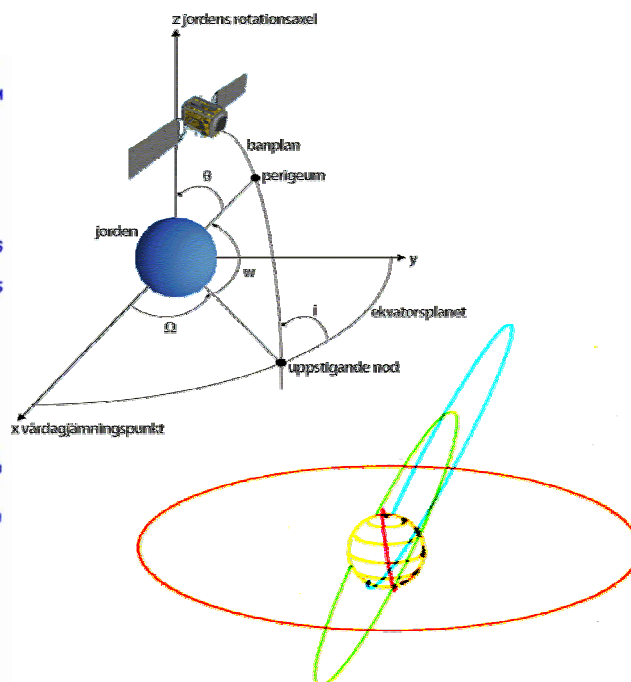
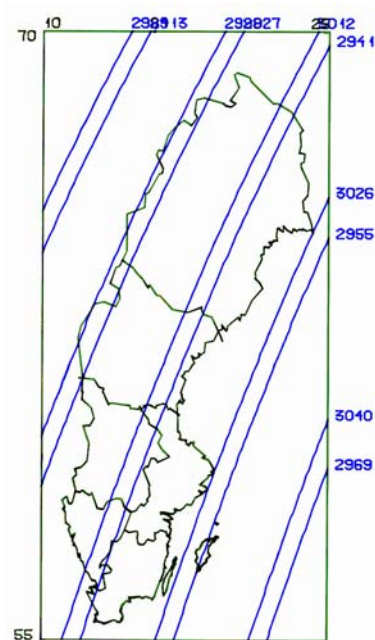


Ulf Ekblad

Elementa om rymdteknik

Satelliter, spaning och kommunikation



TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSINSTITUT

Systemteknik
172 90 Stockholm

Ledningssystem
Box 1165
581 11 Linköping

FOI-R--1594--SE

Mars 2005

ISSN 1650-1942

Teknisk rapport

Ulf Ekblad

Elementa om rymdteknik

Satelliter, spaning och kommunikation

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Systemteknik 172 90 Stockholm Ledningssystem Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1594--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 7. Farkost- och rymdteknik inkl. material	
	Månad, år Mars 2005	Projektnummer E6056
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 71 Obemannade farkoster (FoT 17)	
Författare/redaktör Ulf Ekblad	Projektledare Sandra Lindström	
	Godkänd av Monica Dahmén	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Jörgen Hartnor	
Rapportens titel Elementa om rymdteknik - Satelliter, spaning och kommunikation		
Sammanfattning (högst 200 ord) Satellitbaserade funktioner har under flera decennier varit integrerade i näst intill all mänsklig verksamhet, både civilt och militärt. Informationsinhämtning från rymden är allmänt accepterat i alla sammanhang, såväl militärt som säkerhetspolitiskt. Inom ramen för ett nätverksbaserat försvar ökar betydelsen av att från bl.a. rymdbaserade system kunna erhålla information för att bidra till den gemensamma lägesbilden. Kommunikation via satellit torde utgöra en viktig metod, antingen som alternativ eller komplement, för att kommunicera i ett nätverksbaserat försvar. Satellitnavigering utgör näst intill en nödvändighet vid internationella insatser. I rapporten förklaras, utan att gå in på detaljer, vissa grundläggande principer och begrepp (elementa) när det gäller rymdteknik vad gäller satellitbanor, hur avbildning sker från satellit, samt något om kommunikation och signalspaning. Rapporten behandlar satelliternas rörelser, avbildning, kommunikation och avlyssning (signalspaning). I flera appendix listas kortfattade förklaringar av begrepp och termer som rör satelliter och sensorer. Där finns också en förkortningslista på inom området vanligt förekommande förkortningar samt tabeller över olika uppdelningar av det elektromagnetiska spektrumet.		
Nyckelord Bana, sensor, optik, radar, SAR, signalspaning		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 74 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Systems Technology SE - 172 90 Stockholm Command and Control Systems P.O. Box 1165 SE - 581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--1594--SE	Report type Technical report
	Programme Areas 7. Mobility and Space Technology incl. Materials	
	Month year March 2005	Project no. E6056
	General Research Areas 5. Commissioned Research	
	Subcategories 71 Unmanned Vehicles	
Author/s (editor/s) Ulf Ekblad	Project manager Sandra Lindström	
	Approved by Monica Dahmén	
	Sponsoring agency The Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Jörgen Hartnor	
Report title (In translation) Some fundamentals of space technology - Satellites, surveillance, and communications		
Abstract (not more than 200 words) During several decades, space-based functions have been integrated in almost all human activities, both civilian and military. Information gathering from space is widely accepted in all situations, military as well as security political. Within a network centric defence, the importance of obtaining, from space-based systems, information contributing to the common situation awareness is increasing in importance. Satellite communications will constitute a vital method, either as an alternative or as a complement, for maintaining communication in a network centric defence. Satellite navigation constitutes almost a necessity for international operations. In the report is explained, without going into details, some basic principles and notions (elements) when it comes to space technology concerning satellite orbits, how imaging is done from space, and something about communication and signals intelligence. The report treats satellite movements, imaging, communication, and signals intelligence. In several appendices, short explanations of concepts and terminology concerning satellites and sensors are given. There is also a list of frequently occurring abbreviations as well as tables of divisions of the electromagnetic spectrum.		
Keywords Orbit, sensor, optics, radar, SAR, SIGINT		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 74 pp.	
	Price acc. to pricelist	

Förord

Föreliggande rapport bygger på underlag som har tagits fram i projektet *Rymdtillämpningar för NBF*. Syftet med att publicera föreliggande rapport är att öka den tekniska förståelsen för rymdbaserade system, d.v.s. hur dessa fungerar samt lite om vad som styr och begränsar användningen av rymdbaserade funktioner.

I rapporten förklaras vissa grundläggande principer och begrepp, vilket kan kallas för ”elementa”, när det gäller rymdteknik. Vad som behandlas är satellitbanor, hur avbildning sker från satellit, både optiskt och med hjälp av radar (d.v.s. SAR-system), samt något om kommunikation och signalspaning (”avlyssning”).

De appendix som finns förklarar begrepp och termer som rör satelliter och sensorer. Där finns också en lista på inom området vanligt förekommande förkortningar samt flera tabeller över olika uppdelningar av det elektromagnetiska spektrumet; det elektromagnetiska spektrumet omfattar både optiska våglängder och radio- och radarfrekvenser.

De grundläggande principerna beskrivs allmänt utan att man går in i detaljer. Därför kommer framställningen i vissa fall att vara kanske något approximativ. Detta innebär att rapportens innehåll inte skall användas för att skapa skarpa system; därtill fordras noggrannare beräkningar. Framställningen syftar, som sagts ovan, till att ge en grundläggande förståelse av rymdteknikens elementa.

Innehållsförteckning

1. Rymdsystem.....	8
2. Satelliters rörelser	9
2.1 <i>Keplers lagar</i>	9
2.1.1 Keplers första lag.....	9
2.1.2 Keplers andra lag.....	9
2.1.3 Keplers tredje lag.....	9
2.2 <i>Banelement</i>	9
2.3 <i>Satellitbanor</i>	11
2.3.1 LEO-banor.....	11
2.3.2 MEO-banor.....	12
2.3.3 HEO-banor.....	12
2.3.4 GEO-banan.....	12
2.3.5 Övriga banor.....	13
2.4 <i>Markspår</i>	13
3. Rymdsystem för avbildning	15
3.1 <i>Allmänt</i>	15
3.2 <i>Optisk avbildning</i>	15
3.2.1 Avbildningsprinciper.....	15
3.2.2 Exempel på optiska fjärranalyssystem.....	20
3.2.3 Registreringsbegränsningar.....	23
3.2.4 Upplösning, brännvidd, stråkbredd, datahastighet och datalagring.....	24
3.2.5 Informationsinnehåll och tolkningsbarhet.....	25
3.3 <i>Avbildning med radar</i>	26
3.3.1 Radarprinciper.....	26
3.3.2 Exempel på SAR-system.....	32
3.3.3 Observationsmöjligheter.....	34
3.3.4 Nackdelar och begränsningar med SAR-tekniken.....	34
4. Rymdsystem för kommunikation	36
4.1 <i>Inledning</i>	36
4.2 <i>Användarantennor</i>	36
4.2.1 Antenntyper.....	36
4.2.2 Antennförstärkning och effektförlust.....	37
4.2.3 Antennndiagram och lobbredd.....	40
4.2.4 Gruppantennor.....	43
4.2.5 Antennriktningar.....	43
4.3 <i>Transpondrar</i>	46
4.4 <i>Signalöverföring</i>	46
4.4.1 Sändareffekter.....	46
4.4.2 Frekvenser.....	46
4.4.3 Datahastigheter.....	47
4.5 <i>Exempel på satellitkommunikationssystem</i>	47
4.6 <i>Störning</i>	48

5. Rymdsystem för avlyssning.....	49
5.1 Avlyssningsprinciper	49
5.2 SIS från rymden.....	49
5.2.1 Allmänt	49
5.2.2 Frekvensområde för satellitbaserad SIS	50
5.2.3 Signalstyrkor och dämpning	50
5.3 Exempel på satellitbaserade signalspaningssystem	50
6. Avslutning.....	52
6.1 Sensorjämförelser.....	52
6.1.1 Geometrisk upplösning för SAR relativt optiska sensorer.....	52
6.1.2 Jämförelse av informationsinhämtande sensorsystem	52
6.2 Banjämförelser	53
6.3 Nyttaspekter.....	54
6.3.1 Spaning.....	54
6.3.2 Kommunikation	55
7. Litteraturlista	57
7.1 FOA-/FOI-rapporter	57
7.2 Tidskriftsartiklar.....	57
7.3 Uppsatser och avhandlingar	58
7.4 Böcker	58
7.5 Övrigt	58
7.6 Internet	58
Appendix: Vanliga termer och parametrar.....	60
Appendix 1: Förklaringar av begrepp rörande satellitbanor.....	60
Appendix 2: Förklaringar av satellitrelaterade termer.....	62
Appendix 3: Förklaringar av sensorrelaterade begrepp.....	64
Appendix 4: Förkortningar	67
Appendix 5: Det elektromagnetiska spektrumet.....	71
Våglängdsindelning av det optiska spektrumet	71
Frekvensindelning av radiospektrumet.....	72
Frekvensindelning av radar- och radiospektrumet.....	73
Appendix 6: Militära frekvensband för kommunikation.....	74

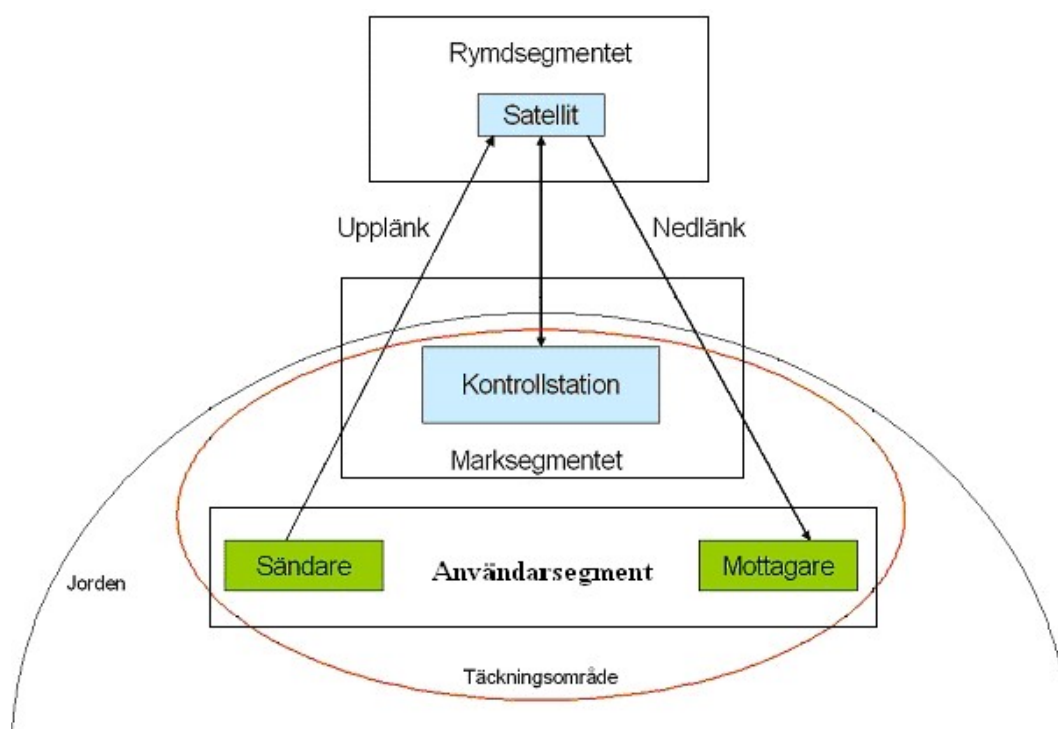
1. Rymdsystem

Rymdsystem brukar generellt delas in i tre delar:

- rymdsegment
- marksegment
- användarsegment

I Figur 1 illustreras dessa. Rymdsegmentet omfattar satelliterna (de delar av systemet som finns i rymden); marksegmentet (kontrollsegmentet) omfattar det som behövs för kontroll och styrning av satelliterna och hela systemets funktion; och användarsegmentet omfattar de delar av systemet som använder sig av systemet och dess tjänster.

Den principiella strukturen i Figur 1 kan komplexifieras. En användare kan t.ex. utgöras av en ”användarstation” som både är sändare av signaler till en satellit och mottagare av data från samma satellit. En sådan station kan t.ex. sända kommandon (s.k. taskingkommandon) till en fjärranalyssatellit för att tala om för denna att den skall göra en viss registrering. Bilden som blir resultatet av denna beställning sänds sedan ner till användarstationen vid lämplig passage av satelliten.



Figur 1: Huvudbeståndsdelarna i ett satellitkommunikationssystem. (Teckning: Ulf Ekblad, FOI.)

2. Satelliters rörelser

De banor som satelliterna kan gå i (d.v.s. sådana banor där de ”faller fritt” och där alltså ingen energi behövs för att driva dem framåt) beskrivs av Keplers tre lagar. Orsaken till att satelliterna rör sig i enlighet med dessa lagar är gravitationskraften (tyngdkraften). För satelliter kring jorden är det jordens gravitationskraft som nästan helt ensamt bestämmer banrörelsen.

2.1 Keplers lagar

Johannes Kepler tog på 1600-talet fram de berömda lagar som beskriver en himlakropps rörelse runt en annan himlakropp och som sedan har fått namnet Keplers lagar. Dessa tre lagar är i dag också tillämpbara för satelliters rörelser i planetsystemet och bl.a. de runt jorden.

2.1.1 Keplers första lag

Keplers första lag säger att en planet/måne/satellit går i en elliptisk bana i ett banplan som skär centralkroppens (t.ex. jorden) masscentrum (d.v.s. dess tyngdpunkt). En ellips är en utdragen cirkel, d.v.s. en cirkel är ett specialfall av ellips. Många satelliter går i cirkulära eller nästan cirkulära banor. Valet av excentricitet (d.v.s. hur mycket ellipsen skiljer sig från en cirkel, som har excentriciteten noll) bestäms av hur uppskjutningen sker och hur andra styraketer ”placerar” satelliten i sin bana. När satelliten väl är i sin bana kan excentricitet ändras genom att raketer på satelliten bränns av på lämpligt sätt.

2.1.2 Keplers andra lag

Den andra lagen säger i princip att planetens/månens/satellitens hastighet är störst när den är närmast den kropp (t.ex. jorden) som den roterar runt och lägst när den befinner sig längst bort från centralkroppen.

2.1.3 Keplers tredje lag

Den tredje av Keplers lagar säger att planeten/månen/satelliten går fortare om de går i låga banor och långsammare i banor på högre höjd (längre avstånd från centralkroppen).

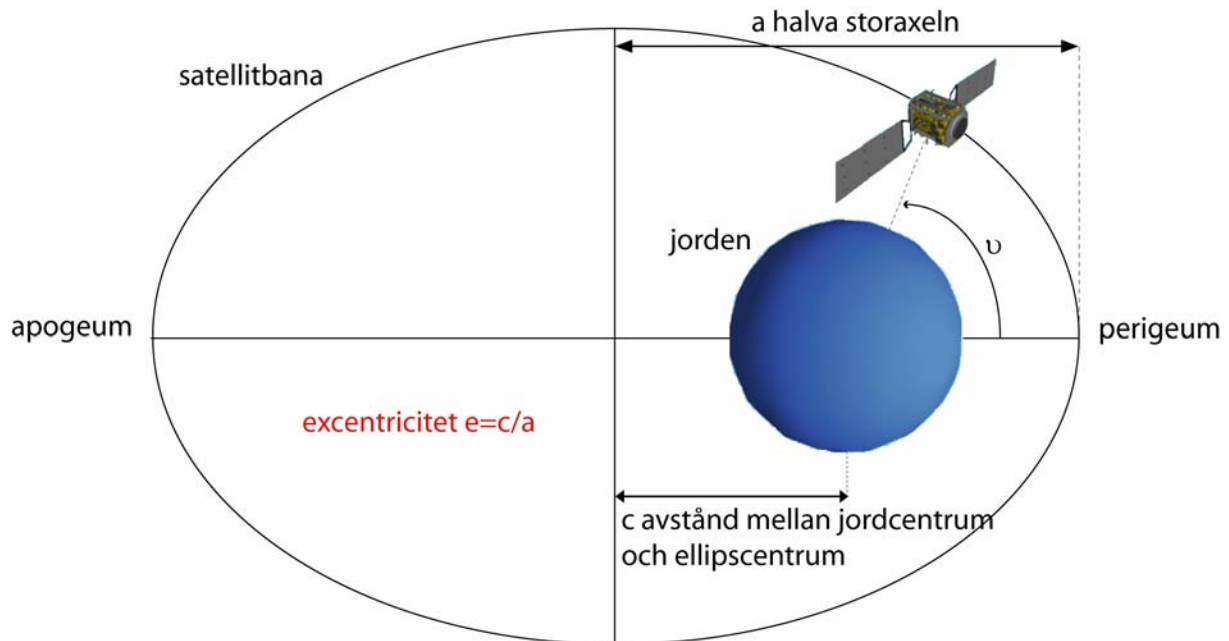
Detta medför att det finns ett och endast ett avstånd på vilket satelliter kan ”stå” stilla över en punkt på jordytan. Detta är det avstånd på vilket de geostationära satelliterna finns. Avståndet är ca 35 800 km från jordytan. Att satelliterna i den geostationära banan tycks stå stilla över ekvatorn beror på att satelliterna rör sig i ekvatorsplanet med samma vinkelhastighet som den som jorden har när den roterar kring sin axel.

2.2 Banelement

Det finns sex banelement¹ för en satellit, också kallade Keplers element, som bestämmer storlek, form, och orientering av satellitbanan samt satellitens position i banan vid en given tid-

¹ Avsnittet om banelement är hämtat från Ulf Ekblad, Marie Andersson, Hans Bergdal, Sandra Lindström, Mats Pettersson, *System av små samverkande satelliter*, FOI-R--1149--SE, Januari 2004.

punkt. Två element bestämmer kretsbanans storlek och form, dessa är ellipsens halva storaxeln a och excentriciteten e (se Figur 2). Avståndet mellan ellipsens ena brännpunkt (den i vilken centralkroppen är belägen) och ellipsens centrum brukar betecknas med c . Om $c = 0$ (d.v.s. $e = 0$) är banan en cirkel annars en ellips, om inte $c = a$ (d.v.s. $e = 1$) för då är banan en parabel. Värdet på halva storaxeln a bestämmer dessutom satellitens omloppstid.



Figur 2: Definition av halva storaxeln a , excentriciteten e och den sanna anomalin v . (Teckning²: Sandra Lindström, FOI.)

För att avgöra var banplanet för satelliten ligger i rymden används parametrarna inklinations i , rektascension Ω och perigeums argument ω (eller w) (se Figur 3). Inklinations i är vinkeln mellan banplanet och jordens ekvatorsplan, rektascension Ω är en vinkel längs med jordens ekvatorsplan mätt österut från den s.k. vårdagjämningspunkten³ (den skärningspunkt mellan himmelsekvatorn och ekliptikan där solen går från södra himmelshalvan till den norra) till satellitbanans uppstigande nod (den punkt i satellitbanan där satelliten passerar genom ekvatorsplanet från söder mot norr) och perigeums argument är en vinkel längs med satellitbanans plan mellan den uppstigande noden och banans perigeum mätt längs med satellitens rörelse. För att slutligen kunna specificera var satelliten är i rymden vid en viss tidpunkt nyttjas begreppet sann anomal v . Detta är vinkeln mellan excentricitetsvektorn (linjen mellan jordens centrum och perigeum) och vektorn som definierar satellitens position (se Figur 3).

² Från Ulf Ekblad, Marie Andersson, Hans Bergdal, Sandra Lindström, Mats Pettersson, *System av små samverkande satelliter*, FOI-R--1149--SE, Januari 2004.

³ På grund av att jordaxeln inte är vinkelrät mot det plan som jorden färdas i runt solen så sammanfaller inte himmelsekvatorn med ekliptikan. Dessa två plan skär varandra längs en linje. I den ena riktningen ligger vårdagjämningspunkten och i den andra höstdagjämningspunkten.

2.3 Satellitbanor

I det här avsnittet indelar vi satellitbanorna i fyra typer: LEO, MEO, HEO och GEO. Detta är inte det enda tänkbara sätt att göra en indelning, men det är en i litteraturen vanligen förekommande indelning.

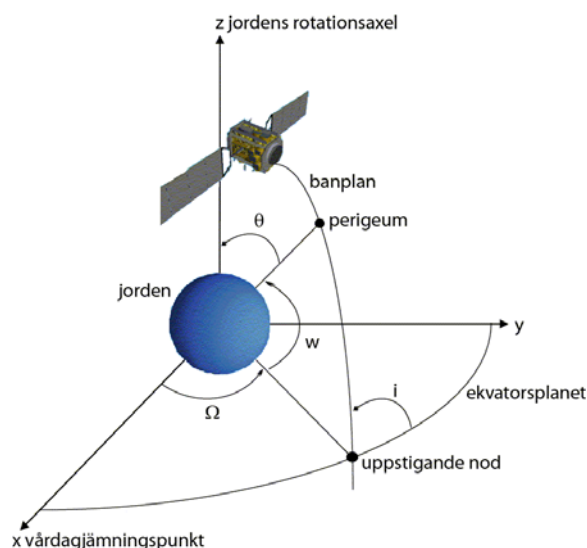
2.3.1 LEO-banor

Definitioner

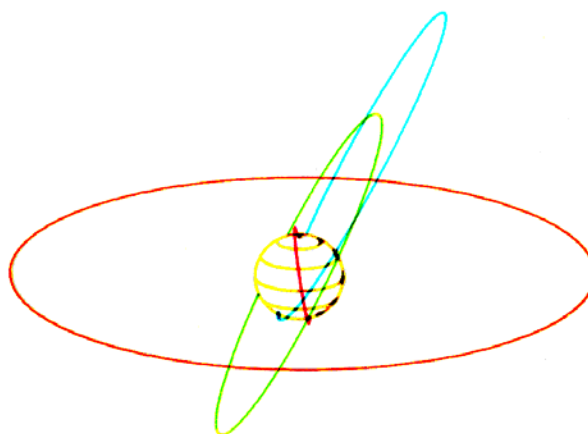
Beteckningen LEO (Low Earth Orbit) används för satellitbanor på låga höjder från ca 200 upp till ca 5000 km. I Figur 4 är en LEO-bana markerad med rött. Användningsområdena för dessa banor omfattar bl.a. fjärranalyssatelliter, forskningssatelliter (för utforskning av atmosfären, den nära rymden samt för astronomisk forskning) och vissa satellitsystem för kommunikation.

