för satelliter med lägre inklinations, se Figur 6 där det första diagrammet (55° latitud) innehåller överflygningar av dessa typer av satelliter.

¹¹ De satelliter som i detta arbete ligger i bana med låg inklinations ligger där som en följd av att de skickades upp som sekundär last på uppskjutningar med SpaceX's Falcon-9 för Starlink-konstellationen.

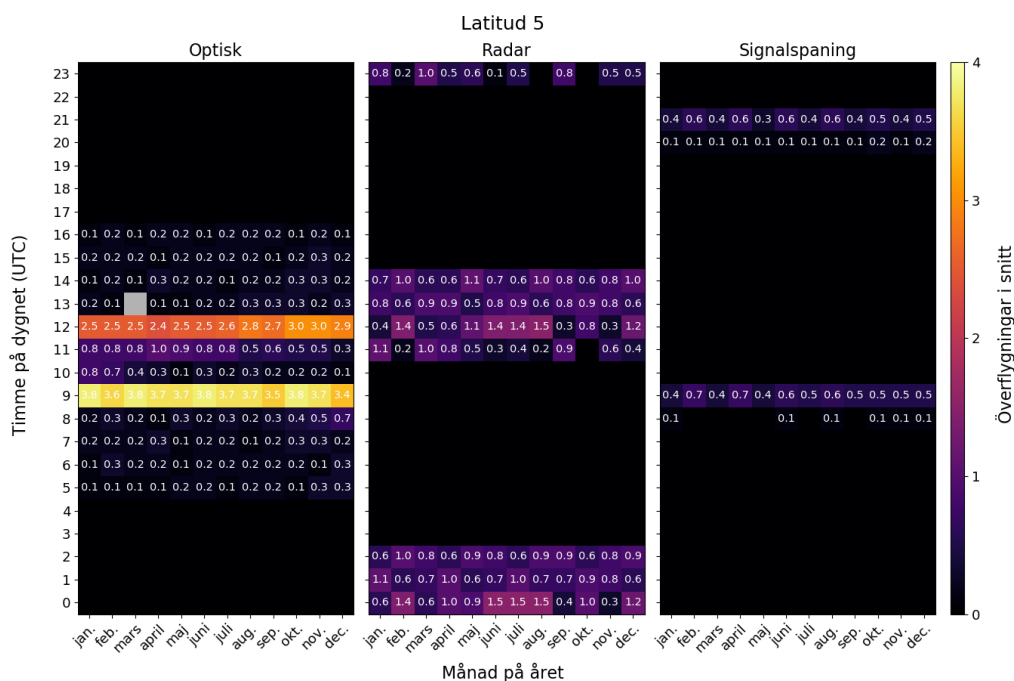
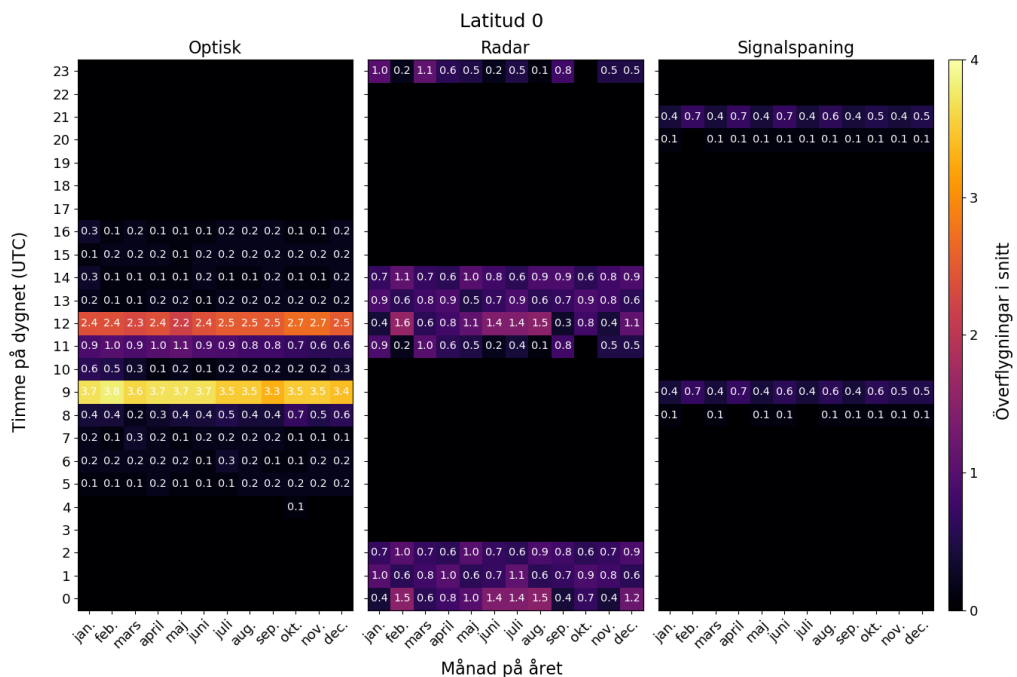
¹² Man göra en analogi till hotbild och syn på hangarfartygen. Under andra världskriget kunde de undgå upptäckt. Så är inte längre fallet idag, men det innebär inte att hangarfartygen tappat sitt strategiska värde.

