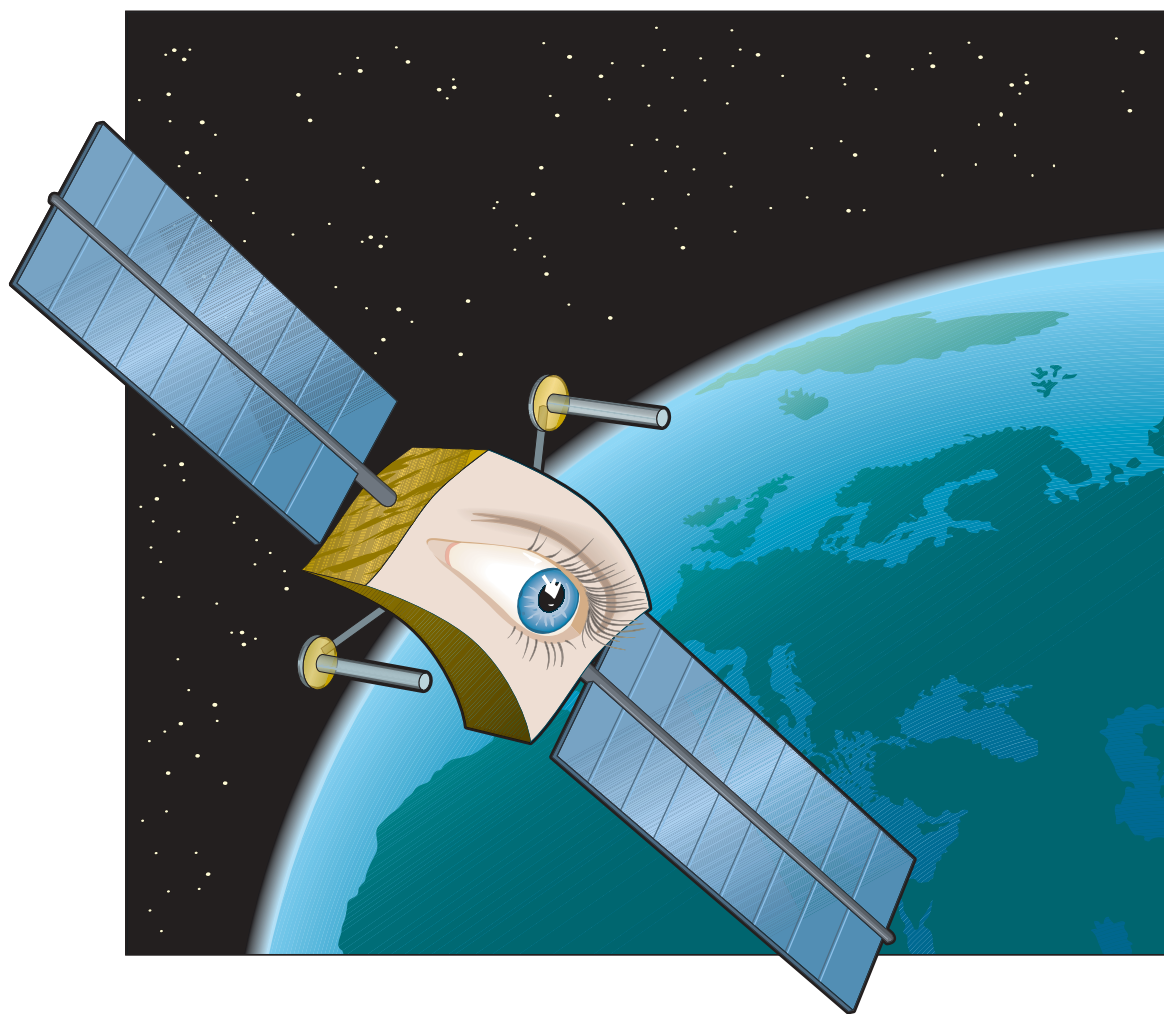


Rymden – nytta och teknik



För första gången ges ett nummer om rymden ut i FOIs serie "FOI orienterar OM...". FOI har under 40-års tid gett ut OM-numren med syftet att på ett enkelt och lätt-tillgängligt sätt föra över kunskap från FOI till befattningshavare inom i första hand Försvarsmakten, om teknik och metoder som är av vikt för försvaret i stort. Rymdsystemen har utvecklats av militära drivkrafter, men har i ökande omfattning fått civila tillämpningar. Idag spelar rymdsystem en närmast självklar roll i det dagliga livet – satellit-TV, satellitnavigering och väderprognoser baserade på satellitdata, för att nämna några exempel.

Av de militära funktionerna i rymdsystemen idag är de tre viktigaste tjänsterna: spaning, satellitkommunikation och positionering sannolikt oundgängliga för varje nation som har ett modernt försvar. För Sveriges del innebär den ökade fokuseringen på internationella operationer och omvandlingen till ett nätverksbaserat försvar (NBF) att rymdfrågorna behöver få en ökad betydelse inom Försvarsmakten.

Det första steget mot detta är att bygga kunskap om rymden för militära ändamål. FOI och dess föregångare har sedan slutet av 1950-talet bedrivit forskning om rymden, om än med små resurser. Denna verksamhet har, mot bakgrund av de pågående förändringarna, ökat under de senaste åren och detta OM-nummer är en första mer populär-vetenskaplig avtappning av kunskap om rymdbaserade tjänster för militära behov.

Jag hoppas att "OM Rymden" kan bidra till ökade kunskaper om rymdsystemens möjligheter och begränsningar som stöd för såväl det militära försvaret som för kris-hantering och rent civila samhällsfunktioner.

Stockholm, den 9 maj 2005



Madelene Sandström
Generaldirektör

Rymden – nytta och teknik

Den här boken kan beställas från
TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSSINSTITUT (FOI)

INNEHÅLL

INLEDNING	5
ANVÄNDNINGSSOMRÅDEN	10
ERFARENHETER FRÅN MILITÄR ANVÄNDNING	18
MILITÄR RYMDSTRATEGI OCH POLICY	21
RYMDEN OCH DEN SÄKERHETSPOLITISKA UTVECKLINGEN	28
FRAMTIDA RYMDKRIG	34
RYMDTEKNIK	37
RYMDTEKNIK - NYTTOLASTER	54
ORDLISTA	77
LITTERATURFÖRTECKNING	80

Redaktörer

Jan Lindh, Göran Bergström

Medverkande författare

Hans Bergdal, Erik Berglund, Bengt Boberg, Ulf Ekblad, Fredrik Marsten Eklöf,
Lars Höstbeck, Sandra Lindström, Ingmar Renhorn, Steven Savage, Robert Sigg,
Mattias Waldenvik, Niklas Wingborg, Mike Winnerstig

Detta är en informationsbok för utbildningsändamål för Försvarsmakten
inom rymdteknologi.

Illustrationer: Martin Ek

Layout: Lars Broman

Språkgranskning: Taina Karlsson

Människans rymdhistoria i korta drag

Årtal Händelse

1543 Nikolaus Kopernicus bok "De Revolutionibus". Beskriver planetsystemet, publiceras postumt

1570–97 Tycho Brahe gör observationer som Kepler använder för att komma fram till sina lagar

1609 Keplers två första lagar

1619 Keplers tredje lag

1870 Jules Vernes bok "Resan till månen"

1898 H.G. Wells bok "Världarnas krig"



Kepler

1903 Konstantin Tsiolkovskijs bok om rymdfart

1914 Robert Goddard får patent på flerstegsraketen

1923 Herman Oberths raketbok om hur man kan skjuta upp satelliter i banor runt jorden

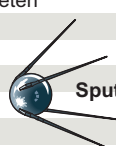
1926 Robert Goddards uppskjutning av den första vätskeraketen

1938 Orson Welles radiosändning av "Världarnas krig"

1942 V2-raketen (Wernher von Braun) provskjuts

1945 Den första beskrivningen av GEO-banan

1957 Sputnik 1



Sputnik 1

1957 Sputnik 2 med hunden Laika

1958 Score, den första kommunikationssatelliten

1959 Svensk rymdforskningskommitté bildas (föregångare till Rymdstyrelsen)

1961 Första människan i rymden (Jurij Gagarin)

1962 ESRO bildas (*European Space Research Organisation*); slogs 1975 ihop med ELDO och blev ESA)

1963 Provstoppsavtalet (Partial Test Ban Treaty, PTBT)

1963 Den geostationära banan används för första gången

1964 ELDO bildas (*European Launcher Development Organisation*); slogs 1975 ihop med ESRO och blev ESA)

1965 Första rymdpromenaden

1965 Frankrike placerar satellit i omloppsbana runt jorden och blir därmed den tredje rymdnationen

1965 Esrange börjar byggas

1967 Rymdavtalet (Outer Space Treaty)

1968 Räddningsöverenskommelsen (Rescue Agreement)

1968 Filmen "2001: A Space Odyssey"

1969 Första landstigningen på månen (Apollo 11)

1972 Rymdskadekonventionen (Liability Convention)

1972 Den första civila fjärranalysatelliten Landsat 1 skjuts upp

1972 Senaste gången människan var på månen (Apollo 17)

1973 Rymdstationen Skylab skjuts upp

1975 Registreringskonventionen (Registration Convention)

1979 Månavtalet (Moon Agreement)

1979 Första uppskjutning med Ariane-1

1980 Den första indiska satelliten skjuts upp

1981 Den första uppskjutningen av rymdfärjan

1981 Första japanska bärraketuppskjutning

1982 Glonass tas i drift

1986 Rymdfärjan Challenger exploderar vid uppskjutningen

1986 Rymdstationen MIR skjuts upp

1986 SPOT 1 skjuts upp

1986 GPS-systemet tas i drift

1986 Viking, den första svenska satelliten, skjuts upp

1988 Den första israeliska satelliten, Ofeq, skjuts upp

1989 Tele-X skjuts upp

1990 Hubble-teleskopet skjuts upp

1991 Första kinesiska bärraketuppskjutning

1998 Den första delen till rymdstationen ISS skjuts upp

2003 Rymdfärjan Columbia exploderar vid återinträdet i atmosfären

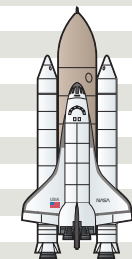
2003 SMART-1 skjuts upp

2003 Kina blir tredje nation att skjuta upp en astronaut i omloppsbana

2004 SMART-1 går in i omloppsbana kring månen



V2



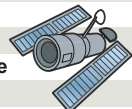
Rymdfärjan



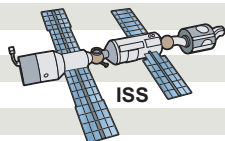
Apollo 11



GPS



Hubble



ISS

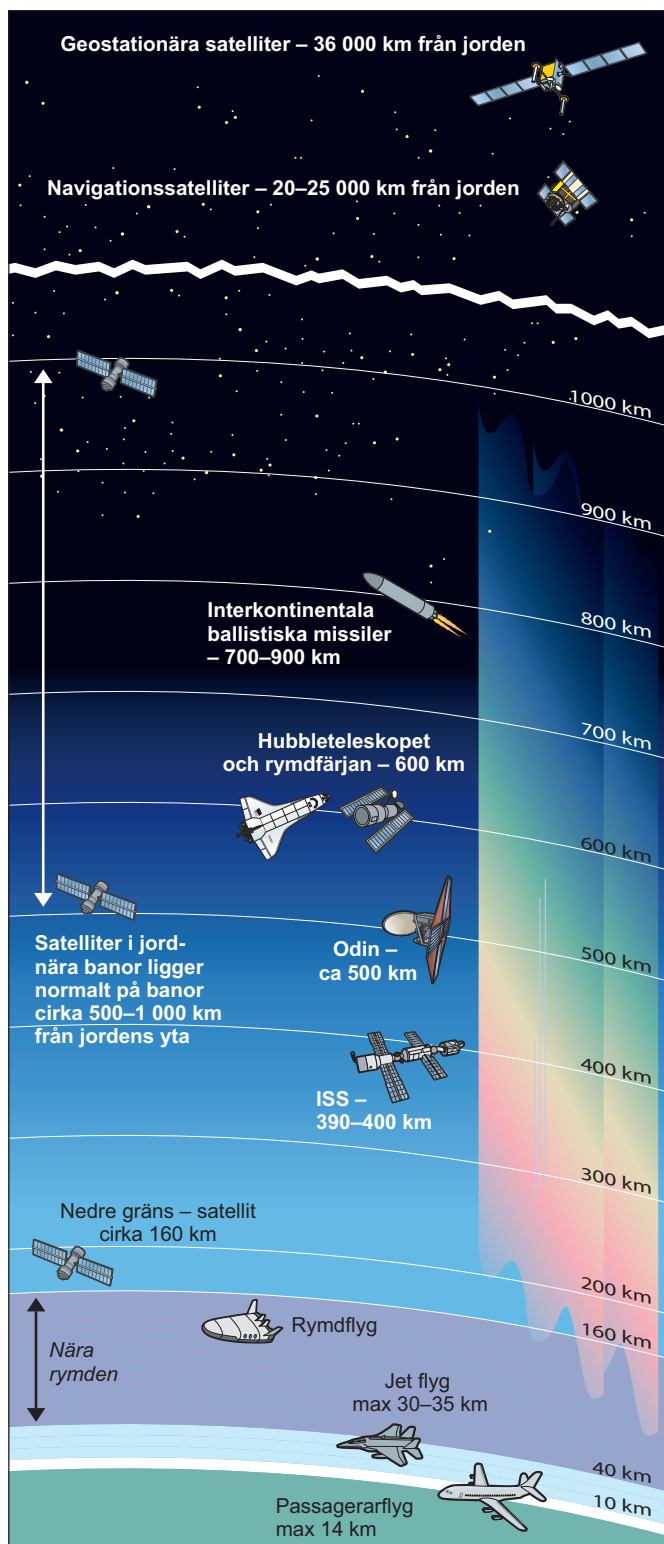
Introduktion

När vi hastigt fick uppdraget att göra en "FOI orienterar om rymden" kändes det osäkert hur kvalitén på slutprodukten skulle bli, med tanke på tidsramen. Nu när boken är klar måste vi säga att våra medarbetare gjort ett imponerande arbete. Boken är skriven med fokus på nyttan av rymdssystem, med en god portion teknik, för att läsaren ska kunna bilda sig en uppfattning om styrkor, svagheter, potential och begränsningar.

Vi önskar Dig läsare mycket nöje.

Jan Lindh
redaktör

Göran Bergström
biträdande redaktör



Figur 1: En översikt av var man hittar vad i rymden och luften. De olika miljöerna delas ibland strategiskt upp i "Luften", "Nära rymden" samt "Omloppsbanan".

Varför rymden

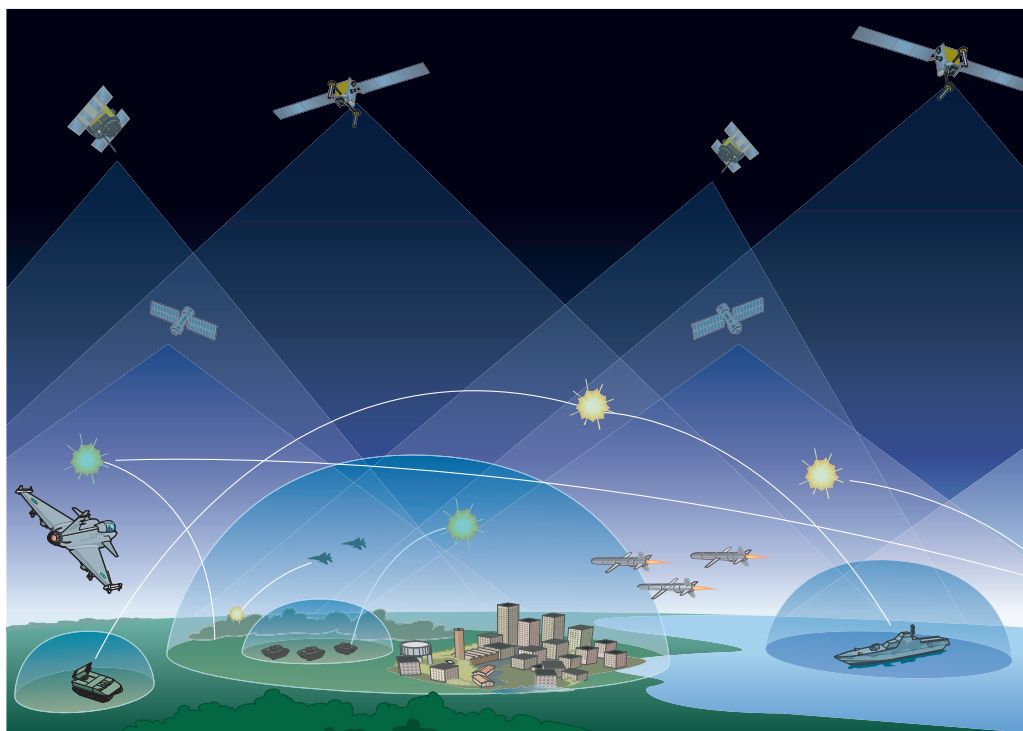
Behovet av att i krig behärska den höga terrängen har alltid funnits. Carl von Clausewitz (2002) sammanfattade för ca 200 år sedan det strategiska värdet av att behärska den höga terrängen i tre punkter: bättre överblick, större taktisk nytta och försvårat tillträde för motståndaren. Från 1783 när de första uppstigningarna med en varmluftsballong gjordes var den högsta punkten inte längre nödvändigtvis en punkt i terrängen utan något som människan själv kunde styra över. Implikationen för krigföringen var uppenbar. Efter ballongen följde först luftskeppet och sedan flygplanet. När det kalla kriget inleddes var

det flygstridskrafter som stod för den högsta punkten.

Flygspaningen under det tidiga kalla kriget var inte utan problem. Att flyga över andra nationers territorier för att fotografera och samla in elektroniska underrättelser var dels förbjudet, dels förenat med stora risker. Åtskilliga flygplan blev nedskjutna. Den svenska DC-3:an som sköts ner 1952 var ett i en lång rad av flygplan som sköts ner längs Sovjetunionens gränser. När Gary Powers U2 sköts ner nära Sverdlovsk i Sovjetunionen bevisades att inte ens specialbyggda spaningsplan som U2 var lösningen. Något annat måste till.

Redan 1946 hade detta "något annat" fått konkret form i USA med rapporten "Preliminary design of an experimental world-circling spaceship" (RAND/Douglas Aircraft Company 1946). Ett år före Sovjets uppskjutning av Sputnik 1 år 1957 hade utvecklingen av den första amerikanska "spionsatelliten" påbörjats. Det projektet blev aldrig genomfört i dess tänkta form, men i augusti 1960 blev USA först med att få hem bilder tagna från satellit i och med det första lyckade CORONA-uppdraget. Den slutliga höga terrängen var nådd.

Värdet av tillgången till



Figur 2: Det framtida slagfältet. Rymdtjänster har allt sedan Gulfkriget 1991 varit viktiga inslag i den väpnade striden. På det framtida slagfältet förväntas rymdbaserade tjänster vara än mer integrerade i de militära förmågorna än i dag och rymden som "Den högsta Punkten" kommer systemtaktiskt att utnyttjas för att nå militära effekter i alla möjliga sammanhang.

den höga terrängen stod snabbt klart. Satelliter i omloppsbana erbjuder global täckning med liten bränsleåtgång, men till priset av att man inte har någon manövrerbarhet och stor förutsägbarhet när de är inom räckhåll. Satelliter kan ge insyn på områden som annars vore onåbara och kan kommunicera med hög datatakt över stora avstånd. Står man under bar himmel har man också kontakt med satelliterna.

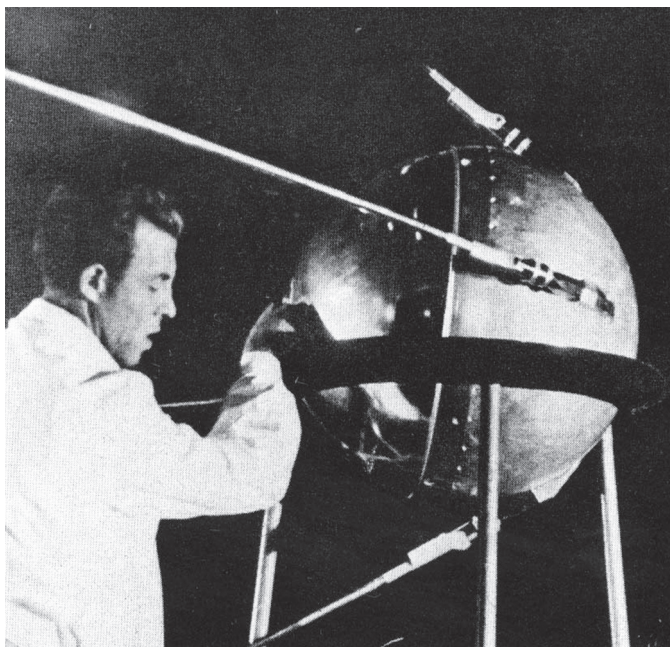
Överblick skapades genom fotografering, radar, signalspaning och förvarning om missilattacker. Taktisk nytta skapades först genom tillgång till kommunikationstjänster (1962-) och senare positioneringstjänster (1979-). Det var svårt för fienden att få tillträde. Även om de första utkasterna till anti-satellitssystem gjordes redan i slutet av 1950-talet så är rymden fortfarande idag en i huvudsak "säker" miljö.

Rymdtjänster integreras idag i såväl civil infrastruktur som militära förmågor. Rymden har, brevid mark, sjö och luft, blivit en ny strategisk miljö och värdet av rymden som den högsta terrängen bara ökar.

Historik

Internationell rymdverksamhet

Sputnik 1, se figur 3, sköts upp av Sovjetunionen 1957. Inte långt efter kom USAs första satellit. Drivkrafter till den rymdkapplöpning som sedan följde var nationell prestige



Figur 3: Sputnik 1 var den första (artificiella) satellit som sköts upp från jorden. Satelliten sände signaler under 21 dygn. (Bild från Nasa.)

och det militära hotet som kom med bärraketekniken; kunde ryssarna skicka upp satelliter i rymden skulle de snart kunna skicka atombomber till USA. När väl problemet med att få upp satelliter i omloppsbana kring jorden var löst uppstod frågan huruvida satelliterna skulle kunna användas till något nyttigt och inte bara vara en kul grej som sände signaler som kunde uppsnappas av amatörradiofantaster.

De två första rymdmakterna började att testa spaning från rymden redan omkring 1960. Från amerikansk sida hemlighölls och förnekades denna verksamhet från officiellt håll under drygt 30 år. Militära spaningssatelliter har alltsedan 1960-talet skjutits upp i ett stort antal från först och främst Sovjetunionen/Ryssland och

USA. På 1990-talet kom den fransk-italiensk-spanska militära spaningssatelliten Hélios.

På den civila sidan sköts den första fjärranalyssatelliten Landsat 1 upp 1972. Ända till 1986 var satelliter i den amerikanska Landsat-serien de enda civila fjärranalyssatelliterna. Det året sköts den första SPOT-satelliten, en fransk-svensk-belgisk civil fjärranalyssatellit, upp.

Den geometriska upplösningen har hela tiden, enligt vad man har kunnat bedöma, varit högre eller mycket högre, på den militära sidan, ända fram till slutet på 1999 då Ikonos-1 sköts upp. De militära satelliternas upplösning, uppskattningsvis ner mot 0,1–0,2 meter, är dock fortfarande högre än de civila systemens.

Från mitten av 1990-talet och framåt har det hänt mycket. USA erkände förekomsten av sin satellitspaningsverksamhet och till och med avhelligade, dock efter att ha försämrat upplösningen något, sina första bilder från början av 1960-talet. Kommersiella system med en upplösning på under en meter har tagits i drift.

Den första kommunikations-satelliten, Score, sköts upp av USA 1958. Under den tid, en månad, som den stannade uppe tjänade den både civila och militära syften. Den första rent militära satelliten, Courier 1B, sköts upp av USA 1960 och den första rent civila satelliten kom 1961.

För civil kommunikation har man använt få men stora satelliter med lång livslängd i GEO, *Geostationary Earth Orbit*, se avsnittet Satellitbanor under Rymdteknik. För militär kommunikation har man använt, förutom stora satelliter i GEO, även system av små satelliter i LEO, *Low Earth Orbit*, se avsnittet Satellitbanor under Rymdteknik. Kring år 2000 började stora system av små satelliter i LEO, för kommersiell telefoni och data, att tas i drift.

Förutom de rent militära tillämpningarna av rymdtekniken har vi också de civila och bemannade rymdprogrammen. De bemannade rymdfärderna började 1961 med ryssen Jurij Gagarin och samma år inleddes den s.k. månkapplöpningen om vem av USA och Sovjetunionen

som först skulle landstiga på månen. Denna gren av rymdverksamheten har nu lett fram till rymdstationen ISS, *International Space Station*, där USA och Ryssland samarbetar.

Svensk rymdverksamhet

En svensk rymdforskningskommitté bildades 1959 och den första svenska raketuppsändningen gjordes från Vidsel 1961. Raketen, som i massmedia kallades för Plutnik, beräknas ha nått en höjd av 80 km. Den första svenska satelliten var rymdforskningssatelliten Viking, uppsänd 1986. Sammanlagt har Sverige haft tio satelliter i rymden. Till dessa kan läggas den svensksbyggda rymdfarkosten SMART-1, utvecklad av Rymdbolaget på uppdrag av ESA. Den sköts upp 2003 och har nu nått fram till månen.

Rymdanknuten verksamhet vid FOI

Dåvarande FOAs rymdverksamhet startade genast efter uppskjutandet av Sputnik-1 med rapporter om satellitbanberäkningar. Detta ledde så småningom till ett datorprogram för markspårsberäkningar för Försvarsmakten.

Som första forskningsinstitution i landet började FOA med datoriserad bildbehandling. Detta var 1972 efter uppskjutningen av Landsat-1 när digitala bilddata på magnetband blev tillgängliga. Detta ledde till att FOA blev involverad i studier av hur satellitbilder

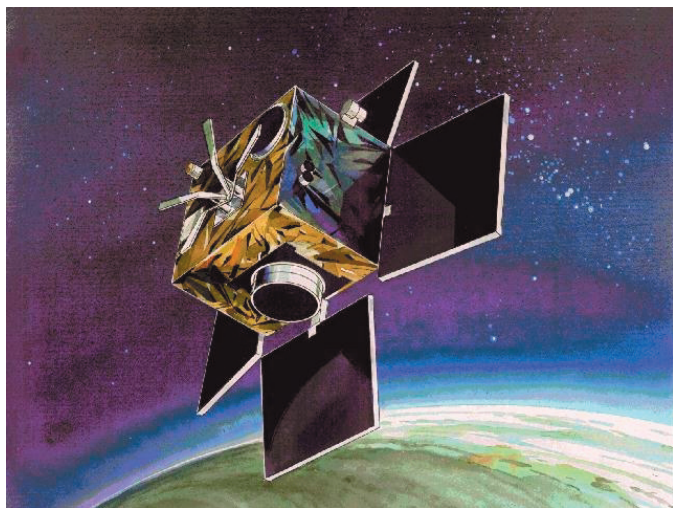
skulle kunna användas för övervakning av nedrustnings- och verifikationsavtal. Åren kring 1980, med början 1978, var FOA med i FN-studien om ISMA, *International Satellite Monitoring Agency*. Tio år senare, 1988, deltog FOA i en svensk studie för Utrikesdepartementet i syfte att ta fram specifikationer på en verifikationssatellit.

Omkring 1985 började man utveckla en SAR-processor, *Synthetic Aperture Radar*, som testades på SEASAT-data. I början av 1990-talet deltog FOA i BEERS, *Baltic Experiment for ERS-1*, som syftade till att ta fram system för nära realtidsbehandling av bilddata från ERS-1 för isbrytare.