Exempel på LEO-banor: polära banor

Satellitbanor som går rakt eller nästan rakt över (d.v.s. passerar ”nära”) jordens poler kallas för polära banor. Ett specialfall av dessa är de s.k. solsynkrona banorna. Detta är banor med en inklination över 90 grader (vanligtvis kring 98 grader). Normalt sett är en satellits banplan fixt i förhållande till stjärnorna. Finessen med solsynkrona banor är att satellitens banplan roterar ett varv kring solen på ett år. De solsynkrona satelliterna passerar alltid en och samma ort (latitud) på samma lokala soltid. Detta beror på att vinkeln satellit-jord-sol alltid är densamma vid varje latitud, eftersom satellitens banplan är fixt i förhållande till solen..



Figur 3: Parametrar som bestämmer satellitbanans orientering i rymden. (Teckning⁴: Sandra Lindström, FOI.)



Figur 4: Fyra exempel på satellitbanor visade skalenligt från perspektivet 20 grader ovanför ekvatorsplanet i vilket GEO-banan ligger (orange). MEO-banan (grön) som visas här representerar en bana för navigeringssatelliter. Molniya-banan är blå och ett exempel på en solsynkron LEO-bana visas i rött. (Datorteckning: Ulf Ekblad, FOI.)

⁴ Från Ulf Ekblad, Marie Andersson, Hans Bergdal, Sandra Lindström, Mats Pettersson, *System av små samverkande satelliter*, FOI-R--1149--SE, Januari 2004.

2.3.2 MEO-banor

Satellitbanor på höjder mellan LEO och GEO benämns på engelska ofta för MEO (Medium Earth Orbit). Detta är vanligen cirkulära satellitbanor företrädesvis inom höjdintervallet 10 000 – 20 000 km, men det kan sträcka sig från 5000 till 35 000 km. Till användningsområdet för denna typ av banor hör de moderna navigeringssystemen som det amerikanska GPS och det ryska GLONASS. Det kommande europeiska navigationssystemet Galileo kommer också att utnyttja MEO-banor. I Figur 4 ges ett exempel på en bana för en satellit i ett navigationssystem i grönt.

2.3.3 HEO-banor

Definitioner

Satellitbanor som är extremt elliptiska brukar på engelska betecknas HEO⁵ (Highly Eccentric Orbit). Det är framförallt den s.k. Molniya-banan (se nedan) som är extremt elliptisk. I de flesta fall är det annars mest praktiskt att använda cirkulära banor. Ibland, åtminstone tidigare, användes elliptiska banor för spaningssatelliter. Excentriciteten var dock inte så stor att de brukar benämnas HEO (Highly Eccentric Orbit).

Exempel på HEO-bana: Molniya-banan

Molniya-banan är en starkt elliptisk bana med en perigeumhöjd på ca 500 km och en apogeumhöjd på ca 40 000 km. Inklination är ca 63 grader (se Figur 4, blå ellips). En satellit i en sådan bana får en omloppstid på ca 12 h och av dessa kan ca 8 användas för kommunikation över t.ex. norra halvklotet. Med tre satelliter kan kontinuerlig täckning fås över t.ex. det norra halvklotet. Fördelar är bl.a. hög elevationsvinkel, medan nackdelar är bl.a. icke-stationariteten samt lång varierande tidsfördröjning.

Det är nästan uteslutande Sovjetunionen som har använt Molniya-banan för kommunikations-satelliter och den används fortfarande av Ryssland.

2.3.4 GEO-banan

Beteckningen GEO (Geostationary Earth Orbit) används för den geostationära banan som ligger ca 35 800 km ovanför ekvatorn (se Figur 4, orange cirkel).

Satelliter i geostationär bana kan täcka in nästan halva jordklotet. Tre satelliter brukar användas för att täcka in hela jorden, förutom polarområdena. Fördelar med GEO-banan är bl.a. stationariteten, medan nackdelar är bl.a. det långa avståndet, som rakt ovanför ekvatorn är ca 35 800 km över ekvatorn och från Sverige ca 40 000 km, med bl.a. en märkbar tidsfördröjning (i Sverige ca 0,27 s) i sambandet som följd.

De flesta kommunikationssatelliterna går i dag i den geostationära banan. De ”svenska” Sirius-satelliterna (som numera ägs endast till 25 % av NSAB och resten är utlandsägt) är exempel på kommersiella satelliter för TV- och dataöverföring i GEO.

⁵ HEO står ibland för High Earth Orbit, d.v.s. banor utanför GEO. Att här har valts att använda HEO i betydelsen starkt elliptiska banor är för att dessa speciella typer av banor är värda ett eget fack.

En stor fördel med geostationära satelliter är att en och samma satellit "hänger" över en punkt på ekvatorn. Därmed kan en sådan satellit sända till ca 40 % av jordytan och lämpar sig således för sändning till ett mycket stort antal mottagare, s.k. broadcasting.

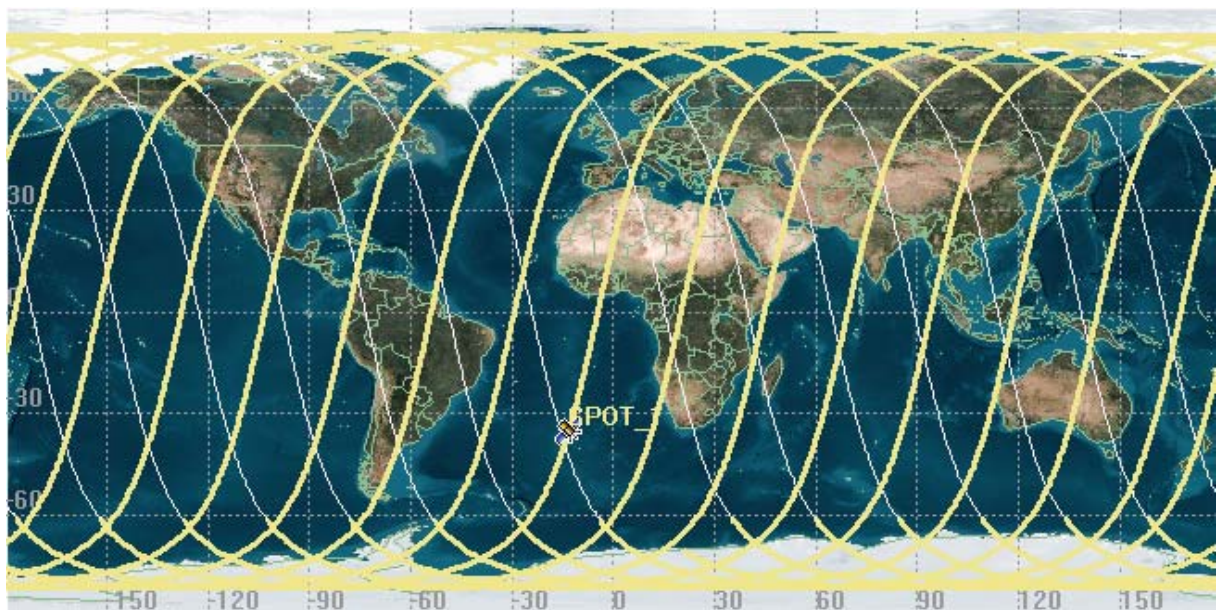
2.3.5 Övriga banor

Vid uppskjutning av en GEO-satellit placeras denna först i en LEO-bana varefter en raketmotor ger den en puff ut mot GEO-banan. Banan ut till GEO får formen av en cirkelbåge eller en del av en spiral. Denna bana som tar satelliten från LEO till GEO kallas på engelska för "geostationary transfer orbit" (GTO), d.v.s. ungefär "övergångsbana till GEO".

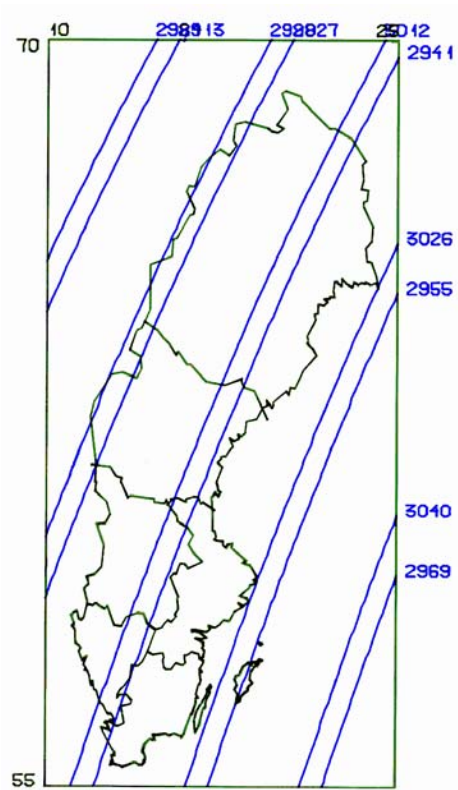
En bana som har samma omloppstid som tiden det tar för jorden att rotera ett varv kring sin axel (d.v.s. ett dygn) kallas för geosynchronous orbit (GSO). Det kan t.ex. vara cirkulära banor på samma banhöjd som för de geostationära satelliterna men med en inklinations skiljd från noll, d.v.s. satelliten behöver inte ligga i ekvatorsplanet.

2.4 Markspår

Under en satellits rotation runt jorden passerar den över olika områden på jorden eftersom samtidigt som satelliten far runt jorden roterar jorden kring sin rotationsaxel. Satellitens passage över jordytan kan ritas upp som en linje som en tänkt lodlinje rakt under satelliten skulle markera på jordytan. Denna linje kallas markspår eller banspår (se Figur 5 och Figur 6). Beroende på satellitbanan (banhöjd, omloppstid, excentricitet) ser ett sådant markspår olika ut. Dessutom kan ett sådant markspår ritas ut för en längre eller kortare tid.



Figur 5: Markspår under ett dygn för SPOT 1 i oktober månad. Dagpassager (då satelliten är solbelyst; satelliten kan inte göra observationer under hela denna del av banan) visas i fet gulmarkering; nattpassager som vita smala streck. Satelliten rör sig under dagpassager från norr till söder; nattpassagerna går från söder till norr. Satelliten gör 14,2 varv per dygn runt jorden vilket ses av de 14 markspåren i figuren. (Beräkning i STK)



Figur 6: Tio dygns markspår (enbart dagpassager) av SPOT 1 över Sverige och dess närhet. Skillnaden mellan två grupper av parvisa markspår är ett dygn och skillnaden mellan de två markspåren i ett par är fem dygn.

3. Rymdsystem för avbildning

3.1 Allmänt

De banor som används vid avbildning beror på syfte och sensor. Vädersatelliter eller satelliter som avbildar jorden för meteorologiska ändamål finns i många fall i GEO. Fjärranalys och spaningssatelliter går i LEO-banor. De civila och kommersiella fjärranalyssatelliterna med optiska sensorsystem går ofta i solsynkrona banor, som är ett specialfall av polära banor.

Grunderna för avbildning från satellit är i princip samma som för vilken avbildning som helst, d.v.s. någon form av fotografering med hjälp av elektromagnetiska vågor. I det här kapitlet är det inga andra typer av avbildning som behandlas. Vad som tas upp här är avbildning med optisk teknik och med radarteknik.

Avbildning med optisk teknik är i princip vanlig fotografering utnyttjande den elektromagnetiska strålning, inom det optiska våglängdsområdet, som kommer från de objekt som avbildas. I första hand är det ljus som reflekteras från objekten och ljuskällan när det gäller fotografering från rymden är solen.

Utanför det synliga spektrumet med något längre våglängd finns IR-områden, där IR står för infrarött (ljus) och kallas ofta för värmestrålning. IR-området kan indelas i NIR (nära IR), MIR (mellan-IR) och TIR (termisk IR). TIR är det egentliga värmestrålningsbandet. Optisk avbildningsteknik omfattar även dessa våglängdsband.

Den största skillnaden mellan värmefotografering och vanlig fotografering ligger på den ljusabsorberande biten (filmen, CCD:erna). Dagens teknik medger inte att lika små CCD-celler används vid värmefotografering som vid fotografering i det synliga delen av spektrumet. Detta medför att bilderna från värmekamerorna får sämre upplösning.

På ytterligare längre våglängder finns radar- och radiofrekvensbanden. Till skillnad från optisk avbildning (om vi bortser från avbildning med hjälp av laser) bygger radaravbildning på detektion av den från sensorn utsända reflekterade strålningen.

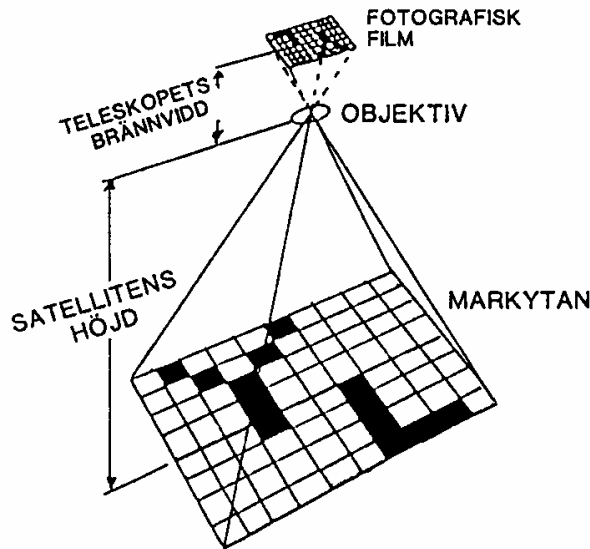
3.2 Optisk avbildning

3.2.1 Avbildningsprinciper

Ett optiskt system (teleskop med lins eller spegel) koncentrerar det på jorden reflekterade solljuset på den bildalstrande sensorn, som kan vara en fotografisk film, ett magnetband (videoband) eller en elektro-optisk sensor. Historiskt sätt användes först fotografisk film (se Figur 7) och kort därefter också videoband. Numera är det bara vissa militära satelliter som använder fotografisk film. Den digitala bilden som alstras av den elektro-optiska sensorn sänds, efter att kanske först ha lagrats ombord på satelliten, ner till en nedtagningsstation.

I Sverige finns två nedtagningsstationer, dels stationen i Esrange och dels den nyare stationen i Sturup. Exempel på täckningsområden för dessa visas i Figur 8 och Figur 9. Inom dessa om-

råden kan alltså en satellitbild tas ner i Sverige i realtid, d.v.s. utan att först ha lagrats ombord på satelliten. Täckningsområdet beror på många parametrar som t.ex. banhöjd, länkbudgeten (d.v.s. en sammanvägning av satellitens sändarstyrka, "känsligheten" hos mottagningsstationens mottagningssystem, m.m., vilket bestämmer den lägsta antennvinkel som kan användas). EROS A1 har en mycket svag sändare, vilket gör att täckningsområdet blir relativt begränsat (Figur 8). Täckningsområdet för SPOT 5 (Figur 9) är mer representativt. Skillnaden i täckningsområde beror också på att satelliterna går i banor på olika höjder.



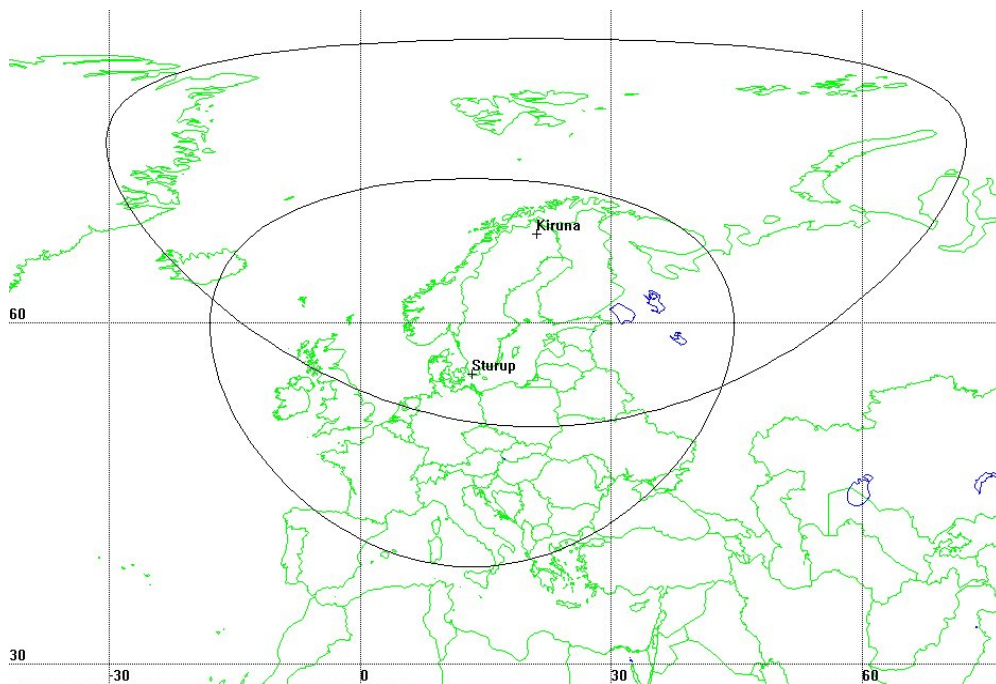
Figur 7: Principen för hur jordens markyta avbildas, med hjälp av objektivet i det optiska systemet, på en fotografisk film.⁶

En fördel med ESRANGE är dess nordliga läge som gör att fjärranalyssatelliter i polära banor vid ca tre av fyra varv kan tömma sitt ombordminne ner till ESRANGE-stationen. Hur väl dessa passager kan användas till nedlänkning av data beror på flera faktorer: hur länge satelliten syns från ESRANGE, hur stort ombordminnet är, datanedlänkingshastighet m.m.

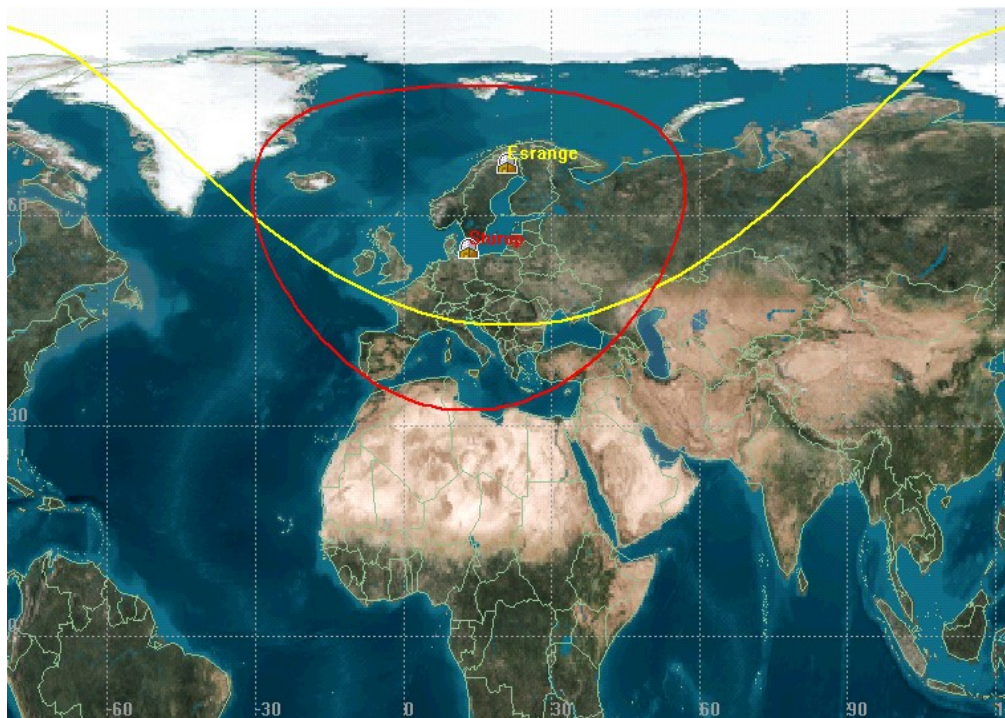
Ett vanligt sätt numera att avbilda jorden är att ha en linjär sensor (bestående av t.ex. flera tusen CCD-element) som är vinkelrätt mot satellitens rörelseriktning. Under satellitens färd sveper den ut ett stråk på jorden. CCD-elementen avläses successivt under passagen. Varje sådan avläsning ger då ett bildelement (en pixel). På engelska kallas ett sådant system för pushbroom system och sensorn en pushbroom scanner eller along-track scanner. Detta illustreras i Figur 10.

Ett annat sätt är att använda ett system som på engelska kallas cross-track (eller whiskbroom) scanner. Detta är ett system där en spegel rör sig fysiskt på ett sådant sätt att ett område tvärs satellitbanans riktning täcks av sensorn. Sensorns IFOV (Instantaneous Field Of View) kommer då att under satellitens passage svepa över jordytan.

⁶ Från Lars B. Wallin, Ulf Ekblad, Sven Grahn, Torleiv Orhaug och Ulf Sveding, *Multinationell verifikationssatellit? - en förstudie*, FOA-rapport C 10312-9.3, september 1988.



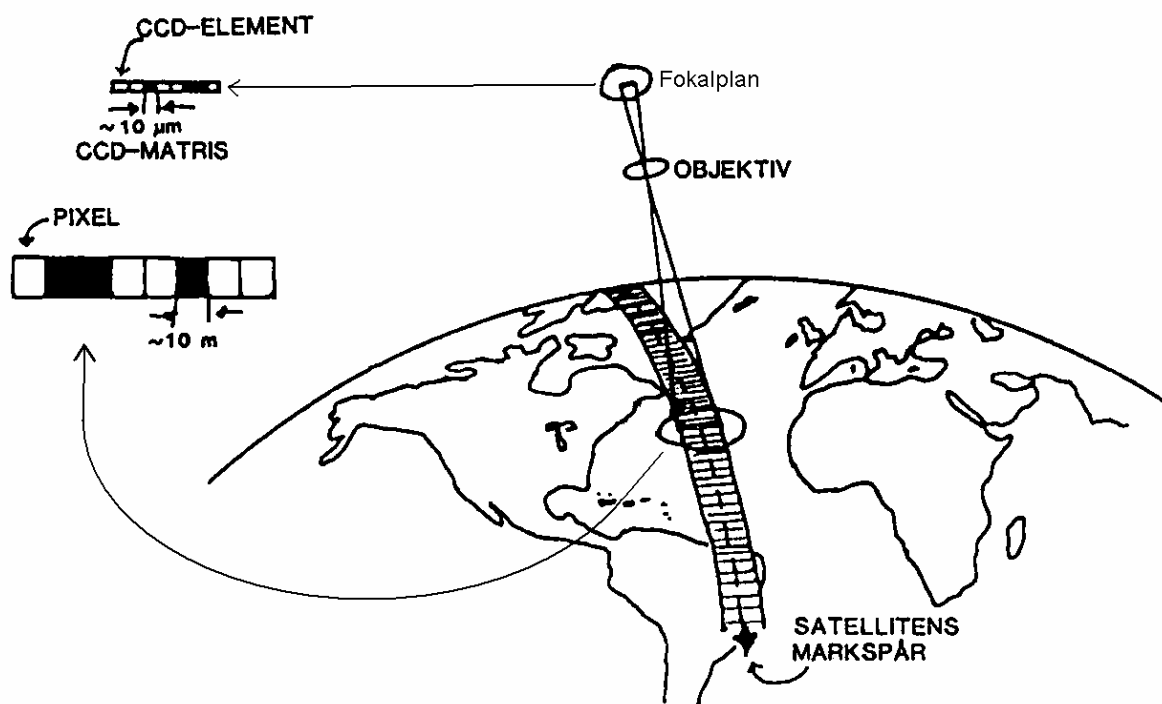
Figur 8: Esranges täckningsområde för EROS A1. Täckningsområdet från Sturup är så som det skulle vara om det fanns en nedtagningsstation för EROS där. (Publicerad med tillstånd från Lantmäteriet, Metria.)⁷



Figur 9: Esranges och Sturups täckningsområden för SPOT 5. Linjerna visar 5 graders elevation, d.v.s. det maximala område som kan täckas av en SPOT 5 när den befinner sig 5 grader över horisonten eller högre. (Bilden producerad i STK och publicerad med tillstånd från Lantmäteriet)

⁷ Ulf Ekblad (red.), Utnyttjande av kommersiella fjärranalysatelliter för DBA-ändamål – En underlagsrapport från FoRMA, FOI-R--0172--SE, Augusti 2001, p. 12.