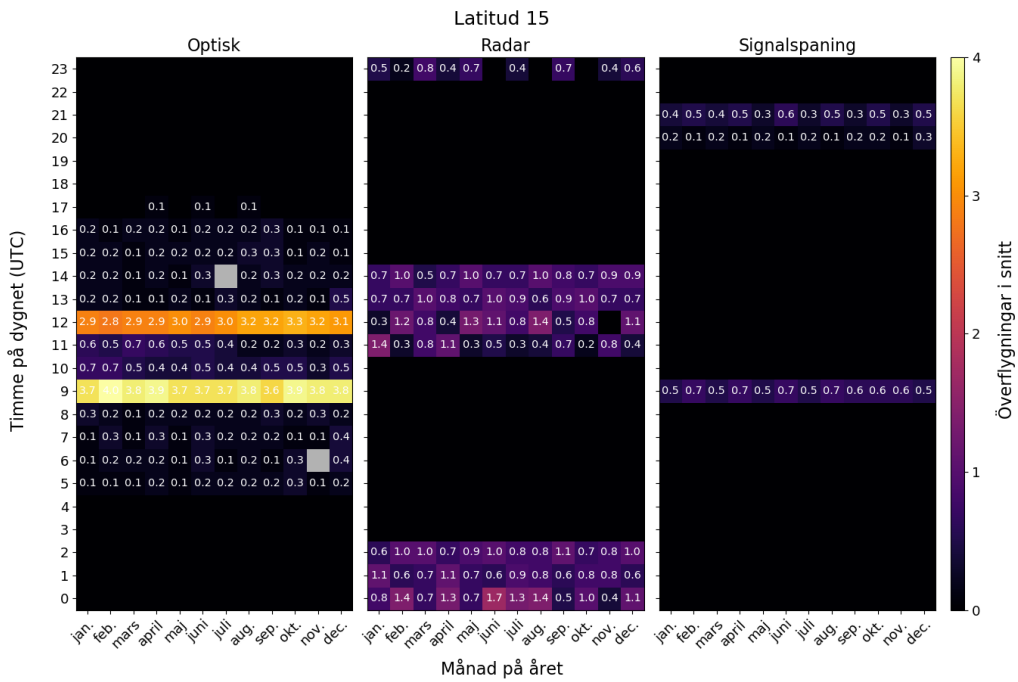
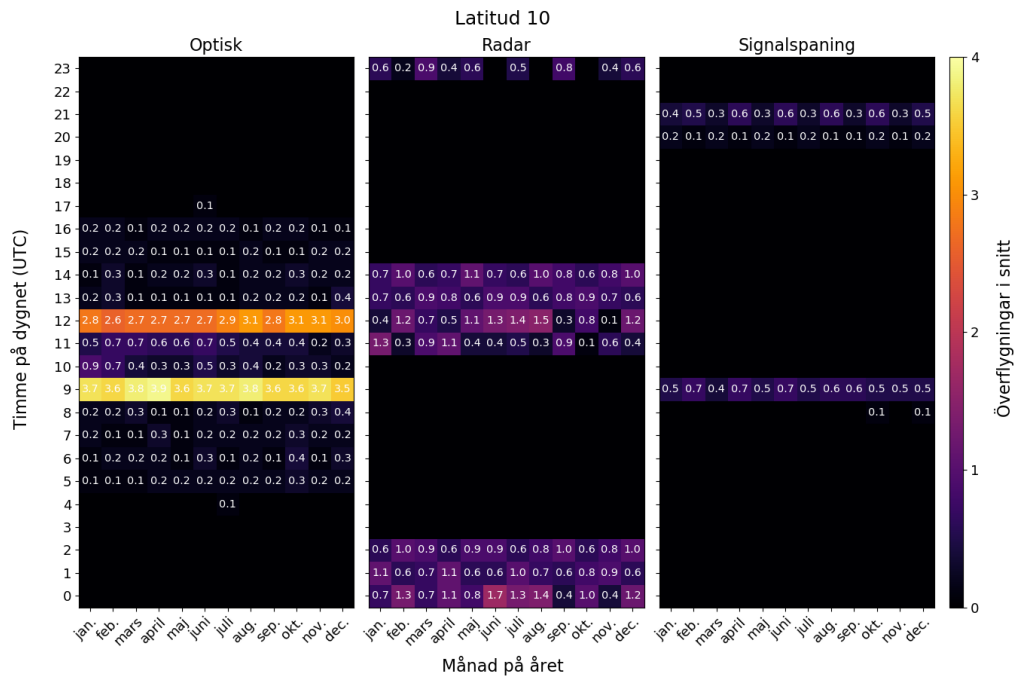
6 Referenser