I början av 1990-talet stödde FOA-experter även UD:s deltagande i FN:s nedrustningskonferens i Genève om förhindrandet av en kapprustning i rymden. Det som studerades var möjligheterna att övervaka rymden, d.v.s. objekt i omloppsbana runt jorden och aktiviteter som sker där.

Under 1990-talet gjordes dels en studie om störhot mot satellitkommunikation och dels tester av prestandan hos GPS- och GLONASS-mottagare.

FOA utvecklade drivämnen och raketmotorer, på uppdrag av Rymdbolaget, till de två "svenska" satelliterna Astrid, se figur 4, och Astrid-2 som sköts upp 1995 respektive 1999. En bild på raketmotorprovning hos FOI kan ses i figur 5.



Figur 4: Illustration av satelliten Astrid (Bild från Rymdbolaget, SSC).

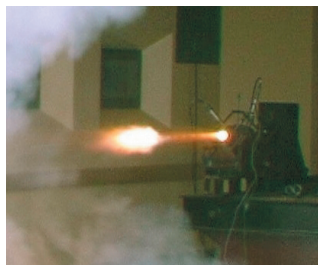
Rymdverksamheten vid det som tidigare var FFA går tillbaka till 1967 och projektet Jabiru, som innebar vindtunnelprov i syfte att studera värmeöverföring i höga hastigheter. Under 1968 genomfördes en utredning av en olyckshändelse med det amerikanska rymdflygplanet X-15. Sedan 1970 har olika arbeten gjorts kring problem kopplade till vibrationer i bakkroppar på raketer. Detta arbete har fortsatt fram till idag och Ariane 5-raketen.

Dessutom har FFA vind-tunneltestat de speciella egen-skaperna hos Cassini-Huygens-sonden, en sond som följer

med rymdfarkosten Cassini till Saturnussystemet, inför inträdet i Titans atmosfär (2004) som huvudsakligen består av kväve och metan.

Därutöver har FFA under de senaste 15 åren deltagit i ett antal olika projekt som på olika sätt berör föreslagna, men aldrig realiserade, rymdfarkoster. Exempel på sådana är: rymdfärjan Hermes (1987), det tyska två-delade rymdskeppet Söngaren (1991) och EXTV, som är ett av tolv europeiska koncept av ett rymdflygplan som var tänkt att kunna både starta och landa för egen maskin. FFA har också arbetat med vindtunnelprov på rymdfarkosten X-38, en planerad räddningsfarkost för den internationella rymdstationen ISS.

Numera ingår verksamheterna från FOA och FFA i myndigheten FOI.



Figur 5: Raketmotorprov vid FOI.

Användningsområden

Satelliter i banor runt jorden används för flera funktioner. Här kommer några av de militärt sett viktigaste av dessa att tas upp. Det handlar om kommunikation; spaning, övervakning och underrättelse; navigering; förvarning; tidssynkronisering; och meteorologi.

För mer och djupare, framför allt teknisk, information se avsnittet Rymdteknik - nytolaster.

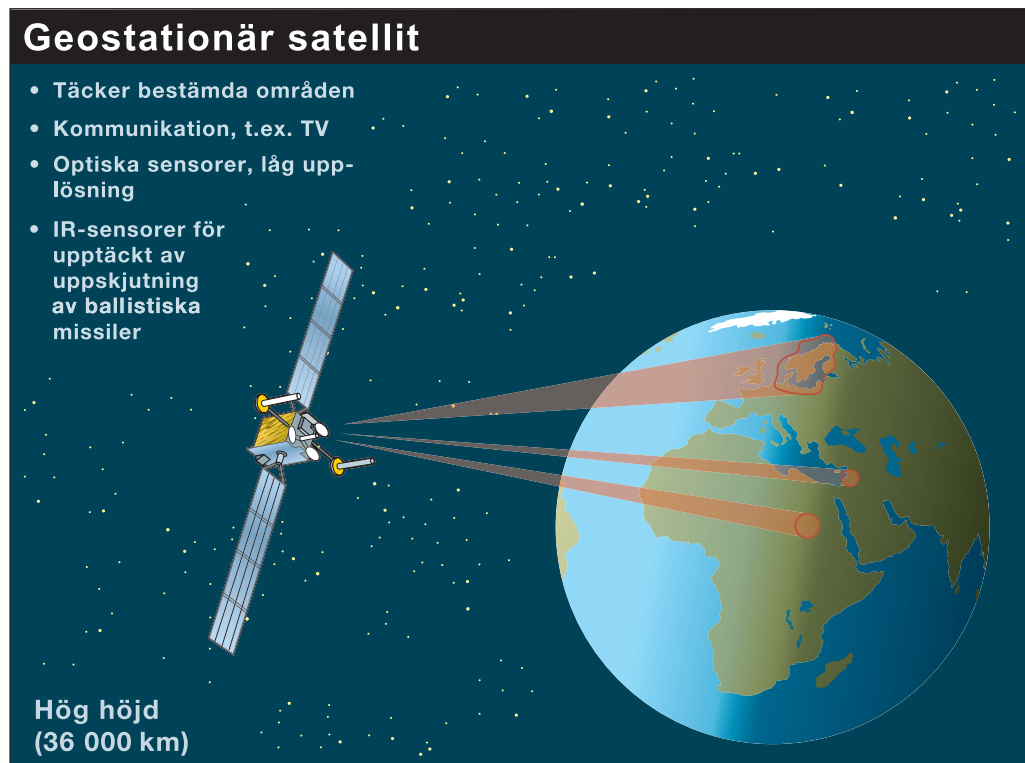
Kommunikation

När satelliter används för kommunikation 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. Kommunikationssatelliter, se figur 6, har alltså som syfte att överföra eller vidarebefordra information eller data från en sändande part till en mottagande part.

Satellitkommunikation utgör ett viktigt komplement när jordbaserad radiotäckning inte finns eller fungerar. Förs-

varsmakten använder i dag kommersiellt tillgängliga satelliter för kommunikation med styrkor i internationella insatser. Inom operationsområdet kan också ett kommunikationsnät snabbt byggas upp genom användning av satelliter. Under krig och i internationella insatser är sannolikheten stor att infrastrukturen blir förstörd, eller står utanför vår kontroll. Satellitkommunikation kommer därför troligen i många operationer att utgöra ett värdefullt, eller kanske till och med nödvändigt, komplement till andra kommunikationsmetoder.



Figur 6: Kommunikationssatelliter är ofta geostationära. Andra användningsområden förekommer dock.



Figur 7: Soldat löser kommunikationsproblem med satellittelefon. Foto: USA DoD.

Över stora avstånd och i områden utan fungerande jordbaserade kommunikationssystem är satellitkommunikation lämplig att använda. Satellitkommunikation utgör också ett lämpligt medel för distribution av information till ett stort antal mottagare, s.k. *broadcasting*. *Broadcasting* från geostationära satelliter är av militärt intresse för överföring av stora datamängder, som t.ex. bilder, kartor, lägesinformation m.m. Det kan också vara av intresse att brett sända information för att dölja mottagarens identitet.

Överföring av insamlade data från små sensorplattformar bedöms allmänt ingå som en komponent i det nya flexibla insatsförsvaret. Ett sätt att utföra sådan insamling är via kommunikationssatelliter. Vapensystem kan t.ex. få inriktningsdata från spaningsensorer via kommunikationssatelliter. Kom-

munikationen går i huvudsak från sensorerna, men man kan också tänka sig att kommandon sänds ut till sensorerna, liksom att det också kan finnas behov av att styra vissa sensorer på avstånd. Det är emellertid inte säkert att satellitkommunikation alltid kan användas i markfall. Terränghinder utgör en begränsande faktor eftersom det behövs i princip fri sikt till satelliten på de frekvenser som används.

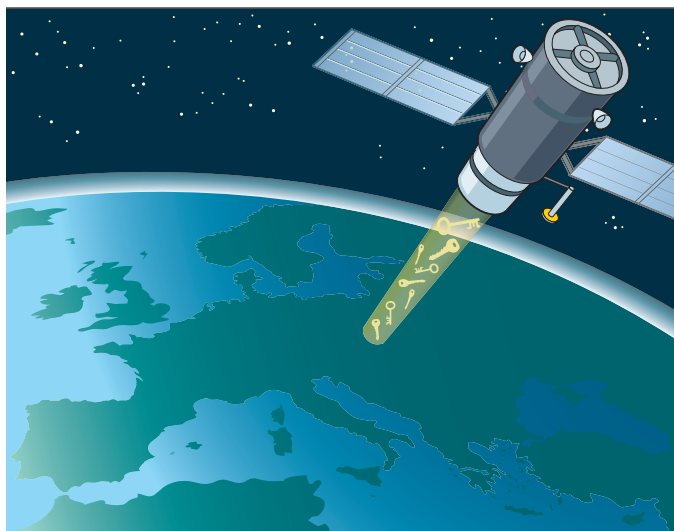
Satellitkommunikation kan användas för kommunikation till och från flygplan. Den kan också användas för förmedling av förvarningsinformation till operationsnivån. Data från spaningsflyg, UAV:er, *Unmanned Aerial Vehicle*, och andra flygande sensorer behöver förmedlas till berörd personal på marken. För att snabbt få ner spaningsbilder från de flygande sensorerna måste dessa överföras med radiolänk.

UAV:er med lång räckvidd och lång uthållighet kan spana långt bortom radiohorisonten och då kommer satellitkommunikation väl till pass.

Satellitkommunikation kan med fördel användas för kommunikation till och från fartyg, eftersom de ofta opererar inom områden bortom radiohorisonten. Satellitkommunikation har stor överföringskapacitet, vilket behövs för överföring av data vid havsövervakning.

I flera fall delas satelliter mellan civil och militär användning. Dessa satelliter har speciella militära transponder dimensionerade för den militära användningen. NATO-länder, som inte har egen satellitkommunikation, kan använda NATO:s egna satelliter. Inom NATO har studier genomförts rörande möjliga sammanslagningar av det amerikanska systemet med Skynet, Syracuse och Hispasat. Engelsmännen studerar om det går att samordna användandet av ett militärt satellitsystem, kallat Skynet 5, med andra länder eller andra brukare. Rymdbolaget ser gärna ett samarbete med försvaret om eventuella speciella militära funktioner i kommande Sirius-satelliter.

Laserkommunikation i rymden kommer att reducera nedtagningstiden med en faktor på 100–1 000 jämfört med idag (jämför surfning med bredbandsuppkoppling eller med telefonmodem). Små kompakta lasermoduler kommer



Figur 8: Visualisering av överföring av kryptonycklar.

att användas på rymdplattformar. Lasersändning till mottagningsteleskop på jorden, t.ex. höga berg, ger mycket hög tillgänglighet. 10-tals Tbit/s är möjligt med våglängdsmultiplexering. Kommunikation mellan flygplan eller UAV och lasersatelliter kan ske med bredbandsöverföring. Kommunikation mellan olika rymdenheter ger möjlighet att alltid hitta lämpliga mottagare på jordytan, eftersom man då kan undvika moln. Laserkommunikation prövas idag dels mellan satelliter och dels från satellit till teleskop på jordytan. NASA planerar att år 2009 kunna sända data från Mars till Jorden med en överföringstakt som är tio gånger högre än vad dagens radiolänkar förmår.

Inom området kommunikation studeras även en intressant teknik för helt säker global överföring av kryptonycklar med kvantmetoder (C. Kurtsiefer et al 2002), se figur 8.

Spaning, övervakning och underrättelse

Satellitspaning, se figur 9, kan utgöra en viktig pusselbit i det nya flexibla insatsförsvaret. En bit utanför svenskt territorium och långt in över annan nations-territorium är det endast satellitspaning som kan ge information utan att onödiga risker tas.

Användningsområden för satelliter med mycket högupplösande optiska sensorer är t.ex. detektion av enstaka fordon, flygplan, byggnader eller folksamlingar samt olika typer av karteringar, framställning av höjdmodeller m.m. Satelliter med hyperspektrala sensorer, d.v.s. optiska sensorer som tar bilder i många våglängdsband (den synliga delen av spektrum delas upp i ett par hundra band), kan användas för t.ex. detektion av kamouflage och bestämning av ytors material, d.v.s. den kemiska sammansättningen hos föremålet. Ju fler spektralband

som registreringen sker i desto bättre kan ytan som reflekterar ljuset bestämmas med avseende på material, färg, konsistens m.m.

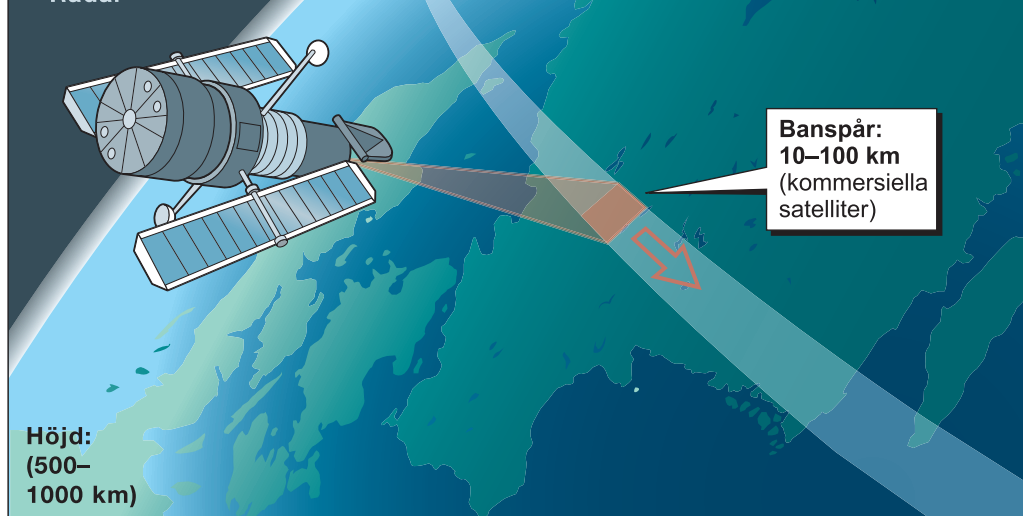
En viktig användning av satellitspaning är möjligheten att erhålla stereobilder för bland annat framställning av höjdmodeller. Höjdinformation är viktig i många militära sammanhang, såsom t.ex. för att hitta bästa frisiktspunkten i ett område, för att hitta störskyddade områden och för att upprätta kommunikationsnät. Med digitala terrängmodeller kan datorsimuleringar av t.ex. flyganfall göras. Terrängnavigering som används i kryssningsrobotar och flygplan jämför mätningar av höjden med en höjddatabas.

SAR-satelliter kan användas för att detektera olja och fartyg på vatten, och för att kartera översvämningar och havsis. Mindre detaljerade markklassningar och detektion av vägar och skogsfria områden i skogsområden kan också göras. Vid t.ex. katastrofer är användbarheten av SAR-satelliter mycket stor. Sensorer med termiska band, s.k. IR-sensorer, kan användas för bland annat detektion av bränder. En fördel med satellitkartering är att man kan få en aktuellare kartbild av terrängen än vad vanliga kartor ger. Exempel på detta är snöförhållanden, vårflood, nya kalhyggen, nya skogsvägar, nya artefakter, t.ex. broar, liksom förändringar av kraftledning, vägar och järnvägar.

Man studerar även laser

Satellit i jordnära bana (LEO)

- Täckningsområdet flyttar sig
- Optiska sensorer, hög upplösning
- Mobiltelefoni
- Radar



Figur 9: Spaningsatelliter ligger ofta i låga banor.

för sensortillämpningar från rymden. Laserhöjdmätare mäter kontinentaldrift ned till cm-nivå och laser studeras som belysningskälla för militära spaningsatelliter i syfte att uppnå högupplöst avbildning under ljussvaga förhållanden, som t.ex. natt. I analogi med syntetisk aperturradar studeras syntetisk aperturlaser med möjlighet till cm-upplösning. Laser prövas även från rymden för meteorologisk sondering av vindar, aerosoler och gaser i atmosfären liksom för mätning av vegetationshöjd och annan topografi över land och is.

Snabba och kortlivade förändringar upptäcks i regel inte med hjälp av satellitbilder. Därför kan man t.ex. inte förlita sig på satellitspaning för

upptäckt av landstigningsoperationer.

Antalet satelliter som behövs för att med ett visst tidsintervall kunna observera ett visst område ökar med minskande tidsintervall. Kortfattat kan det konstateras att på svenska breddgrader kan en och samma satellit (med optisk sensor) i bästa fall observera ett och samma område en gång per dygn. För SAR-satelliter dubblas observationsfrekvensen eftersom dessa även kan göra registreringar under nattpassager. Satelliternas passager är inte jämnt utspridda på dygnet utan dessa har valts att ske huvudsakligen under förmiddagen.

Satellitspaning kan med fördel användas för att rikta in annan spaning eller inhämtning av information, s.k. underrättelser. Lämpligen inköps kommersiella satellitbilder under fredstid så att en databas kan byggas upp. I denna lagras bilder som har korrigerats geometriskt. Dessa bilder får fungera som normalbilder, och jämförs sedan med nya bilder. På så sätt kan förändringar upptäckas.

Normalbilden ger bland annat underlag för framtagning av kartor samt information om geografiska förhållanden, skog, vägar, infrastruktur, m.m. Före en internationell insats kan normalbilden jämföras med nyregistreringar.

Ur informationssynpunkt är i de flesta fall optiska data att föredra med tanke på det större informationsinnehållet. När det gäller att få bilder vid en specificerad tidpunkt så är både ljusförhållanden och moln en begränsande faktor för optiska satelliter och då är SAR-satelliter ett alternativ som lättare uppfyller tidskraven.

Navigering

Satellitbaserade navigeringssystem består av flera tiotals satelliter i cirkulära MEO-banor på höjder omkring 20 000 km. De tre stora systemen är GLONASS (*GLO*bal *NA*avigation *Sat*ellite *S*ystem), GPS (*G*lobal *P*ositioning *S*ystem) och GALILEO. Av dessa är det endast GPS som i dag är operativt med fullt antal satelliter. GALILEO planeras att tas i drift år 2008. Det finns även andra system än dessa, men de är mer till för positionsbestämning än för navigering.

Ombord på satelliterna finns mycket exakta atomur. Varje satellitmottagare har

dessutom en egen klocka inbyggd, men denna är inte lika exakt som den på satelliterna. Signalerna från satelliterna innehåller information om satellitens position och tiden vid utsändningstidpunkten. Genom att registrera när en signal tas emot och jämföra med den i signalen angivna tidpunkten får man gångtiden från satellit till mottagare. Eftersom signalen färdas med ljusets hastighet ger detta direkt avståndet till satelliten. Sedan tänker man sig en sfär centrerad i respektive satellit med ovanstående avstånd som sfärens radie. Genom analys av sfärernas skärningspunkter får man mottagarens position. Om mottagarens klocka vore lika bra som de i satelliterna och synkroniserad med dessa skulle det räcka med att ta emot signaler från tre satelliter. För att ta hand om tidsfelet i mottagarens klocka fordras emellertid signaler från minst fyra satelliter för att få mottagarens position.

På en plats på jorden utan terränghinder, och på inte

alltför höga latituder, räcker det bra med ett fullt fungerande GPS-system. Däremot när det finns terränghinder, som det ofta finns t.ex. i stadsmiljö, samt på höga latituder, som t.ex. i Sverige, är inte GPS-systemet tillräckligt i många applikationer. Därför skaffar sig EU nu ett eget system kallat GALILEO. Med mottagare som kan ta emot signaler från både GPS och GALILEO får man mycket bättre möjligheter till positionsbestämning.

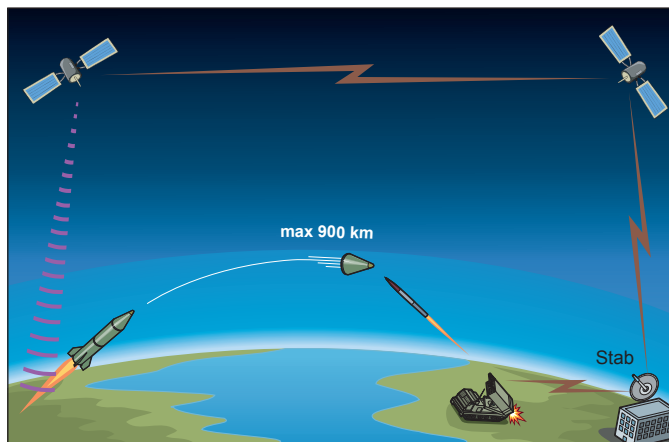
Både GLONASS och GPS är militära system som kontrolleras av stormakter. Ett civilt system som GALILEO ger civila användare i Europa säkerställd tillgång till navigationstjänster. En enkel översikt av de stora satellitbaserade navigeringssystemen ges i figur 10.

Förvarningssystem

Under det kalla kriget levde vi alla i skuggan av kärnva-penavskräckningen, som base-rade sig på MAD-doktrinen, *Mutually Assured Destruction*, garanterad ömsesidig förintelse. Den viktigaste bäraren av

Tre satellitnavigeringssystem			
	GLONASS	GPS	GALILEO
Ägare	Ryssland (militärt)	DoD USA (militärt)	EU (civilt)
Antal satelliter	24 (3 banplan med 8 satelliter vardera)	24 (6 banplan med 4 satelliter vardera)	30 (3 banplan med 10 satelliter vardera)
Inklination	64,8°	55°	56°
Banhöjd (cirka)	19 100 km	20 200 km	23 200 km
Antal frekvensband	2	3	7
Driftsättningsår	1982	1986	2008

Figur 10: Data på satellitnavigeringssystemen GPS, GLONASS och GALILEO.



Figur 11: Visualisering av förvarningssystem.

kärnvapnen var den ballistiska roboten. Ett massivt anfall från motståndaren hotade att lamslå landets ledning och att förstöra de egna kärnvapnen innan de hann avfyras. En viktig del i MAD-doktrinen var alltså system för förvarning för ett avfall från motståndaren. Tiden för en strategisk ballistisk robot, ICBM, *Inter-Continental Ballistic Missile*, att gå från ryskt territorium till USA (eller det omvända) är ca 30 min. När det gäller kortdistansrobotar, taktiska robotar och SLBM, *Submarine-Launched Ballistic Missile*, med en räckvidd på upp till ca 3 000 km, kan tiden vara så kort som några minuter för de mest korträckviddiga systemen. Den tillgängliga tiden för att skydda landets ledning och för att fyra av de egna robotarna var alltså mycket begränsad.

För att få tillräcklig förvarning för att vidta skyddsåtgärder när det gäller kortdistansrobotar måste dessa upptäckas redan vid uppskjutningstillfället, d.v.s. i startfasen. Det bästa alternativ som står till buds är då övervakning medelst satelliter,

s.k. förvarningssatelliter, *early warning satellites*. En schematisk bild kan ses i figur 11. Syftet med s.k. förvarningssatelliter är i första hand att:

- varna för en ballistisk robot-attack
- uppskatta uppskjutningsplatsens läge för att eventuellt kunna identifiera angripare
- beräkna nedslagsplats för eventuella försvarsåtgärder

Dessa förvarningssystem är konstruerade för detektion av uppskjutning av strategiska interkontinentala robotar som kan nå ut till 5 000 km i högsta banpunkten. De amerikanska förvarningssatelliterna roterar med en hastighet på 5–7 varv/min. Detta medför att varje punkt på jorden kan observeras med ett intervall på 8–12 sekunder.

Satelliterna detekterar värmestrålningen från de varma förbränningsgaserna under uppskjutningsfasen med detektorer för infrarött ljus. Det

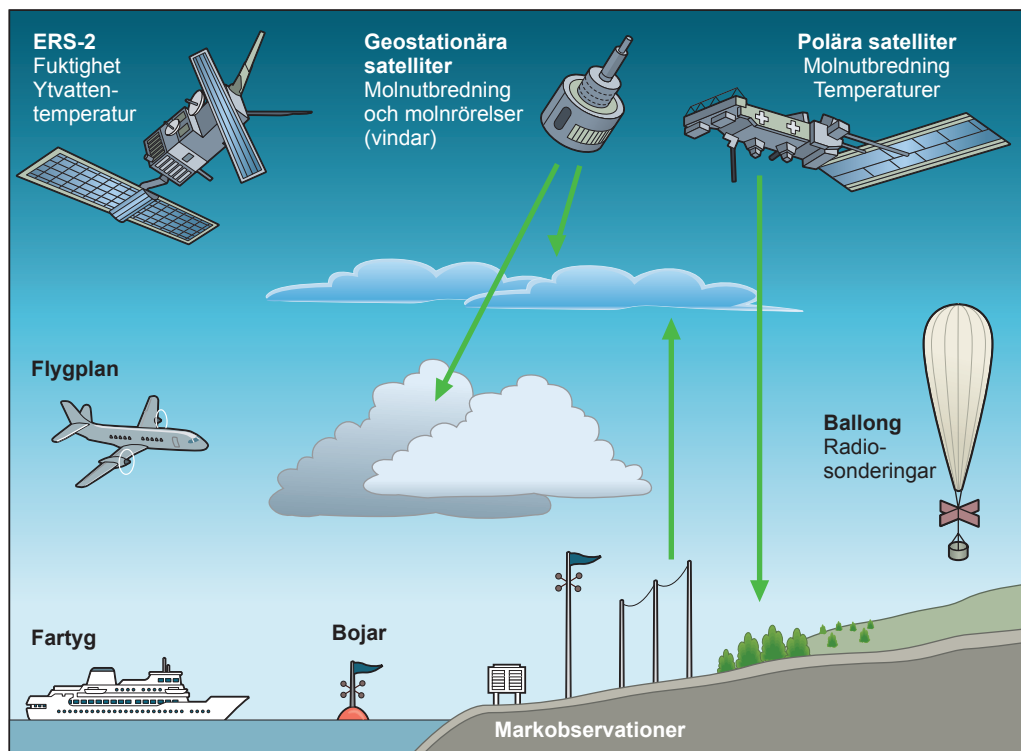
infraröda ljuset måste över en viss ljusstyrka i förhållande till bakgrunden för att passera detektorelementens tröskel och registreras. Dessutom är datorn ombord programmerad att förkasta falska signaler för att minska antalet felaktiga varningar.

År 1963 insåg man i USA fördelarna med att placera förvarningssatelliter i den geostationära banan. De amerikanska förvarningsprogrammen är bättre kända än de ryska eftersom USA medvetet har släppt information om sina system för att visa Sovjetunionen, under det kalla kriget, att ett anfall med ballistiska robotar skulle bli upptäckt. USA skulle sedan omedelbart svara med en massiv vedergällningsattack med kärnvapen som skulle ödelägga hela Sovjetunionen.

I Sovjetunionen kom satellitförvarningsprogrammet i gång senare än i USA. Det tycks som om Sovjetunionen har haft betydligt större problem med att få sitt satellitförvarningssystem att fungera rent tekniskt än vad USA har haft, med flera misslyckade uppskjutningar. Inte förrän 1982 fick Sovjetunionen ett operationellt system. Till skillnad mot USA går de ryska förvarningssatelliterna i Molniya-banor.