Genom att antingen vrida på det optiska systemet eller på hela satelliten kan områden till vänster eller höger om satellitens banspår avbildas. På samma sätt kan områden framför och bakom satelliten avbildas. Att man vill titta till höger eller vänster om sitt banspår beror antingen på att man vill se ett område tidigare än vad som skulle vara fallet om man skulle behöva vänta på att området befinner sig rakt under satelliten eller att man vill göra en stereobild av området. Tekniken att först se framför sig och sedan bakom sig kan som sagt utnyttjas till att skapa stereobilder, men den kan också användas för att detektera objekt som har förflyttats under tiden mellan registreringarna.



Figur 10: Principen för hur pushbroom-tekniken fungerar. En bit av jordytan avbildas successivt på en linjär array av CCDer allteftersom satelliten rör sig.⁸

Upplösningen (markupplösningen) X för system med t.ex. CCD-element ges (i en lägsta approximation) av:

$$X = \frac{Dh}{f} \quad (1)$$

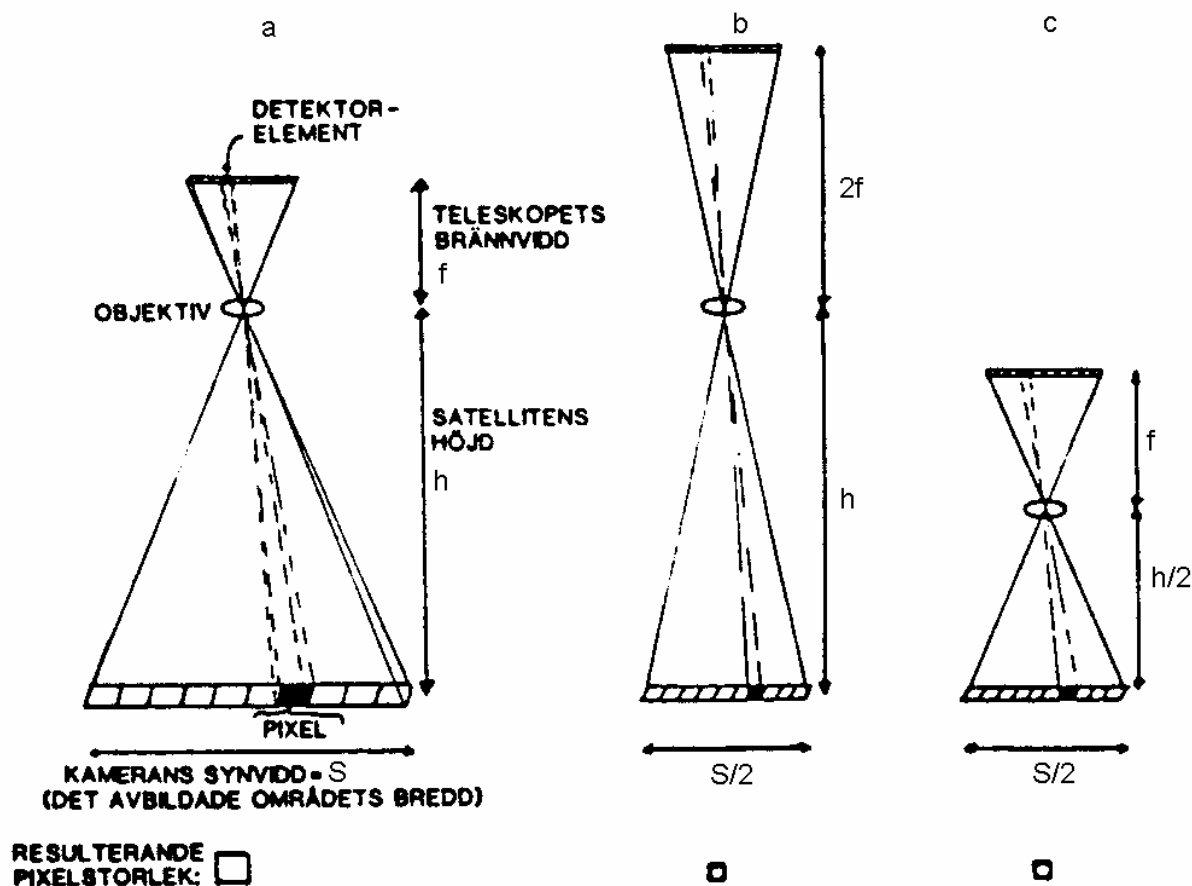
där D är detektorelementets storlek, h satellithöjden och f det optiska systemets brännvidd (fokallängd). Med upplösning menas här alltså storleken på pixeln, d.v.s. kantlängden på den kvadrat som pixeln representerar på marken. Upplösningen kan emellertid inte bli bättre än

⁸ Något modifierad bild från Lars B. Wallin, Ulf Ekblad, Sven Grahn, Torleiv Orhaug och Ulf Sveding, *Multinationell verifikationsatellit? - en förstudie*, FOA-rapport C 10312-9.3, september 1988.

den som ges av diffraktionsbegränsningen. Diffraktion innebär att exempelvis ”elektromagnetiska vågor böjer av vid en skarp kant eller spalt. Diffraktion medför att ljus som träffar en smal spalt inte ger en skarpt avgränsad ljusbild på en skärm. Man får en breddad och något diffus centralbild med svaga sekundära bilder på ömse sidor, åtskilda av mörker på regelbundna avstånd från centrum.”⁹ För att diffraktionsfenomen skall uppträda måste spaltens storlek vara av samma storleksordning som ljusets våglängd. En lins eller en spegel fungerar som en spalt. För fjärranalyssystem i den optiska delen av spektret befinner man sig vanligtvis långt ifrån diffraktionsbegränsningen som ges

$$X_{\min} = \frac{\lambda h}{D} \quad (2)$$

där D är öppningsdiameter för linsen eller spegeln. Ekvation (1) illustreras i Figur 11 och i avsnitt 3.2.4 ges några numeriska exempel.



Figur 11: Illustration av ekvation (1). Den resulterande pixelstorleken X (a) kan halveras antingen genom att teleskopets (objektivets) brännvidd f dubblas (b) eller genom att satellitens banhöjd halveras (c).¹⁰

⁹ Nationalencyklopedin

¹⁰ Något modifierad bild från Lars B. Wallin, Ulf Ekblad, Sven Grahn, Torleiv Orhaug och Ulf Sveding, *Multinationell verifikationssatellit? - en förstudie*, FOA-rapport C 10312-9.3, september 1988.

3.2.2 Exempel på optiska fjärranalyssystem

Av alla de befintliga fjärranalyssystem¹¹ som finns har här några få valts ut för att ge en liten uppfattning om satellitburna optiska fjärranalyssystemers uppbyggnad och prestanda. Systemen är: Ikonos, EROS, OrbView-3 och SPOT 5. Några data för dessa system redovisas i Tabell 1. Figur 12, som visar Ikonos, får illustrera hur en fjärranalyssatellit kan vara uppbyggd.

Tabell 1: Sammanställning av några data om satelliterna Ikonos, EROS, OrbView-3 och SPOT 5

Parameter		Satellit	Quick-Bird	Ikonos	EROS		Orb-View-3	SPOT 5	Pléiades
					A	B			
Uppskjutning [år]			2001	1999	2000	2005	2003	2002	2008
Livslängd (uppskattad) [år]			7	7	6 – 10	10	5	5	5
Storlek [m x m x m]			Längd: 3	1,8 x 1,8 x 1,6		Längd: 2,6		3,1 x 3,1 x 5,7	
Massa	torr [kg]						320	2880	
	med bränsle [kg]		955	726	250	360	370	3030	< 1000
Överföringshastighet till mottagningsstationerna [Mbit/s]			320	320	70	280		2 x 50	450
Upplösning [m]	Pan		0,61	1	1,8	ca 0,8	1	5 (2,5)	0,7
	MS		2,44	4	-	-	4	10	2,8
Banhöjd [km]			450	677	480	ca 600	470	832	694
Bantyp			Solsyn-kron	Solsyn-kron	Solsyn-kron	Solsyn-kron	Solsyn-kron	Solsyn-kron	Solsyn-kron

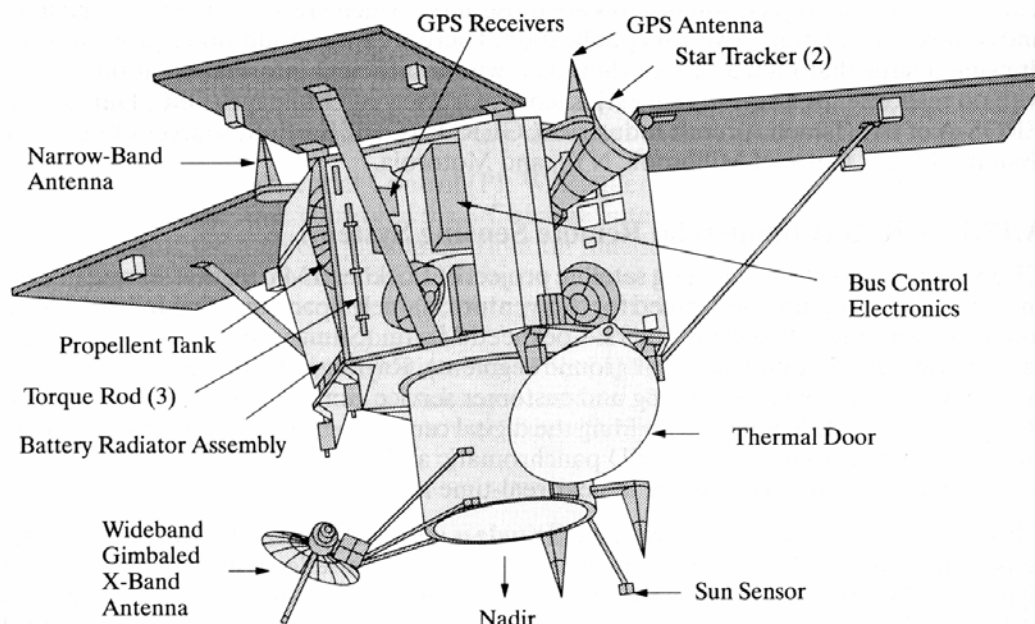
Anm.: Olika uppgifter förekommer i olika källor, speciellt för EROS B som ännu inte är uppskjuten. Ett försök har här gjorts att välja de mest aktuella och troligaste uppgifterna.

QuickBird

QuickBird är, med upplösningen 0,61 m i S/V (svart/vitt), för närvarande den mest högupplösande bland de kommersiellt ägda satelliterna (färgbilderna har upplösningen 2,44 m). Den sköts upp år 2001 och går i en solsynkron bana på 450 km höjd med omloppstiden 93,4 minuter och med inklinationen 97,2 grader. Återkomstfrekvensen är för upplösningen 0,7 m mellan ett och 3,5 dygn beroende på latitud. Satelliten kan vridas så att observationsområdet kan ligga framför, bakom eller vid sidan om markspåret (ut till 30 grader från nadir¹²). Stråkbredden är 16,5 km. Kapaciteten för lagring av bilder ombord på satelliten är 128 Gb. QuickBirds spektralband framgår av Tabell 2.

¹¹ Uppgifterna om fjärranalyssystemen kommer från rapporten *Kommersiellt tillgängliga fjärranalyssatelliter*, Satellus (numera Lantmäteriet, Metria), 2000.

¹² Den punkt på jorden som ligger rakt under satelliten. (Jfr begreppet zenit som är ”punkten” rakt ovanför en punkt på jorden.)



Figur 12: Exempel på hur en fjärranalys-/spaningssatellit kan vara uppbyggd, i det här fallet Ikonos. (Publicerad med tillstånd från Lantmäteriet.)

Tabell 2: Spektralband för QuickBird

QuickBird	Pankromatiskt [μm]	Multispektralt [μm]
Spektralt omfång	0,45 - 0,90	0,45 - 0,52 0,52 - 0,60 0,63 - 0,69 0,76 - 0,90
Angiven noggrannhet ¹³	23 m Med kontrollpunkter: 17 m	23 m Med kontrollpunkter: 17 m

Ikonos

Attityden för Ikonos-satelliten mäts med hjälp av två stjärnsensorer samt en solsensor och styrs av fyra reaktionshjul¹⁴. Satellitläget registreras med hjälp av GPS. Det tar 14 dagar för satelliten att komma tillbaka till samma ställe, men vinklingen av sensorn ger möjlighet till omregistrering med en till tre dagars intervall vid 40:e breddgraden.

Teleskopet i satelliten är av Cassegrain-typ med 10 meters fokallängd, 70 centimeters apertur och med push-broom CCD-detektorteknologi med 32 stegs TDI (Time Delay Integration) för det pankromatiska bandet. Sensorn registrerar samtidigt pankromatiska och multispektrala data. Data komprimeras innan det sänds till mottagningsstationen. Ikonos spektralband framgår av Tabell 3.

¹³ Den noggrannhet som tillverkaren har uppgivit.

¹⁴ Ett reaktionshjul är ett roterande svänghjul och genom att ändra på rotationshastigheten uppstår ett kraftmoment som vrider rotationsaxeln.

Tabell 3: Spektralband för Ikonos

Ikonos	Pankromatiskt [μm]	Multispektralt [μm]
Spektralt omfång	0,45 - 0,90	0,45 - 0,53 0,52 - 0,61 0,64 - 0,72 0,77 - 0,88
Angiven noggrannhet	Horisontellt: 12 m. Med kontrollpunkter: Horisontellt: 2 m; Vertikalt: 3 m.	Horisontellt: 12 m. Med kontrollpunkter: Horisontellt: 2 m; Vertikalt: 3 m.

EROS A och B

EROS A har ett pankromatiskt band och EROS B2 – B6, med första uppskjutning planerad till slutet av 2005,¹⁵ skall utrustas med både ett pankromatiskt och flera spektrala band. Någon eller några av B2 – B6 kan eventuellt komma att utrustas med enbart SAR-sensor. Attityden mäts med hjälp av horisontsensor, solsensor, gyron och magnetometer. Attityden justeras med hjälp av reaktionshjul och ”thrusters”. Återbesöksfrekvensen för EROS A är för punkter med latitud > 40 grader med ett sidtittande på 45 grader två dagar. Teleskopet är av Cassegrain-typ med 3,5 meters fokallängd, 30 centimeters apertur och med push-broom CCD-detektor-teknologi. Vinklingsmöjlighet finns på 45 grader i alla riktningar vilket ger möjlighet till stereo både mellan och inom stråk. Den radiometrisk upplösningen uppges till 11 bitar för EROS A, tio bitar för EROS B-satelliterna. EROS-satelliternas spektralband framgår av Tabell 4.

Tabell 4: Spektralband för EROS A

EROS A	Pankromatiskt [μm]	Multispektralt [μm]
Spektralt omfång	0,5 - 0,9	-
Angiven noggrannhet	Bättre än 100 m.	-

Tabell 5: Spektralband för EROS B

EROS B	Pankromatiskt [μm]	Multispektralt [μm]
Spektralt omfång	0,5 - 0,9	-
Angiven noggrannhet	Bättre än 30 m.	-

OrbView-3

OrbView-3-satelliten uppges inom tre dagar kunna registrera godtyckligt område på jorden. OrbView har två pankromatiska sensorer med en respektive två meters upplösning och fyra multispektrala band med fyra meters upplösning. Ombordminnet har plats för 228 st. 8 km x 8 km pankromatiska enmetersupplösta scener. OrbView-systemets sensorparametrar framgår av Tabell 6.

¹⁵ www.imagesatintl.com/aboutus/satellites/satellites.shtml

Tabell 6: Sensorparametrar för OrbView-3

OrbView-3	Pankromatiskt [μm]	Multispektralt [μm]
Spektralt omfång	0,45 - 0,90 μm	0,45 - 0,52 0,52 - 0,60 0,63 - 0,69 0,76 - 0,90
Angiven noggrannhet	Med kontrollpunkter: Horisontellt: 12 – 60 m / < 12 m.	Med kontrollpunkter: Horisontellt: 12 – 60 m / < 12 m.

SPOT 5

Det franska SPOT-programmet drivs i samarbete med Sverige och Belgien. Programmet inleddes 1986 och den senast uppsända SPOT-satelliten har nummer 5. SPOT 5 har två pankromatiska sensorer med 5 meters upplösning och två multispektrala sensorer med 10 meters upplösning. Upplösningen för SWIR¹⁶-bandet på SPOT 5 är 20 m. Genom att ta två bilder med 5 meters upplösning men med en halv pixels förskjutning along-track erhålls upplösningen 2,5 m. Upplösningen på 2,5 m kallas för ”supermode”. Stereomöjlighet finns dels genom sidtittande bilder tagna under två olika passager och dels längs stråket via ett separat instrument. De två bildinstrumenten kallas HRG (High Resolution Geometry) och HRS (High Resolution Stereo). Sensorparametrarna för SPOT 5 framgår av Tabell 7.

Tabell 7: Sensorparametrar för SPOT 5

SPOT 5	Pankromatiskt [μm]	Multispektralt [μm]
Spektralt omfång	0,48 – 0,71	0,50 – 0,59 0,61 – 0,68 0,78 – 0,89 1,58 – 1,75 (SWIR/MIR)
Angiven noggrannhet	Horisontellt: 10 m; Vertikalt: 5 m.	

Pléiades

Det franska systemet Pléiades planeras ha två satelliter i ett banplan med en pankromatisk upplösning på 0,7 m och multispektral på 2,8 m. Uppskjutning beräknas ske 2008 - 2009.

3.2.3 Registreringsbegränsningar

Bästa observationstid för optisk avbildning är i regel från förmiddag till början av eftermiddag, d.v.s. mellan ungefär kl. 9 och kl. 14. För att morgondimma skall hinna försvinna bör observationerna göras efter kl. 9 och för att stackmoln inte skall hinna byggas upp bör de göras före kl. 14. Detta gör att satelliternas passager inte är jämnt utspridda på dygnet utan att dessa är koncentrerade till i regel mellan kl. 09.00 och kl. 11.00 (lokal soltid).¹⁷

¹⁶ Short Wave Infrared.

¹⁷ Ulf Ekblad (red.), *Utnyttjande av kommersiella fjärranalyssatelliter för DBA-ändamål – En underlagsrapport från FoRMA*, FOI-R--0172--SE, Augusti 2001.

Det finns dock ett antal olika typer av begränsningar som påverkar möjligheterna att snabbt erhålla önskade bilder:

- Återkomstfrekvens
Dessa parametrar beror på de fysikaliska naturlagarna och systemets konstruktion. Mycket högupplösande sensorer med stor flexibilitet i tittvinkel kan teoretiskt göra registreringar varannan dag med full upplösning och möjligen varje dag med reducerad upplösning.
- Mörker, moln, regn och dis
Optisk avbildning från satellit är beroende av solljuset och att det reflekterade ljuset kan nå upp till satelliten. På höga latituder finns det t.ex. ofta inte tillräckligt med ljus under den mörka årstiden. Termisk IR-spaning fordrar klart väder, men spaningen kan ske i mörker och viss spaning kan alltså ske mot ljuskällor nattetid.
- Korrigerings och distribution:
Olika typer av databehandling av bilderna och distributionen av dessa kan ta tid. I princip kan dock en satellitbild (rådatabild utan systemkorrigerings) distribueras i nära realtid, d.v.s. under en timme från registreringen räknat.
- Prioritet
Det kan vara svårt eller dyrt att få den prioritet man vill ha för att säkerställa att man får bilder från rätt plats vid rätt tidpunkt om man köper bilder på den kommersiella marknaden.
- Säkerhetspolitiska restriktioner
Nationella säkerhetspolitiska intressen kan innebära att bilder från vissa områden under vissa tider inte kan fås med den upplösning man vill ha om man är beroende av annan stats system eller system som lyder under annan stats jurisdiktion.

3.2.4 Upplösning, brännvidd, stråkbredd, datahastighet och datalagring

Ekvation (1) beskriver beroendet mellan storheterna upplösning, detektorelementens storlek, satellithöjd och brännvidden. Exempelvis så har det gamla SPOT-systemet i pankromatisk (d.v.s. svart/vit-bild) upplösningen 10 m med CDD-element på 13 μm och brännvidden 1,082 m från höjden 830 km. Bilden registreras med CCD-arrayer med 6000 element vilket ger en stråkbredd på 60 km.

Ett system med CCD-element på 5 μm , brännvidden 10 m och på höjden 400 km får en upplösning på 20 cm. Om sensorn har lika många element som SPOT-systemet ovan fås en stråkbredd på 1,2 km. Detta system skulle kunna vara ett exempel på en militär spaningssatellit.

Det är bara militära spaningssystem som använder sig av banhöjder under ca 450 km när det gäller satelliter som skall ha en viss uthållighet. Detta beror på att när man kommer under banhöjder på ca 450 km så påverkas satelliten av de övre lagren i atmosfären och oregelbundenheter i gravitationsfältet så pass mycket att man måste göra frekventa banhöjningar. Utan sådana skulle satelliten falla ner efter några månader. Detta leder till ett stort behov av ombordbränsle.

För att belysa hur valet av parametrar påverkar ett systems prestanda kan man ta fallet QuickBird. Den designades för att ge en upplösning på 1 m, men genom att välja en lägre banhöjd fick man i stället en upplösning på 61 cm.

En stråkbredd på 1,2 km är inte mycket. Det är som att titta genom ett nyckelhål och därför kallas de amerikanska optiska spaningssatelliterna för KH, följt av ett nummer, där KH står för key-hole (d.v.s. nyckelhål). Genom att ha CCD-arrayer med fler element kan stråkbredden ökas: en dubbling av antalet element ger en fördubblad stråkbredd.

Ju högre upplösning och ju större stråkbredd desto större datamängd alstras. Detta medför att om både upplösning och stråkbredd ökas så ökas också kraven på dataöverföringshastigheten. Högre datahastighet kan medföra att både sändare och mottagare behöver ändras.

Det går att sända ner en större datamängd med lägre datahastighet men det tar då längre tid och ställer krav på buffring av data om nedsändningen sker i realtid. Vid ombordlagring så medför större datamängder ett behov av större datalagringskapacitet. Likaså vid lagringen på marken fordras då också högre datalagringskapacitet.