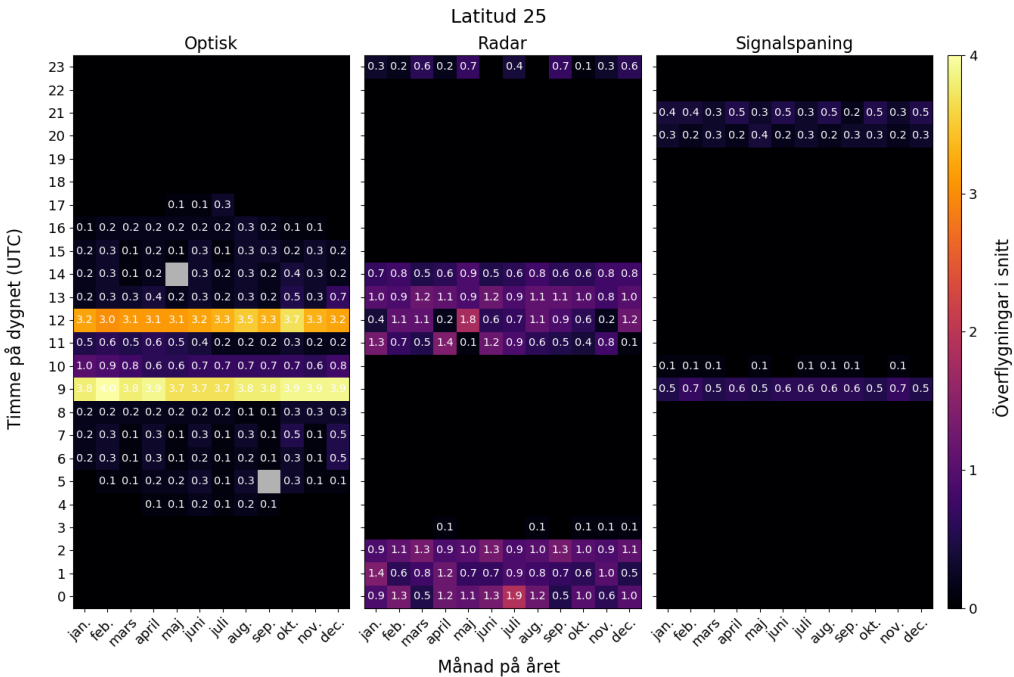
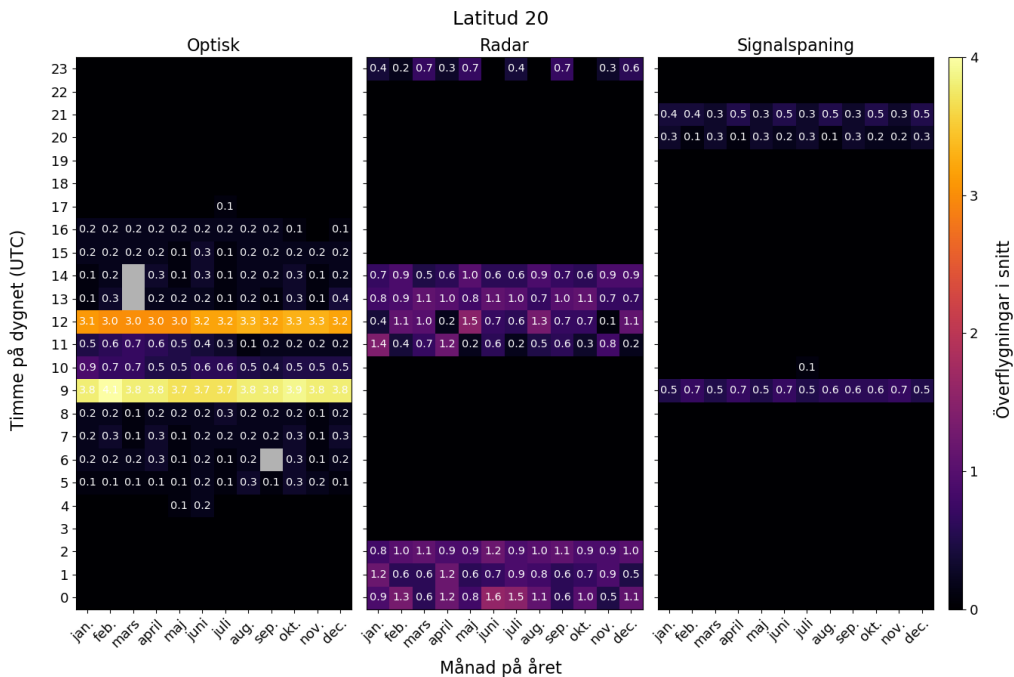
- [1] E. Berglund, G. Bergström, P. Brämning, A. Foyer, M. Garmelius, K. Hallgren, H. Hansson Halsius, J. Stenberg, N. Stensbäck och J. Söderberg, "FOI stöd till Försvarsmaktens förmågeinriktning 2019-2021," FOI, Stockholm, 2021.
- [2] V. Jungnell, "Överflygningsanalys av avbildande jordobservationssatelliter," FOI, Stockholm, 2016 [FOI-R--4320--SE].
- [3] Försvarsmakten, "Doktrin för gemensamma operationer," Stockholm, 2020.
- [4] S. Lindström, K. Hallgren, S. Papadogiannakis, O. Rasmusson, J. Rydqvist och J. Westman, "Omvärldsanalys Rymd 2020 - Fokus på försvar och säkerhet," FOI, Stockholm, 2021 [FOI-R--5077--SE].
- [5] G. Denis, A. Claverie, X. Pasco, J.-P. Darnis, B. d. Maupeou, M. Lafaye och E. Morel, "Towards disruptions in Earth observation? New Earth Observation systems and markets evolution: Possible scenarios and impacts," *Acta Astronautica*, vol. 137, pp. 415-433, 2017.
- [6] Spacenews, "China launches new Gaofen-11 high resolution spy satellite to match U.S. capabilities," 2021-11-22. [Online]. Available: <https://spacenews.com/china-launches-new-gaofen-11-high-resolution-spy-satellite-to-match-u-s-capabilities/>. [Använd 2021-11-24].
- [7] W. McClain och D. Vallado, *Fundamentals of Astrodynamics and Applications*, Springer Netherlands, 2001.
- [8] K. Hallgren, "Försvarsmaktens SSA-demonstrator," FOI, Stockholm, 2020 [FOI-D--0995--SE].
- [9] E. Kulu, "Satellite Constellations - 2021 Industry Survey and Trends," i *Small Satellite Conference*, Utah State University, Logan, USA, 2021.
- [10] J. Koller, "The Future of Ubiquitous, Real-Time Intelligence – A GEOINT Singularity," The Aerospace Corporation, 2019.
- [11] ESA, "WorldView Legion Constellation," eoPortal, [Online]. Available: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/worldview-legion>. [Använd 2021-12-07].
- [12] E. Magliarditi, "Tradespace analysis for Earth Observation Constellations: a value driven approach," Massachusetts Institute of Technology, Department of Aeronautics and Astronautics, Cambridge, 2020.
- [13] B. M. Kasper, "The end of secrecy – Military Competitiveness in the Age of Transparency," Occasional Paper No. 23, Center for Strategy and Technology, Air War College, Maxwell Air Force Base, USA, 2001.