Vädertjänst

Satellitbilder är idag en naturlig del av väderprognosen i TV. I fågelperspektiv visas hur molnen har rört sig det senaste dygnet och meteorologen



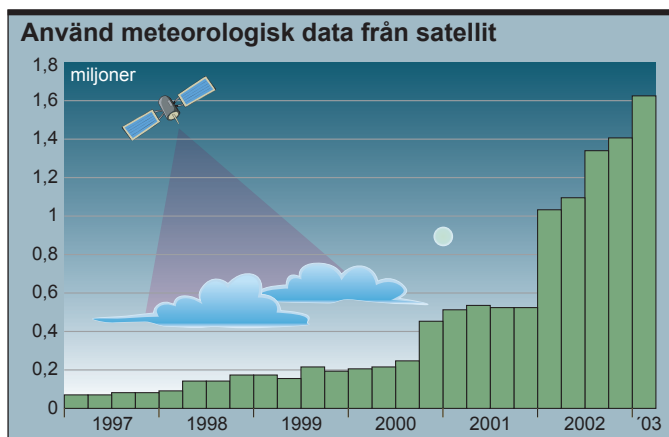
Figur 12: De meteorologiska observationerna omfattar allt ifrån markbundna till satellitbundna system.

berättar vanligtvis hur dessa hör samman med olika vädersystem som drabbar oss. Vädersatelliter har använts sedan 1960-talet. Två typer av satelliter används; geostationära och polära. Den förstnämnda befinner sig över en fix punkt över ekvatorn medan den andra cirkulerar från pol till pol på relativt låg höjd. Fördelen med den geostationära satelliten är att den kan ta bilder över samma område med hög täthet i tiden. Dock blir den rumsliga upplösningen sämre ju närmare polen man kommer. Den polära satelliten tar bilder med hög rumslig upplösning men passerar bara någon gång per dygn över ett specifikt område. Dessa typer kompletterar således varandra.

Först och främst utvecklades tekniker för att man skulle kunna analysera molnsystemen. Satellitbilder tagna i det synliga våglängdsbandet fångar upp fågelperspektivet, men ger inte någon information om vilken höjd molnen befinner sig på. Därför används olika våglängdsband inom det infraröda området för att man ska kunna särskilja olika typer av molnslag och därigenom bestämma vilken höjd de befinner sig på. Mycket forskning och utveckling har lagts ner på att ta fram algoritmer för automatisk molnklassificering. Idag används dessa produkter i stor utsträckning av meteorologer för analys av nuläget.

i användandet av satellitdata ligger dock på ett annat plan. De matematiska väderprognosmodellerna behöver ett så bra starttillstånd som möjligt för att kunna producera en bra prognos. Snabbt såg man framför sig hur satelliterna framför allt kunde ge observationer över annars svårobserverade områden såsom oceanerna. Det ledde till att många väderskepp lades ner i förtid i och med den övertro som fanns på satelliternas förmåga att ge bra observationer. Dock kunde man bara konstatera att observationerna från satelliterna inte var tillräckligt noggranna för att kunna användas till att uppskatta starttillståndet. Under en tid ledde detta till att väderprognoserna faktiskt försämrades, eftersom det nu

Den stora revolutionen



Figur 13: Användningen av meteorologiska satellitdata har ökat avsevärt under det senaste årtiondet. Information erhållen från ECMWF, European Center for Medium-Range Weather Forecast.

fanns ännu färre observationer över hav, jämfört med när väderskepp var utplacerade.

Dock arbetade man intensivt med att hitta nya metoder och algoritmer för att kunna uppskatta starttillståndet bättre, och till slut utvecklades så pass sofistikerade metoder att man faktiskt kunde börja använda satellitdata på allvar. Grundidén i dessa tekniker är att atmosfärens tillstånd modifieras med avseende på temperatur och fuktighet så att modellen ger samma strålning som satelliten mäter. Man säger att problemet löses med hjälp av inversteknik. Dessutom tog man fram metoder för att uppskatta vindar med hjälp av så kallad scatterometer-teknik samt nya instrument för att mäta fuktighet i atmosfären, bland annat med hjälp av mikrovågsteknik och GPS-signaler. Det innebär att idag används satelliterna inte bara för molnklassificering utan de ger även viktig indata i form av temperatur, fuktighet och vindar

till väderprognossystemet, se figur 12.

Man har noterat signifikanta förbättringar av prognoserna och mätningar av antalet utnyttjade observationer visar att användandet av satellitdata har växt exponentiellt de senaste åren, se figur 13. Sammantaget har detta lett till att bättre underlag, vad gäller vädret, kan lämnas till olika typer av operationer. Framför allt har väderinformationen till planering på lite längre sikt (3–7 dygn) blivit bättre.

Historia

Utvecklingen av rymdtekniken har hela tiden haft kraftiga militära förtecken. Den första användningen av rymden gällde ballistiska robotar i form av den tyska V-2, se figur 14. Den första V-2 roboten sköts upp 3 oktober 1942 och nådde 80 km höjd. Över 3 000 V-2 avfyrades mot Storbritannien och Nederländerna under andra världskriget. De tyska ingenjörerna kom sedan att spela avgörande roller i den fortsatta utvecklingen av ballistiska robotar både i USA och i Sovjet.

I både USA och Sovjet togs de första ballistiska robotarna i bruk i mitten av 1950-talet och de första interkontinentala robotarna kom omkring 1960. Ballistiska robotar försedda med kärnladdningar kom sedan att utgöra den viktigaste delen av kapprustningen mellan supermakterna. Ballistiska robotar finns idag i närmare 30 länder och de har även kommit till stor användning i flera konflikter. Den mest kända och kanske den mest spridda ballistiska roboten är den ryska Scud, vilket egentligen är NATO-namnet på roboten. Scud har en räckvidd av omkring 300 km och togs i tjänst i Sovjet i mitten av 50-talet. Den mest omfattande användningen av ballistiska robotar sedan andra världskriget ägde rum i inbördeskriget i Afghanistan i slutet av 1980-talet då regeringssidan avfytrade

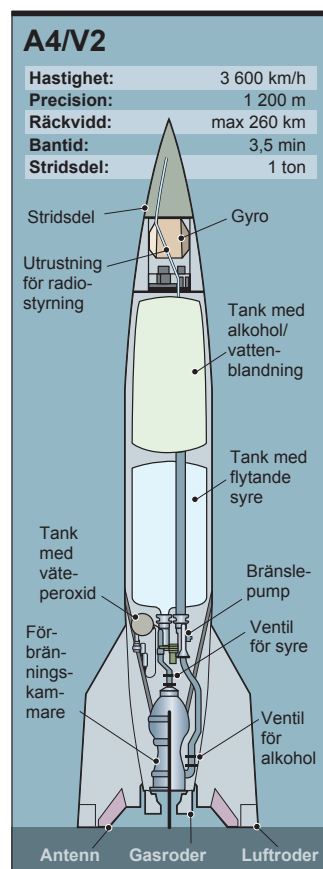
mer än 2 000 Scud mot sina motståndare. I kriget mellan Iran och Irak avfyrades närmare 900 Scud.

Den första spanings-satelliten, eller spionsatelliten, sköts upp av USA i augusti 1960. Spaningssatelliterna var det första projektet som drevs av ARPA (nuvarande DARPA, *Defense Advanced Research Projects Agency*), som bildades 1958, fem månader efter uppskjutningen av Sputnik. Satelliten var utrustad med en vanlig kamera. När satelliten hade tagit sina bilder sköts en liten kapsel med den exponerade filmen ned mot jorden. Den lilla kapseln bromsades med fallskärm och fångades i luften av ett transportflygplan. Efter landningen kunde sedan filmen framkallas. Trots denna krångliga procedur innebar spaningssatelliterna ett kolossalt genombrott – på bara en dag tog den första satelliten fler bilder över Sovjet än alla U-2 flygplanen dittills hade gjort. Bilderna hade under 60-talet en upplösning av 2–3 meter. Trots utvecklingen av digitala system bibehölls tekniken med konventionella kameror som skickade ned filmerna i kapslar ända fram till 1984.

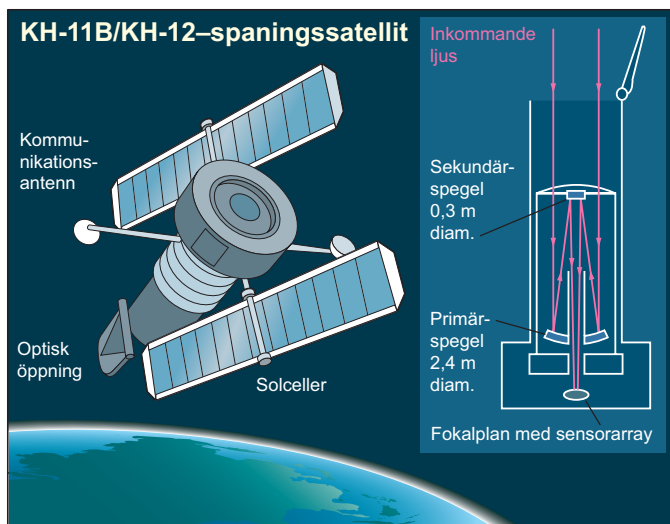
Redan under 1960-talets första år började man använda en satellit med bildlänk. Satelliten använde fortfarande en konventionell kamera, men filmen framkallades och

skannades ombord på satelliten och bildinformationen skickades via radiolänk till jorden. Upplösningen på 30 meter var dock relativt dålig.

1976 tog USA ett stort steg då KH-11 sköts upp. KH-11 använde en digital CCD-kamera och kunde sända ned bilder i realtid. Upplösningen var omkring 15 cm. I figur 15 ses en illustrerad bild av KH-11B, eller KH-12 som man ibland benämner den versionen,



Figur 14: Den tyska ballistiska roboten A-4/V-2.



Figur 15: En schematisk bild på en av versionerna av spaningssatelliten KH-11B/KH-12.

som antagligen ser ut som det mer allmänt kända HUBBLE teleskopet.

Frankrike var det land som öppnade dörren för kommersiellt tillgängliga satellitbilder, då den första SPOT-satelliten togs i bruk 1986. SPOT erbjuder nu bilder med en upplösning av 5 meter. Andra satelliter, som Ikonos, erbjuder 1 meter i upplösning.

En variant av spaningssatelliter är de förvarningssatelliter som USA och Sovjet använder. Satelliterna ligger i geostationära banor och använder IR-sensorer för att upptäcka motorflamman från startande ballistiska robotar.

Gulfkriget 1990–91

Gulfkriget 1991 kallas ibland för det första rymdkriget och var det första krig där rymdsystemen fick en bred användning på den taktiska nivån. Spaningssatelliter användes för

att lokalisera irakiska styrkor, GPS-satelliter gjorde det möjligt för markförbanden att förflytta sig i öknen, kommunikationssatelliter användes i stor utsträckning för sambandet och förvarningssatelliter larmade när Irak avfyra ballistiska robotar.

För första gången i ett krig använde man satellitbilder för den operativa och taktiska ledningen. De spaningssatelliter som kunde användas under Gulfkriget var tre elektrooptiska KH-11 som inte kan se genom moln och en Lacrosse med syntetisk aperturradar. Den typiska täckningen som spaningssatelliterna gav över Irak var fyra dagliga passager med KH-11 och två dagliga passager med Lacrosse. Varje passage gav ungefär 15 minuter spaningstid över Irak. Satelliterna lagrade informationen tills de passerade en markstation som de kunde sända ned informationen till. Satellitbilderna skickades sedan till USA där hundratals

analytiker arbetade med att tolka bilderna. När den operativa och taktiska nivån i Mellanöstern fick tillgång till satellitbilderna var de ca 18 timmar gamla. Den taktiska nyttan blev därför relativt begränsad och analysen efter kriget pekade på flera brister, bl.a. överdriven centralisering och hemlighetsmakeri. Med tanke på att man före kriget aldrig hade genomfört någon planering eller övning för att använda satellitinformation på taktisk eller operativ nivå, får man nog ändå betrakta Gulfkriget som ett lyckat första steg i den riktningen.

Satellitspaning gav USA god förvarning om det irakiska anfallet mot Kuwait i augusti 1990. En vecka före det irakiska anfallet kunde CIA och Pentagon informera president Bush om att en irakisk attack var "trolig" och 12 timmar före invasionen meddelade CIA att sannolikheten för ett anfall inom de närmaste 24 timmarna var 70%.

Koalitionen hindrade spridning av kommersiella satellitbilder, bl.a. från den franska SPOT, från krigsskådeplatsen. Detta gjorde det svårare både för Irak och för allmänheten att veta vad som försiggick.

Gulfkriget blev det verkliga genombrottet för satellitnavigering med GPS. 1991 var GPS egentligen inte operativt, eftersom bara 16 av de 24 satelliterna var i drift. Detta betydde att GPS inte kunde ge position i tre dimensioner hela tiden. En del av flyganfallen fick därför planeras så att de genomfördes när tillräckligt

många satelliter syntes ovanför horisonten. Antalet GPS-mottagare i det amerikanska försvaret var före Gulfkriget mycket begränsat. 10 000 civila GPS-mottagare köptes därför snabbt in och installerades hastigt i flygplan, helikoptrar och fordon – ibland med hjälp av tejp. Den avsiktliga störningen av den civila GPS-signalen stängdes av under Gulfkriget, så att de civila mottagarna skulle kunna ge bästa möjliga noggrannhet.

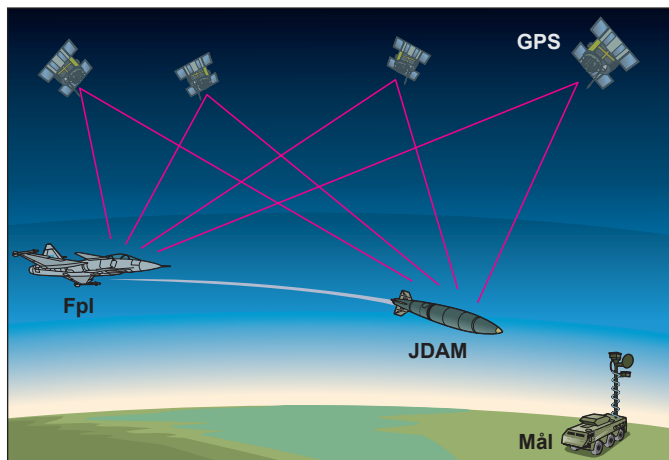
En mycket stor del av sambandet, dels mellan USA och staberna i Mellanöstern, dels mellan enheterna i Mellanöstern, gick via satellitkommunikation. Under Gulfkriget använde det amerikanska försvaret satellitkommunikation med en överföringskapacitet om 100 Mbit/s. Ungefär hälften av kapaciteten kom från militära satelliter och hälften köptes från kommersiella operatörer.

Kosovo 1999

Den viktigaste nyheten med kopplingar till rymdteknik under Kosovokonflikten 1999 var introduktionen av vapen



Figur 16: Kontroll av position med GPS i terräng. Foto: USA DoD.



Figur 17: JDAM: En GPS-styrd bomb som släpps från ett flygplan och själv söker upp sitt mål.

som styrdes med hjälp av satellitnavigering med GPS. Den GPS-styrda bomben JDAM, *Joint Direct Attack Munitions*, är en vanlig bomb som försetts med styranordningar och ett styrsystem baserat på GPS och tröghetsnavigering, se figur 17. JDAM träffar en angiven punkt på jorden med en precision av 3–5 meter och kostar bara omkring 200 000 kronor. Det låga priset och den goda precisionen, som dessutom är oberoende av vädret, gjorde att JDAM snabbt blev ett favoritvapen. JDAM har sedan fortsatt att spela en mycket stor roll i konflikterna i Afghanistan och Irak.

Afghanistan 2001

Under de militära operationerna i Afghanistan 2001 spelade rymdsystem återigen en stor roll. Mest kritiskt för operationerna i det otillgängliga Afghanistan var satellitkommunikation. Behovet av satellitkommunikation visade sig snabbt vida överstiga planerade resurser, varför upphandling av kommersiell

kapacitet fick göras mycket hastigt. Trots att stor kapacitet fanns, totalt nästan 1000 Mbit/s, mättades kommunikationerna. Exempelvis kunde USA operera med endast två UAVer av typ Predator, ett obemannat spaningsflygplan med optiska sensorer och radar, på en gång.

Irak 2003

Under Irakkriget 2003 använde man rymdsystemen än en gång i stor omfattning. GPS fanns nu i nästan alla fordon. GPS och satellitkommunikation utgjorde grunden i ett system kallat BFT, *Blue Force Tracker*, som skulle förhindra vådabekämpning av egna enheter. BFT fungerade väl och ses av många som en nyckelteknik för snabba och rörliga operationer.

Behovet av satellitkommunikation fortsatte att växa och under Irakkriget 2003 användes en kapacitet av ungefär 3 000 Mbit/s, eller 30 gånger så mycket som i Gulfkriget 12 år tidigare. Omkring 80% av satellitkommunikationerna gick via kommersiella kanaler.

Ur ett militärt perspektiv är rymden ytterligare en miljö där man kan bedriva verksamhet som påverkar militära operationer. Rymden har förvisso andra egenskaper än mark, sjö eller luft men som en strategisk domän att utnyttja eller kontrollera skiljer sig inte rymden från andra domäner. För att förstå möjligheter och begränsningar, liksom varför vissa system ser ut som de gör, är det viktigt att förstå både tekniska och organisatoriska förutsättningar för militär rymdverksamhet.

Militära operationer har nor-

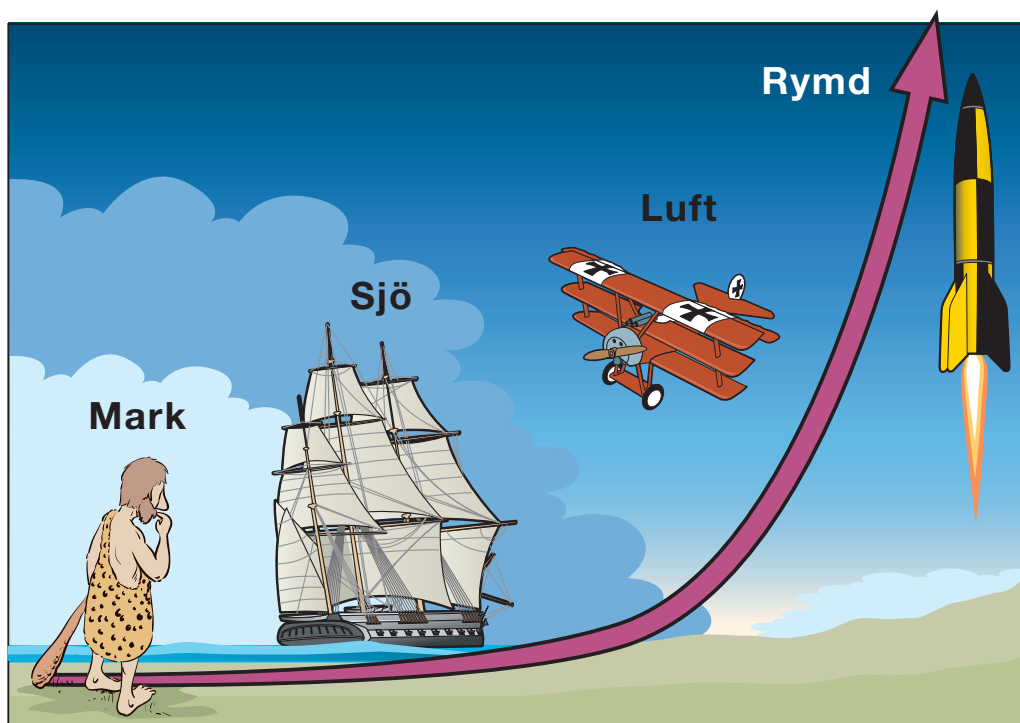
malt inte som syfte att förstöra motståndarens materiel. Syftet är att påtvinga motståndaren sin egen vilja. För militära rymdsystem innebär det att de har kopplingar till jorden eftersom det är på jorden de maktstrukturer finns som man måste påverka. De rymdsystem som är av militärt intresse under överskådlig framtid är de som befinner sig i omloppsbana kring jorden eller nära jorden.

Redan här delar sig rymden i två separata miljöer: den del där omloppsbana är möjligt, över ca 160 km, och den del där varken konventionellt flyg

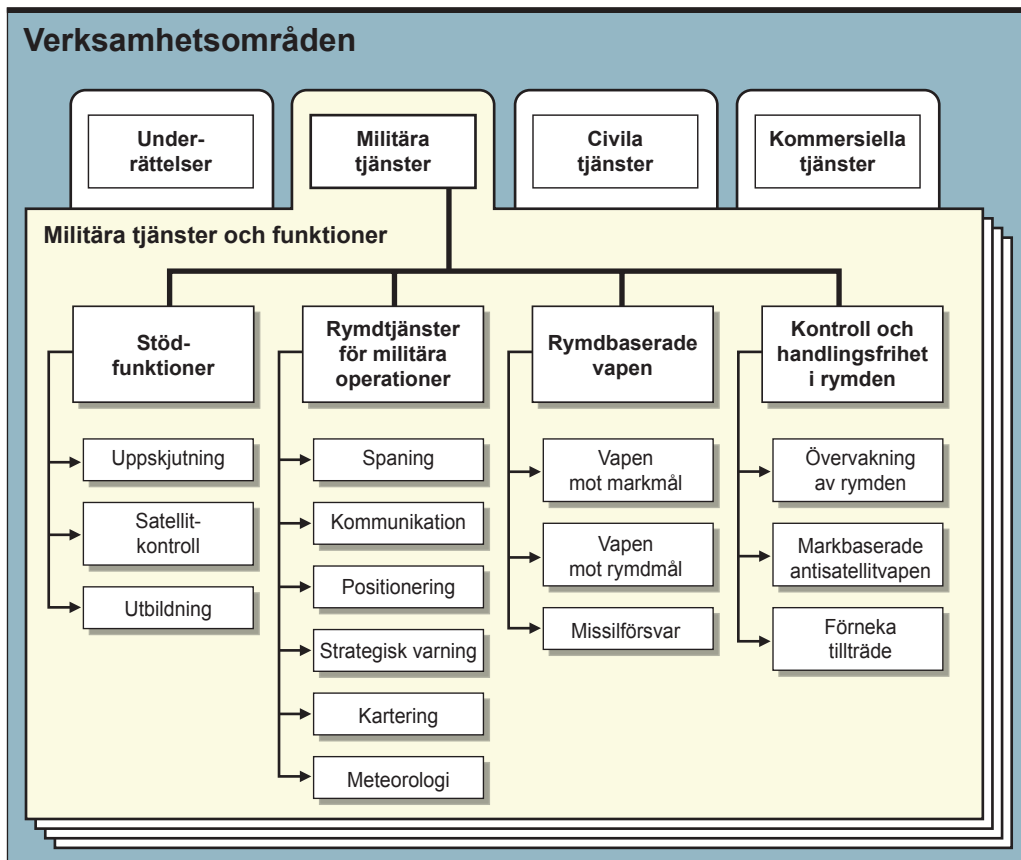
eller satelliter i omloppsbana kan verka, ca 30–160 km över jordytan, ibland kallad "nära rymden". Var och en av dessa två miljöer kräver sin egen strategi och till detta kopplade policybeslut. I detta avsnitt behandlas strategi och policy för rymden i generella termer, utan åtskillnad av den ena eller den andra rymdmiljön. Exempel är hämtade från omloppsbanan, då det är dessa system som är operativa idag.

Aktörer och intressenter

Traditionellt talar man om fyra olika sektorer eller verksam-



Figur 18: Utvecklingen mark-sjö-luft-rymd. Människan har ianspråktagit miljöerna mark, sjö och luft för militära aktiviteter en efter en under tusentals år av utveckling. Sedan knappt femtio år är rymden en miljö som nyttjas för att uppnå militär effekt. Denna utveckling är till stor del en direkt följd av teknikutvecklingen.



Figur 19: Verksamhetsområden inom rymdverksamhet.

hetsområden när man diskuterar aktörer och intressenter i rymdverksamhet, se figur 19. Inom varje verksamhetsområde kan man sedan definiera ett flertal olika grupper av tjänster eller funktioner. I många fall liknar tjänsterna varandra oavsett vilket verksamhetsområde de tillhör. Det är dessa likheter som ligger till grund för det ofta utnyttjade begreppet *dual use* i rymdsammanhang. De fyra sektorerna är:

Underrättelsesektorn – En nationell funktion som förvisso har militära kopplingar men som inte är strikt militär. Fokus ligger på datainsamling, för senare bearbetning, genom

såväl avbildande spaning, optisk eller radar, signalspaning och strategisk förvarning, t.ex. genom IR-spaning. Hit hör de klassiska verifikationstjänsterna, det som under det kalla kriget var känt som NTMV, *National Technical Means of Verification*, d.v.s. övervakning av att t.ex. nedrustningsavtal hölls.

Militära sektorn – Detta är det i dag snabbast växande verksamhetsområdet och handlar om att använda rymdtjänster i militära operationer. Detta område är väsensskilt från Underrättelsesektorn, då de militära tjänsterna direkt syftar till att skapa militär förmåga. Förvisso är avbildande sys-

tem viktiga även här, men av kanske större värde är kommunikationstjänster och positioneringstjänster. En "indirekt" rymdtjänst för det militära området är rymdtjänster för meteorologi där satellitbilder används för att göra väderprognoser.

Civila sektorn – Här samlas statliga, och eventuellt andra icke-vinstdrivande, organisationer såsom statliga myndigheter och verk, universitet och högskolor eller hjälporganisationer. Rymdtjänster vid räddningsinsatser efter naturkatastrofer hör hemma här, liksom satellitbilder vid arkeologisk eller geofysisk

forskning och inventering av skogs- och åkermark. Rymdforskning med satellit, såsom de svenska forskningssatelliterna Freja och Odin, sorterar här.

Kommersiella sektorn –

Detta är, som namnet antyder, de som säljer satellittjänster eller tjänster baserade på tillgång till satelliter. Det kan vara de företag som äger en kommersiell fotospaningssatellit och säljer bilder, såsom Space Imaging och Ikonos, eller den som säljer GPS-navigatorer till taxibilar, vilka använder rymdtjänster som produceras av amerikanska försvaret.

Det är viktigt att hålla i minnet att de fyra olika sektorerna har olika fokus och intressen och att rymdsystem och rymdtjänster inom de olika sektorerna därför kommer att se olika ut. Ett exempel är fotospaning för underrättelser respektive den militära sektorn. I den bästa av världar skulle alla kunna få bilder med kort leveranstid som täcker ett stort område med hög kvalitet. Av såväl tekniska som ekonomiska skäl är detta inte möjligt. Man har ofta att välja mellan att snabbt få en bild med lägre kvalitet som täcker ett stort område eller kanske behöva vänta en tid på att få en bild som med hög upplösning täcker ett litet område. I detta val kommer underrättelsesektorn och den militära sektorn ofta att välja olika. För strategiskt inriktade underrättelser krävs hög upplösning men det är inte alltid tidskritiskt. För den militära sektorn vill man ofta snabbt ha en bild. Givet dessa skillnader är det inte alls säkert

att underrättelsesektorn och den militära sektorn kan enas om en och samma satellit.

Tjänster i den militära sektorn

Rymdtjänster och rymdfunktioner inom de olika sektorerna kan delas upp i funktionella grupper. Den första gruppen, som i princip är gemensam för alla sektorer, är stödfunktionerna. Här ingår sådant som uppskjutningstjänster, satellitkontroll, ofta förkortat TT&C efter den engelska beteckningen *Telemetry, Tracking and Control*, och utbildning för och om rymden och satellitsystemen.

Beroende på sektor kommer de övriga grupperna av funktioner att se olika ut. För den militära sektorn kan man grovt dela upp funktioner och tjänster i ytterligare tre områden:

- Rymdtjänster för militära operationer, *Force Enhancement*
- Rymdvapen, *Force Application*
- Kontroll och handlingsfrihet i rymden, *Space Control*

Under rubriken Rymdtjänster för militära operationer finns alla sådana tjänster som använder rymdsystem för att skapa och stödja militär förmåga på land, till sjöss och i luften. Här finns "direkta" rymdtjänster som spaning, kommunikation och positionering men också "indirekta" som kartering och meteorologi. Ingen av dessa är något nytt, men alla drar nytta av satellitbaserade tjänster. T.ex. ger tillgång till satelliter kartor

respektive väderprognoser som är bättre än annars. Till denna grupp hör också en form av tidig varning, en funktion som även återfinns i underrättelsesektorn. I den militära sektorn handlar "Tidig varning" om att ge egna militära styrkor tid att förbereda sig. Sverige använder idag ett flertal olika rymdtjänster till stöd för militära operationer. Exempel är väderprognoser grundade på satellitdata, GPS-navigering till sjöss eller satellitkommunikation mellan Sverige och missioner i utlandet.