Större datamängder, d.v.s. i det här fallet större och fler satellitbilder, ställer högra krav på inte bara bildbehandlingsutrustningen i form av datorer utan också på personalsidan med fler och kanske bättre bildtolkar och –analytiker.

Mer, större och bättre medför alltså stora krav på många sätt om man skall kunna utnyttja de förbättrade resurserna.¹⁸

3.2.5 Informationsinnehåll och tolkningsbarhet

Man tenderar lätt att prata om enbart upplösning men vilket informationsinnehåll en bild har eller dess tolkningsbarhet beror av flera faktorer:

- Radiometrisk upplösning.
Ikonos har 11 bitars upplösning (d.v.s. $2^{11} = 2048$ grånivåer) och en skannad flygbild 7 – 8 bitar (128 – 256 grånivåer).
- Graden av multispektralitet, d.v.s. antalet våglängdsband.
Olika våglängdsband är användbara för olika applikationer.
- Synfält, d.v.s. hur vidvinklig kameran respektive sensorn är.
Ikonos har t.ex. ca 1 grads synfält medan en flygbildskamera har 60 - 100 graders synfält. Beträkningsvinkeln från en satellit är, p.g.a. satellitsensorns begränsade synfält, nästan konstant över hela bilden vilket gör den enklare att hantera med automatiserade metoder.

Det är vanligt att man enbart beaktar den geometriska upplösningen när man talar om bilders möjlighet att ge information. I själva verket måste den geometriska upplösningen ställas i relation till den radiometrisk upplösningen, d.v.s. hur många grånivåer bilden har. SPOT-satelliternas pankromatiska bilder med 10 meters upplösning och med 256 grånivåer (8 bitar)

¹⁸ Avsnittet 3.2.4 har genererats efter ebrevs-korrespondens med Jörgen Hartnor, Metria.

är jämförbara ur tolkningssynpunkt med IRS¹⁹ 1C/D som har 5,8 meters upplösning men bara 64 grånivåer (6 bitar).

Multispektral information är användbar för att skilja t.ex. byggnader från träd eller andra klorofyllrika objekt. För att klara detta räcker det dock med vegetationsindexet NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) som bara kräver två band: röd (R) och nära infraröd (NIR):

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (3)$$

Om den geometriska upplösningen är ungefär lika så är generellt sett en satellitbild överlägsen en skannad flygbild och detta av framförallt två orsaker: satellitsensorns mindre synfält och dess högre radiometriska upplösning.

Även andra faktorer kan påverka tolkningsbarheten. T.ex. inställningen av sensorförstärkningen hos SPOT 4 är inställd för ett medelvärde vilket gör att bilder blir mörkare för svenska breddgrader än för ekvatoriella områden.

3.3 Avbildning med radar

3.3.1 Radarprinciper

Klassisk radar

Radar (RAdio Detection And Ranging) är en teknik där elektromagnetisk strålning sänds ut (vanligen i form av pulser) varefter gångtiden för de pulser som återkommer efter att ha reflekterats på målobjektet mäts. Radar används vanligen för att upptäcka, positionsbestämma, följa och avbilda objekt. Typiska exempel på objekt är flygplan och fartyg. De första lyckade experimenten med radar gjordes 1903.

Principen för radar är att elektromagnetisk strålning i våglängdsområdet ca 1 mm – ca 1 m (30 MHz – 30 GHz) sänds från en sändare, reflekteras och tas emot av en mottagare. De elektromagnetiska vågorna alstras i radarenheten (radarn, radarstationen) och tas vanligen emot med samma enhet. Det finns ett flertal olika typer av radar, men det ligger utanför ämnet i denna rapport. Här skall endast kortfattat beskrivas hur grundprincipen fungerar.

I princip fungerar en radar så att strålningen sänds ut i pulser. Avståndet till målet (det som reflekterar tillbaka strålningen) fås genom att mäta gångtiden t för en utsänd puls genom att utnyttja sambandet $v = \frac{s}{t}$. För elektromagnetisk strålning är $v = c$ ljushastigheten 300 000 km/s. Sträckan $s = 2r$ (tvåan eftersom pulsen går fram och tillbaka), där r är avståndet till målet. Detta ger:

$$r = \frac{ct}{2} \quad (4)$$

¹⁹ Indiska fjärranalyssatelliter.

Genom att veta i vilken riktning radarns antenn befinner sig vid sändnings- och mottagnings-tillfällena (dessa blir nära nog identiska p.g.a. ljusets höga hastighet i förhållande till avståndet till målet för den klassiska tillämpningen av radar här på jorden och pulsens korta utsträckning i tid) kan också asimut och elevation till målet fås.

Det finns två klassiska radartyper. Den ena roterar runt en vertikal axel och ger asimuten till målet. Den andra, höjdmättningsradarn, vickar runt en horisontell axel och ger elevationen till målet. Radarekona visas dock ofta på en plan skärm. Den första typen ovan t.ex. visar radar-ekona på en cirkelskiva där radien är avståndet till ekot och vinkeln är asimuten (ett planpolärt diagram).

Avbildande radar

Den bild som alstras av en radar är resultatet av tidsskillnaden mellan utgående och inkommande signal. För spaning med radarsensorer finns det två avbildningstekniker, dels Real Aperture Radar (RAR) och dels Synthetic Aperture Radar (SAR). I RAR-system (icke-koherent radar) bestäms antennens lobbredd av antennens fysiska storlek, d.v.s. upplösningen begränsas av antennlängden. Den geometriska upplösningen parallellt med satellitbanan blir för RAR ekvivalent med motsvarande bredd hos det momentant belysta markområdet. Detta är bl.a. beroende på antennens storlek, den s.k. aperturen (egentligen öppning): ju större apertur desto smalare strålning kan sändas ut (den s.k. loben blir smalare) och med en smalare lob kan mindre objekt särskiljas vilket ju är det som är upplösning.

Av praktiska skäl kan man inte bygga hur stora antenner som helst vilket ju därmed begränsar möjligheterna till att få hög upplösning. Under andra hälften av 1900-talet kom man på ett sätt att kringgå denna begränsning och skapa en konstgjord apertur (på engelska "synthetic aperture") och på så sätt öka upplösningen. Denna princip fungerar som så att radarn placeras på en plattform som rör sig. Genom att på ett sinnrikt sätt hålla reda på de utsända radar-pulserna allteftersom plattformen rör sig kan man bearbeta de insamlade radar-pulserna på ett sådant sätt att radarn fungerar som om den hade en antenn som är större än den fysiska antennen. I princip kan den "syntetiska antennens" längd (den syntetiska aperturen) vara hur lång (stor) som helst, men den begränsas oftast av den fysiska antennens strålningsdiagram. Detta gör att ju mindre fysisk antenn (vid samma våglängd) desto högre upplösning har SAR-systemet. Detta innebär att man i satellitfallet ofta skapar syntetiska antenner som är många kilometer stora. I SAR-systemen (koherent radar) skapas alltså bilder med hög upplösning genom signalbehandling av de mottagna signalernas magnituder och faser.

I asimutled, d.v.s. längs med satellitbanan (se Figur 13 för en schematisk illustration av begrepp och storheter för en puls i satellitburen SAR), blir upplösningen X_a^{puls} :²⁰

$$X_a^{puls} = \frac{h \theta_a}{\cos \theta} = \frac{h \lambda}{L \cos \theta} \quad (5)$$

där h är satellithöjden, θ_a antennens lobbredd i asimutled, θ infallsvinkeln, λ våglängden och L den fysiska antennlängden. Detta är också upplösningen i RAR-fallet.

²⁰ Charles Elachi, *Spaceborne radar remote sensing: Applications and techniques*, IEEE Press, New York, 1988, p. 64.

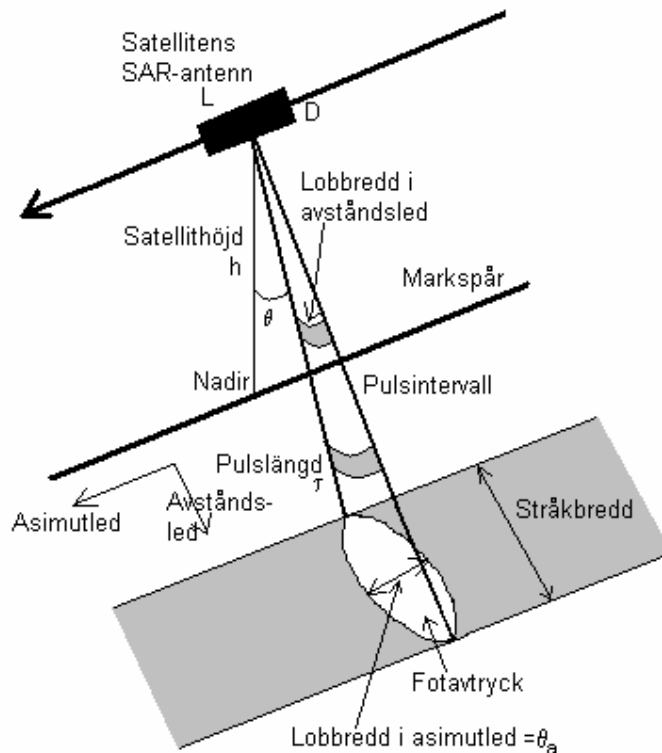
Genom att syntetisera en antenn (den syntetiserade antennen motsvarar en linjär array av antenner²¹ vars totala längd alltså motsvarar den syntetiserade antennens längd) blir upplösningen i asimetled²²

$$X_a^{SAR} = \frac{L}{2} \quad (6)$$

d.v.s. hälften av antennens storlek (längs med färdriktningen). Detta hänger ihop med att ju kortare den fysiska antennen är desto längre kan den syntetiserade antennen bli. Av ekvation (6) ses att upplösning är oberoende av avståndet mellan radarn och det avbildade området. Dessutom blir upplösningen bättre om antennen är mindre. I satellitfallet är

$$\frac{L}{2} \ll \frac{h\lambda}{L \cos \theta} \quad (7)$$

d.v.s. upplösningen i asimetled är mycket bättre för SAR ($\frac{L}{2}$) än vanlig radar ($\frac{h\lambda}{L \cos \theta}$).



Figur 13: Geometrisk förhållanden och storheter för satellitburen SAR. (Teckning: Ulf Ekblad, FOI.)

²¹ Charles Elachi, *Spaceborne radar remote sensing: Applications and techniques*, IEEE Press, New York, 1988, pp. 54 och 72-73.

²² Ibid., p. 73.

I avståndsled (eng. range), d.v.s. vinkelrätt mot satellitbanan, åstadkoms hög upplösning med hjälp av pulskompressionsmetoder. Upplösningen X_r , som är det minsta avståndet mellan två urskiljbara punkter, är (jfr ekvation (4)).²³

$$X_r = \frac{c\tau}{2\sin\theta} = \frac{c}{2B\sin\theta} \quad (8)$$

där c är ljushastigheten, $\tau = \frac{1}{B}$ är den minsta upplösbara tidsskillnaden mellan två pulser, B signalens (radarpulsens) bandbredd och θ infallsvinkeln.

SAR-tekniken från satellit medger i dag en upplösning i avståndsled ner till under en meter. Detta sker medelst efterföljande datorbearbetning. Om upplösningen kraftigt ökar och synfältet/stråkbredden bibehålls ökar datamängden samtidigt i proportion härtill vilket kan leda till dataöverföringsproblem. Det finns emellertid tekniker, såsom spotmode (se nedan), för att reducera detta problem.

Interferometri

Elektromagnetiska vågor kan fås att interferera med varandra på så sätt att två vågor kan antingen släcka ut varandra eller förstärka varandra. Vad som händer beror på fasen mellan de båda vågorna; en vågdal och en vågtopp släcker ut varandra medan två vågdalar eller två vågtoppar förstärker varandra. På detta ljusfenomen bygger interferometrar. Eftersom de våglängder som används vid radar är av storleksordningen centimetrar eller några tiotal centimetrar kan interferometrar som arbetar i radarfrekvensbandet mäta avstånd med denna noggrannhet.

Med hjälp av sådana interferometriska metoder kan förskjutningar i marken på centimetrar uppmätas och bra höjdmodeller (DEM) produceras. Interferometri förutsätter dock att man har tillgång till bildpar som är tagna från positioner på lämpligt avstånd från varandra och utan att alltför lång tidsrymd förflyter mellan de olika bilderna; helst av satelliter i tandem.

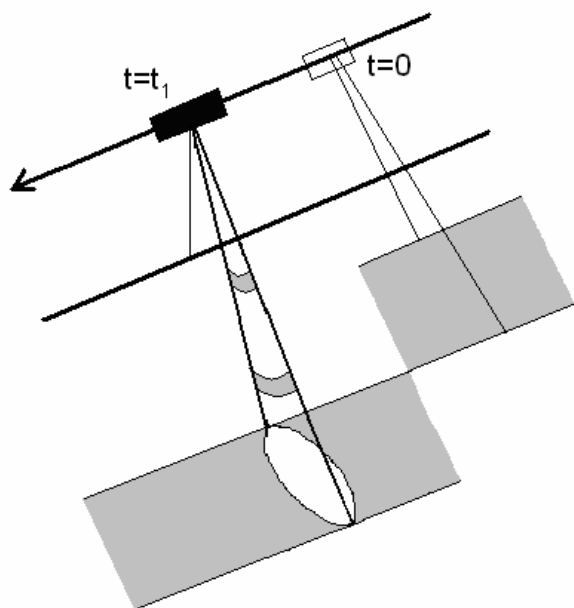
Stripmode

Den vanligaste moden för SAR är stripmode (se Figur 14). I denna sker avbildning av områden i form av remsor, vanligen en remsa.

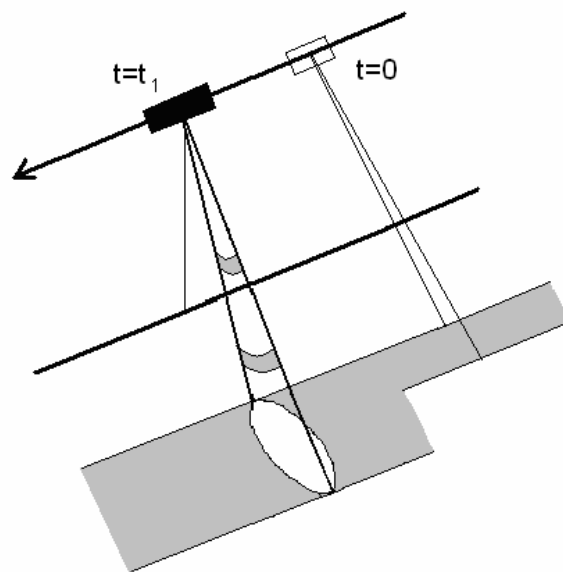
Scanmode

Scanmode (scanSARmode, scan SAR eller scanning SAR) (se Figur 15) är en SARmode med förmåga att belysa flera delstråk. I denna mode kan stråkbredden ökas på bekostnad av en lägre upplösning i avståndsled. Täckningsområdet under en passage blir alltså större, d.v.s. ett större område avbildas vid ett och samma tillfälle i stället för att man skall behöva vänta till en annan passage ett antal dygn senare.

²³ Charles Elachi, *Spaceborne radar remote sensing: Applications and techniques*, IEEE Press, New York, 1988, p. 73.



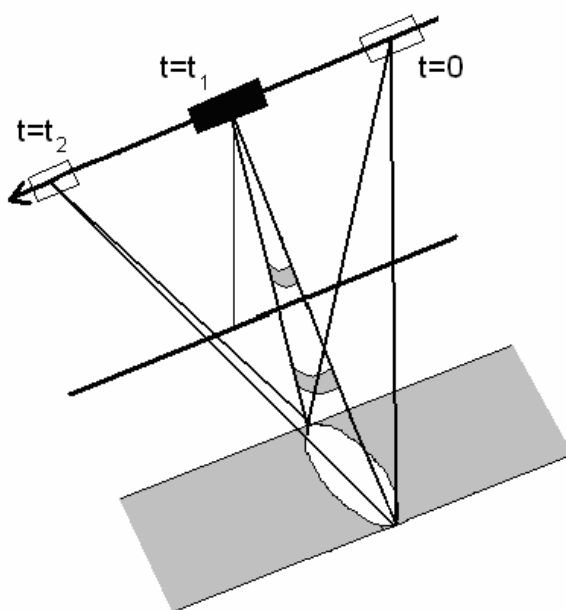
Figur 14: Principen för stripmode. Vid en tidpunkt ($t=0$) täcker radarloben ett visst stråk. Vid en senare tidpunkt ($t=t_1$) täcker loben ett annat stråk. (Teckning: Ulf Ekblad, FOI.)



Figur 15: Principen för scanmode. Vid en tidpunkt ($t=0$) täcker radarloben ett visst stråk. Vid en senare tidpunkt ($t=t_1$) täcker loben ett bredare stråk. (Teckning: Ulf Ekblad, FOI.)

Spotmode

I spotmode (se Figur 16) följer den avbildande sensorn ett och samma område på marken under passagen av området. Detta gör att upplösningen i asimutled ökar.



Figur 16: Principen för spotmode. Radarloben täcker hela tiden samma område vid passagen, d.v.s. från $t=0$ till $t=t_2$. (Teckning: Ulf Ekblad, FOI.)

Backscatter

Strålning som infaller på en slät yta reflekteras bort från strålkällan i enlighet med den välkända reflektionslagen att reflektionsvinkeln är lika med infallsvinkeln. En sidstrålande ("sidtittande") sensor som SAR skulle då inte få tillbaks någon strålning som den skulle kunna detektera. I naturen är nu emellertid i allmänhet ytor inte helt släta utan dessa är mer eller mindre skrovliga. Vid strålning mot en skrovlig yta kommer strålningen att reflekteras i många riktningar, varav en del kommer att reflekteras mot strålningskällan. Det är denna del av strålningen som SAR-systemen mottar. Denna typ av bakåtrefleksion (bakåtspridning) kallas på engelska för "backscatter". Förutom dessa yteffekter finns det effekter, s.k. volymeffekter, som beror på att strålningen till viss del tränger ner i objektet.

Bildtolkning

Det finns flera faktorer som påverkar hur objekt avbildas i en radar-/SAR-bild, varav två beskrivs i vad som följer.²⁴ Detta avsnitt placeras här under SAR-teknik eftersom SAR-bilder ofta fordrar en större förståelse av dessa faktorer för att kunna tolkas än andra typer av bilder, beroende på att människan endast ser i den synliga delen av spektrumet och alltså inte har någon naturlig erfarenhet av att tolka bilder i andra våglängdsområden.

Läget i terrängen påverkar placeringen av objektet i bilden. Radarekot från punkter som ligger högre upp kommer tillbaka något tidigare än från en punkt som ligger längre ner. Detta, som på engelska kallas "foreshortening", beror på att radarvågen når ett högt liggande objekt tidigare än om objektet skulle ha legat lågt, d.v.s. objektet tillskrivs ett kortare horisontellt avstånd än om det hade legat lägre. Konsekvensen av detta blir att berg ser ut att luta.

En av de saker som behöver beaktas vid tolkningen av en SAR-bild är "backscatter". Ju mer strålning som SAR-sensorn tar emot desto ljusare blir bilden. Graden av backscatter beror på flera faktorer, bl.a.: belysningsförhållandena (vinkelförhållandena mellan satelliten, det reflekterande objektet och dess ytor i förhållande till strålriktningen); egenskaperna hos materialets yta vad gäller reflektion; ytans skrovlighet; polarisation; och strålningens våglängd.

Ett exempel på hur detta påverkar en SAR-bild är reflektionen av en vattenyta. Vattenvågorna på ytan hur stor betydelse för hur radarvågorna reflekteras tillbaka mot SAR-sensorn. En spegelblank yta alstrar mycket lite backscatter och ser därmed mörkare ut än en med ett oroligt vatten. Detta kan utnyttjas till att detektera fartyg eftersom kölvattnet har andra vågmönster än det av fartyget opåverkade havet. En annan mycket viktig tillämpning är detektion av olja på vattnet. Det visar sig nämligen att olja på en vattenyta har tendens att släta ut småvågor. Detta gör att ett oljetäckt område på havet ser mörkare ut än det omkringliggande vattnet.²⁵

²⁴ Erik Hansson och Wolter Arnborg, "Satellitburen radar för översvämningskartering", *Kart & Bildteknik*, 2003:2, p. 21, Kartografiska Sällskapet.

²⁵ En stor del av avsnitt 3.3.1 har granskats av Mats Pettersson, FOI.

3.3.2 Exempel på SAR-system

Av alla de befintliga SAR-system²⁶ som finns har här några få valts ut för att ge en liten uppfattning om satellitburna optiska fjärranalyssystem uppbyggnad och prestanda. Systemen är: ERS, Radarsat, ENVISAT, TerraSAR-X, SAR-Lupe och COSMO-SkyMed.

Tabell 8: Sammanställning av några data om satelliterna ERS, Radarsat, ENVISAT, Terra-SAR-X, SAR-Lupe och COSMO-SkyMed

Satellit Parameter	ERS-2	Radarsat-2	ENVISAT	Terra-SAR-X	SAR-Lupe	COSMO-SkyMed
Uppskjutning [år]	1995	2004	2002	2006	2005	2005
Livslängd (uppskattad) [år]		5	5		10	5
Storlek [m x m x m]	2 x 2 x 3	3,7 x 1,36	10 x 5		4 x 3 x 2	
Massa med bränsle [kg]	2516	ca 3200	8140	1023	770	1700
Överföringshastighet till mottagningsstationerna [Mbit/s]	105	105	3 x 100	300		300
Upplösning (1-look) [m]	25	3	< 30	1	0,5	< 1
Banhöjd [km]	ca 780	798	800	515	ca 500	619
Frekvensband	C	C	C	X	X	X

ERS

ESA:s ERS (European Remote Sensing satellite) satelliter har ett antal sensorer utöver SAR-sensorn. Upplösningen i SAR-bilderna är ca 30 m; ett 100 km brett stråk täcks av satelliten. Satelliterna behöver stora antenner för att kunna ta emot den reflekterade radarsignalen. Följaktligen måste satelliterna vara ganska stora; de väger ungefär 3,3 ton. Nyttolasten ensam väger ca ett ton och konsumerar ca 1 kW elektrisk effekt vid full drift. Antennerna är efter utfällning upp till 10 meter långa och nyttolaststrukturen är 2 x 2 meter i basen och ca tre meter hög. Den utfällbara solpanelen består av två 5,8 m x 2,4 m vingar på vilket har monterats total 22260 solceller. För att vingarna alltid skall peka mot solen roteras hela panelen 360 grader, med avseende på satelliten, under varje banvarv. SAR-sensorn på ERS-2 har ett band, en polarisationskombination²⁷ och en fast incidensvinkel (infallsvinkel)²⁸. Data över norra delen av Europa som registreras med ERS-satelliterna länkas ner till markstationerna Salmijärvi utanför Kiruna samt Tromsø i Norge.

Radarsat

Radarsat-1 är utrustad med ett SAR-instrument som kan registrera i ett antal moder med olika kombinationer av stråkbredd och upplösning. Dessutom kan incidensvinkeln varieras inom ett stort intervall. Flacka incidensvinklar är gynnsamma då man vill detektera fartyg och brantare vinklar är bättre för t.ex. oljedetektering. Radarsat-1, såväl som kommande Radarsat-2, har enbart C-band.

²⁶ Mycket av uppgifterna om SAR-systemen kommer från rapporten *Kommersiellt tillgängliga fjärranalys-satelliter*, Satellus (numera Lantmäteriet, Metria), 2000.