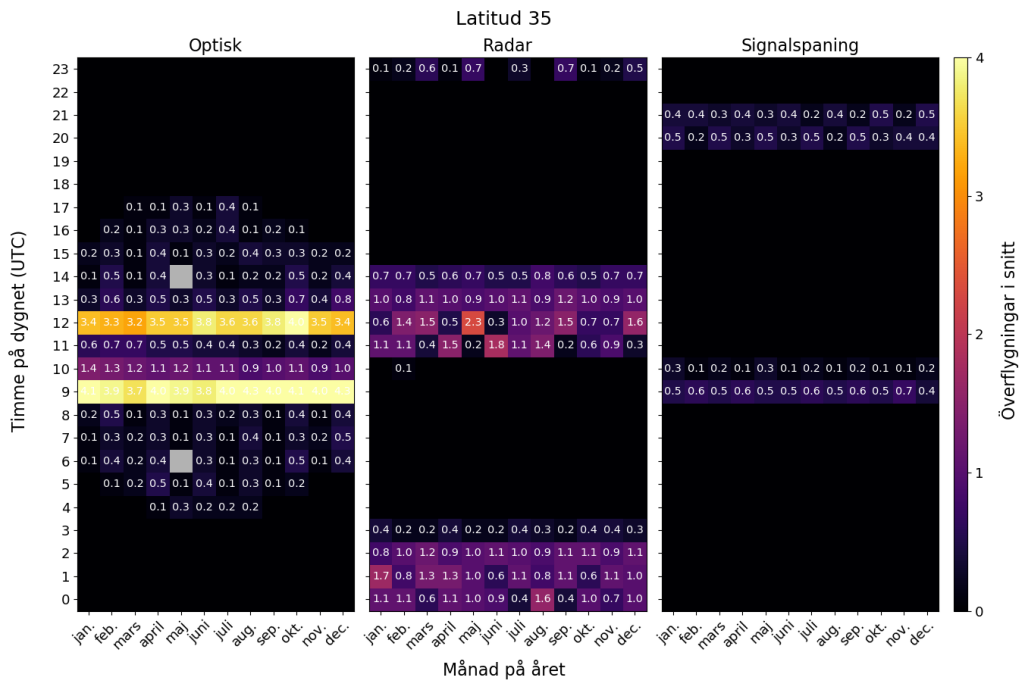
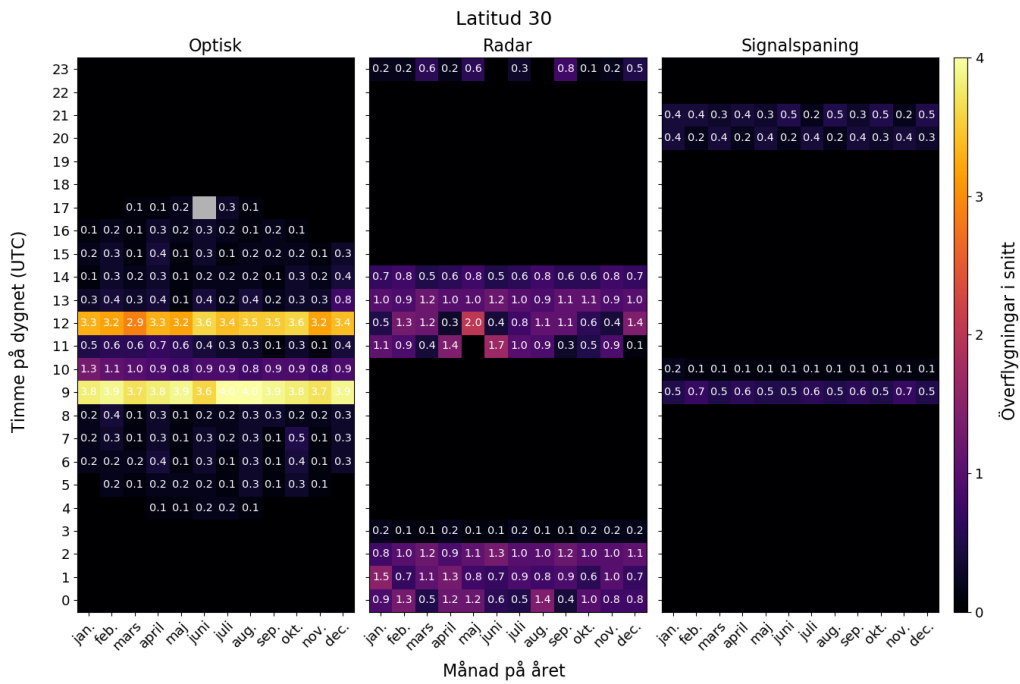
Bilaga A – Överflygningsfrekvensdiagram

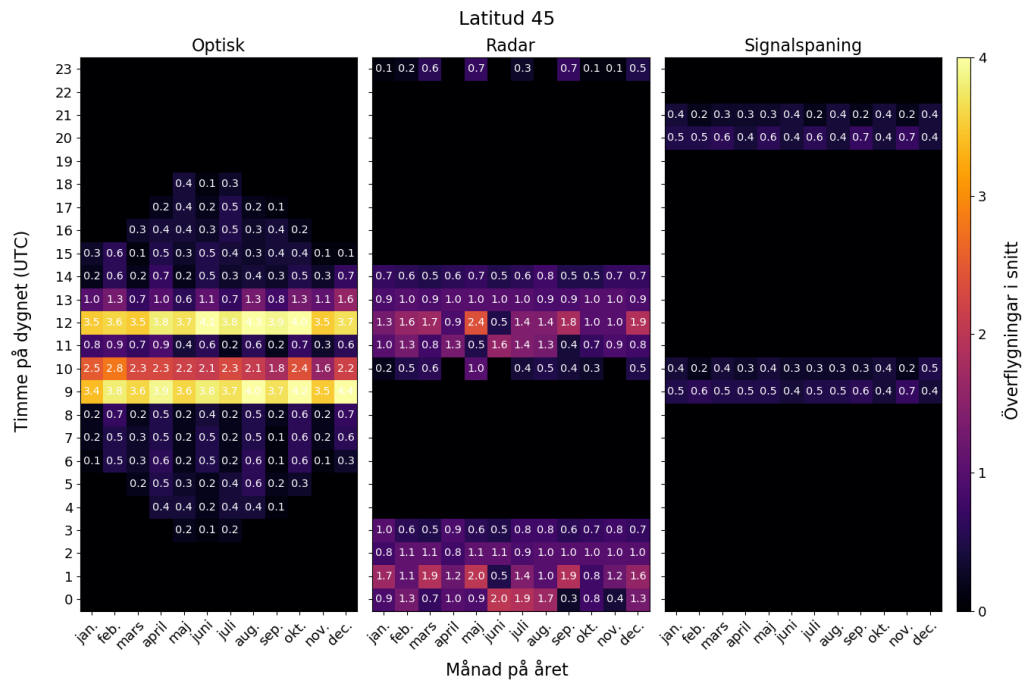
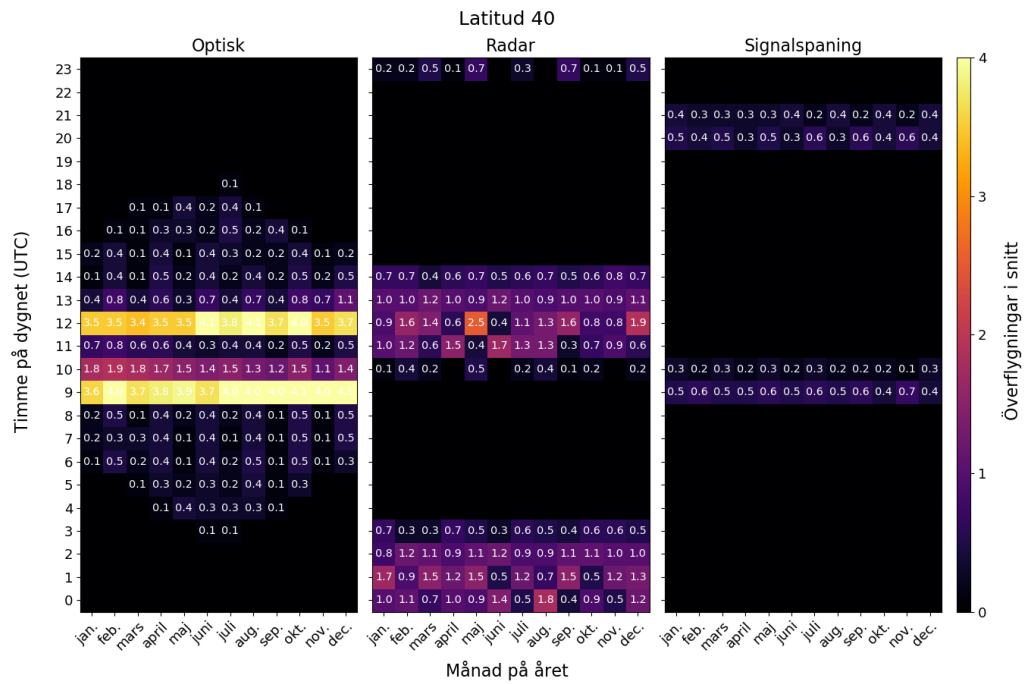
Nedan figurer visar ÖFD för de punkter som används i latitudanalysen i avsnitt 4.3. Samtliga figurer innehåller tre ÖFD, en för varje sensortyp. Notera att skalan kan variera.