Rymdvapen är fortfarande något som ligger i framtiden, om än kanske inte så långt bort. Till detta område hör vapen baserade i rymden för att verka mot antingen marken, mot ballistiska missiler eller mot andra satelliter. Om vapen av dessa typer skulle utvecklas kommer det att påverka såväl den säkerhetspolitiska miljön som strategi, taktik och doktrinutveckling. Detta gäller givetvis inte bara den eller de nationer som har vapnen utan i lika hög grad deras allierade och deras motståndare.

Kontroll och handlingsfrihet i rymden är något som just har börjat exploateras och debattens vågor går höga kring huruvida detta är acceptabelt eller ej. Bakgrunden är den att framförallt USA gjort sig så beroende av sina rymdsystem för militära operationer att man tvingas fundera i termer av att säkra tillgång till rymden och garantera sina systems säkerhet och fortlevnad. I USA används omväxlande och synonymt termerna *Space Control* och

Space Superiority. Ett första steg i detta är att skapa en detaljerad rymdlägesbild. Traditionellt har detta gjorts med hjälp av radar från marken, men detta bedöms inte vara tillräckligt och nu utvecklas kompletterande satellitbaserade system. Utöver rymdlägesbilden krävs, för att uppnå kontroll av rymden, även anti-satellit-(ASAT)system. Markbaserade sådana har funnits operativa under det kalla kriget och steget till att utveckla nya sådana är inte långt om den politiska viljan finns. Som ännu ett steg i kontroll av rymden ingår att förneka motståndaren tillträde och tillgång till sina egna system. Detta behöver inte ske med rymdvapen eller ASAT-vapen. Även sådant som att bekämpa uppskjutningsanläggningar och markstationer eller störa ut kommunikationslänken mellan mark och satellit är möjligt.

Rymdsystemens bidrag och inflytande vid militära operationer har inverkan på hur striderna kan föras, och är därmed system att ta hänsyn till vid doktrinutveckling och insatsplanering. Det är viktigt att ha en sammanhängande struktur när det gäller metod - organisation - personal - teknik även avseende rymdtjänsterna. Det innebär att identifierade behov och teknisk nytta måste gå hand i hand med utveckling av doktrin, organisation och policy. Sverige som nation har redan valt att använda rymdtjänster för militära operationer. Vi står alltså inte inför ett nationellt strategiskt vägval i den meningen att vi ska välja mellan att använda

eller inte använda rymdsystem. Däremot kan vi fortfarande välja hur djupt vi vill integrera rymdtjänster i våra militära system, och därmed också hur vår policy avseende utnyttjande av rymden ska se ut.

Rymden som strategisk miljö

Som framgår ovan finns all anledning att se på rymden ur ett strategiskt perspektiv, dels i syfte att bedöma möjligheter och risker med att utnyttja rymden, dels för att värdera nyttan av rymdsystem och organisera sig så att man får ut mesta möjliga effekt. För detta krävs några grundantaganden om rymden som strategisk miljö:

- Militär förmåga på land, till sjöss och i luften är några bland många nationella säkerhetspolitiska verktyg som kan användas för att uppnå en nations säkerhetspolitiska mål och åtaganden.
- Rymden är ytterligare en miljö vid sidan av mark, sjö och luft.
- Den strategiska utvecklingen av militär rymdförmåga kommer att följa samma mönster som utvecklingen av förmåga till sjöss och i luften, först spaning, sedan vapen för att förhindra spaning och slutligen användning av plattform som vapenbärare mot "alla" typer av mål.
- Militära rymdsystem är eller kommer att vara nationella verktyg för att uppnå nationella säkerhetspolitiska mål.

- Fysiskt skiljer sig rymden från land, sjö, luft och *cyberspace*.
- Människor kan inte existera i rymden utan tekniska stödsystem, vilket gäller även sjö- och luftdomänerna. Detta understryker likheten i förutsättningarna mellan sjö, luft och rymd, inte de fysikaliska skillnaderna mellan dem.
- Såväl teknik som taktik som är unik för rymden måste, och kommer att, utvecklas. Detta för att kunna dra nytta av rymdens unika egenskaper.
- När rymdsystem används i konflikter på marken måste de ses i samverkan med, inte skilt från, militär förmåga inom mark-, sjö- och luftdomänerna.
- När rymdsystem integreras med övriga system utgör rymdkomponenten en reell del av vanlig krigföring som, givetvis, följer samma strategiska regler som all annan förmåga.
- Rymdsystemens förmåga som nationella säkerhetspolitiska verktyg innebär att de inte skall ses som enbart en militär utan som en nationell angelägenhet.

Sammantaget innebär punkterna ovan att "rymdkrigföring" inte är något unikt eller nytt och kommande, utan något som redan är här. Det är en naturlig utveckling av en ständig strävan efter att omforma stridsfältet till sin egen fördel. Det "strategiska beslutet" om att utvidga den geofysiska miljön för krigföring även till rymden är ett implicit

Doktrin	Fristaden	Överlevnad	Kontroll av rymden	Högsta punkten
Egenskaper	Rymdsystem används för insamling och kommunikation	<i>Samma egenskaper som "Fristaden" samt:</i> Rymdsystem görs hårdade och störtlåga. Redundans och reservförfaranden.	<i>Samma egenskaper som "Överlevnad" samt:</i> Övervakning av rymden och vapen för att skydda respektive hota rymdsystem.	<i>Samma egenskaper som "Kontroll av rymden" samt:</i> Rymden nyttjas för offensiva operationer mot mål på marken.

Figur 20: Doktriner för rymden.

beslut som fattades redan för femtio år sedan. Det som pågår just nu, i framförallt USA, är därför inte första akten i en militarisering av rymden utan en sannolikt nödvändig anpassning till konsekvenserna av den ständigt ökande nytta som rymden tillför militära operationer.

Rymden är redan militariserad i den betydelsen att det finns specifikt militära system i rymden som syftar till att stödja militära operationer på marken. Idag omfattar dessa system dock inte vapensystem. En *militarization of space* har redan genomförts.

Doktriner för rymden

Att acceptera rymden som en strategisk miljö där system och operationer kan påverka skeenden på jorden innebär också att man kan utveckla doktriner som omfattar även rymden. Man kan i huvudsak urskilja fyra olika attityder eller doktriner i frågan om militära rymdsystem. Dessa har sitt ursprung i det amerikanska flygvapnet och brukar benämnas Luptons doktriner efter överstelöjtnant David Lupton, se *"On space Warfare: A Space Power Doctrine"* (Lupton 1998). De fyra doktrinerna kan sammanfattas enligt nedan, se

även figur 20:

Fristaden, Sanctuary: De rymdsystem som används är "passiva" och används för t.ex. datainsamling, kommunikation eller positionering. Fristadens principer går tillbaka till rymdsystemsroll i det kalla krigets terrorbalans. Rymdsystemen var nödvändiga dels som förvarning, dels för verifikation av nedrustningsavtal. Fristaden är den doktrin som hör ihop med en nation där underrättelsesektorn är den huvudsakliga rymdaktören och där rymdsystemens bidrag till militär förmåga är sekundär. En sådan nation kommer inte heller att behöva några militära "rymdförband" eller ett "Rymdtaktiskt kommando".

Systemöverlevnad, Survivability: Nyttan av rymdsystem för att stödja militär förmåga blir ett mål i sig utöver Fristadens verifikation av avtal. Rymdsystem som är optimerade för olika behov kommer att behövas, vilket speglar att här är både underrättelsesektorn och den militära sektorn intressenter i rymdsystemen. Den militära förmågans beroende av rymden kräver att sårbarheten hos rymdsystemen minskas. Detta löses primärt genom att systemen "hårdgörs" och genom redundans. Någon

form av organisatoriskt militärt rymdengagemang krävs; om inte en separat rymdorganisation så åtminstone rymdkompetens och C2-system som kan hantera rymdresurser i de ordinarie staberna.

Kontroll av rymden, Space control: Här jämföras rymden med mark, sjö och luft som strategisk domän att ha kontroll över och kunna agera i. Utöver de krav som ställs av Systemöverlevnad så krävs här också förmåga att ha en aktuell rymdlägesbild och beredskap, samt förmåga att skydda egna system och, om man så väljer, förmåga att bekämpa motståndarens rymdsystem. Någon form av "Rymdtaktiskt kommando" är sannolikt nödvändigt.

Högsta punkten, High ground: När rymden utnyttjas som den slutliga högsta punkten innebär det att man i alla avseenden använder rymdens unika egenskaper. Det innebär att det finns vapensystem för och i rymden och en organisation som kan föra krig i rymden. Någon form av rymdstyrkor som kan agera i och från omloppsbanan, med tillhörande staber och kommandon, utbildning och träning etc, är sannolikt nödvändigt. Dock skall detta inte

tas till intäkt för att det handlar om att placera människor på vapenplattformar i rymden. Huvuddelen av den förmåga som krävs här kan sannolikt byggas upp med autonoma och fjärrkontrollerade system.

Under en nations utveckling mot en militär rymdmakt kan man urskilja tre tydliga steg. De tre stegen speglar nationens tekniska *know-how* och militära doktrin. Det första steget innebär att man använder rymdsystem för att stödja och förstärka förmågor för militära operationer på marken. Ett exempel är att man använder GPS för att mäta in sin egen position. Sverige och de flesta europeiska länder står idag på denna nivå. Doktrinmässigt innebär det att man som nation ansluter sig till *Fristaden* eller *Systemöverlevnad* enligt ovan.

Steg nummer två innebär att man använder rymdbaserade system för att skapa nya förmågor för militära operationer på marken som annars inte skulle vara möjliga. Exempel på detta är långräckviddig precisionsbekämpning med GPS-styrda kryssningsmissiler eller system för *Blue Force Tracking* för att hålla reda på var egna styrkor befinner sig. I dessa förmågor är rymdtjänsterna integrerade med andra tjänster i system som skulle vara omöjliga att realisera utan rymdbaserade system. Tar man detta steg skapas ett beroende av rymdsystemen. Den nation som idag tydligt står på steg två är USA. I doktrinintermer är *Systemöverlevnad* den lägsta ambitionsnivån som är rimlig

i detta steg. Ju större beroendet blir desto tydligare tvingas en nation som står på steg två in i Kontroll av rymden.

Det tredje steget innebär att den militära förmågan utökas från att begränsas till operationer inom atmosfären till att också innefatta militära operationer i rymden. Detta innebär en *weaponization* av rymden där vapen placeras i rymden för att verka mot andra mål i rymden eller på marken. Detta innebär också ett medvetet beslut om att ansluta sig till en doktrin av karaktären *Högsta punkten*.

Likheter och skillnader i olika strategiska miljöer

I många sammanhang kopplas luften och rymden, *air and space*, ihop och en naturlig utveckling antas vara att flygvapen, *Air Force*, transformeras mot ett flyg- och rymdvapen, *Aerospace Force*. Detta är sannolikt en förenkling av verkligheten och på intet sätt nödvändigtvis den bästa lösningen. En sådan *Aerospace Force* skulle tvingas ha förmåga att agera i tre olika strategiska miljöer. Se även figur 1.

1. Luften, där man kan använda motorer som andas luft, och därmed inte behöver bära med sig syre för förbränning. I luften kan man manövrera i tre dimensioner med roder, istället för att förbruka bränsle. Lyftkraften skapas genom att luften strömmar kring flygplanets vingar.
2. Nära-rymden, på 30–160 km, höjd där om-

loppsbanor inte är möjliga och dit vanliga flygplan inte kan nå. Här kan man agera med rymdflygplan som använder raketmotorer för såväl framdrift som kursändringar. Tyngdkraftfältet är starkt och det finns inte tillräckligt med atmosfär för att skapa lyftkraft med vingar.

3. Omloppsbanan från ca 160 km och uppåt. Ingen framdrift krävs då satelliten väl är placerad i bana eftersom den faller fritt. Dock krävs bränsle för att ändra kurs, vilket är detsamma som att ändra bana. Priset för att nå omloppsbanan är dock högt. Förutom att nå tillräcklig höjd krävs att satelliten ges en hastighet av ca 8 km/s parallellt med jordytan för att placeras i omloppsbanan och inte falla tillbaka till jorden. Tyngdkraften varierar här från ca 95% av den vid jordytan till ca 2%.

Omloppsbanan är ur ett nyttoperspektiv en miljö i ständig förändring. I och med att satelliterna aldrig kan stå stilla och inte kan backas eller manövreras utan mycket höga kostnader i form av bränsleåtgång, så kan man aldrig kortsiktigt anpassa sig till situationen. Å andra sidan är varje situation i det korta perspektivet fullständigt deterministisk och går att beräkna in i framtiden, givet tillräckligt bra ingångsdata. Vidare är satellitsystem globala till sin natur, varför det är svårt att påstå att man bygger en förmåga lokalt med hjälp av satelliter då

varje sådan lokal förmåga, lite beroende på satellitbanor, också blir mer eller mindre global. Detta har inverkan på begreppet rymdherravälde, *space superiority*, då ett likställande av rymdherravälde och luftherravälde inte är korrekt. Medan luftherravälde är något som kan anses vara lokalt i tid och rum kommer rymdherravälde baserat på satellitsystem till sin natur att vara globalt och existera över tiden, oavsett pågående militära operationer.

I den "nära rymden" är spelreglerna annorlunda. Svårigheten att manövrera på grund av frånvaron av atmosfär är den samma som i rymden. Dock innebär det omöjliga i att gå in i omloppsbanan att man är begränsad till ballistiska banor. Historiskt var detta den första verkliga användningen av rymden, då rymden var transportsträcka för de första ballistiska missilerna. Att använda ballistiska banor har den fördelen att man inte behöver accelerera sina system upp till 8 km/s, vilket i sin tur innebär att den mängd bränsle som måste föras med är mindre. I praktiken går det att nå den nära rymden med olika former av rymdflygplan som startar från marken, om än med viss hjälp, och flyger som flygplan upp till 30 km höjd för att där övergå till att bli en raket. Det privata *SpaceShipOne*, som i oktober 2004 vann det s.k. *X-prize* genom att bli den första farkost som kunde bära en viss nyttolast upp i rymden och tillbaka två gånger inom två veckor, är ett exempel på ett sådant rymdflygplan.

Bevekelsegrunden för att skapa militära system för den nära rymden är framförallt möjligheten att snabbt ta sig mellan två punkter på jordytan som ligger mycket långt ifrån varandra. Det oftast framförda exemplet handlar om att man vill göra en vapeninsats mot markmål på långt avstånd med kort tid från beslut till genomförande och utan att använda interkontinentala missiler. Som vapenlast för sådana insatser föreslås ofta s.k. stavar, eller *Rods from God*, som verkar genom sin kinetiska energi istället för genom en sprängladdning. Det är värt att notera att sådana stavar måste fällas från flera hundra kilometers höjd, väl över den övre gränsen för den nära rymden, för att ett kilo "stav" skall ha lika mycket sprängkraft som ett kilo konventionellt sprängämne.

De olika strategiska miljöerna kommer att ställa olika krav på tekniska system med olika förmågor. Såväl plattformar som vapen kommer att vara olika och ledningssystemen, där ledningssystemet antas bestå av komponenterna metod, organisation, personal och teknik, kommer att skilja sig åt avseende flera komponenter. T.ex. måste metodiken för att leda i luften med dess egenskaper skilja sig kraftigt från att leda verksamhet i omloppsbanan.

Det finns mycket som talar för att de som är mest lika är luften och den nära rymden, medan omloppsbanan är så annorlunda att det finns mer att förlora än att vinna på att samordna omloppsbanan med

de andra. På samma sätt som att mark, sjö och luft är olika så bör man nog se mark, sjö, luft och rymd (omloppsbanan) som helt skilda miljöer.

Inledning

Rymdfrågornas betydelse för den militära sektorn har ökat i relation till bland annat de nya tekniska militära förmågor som rymdsystem möjliggjort. Samtidigt har det också inneburit att en ny säkerhetspolitisk arena etablerats, där frågor om samarbete, konkurrens eller konflikt har fått en ny innebörd. I figur 21 visas en uppskattning av rymdbudgetar för vissa större rymdnationer.

Staters och grupper av staters respektive policy för rymdområdet är därför redan idag i betydande utsträckning styrd av de gängse konflikt- och samarbetsmönster som finns mellan dessa aktörer. Eftersom rymdsektorn innehåller stora inslag av såväl industri- som säkerhetspolitik är det inte enbart militära bedömningar som påverkar de säkerhetspolitiska beslutsfattarna i deras överväganden kring rymdom-

rådet. Rymdsektorns stora civila tillämpningar gör att civila, kommersiella intressen kan ha mycket stor effekt på policyskapandet inom området, samtidigt som, den ekonomiska globaliseringen till trots, säkerhets- och geopolitiska beslut kan sätta avgörande gränser för hur kommersiella aktörer tillåts agera.

Detta kapitel inleds med en kort beskrivning av det legala ramverk som finns för civil och militär rymdverksamhet, och övergår sedan i en diskussion kring de säkerhetspolitiska implikationerna av rymdsystem och deras användning. Några av dagens viktigaste trender på detta område tas också upp.

Avtal och fördrag rörande rymden

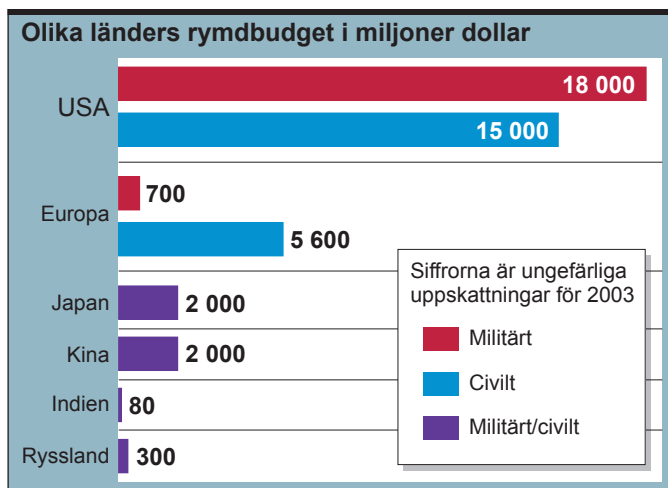
Det föreligger ett antal större internationella avtal rörande

Rymdavtal	
Outer Space Treaty	1967
Rescue Agreement	1968
Liability Convention	1972
Registration Convention	1975
Moon Agreement	1979

Figur 22: Internationella avtal som angår rymdverksamhet.

rymden. Behovet av en reglering av rymdverksamheten uppkom för över femtio år sedan, och blev akut i och med den sovjetiska uppskjutningen av Sputnik-satelliten 1957. Normalt sett får ju inte ett lands luftfarkoster flyga över andra länders territorier utan tillstånd, men satelliter gör i princip detta hela tiden. Man löste detta pragmatiskt genom konceptet rymdens frihet, *freedom of space*, som innebär att en satellit i omloppsbana inte anses kränka den territoriella integriteten avseende de länder som den passerar över. Under ett antal konferenser i slutet på femtio- och början på sextioalet formaliserades sedan detta under Förenta Nationernas ledning, där en särskild kommitté hanterar frågor som rör internationell användning av rymden. Denna kommitté, COPUOS (*United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space*), är det huvudsakliga internationella organet för förhandlingar och avtalsskrivande om rymden.

Den internationella lagstiftningen om rymden inne-



Figur 21: Rymdbudget för vissa länder 2003 (estimerade ungefärliga siffror).

fattar bland annat fem stora konventioner (avtal), som reglerar förhållandena för såväl civil som militär användning av rymden. Dessa är listade i figur 22.

Av dessa har t.ex. Sverige undertecknat alla utom *Moon Agreement*, som handlar om verksamhet på månen och andra himlakroppar där Sverige inte har någon möjlighet att delta som stat.

Outer Space Treaty är det centrala ramavtalet av dessa. Huvudprincipen i detta avtal, som undertecknats av 98 stater (2003), är att den yttre rymden – inklusive månen och andra himlakroppar – är fri att utforska för alla stater och att vetenskaplig forskning fritt kan utföras i rymden. Vidare förbinder sig alla signatärstater att inte placera ut kärnvapen eller andra massförstörelsevapen i rymden, samt att inte bygga militära baser eller testa vapensystem på månen. Däremot finns det inget uttryckligt förbud mot att placera ut vapen – som inte är kärn- eller massförstörelsevapen – i en omloppsbana runt jorden. *Outer Space Treaty* är närmare fyrtio år gammalt och skapades under det kalla kriget, men har en betydande flexibilitet som gjort att det fortfarande fungerar som legalt ramverk för dagens rymdverksamhet.

De övriga avtalen reglerar räddningsfrågor, *Rescue Agreement*, där det fastställs att såväl personal som utrustning som (nöd-)landar på icke avsedd plats genast ska få återvända till den stat eller aktör som ansvarat

för uppskjutningen. Om skador uppstår, t.ex. genom att delar från rymdfarkoster faller ner på jorden, reglerar *Liability Convention* hur skadestånd ska betalas. Huvudprincipen är att den stat eller aktör som ansvarar för uppskjutningen har en absolut skadeståndsskyldighet för de eventuella skador som t.ex. en uppskjuten farkost orsakar. Enligt *Registration Convention* måste alla uppskjutningar registreras, och uppgifterna i dessa register delges FN.

Moon Agreement, slutligen, förbjuder all våldsanvändning på, och all användning av månen för fientliga eller våldsamma aktioner. Kärnvapen och massförstörelsevapen i allmänhet är enligt avtalet specifikt förbjudna att placeras ut på månen, andra himlakroppar och i omloppsbana.

Som synes är de tre senare avtalen i huvudsak en utveckling och en precisering av det som regleras i *Outer Space Treaty*.

Rymdfrågornas säkerhetspolitiska implikationer

Det finns flera egenskaper hos rymdsektorn och rymdsystemen som nästan ofrånkomligen har säkerhetspolitiska implikationer. För det första handlar rymdteknik oftast om avancerad högteknologi, vilken är säkerhetspolitiskt intressant i sig själv.

För det andra påverkar en utbyggd rymdförmåga, oavsett om det rör sig om civila eller renodlat militära tillämpningar,

den befintliga maktbalansen mellan stater och grupper av stater. I ett läge där de traditionella säkerhetspolitiska strukturerna är under förändring och utvecklingen mot rymdtillämpningsberoende NBF-försvar fortsätter, kan således en förstärkt rymdförmåga bli en central faktor i världspolitik. I det följande ska några centrala policyfrågor och deras implikationer för den globala säkerhetspolitiken kort diskuteras.

Rymdpolicy och den geopolitiska utvecklingen

USA-Europa

USA är traditionellt den ojämförligt största aktören på det militära rymdområdet, och en vanlig bedömning är att amerikanska satsningarna idag utgör omkring 95% av den globala budgeten på området. USA avser också uttryckligen att behålla en dominerande ställning på rymdområdet, i synnerhet avseende dess militära dimension. Detta innebär inte nödvändigtvis att det amerikanska syftet är att skära av andra aktörers användning av rymden för militära ändamål; man ser snarare andras rymdsatsningar och globalt rymdsamarbete som positivt, men under förutsättning att det är "rätt" aktörer som ägnar sig åt rymden och att samarbetet som sådant är gynnsamt för USA.

EU-länderna har under de senaste åren varit mycket splittade i sin syn på USA och hur



Figur 23: Inom EU finns en tendens att vilja balansera den amerikanska maktställningen genom att t.ex. skaffa sig egna, GPS-liknande satelliter.

Europas relationer till USA bör se ut. Detta har i hög utsträckning påverkat tänkandet och policyprocesserna inom vissa delar av EU. T.ex. har man från franskt håll, baserat på landets traditionella säkerhetspolitiska linje, uttryckt en stark önskan om en oberoende europeisk rymdförmåga för att bemöta den amerikanska dominansen. När t.ex. EU under 2002 tog de avgörande besluten om att sjösätta GALILEO-systemet (oaktat att detta GPS-liknande system formellt ännu inte har militära tillämpningar) tolkades det i Frankrike som ett avgörande första slag mot den amerikanska rymdhegemonin, se t.ex. *“Galileo, trente satellites pour concurrencer l’Amerique”* (Le Figaro 2002).

En annan aktör inom EU, nämligen EU/EG-kommissionen, har under de senaste åren varit drivande för utvecklingen av en europeisk rymdkapacitet under former som legat mycket nära den franska hållningen. En första

“grönbok” presenterades av kommissionen i januari 2003. Den tydliggjorde att en förstärkt europeisk rymdförmåga (inom EU:s ram, snarare än inom den etablerade men icke EU-anslutna internationella myndigheten ESA, European Space Agency) både skulle leda till ett ökat europeiskt oberoende och till en förstärkning av EU:s gemensamma säkerhets- och försvarspolitik (ESFP). Dessutom ansåg kommissionen att allt detta var nödvändigt som motåtgärder mot det amerikanska globala inflytandet.

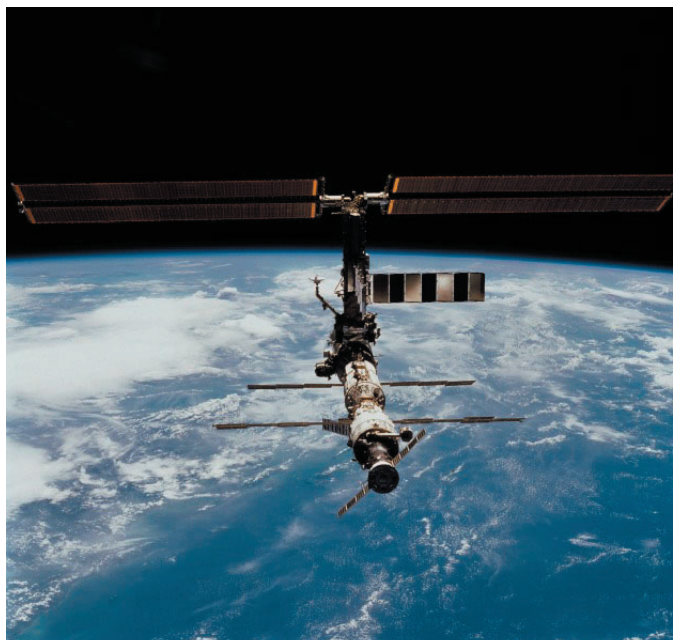
I november samma år utkom dock kommissionen med en “vitbok” om rymden, efter en remissomgång avseende grönboken. I vitboken är det antiamerikanska budskapet nedtonat, till förmån för ett perspektiv som i mer allmänna termer diskuterar hur Europa, d.v.s. EU, kan bli en starkare global aktör med världspolitiska ambitioner. Detta skulle ske genom fokuserade satsningar på en bred,

oberoende rymdförmåga och ett autonomt säkerhetspolitiskt beslutsfattande baserat på denna rymdförmåga (*White Paper Space: a new European frontier for an expanding Union An action plan for implementing the European Space policy* 2003).

I termer av konkreta projekt har t.ex. GALILEO-systemet varit föremål för en hetsig diskussion över Atlanten, eftersom man från amerikanskt håll dels såg allmänt skeptiskt till programmet på grund av dess säkerhetspolitiska förutsättningar och implikationer, dels bland annat fruktade att GALILEO-satelliternas signaler skulle inkräkta på de amerikanska militära GPS-signalerna. Efter segslitna förhandlingar om det senare har man nu nått en lösning på de tekniska frågeställningarna, vilket utgör en god grund för att frågan avpolitiserats. I anslutning till detta kan nämnas att amerikanska industriella intressen rapporterats se en viss marknad i GALILEO-projektet och kan därför ha påverkat den amerikanska regeringen att mildra motståndet mot detta.