²⁷ För en förklaring av polarisation se appendix 3.

²⁸ Se appendix 3.

Radarsat-1 har en planerad livslängd av fem år och en totalvikt av 2750 kg. Radarsat-2 har en planerad livslängd av sju år och några dimensionsuppgifter är:

- SAR-antenn: 15 m x 1,5 m
- Solpaneler: 3,73 m x 1,8 m (var och en)
- Buss: 3,7 m x 1,36 m
- Satellitens massa: 3100 kg

Båda satelliterna är grynings-skymningssatelliter för att få optimal mängd solenergi till panelerna. Banan är cirkulär och solsynkron. RADARSAT har möjlighet till stor täckning i avstånd med något reducerad upplösning. Detta gör att t.ex. hela Östersjön kan avbildas under en passage. RADARSAT 1-data över norra delen av Europa tas endast emot vid Tromsø-stationen.

ENVISAT

Den ESA-byggda ENVISAT:s mått är 26 m x 10 m x 5 m och massan är 8,2 ton. Den är utrustad med nio instrument. Livslängden är planerad till fem år. Ett av satellitens instrument, ASAR, skall avlösa ERS-2:s SAR-sensor. Data kan lagras ombord i ett halvledarminne, sändas direkt till markstation eller utnyttja ARTEMIS (Advanced Relay and Technology Mission Satellite) satelliten för överföring till jorden.

TerraSAR-X

TerraSAR-X är en satellit arbetande på X-bandet med multipolarisation och som planeras att sändas upp 2006. Satelliten kommer att gå i nära polär bana på banhöjden ca 500 km. Det är en tysk samproduktion mellan det statliga DLR²⁹ och det privata EADS³⁰ Astrium.

Satelliten är ca 5,2 m lång och 2,2 m bred med massa drygt 1000 kg vid start. Upplösningen blir som bäst drygt 1 m i spotmode. SAR-antennen är 4,8 m lång och 0,8 m bred.³¹ Varje punkt på jorden kommer att kunna bli avbildad inom tre dygns intervall.

Tre avbildningsmoder kommer att finnas:

- Spotmode: Bildyta 5-10 km x 10 km; upplösning ner mot 1 m.
- Stripmode: Avbildningen täcker in ett 30 km brett och upp till 1500 km långt område; upplösning 3 m.
- Scanmode: Avbildningen täcker in ett 100 km brett och upp till 1500 km långt område; upplösning 16 m.

TanDEM-X är en tandem-konstellation bestående av två TerraSAR-X-satelliter som skall utnyttja interferometri. Det är i dag 2004 ej beslutat att genomföra TanDEM-X.³²

²⁹ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

³⁰ European Aeronautic Defence and Space Company

³¹ Enligt ekvation (6) skall upplösningen vara halva antennlängden i färdriktningen. Denna ekvation gäller för strip- och scanmoderna. Spotmode används för att förbättra denna upplösning och då kan alltså upplösningen bli så bra som drygt en meter.

³² "TerraSAR-X - New Quality of Earth Observation", SpaceRef.com, November 22, 2004, <http://www.spaceref.com/news/viewpr.html?pid=15523>

SAR-Lupe

Den första uppsändningen i det tyska militära programmet SAR-Lupe, med fem satelliter i tre banplan, planeras 2006.

COSMO-SkyMed

COSMO-SkyMed, som är SAR-delen av det gemensamma konceptet COSMO-SkyMed och Pléiades, innehåller fyra X-bands-satelliter från Italien.

3.3.3 Observationsmöjligheter

SAR-satelliter går ofta i solsynkrona banor. SAR-sensorer kan i regel registrera i olika moder. Upplösningen beror av vilken mod man väljer på så sätt att med högre upplösning följer mindre stråkbredd. Incidensvinkeln är också beroende av stråkbredd och polarisation. Man får välja någon eller några parametrar och sedan kontrollera vilka kombinationer som är möjliga.

Radar sägs vara ljus- och väderoberoende. Det förstnämnda är helt rätt medan det senare kräver en mera omfattande analys. Existensen av kortvågig väderradar som kan ”se” regn indikerar helt riktigt att regn kan detekteras med korta radarvåglängder³³ som X-band och i någon utsträckning C-band men knappast med L-band. Dessutom kan effekten av markfuktighet vara svår att separera från markstrukturer (skrovlighet) i en enskild C-bandsbild.

För att få mer information ur SAR-bilder är det värdefullt att använda flera våglängder och flera polarisationer samt att kunna utnyttja interferometrisk metod. Om man måste välja en våglängd så är L-band mera lämpat för landtillämpningar och C-band mera för havstillämpningar. För militära tillämpningar brukar X-band rekommenderas.

SAR-data kan användas för framställning av höjdmodeller, detektering av olja på vatten, detektering av skepp på vatten (om synvinkeln är tillräckligt mycket åt sidan), kartering av isförhållanden på havet, snökartering, markklassning i ett begränsat antal klasser typiskt skog – icke-skog, infrastruktur, måldetektion, etc.

3.3.4 Nackdelar och begränsningar med SAR-tekniken

Databehandling

SAR-data kräver mera processning och bearbetning än optiska data. SAR-system alstrar dessutom stora datamängder. Detta ställer höga krav på datalänken ner till marksegmentet. Utrustning i form av kraftfulla datorer måste finnas om man eftersträvar nära realtidsbearbetning för avbildade områden på jordytan. Ju större spaningsområde och ju högre upplösning desto större datamängder, vilket i sin tur ställer högre krav på databehandlingskapacitet.

Nästan väderoberoende

Radarspaning är inte ljus- och väderberoende som den optiska spaningen är, eftersom radarvågorna tränger igenom moln och dimma. Strålkällan finns dessutom på satelliten, varför spaning kan ske nattetid. Mycket kraftigt regn kan dock dämpa radarstrålningen något. Radarekot påverkas dessutom av markfukt.

³³ För radarvåglängder och dess indelning se Appendix 5.

Energibegränsning

Radarn kräver mycket energi. Ett sätt att alstra energi är med solceller. Stora solcellspaneler innebär stort luftmotstånd, vilket blir speciellt märkbart på låga banhöjder. För att inte luftmotståndet skulle bli för stort hade därför tidiga radarsatelliter kärnkraftsreaktorer ombord för energiförsörjningen. Moderna civila SAR-satelliter går i lite högre banor och låter sig nöja med solpaneler som energikällor. Den elektriska energin lagras i batterier ombord, men energin räcker bara till ca 20 min per varv om ca 90 min.

4. Rymdsystem för kommunikation

4.1 Inledning

När satelliter används för kommunikation, s.k. kommunikationssatelliter, så sänds en signal från en sändare på jorden (på marken, i luften eller på havet) till en satellit och sedan ner igen till en mottagare på jorden. Uppe i satelliten tas signalen emot av en mottagarantenn. Inne i satelliten finns en kombinerad sändare-mottagare som kallas transponder. Signalen sänds ner till jorden via en sändarantenn.

När man talar om kommunikationssatelliter så är det satelliter som har som syfte att överföra eller vidarebefordra information eller data från en sändande part till en mottagande part. Detta innebär att här inte belyses den dataöverföring som sker från en informationsinhämtande sensor, som t.ex. en fjärranalyssatellit, ner till jorden.

Nedan kommer att diskuteras några av delarna i denna process. Det gäller antennerna som finns på jorden, något om transpondrar, något om signalen (frekvenser, effekter och datahastigheter).

4.2 Användarantenn

Syftet med antenner är sända och ta emot elektromagnetisk strålning. Sändarantennen omvandlar elektriska signaler till elektromagnetiska vågor (radiovågor) medan mottagarantennen gör det omvända d.v.s. de omvandlar elektromagnetiska vågor till elektriska signaler. Sändarantennerna riktar strålning i en viss riktning (om de inte är rundstrålande) och mottagarantennerna förstärker den mottagna signalen från en viss riktning (om de inte är rundstrålande). Syftet med rundstrålande antenner är att kunna ta emot signaler från alla möjliga håll utan att behöva ställa in antennen på visst sätt eller att kunna sända till många olika mottagare eller till en mottagare vars position är okänd utan att behöva ställa in antennen på visst sätt.

Antenner är en viktig del i ett satellitkommunikationssystem och då speciellt användarantennerna. De antenner som finns på satelliten kommer inte att behandlas här, utan här behandlas bara antenner från användarens synvinkel, d.v.s. sådana antenner som finns på jorden.

4.2.1 Antenntyper

Det finns många olika typer av antenner, såsom dipolantenn, vertikalantenn, parabolantenn och gruppantenn (också kallat bl.a. antennarray, elektriskt styrd antenn). Vilken antenntyp som används på marken beror på faktorer som strålningens frekvens (eller våglängd), satellitavstånd, ”stillastående” (geostationär) eller ”rörlig” (i LEO och MEO) satellit, sändareffekter, om användaren är stationär eller rörlig och vilken typ av plattform som skall hysa antennen.

Varje antenn har sina för- och nackdelar. Dipolantennerna sänder (och är därmed också bra på att ta emot signaler) mer eller mindre jämnt runt omkring antennen. De använda effekterna är ofta ganska låga. Parabolantennerna och gruppantennerna är riktantennerna, d.v.s. de koncentrerar den utsända strålningen i en viss riktning och detta ger då en s.k. antennförstärkning (eng.: antenna gain). Det är då lätt att inse att någon form av dipolantenn används i fallet med

satellittelefoner för system av satelliter i LEO och MEO, medan man för geostationära satelliter ofta använder en parabolantenn.

En gruppantenn består av ett antal s.k. antennelement. Gruppantenner beskrivs i avsnitt 4.2.4.

Våglängden sätter vissa begränsningar vad gäller antennstorlek. En antenn kan inte göras hur liten som helst i förhållande till den våglängd som den skall ta emot för att vara effektiv. Generellt gäller att ju längre våglängd desto större måste antennen vara. En antenn på långvågsbandet kan vara flera hundra meter lång medan en antenn på GHz-frekvenser kan vara av storleksordningen decimeter. För gruppantenner gäller också att avstånden mellan elementen skall ha ett visst avstånd beroende på den våglängd som den skall sända på.

4.2.2 Antennförstärkning och effektförlust

Enligt reciprocitetssatsen (the reciprocity theorem)³⁴ är, för varje våglängd, sändar- och mottagarantennerna identiska. Detta innebär att t.ex. en antenn som förstärker en inkommande signal med en viss faktor förstärker en utgående signal med samma faktor. En (mottagar-) antens förstärkning G_m (av engelskans gain) i huvudaxeln ges av³⁵

$$G_m = \eta \frac{4\pi}{\lambda^2} A \quad (9)$$

där λ är våglängden, A antennarean (aperturen) och η verkningsgraden. För en typisk antenn är $\eta = 0,55 - 0,6$. För en cirkulär parabolantenn är³⁶

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (10)$$

där D är antenreflektorns diameter. Antennförstärkningen är relativt en isotrop antenn, d.v.s. en perfekt rundstrålande antenn, som har antennförstärkningen $G = 1$. Kombinerar ekvation (9) och ekvation (10) kan förstärkningen för en antenn med cirkulär öppning som

$$G = \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \eta \quad (11)$$

Av ekvation (9) eller (11) ser man att en antenn med stor apertur har högre förstärkning än en antenn med liten apertur. Ofta kan man använda följande approximativa uttryck för att beräkna förstärkningen³⁷:

$$G \approx \frac{30000}{(\theta_{3dB})^2} \quad (12)$$

³⁴ Robert A. Nelson, *Antennas – The Interface with Space*, 1999, www.atcourses.com/antennas_tutorial.htm.

³⁵ Ibid.

³⁶ Ibid.

³⁷ Leila Z. Ribeiro, *Advanced Satellite Communications – Earth Stations, Antennas and Network Architecture*, George Mason University, 2001, http://bass.gmu.edu/~lribeiro/Spring01/Lectures/TCOM508_L1.PDF.

där θ_{3dB} är i grader.

En viktig relation mellan våglängden λ och frekvensen f är

$$c = \lambda f \quad (13)$$

där c är ljushastigheten (i vakuum) 300 000 km/s. Eftersom c är konstant så ser man från ekvation (13) att om man minskar våglängden ökar frekvensen och omvänt.

Effekttätheten vid mottagarantennen är³⁸

$$S_m = \frac{P_s}{4\pi r^2} \quad (14)$$

där P_s är sändarens effekt och r är avståndet mellan sändare och mottagare. Av ekvation (14) ser man att effekten avtar med kvadraten på avståndet. Ekvation (14) gäller för rundstrålande sändare. Dessa har en förstärkning $G_s = 1$. Ekvation (14) kan generaliseras till att källa även för icke rundstrålande sändare genom att införa förstärkningen G_s i ekvationen. Ekvation (14) blir då:

$$S_m = \frac{P_s G_s}{4\pi r^2} \quad (15)$$

Den mottagna effekten hos en antenn är³⁹

$$P_m = S_m A_m \quad (16)$$

där A_m är mottagarantennens area (eller mer korrekt den effektiva antennarean $A_m = \eta A$). Av ekvation (16) ser man att ju större antenn desto mer effekt mottas. Eftersom avståndet till GEO är mycket stort (på Sveriges latitud ca 40 000 km) behövs antingen ett högt värde på sändareffekten P_s eller en stor antennarea A_m för att få bra mottagning. Den mottagna effekten kan alltså slutligen skrivas

$$P_m = \frac{P_s G_s G_m \lambda^2}{(4\pi r)^2} \quad (17)$$

Kvoten mellan sändareffekten P_s och mottagen effekt P_m kallas för transmissionsförlust,⁴⁰ d.v.s.

$$L = \frac{P_s}{P_m} \quad (18)$$

³⁸ Lars Ahlin och Jens Zander, *Digital radiokommunikation – system och metoder*, Studentlitteratur, 1992, p. 32.

³⁹ Ibid.

⁴⁰ Ibid., p. 82.

Om strålningen endast går genom rymden (vakuum; på eng. free space) kan transmissionsförlusten uttryckas som⁴¹

$$L_{fs} = (4\pi)^2 \left(\frac{r}{\lambda} \right)^2 \quad (19)$$

där λ är strålningens våglängd. Med användande av ekvation (13) kan ekvation (19) också skrivas:

$$L_{fs} = \left(\frac{4\pi}{c} \right)^2 (rf)^2 \quad (20)$$

Av ekvation (19) ser vi att frirymdutbredningsförlusten (eng.: free-space loss) L_{fs} ökar med kvadraten på avståndet och minskar med kvadraten på våglängden. Alltså, ju längre våglängd desto mindre transmissionsförlust (eller ekvivalent enligt ekvation (20): ju högre frekvens, desto högre transmissionsförlust).

Ekvation (17) kan skrivas som

$$P_m = EIRP + \frac{1}{L_{fs}} + G_m \quad (21)$$

där alla enheter är i dB. Brukligt är att använda samma beteckningar i ekvationer av typ (17) och i dB-ekvationer av typ (21), vilket kan vara förvillande. I ekvation (21) har införts beteckningen

$$EIRP = P_s G_s \quad (22)$$

där EIRP står för Effective Isotropic Radiated Power.

I tekniska system orsaks brus (eng. noise, varav beteckningen N) till stor del av temperaturen i kedjan från sändare till mottagare, inklusive sändaren och mottagaren. Relationen mellan temperatur och brus ges av

$$N = kTB \quad (23)$$

där k är Boltzmanns konstant ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K eller i dB-enheter -228,6 (dBJ/K)), T temperaturen och B den ekvivalenta brusbandbredden.

Signal-brus-förhållandet (eng. Signal-to-Noise Ratio, SNR) definieras som⁴²

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{P_m}{N} \quad (24)$$

Om ekvation (17) och ekvation (23) används kan SNR skrivas som

⁴¹ Lars Ahlin och Jens Zander, *Digital radiokommunikation – system och metoder*, Studentlitteratur, 1992, p. 82.

⁴² Ibid., p. 76.

$$\frac{C}{N} = \frac{P_s G_s}{k B} \left(\frac{G_m}{T} \right) \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \frac{1}{A_p} \quad (25)$$

där S har ersatts med C , för eng. carrier power, och A_p som representerar förluster orsakade av mediet genom vilket signalen färdas. I ekvation (25) står T för temperaturen som svarar mot det totala bruset. Uttrycket i ekvation (25) kallas på eng. för carrier-to-noise ratio. Kvoten G_m/T brukar kallas för mottagarantennens kvalitetsfaktor. Ju högre värde på denna desto ”bättre” antenn. Värdet brukar t.ex. öka med ökande antenndiameter.

4.2.3 Antenndiagram och lobbredd

Den elektromagnetiska strålningens vågor från en antenn interfererar med varandra och orsakar antingen konstruktiv interferens eller destruktiv interferens. I de riktningar där vågorna interfererar konstruktiv blir strålningen förstärkt (där bildas vad som kallas för lobar) medan i riktningar där vågorna interfererar destruktivt blir strålningen försvagad. Detta kan illustreras i något som kallas antenndiagram (eng.: antenna pattern). Genom att konstruera antennen på ett lämpligt sätt kan detta antenndiagram fås att mer eller mindre bra uppfylla önskvärda egenskaper hos antennen.

I den riktning som antenner sänder ut sin mesta energi får man en huvudlob. Denna riktning kallas på engelska för ”boresight” och den sammanfaller i regel med antennens symmetriaxel. Antennförstärkningen i förhållande till huvudriktningen ges approximativt av⁴³

$$G(\theta) = G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2 \quad (26)$$

där G_0 är antennförstärkningen i huvudriktningen och θ_{3dB} är vinkeln för vilken effekten har sjunkit till hälften, d.v.s. θ_{3dB} är ett mått på bredden på loben där effekten har sjunkit till hälften. Denna storhet kallas för halvvärdeslobbredden eller enbart lobbredden. I ekvation (26) anges antennförstärkningen i dB. Beteckningen 3 dB står för en halv, d.v.s. en minskning med 3 dB är lika med en minskning med hälften.

Halvvärdeslobbredden för en parabolisk antenn ges av⁴⁴

$$\theta_{3dB} = \frac{1,2\lambda}{D} \quad (27)$$

där θ_{3dB} fås i radianer eller approximativt av⁴⁵

⁴³ Robert A. Nelson, *Antennas – The Interface with Space*, 1999, www.atcourses.com/antennas_tutorial.htm.

⁴⁴ Leila Z. Ribeiro, *Advanced Satellite Communications – Earth Stations, Antennas and Network Architecture*, George Mason University, 2001, http://bass.gmu.edu/~lribeiro/Spring01/Lectures/TCOM508_L1.PDF.

⁴⁵ Siffervärdet anges till 65 av Ray E. Sheriff, Y. Fun Hu, *Mobile Satellite Communication Networks*, Wiley, 2001, p. 149, och till 72 av Leila Z. Ribeiro, *Advanced Satellite Communications – Earth Stations, Antennas and Network Architecture*, George Mason University, 2001, http://bass.gmu.edu/~lribeiro/Spring01/Lectures/TCOM508_L1.PDF, varför värdet 70 torde vara en rimlig kompromiss.

$$\theta_{3dB} \approx 70^\circ \frac{\lambda}{D} \quad (28)$$

där θ_{3dB} erhålls i grader. I ekvationerna (27) och (28) är D antenndiametern och λ sändningsvåglängden.⁴⁶

Av ekvation (27) ser man att en antenn med hög förstärkning (stor apertur/antenndiameter) har smal huvudlob medan en antenn med låg förstärkning (liten apertur/antenndiameter) har bred huvudlob.

Förutom huvudloben har varje antenn flera andra lobar, s.k. sidolobar. Den första sidloben för en parabolisk antenn ligger ca 22 dB lägre än huvudloben.⁴⁷ I regel vill man ha så små sidolobar som möjligt eftersom strålningen i sidoloberna dels kan störa andra och dels ökar risken att själv bli störd av strålning som tas emot i sidoloben. En stor sidolob ökar också risken att sändaren blir avlyssnad eller upptäckt och inpejlad av icke önskvärd part.

För att minska risken att sändning från marksändare till satellit blir upptäckt önskas så smal huvudlob och så låga sidolobar som möjligt. För parabolantennar beror lobbredden (huvudlobens bredd) på antenndiametern. I Tabell 9 ges några exempel på lobbredder för olika antenndiametrar. Vi ser att för antenndiametrar i storleksområdet 0,5 – 2 m är lobbredden ca 10 – 0,5 grader, beroende bl.a. på frekvensen. Tabell 9 visas i diagramform i Figur 17. I praktiken blir lobbredderna något bredare (kanske upp mot 50 % bredare) än dessa teoretiska värden, men sidoloberna blir lägre. Av Figur 17 framgår att lobbredden minskar med ökande frekvens och med ökande antenndiameter.

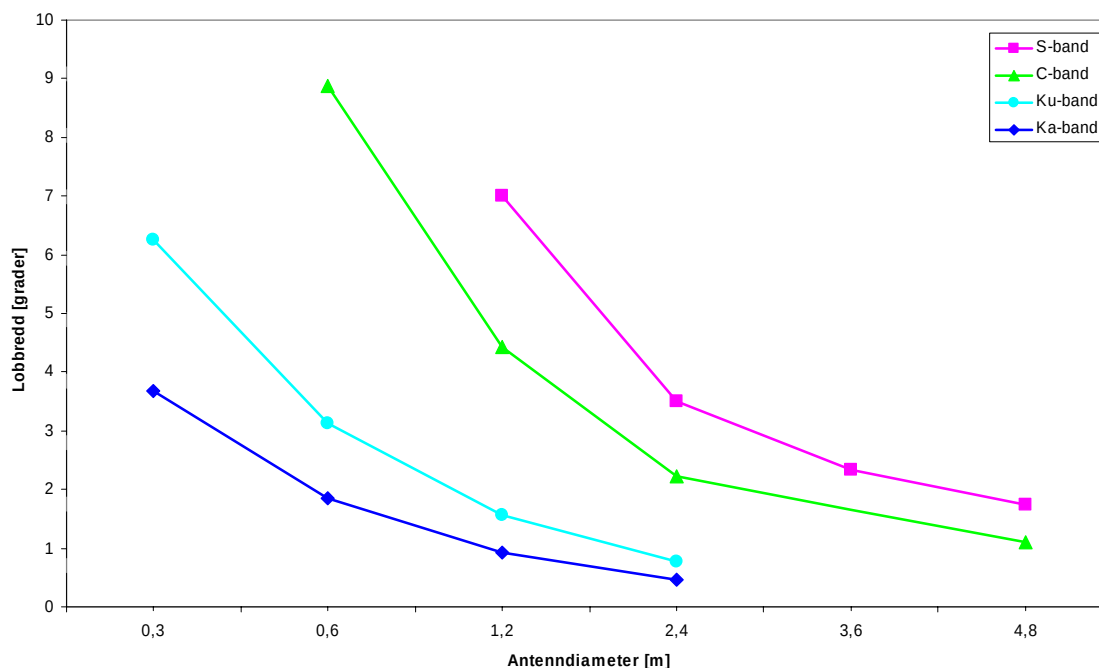
Tabell 9: Några exempel på huvudlobbredder för några frekvensband som funktion av antenndiameter⁴⁸

Antenn-diameter [m]	Huvudlobbredd [grader]			
	S-band (2,5 GHz)	C-band (3,95 GHz)	Ku-band (11,2 GHz)	Ka-band (19,0 GHz)
0,3			6,25	3,68
0,6		8,87	3,13	1,84
1,2	7,00	4,43	1,56	0,92
2,4	3,50	2,22	0,78	0,46
3,6	2,33			
4,8	1,75	1,10		

⁴⁶ I Robert A. Nelson, *Antennas – The Interface with Space*, 1999, www.atcourses.com/antennas_tutorial.htm, anges $58,4^\circ \lambda/D$ för likformig strålning och $72,8^\circ \lambda/D$ för parabolisk strålningsfördelning (medelvärde av dessa två blir ca 65°). För den strålningseffektivaste antennen blir värdet enligt Nelson $65,3^\circ \lambda/D$.