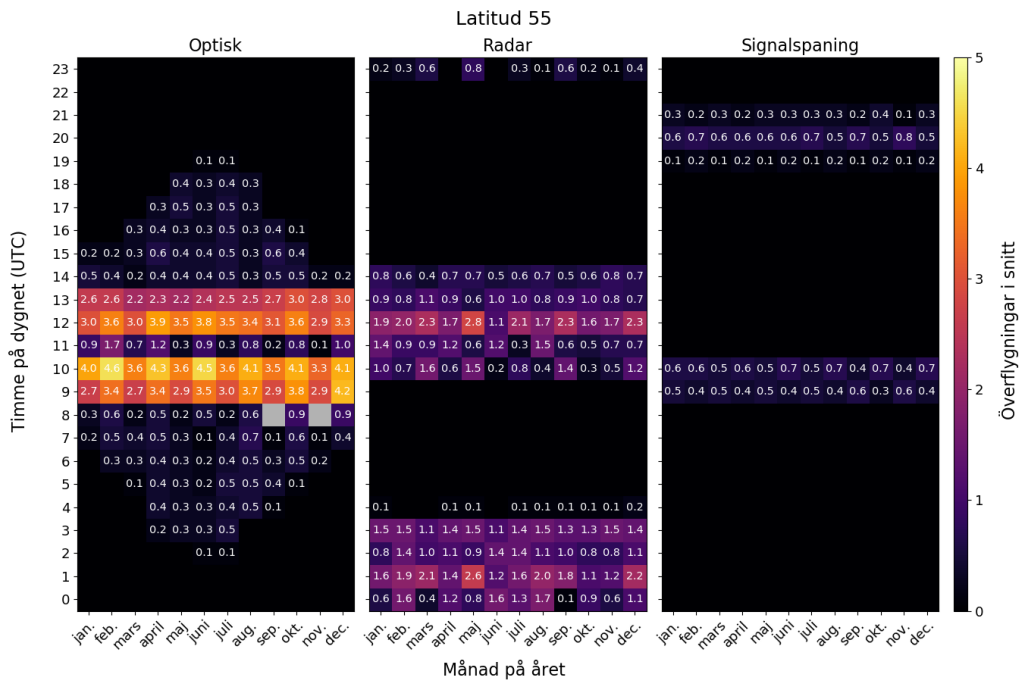
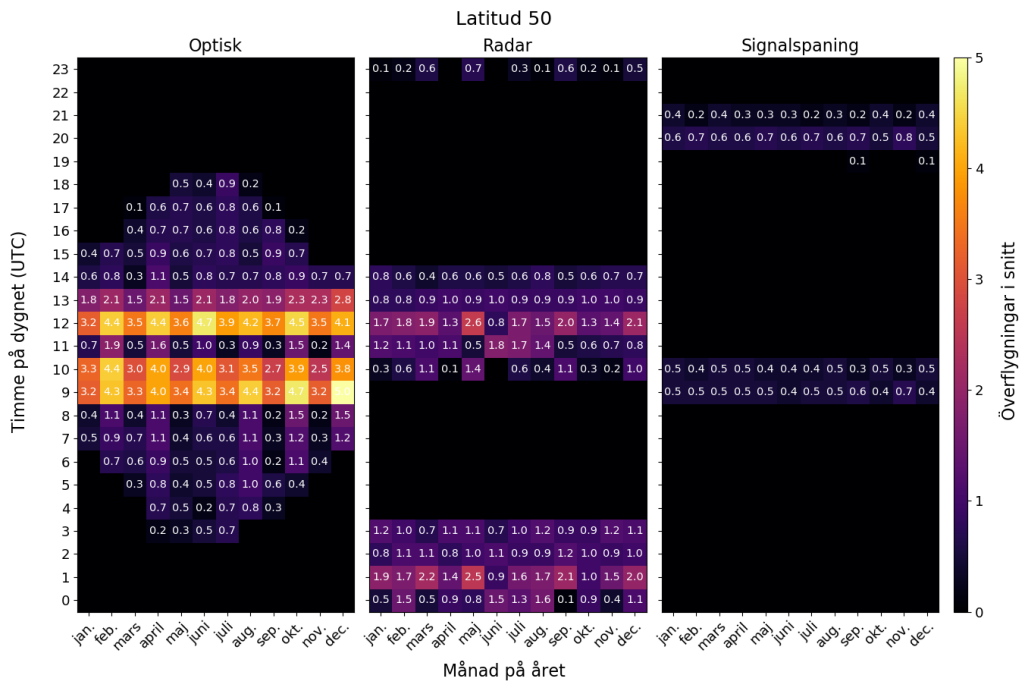