USA-Ryssland

Som gamla kontrahenter på rymdområdet har USA och Ryssland en betydande erfarenhet av och insikter i varandras rymdprogram. Inte minst inom arbetet med den internationella rymdstationen (ISS), se figur 24, har det rysk-amerikanska samarbetet varit djupgående och konstruktivt. För detta har Ryssland erhållit ett betydande ekonomiskt stöd



Figur 24: Den internationella rymdstationen ISS, foto NASA.

från USA.

De ryska satsningarna på det militära rymdområdet har dock under flera år efter det kalla kriget slut varit så begränsade att det amerikanska intresset för ryska program varit tämligen litet. Med en förbättrad ekonomi i Ryssland har man emellertid där kunnat öka satsningarna på området de senaste åren. Detta i kombination med en ökad amerikansk oro över den ryska demokratins framtid skulle kunna leda till vissa spänningar länderna emellan, men på kort sikt talar mer för ett fortsatt tämligen gott samarbete.

USA-Kina

Om de rysk-amerikanska relationerna inte idag ser ut att initiera några större problem på rymdområdet torde raka motsatsen kunna identifieras

i de kinesisk-amerikanska. Av flera skäl föreligger det en betydande konfliktpotential på medellång och lång sikt mellan USA och Kina, som kan få en av sina första uttrycksformer på rymdområdet.

Det råder inga tvivel om att det kinesiska rymdprogrammet är såväl offensivt som militärt till sin natur, även om de mer civila sidorna – som t.ex. de lyckade uppskjutningar av såväl obemannade som bemannade rymdfarkoster som gjorts de senaste åren – hittills har fått mest utrymme. På den militära sidan är just relationen och attityden till den amerikanska inställningen till rymden den centrala och i många fall styrande.

På den säkerhetspolitiska nivån går det tämligen lätt att identifiera de centrala problemen. Som noterades ovan avser USA även officiellt att behålla sin

nuvarande dominerande, eller som många kinesiska bedömare menar hegemoniska, position på rymdområdet, i synnerhet det militära. Förutom att denna attityd i Kina anses som allmänt arrogant och förmäten, innebär den också en direkt utmaning mot vad som i Kina idag bedöms vara vitala kinesiska säkerhetsintressen. Kinesiska beslutsfattare uppfattar idag att rymdverksamhet är en central del av den stora kinesiska moderniseringsambitionen, som har såväl kommersiella som säkerhetspolitiska drivkrafter. De teknologiska spin-off-effekter som man dessutom av goda skäl ser som sannolika efter en rymdsatsning är en annan viktig drivkraft. En ökad kinesisk ambition på rymdområdet kan alltså bara av dessa skäl komma att kollidera med en amerikansk, restriktiv attityd mot andra länders rymdambitioner.

Dessutom finns ett par avgörande säkerhets- och geopolitiska anledningar till amerikansk-kinesiska spänningar. Kina har länge varnat för att utplacering av vapensystem i rymden kommer att leda till en destabiliserande rustningsspiral på rymdområdet, och denna kinesiska attityd har hårdnat sedan USA sade upp ABM-avtalet 2001-02. USA planerar såvitt känt inte idag för att placera ut vapen i rymden, men alla former av missilförsvar kommer att i mycket hög utsträckning vara beroende av rymdsystem, främst i form av satelliter. Även om hotet från Kina inte var huvudorsaken till att USA sade upp avtalet – vilket snarare orsakades av en strävan

efter att skapa försvarssystem mot små till mycket små anfall med ballistiska missiler uppskjutna av terroristgrupper eller "skurkstater" – fick det till följd att den begränsade kinesiska förmågan till kärnvapenavskräckning gentemot USA föreföll att hotas. Den totala mängden kinesiska kärnvapenbärande missiler torde fortfarande vara för stor för att fullständigt kunna slås ut av ett kommande ballistiskt missilförsvar i USA, men ett sådant försvar minskar under alla omständigheter kraften i den kinesiska avskräckningen mot USA.

Vad värre är, ur ett kinesiskt geopolitiskt perspektiv, är att traditionella motståndare som Japan sannolikt kommer att ingå mer eller mindre integrerat i det amerikanska missilförsvaret, vilket gör att den kinesiska förmågan till maktprojektion i närområdet minskar. Detsamma gäller Taiwan, som – även om

man inte formellt kommer att ingå i ett amerikanskt missilförsvarssystem i Asien – blir avsevärt lättare att stödja militärt från amerikansk sida om ett utbyggt system av ryddbaserade sensorer övervakar de militära aktiviteterna på det kinesiska fastlandet. Taiwan-frågan är dessutom en extra drivkraft för Kina vad avser att skaffa sig en egen militär rymdförmåga. Med satellithjälp har man en relativt god chans att bekämpa t.ex. amerikanska hangarfartyg som uppträder till Taiwans försvar med missiler av olika slag, vilket skulle kunna göra det för kostsamt för USA att försvara ön i händelse av en konflikt Kina-Taiwan.

Sammantaget har den geopolitiska utvecklingen fått kinesiska bedömare och beslutsfattare att a) konstatera att en militär konfrontation, eller i alla fall ett intensivt militärt konkurrensförhållande, med USA i det närmaste är

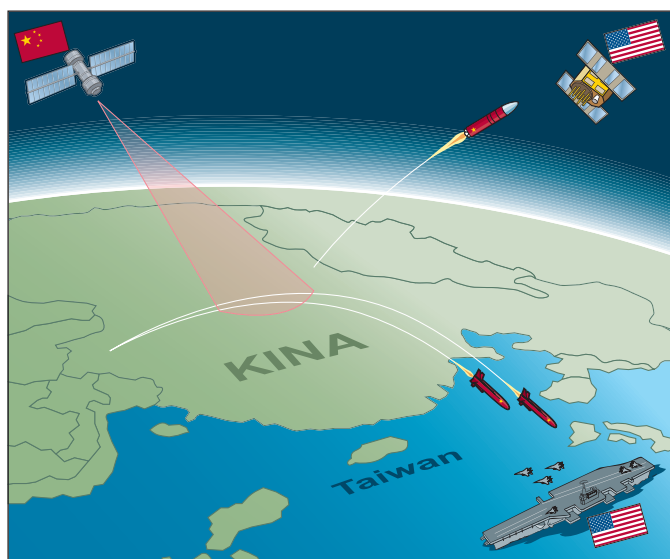
ofrånkomligt, samt b) överväga – trots det egna motståndet på det retoriska planet – att utveckla rymdvapen, t.ex. antisatellitvapen av olika slag. Att rymden skulle kunna bli ett första slagfält i en militär konfrontation mellan USA och Kina är därför inte ett osannolikt scenario. Ett första anfall mot t.ex. det amerikanska, ryddbaserade övervaknings- och kommunikationssystemet i Asien skulle på ett mycket allvarligt sätt begränsa den amerikanska förmågan till krigföring i området.

Som i alla rustningsspiraler har också detta scenario fått till följd att man i USA börjat uppmärksamma ett framtida rymdvapenhot mer. Det man i USA tror skulle göra rymdvapen- och antisatellitsatsningar frestande för Kina, är att sådana inte kräver att det kinesiska rymdprogrammet i stort är i paritet med det amerikanska, vilket det inte heller kommer att vara på decennier. Den s.k. Rumsfeld-kommissionen – ledd av USA:s nuvarande (2004) försvarsminister – argumenterade kraftfullt för ett ökat skydd av USA:s rymdresurser bland annat på grund av denna tänkta hotbild.

Ett försök att åskådliggöra spänningarna i området ges i figur 25.

EU och de "nya rymdmakterna"

Inom EU-systemet har det, i kontrast till det amerikanska perspektivet, stundtals funnits en påtaglig vilja att samarbeta med de "nya rymdmakterna",



Figur 25: Rymdsystem är centrala för Kina om man t.ex. ska kunna hindra USA från att skydda Taiwan i händelse av en kinesisk invasion.

med vilket oftast avses Kina, Indien och Japan. Även om t.ex. EU-kommissionen i sin vitbok understryker att det längsta och viktigaste partnerskap Europa har på rymdområdet är det med USA, reser man vissa frågetecken kring detta och rekommenderar samtidigt EU att satsa på fördjupade relationer med Ryssland och Kina. Kina i synnerhet bedöms av kommissionen bli en *“major space player”*, som kommer att generera världens största efterfrågan på rymdtjänster av olika slag. Här ser man också, enligt vitboken, en orsak till att Kina nyligen anslutit sig till GALILEO-systemet (*White Paper Space: a new European frontier for an expanding Union – An action plan for implementing the European Space policy 2003*, ss.19f).

Slutsatser:

Rymden som säkerhetspolitisk arena

Av ovanstående korta genomgång kan man alltså dra slutsatsen, att rymden dels tenderar att bli en arena för säkerhetspolitisk maktkamp på traditionell, geopolitisk grund, dels också att rymden på grund av sina egenskaper och möjligheter genererar nya konfliktmönster, främst mellan de stater som är eller har ambitioner att bli militära stor- eller supermakter.

Det säger sig självt att dessa utvecklingar kan leda till negativa följder, inte bara för de stater som blir inblandade i eventuella framtida konflikter eller rustningsspiraler, utan

också för alla andra vars fredliga användande av rymden kan tänkas hotas vid sådana konflikter.

En eventuell sådan maktkamp i rymden mellan USA och Kina är förmodligen mer sannolik än en liknande mellan t.ex. USA och EU-länderna. Även om det, som noterats ovan, finns tydliga maktbalansorienterade tongångar i EU-kommissionens dokument kring rymdområdet, som dessutom har udden inriktad mot USA, är det långt ifrån säkert att en sådan politik blir EU:s. De flesta länder inom EU är ju redan militärt allierade med USA genom NATO, varför en fullskalig rymdmilitär maktbalanssatsning mot USA torde vara ett mycket långsökt scenario för EU i sin helhet. De senaste överenskommelserna om GALILEO-systemet och det hittillsvarande djupa och långvariga samarbetsförhållandet mellan de europeiska och amerikanska rymdmyndigheterna ESA och NASA bidrar också till att göra bilden ljusare ur samarbetssynpunkt. Det faktum att USA satsar så mycket mer resurser på militär rymdanvändning än EU-länderna, kan ytligt sett ge incitament till maktbalansorienterade strömningar. Mer troligt är dock att EU:s medlemsländer – i synnerhet den stora majoritet av dessa som också är NATO-medlemmar – genom samarbete kommer att försöka dra nytta av relationerna till USA snarare än att satsa på att “komma ikapp” landet på rymdområdet.

För svenskt vidkommande, som militärt icke-allierad EU-medlem, är ett starkare europeiskt rymdsamarbete inom t.ex. ett till EU närmare knutet ESA en önskvärd utveckling. Samtidigt understryker svensk politik alltid också vikten av att ett negativt maktbalansförhållande mellan USA och EU inte utvecklas, vilket logiskt torde innebära att en sådan starkare europeisk rymdförmåga bör byggas upp i samarbete, och inte maktkamp, med USA. Sverige är emellertid inte ensamt inom EU och även om det svenska rymdprogrammet är ovanligt starkt för ett land av Sveriges storlek, behöver inte vår röst väga tyngst. Det finns alltså all anledning att följa utvecklingen av den europeiska rymdkapaciteten noga. Vad gäller övriga möjliga konfliktområden, som t.ex. relationer USA-Kina, kan inte Sverige antas ha något större inflytande. Givet det faktum att Kina i hög grad är beroende av utländsk teknologi har dock EU som helhet möjligen en viss potential att påverka landet.

Kärnvapen

Ballistiska robotar med kärnvapen har sedan 1960 varit det viktigaste strategiska vapnet och trots de ändrade säkerhetspolitiska förhållandena kommer de att fortsätta att vara det under överskådlig tid. Ballistiska robotar med kärnvapen finns idag i åtminstone USA, Ryssland, Storbritannien, Frankrike, Kina och Israel. Ytterligare länder som Nordkorea, Indien, Pakistan och Iran driver utveckling av såväl kärnvapen som ballistiska robotar.

En nyckel teknik, som skiljer ballistiska robotar från andra rymdsystem, utgörs av själva stridsdelarna, *reentry vehicles*, som skall återinträda i atmosfären och träffa sina mål med god precision, se figurerna 26 och 27. För interkontinentala ballistiska robotar sker återinträdet i en

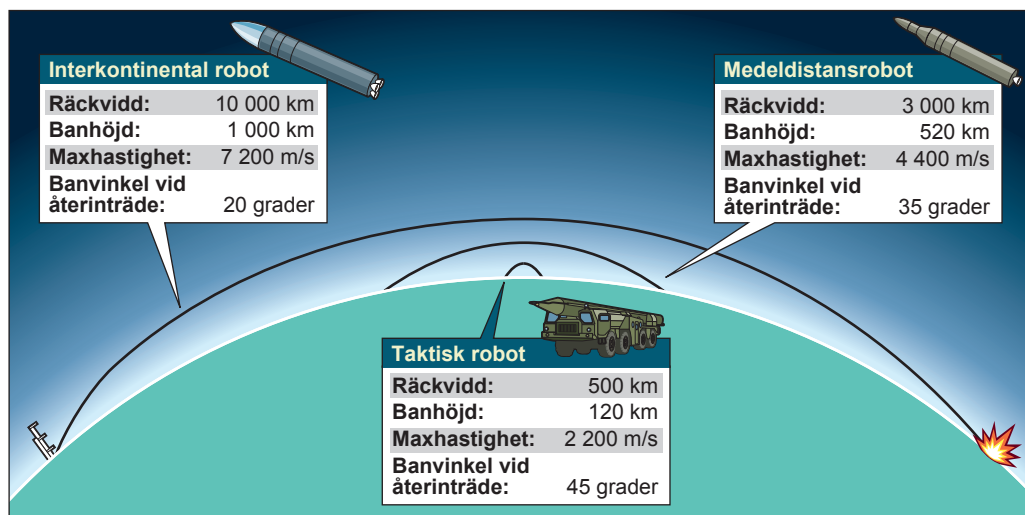
mycket flack vinkel, vilket innebär att stridsdelarna bromsas och påverkas av atmosfärstörningar under lång tid. Detta gör återinträdet komplicerat. För utformningen av stridsdelen finns två alternativ: att göra den rund och med stort luftmotstånd så att den bromsas kraftigt eller att göra den spetsig. Aerodynamiken gör att en stötvåg bildas en bit framför en rund stridsdel och att det räcker med relativt enkla lösningar för att skydda den från värmen; här kan man jämföra med den runda bottenplattan med värmeskölden på Apollokapseln. Att den runda stridsdelen passerar genom atmosfären med låg hastighet och därmed utsätter sig för vindstörningar under lång tid gör dock att precisionen blir dålig med bomavstånd på flera kilometer.

En spetsig stridsdel får en stötvåg på nosen, som värms upp till omkring 10 000 grader, vilket ställer krav på extrema material. Mycket höga krav ställs också på symmetri, eftersom stridsdelen annars kan börja svänga eller till och med tumla.

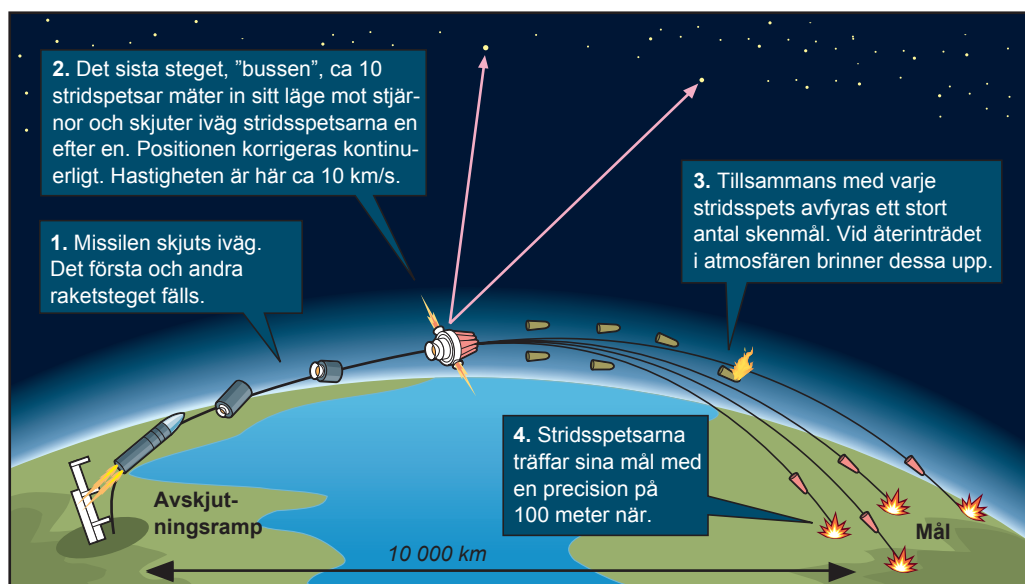
Missilförsvar

Missilförsvar utvecklades tidigt av såväl USA som Sovjet och började provas under 1960-talet. 1972 ingick USA och Sovjet det så kallade ABM-avtalet som begränsade utveckling och utplacering av missilförsvar. Planerna på missilförsvar, eller "stjärnornas krig", kom sedan att utgöra en viktig del av avslutningen av det kalla kriget.

Den irakiska användningen av Scud under Gulfkriget och Nordkoreas utveckling av såväl kärnvapen som ballistiska



Figur 26: Banhöjd för olika räckvidd på ballistiska robotar.



Figur 27: Avancerade ballistiska robotar kan leverera sina stridsdelar med en närmast häpnadsväckande precision.

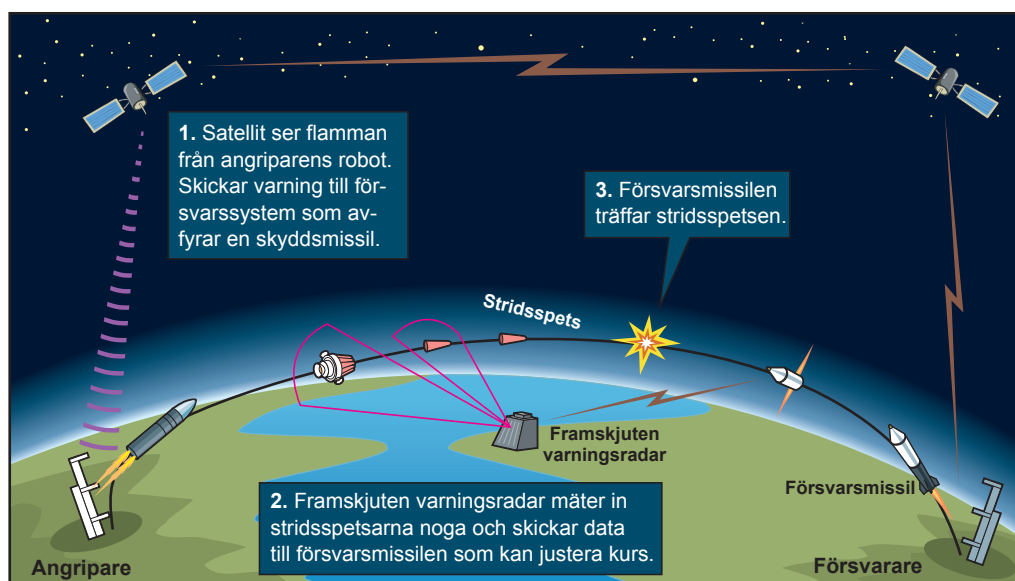
robotar utgör de främsta motiven till att USA lägger ned stora resurser, närmare 10 miljarder dollar per år, på att utveckla olika system för skydd mot ballistiska robotar. Idag har USA ett mycket begränsat försvar mot taktiska ballistiska robotar i form av Patriot PAC 3, som har räckvidd och höjdtäckning

om 15 km. Luftvärnsroboten THAAD utvecklas för att bli arméns huvudsakliga försvar mot ballistiska robotar. THAAD använder en IR-målsökare för att träffa anfallande ballistiska robotar på höjder uppemot 150 km. THAAD kommer att tas i tjänst omkring 2007.

Den flygande lasern ABL,

AirBorne Laser, som är en jumbojet utrustad med en mycket kraftig laser, skall kunna bränna sönder raketmotorn på startande ballistiska robotar på några hundratal kilometers avstånd. Sju flygplan skall enligt planerna vara i tjänst 2008.

De markbaserade robotarna, som skall skydda USA



Figur 28: Missilförsvarets princip.

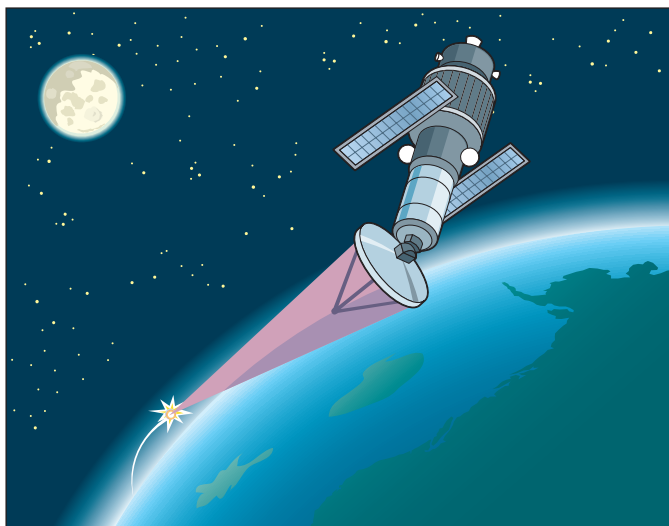
mot begränsade angrepp med interkontinentala robotar, har börjat utplaceras i Alaska. Robotarna har stridsdelar med IR-målsökare, som skall träffa stridsdelarna från de ballistiska robotarna högt uppe i banan. Att det inte är alldeles enkelt att uppnå en direktträff inses ganska snart, eftersom det handlar om att få två meterstora föremål som båda två rör sig med ungefär 5 000 m/s att kollidera.

Den amerikanska flottan deltar också i försvaret mot ballistiska robotar. Några Aegis-kryssare förses med en ny version av luftvärnsroboten Standard (SM-3), som har en räckvidd av 500 km och en höjdtäckning på närmare 200 km. Det är intressant att notera att denna robot, som kommer att utgöra en viktig del av det kanske mest avancerade försvarssystemet hittills, inte är något annat än en vidareutveckling av flottans första luftvärnsrobot, Terrier, som togs i tjänst 1956.

Anti-satellitvapen

Anti-satellitvapen började utvecklas på 1950-talet och det första försöket med en anti-satellitrobot genomfördes av USA 1962. Såväl USA som Sovjet utvecklade olika typer av anti-satellitvapen, men inget system togs i tjänst. För närvarande är det antagligen bara USA som bedriver utveckling av anti-satellitvapen.

Anti-satellitvapen kan verkansmässigt basera sig på kinetisk energi eller på elektromagnetisk strålning. Robotar som verkar med kinetisk energi förses oftast med en verkansdel bestående



Figur 29: Laserkanon i rymden verkar mot andra satelliter.

av utfällbara stänger och styrs så att de får en direktträff med satelliten. Strålvapen, företrädesvis högenergilaser, kan baseras på marken, på flygplan eller i rymden. Även kärnvapen verkar genom elektromagnetisk strålning, där värmestrålningen dominerar på korta avstånd och den elektromagnetiska pulsen (EMP) på längre avstånd. En satellit som skjuts sönder i sin omloppsbana störtar inte till marken utan satelliten, eventuellt uppdelad i flera delar, fortsätter att kretsa runt jorden som rymdskräp.

Vapen i rymden

Tankarna på att placera vapen, och då speciellt kärnvapen, i rymden föddes tidigt. Strävan har dock hittills varit att hålla rymden fri från vapen. Framförallt i USA pågår för närvarande diskussioner om att placera markmålsvapen i rymden. USA:s ledande roll i detta sammanhang framgår kanske bäst av att endast USA, Israel och Mikronesien röstade

emot en FN-resolution för att stoppa rustning i rymden i november 2000. Högenergilaser eller konventionella vapen skulle kunna användas mot markmål och insatser skulle kunna göras globalt inom någon minut från insatsbeslut.



Figur 30: Anti-satellitvapnet "flugsmällan" smyger på en intet ont anande satellit.

Rymdteknik

Rymdsystem brukar generellt delas in i tre delar:

- rymdsegment
- marksegment
- användarsegment

Rymdsegmentet omfattar satelliterna, d.v.s. de delar av systemet som finns i rymden. Marksegmentet, också kallat kontrollsegmentet, omfattar det som behövs för kontroll och styrning av satelliterna och hela systemets funktion. Användarsegmentet omfattar de delar av systemet som använder sig av systemet och dess tjänster.

I det här kapitlet beskriver vi först uppskjutning av satelliter och därefter hur satelliterna rör sig i rymden, d.v.s. satellitbanorna. Efter det kommer ett avsnitt om hur miljön i rymden påverkar satelliterna. Marksegmentet tas kort upp, därefter beskrivs hur satellitplattformen är uppbyggd för att stödja nyttolasten. Kapitlet avslutas med en kort framtidssyn. I nästa kapitel ges en beskrivning av hur de olika nyttolasterna fungerar. Där beskriver vi framförallt de typer av nyttolaster som är av militärt intresse.

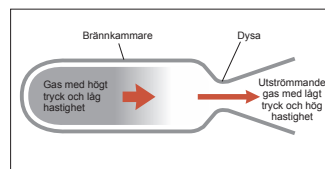
Uppskjutningssystem

För att nå upp i rymden krävs mycket energi. Om ett föremål helt skall lämna jordens gravitationsfält måste det skjutas i väg med en hastighet av 11 km/s, medan ett föremål måste ha en hastighet av omkring 8 km/s

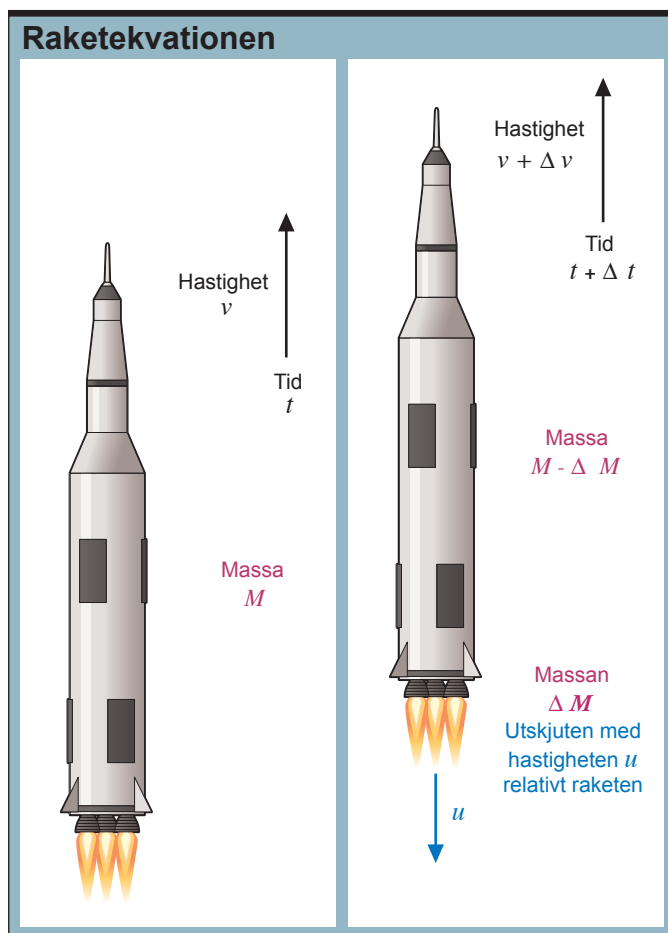
för att nå en omloppsbana runt jorden. Att nå 100 km höjd, som nyligen gjordes av den privata *SpaceShipOne*, kräver dock bara 3–4 % av den energi som behövs för att nå omloppsbana.