⁴⁷ I Robert A. Nelson, *Antennas – The Interface with Space*, 1999, www.atcourses.com/antennas_tutorial.htm, ges de två värdena 17,6 dB resp. 24,6 dB för de två fallen i fotnot 29. För den strålningseffektivaste antennen blir värdet enligt Nelson 22,3 dB.

⁴⁸ Mark Long, "Frequencies for satellite communications", *Telesatellit*, March/April 1997, www.mlesat.com/Article9.html.



Figur 17: Tabell 9 i diagramform visande huvudlobens bredd som funktion av antenndiametern för, från vänster till höger, Ka-, Ku-, C- och S-bandet resp. Observera att eftersom det endast är fyra punkter på varje linje blir dessa kantigare än vad de i verkligheten är. (Diagram: Ulf Ekblad, FOI.)

I militära sammanhang är det ofta önskvärt med så små lobbredder som möjligt, samtidigt som parabolantennerna bör vara så små som möjligt. Här blir man tvungen att välja en lämplig kompromiss.

Parabolantenners sidolober kan minimeras med lämpligt val av antenntyp. Sidolobsundertryckningen relativt huvudloben kan variera mellan -18 dB och -40 dB. Rätt val av antenntyp kan alltså minska sidoloberna med 20 dB.

Det finns ett stort antal typer av kommersiella parabolantennar. Hur stor antennen behöver vara beror bl.a. på om man befinner sig i huvudlobens centrala täckningsområde eller i dess utkant. De kommersiella parabolantennerna (för civil användning med kommersiella satelliter) brukar delas in i tre storleksklasser:

- liten: diameter på 60 – 70 cm
- mellan: diameter på ca 90 cm
- stor: diameter på 120 – 150 cm

För DBS (Direct Broadcast Satellite), d.v.s. satelliter som sänder TV-program direkt till hushållen, finns också mindre mottagarparaboler med en diameter på ca 45 cm. Eftersom dessa satelliter sänder med högre effekt räcker det med en mindre parabol.

4.2.4 Gruppantennor

En fasstyrd gruppantenn⁴⁹ är en antenn som består av flera små antennelement. Dessa element kombineras elektroniskt till en antenn vars yta motsvaras av en mycket större antenn än summan av antennelementens ytor, d.v.s. gruppantennen syntetiserar en antennarea motsvarande en större fysisk antenn. Elementen kan styras så att de samverkar på sådant sätt att strålningen förstärks i vissa riktningar och släcks ut i andra. Denna samverkan är helt elektronisk, d.v.s. inga rörliga mekaniska delar är inblandade. Systemet ger en antennlob som snabbt kan riktas om elektriskt utan mekanisk rörelse i olika riktningar. Därför kan en fasstyrd gruppantenn som sitter monterad på ett fordon i rörelse ha sin huvudlob hela tiden riktad i en viss riktning, t.ex. mot en GEO-satellit. De kan dessutom fås att anpassa sig efter varierande vågutbredningsförhållanden och på så sätt reducera problemet med flervägsutbredning. Ytterligare en fördel med dessa antenner är att antennloberna kan styras så att ett minimum i antenn-diagrammet hamnar i riktningen mot en störsändare varvid effekten av störningen reduceras.⁵⁰

Det som för närvarande pågår är framtagande av gruppantennor som kan integreras i plattformarnas ytor, d.v.s. i stället för att ha en stor parabol på t.ex. ryggen av ett flygplan skall man kunna ha en skrovintegrerad gruppantenn i själva flygplansskrovet. Detta har ju omedelbara aerodynamiska fördelar. En annan fördel är att vid ett flygplans snabba svängar och andra rörelser skall antennloben hela tiden kunna hållas riktad mot t.ex. en GEO-satellit.

Vid frekvenser i 20/30 GHz-området kan en fasstyrd gruppantenn med mer än 35 dBi antennvinst troligen göras mindre än 0,5 meter x 0,5 meter. En sådan antenn är tillräckligt liten för att kunna monteras på ett fordon, som t.ex. på taket till en bil. Med antennvinst på 35 dBi och en sändareffekt i storleksordningen 10 W kan man sannolikt nå dataöverföringshastigheter av storleksordningen Mbit/s till GEO. Detta förutsätter emellertid att satelliten också har en fasstyrd gruppantenn som ger cellulära täckningsområden på jorden. Satellitens antennvinst behöver också vara mycket stor. Ett sådant system skulle kunna användas såväl till lands som till sjöss och kanske även för större flygplan.

4.2.5 Antennriktningar

Riktning till GEO-satellit

Riktningen, d.v.s. höjden över horisonten α , till en geostationär satellit som befinner sig rakt i söder ges av (i grader)

$$\alpha = 90 - \lambda - \arctan \left(\frac{\sin \lambda}{1 + \frac{r}{R} - \cos \lambda} \right) \quad (29)$$

där λ (i grader) är latituden för platsen, R jordens radie (ca 6370 km) och r är den geostationära banans höjd över ekvatorn (ca 35 800 km). Uttrycket kan förenklas till

⁴⁹ Andra benämningar på fasstyrda gruppantennor är ESA (Elektriskt Styrd Antenn) och DGA (Digital Grupp-Antenn).

⁵⁰ Keng-Jin Lian, *Adaptive antenna arrays for satellite personal communication system*, Thesis for Master of Science, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997, <http://scholar.lib.vt.edu/theses/public/etd-74181839751071/etd.pdf> (pdf-filen återger tyvärr några symboler och figurer ofullständigt eller inte alls).

$$\alpha \approx 90 - \lambda - \arctan\left(\frac{R \sin \lambda}{r}\right) \quad (30)$$

eftersom $r \gg R(1 - \cos \lambda)$. Figur 18 och Figur 19 visar de geometriska förhållandena.

Figur 18 visar hur stor en huvudlob med lobbredden α är i jämförelse med riktningen (höjden över horisonten) till en GEO-satellit på breddgrader runt 45 grader. Det ger in indikation på hur bra det går att utnyttja terränghinder för att avskärma sändningen från markterminaler.

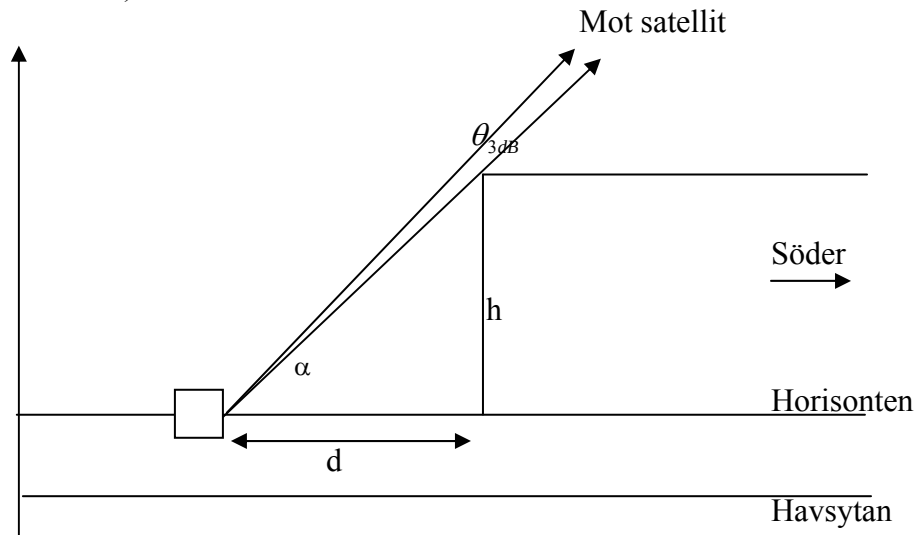
På de höga frekvenser som används vid satellitkommunikation måste det vara fri sikt till satelliten. För att kunna kommunicera via en geostationär satellit måste då

$$\alpha > \arctan\left(\frac{h}{d}\right) \quad (31)$$

där h är höjden på terränghindret (d.v.s. höjden i förhållande till markterminalen) och d är avståndet till detta (se Figur 18). Detta kan omskrivas till:

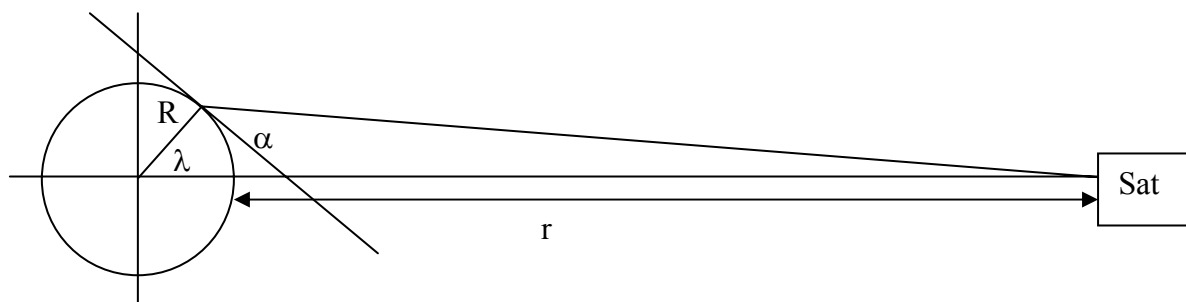
$$d > \frac{h}{\tan \alpha} \quad (32)$$

Höjd (över havet)



Figur 18: Geometriska relationer mellan en GEO-satellits höjd över horisonten α , hindrets höjd h och avståndet d till detta visas schematiskt. Dessutom illustreras ungefärlig lobbredd för en 0,5 m parabol i förhållande till en GEO-satellits höjd över horisonten. (Teckning: Ulf Ekblad, FOI.)

Felet i den approximativa beräkningen blir högst ca en grad. I Tabell 10 ges några exempel på värdet för α vid några latituder för norra halvklotet. På södra halvklotet befinner sig GEO-satelliter i nordlig riktning med motsvarande värden.



Figur 19: Geometrisk relationer som visar en GEO-satellits höjd över horisonten. (Teckning: Ulf Ekblad, FOI.)

GEO-banan är en cirkel ovanför ekvatorn. Detta innebär att från jorden sett ligger de geostationära satelliterna som ett pärlband längs en storcirkel. För en observatör på ekvatorn står satelliterna som högst över horisonten; en satellit kan t.o.m. stå rakt i zenit för en viss observatör. Ju mer observatören avlägsnar sig ekvatorn desto närmare horisonten kommer alla geostationära satelliter att stå.

Tabell 10: Riktning (d.v.s. höjden över horisonten) på norra halvklotet till geostationär satellit som är belägen rakt i söder

Latitud λ [grader]	Höjd över horisonten α [grader]	Kommentar
60	22	Stockholms latitud är ca 59 grader
45	38	Belgrads latitud är ca 45 grader
40	44	Ankaras latitud är ca 40 grader
30	55	Kuwait ligger på ca 29 graders latitud
0	90	På ekvatorn ligger satelliten rakt över huvudet

Eftersom det för varje punkt på jorden finns en bestämd riktning till en viss GEO-satellit och eftersom denna riktning är konstant kan enkla parabolantennar användas när användarantennerna kan hållas stilla eller inte rör sig alltför snabbt. För snabba och häftiga rörelser hos antennplattformen är gruppantennar lämpligare.

Riktningar till LEO-satelliter

Satelliter som inte finns i den geostationära banan utan går i banor på lägre höjder kan korsa himlen på många olika sätt, alltifrån passager rakt över huvudet till passager nära horisonten. Vissa specialfall förekommer där satelliterna passerar på vissa sätt, men passagera för LEO-satelliter i kommunikationssystem kan vara på många olika sätt. Det går därför inte att peka ut några speciella riktningar till dessa satelliter.

Det enklaste sättet är att ha en rundstrålande antenn, men nackdelen med sådana är röjningsrisken. I annat fall kan man ha en parabolantenn som följer satellitens rörelse eller hellre en gruppantenn.

Eftersom satellitbanor är predikterbara och tämligen stabila kan banpassager beräknas för ganska lång tid. Detta kan utnyttjas för att underlätta inpejlingen av satelliten vid uppdykan-

det. Detta kan vara betydelsefullt om man har parabolantenn och ett litet geometriskt kommunikationsfönster, och därmed kort tid för uppkoppling och sändning.

4.3 Transpondrar

En transponder är en kombinerad sändare och mottagare som tar emot sändningen på en frekvens och sänder ut en förstärkt signal på en något ändrad frekvens. Det finns tre huvudtyper av transpondrar:

- olinjära
- linjära
- regenerativa

De olinjära transpondrarna användes och används för tillämpningar där hög verkningsgrad är viktig, t.ex. för analog TV och datatransmission med TDMA (tidsmultiplex).⁵¹

De linjära transpondrarna medger att man sänder många bärvågor genom transpondern utan att blandningsprodukter uppstår och används för system för tvåvägsförbindelser enligt principen ”Single Channel Per Carrier” (SCPC).⁵²

I regenerativa transpondrar omkopplas trafik på satelliten, s.k. on-board switching, varvid den inkommande signalen först demoduleras, sedan görs felrättning och slutligen moduleras den utgående signalen igen⁵³. Genom en sådan förändring kan den utgående signalen komma att se helt annorlunda ut än den inkommande, vilket innebär bl.a. att det inte finns någon fix relation mellan upp- och nedlänkens frekvens. Detta försvårar störsändning (störning tas upp i avsnitt 4.6). Ombordbearbetning av signalen medger också ökade möjligheter till kryptering.⁵⁴

4.4 Signalöverföring

4.4.1 Sändareffekter

Effekter som används vid satellitkommunikation är små. För en upplänk till en GEO-satellit kan det röra sig om något eller några tiotal W. För upplänkar till LEO-system ligger effekterna på betydligt lägre nivåer, som t.ex. 0,25 W.

4.4.2 Frekvenser

Tillgängliga frekvenser för olika applikationer regleras av ITU, den Internationella Teleunionen. Civila satellitkommunikationssystem utnyttjar särskilt upplåtna frekvensband från 160 MHz upp till 275 GHz, d.v.s. i stort sett utspridda över hela radiofrekvensspektrumet. Vanliga frekvensband för hyrning av transponderkapacitet för VSAT-trafik via kommersiellt

⁵¹ Ulf Ekblad (red.), *Utnyttjande av satelliter för kommunikation i den nya krigföringen – FoRMA underlagsrapport*, FOI-R--0284--SE, December 2001, p. 19.

⁵² Ibid.

⁵³ Friedrich Jondral och Marcel Kohl, *Simulation of Satellite Communications Links*, www.estec.esa.nl/xewww/cost255/ws/98c08/papers/c255p08.pdf.

⁵⁴ Ulf Ekblad (red.), *Utnyttjande av satelliter för kommunikation i den nya krigföringen – FoRMA underlagsrapport*, FOI-R--0284--SE, December 2001, p. 19.

tillgängliga satelliter ligger idag främst i området 10 - 17 GHz⁵⁵. Detta band har använts under lång tid för exempelvis de nordiska ländernas fasta kommunikationslänkar över satellit till utlandsstyrkorna.

4.4.3 Datahastigheter

Dagens civila GEO-satelliter kan överföra data med upp till 34 Mbit/s. Det finns exempel på militära kommunikationssatelliter med en datahastigheter på 96 Mbit/s.

4.5 Exempel på satellitkommunikationssystem

Iridium

Iridium-systemet är till för telefoni och överföring av små datamängder. Det omfattar ett 70-tal satelliter på en höjd av ca 800 km. Inklinationen är ca 90 grader. Användarfrekvenserna är ca 1,5 GHz. Satelliterna kommunicerar med varandra på frekvenser omkring 25 GHz. Systemet klarar ca 1000 samtidiga samtal, med datahastigheter på ca 2,5 kbit/s (för telefonsamtal) och ca 10 kbit/s (för datameddelanden). Därtill finns tjänster för personsökning och dubbelriktad förmedling av korta alfanumeriska meddelanden. Celldiametern är på ca 150 km. Systemet är relativt autonomt, d.v.s. överföringen av samtalen fungerar oberoende av markstationer.

Globalstar

Globalstar-systemet är för telefoni och överföring av små datamängder. Det består av ett 50-tal satelliter på en höjd av ca 1500 km. Inklinationen är ca 50 grader. Användarfrekvenserna är ca 1,5 GHz. Ett 50-tal markstationer finns runt om i världen. Systemet klarar datahastigheter på ca 10 kbit/s. Vidare finns tjänster för förmedling av korta alfanumeriska meddelanden samt eventuellt positionsbestämning. Systemet är beroende av markstationer, d.v.s. överföringen av samtalen är beroende av markstationer.

Skynet 4

Brittiska Ministry of Defence är ägare av Skynet 4, men sedan 2003 drivs systemet av Paradigm Secure Communications⁵⁶. Nyttolasten består av fyra SHF (X-band) (8/7 GHz) TWTA på 40 W och två UHF (S-band) (250/300 MHz) TWTA på 40 W. Experimentellt används EHF på 44 GHz. Systemet har högt störskydd, interferensskydd, hög autonomitet och ombordsignalbehandling. Livslängden är sju år och satelliterna finns i GEO (10° W, 1° W, 34° E, 53° E). Användningsområdet är säker militär kommunikation med transportabla och portabla markterminaler till ubåtar, fartyg, flygplan och trupp.

Télécom 1 och 2 / Syracuse 1 och 2

På France Télécoms satelliter Télécom 1 finns de militära transpondrarna Syracuse 1. De använder SHF (X-band) TWTA på 20 W. Livslängden anges till sju år och de finns i GEO (3° E). Användningsområdet är säker nationell/militär kommunikation över Frankrike och västra Atlanten.

⁵⁵ Ku-bandet.

⁵⁶ EADS: http://www.space.eads.net/web1/press/press_release.asp?langue=en&id_tree=109&id_tree_nav=90 ; se även Paradigm: <http://www.paradigmsecure.com/?OBH=5> .

På France Télécoms satelliter Télécom 2 finns de militära transpondrarna Syracuse 2. Transpondrarna har fem (transparenta kanaler) SHF (X-band) (8/7 GHz) TWT på 40 W, med bandbredderna tre 40 MHz, 60 MHz och 80 MHz. Både CDMA och FDMA används. En styrbar lob samt störskydd finns. Livslängden är 10 år och satelliterna finns i GEO (8° W, 5° W, 3° E). Terminaler finns för fasta, transportabla och mobila (antenn diameter: 0,4 - 0,9 m) enheter som t.ex. fartyg. De används för säker nationell/militär kommunikation för telegrafi (75 och 200 bit/s), telefoni (2400 och 16000 bit/s), data (75, 2400 och 16000 bit/s) och "broadcast" över Frankrike, västra Atlanten och franska territorier.

4.6 Störning

Satellitkommunikation kan i princip störas på två sätt: det första är störning av satellitens mottagare; det andra är störning av markmottagarna. När det gäller geostationära satelliter är störning av mottagaren i satelliten det mest effektiva, därför att, om inga speciella störskyddsåtgärder sätts in, alla mottagare på marken då blir utstörda samtidigt.

Markmottagare för LEO-system är störkänsligare än markmottagare för signaler från GEO-satelliter. Detta eftersom i det första fallet har mottagarna, mer eller mindre, rundstrålande antenner medan de i det andra fallet ofta har smala antennlobar riktade mot den geostationära satelliten. Genom att utrusta mottagaren med gruppantennor kan nollning av störsändaren, att ett lobminimum riktas mot störsändaren, åstadkommas, varvid verkan av störningen reduceras.

5. Rymdsystem för avlyssning

5.1 Avlyssningsprinciper

Med signalspaning (SIS) avses spaning mot elektromagnetiska signaler inom radio- och radarfrekvensområdena. I princip fungerar det som en radioapparat som lyssnar på radiosändningar. I signalspaningsfallet gäller det att hitta intressanta signaler, lokalisera sändaren och ”lyssna” på sändningens innehåll. För detta fordras bra antenner, känsliga mottagare, möjlighet att spela in signalen och kanske flera mottagningsenheter för lokalisering.

När väl signalen är detekterad och inspelad gäller det sedan att få ut så mycket information som möjligt från denna signal. Det kan då gälla att se när liknande signaler förekommer på samma frekvens, vilka typiska signaturer som finns hos signalen och att tolka signalens innehåll. I det senare fallet fordras det avkodning när det gäller digitala signaler och dekryptering när det gäller analoga och digitala signaler. I det första fallet talar man om trafikanalys.

Det som spanas mot är alltså kommunikation på radiofrekvenser och strålning från radarstationer. I kommunikationsfallet (KOS = KÖmmunikationsSpaning) vill man spana så länge som möjligt för att om möjligt kunna lyssna av hela ”samtalet”. I fallet med radarspaning (TES = TEknisk Signalspaning) kan det räcka med kortare avlyssningar. Det man är intresserad av i TES är att få fram tekniska data på radarn. Data om radarn kan ge information om dess prestanda och möjligheter att störa radarn eller på annat sätt undgå att upptäckas av radarn.

5.2 SIS från rymden

5.2.1 Allmänt

När signalspaningsutrustningen finns uppe i en satellit medför detta vissa problem och svårigheter, men också vissa fördelar. Om utrustningen finns i en LEO-satellit passerar man snabbt över ett område. Man kan därmed inte från en satellit i LEO få långa sammanhängande avlyssningstider. Fördelar är bl.a. att man kan spana över hela jorden och att man återkommer till samma område och kan på så sätt över tiden öka sin kunskap om signalkällorna.

Om man däremot använder en GEO-satellit kan man kontinuerligt avlyssna alla signaler inom satellitens täckningsområde. Nackdelen med GEO-satelliter är däremot att avståndet blir mycket långt. Detta medför att signalerna blir mycket svaga och en mycket stor antenn fordras för att detektera de svaga signalerna. En stor antenn behövs också för att minska täckningsområdet. Om man lyssnar på signaler från hela den synliga delen av jordklotet blir dessa många. Samtidigt används på flera håll samma frekvenser som då alltså inte kan separeras i GEO-mottagaren.

5.2.2 Frekvensområde för satellitbaserad SIS

De frekvensområden där radio- och radarsignaler kan utbreda sig från jordytan upp till satelliten utan alltför stort hinder från jonosfären är frekvenser över kortvågsbandet, d.v.s. över ca 30 MHz.⁵⁷

5.2.3 Signalstyrkor och dämpning

Den mottagna signalens styrka avtar (dämpas) med kvadraten på avståndet mellan sändare och mottagare. Eftersom den geostationära banan ligger ca 100 gånger längre bort än banor nära jorden blir signalerna ca 10 000 gånger svagare. Ju svagare en signal är desto större antennarea behövs. Därför behövs mycket stora antenner för signalspaningssatelliter i GEO.⁵⁸

Radarsignaler är 30 miljoner till 30 miljarder gånger starkare, d.v.s. ca 75 – 105 dB starkare, än kommunikationssignaler. Den stora spridningen i signalstyrkor innebär att det behövs stor dynamik i mottagarna. Det kan därför vara lämpligt att ha olika satellitsystem för radar-SIS och radio-SIS.⁵⁹

5.3 Exempel på satellitbaserade signalspaningssystem

NOSS

Det finns flera satellitsystem som klassas som signalspaningssystem. Det äldsta är Naval Ocean Surveillance System (NOSS), ibland också kallat Whitecloud, som spanar huvudsakligen mot fartygsbaserad radar. NOSS består av en modersatellit och tre små slavsatelliter på banhöjden 1100 km och har en omloppstid på ca 107 minuter. Mottagarna sitter antagligen på både slavsatelliterna och modersatelliten. Modersatelliten utgör ”navet” i systemet dit de på slavsatelliterna insamlade signalerna sänds innan nersändning till jorden sker. Avstånd mellan dessa är ca 50 – 100 km. Modersatelliten befinner sig ca 200 km före slavsatelliterna. Noggrannheten i positionsbestämningen uppskattas till någon kilometer.⁶⁰

EORSAT

Det sovjetiska/ryska systemet kallat EORSAT (ELINT Ocean Reconnaissance Satellite; ELINT = ELectronic INTelligence) tros kunna positionsbestämma fartyg med en noggrannhet på 2 km.⁶¹

Essaim

Essaim (fr. svärm) är ett franskt system av fyra små signalspaningssatelliter på 120 kg vardera. Essaim har föregåtts av Cerise (uppskjuten 1995) och Clémentine (uppskjuten 1999). Båda dessa är små satelliter (50 kg). Cerise påstås arbeta med radio-SIS (COMINT) och Clémentine med radar-SIS (ELINT). Huruvida Essaim är ett radio-SIS- eller på radar-SIS-system är okänt. Både Cerise och Clémentine var singelsatelliter medan Essaim är ett kluster

⁵⁷ Ulf Ekblad (red.), *Framtida system för spaning från satellit - En underlagsrapport till LUST*, FOA-R--00-01463-201--SE, Mars 2000, p. 23.