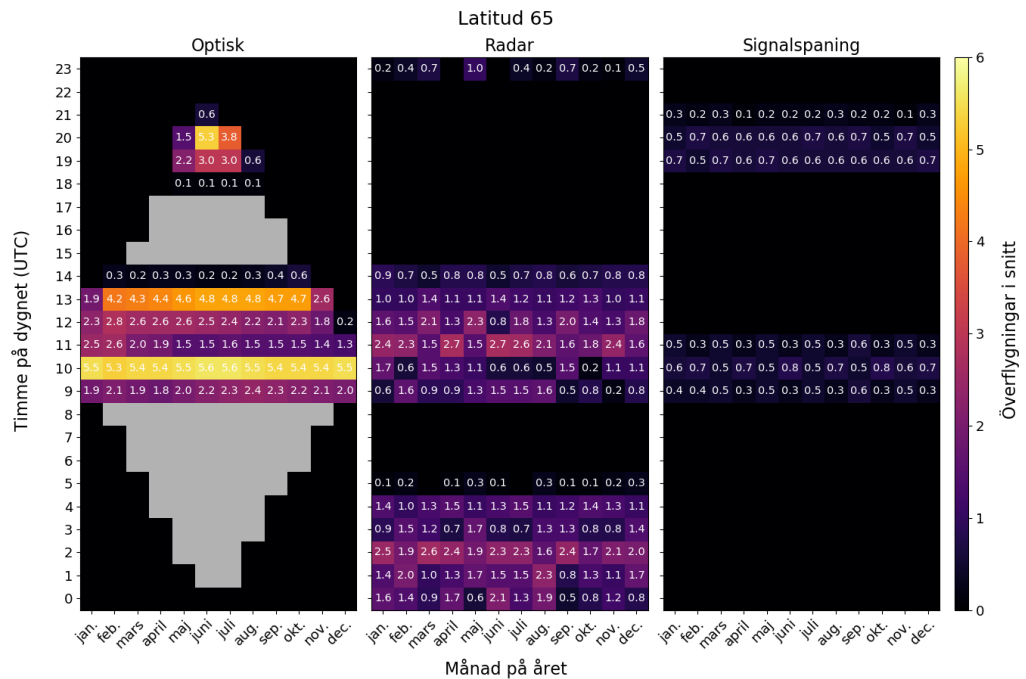
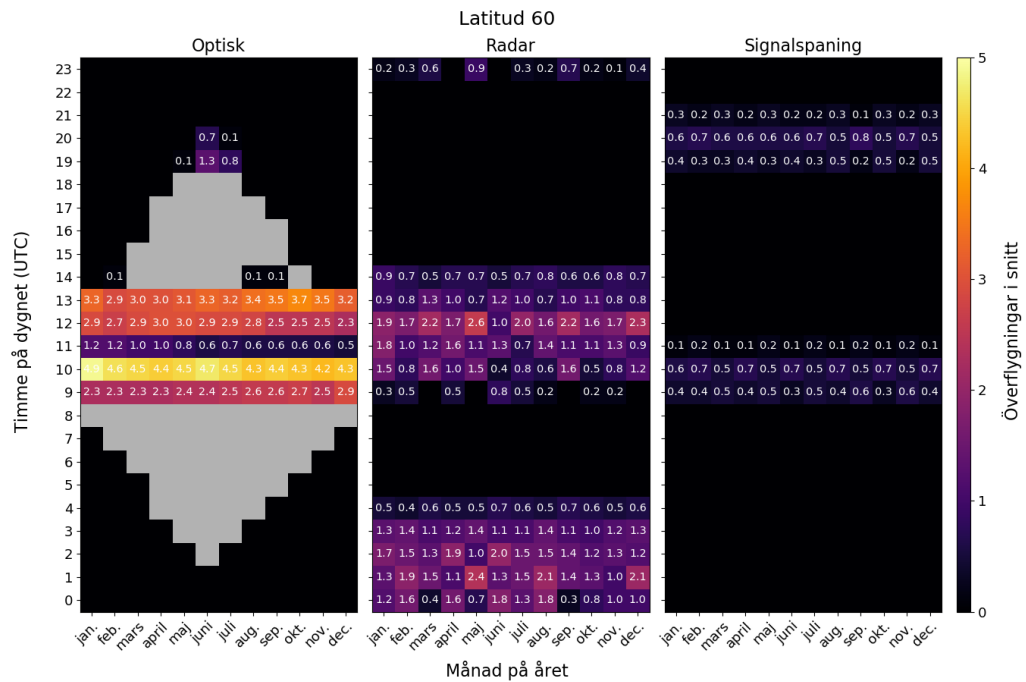