Det enda sättet att nå så höga hastigheter har varit att använda sig av raketer. En raket ger drivkraft genom att förbränna det medförda bränslet och slunga ut avgaserna med

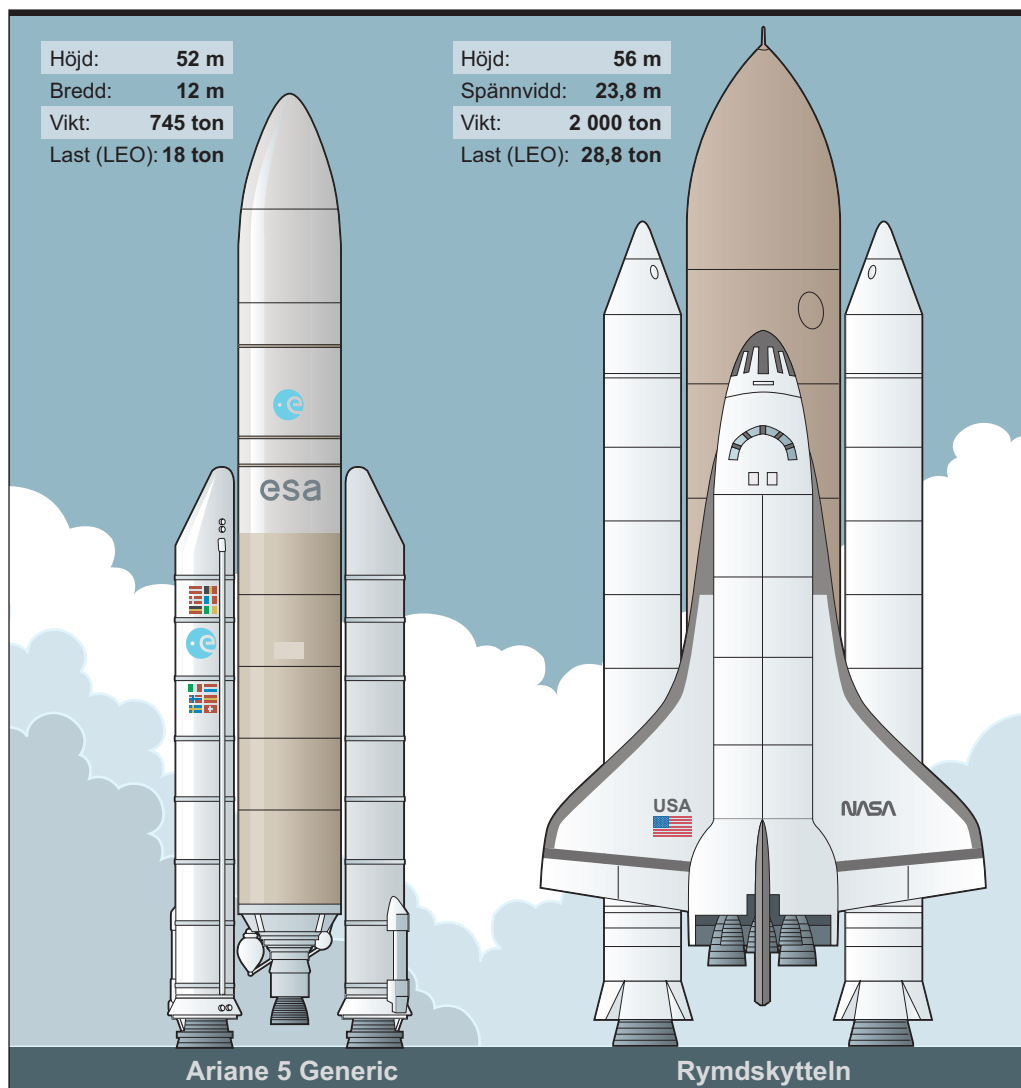
hög hastighet bakåt, se figur 31 samt 32. Kineserna uppfann svartkrut före Kristi födelse och anses ha börjat med raketer på 600-talet. Själva ordet "raket" kommer från Italien där ordet "rochetta" på 1300-talet började



Figur 32: Dysan där förbränning sker och avgaser slungas ut.



Figur 31: Principen för framdrivning av raket.



Figur 33: En kort jämförelse mellan rymdfärjan och Ariane.

användas för krutdrivna pilar.

Den specifika impulsen är ett mått på hur effektivt ett raketdrivämne är. Den definieras som $I_{sp} = F / q = U$, där F är dragkraften (N), q massflödet (kg/s) och U utströmningshastigheten (m/s). Den specifika impulsen mäts i Ns/kg.

För att raketen skall vara

så effektiv som möjligt skall den dels ha en låg slutlig vikt, dels ha en hög hastighet på den utströmmande massan. En låg slutlig vikt åstadkoms dels genom att raketens struktur görs så lätt som möjligt, dels genom att den delas in i steg och de delar av raketens som inte längre behövs släpps successivt.

Det finns två olika typer av raketmotorer: med flytande

eller fast drivämne. Flytande drivämne ger mer energi och har en högre specifik impuls, men har också påtagliga nackdelar. Flytande väte och syre, som används i huvudmotorn såväl till rymdfärjan som till Ariane 5, ger en mycket hög specifik impuls, 4500 Ns/kg, och är miljövänligt, eftersom förbränningsprodukten är vatten. Flytande syre och väte kräver dock nedkylning till

låga temperaturer och tar också upp en stor volym. Olyckan med Columbia 2003 orsakades av att ett stycke skumplast som används som isolering på den stora bränsletanken lossnade och slog i rymdfärjans vinge.

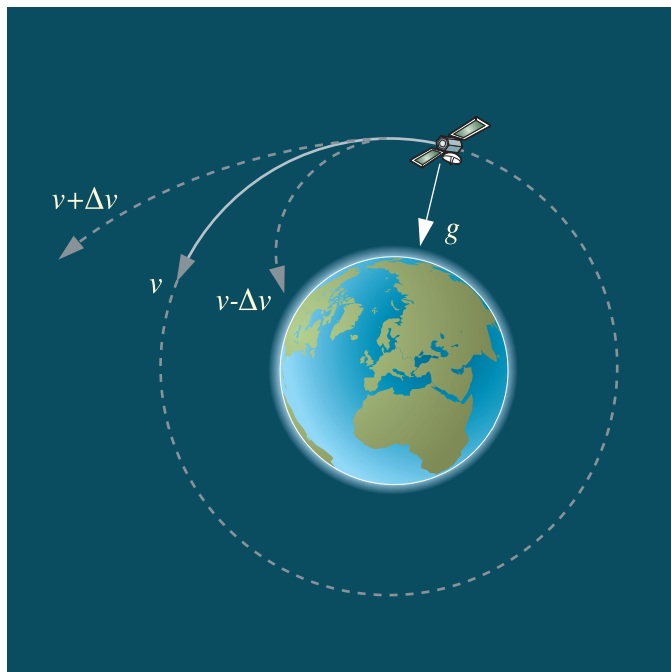
Andra typer av flytande drivämne är flytande syre och fotogen, som användes i Saturn-raketens första steg samt i många ballistiska robotar och som har en specifik impuls av 3500 Ns/kg. Fotogen kräver inte kylning och tar inte alls lika stor plats som flytande väte, vilket ger mer kompakta raketer.

En annan nackdel med raketmotorer med flytande drivämne är att det krävs avancerade pumpar och regelsystem för att pumpa in vätskorna i brännkammaren och se till att de blandas på ett lämpligt sätt.

Raketmotorer med fast drivämne har lägre specifik impuls, omkring 2500 Ns/kg, men har flera fördelar. De tål lagring och ställer inga krav på nedkylning. Det fasta drivämnets påminner om gummi och gjuts på plats i motorhysan. Kraven på precision i tillverkningen är emellertid stora, eftersom sprickor i motorn kan göra att den exploderar.

Satellitbanor

Satelliter kan endast gå i vissa bestämda banor. Gemensamt för dessa banor är att det inte krävs någon energi för att driva fram satelliterna utan de faller fritt, men på grund av den hastighet satelliterna har "missar de marken" hela tiden, se figur 34.



Figur 34: Satelliten måste ha en viss hastighet för att den ska hålla sig i en speciell bana.

Dessa satellitbanor beskrivs av Keplers tre lagar, uppkallade efter astronomen Johannes Kepler (1571–1630). Det var egentligen lagar för planeternas rörelser men det är samma lagar som beskriver satelliternas rörelser. Isaac Newtons (1642–1727) upptäckter visade att orsaken till att satelliterna rör sig i enlighet med dessa lagar är gravitationskraften – i dagligt tal kallat tyngdkraften. För satelliter kring jorden är det jordens gravitationskraft som nästan helt ensamt bestämmer banrörelsen.

Keplers första lag säger att en planet/måne/satellit går i en elliptisk bana i ett banplan som skär centralkroppens, t.ex. jordens, 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, bestäms av hur uppskjutningen sker och hur styrraketerna placerar satelliten i sin bana. När satelliten väl är i sin bana kan excentriciteten ändras genom att raketer på satelliten bränns av på lämpligt sätt.

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.

Den tredje av Keplers lagar säger att planeten/månen/satelliten måste gå fortare om

den går i en låg bana och långsammare i en bana på högre höjd, d.v.s. 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, och på detta avstånd finns de geostationära satelliterna. 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 jorden har när den roterar kring sin axel.

Banelement

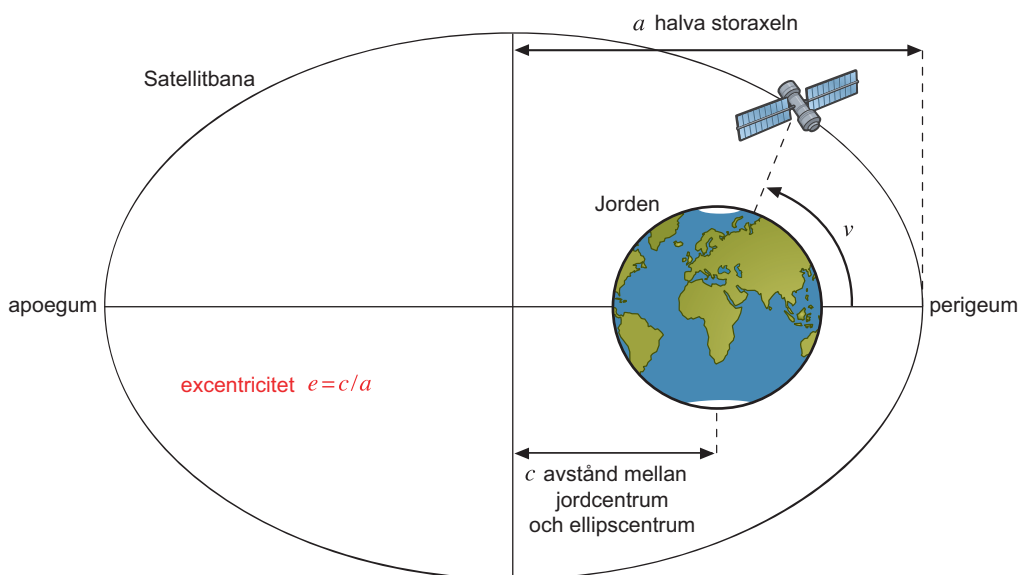
Det finns sex banelement för en satellit, också kallade Keplers element, som bestämmer storlek, form, och orientering av satellitbanan samt satellitens position i banan vid en given tidpunkt. Två element bestämmer kretsbanans

storlek och form, ellipsens halva storaxel a och excentriciteten e , se figur 35. 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. I övriga fall är den en ellips, om inte $c=a$ (d.v.s. $e=1$) för då är banan en parabel. Värdet på halva storaxeln bestämmer dessutom satellitens omloppstid.

För att avgöra var i rymden banplanet för satelliten ligger, används parametrarna inklination i , rektascension Ω och perigeumsargument ω (eller w) (se figur 36). Inklination i är vinkeln mellan banplanet och jordens ekvatorsplan. Rektascension Ω är en vinkel längs med jordens ekvatorsplan mätt österut från den s.k. vårdagjämningpunkten, som är den skärningspunkt mellan himmelsekvatorn och ekliptikan där solen går från södra him-

melshalvan till den norra, till satellitbanans uppstigande nod, som är den punkt i satellitbanan där satelliten passerar genom ekvatorsplanet från söder mot norr. 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 används begreppet *sann anomal*i, betecknat v . Detta är vinkeln mellan excentricitetsvektorn, d.v.s. linjen mellan jordens centrum och perigeum, och vektorn som definierar satellitens position, se figur 35.

Satellitbanor kan delas in i fyra typer: LEO, MEO, HEO och GEO. Detta är inte det enda tänkbara sättet att göra en indelning, men det är en i litteraturen vanligen förekommande indelning.



Figur 35: Definition av halva storaxeln a , excentriciteten e och den sanna anomalin v .

LEO-banor

Beteckningen LEO, *Low Earth Orbit*, används för satellitbanor på låga höjder från ca 200 upp till ca 5 000 km. I figur 37 är en LEO-bana markerad med rött. Användningsområdena för dessa banor omfattar bland

annat fjärranalyssatelliter, forskningssatelliter (för utforskning av atmosfären och den nära rymden samt för astronomisk forskning) och vissa satellitsystem för kommunikation.

Satellitbanor som går rakt

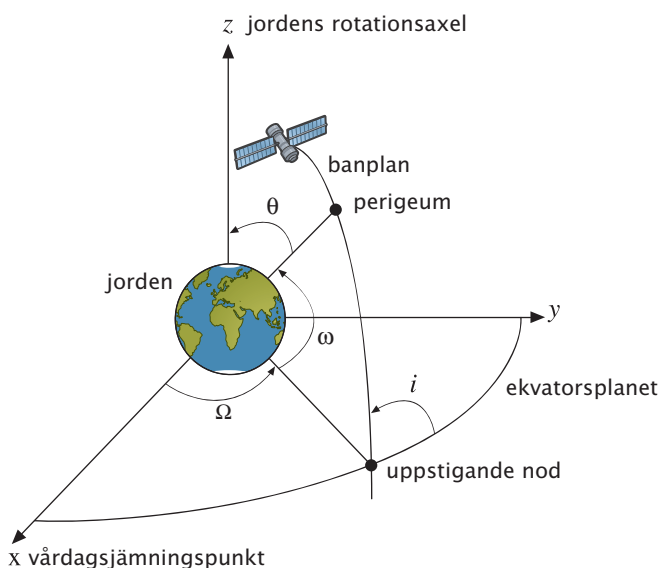
eller nästan rakt över jordens poler kallas för polära banor. Ett specialfall är de s.k. solsynkrona banorna som är banor med en inklination över 90 grader, vanligtvis kring 98 grader. Normalt sett är en satellits banplan fixt i förhållande till stjärnorna. Finessen med solsynkrona banor är att satellitens banplan roterar ett varv kring solen på ett år. De solsynkrona satelliterna passerar alltid en och samma ort, d.v.s. samma latitud, på samma lokala soltid.

MEO-banor

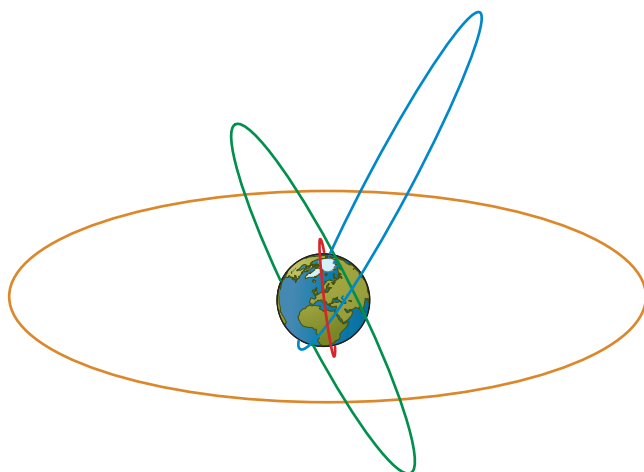
Satellitbanor på höjder mellan LEO och GEO benämns på engelska ofta för MEO, *Medium Earth Orbit*. Detta är vanligen cirkulära satellitbanor, företrädesvis inom höjddintervallet 10 000–20 000 km, men de kan sträcka sig från 5 000 till 35 000 km. Till användningsområdet för denna typ av banor hör moderna navigeringssystem, som det amerikanska GPS och det ryska GLONASS. Det kommande europeiska navigationssystemet GALILEO kommer också att använda MEO-banor. I figur 37 ges ett exempel på en bana för en satellit i ett navigationssystem i grönt.

HEO-banor

Satellitbanor som är extremt elliptiska brukar på engelska betecknas HEO¹, *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



Figur 36: Parametrar som bestämmer satellitbanans orientering i rymden.



Figur 37: 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.

¹HEO står ibland för *High Earth Orbit*, d.v.s. banor utanför GEO. Vi har här valt att använda HEO i betydelsen starkt elliptiska banor för att dessa speciella typer av banor är värda ett eget fack.

att använda cirkulära banor. Tidigare användes elliptiska banor för spaningssatelliter. Excentriciteten var dock inte så stor att de brukade benämnas HEO.

Molniya-banan är en starkt elliptisk bana med en perigeumhöjd på ca 500 km och en apogeumhöjd på ca 40 000 km. Inklinationen är ca 63 grader, se figur 37, blå ellips. Det speciella med inklinationen 63 grader är att den högsta punkten inte roterar runt jorden som den gör vid andra inklinationer. Omloppstiden för en satellit i Molniya-banan är ca 12 h och av dessa kan ca 8 h användas för t.ex. kommunikation eller förvarning över exempelvis norra halvklotet. Med tre satelliter kan kontinuerlig täckning fås över t.ex. det norra halvklotet. Fördelar är bland annat hög elevationsvinkel, medan nackdelar är bland annat icke-stationariteten samt lång varierande tidsfördröjning.

GEO-banan

Beteckningen GEO, *Geostationary Earth Orbit* eller geostationär bana, används för den geostationära banan som ligger ca 35 800 km ovanför ekvatorn, se figur 37 orange cirkel.

Satelliter i den geostationära banan kan täcka in nästan halva jordklotet. Tre satelliter brukar användas för att täcka in hela jorden, förutom polarområdena. Fördelar med GEO-banan är bland annat stationariteten, medan nackdelar bland annat är det långa avståndet, som

rakt ovanför ekvatorn är ca 35 800 km över ekvatorn och ca 40 000 km från Sverige, med bland annat 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 medan resten är utlandsägt, är exempel på kommersiella satelliter för TV- och dataöverföring i GEO.

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*.

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 det tar för jorden att rotera ett varv kring sin axel, d.v.s. ett dygn, kallas på engelska för *geosynchronous orbit* (geosynkron bana, GSO). Det kan t.ex. vara cirkulära banor på samma banhöjd som de geostationära satelliterna men

med en inklination skild från noll, d.v.s. satelliten behöver inte ligga i ekvatorsplanet.



Figur 38: Satellitens banspår som en linje på jordytan.

Banspår

Under en satellits rotation runt jorden passerar den över olika områden på jorden (geostationära satelliter undantaget) eftersom jorden roterar kring sin rotationsaxel samtidigt som satelliten far runt jorden. Satellitens passage över jordytan kan ritas upp som en linje på jordytan.

Linjen markerar lägena rakt under satelliten. Denna linje kallas markspår eller banspår, se figur 38, figur 39 och figur 40. Beroende på satellitbanan, t.ex. banhöjd, omloppstid och excentricitet, ser ett sådant markspår olika ut. Dessutom kan ett sådant markspår ritas ut för en längre eller kortare tid.

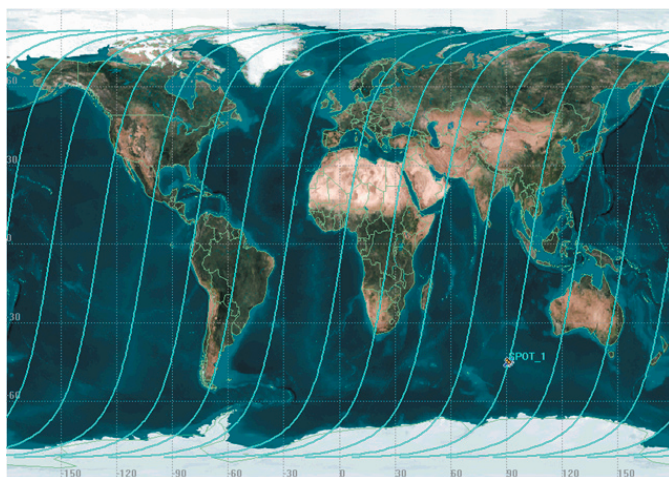


Figure 39: Markspår under ett dygn för SPOT 1. Endast dagpassager visas. Satelliten rör sig i det här fallet från norr till söder; nattpassagera går åt andra hållet. Satelliten gör 14,2 varv per dygn runt jorden vilket man kan se av de 14 markspåren i figuren. (Bilden är genererad genom programvara från Analytical Graphics, Inc.)

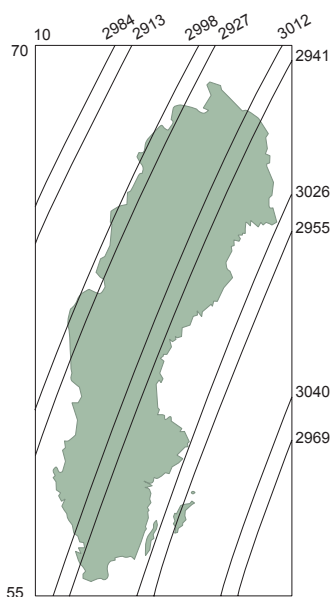


Figure 40: Tio dygns markspår (enbart dagpassager) av SPOT 1 över Sverige och dess närhet. Skillnaden mellan två grupper av parvisa markspår är ett dygn och skillnaden mellan de två markspåren i ett par är fem dygn.

Rymdmiljön och dess påverkan på satelliter

Rymden är allt annat än tom. Trots att rymden i stora drag kan karaktäriseras som ett bra vakuum, d.v.s. det finns nästan inga atomer eller molekyler, finns där strukturer och processer som påverkar i stort sett all rymdverksamhet. Figur 41 ger en schematisk bild över hur man benämner olika områden i rymden och atmosfären.

Jonosfären

Närmast jordytan utgörs atmosfären av den gasblandning som vi benämner luft, och som består av i huvudsak kväve och syre. Luften blir tunnare med ökande höjd över jordytan och på höjder över cirka 100 km kommer även dess sammansättning att förändras för att så småningom i stort utgöras av

vätgas. Strålning från solen, med våglängder i ultraviolett- och röntgenområdena, kommer när den tränger ned i atmosfären att jonisera elektriskt neutrala atomer och molekyler till elektron-jon-par, s.k. jonisering. Samtidigt som den nedträngande strålningen därmed absorberas kommer den att möta en, med inträngningsdjupet, allt tätare atmosfär. Detta innebär att jonisationen kommer att få ett maximum i den övre atmosfären. Elektroner och joner återförenas till neutrala atomer eller molekyler genom något som brukar kallas rekombination. Samverkan mellan rekombination och jonisation resulterar i en blandning av elektriskt neutral gas, joner och elektroner. Denna blandning får ett elektrontäthetsmaximum, d.v.s. ett maximum av antalet elektroner per volymenhet, i ett område i den övre delen av atmosfären. Jonisationsgraden, d.v.s. den utsträckning i vilken den

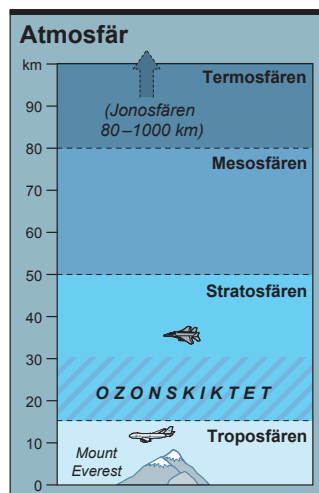


Figure 41: Atmosfären och rymdmiljön.

neutrala gasen har joniserats, beror bland annat på solens höjd över horisonten och variationer i solaktiviteten.

Som definition av jonosfären använder man ibland det faktum att jonosfären är den del av den övre atmosfären som förmår påverka utbredningen av radiovågor i kortvågsbandet. Radiovågutbredning i ett plasma, en blandning av joner och elektroner, är möjlig bara om radiovågens frekvens är högre än den så kallade plasmafrekvensen. Plasmafrekvensen beror på elektrontätheten. Eftersom elektrontätheten har ett maximum i jonosfären kommer även plasmafrekvensen att ha ett maximum i jonosfären. Frekvenser lägre än den maximala plasmafrekvensen kommer att reflekteras i jonosfären. Detta möjliggör kommunikation över långa avstånd genom att radiovågor i kortvågsområdet kan "studsa" i jonosfären och därmed nå bortom horisonten. Dygns-

variationer i elektrontäthet innebär att även den högsta användbara frekvensen för kortvågskommunikation varierar över dygnet.

Rymdväder och dess inverkan på jorden

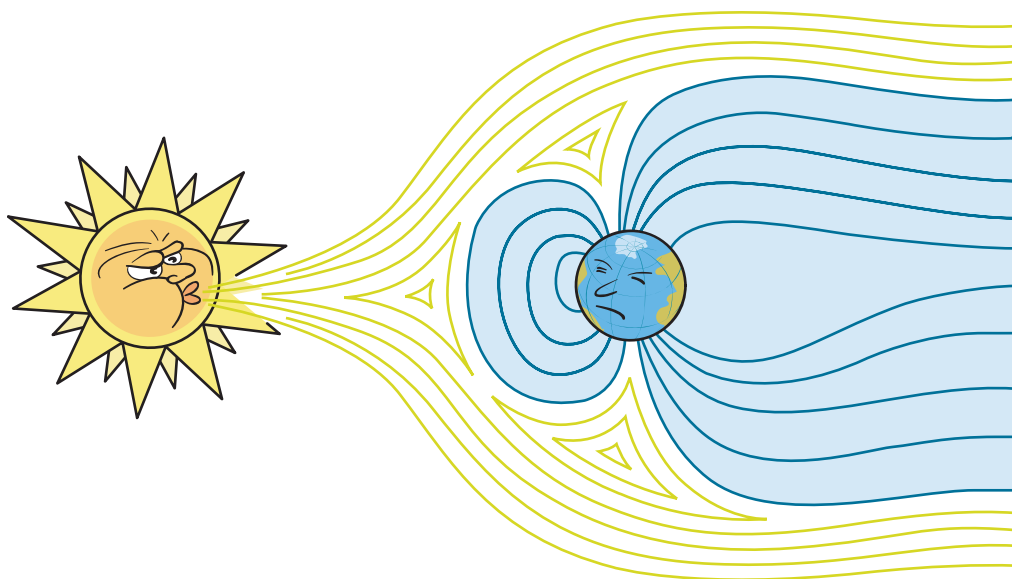
Utanför jonosfären, på höjder över ungefär 1000 km, består de resterande delarna av atmosfären till övervägande del av helt joniserad vätgas. De laddade partiklarnas rörelser domineras i detta område helt av jordens magnetfält och området benämns följaktligen magnetosfären.

Solen har också ett magnetfält. Den materia som ständigt kastas ut från solen, solvinden, utgörs av laddade partiklar som drar med sig solens magnetfält ut i den interplanetära rymden. Där solvinden når jorden tvingas den, och det i solvinden "infrusna" magnetfältet, att

passera runt magnetosfären, liksom strömmande vatten runt en sten. På uppströmssidan, dagsidan, bildas en bogvåg och på nedströmssidan, nattsidan, kommer jordens magnetfält att dras ut till en lång svans. En schematisk illustration kan ses i figur 42.