⁵⁸ Ibid.

⁵⁹ Ibid., p. 24.

⁶⁰ Ibid., p. 23.

⁶¹ Ibid.

av satelliter, i likhet med NOSS. Banan sägs bli en nära cirkulär LEO-bana på ca 680 km höjd med en omloppstid av ca 96 minuter.⁶²

NSAT

NSAT-1⁶³, som tas fram av norska FFI (Forsvarets ForskningsInstitut), är en mikrosatellit, som ännu ej är uppskjuten, för lokalisering av sjöfart genom mätning av strålningen från navigationsradarn. Sensorn kan bestämma vilken typ av radarsignaler som målobjektet sänder ut samt tid, riktning, positionsnoggrannhet och position som målobjektet har vid detektering. Eftersom NSAT-1 bara registrerar radarsignaler från navigationsradar så är detta inte ett generellt signalspaningssystem.

System i GEO

Det lär finnas både amerikanska och ryska signalspaningssatelliter i GEO för kommunikationsavlyssning. Ingen öppen information finns dock om dessa system.⁶⁴

⁶² Ulf Ekblad, Marie Andersson, Hans Bergdal, Sandra Lindström, Mats Pettersson, *System av små samverkande satelliter*, FOI-R--1149--SE, Januari 2004.

⁶³ Se *ibid.*

⁶⁴ *Ibid.*

6. Avslutning

6.1 Sensorjämförelser

6.1.1 Geometrisk upplösning för SAR relativt optiska sensorer

Geometrisk upplösning för SAR-sensorer motsvarar inte riktigt geometrisk upplösning för optiska sensorer främst p.g.a. bildernas ”fläckighet” (”speckle”) som reducerar faktisk upplösning. Fläckigheten beror av skillnaden i utsträckning mellan upplösningcell (nominell upplösning) och reflektionscell (motsvarar våglängden). Fläckigheten reduceras vanligen genom s.k. multi-look d.v.s. man tar flera bilder över samma område och medelvärdesbildar över dessa. Detta medför att upplösningen reduceras. Den faktiska geometriska upplösningen är också beroende av topografin på så sätt att i kraftigt kuperade områden blir upplösningen lägre. Faktisk upplösning blir alltså lägre än den specificerade nominella upplösningen för SAR-sensorer.

6.1.2 Jämförelse av informationsinhämtande sensorsystem

En översikt av några parametrar för informationsinhämtning från satellit med olika sensorer ges i Tabell 11. Data i tabellen hänförs i fallen optisk spaning och SAR till kommersiellt ägda satelliter medan för SIS handlar det om militärt ägda satelliter.

Tabell 11: Jämförelse mellan optisk spaning, SAR och SIS från satellit

Satellittyp	Optisk spaning	SAR	SIS	
Bantyp	LEO	LEO	LEO	GEO
Upplösning	Storleksordning meter	Storleksordning några meter		
Väderberoende	Högt	Lågt	Lågt	Lågt
Dagsljusberoende	Högt (om ej TIR)	Inget	Inget	Inget
Jonosfärsberoende	Inget	Lågt	Visst	Visst
Sensors frekvenskänslighetsintervall	Visuellt ljus, IR (både NIR, MIR och TIR)	8 – 12 GHz	30 MHz – 18 GHz	30 MHz – 18 GHz
Ytmässig täckning	Stråkbredd i storleksordning 10 - 185 km	Stråkbredd i storleksordning 50 - 500 km	Stråkbredd i storleksordning 1000 km	Max 40 % av jordytan
Tidsmässig täckning	Momentana observationer	Momentana observationer	Observationstid i storleksordningen 5 min	Kontinuerlig
Observationsfrekvens över ett och samma område	Högst varannan dag	Högst varje dag	10 h/månad	Alltid på plats

Noter: NIR = nära IR; MIR = mellan-IR, TIR = termisk IR

Antalet satelliter som behövs för att med ett visst tidsintervall kunna observera ett visst område ökar med minskande tidsintervall⁶⁵. Kortfattat kan det konstateras att på svenska breddgrader kan en och samma satellit (med optisk sensor) i bästa fall, med snedtitning, observera ett och samma område en gång per dygn. För SAR-satelliter dubblas observationsfrekvensen eftersom dessa även kan göra registreringar under nattpassager. Antalet observationstillfällen ökar linjärt med antalet satelliter.

6.2 Banjämförelser

Den satellitbana som används för en viss satellit bestäms i första hand av vad satelliten skall användas för. I andra hand kan faktorer som en billig uppskjutning tillsammans med en annan satellit vara det som bestämmer banvalet. Här jämför vi hur användning av LEO- respektive GEO-bana påverkar nyttjandet av kommunikationssatelliter. En kort översikt av för- och nackdelar med att använda ett LEO-system i jämförelse med att använda en GEO-satellit ges i Tabell 12.

Tabell 12: Några för- resp. nackdelar med kommunikationssatelliter i LEO jämfört med i GEO

	LEO-system (med global täckning)	GEO-satellit
Fördelar	<u>korta avstånd:</u> • låga sändareffekter • korta sändningsfördröjningar <u>rörliga:</u> • passerar högt på höga latituder	<u>stationäritet:</u> • känd position • finns alltid på plats • behöver inte vänta på lämpligt sändningstillfälle • står högt på låga latituder • lång sändningstid vid varje sändningstillfälle • små Dopplershift • täcker 42,4 % av jordens yta
Nackdelar	<u>rörliga:</u> • ev. följningsbehov • måste ev. vänta på lämplig passage för att sända • vet kanske inte när lämplig passage sker • tillgänglig sändningstid under en passage kan vara kort	<u>långa avstånd:</u> • stora effektförluster (ca 200 dB) • fordrar höga sändareffekter • långa sändningsfördröjningar <u>stationäritet:</u> • fri sikt inte alltid möjlig • står nära horisonten på höga latituder (ingen täckning över 81,3 graders latitud)
Lämplig för	Smalbandig kommunikation Små datamängder Telefoni	Bredbandig kommunikation Stora datamängder Broadcasting

Fördelar med LEO-system är ett kortare avstånd. Detta medför att sändareffekterna kan vara lägre och att fördröjningarna i systemet blir lägre. Skillnaden i frirymdsdämpning mellan en LEO-satellit på höjden 1000 km och en GEO-satellit är ca 30 dB.⁶⁶ En markstation med en tvåmetersparabol kan t.ex. sända med en effekt på 10 W⁶⁷ medan Globalstars telefoner sänder med effekter på mellan 50 och 300 mW⁶⁸.

⁶⁵ Ulf Ekblad, *Minimum Number of Satellites for Periodic Coverage*, FOA Report C 30511-9.4, December 1988.

⁶⁶ Ray E. Sheriff, Y. Fun Hu, *Mobile Satellite Communication Networks*, Wiley, 2001, p. 152.

⁶⁷ Ibid, p. 157.

⁶⁸ Ulf Ekblad, (red.), *Utnyttjande av satelliter för kommunikation i den nya krigföringen – FoRMA underlagsrapport*, FOI-R--0284--SE, December 2001, p. 58.

LEO-satelliter befinner sig inte på en fix punkt på himlen. Detta gör att de ibland passerar högt på himlen, d.v.s. nära zenit. För polära satelliter kan man då också på höga latituder få sådana satelliter att passera högt över horisonten.

GEO-satelliternas fördelar kommer av deras stationäritet, d.v.s. att de står stilla på en punkt på himlen. Detta medför att deras position alltid är känd, utan att behöva ta till datorer för att räkna ut positionen. Likaså finns de alltid där på sin plats varför man alltid kan kommunicera med dem om fri sikt finns och man kan kommunicera så länge man önskar. På låga latituder står satelliterna högt på himlen, om man bortser från de satelliter vars position finns långt väster eller öster ut.

Nackdelar med LEO-satelliter beror främst på att de är rörliga. Markantennen måste, om inte rundstrålande antenn används, följa satelliten. Den som vill kommunicera via en satellit måste kanske vänta på att en satellit dyker upp i det tillgängliga synfältet och det kan behövas en dator med satelliternas banddata för att veta när en satellit finns inom tillgängligt synfält. Dessutom kan sändningstillfällena bli mycket korta vid varje tillfälle, speciellt om endast ett litet synfält finns tillgängligt.

För GEO-satelliter beror deras nackdelar på dels det långa avståndet och dels på deras stationäritet. Det långa avståndet medför att högre sändningseffekter behövs och att tidsfördröjningen i systemet blir relativt stort. Stationäriteten medför att fri sikt till satelliten inte finns från alla platser och att satelliten alltid står mycket lågt över horisonten på höga latituder.

6.3 Nyttoaspekter

6.3.1 Spaning

För att hindra obehöriga från att ta emot nedsända satellitbilder, d.v.s. för att förhindra att någon kommer åt satellitbilder utan att betala för dem, krypteras i vissa kommersiella system, som t.ex. Ikonos, satellitbilder före nedsändande till marken. För att kunna se bilden behövs en nyckel vilket finns på de behöriga mottagningsstationerna.

Satelliter utrustade med olika typer av sensorer kan användas för olika syften eftersom sensorerna ger olika typ av information. Mycket högupplösande optiska sensorsystem ger bra detaljinformation med inte så ofta och av en liten yta. Högupplösande optiska sensorsystem ger lite sämre detaljinformation men kanske oftare och av en större yta. Eftersom de högupplösande systemen, alltså de med lägre upplösning än de mycket högupplösande systemen, i regel har ett större täckningsområde, d.v.s. de kan täcka in ett större område, och på så sätt se lite längre åt sidorna. Detta medför att de högupplösande systemen i princip kan observera ett visst område lite oftare än system med sämre täckning.

Hyperspektrala sensorsystem, d.v.s. optiska sensorer med upp mot ett par hundra spektralband (till skillnad mot ordinära optiska sensorsystem som har upp mot halvdussinet spektralband), ger mycket bra information om vad som ses avseende färg på objektet. Objektets färg ger sedan bl.a. information om vilket material som ljuset har reflekterats ifrån. Termiska sensorsystem ger information om de avbildade objektens temperaturer. SAR-systems användning beror på radarns våglängd och polarisationsegenskaper. Tabell 13 exemplifierar dessa systems användningsområden.

Tabell 13: Användningsområden för olika satellittyper när det gäller informationsinhämtning

Satellit med:	Användningsområden
Optisk sensor, upplösning < 5 m	Detektion av enstaka fordon, flygplan, byggnader, folksamlingar, karteringar, framställning av höjdmodeller, markklassningar, detektion av andra typer av mänskliga aktiviteter (t.ex. flyktingläger).
Optisk sensor, upplösning 5 – 50 m	Detektion av fordonskonvojer, storskaliga förändringar, fartyg, olja på vatten, isförhållanden, markklassningar, framställning av höjdmodeller.
Hyperspektral sensor	Detektion/genomskådning av kamouflage, kemisk sammansättning av ytor.
Termisk sensor	Detektion av bränder.
SAR	Detektion av olja på vatten, översvämningar, fartyg, kartering av havsis, framställningar av höjdmodeller, mindre detaljerade markklassningar, vägar.

Satellitspaning kan med fördel användas för att rikta in annan spaning och vice versa. Med hjälp av informationsfusion, t.ex. ”data mining”, extraheras sedan underrättelser. Ju fler typer av informationskällor (HUMINT, SIS m.m.) som man har tillgång till desto mer och bättre underrättelser bör man erhålla. En lämplig strategi torde vara att under fredstid att bygga upp en databas av satellitbilder och utbilda personal i bildhantering och -analys.

Normalbilden ger bl.a. underlag för framtagning av kartor samt information om geografiska förhållanden, skog, vägar, infrastruktur, m.m. Före en internationell insats kan normalbilden jämföras med nyregistreringar. Om tiden medger utnyttjas med fördel optiska bilder, men med ett ökande krav på snabba insatser kan det bli nödvändigt att förlita sig på SAR-bilder. Förändringar som då upptäcks kan ge väsentlig information för insatsstyrkorna.

6.3.2 Kommunikation

Tjänster

Det finns ett stort utbud av kommersiella tjänster för direktkommunikation, såsom telefoni, meddelande-, fax-, och dataöverföringar, e-post, Internet, videokonferenser m.m. Det kan t.ex. vara s.k. VSAT-tjänster (VSAT = Very Small Aperture Terminal).

Många av dessa kommersiella tjänster kan också utnyttjas militärt. Utsändningar av DBS-typ (”broadcasting”) kan utnyttjas för överföring av stora datamängder, som t.ex. bilder, kartor, lägesinformation m.m. Det kan också vara av intresse att brett sända information eftersom det blir svårare att veta vem som är mottagare.

När det gäller innehållet i informationen så kan den döljas genom kryptering. Detta kan göras även om kommersiella satellitkommunikationssystem används. Den överförda informationen består av digitala ettor och nollor. Kommunikationssystemet som överför signalen gör detta utan att tolka innehållet. Det som behövs är en enhet som krypterar signalen före sändning och en som dekrypterar efter mottagandet.

Satellitkommunikation i NBF

Kommunikation utgör en förutsättning för att det NätverksBaserade Försvaret (NBF) skall fungera. Satellitkommunikation behöver kanske inte vara nödvändigt i NBF inom det svenska landterritoriet. Däremot på Östersjön och när det terrestra nätet inte fungerar tillfredsställande skulle satellitkommunikation kunna vara det bästa sättet att överföra data och återupprätta avbrutna förbindelser.

För att tidigt få information om vad som sker i omvärlden, d.v.s. att tidigt upptäcka förändringar från normalbilden, behövs överföring av underrättelsedata från platser bortom den svenska radiohorisonten. Sådan överföring kan ske med befintlig terrest infrastruktur när den fungerar. Om den inte fungerar torde det bästa alternativet vara att använda satellitkommunikation⁶⁹, åtminstone om det handlar om stora datamängder (små datamängder kan överföras på kortvåg).

Internationella insatser

FM har alltsedan starten på sin internationella insats i Balkan utnyttjat satelliter för kommunikationen till och från insatsområdet. Exempelvis så installerades FMsatkom i Kosovo i november 2002. SWELINK är ett system som ursprungligen togs fram för Bosnien, men markstationer har med tiden även funnits i södra Ungern, i Makedonien och i Kosovo. Genom åren har olika mycket bandbredd för SWELINK hyrts.⁷⁰

⁶⁹ Ulf Ekblad, (red.), *Utnyttjande av satelliter för kommunikation i den nya krigföringen – FoRMA underlagsrapport*, FOI-R--0284--SE, December 2001, p. 35.

⁷⁰ För mer om rymdsystem och internationella insatser se FOI-rapporten: Mari Andersson, Ulf Ekblad, *Rymdsystem för internationella insatser*, FOI-R--1077--SE, December 2003.

7. Litteraturlista

7.1 FOA-/FOI-rapporter

Mari Andersson och Ulf Ekblad, *Rymdsystem för internationella insatser*, FOI-R--1077--SE, December 2003.

Ulf Ekblad, *Minimum Number of Satellites for Periodic Coverage*, FOA Report C 30511-9.4, December 1988.

Ulf Ekblad, *Rymdvapen och åtgärder mot satelliter*, FOA-R--00-01456-20--SE, Mars 2000.

Ulf Ekblad (red.), *Framtida system för spaning från satellit - En underlagsrapport till LUST*, FOA-R--00-01463-201--SE, Mars 2000.

Ulf Ekblad (red.), *Utnyttjande av kommersiella fjärranalyssatelliter för DBA-ändamål - En underlagsrapport från FoRMA*, FOI-R--017--SE, Augusti 2001.

Ulf Ekblad (red.), *Utnyttjande av satelliter för kommunikation i den nya krigföringen - FoRMA underlagsrapport*, FOI-R--0284--SE, December 2001.

Ulf Ekblad, Marie Andersson, Hans Bergdal, Sandra Lindström och Mats Pettersson, *System av små samverkande satelliter*, FOI-R--1149--SE, Januari 2004.

Hans Jonsson, *Kommersiellt tillgängliga fjärranalyssatelliter*, GAB100 Konsultstudie för FoRMA:s satellitgrupp, Satellus (numera Lantmäteriet, Metria), 2000-12-11.

Lars B. Wallin, Ulf Ekblad, Sven Grahn, Torleiv Orhaug och Ulf Sveding, *Multinationell verifikationssatellit? - en förstudie*, FOA-rapport C 10312-9.3, september 1988.

7.2 Tidskriftsartiklar

Erik Hansson och Wolter Arnberg, "Satellitburen radar för översvämningskartering", *Kart & Bildteknik*, 2003:2, Kartografiska Sällskapet.

Caroline Laurent i "Syracuse 3, une nouvelle génération de satellites militaires", *CNES Magazine*, No. 12, Avril 2001, pp. 29-30.

Mark Long, "Frequencies for satellite communications", *Telesatellit*, March/April 1997, www.mlesat.com/Article9.html.

M. Zink, C. Buck, J-L. Suchail, R. Torres, A. Bellini, J. Closa, Y-L. Desnos, and B. Rosich, "The Radar Imaging Instrument and Its Applications: ASAR", *ESA Bulletin*, No. 106, June 2001, <http://esapub.esrin.esa.it/bulletin/bullet106/zink106.pdf>.

7.3 Uppsatser och avhandlingar

Vidyashankar V. Grounder, Ravi Praksh, and Hosame Abu-Amara, *Routing in LEO-based satellite networks*, University of Texas, NORTEL Networks.

Sastri Kota, Rohit Goyal, and Raj Jain, *Satellite ATM network architectural considerations and TCP/IP performance*, Lockheed Martin Telecommunications, Ohio State University.

Keng-Jin Lian, *Adaptive antenna arrays for satellite personal communication system*, Thesis for Master of Science, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997, <http://scholar.lib.vt.edu/theses/public/etd-74181839751071/etd.pdf> (pdf-filen återger tyvärr några symboler och figurer ofullständigt eller inte alls).

Örln Bengt Lundgren, *Satellitkommunikation för Marinens fartyg*, C-uppsats på Försvarshögskolan, 19100:1067, 2001-06-19.

Paolo Narvaez, Antoine Clerget, and Walid Dabbous, *Internet routing over LEO satellite constellations*, MIT, INRA.

7.4 Böcker

Lars Ahlin och Jens Zander, *Digital radiokommunikation – system och metoder*, Studentlitteratur, 1992.

Dictionnaire de spatiologie, Tome 1: Termes et définitions, 3^e édition, Conseil International de la Langue Française, Paris, 1992.

Charles Elachi, *Spaceborne radar remote sensing: Applications and techniques*, IEEE Press, New York, 1988.

Ray E. Sheriff and Y. Fun Hu, *Mobile Satellite Communication Networks*, Wiley, 2001.

7.5 Övrigt

Nationalencyklopedin.

7.6 Internet

Charles W. Bostian, Vincent W.S. Chan, E. Paul Hager, Neil R. Helm, Christoph E. Mahle, Edward F. Miller, Joseph N. Pelton, *Satellite Communication Systems and Technology; Chapter 2: Review Assessment of Satellite Communication Technologies*, NASA and ITRI, 1993, www.wtec.org/loyola/satcom/c2_s1a.htm#f2_1 .

Friedrich Jondral och Marcel Kohl, *Simulation of Satellite Communications Links*, www.estec.esa.nl/xewww/cost255/ws/98c08/papers/c255p08.pdf .

Robert A. Nelson, *Antennas – The Interface with Space*, 1999,
www.atcourses.com/antennas_tutorial.htm .

Leila Z. Ribeiro, *Advanced Satellite Communications – Earth Stations, Antennas and Network Architecture*, George Mason University, 2001,
http://bass.gmu.edu/~lribeiro/Spring01/Lectures/TCOM508_L1.PDF .

”TerraSAR-X - New Quality of Earth Observation”, SpaceRef.com, November 22, 2004,
<http://www.spaceref.com/news/viewpr.html?pid=15523>

www.eohandbook.com

www.globalstar.com/index_two.html

www.imagesatintl.com/aboutus/satellites/satellites.shtml#

www.iridium.com

www.skyhelp.net/acrobat/9june01/data_overview.pdf

Appendix: Vanliga termer och parametrar

Appendix 1: Förklaringar av begrepp rörande satellitbanor

I detta appendix listas ett antal termer och parametrar som inte enbart finns med i rapporten. Detta görs med tanke på att kunna användas som en uppslagsdel för användare som stöter på dessa begrepp i olika sammanhang.

Term	Förklaring
apogeum	Den punkt i satellitbanan som är längst bort från jorden.
banelement (Keplers element)	De sex storheter som fullständigt och entydigt bestämmer en satellits position.
excentricitet	Mått på hur långsträckt en ellips är (Figur 2). Beteckning: e ; för en jordsatellit kan den uttryckas som $e = \frac{\text{apogeumhöjden} - \text{perigeumhöjden}}{\text{apogeumhöjden} + \text{perigeumhöjden} + 2 \times \text{jordradien}}$
GEO	Geostationary (Geosynchronous) Earth Orbit: Cirkulär satellitbana i ekvatorsplanet på höjden 35 800 km; omloppstid: 24 h.
GSO	GeoSynchronous Orbit: En bana som har samma omloppstid som tiden det tar för jorden att rotera ett varv kring sin axel (d.v.s. ett dygn).
GTO	Geostationary Transfer Orbit: Temporär elliptisk bana för slutlig positionering i GEO-bana.
HEO	Highly Eccentric Orbit: Extremt elliptisk satellitbana, typ Molniya-banan.
HEO	High Earth Orbit: satellitbanor på höga höjder bortom GEO.
inklination	Vinkeln mellan satellitens banplan och ekvatorsplanet (Figur 3). Beteckning: i
LEO	Low Earth Orbit: Satellitbana vanligen nästan cirkulär och inom höjd-intervallet 100 - 5000 km. (Alternativ definition: 100 – 500 km.)
MEO	Medium Earth Orbit: Cirkulär satellitbana mellan LEO och GEO, d.v.s. 5 000 – 35 000 km. (Alternativ definition: 500 – 35 000 km.)
Molniya-bana	Extremt elliptisk satellitbana, med perigeum på 400 – 1000 km över södra jordklotet och apogeum på ca 40 000 km över norra jordklotet, och med en inklinations på ca 63 grader; omloppstid: 12 h.
nadir	Den punkt på jorden som ligger rakt under satelliten. (Jfr begreppet zenit som är ”punkten” rakt ovanför en punkt på jorden.)
nedstigande nod (descending node)	Den punkt där satellitens bana korsar ekvatorsplanet från nord mot syd.
nodlinje	Linjen mellan centralkroppen och den uppstigande noden (Figur 3).
omloppstid	Den tid det tar för satelliten att fullgöra ett varv kring centralkroppen.