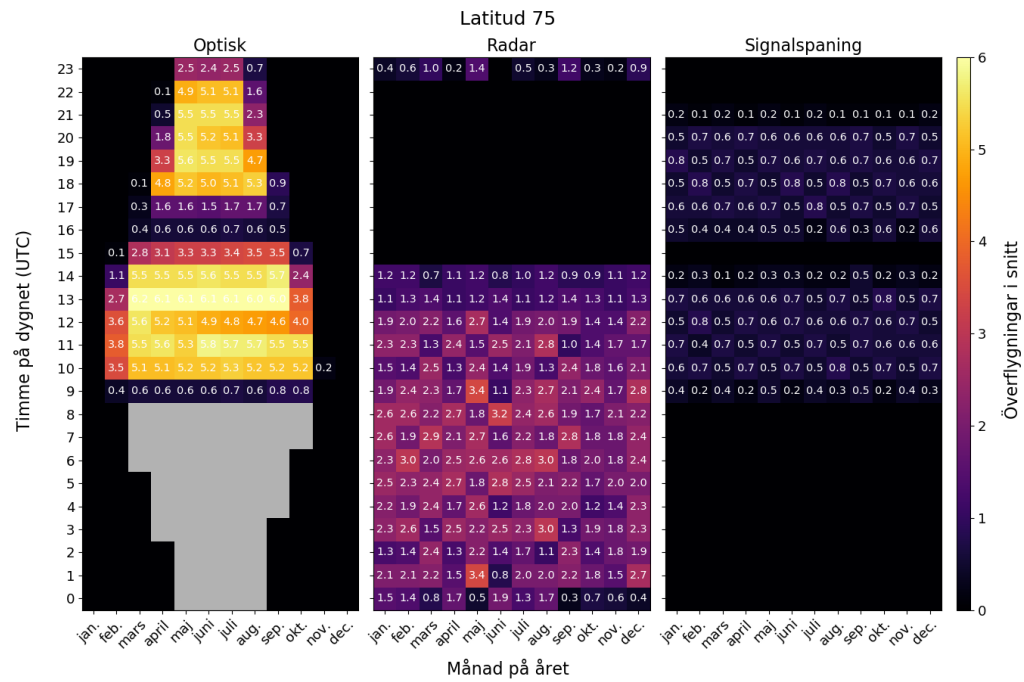
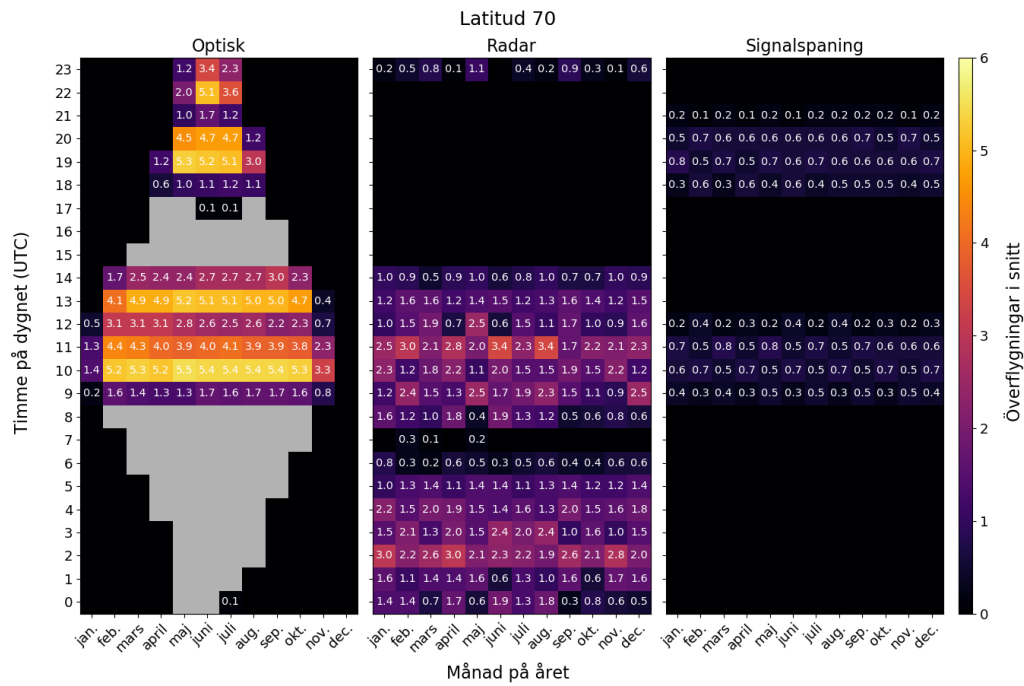