Gränsytan mellan magnetosfären och solvinden benämns magnetopausen. De elektriska strömssystem som drivs av solvinden genererar i sin tur magnetfält som överlagras på det magnetfält som jorden själv genererar. Det faktiska magnetfält som mäts upp på jordytan är därför en summa av jordens magnetfält och magnetfält genererade av strömmar i jordens omgivning.

Kopplingen mellan solvinden och magnetosfären beror på den magnetiska topologin, d.v.s. hur solvindens magnetfält är orienterat i förhållande till jordens magnetfält. I de delar av



Figur 42: Solvindens inverkan på jordens magnetfält.

magnetopausen där solvindens och magnetosfärens magnetfält är antiparallella, d.v.s. motriktade, finns förutsättningarna för ett ökat inflöde av partiklar och magnetisk energi från solvinden till magnetosfären. Det finns alltid någon del av magnetopausen där magnetfälten är antiparallella. Förutsättningarna för växelverkan mellan solvinden och magnetosfären är dock som störst när solvindens magnetfält på dagsidan, den sidan som är vänd mot solen, är antiparallellt med magnetosfärens magnetfält. I det fallet kan överföring av energi från solvinden till magnetosfären ske över en yta på dagsidan.

Variationer i solvindens intensitet förekommer, ofta i samband med koronamassutkastningar, *coronal mass ejections*, där en klump plasma, joniserad gas, med tillhörande magnetfält kastas ut från heliosfären. När en förstärkt solvind är dels sådan att den kommer på kollisionkurs med jorden, dels sådan att dess magnetfält är antiparallellt med magnetosfärens på dagsidan finns alla förutsättningar för en av de mer spektakulära formerna av rymdväder - en geomagnetisk storm.

Historiskt sett har geomagnetiska stormar detekterats genom förändringar av den horisontella komponenten av jordmagnetfältet, H , uppmätt på jordytan, H_p , där H är den magnetiska fältstyrkan. Ett index, Dst eller *disturbance storm time*, konstruerat från en sammanvägning av H_p uppmätt på olika platser, fungerar som ett mått för stormar.

En geomagnetisk storm

börjar i allmänhet med en plötslig ökning av H_p . Efter denna inledande fas vidtar den flera timmar långa huvudfasen med ett starkt reducerat H_p , tidvis av storleksordningen 1% minskning.

Underslutfasen, som vanligtvis sträcker sig över flera dagar, återgår H_p till normal styrka. De strömmar i magnetosfären som är källan till dessa ändringar i H har sitt ursprung i partiklar som kommit in i magnetosfären från solvinden. Transporten av energi från solvinden till magnetosfären sker ofta via den del av magnetosfären som på nattsidan av solvinden dragits ut till en svansliknande form. Under så kallade substormar sker en kortslutning i svansen, vilken startar den injektion av partiklar och energi som i förlängningen deponeras i jonosfären, bland annat i form av norrsken. Det detaljerade förloppet för kopplingen mellan solvinden och magnetosfären utgör ett aktivt forskningsområde och långt ifrån alla detaljer är ännu klarlagda.

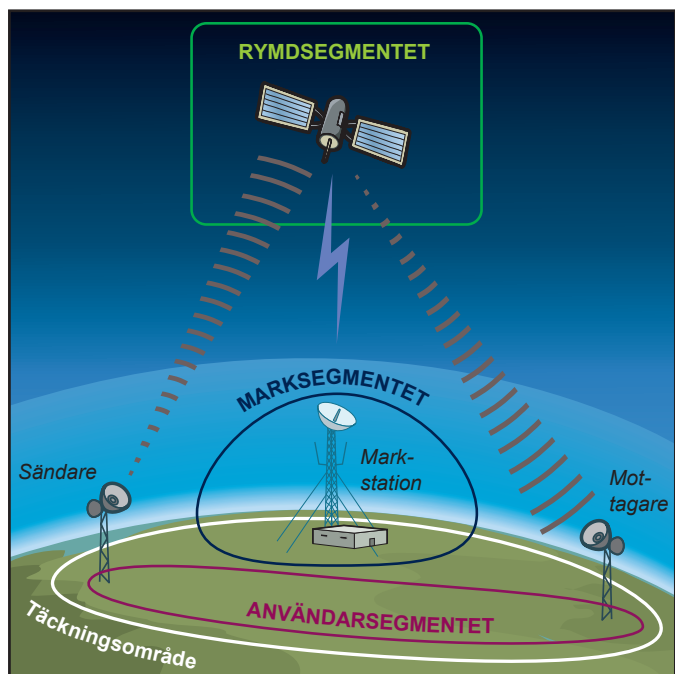
De partikelflöden och strömmar som förstärks vid geomagnetiska stormar ger upphov till förhöjda strålningsnivåer för satellitsystem i omloppsbana runt jorden, vilket kan leda till skador eller förhöjt slitage. Vidare kan radiokommunikation via jonosfären störas. Även signaler mellan satelliter och jordytan, t.ex. från GPS-satelliter, kan påverkas av rymdvädret. Fluktuationerna i magnetfält på jordytan kan inducera strömmar i kraftledningssystem vilket leder till ökad påfrestning på bland annat transformatorer och i särskilt svåra fall kan strömbrott inträffa.

Marksegmentet

Marksegmentet stödjer rymdsegmentet och för insamlad data och information vidare till slutanvändaren. Marksegmentet består av en eller flera markstationer och kontrollcentraler. Generellt får kontrollcentralen in önskemål från slutanvändaren som sedan skickas vidare som kommando från markstationen till satelliten. Figur 43 illustrerar relationen mellan rymdsegmentet, marksegmentet och användarsegmentet. Slut-användaren skickar aldrig på egen hand kommandon direkt till satelliten, med undantag för kommunikationssatelliter, på grund av satellitens känslighet. Kontrollcentralen har tre viktiga uppgifter: att övervaka och styra rymdfarkostens plattform samt dess delsystem; att analysera data från nyttolasten och även skicka kommando till instrumenten och sensorerna; samt att planera och hantera hela satellituppdraget.

Vid utformning av marksegmentet finns det flera punkter att ta hänsyn till, såsom:

- Markstationens läge som väljs utifrån satellitens täckning och slutanvändarens behov. Detta balanseras sedan mot kostnad, tillgänglighet och tillgång på kommunikation.
- Datahastighet på nedlänk och upplänk.
- Krav på datahantering, d.v.s. var skall datahanteringen ske och vilken utrustning måste finnas tillgänglig (hårdvara, mjukvara m.m.)
- Lämplig kommunikation



Figur 43: Relationen mellan rymdsegmentet, marksegmentet och användarsegmentet.

mellan marksegmentets olika delar och slutanvändaren. Det är t.ex. viktigt att se till att bandbredden är tillräcklig för den önskade dataöverföringen.

Det är viktigt att komma ihåg att marksegmentet inte bara utgörs av hårdvara och mjukvara, utan en annan viktig komponent är bemanning av marksegmentet. Ett exempel på hur bemanningen kan se ut är en platschef eller liknande, skiftarbetande operatörer under 24 timmar sju dagar i veckan, hårdvaruexperter, mjukvaruexperter, data- och ingenjörstöd för planering, administratörer, specialister för analys av satellitens delsystem och ibland forskare för analys av data från nyttolasten. Allt som allt blir det ett par hundra personer beroende på satellituppdrag.

Rymdsegmentet

Satelliten och dess beståndsdelar kallas inom rymdkretsar "rymdsegmentet". Rymdsegmentet kan ses som två delar: nyttolasten och satellitens plattform. Nyttolasten är t.ex. transpondrar, sensorer, instrument och vapen; d.v.s. det är lasten som skall utföra satellitens uppdrag. Satellitens plattform och dess delsystem är vad som behövs för att nyttolasten skall kunna utföra sitt uppdrag. Plattformens delsystem skall se till att:

- Nyttolasten riktas i rätt riktning
- Nyttolasten är manövrerbar
- Data från nyttolasten kan kommuniceras ned till markstationen
- Den önskade banan för satelliten bibehålls

- Nyttolasten håller ihop och sitter stabilt på plattformen
- Nyttolasten fungerar och att den är driftsäker över en viss tidsperiod
- Det finns en energikälla för att möjliggöra ovanstående punkter

I kommande avsnitt redogörs kort för plattformens delsystem och de vanligaste förekommande nyttolasterna för militärt bruk. I figur 44 illustreras rymdsegmentet och dess delar.

Struktur och rörliga delar

Strukturen på satelliten skall fysiskt stötta alla andra delsystem och nyttolasten. Strukturen är också det som fäster satelliten på bärraket och därför bör den vara tillräckligt kraftig för att överleva accelerations- och vibrationsbelastningar vid uppskjutningen. Samtidigt bör strukturen vara så lätt och kompakt som möjligt eftersom låg vikt leder till lägre uppskjutningskostnader. Strukturen består av material som uppfyller krav på bland annat:

- Hållfasthet
- Styvhet
- Densitet (vikt)
- Termisk konduktivitet
- Termisk expansion
- Motstånd mot rost
- Kostnad
- Tjänbarhet (vilket kan hindra sprickbildning)
- Seghet (förmåga att stå emot att sprickor växer)
- Lätt att tillverka
- Lättillgängligt
- Lätthanterligt

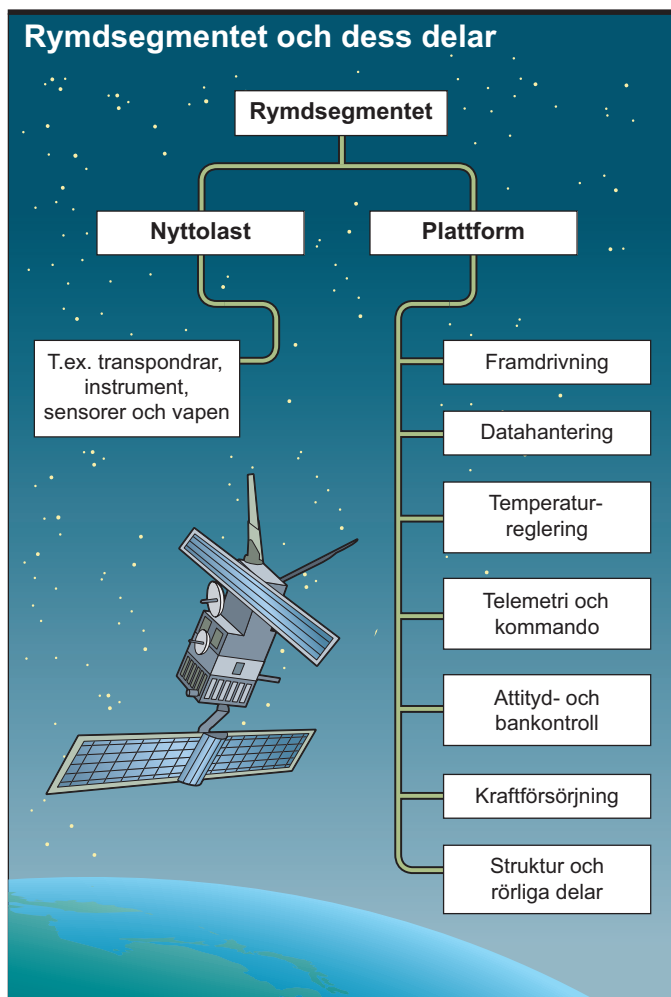
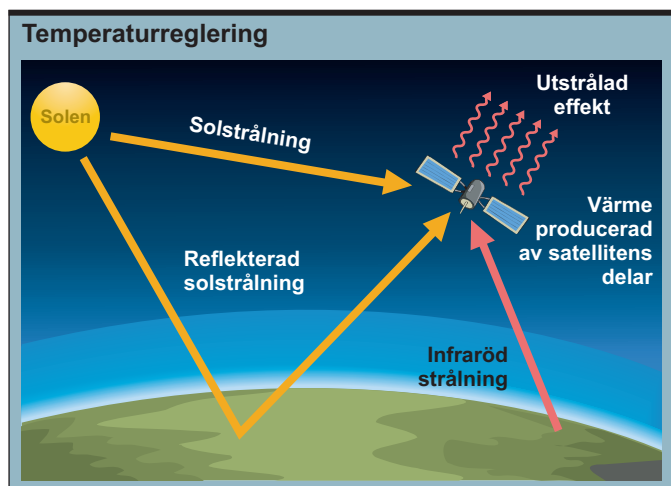


Figure 44: En skiss över rymdsegmentet och dess delar.



Figur 45: Temperaturkällor att ta hänsyn till för satelliters temperaturreglering.

Rörliga och utfällbara delar delas oftast in i två kategorier: mekanismer med leder som rör sig ofta eller som är i konstant rörelse och mekanismer som oftast bara rör sig en gång under ett satellituppdrag. Exempel på det förstnämnda är inriktning och baninmätning av antenner och solpaneler samt användning av moment- och reaktionshjul vid attitydkontroll. Exempel på rörelser som oftast bara sker en gång är utfällning av antenner och solpaneler samt separation mellan rymdfarkost och bärraket. Rörliga delar är alltid känsligare än fasta och kan lätt orsaka fel; därför väljer man att hellre ha fasta än rörliga delar på satelliten. Vissa rörliga funktioner är ändå väldigt viktiga för satelliten, t.ex. utfällning av solpanelerna; om detta inte fungerar som det ska kan hela satellituppdraget misslyckas.

Temperaturreglering

Syftet med ett temperaturregleringssystem är att hålla temperaturen inom den tillåtna temperaturgränsen för alla delarna på en satellit. Värme genereras både i satelliten och i dess omgivning. För att reglera temperaturen i en satellit tas det hänsyn till värmetillskott från solen, jorden och komponenter ombord på satelliten. Komponenter i satelliten som producerar värme inkluderar raketmotorer, elektroniska delar och batterier. Den termiska strålningsmiljön för en typisk satellit ses i figur 45.

Det är som sagt viktigt att hålla temperaturnivån inom



Figur 46: Skillnad i skuggtid mellan olika satellitbanor.

rimliga gränser men det är även viktigt att temperaturen är stabil och homogen. Med stabil menas att den maximala tillåtna temperaturvariationen över tiden hålls någotsånär stabil. En homogen temperatur syftar till att den maximalt tillåtna temperaturvariationen i satellitkroppen, vid en viss tidpunkt, inte är för stor.

Strukturen på en satellit tål normalt stora temperaturvariationer men det finns delar på satelliten där en temperaturvariation på endast $\pm 0,5^\circ\text{C}$ är tillåten. Detta är delar som stöttar delsystemen med väldigt hög riktighetsnoggrannhet och därför vill man minimera termiska expansioner och förvriddningar i materialet.

Satelliten har ofta både passiv och aktiv värmereglering. Den passiva värmeregleringen görs med hjälp av bland annat termiska filter, kylare, lackering eller andra ytbehandlingar. Den aktiva värmeregleringen kan bestå av elektriska värmeelement, persienner eller värmeter.

Kraftförsörjning

Det elektriska kraftförsörjningssystemet tillhandahåller, lagrar, distribuerar och kontrollerar satellitens kraftförsörjning.

I en rymdfarkost används oftast både primära och sekundära energikällor. Några exempel på primära system är solceller, nukleära system och bränsleceller. Solceller omvandlar infallande solenergi till elektrisk energi; solenergi är den vanligaste energikällan för jordbundna satelliter. Nukleära system använder antingen radioaktiva sönderfallsprocesser, med hjälp av plutonium-238, eller nukleär fission, med hjälp av uran-235 (kärnbränsle), som energikälla för direkt omvandling av termisk energi till elektrisk energi. Nukleära system används oftast för interplanetära uppdrag eftersom satelliten befinner sig för långt bort från solen för att använda solenergi. Bränsleceller använder en elektrokemisk process där en kontrollerad kemisk reaktion direkt överförs till elektrisk energi. Fördelarna med bränsleceller är att de fungerar dag som natt, till skillnad från när solenergi

används. Bränsleceller används ofta på bemannade färder eftersom biprodukten är vatten som sedan kan drickas av astronauterna. Nackdelen är att satelliten måste bära med sig bränsle, vilket ökar vikten på satelliten.

Lagring av energi sker nästan alltid i batterier. Det är batterierna som utgör den sekundära energikällan och används när den primära källan inte är tillgänglig. Det bör dock nämnas att batterier är den enda energikällan som behövs för satellituppdrag som varar i mindre än en vecka. För uppdrag som varar i över en vecka brukas batterier som energireserver. Satelliter som använder solenergi som primär energikälla kräver ett energilagringssystem av två anledningar: när delsystem använder mer energi än de är dimensionerade för, d.v.s. när de kräver topp effekter, och som extra energikälla när satelliten befinner sig i eklips och inte kan använda solenergin. En satellit i den geostationära banan befinner sig i eklips maximalt 1,2 timmar under en 24-timmars period. En satellit i en LEO-bana befinner sig däremot i eklips upp till 40 %

av sin livstid och är därmed väldigt beroende av en sekundär energikälla, se figur 46.

Kraftförsörjningssystemets kontroll- och distributionsnätverk har som uppgift att leverera lämpliga nivåer på ström och spänning ut till satellitsystemet. Fördelning av energi skall i princip skydda satellitens kraftförsörjning och består därför av elbrytare för att kunna slå på och slå av strömmen till satellitens olika delar. Kraftförsörjningssystemet reglerar i huvudsak tre delar: solcellerna, spänningen över bussen och laddning av batterierna.

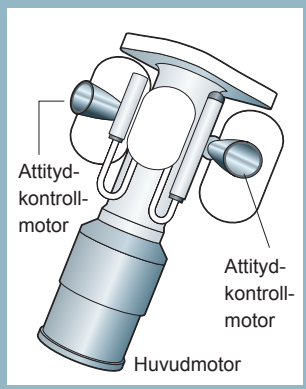
Framdrivning

Beroende på vilken uppgift en viss satellit har, placeras den i en viss bana runt jorden, se avsnittet Satellitbanor tidigare i detta kapitel. Banorna kan variera i höjd, vinkel mot ekvatorn samt hur elliptiska de är. Ofta skjuter man upp flera satelliter med en och samma bärraket. När satelliten separeras från bärraket hamnar den oftast inte i den bana där den skall användas. Satelliten behöver därför ett eget framdrivningssystem. Satellitens framdrivningssystem används från det att satelliten separeras från bärraket till slutet av satellitens livslängd. Faktum är att det ofta är framdrivningssystemet som sätter gränsen för satellitens livslängd, eftersom mängden drivämne är begränsat.

När satelliten har kommit in i rätt bana runt jorden finns det flera yttre faktorer som påverkar

Huvudmotor och attitydkontroll

En rymdfarkost har många – ibland upp till tolv – små munstycken riktade åt olika håll för att justera läge och position.



Figur 47: Huvudmotor och attitydkontroll.

satellitens bana och som med tiden gör att banan förändras. De viktigaste orsakerna är:

- jordens gravitationsfält avviker från sfärisk symmetri, framförallt på grund av jordens tillplattning vid polerna
- kollision med partiklar, joner och molekyler, d.v.s. en typ av luftmotsstånd
- inverkan av månens och solens gravitation

Förutom att satelliten måste befinna sig i rätt omloppsbana, måste den även ha rätt riktning för att t.ex. kunna studera föremål på jorden. En satellit som placeras i rymden är instabil med hänsyn till sin orientering och kommer lätt in i en okontrollerad tumling. Detta kan undvikas genom att satelliten roterar, s.k. spinnstabilisering, eller genom aktiv styrning med hjälp av små raketmotorer, s.k. attitydkontroll, se figur 47.

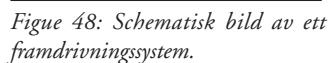
Nackdelen med spinnande satelliter är att det är svårt att använda stora solpaneler samt att riktbara antenner måste rotera i förhållande till satelliten, för att t.ex. riktas mot jorden.

De två dominerande framdrivningsprinciperna är baserade på antingen kemiska eller elektriska raketmotorer. Hos kemiska raketmotorer lagras energin i drivämnet och frigörs genom förbränning. Hos elektriska raketmotorer används t.ex. xenon, som accelereras med hjälp av elektrisk energi, vilken fås från satellitens solpaneler. Kemiska raketmotorer är den idag klart dominerande typen, men elektriska motorer tros få stor betydelse i framtiden. Beroende på om motorn skall användas till att förflytta satelliten från en bana till en annan eller om den skall användas till attitydkontroll ställs det olika krav på den.

Banjustering

För att förflytta satelliten från en bana till en annan används oftast raketmotorer med relativt stor dragkraft (10^2 – 10^3 N). Vanligen finns det en eller två sådana motorer som används någon eller några få gånger under satellitens hela livslängd. Tidigare var det vanligt med krutraketmotorer, men i dag använder man vanligen vätskeraketmotorer som drivs av monometylhydrazin (MMH, kemisk beteckning H_2NNHCH_3) eller hydrazin (N_2H_4) som bränsle och dikvävetetraoxid (N_2O_4) som oxidator, se figur 48.

Framdrivningssystem med MMH som bränsle och N_2O_4 som oxidator.

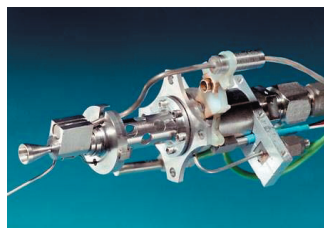


Attitydkontroll

Raketmotorer för attitydkontroll har låg dragkraft, oftast 1 N eller mindre. De skall kunna användas i flera hundra tusen korta pulser under satellitens hela livslängd. Ända upp till 12 stycken attitydkontrollmotorer kan sitta på en satellit, riktade åt olika håll. Vanligen använder man vätskeraketmotorer som drivs enbart med hydrazin, se figur 49, eller elektriska raketmotorer.

Fördelen med hydrazinmotorer är att de är relativt enkla och driftsäkra. Nackdelen är att hydrazin är mycket giftigt och därmed dyrt att hantera. Elektriska raketmotorer har högre prestanda och kommer förmodligen att bli vanligare för attitydkontroll.

Satellitens riktning kan även regleras genom att man använder momenthjul, som drivs med



Figur 50: Hydrazinmotor för attitydkontroll, dragkraft 1 N. Foto: EADS SPACE Transportation.

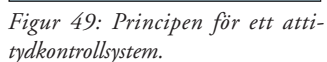
elektriska motorer. Vanligen används både attitydraketer och momenthjul för att kontrollera satellitens riktning.

För mycket små satelliter, s.k. mikro- eller nanosatelliter, kan man använda kvävgas under högt tryck för framdrivningsändamål. Dessa s.k. kallgassystem har låga prestanda, men de är konkurrenskraftiga, just för att de kan göras väldigt små.

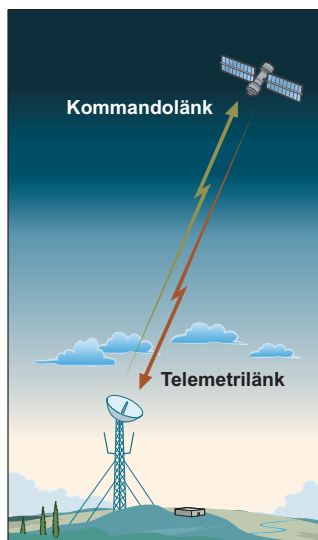
Utvecklingstendenser och svenska nischer

Elektriska raketmotorer är något som i framtiden kommer att bli allt vanligare och som studeras på många håll i världen. Fördelen är deras höga prestanda och att inga giftiga drivämnen behövs. Kemiska raketmotorer kommer dock även i framtiden att vara nödvändiga när hög dragkraft erfordras. En stor nackdel med vätskeraketer är dock de mycket giftiga drivämnen som används. Både ESA och NASA har därför visat intresse för drivämnen, som inte är farliga att hantera, s.k. gröna drivämnen. Detta är ett område där FOI ligger långt framme och har utvecklat lovande alternativ. Rymdbolaget och Volvo Aero samarbetar med att utveckla en 1-Newton

Tank med hydrazin trycksatt med kvävgas.



vätskeraketmotor för de driv-
ämnena som tagits fram på
FOI. I framtiden kommer
det troligen att bli vanligare
med mikro- och nanosatelliter,
då mikroelektroniken och
mikromekaniken har gjort
stora framsteg. Därför kom-
mer förmodligen även mik-
roframdrivningssystem att bli
vanligare. Detta är något som
man med stor framgång studerar
på Ängströmlaboratoriet i
Uppsala.



Figur 51: Schematisk bild av telemetri och kommando.

Telemetri, kommando och datahantering

Datahanteringssystemet har två huvuduppgifter: det skall ta emot, validera, avkoda och distribuera kommandon till andra delsystem på satelliten; det skall också samla in, processera och formatera data. Man talar ofta om två typer av data, servicefunktionsdata, *housekeeping data*, och nyttolastdata, *mission data*. Nyttolastdata genereras, överförs

och tas emot av nyttolasten d.v.s. det är huvudinformationen i ett satellituppdag. Servicefunktionsdata är däremot information som behövs för att stödja själva uppdraget som bland annat information om satellitens bana och attityd, temperatur, uppladdning på batteriet samt i vilket skick satellitens delar befinner sig i.

Det som kallas telemetri och kommando är förbindelselänken mellan satelliten och marksegmentet. Insamlad nyttolastdata och servicefunktionsdata förmedlas från satelliten genom telemetrilänken till operatörer och användare. För att kontrollera satelliten och för att manövrera nyttolasten förmedlas också kommandon från operatörer till satelliten.

Viktiga funktioner som delsystemet skall utföra är följande:

- Bärvägsinmätning för att kunna låsa in på markstationens signal.
- Mottagning och detektering av kommandon, d.v.s. att ta emot upplänken och processera den i satelliten.
- Modulering och överföring av telemetrisignalen, d.v.s. acceptera data från satellitsystemet, processera det och överföra det till markstationen.
- Lokalisering, d.v.s. ta emot, processera och överföra lokaliseringsdata för att bedöma satellitens position.
- Manövrering av delsystemen vilket innebär att processera servicefunktionsdata. Detta

inkluderar upprätthållning av hälsa och status för att kunna detektera samt återställa fel i datasystemet.

Om satelliten befinner sig i en geostationär bana är länken mellan satelliten och markstationen kontinuerlig. En satellit som befinner sig i övriga banor är endast synlig från dess markstation under några minuter vid varje banpassage. Detta kräver att satelliten har tillgång till lagringskapacitet ombord och även en snabb överföringslänk. Om en rymdfarkost, som t.ex. den internationella rymdstationen ISS, behöver en kontinuerlig länk och inte befinner sig i en geostationär bana så kan detta lösas genom att man antingen använder andra markstationer inom synhåll eller genom att man använder sig av reläsatelliter, d.v.s. länken går då via satelliter som befinner sig i den geostationära banan.

Exempel på satellitkonfigurationer

I figur 52 illustreras skillnader i två typiska satellitkonfigurationer: en observationssatellit och en kommunikationssatellit. Orbview-3 är en av de första kommersiella satelliterna som tillhandahåller högupplösta bilder. Med en upplösning på 1 m kommer det att vara möjligt att urskilja hus, bilar och flygplan på marken. Det kommer också att vara möjligt att skapa exakta digitala kartor och tredimensionella scener. Sicral-1 är den första italienska kommunikationssatelliten som är helt dedikerad för militär användning. Satelliten har

nio transpondrar. Sicral-1 är, med den franska kommunikationssatelliten Syracuse, den första europeiska satelliten med tillgång till kommunikation på EHF-bandet. I tabellen ses klart och tydligt skillnaderna mellan en satellit i låg bana och en satellit i geostationär bana.

Informationen är baserad på uppgifter från Internet (Orbital Sciences Corporation 2004) och (Alenia Spazio 2004).