Term	Förklaring
perigeum	Den punkt i satellitbanan som är närmast jorden (Figur 2).
perigeums argument	Vinkeln längs med satellitbanans plan mellan den uppstigande noden och banans perigeum mätt längs med satellitens rörelse (Figur 3). Beteckning: ω
polär bana	En satellitbana med inklinationen 90 grader.
precession	Långsam vridning.
rektascension	Vinkel längs med jordens ekvatorsplan mätt österut från vårdag-jämningspunkten till satellitbanans uppstigande nod (Figur 3). Beteckning: Ω
solsynkron bana	En bana där satelliten alltid passerar en viss ort vid samma lokala soltid. Banplanet roterar ett varv/år på sådant sätt att banplanets position i förhållande till solen är konstant; detta kan ske för LEO-banor med inklinations större än 90 grader (den exakta inklinationen beror av banhöjden men ligger i allmänhet runt 98 grader).
subsatellitspår	Satellitbanans projektion på jordytan; kallas också markspår. För exempel se Figur 5 och Figur 6.
uppstigande nod (ascending node)	Den punkt där satellitens bana korsar ekvatorsplanet från syd mot nord (Figur 3).

Appendix 2:

Förklaringar av satellitrelaterade termer

I detta appendix listas ett antal termer som inte nödvändigtvis finns med i rapporten. Detta görs med tanke på att kunna användas som en uppslagsdel för användare som stöter på begreppen i andra sammanhang.

Term	Förklaring
across-track-sensor	En across-track-sensor använder en spegel som rör sig i sidled i förhållande till satellitens rörelseriktning.
across track stereo	Stereoavbildning genom registrering av ett och samma områden från två passager, d.v.s. genom att från respektive passage ena gången vinkla åt vänster och andra åt höger (eller vice versa).
along-track scanner	Samma som along-track-sensor.
along-track-sensor	En skanner med en linjär array av detektorer vinkelrät mot satellitens rörelseriktning.
along track stereo	Stereoavbildning genom vinkling först framåt och sedan bakåt.
attityd	Satellitens orientering given som tre vinklar: rotation kring längdaxel (roll), rotation kring tvärsaxel (pitch) och rotation kring vertikalaxel (yaw).
cross-track scanner	Samma som across-track-sensor.
fjärranalys	Den vetenskap som på avstånd studerar objekt genom att analysera elektromagnetisk strålning från objektet (i många fall jorden). Strålningen kan vara alstrad av fjärranalysensorn, som i fallet med SAR. Sensorn som insamlar data kan finnas på såväl satelliter som på flygplan eller andra plattformar eller helt enkelt uppställd på marken för att studera något som finns långt bort.
marksegment	Se Figur 1.
nyttolast	Den utrustning på satelliten som används direkt för satellitens uppgift.
operativ livslängd	Den tid systemet fungerar. För satelliter är denna tid ofta mycket kortare än den tid som satelliten befinner sig i omloppsbanan.
plattform	Den del av satelliten som stöder nyttolasten.
reaktionshjul	Ett roterande svänghjul som används till att styra satellitens position i rymden (d.v.s. dess attityd) vilket sker genom att ändra på rotationshastigheten varvid det kraftmoment som då alstras vrider rotationsaxeln.
rymdsegment	Se Figur 1.
signalspaning	Teknik och metoder för insamlande och analys av elektromagnetisk strålning i radio- och radar området. Signalspaning är passiv, d.v.s. signalspaningsutrustningen sänder själv inte ut någon strålning. Därmed utesluts avbildande radartekniker. Förkortning: SIS (eller sis).
spaning	Militär term för inhämtande av information om objekt och aktiviteter. Därvid kan fjärranalysmetoder och -tekniker användas.

Term	Förklaring
spotmod	Den avbildande sensorn följer ett område på marken vid passagen av området (se Figur 16).
stråkbredd (ground swath)	Hur stort område en sensor ser från satelliten, d.v.s. bredden på det område som sensorn sveper över (se Figur 13).
styrbarhet	Förmåga att styra en sensor att samla in information från visst område el. dyl.
telemetri	Tekniker för att överföra mätdata från en punkt till en annan, vanligen med hjälp av radio- eller kabelförbindelse. ⁷¹ I satellitsammanhang det samma som telemetrisignal.
telemetrisignal	Signal innehållande mätdata från en satellit, sensor, m.m. Begreppet omfattar både den informationsdata som är syftet med sensorn och data som talar om systemets status. Det senare kallas på engelska för housekeeping telemetry eller maintenance telemetry.
tidstäckning	Den tid som en satellit kan täcka in ett visst område med sin sensor.
täcknings- intervall	Återbesöksfrekvensen, d.v.s. hur ofta en viss ort teoretiskt kan avbildas, d.v.s. kortaste tid mellan två teoretiskt möjliga registreringar. För optiska sensorer gäller det passager i nedstigande mod (descending mode) medan SAR-satelliterna också registrera i uppstigande mod (ascending mode). Återbesöksfrekvensen påverkas av stråkbredden, banhöjden, möjligheten att vinkla instrumentet eller hela satelliten samt latituden (huvudsakligen för satelliter i nära polär bana).

⁷¹ Nationalencyklopedin.

Appendix 3:

Förklaringar av sensorrelaterade begrepp

I detta appendix listas ett antal begrepp som inte nödvändigtvis finns med i rapporten. Detta görs med tanke på att kunna användas som en uppslagsdel för användare som stöter på dessa begrepp i olika sammanhang.

Term	Förklaring
asimut	Vinkel längs horisonten från norr solurs; d.v.s. 0 grader motsvarar norr; 90 grader motsvarar öst; 180 grader motsvarar söder; och 270 grader motsvarar väst.
B	Blå våglängd (blått spektralband): ca 0,4 – 0,5 mikrometer.
bandbredd	Frekvensomfång. Utsträckningen i spektrum hos ett frekvensband, d.v.s. bandbredden är skillnaden i hertz (Hz) mellan den högsta och den lägsta frekvensen i bandet. ⁷² Matematisk/fysikaliskt finns ingen strikt definition av bandbredd; ett flertal definitioner används: ⁷³ 3-dB-bandbredd: det frekvensområde inom vilket spektraltätheten är större än halva toppvärdet. effektbandbredd: det frekvensområde som innehåller en viss del (t.ex. 99 %) av den totala effekten. I datorsammanhang används bandbredd ibland som mått på ett överföringsmediums maximala överföringshastighet. 1 Hz motsvarar ungefär 1 bit/s. ⁷⁴
DAMA	Demand Assignment Multiple Access: Multilobantennsystem för frekvensåtervinning och behovsanpassad kapacitetsallokering.
DDOA	Doppler Difference Of Arrival
elevation	Vinkeln över horisonten från 0 grader vid horisonten till 90 grader i zenit.
ETM	Enhanced TM: TM på Landsat 7
frirymd-utbredningsförlust (eng.: free-space loss)	Den dämpning av signalen som orsakas av avståndet. Dämpningen ökar med kvadraten på avståndet.
G	Grön våglängd (grönt spektralband): ca 0,5 – 0,6 mikrometer.
geometrisk upplösning	Upplösning i rumsligt avseende; anges ofta i fjärranalyssammanhang med pixelstorleken (längden på kvadratens sida) på marken.
HS	Hyperspektralt: Antalet spektralband är så många att man får en kontinuerlig täckning av ett stort våglängdsintervall. Typiskt många tiotal eller några hundra spektralband.
incidensvinkel	Infallsvinkel. Det är den vinkel som en infallande stråle bildar vid reflektionspunkten med normalen till ytan som strålen träffar.

⁷² Nationalencyklopedin.

⁷³ Lars Ahlin och Jens Zander, *Digital radiokommunikation – system och metoder*, Studentlitteratur, 1992, p.170.

⁷⁴ Nationalencyklopedin.

Term	Förklaring
länkbudget	Summan av förluster och förstärkningar av signalen mellan sändare och mottagare.
MS	Multispektralt (färgbilder): Samlingsnamn för ett antal spektralband som kan användas för att skapa en färgbild.
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index: Vegetationsindex.
Pan	Panchromatic: Täcker ett spektralband som ger en bild motsvarande svart-vitt.
polarisation	Anger vilket polarisationsplan som man sänder i och vilket man tar emot i. T.ex. VV betyder: sänd vänsterpolariserad signal och mät returnerad intensitet med vänsterpolarisering. Olika objekt vrider polarisationen på olika sätt och olika polarisation olika mycket. Därför blir användningen av olika polarisationer och kombinationer av sänd- och mät polarisationer ett sätt att kunna separera objekt, p.s.s. som man använder informationen från flera spektralband i en optisk bild.
polariserat ljus	Elektromagnetisk strålning är en svängningsrörelse hos det elektriska och magnetiska fältet. För varje våg svänger det elektriska fältet i ett plan vinkelrätt mot vågens utbredningsriktning. Polariserat ljus består av vågor som svänger i samma plan till skillnad från opolariserat ljus där det elektriska fältet svänger i alla möjliga plan.
R	Röd våglängd (rött spektralband): ca 0,6 – 0,7 mikrometer.
radiometrisk upplösning	Anger, förenklat uttryckt, hur många grånivåer en bild har. Kallas också dynamiskt omfång (eng. dynamic range).
RGB	Rött – Grönt – Blått (Red – Green – Blue).
SAR	Synthetic Aperture Radar: radarsystem där hög asimut upplösning åstadkoms genom att lagra och processa data på Dopplerförskjutningen hos flera radarpulser på ett sådant sätt att man får samma effekt som från en mycket längre antenn.
scan SAR	En SAR med förmåga att belysa flera delstråk genom att olika utvinklingar av antennen, d.v.s. ett bredare område täcks in men med en lägre upplösning (se Figur 15).
spatial upplösning	Samma som geometrisk upplösning.
spektralband	Term som används inom optiken; det samma som våglängdsband och frekvensband.
spektral upplösning	Upplösning i spektralt avseende, d.v.s. hur nära två spektrala linjer (två elektromagnetiska signaler på två våglängder/frekvenser) kan ligga för att man skall kunna se att det är två linjer och ej enbart en linje.
spot SAR	SAR-mod där avbildning sker av ett och samma område under satellitpassagen (se Figur 16).
strip-line image	Satellitbild där data från hela registreringen har används. Registreringen kan vara under tiotalet minuter eller t.o.m. längre. ⁷⁵
strip SAR	SAR-mod där avbildning sker av områden i form av remsor (se Figur 14).
S/V	svart/vitt
TM	Thematic Mapper: Sensor på Landsat 1 – 6.

⁷⁵ M. Zink, C. Buck, J-L. Suchail, R. Torres, A. Bellini, J. Closa, Y-L. Desnos, and B. Rosich, "The Radar Imaging Instrument and Its Applications: ASAR", *ESA Bulletin*, No. 106, June 2001, p. 50, <http://esapub.esrin.esa.it/bulletin/bullet106/zink106.pdf>

Term	Förklaring
transponder	Kombinerad sändare och mottagare (för radio eller radar, som vid mottagande av viss signal automatiskt svarar med egen signal anv. t.ex. för navigering); från eng. <i>transponder</i> förkortad sammansättning av eng. transmitter och responder ('svarare') ⁷⁶ ; i satellitsammanhang en kombinerad sändare och mottagare som tar emot sändningen på en frekvens och sänder ut en förstärkt signal på något ändrad frekvens.
upplösning	Förmågan att separera två objekt i en bild, d.v.s. att se dessa som två objekt. Inom fotografin en term som anger hur fina detaljer som maximalt kan återges med en fotografisk film. Termen används också om ett kameraobjektivs förmåga att särskilja fina detaljer. För att bestämma en films eller ett objektivs upplösning använder man linjeraster med varierande antal linjepar per mm som kopieras på filmen resp. projiceras genom objektivet. Ju finare raster som filmen eller objektivet förmår återge, desto högre är upplösningen. Som regel kan man säga att filmer med låg ljuskänslighet har högre upplösning än filmer med hög ljuskänslighet och att svartvita filmer har högre upplösning än färgfilmer. Objektivet upplösning påverkas bl.a. av bländarvalet (bländare 8 eller 11 ger normalt den högsta upplösningen). ⁷⁷
vinkel-upplösning	Den minsta vinkel mellan två objekt som fordras för att de skall ses separerade (d.v.s. som två objekt) av en sensor. ⁷⁸

⁷⁶ Nationalencyklopedin.⁷⁷ Nationalencyklopedin.⁷⁸ Nationalencyklopedin.

Appendix 4:

Förkortningar

I detta appendix listas ett antal förkortningar som inte enbart finns med i rapporten. Detta görs med tanke på att kunna användas som en uppslagsdel för användare som stöter på dessa förkortningar i olika sammanhang. Det finns ett otal andra förkortningar, men de som är medtagna här tillhör förhoppningsvis de mest vanligt förekommande.

AGC	Automatic Gain Control
ARTEMIS	Advanced Relay and TEchnology MISSION Satellite
ASAP	Ariane Structure for Auxiliary Payload
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BNSC	British National Space Centre
BOL	Beginning Of Life
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
BSB	British Satellite Broadcasting
BSS	Broadcast Satellite Service
CCB	Common Core Booster
CCD	Charged-Coupled Device
CCRS	Canada Centre for Remote Sensing
CDMA	Code Division Multiple Access
CNES	Centre National d'Études Spatiales (Frankrike)
COMINT	COMMunication INTelligence
CS	Control Station
CST	Core Software Technology
DAMA	Demand Assignment Multiple Access
dB	decibel
dB _i	decibel i förhållande till isotropisk
DBS	Direct Broadcast Satellite
DDOA	Doppler Difference Of Arrival
DEM	Digital Elevation Model
DGA	Délégation Générale pour l'Armement (Frankrike)
DGA	Digital GruppAntenn
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DOS	Denial of Service
DRS	Data Relay Satellite
DS	DirektSekvens
DSCS	Defense Satellite Communications System
DTM	Digital Terrain Model
EADS	European Aeronautic Defence and Space Company
EHF	Extremely High Frequency

EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
ELINT	ELectronic INTelligence
ELOP	ELectro Optics Industries, Ltd
EORSAT	ELINT Ocean Reconnaissance Satellite
EOS	Earth Observing System
EOS	End Of Service
ERDAS	Earth Resources Data Analysis System
EROS	Earth Resources Observation System
ERS	European Remote Sensing satellite
ESA	Elektriskt Styrd Antenn
ESA	European Space Agency
ESOC	European Space Operations Centre
ESTEC	European Space research and Technology Centre
ETM	Enhanced TM
EUTELSAT	European Telecommunications SATellite organization
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFI	Forsvarets ForskningsInstitutt (Norge)
FLIR	Forward Looking IR
FM	Försvarsmakten (Sverige)
FSS	Fixed Satellite Service
FTN	Försvarets TeleNät
GEO	Geostationary Earth Orbit
GLONASS	GLObal NAVigation Satellite System (Ryssland)
GPS	Global Positioning System (USA)
GSO	GeoSynchronous Orbit
GTO	Geostationary Transfer Orbit
HEO	Highly Eccentric Orbit
HEO	High Earth Orbit
HPM	High Power Microwave
HRG	High Resolution Geometry
HRS	High Resolution Stereo
HRV	High Resolution Visible
HUMINT	HUMAN INTelligence
IAI	Israel Aircraft Industries
IFOV	Instantaneous Field Of View
II	Internationella Insatser
IR	InfraRed
IRS	Indian Remote Sensing satellite
ISI	ImageSat International
ISS	International Space Station
ITSO	International Telecommunications Satellite Organisation
ITU	International Telecommunications Union
IW	Information Warfare
Ka	Above K-band
KH	Key-Hole

KOS	KOMmunikationsSpaning
Ku	Under K-band
KV	KortVåg
LEO	Low Earth Orbit
LPD	Low Probability of Detection
LPI	Low Probability of Intercept
MEO	Medium Earth Orbit
Milstar	MILitary Strategic Tactical Relay
MIR	Mellan-IR
MSS	Mobile Satellite Service
MTI	Moving Target Indicator
MWIR	Medium Wave Infrared
NASDA	National Space Development Agency (Japan)
NBF	NätverksBaserat Försvar
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIIRS	National Imagery Interpretability Rating Scale
NIR	Near IR
NOSS	Naval Ocean Surveillance System
NSAB	Nordiska Satellit AB
PN	Pseudo-Noise
PRN	Pseudo Random Noise
PTS	Post- och TeleStyrelsen
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	QuadriPhase Shift-Keying
Radar	RADio Detection And Ranging
RAL	Rutherford Appleton Laboratory
RAR	Real Aperture Radar
RTOF	Recoverable Tethered Optical Fibre
SAMRO	SATellite Militaire de Reconnaissance et d'Observation
SAR	Synthetic Aperture Radar
SATCOM	SATellite COMMunication
SBR	Space-Based Radar
SCPC	Single Channel Per Carrier
SDS	Satellite Data System
SES	Société Européenne des Satellites
SHF	Super High Frequency
SIR	Shuttle Imaging Radar
SIS	SIGnalSpaning
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
SSO	Sun-Synchronous Orbit
SSPA	Solid-State Power Amplifiers
S/V	svart/vitt

SWIR	Short Wave Infrared
SVT	Sveriges Television
TDF	Télédiffusion de France
TDI	Time Delay Integration
TDMA	Time Division Multiple Access
TDOA	Time Difference Of Arrival
TDRS	Tracking and Data Relay Satellite
TDRSS	Tracking and Data Relay Satellite System
TES	TEknisk Signalspaning
TIR	Thermal IR
TIROS	Television IR Observation Satellite
TM	Thematic Mapper
TOA	Time Of Arrival
TWT	Travelling Wave Tube
TWTA	Travelling-Wave-Tube Amplifiers
UFO	UHF Follow-On
UHF	Ultra High Frequency
VIS	VISible
VNIR	VIS + NIR
VSAT	Very Small Satellite Terminal

Appendix 5: Det elektromagnetiska spektrumet

Våglängdsindelning av det optiska spektrumet⁷⁹

Frekvensband		Beteckning	Våglängdsområde ⁸⁰
Ultraviolett ljus		UV	0,01 – 0,4 µm
Synligt ljus		VIS	0,4 – 0,75 µm
Infrarött ljus	Hela intervallet	IR	0,75 – 1 mm
	Nära IR	NIR	0,75 – 1,3 µm
	Short Wave IR	SWIR	1,3 – 3 µm
	Mid-Wave IR (Mellan-IR)	MWIR (MIR)	3 – 6 µm
	Termisk IR	TIR	6 – 15 µm
	Far IR	FIR	15 – 1 mm
Mikrovågor		MW	1 mm – 1 m

⁷⁹ Från www.eohandbook.com

⁸⁰ De angivna värdena är naturligtvis bara approximativa; det finns inga skarpa gränser mellan olika våglängdsområden.

Frekvensindelning av radiospektrumet⁸¹

Frekvens-band	Beteck-ning	Svensk benäm-ning	Svensk beteck-ning	Frekvens-område⁸²	Våglängdsområde⁸³
Extremely Low Frequency	ELF			0,03 – 300 Hz	1000 – 1 000 000 km
Ultra Low Frequency	ULV			0,3 – 3 kHz	100 – 1000 km
Very Low Frequency	VLF			3 – 30 kHz	10 – 100 km
Low Frequency	LF	Lång-våg	LV	30 – 300 kHz	1 – 10 km
Medium Frequency	MF	Mellan-våg	MV	300 – 3000 kHz	100 – 1000 m
High Frequency	HF	Kort-våg	KV	3 – 30 MHz	10 – 100 m
Very High Frequency	VHF	Ultra-kortvåg	UKV	30 – 300 MHz	1 – 10 m
Ultra High Frequency	UHF			300 – 3000 MHz	0,1 – 1 m
Super High Frequency	SHF			3 – 30 GHz	1 – 10 cm
Extremely High Frequency	EHF			30 – 300 GHz	1 – 10 mm

⁸¹ Från *Dictionnaire de spatiologie*, Tome 1: Termes et définitions, 3^e édition, Conseil International de la Langue Française, Paris, 1992.

⁸² Det som står i not 76 gäller naturligtvis också för frekvensområden.

⁸³ Se not 76.

Frekvensindelning av radar- och radiospektrumet⁸⁴

Frekvens- band⁸⁵	Frekvensområde för radar [GHz]		Frekvensområde för kommunikation [GHz]	
	Intervall	Vanligen använt intervall	”Frekvens- band”	Vanligen använt intervall
L	1 – 2	1,215 – 1,4	1,5	1,525 – 1,710
S	2 – 4	2,3 – 2,5 2,7 – 3,4	2,5	
C	4 – 8	5,25 – 5,85	4/6	3,7 – 4,2 5,925 – 6,425
X	8 – 12	8,5 – 10,5		
Ku	12 – 18	13,4 – 14,0 15,3 – 17,3	11/14 12/14	10,7 – 13,25 14,0 – 14,5
K	18 – 27	24,05 – 24,25	20	
Ka	27 – 40	33,4 – 36,0	30	
V	40 – 75			
W	75 – 110			

⁸⁴ Från *Dictionnaire de spatiologie*, Tome 1: Termes et définitions, 3^e édition, Conseil International de la Langue Française, Paris, 1992.

⁸⁵ Det finns några olika varianter av indelningar av radar- och radiofrekvensområdena, varför man ibland ser uppgifter som inte är i överensstämmelse med indelningarna här.

Appendix 6: Militära frekvensband för kommunikation

De viktigaste frekvensband som är identifierade i den europeiska frekvensplanen som militära frekvensband för satellitkommunikation är listade i Tabell 14. Det finns dessutom notering om frekvensband för framtida civila och militära satellitsystem. Dessa framgår av Tabell 15.

Tabell 14: Militära frekvensband för satellitkommunikation i den europeiska frekvensplanen⁸⁶

Frekvens [GHz]	Band	Kommentar
7,25 - 7,75	C/X	nedlänk
7,9 - 8,4	C/X	upplänk
20,20 - 21,20	K	nedlänk
30,00 - 31,00	Ka	upplänk
39,50 - 40,50	Ka	nedlänk
43,50 - 45,50	V	upplänk

Tabell 15: Frekvensband i den europeiska frekvensplanen för framtida civila och militära satellitsystem⁸⁷

Frekvens [GHz]	Band	Kommentar
50,40 - 51,40	V	
71,00 - 74,00	V	upplänk
81,00 - 84,00	W	nedlänk

Bandet kring 7 - 8 GHz⁸⁸ utnyttjas i stor omfattning inom NATO för satellitkommunikation. Delar av bandet disponeras även av Försvarsmakten men utnyttjas för radiolänk inom FTN. Högre frekvensband, främst kring 20/30 GHz, börjar utnyttjas för specifika militära satellitkommunikationssystem.

Att banden i Tabell 14 är militära innebär inte att Försvarsmakten kan disponera dem utan vidare. Först erfordras en överenskommelse med Post- och telestyrelsen (PTS, den svenska frekvensmyndigheten) och därefter skall en internationell koordineringsprocedur, vilken tar flera år, genomföras via ITU.

⁸⁶ Ulf Ekblad (red.), *Utnyttjande av satelliter för kommunikation i den nya krigföringen – FoRMA underlagsrapport*, FOI-R--0284--SE, December 2001, p. 14.

⁸⁷ Ibid.

⁸⁸ X-bandet.