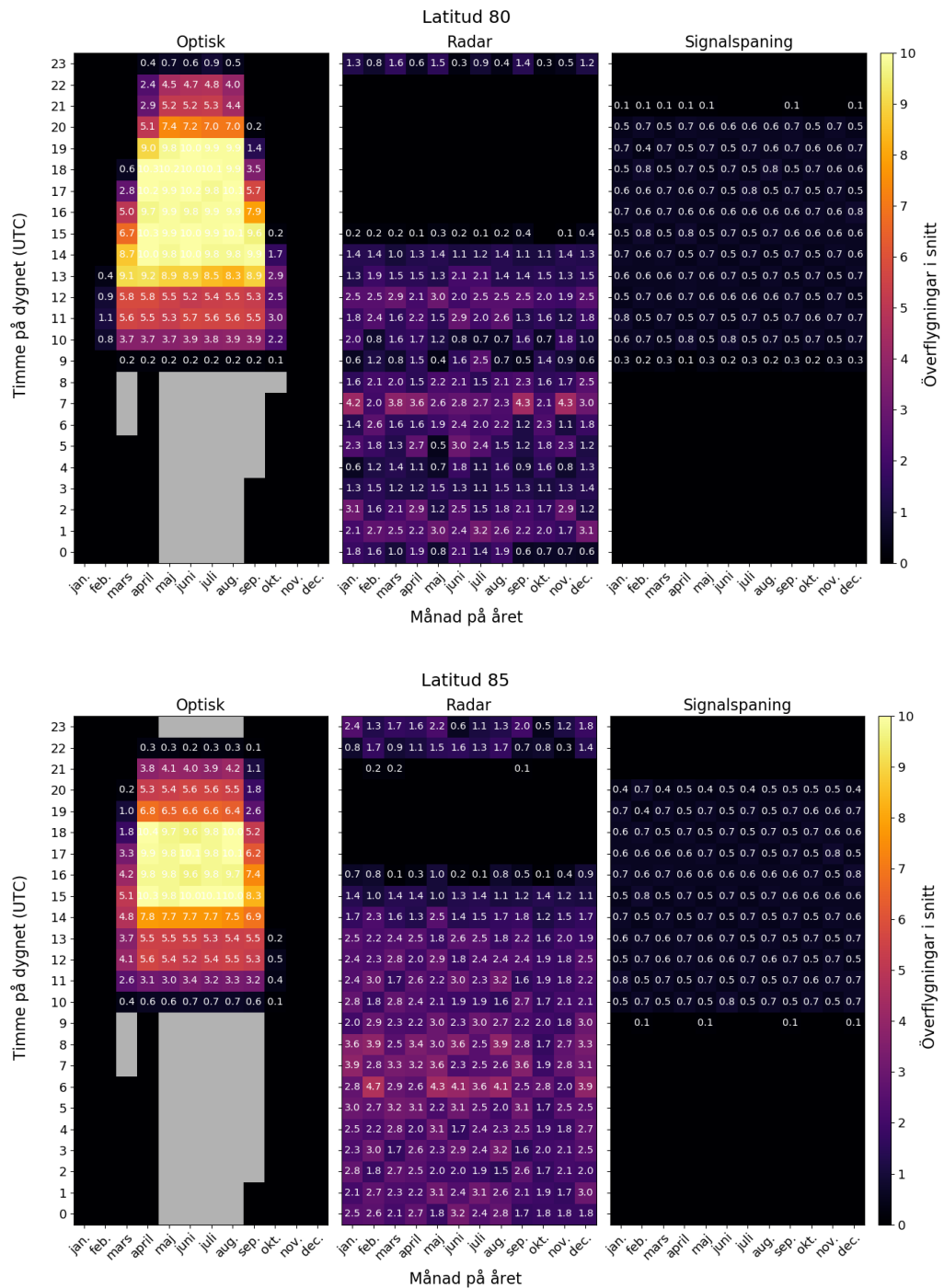












Bilaga B – Satelliturval

Nedan beskrivs de konstellationer som valdes ut för denna analys.¹³ Uppfylld av de urvalsparametrar som specificerades i avsnitt 4.1 ser ut som följer:

- Täckta in de flesta sensortyper
 - ✓ Urvalet täcker in SAR, signalspanings och optiska satelliter.
- Inkludera väl utbyggda konstellationer
 - ✓ Samtliga konstellationer har uppnått operativ drift.
- Representativa banparametrar för respektive sensortyp
 - ✓ SAR-konstellationen ligger i solsynkron bana, vilket typiskt är fallet då det medger kontinuerlig laddning via solceller. Signalspaningskonstellationen är den första operativa i sitt slag. De optiska konstellationerna täcker upp de två typfallen genom att inkludera satelliter dels i solsynkron bana och dels med inklinations kring 50-55°, där de senare mer frekvent kan täcka in de latituder som generellt är av störst ekonomiskt intresse.

ICEYE

Den finska ICEYE-konstellationen, ägd av företaget med samma namn, består 2021-01-01 av satelliterna ICEYE X4 upp till X7. ICEYE var 2019 först med att kunna erbjuda SAR-bilder med en upplösning på under en meter från satelliter i storleksklassen <100 kg. Satelliterna ligger i en solsynkron bana med inklinations 97,7°, banhöjd 550-590 km, period ca 96 minuter. Officiell nuvarande återbesöksfrekvens finns ej angiven, men målet med den kompletta konstellationen av 15 satelliter är angivet som genomsnittlig global återbesöksfrekvens på tre timmar och garanterat fyra överflygningar per dygn. Upplösningen på SAR-bilderna är nu nere i en halvmeter.

Hawkeye360

Den amerikanska Hawkeye-konstellationen, ägd av företaget Hawkeye 360, består 2021-01-01 av satelliterna Hawk-A, Hawk-B och Hawk-C. Hawkeye är den första spelaren på den expanderande kommersiella signalspaningsmarknaden. Satelliterna flyger i tripletter för möjlighet till triangulering av signaler, och den kompletta planerade konstellationen som består av sju sådana tripletter, vilka kommer byggas upp succesivt 2021-2023. De första satelliterna ligger i en solsynkron bana med inklinations 97,7°, banhöjd 570-590 km, period ca 96 minuter.

Hawkeyes nuvarande produkter är RFGeo, som är en kartläggning av RF-signaler från VHF upp till Ku-bandet; *Regional Awareness Subscription* som analyserar beteende hos RF-källor över tid; och SEAKER som är inriktad på sjöfart och spårning av fartyg oavsett om de har på sin AIS-transponder eller försöker att förfälska sin signal.

Återbesöksfrekvens för den kompletta konstellationen av 21 satelliter är angivet som "avsevärt mindre än en timme".

Worldview

Det amerikanska företaget DigitalGlobe blev kända genom sin ikoniska IKONOS-satellit, som 1999 blev den första kommersiella optiska satelliten med upplösning på under en

¹³ Information om satelliterna bygger på företagens egna hemsidor samt Gunter's Space Page: <https://www.iceye.com/>, <https://www.he360.com/>, <https://www.maxar.com/>, <https://www.planet.com/> respektive <https://space.skyrocket.de/>.

meter. DigitalGlobe har sedan 2007 byggt upp ett system av WorldView-satelliter. Snarare än en konstellation så är det ett system av komplementära satelliter, där satelliternas förmågor skiljer sig avsevärt beträffande optiska prestanda. 2021-01-01 fanns det fyra Worldview-satelliter, Worldview-1 upp till Worldview-4, där den sista förklarats inoperabel. Satelliterna ligger i solsynkrona banor med inklinations vinkel kring 98°, banhöjd mellan 350 och 770 km, period mellan 92 och 100 minuter. Det finns inga officiella siffror på återbesöksfrekvens. Upplösningen på de optiska bilderna ligger kring en kvarts meter.

Planet

Amerikanska Planet har två huvudsakliga konstellationer: PlanetScope som består av fyrakilos jordobservationssatelliter kallade Doves, av vilka det nu finns över 100 i bana; samt SkySat, 21 jordobservationssatelliter i hundrakilosklassen. I föreliggande rapport har vi valt ut de mer kvalificerade SkySat-satelliterna. SkySat-satelliterna är uppdelade på två olika bantyper: de tretton första ligger i solsynkron bana med inklinations vinkel 97,2°, banhöjd 450 km och period ca 94 minuter; de sex senare ligger i en bana med inklinations vinkel 53°, banhöjd 400 km och period ca 93 minuter.

Återbesöksfrekvens har angetts till i genomsnitt sju gånger per dag, med upplösning på under en meter.

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



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

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

www.foi.se