Framtida utveckling

En spekulatio n om utvecklingen av rymdteknik inom en nära framtid, t.ex. i tidsperspektivet fem till tio år, skulle kunna se ut som följer. För det första får man anta att dagens teknikutveckling fortsätter nå

gorlunda oförändrat. Detta innebär, för en specifik funktion med oförändrad prestanda, att satellitens massa kan reduceras. Resultatet blir en lägre uppskjutningskostnad. Med framstegen på mikro- och nanoteknologins områden kan dessutom motorer och system för attitydkontroll göras mycket mindre. Detta gör att små satelliter kan styras på ett billigare och effektivare sätt än i dag. Nanotekniken behandlas utförligare senare.

En annan spännande utveckling är att man börjat ta fram och använda nya billiga och energisnåla framdrivningssätt i rymden. En sådan metod, jondrift, används på den europeiska månsonden

SMART-1. Denna metod går ut på att man låter en svag energikälla verka under lång tid. Konsekvensen blir att det går åt mindre energi men det tar längre tid att genomföra manövreringen. Man har även börjat ta fram miljövänligare bränslen för bärraketer, vilka kanske kan börja användas om ett antal år.

En annan utveckling som förutspås, är att man kommer att införa vapensystem i rymden, d.v.s. att man beväpnar satelliter eller inför speciella vapensatelliter. På engelska kallas detta för *weaponization of space*. Genom att utrusta satelliter med vapen kan andras satelliter förstöras i syfte att hindra en part att utnyttja sina

Exempel på satellitkonfigurationer

	Orbview-3	Sicral-1
Dimension på rymdfarkosten	1,9 m hög, 1,2 m i diameter	2,79 x 3,43 x 4,93 m
Vikt	304 kg	2 500 kg
Solpaneler	5 GaAs paneler	3 000 W
Kraftförsörjning	625 W	1 500 W (900 W i eklips)
Riktningsnoggrannhet	±12 m/10 m	0,2° i alla riktningar
Upplänk/nerlänk	UHF/X-band	S- och EHF-band
Livstid	5 år	10 år
Stabilisering	Treaxlig	Treaxlig
Bränsle		Flytande tvåkomponentsdrivmedel
Bana	470 km cirkulär solsynkron bana inklination 97°	GEO-bana ca 36 000 km höjd Longitud 16,2° österut
Nyttolast/instrument	Vikt 66 kg. Högupplöst avbildningsinstrument med upplösningen 1 m pan och 4 m multispektral. Stråkbredd 8 km, dataakt 150 Mb/s. Återkomstfrekvensen är mindre än tre dagar.	Vikt 450 kg. Transponder med tre frekvensband: EHF, UHF och SHF. Används för kommunikation, data- och videoöverföring.
Uppskjutningsraket	Pegasus	Ariane IV
Datum för uppskjutning	26 juni 2003	7 februari 2001

Figur 52: Jämförelse mellan två satellitkonfigurationer, spanings- och kommunikationssatellit.

satellitesystem. Det är tänkbart att en supermakt som USA börjar skicka upp sådana vapensatelliter, s.k. ASAT-satelliter, *anti-satellite*, mot slutet av den kommande tioårsperioden. Efter som det kräver större vapenverkan att förstöra ballistiska missilier/robotar än satelliter, kommer antagligen inte sådana vapensatelliter att finnas under den kommande tioårsperioden.

Ett organiserat uppskjutande av betalande personer upp i rymden, d.v.s. till höjder över 100 km där man numera brukar säga att rymden börjar, kan ha kommit i gång om fem år. Denna form av rymdturism innebär alltså inte att resorna går runt jorden. Detta får vi vänta ytterligare ett antal år på.

Andra spekulationer är att man om tio år har börjat bygga en månbas, samt att den första bemannade färden till Mars sker senare än de närmast kommande tio åren.

Nanoteknik

Nanoteknikområdet betraktas i dag som ett av de mest betydelsefulla områdena som driver utvecklingen inom modern militärteknik. Egentligen är nanoteknik ingenting annat än materialteknik, men nu börjar man förstå metoderna som gör det möjligt att utveckla material med helt nya egenskapskombinationer, samt att kombinera egenskaper från traditionella områden såsom elektronik, kemi, biokemi, fysik, optik och mekanik. Det

är just detta som är relevant inom satellitteknik, där vikt- och volymbesparingar betyder så mycket för både pris och prestanda. Dessutom krävs multifunktionella material för bästa möjliga totala prestanda.

Nanoteknik kommer att påverka vad vi kallar för elektronik så att nya möjligheter för elektroniska komponenter för kommunikation, sensorer och informationslagring öppnas. Särskilt bör nämnas kolnanorör som är utomordentliga små strukturer av kolatomer (egentligen makromolekyler) som har visat sig ha hittills ouppnåeliga elektroniska egenskaper. Med hjälp av nanorör har man tillverkat transistorer, dioder och logikkretsar som drar väsentlig mindre ström än dagens kiselbaserade elektronik, och som dessutom troligtvis är mycket mer beständiga mot strålningsskador. Eftersom elektrisk effekt är dyrt att framställa i rymden, och risken för strålningsskador hög, kan denna utveckling betyda mycket. Nanoteknik lämpar sig även för nya informationslagringsprinciper och man förutspår lagringsmedia som i princip ger hur mycket minne som helst. Som exempel nämns moduler på ett par kubikcentimeter med terabitlagringskapacitet. Både energikonvertering och lagring är viktigt för satelliter, och nanoteknik kommer sannolikt att möjliggöra effektivare solceller och mindre enheter (batterier, kondensatorer) för lagring av elektrisk kraft.

Mikroelektromekaniska system, s.k. MEMS, används i satellitteknik i dag och längre fram

i tiden förutspås motsvarande nanoelektromekaniska system, s.k. NEMS. Dessa är ytterligare förminskade system som kombinerar elektroniska och mekaniska funktioner för till exempel:

- sensorsystem
- kommunikationssystem
- navigering
- styrning

Nanoteknikområden som speciellt bör nämnas inkluderar elektrooptiska sensorer med ökad känslighet eller dynamiska (styrbara) spektrala egenskaper, ytbeläggningar för kontroll av friktion och material för vibrationsdämpning. Ytbeläggningar för att minimera slitage och friktion är särskilt viktigt i MEMS och skulle kunna förbättra dagens teknik. Mikromotorer och aktuatorer är ytterligare exempel på tillämpningar.

I en nyligen publicerad studie (*Applications of Nanotechnology in Space Developments and Systems, Technological Analysis* 2003) identifieras ytterligare applikationsområden för nanostrukturella material i rymd- och satellittillämpningar, bl. a. temperaturkontroll och nanokompositmaterial.

Att framställa lastbärande (strukturella) material med hjälp av nanoteknik kommer förmodligen att innebära höga kostnader och kommer att vara svårt att göra i större skala, men oftast kan satellitstrukturer tåla ett högre kilopris än övriga tillämpningar.

Rymdteknik - nyttolaster

Det finns många tänkbara nyttolaster på satelliter. Ett antal exempel kan ses i figur 53. Dessa kan emellertid delas in i några få huvudgrupper enligt följande metoder:

System för informationsinhämtande:

- System för avbildning:
 - Optisk avbildning (visuellt, IR)
 - Avbildning medelst radar

- System för registrering av signaler:
 - Elektromagnetisk strålning inom radio- och radarområdena
 - Gammastrålning

System för informationsöverföring:

- Kommunikationssystem

Navigationssystem

Satellitssystem kan också delas in med avseende på uppgift

– även kallat uppdrag eller mission. En uppdelning av informationsinhämtande system kan vara:

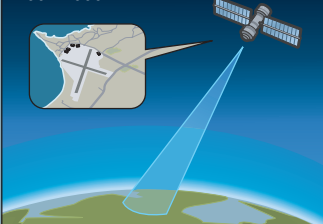
Civila och kommersiella tillämpningar:

- Jordobservation (markobservation)
 - Miljöövervakning
 - Naturkatastroföversikt
 - Infrastrukturella förändringar
 - Förändringsanalys

Sex exempel på nyttolaster

Nedan illustreras de sex typerna av nyttolaster som behandlas i denna skrift. Det är optisk avbildning i den visuella delen av spektret, avbildning i den termiska delen av IR-området, radaravbildning med SAR-teknik, signalspaning (SIS), kommunikation samt positionsbestämning.

Optisk avbildning 200–1 000 km



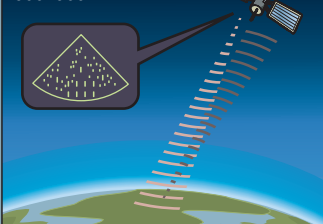
Eftersom avståndet är långt, ljusstrålningen är svag och satelliten rör sig snabbt är det avancerade kamerasytem som erfordras för att erhålla bilder med hög upplösning.

Termisk IR 200–1 000 km



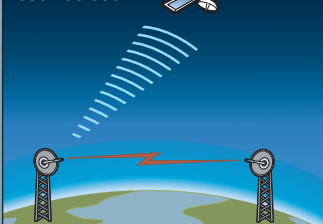
Liknar de för optisk avbildning. Värmebildskamerorna registrerar dock i ett annat våglängdsområde, vilket bl.a. påverkar valet av registreringsmedium (CCDerna).

Radaravbildning 300–900 km



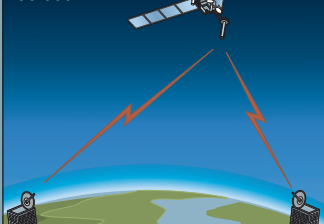
SAR-satelliternas nyttolast består i princip av en avancerad radar.

SIS 600–36 000 km



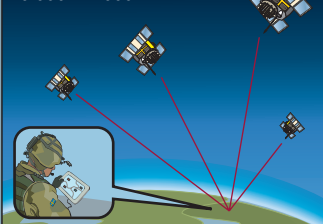
Radiomottagare som registrerar radiosignaler på olika frekvenser. Informationen sänds antingen ner direkt eller alternativt vid ett senare tillfälle från inspelning på band.

Kommunikation 36 000 km



Nyttolasten består huvudsakligen av en transponder som tar emot kommunikationssignalen, förstärker denna och sänder ner signalen på en något förskjuten frekvens.

Positionering 20 000–24 000 km



Arbetar med atomur som ger en mycket noggrann tidsangivelse. Satelliterna sänder ut signaler innehållande information om tidpunkten när respektive signal sänds i väg från satelliten.

Figur 53: Principerna för sex vanliga nyttolaster.

Geometrisk upplösning för olika satellitapplikationer

Observationstyp	Applikation	Geometrisk upplösning (storleksordningar)
VIS/NIR (spaning)	Spaning	dm–10 m
	Vegetation/miljö/oceanografi	10 m–100 m
	Meteorologi	100 m–10 km
TIR		0,5 m–30 m
SAR		0,5 m–100 m

Figur 54: Geometrisk upplösning för olika satellitapplikationer.

- Oceanografi
 - Vattenströmningar
 - Vattentemperatur
 - Våghöjd
- Atmosfärfysik
 - Meteorologi
 - Ozonskiktet
 - Luftföroreningar
- Rymdfysik
 - Geodesi (jordens gravitationsfält)
 - Norrsken (jordens magnetfält)
- Astronomi
 - Astrofysik
 - Astronometri

Militära och säkerhetspolitiska tillämpningar:

- Strategisk spaning
- Taktisk spaning
- Signalspaning
- Detektion av kärnvapendetonationer
- Detektion av robotuppskjutningar

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. Decivila 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 radartechnik. Vilken upplösning man kan räkna med vid olika tekniker kan ses i figur 54.

Avbildning med optisk teknik är i princip vanlig fotografering där man använder 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 spekt-

rumet med något längre våglängd finns IR-området, där IR står för infrarött (ljus) och ofta kallas 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-matriserna). CCD, som står för *charge-coupled device*, detekterar fotoner genom att utnyttja den fotoelektriska effekten. Dagens teknik medger inte att lika små CCDer används vid värmefotografering som vid fotografering i den synliga delen av spektrumet, se avsnittet IR- och EO-sensorer senare. Detta medför att bilderna från värmekamerorna får sämre upplösning. Fördelen med elektrooptisk (EO) registrering av bilder är bland annat att bilderna kan sändas ner från satelliten som radiosignaler. Om fotografisk film används får

man sända ner filmen i kapslar eller ta ner hela satelliten, eller både och. Detta medför dels att användaren får vänta med att få sina bilder och dels att satelliten får en mycket begränsad livslängd (till dess att filmen har tagit slut). Ryssland och Kina tar ner filmer i kapslar och hela satelliter som får dala ner till marken i en fallskärm. USA tog ner sina över oceanerna och fångade upp kapslarna eller satelliterna i luften med flygplan.

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.

När satelliter används för kommunikation, s.k. kommunikationssatelliter, 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. Uppre 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 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 fjärranalysatellit, ner till jorden.

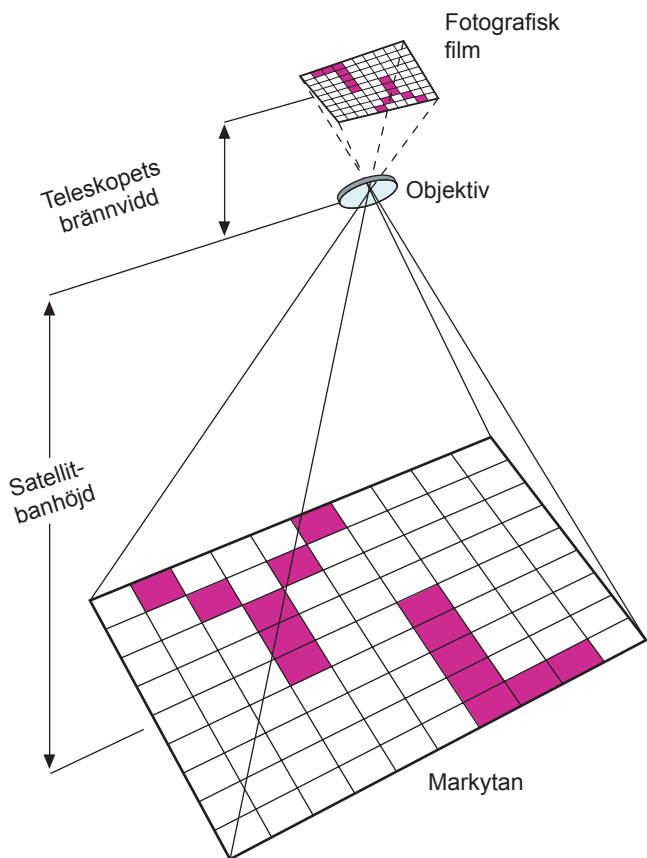
Senare kommer vi att ta upp några av delarna i denna process. Det gäller bland annat antennerna som finns på jorden, transponrar och signalen (frekvenser, effekter och datahastigheter).

Optiska sensorer

Ett optiskt system, d.v.s. ett teleskop med lins eller spegel, koncentrerar det på jorden reflekterade solljuset på den bildalstrande sensorn, som kan vara en fotografisk film, ett

videoband eller en elektrooptisk sensor. Historiskt sett användes först fotografisk film, se figur 55, och kort därefter också videoband. Numera är det bara vissa militära satelliter som använder fotografisk film. Den digitala bilden som alstras av den elektrooptiska 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. Ett exempel på täckningsområde visas i figur 56. Inom dessa områden



Figur 55: Principen för hur jordens markyta avbildas, med hjälp av objektivet i det optiska systemet, på en sensor.



Figur 56: 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 av Jörgen Hartnor, Lantmäteriet)

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 och länkbudget – d.v.s. en sammanvägning av satellitens sändarstyrka, känsligheten hos

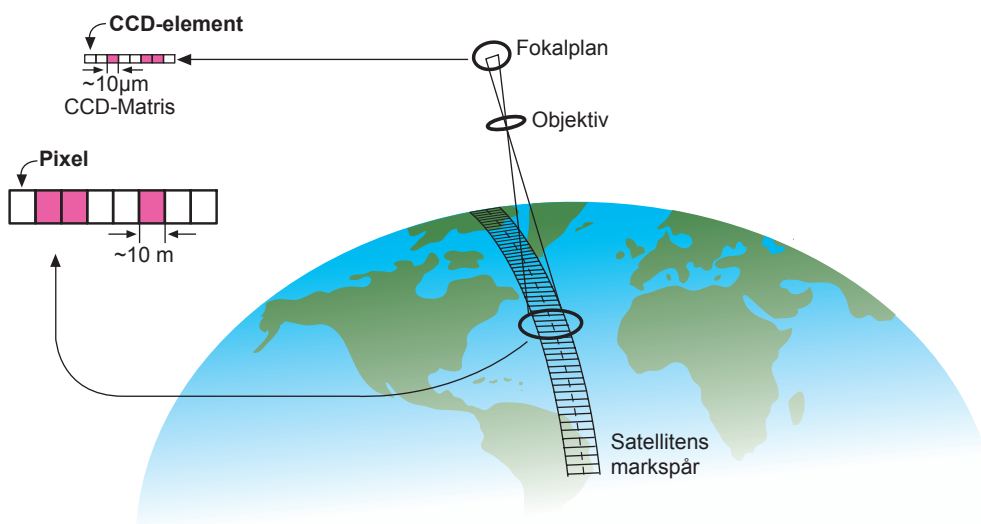
mottagningsstationens mottagningssystem, m.m. – vilket bestämmer den lägsta antennvinkel som kan användas.

En fördel med Esrange är dess nordliga läge som gör att fjärranalysatelliter i polära banor vid ca tre av fyra varv

kan tömma sitt ombordminne 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, data-nedlänkingshastighet m.m.

Ett vanligt sätt numera att avbilda jorden är att ha en linjär sensor, bestående av t.ex. flera tusen CCDer, som är vinkelrätt mot satellitens rörelseriktning. Under satellitens färd sveper den ut ett stråk på jorden. CCDerna 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 57.

Ett annat sätt är att använda ett system som på engelska kallas *cross-track*, eller *whiskbroom scanner*. Detta är ett system där



Figur 57: Principen för hur pushbroom-tekniken fungerar. En bit av jordytan avbildas successivt på en linjär matris av CCDer allteftersom satelliten rör sig.

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.

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. Anledningen till att man vill titta till höger eller vänster om sitt banspår kan vara att man vill se området tidigare än om man skulle behöva vänta tills satelliten befinner sig rakt över området 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.

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

$$X = \frac{dh}{f} \quad (\text{E } 1)$$

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. Ekvation E1 illustreras i figur 58.

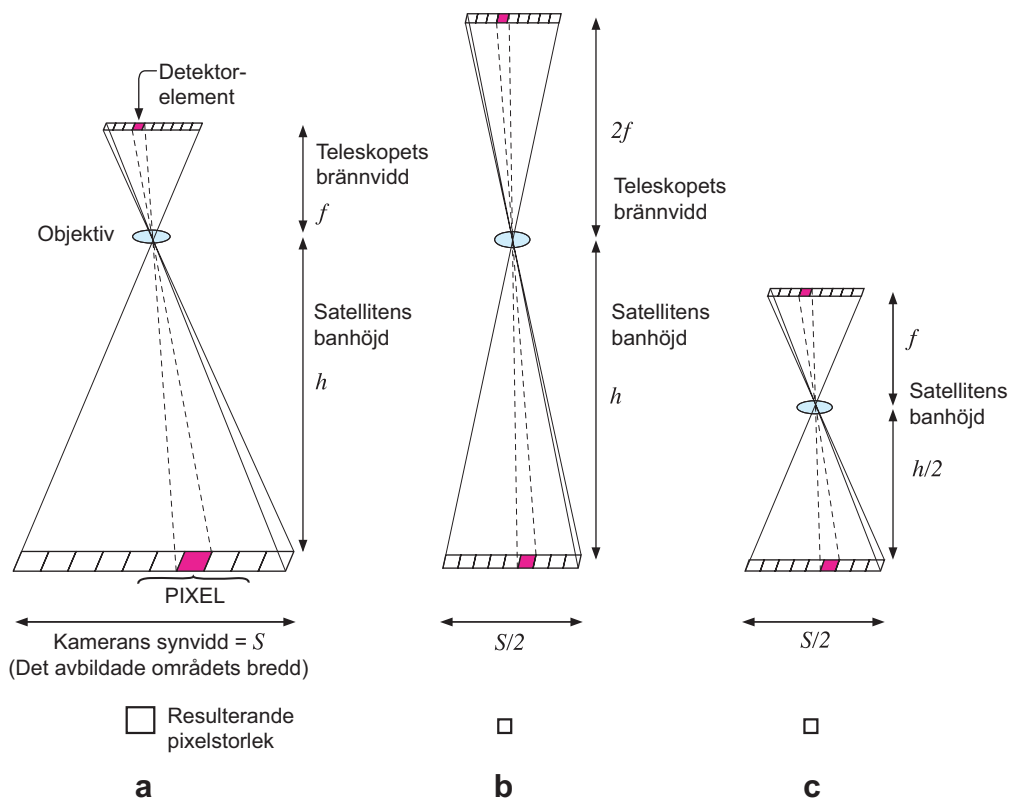
Man kan dock inte få högre upplösning än vad som ges av diffraktionseffekten vilket innebär att:

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

där D är öppningsdiametern för linsen eller spegeln.

Om en laser används för avbildning eller avståndsmätning erhålles approximativt en upplösning i höjd som är:

$$\Delta h = \frac{\tau}{2} \quad (\text{E } 3)$$



Figur 58: Illustration av ekvation E1. Den resulterande pixelstorleken X , se a, kan halveras antingen genom att teleskopets brännvidd f dubblas, se b, eller genom att satellitens banhöjd halveras, se c.

där c är ljushastigheten (300 000 km/s) och τ laserpulsens bredd. Med $\tau = 0,1$ ns ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$; n står för nano) erhålles $\Delta h = 1,5$ cm. För den transversella upplösningen gäller formlerna ovan om laserstrålen täcker den yta som motsvaras av pixelstorleken projicerad på jordytan.

IR- och EO-sensorer

Avbildning med hjälp av elektromagnetisk strålning inom det visuella och infraröda våglängdsområdet är vanligt förekommande. Inom det visuella och det nära infraröda våglängdsområdet används okyld kiselteknik, liknande den som förekommer i våra vanliga digitalkameror. En indelning av det elektromagnetiska spektret kan ses i figur 59. Den viktigaste skillnaden mellan registrering i det visuella/nära-IR-området och det termiska infraröda våglängdsområdet är att sensorerna inom det senare området måste kylas

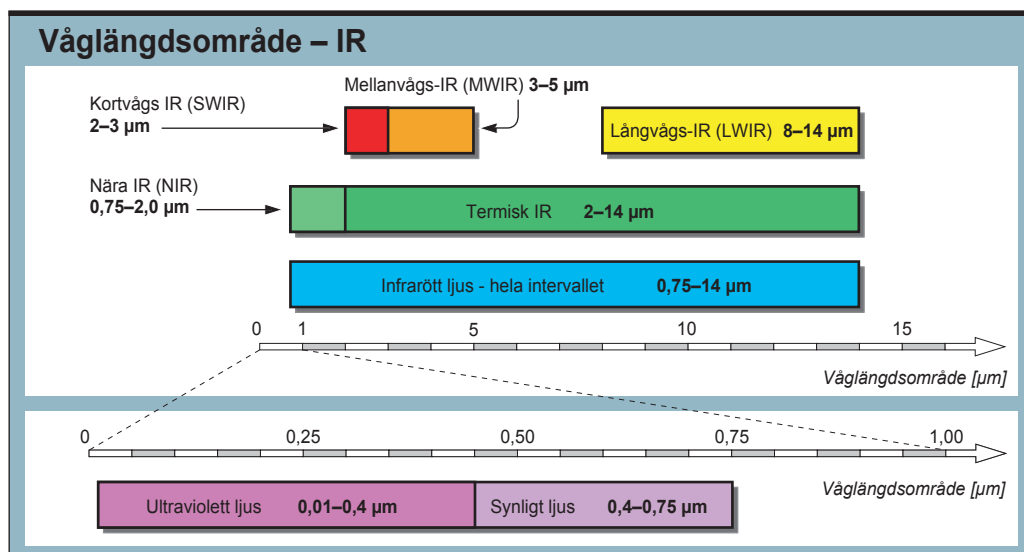
ner till temperaturen 77 K eller lägre; ju längre våglängd ju lägre temperatur fordras. Ett stort problem är att tillverka stora matriser av detektorer för IR-området. Detektorelementens storlek är relaterad till våglängden, vilket medför att detektorelementen är minst tre gånger större i det termiska infraröda området än motsvarande för det synliga ljuset (ner mot $5 \mu\text{m}$ för synligt ljus mot ca $15 \mu\text{m}$ för IR). Den största fokalplansmatrisen på marknaden år 2004 för det synliga, visuella området innehåller 9216x9216 CCDer. I det termiskt infraröda våglängdsområdet har matriser av storleken 2048x2048 CCDer tillverkats. I ett teleskop kan ett antal matriser sammanfogas till en större bildyta.

I många tillämpningar krävs inte bara en hög spatial upplösning utan även en hög spektral upplösning. Hyperspektrala avbildningssystem kan, förutom ett stort

antal band inom den synliga delen av spektret, också ha flera band i IR-området. Den spektrala informationen används i ett stort antal tillämpningar. Vilka våglängdsband som är viktiga varierar med dessa tillämpningar. Exempel på tillämpningar är:

- molnregistrering
- sjöstillstånd
- snö- och iskartläggning
- kartläggning av översvämningsområden
- kartläggning av jord och vegetation, mineraler och berg
- kustkartering, vägnät och byggnader

Olika spektralområden är olika effektiva i samband med dessa tillämpningar. Området kring $2 \mu\text{m}$ är t.ex. intressant vid detektion av mineraler. Grödor studeras med fördel i det visuella och nära infraröda våglängdsområdet. Det kommande amerikanska systemet för detektion av missiluppskjutningar tros komma



Figur 59: Våglängdsindelning av det optiska spektret.

att detektera strålning i det termiska infraröda området omfattande kortvåg, mellanvåg och långvåg.

Ett sätt att använda satellitburna IR-system skulle kunna vara att detektera högt flygande föremål, som flygplan på höjder över 5 km. Tanken är att vattenånga på lägre höjder i atmosfären skulle utgöra en kall bakgrund mot vilken flygplanen avtecknar sig. Genom att ta differensen mellan två bilder kan rörliga objekt som flygplan detekteras. Med en sådan teknik skulle t.ex. dagens smyg-*(stealth-)*flygplan kunna upptäckas. Dessa är i dag inte designade för att undgå upptäckt uppifrån. Eftersom flygplan är snabbt rörliga objekt måste observationssystemet ha nästan kontinuerlig täckning av ett område för att tekniken skall vara intressant. Detta innebär, om man vill undvika att ha ett mycket stort antal satelliter i LEO, att man måste ha en satellit i GEO-banan eller tre i Molniya-banor (se avsnittet om Satellitbanor tidigare). Då detta innebär stora avstånd fordras ett kraftfullt optiskt system i satelliten.

RADAR

Klassisk radar

Radar, *Radio Detection And Ranging*, är en teknik där elektromagnetisk strålning sänds ut, varefter gångtiden för den reflekterade strålningen från målet mäts. Radar används vanligen för att upptäcka, positionsbestämma, avbilda och följa objekt. Typiska exempel på objekt är flygplan och fartyg.

Principen för radar är att elektromagnetisk strålning, företrädesvis i våglängdsområdet ca 3 mm–ca 10 m (30 MHz–100 GHz), sänds från en sändare och reflekteras för att tas emot av en mottagare. De elektromagnetiska vågorna alstras i radarenheten, d.v.s. radarn eller radarstationen, och tas vanligen emot med samma enhet.

I princip fungerar en radar så att strålningen sänds ut i pulser. Avståndet till målet fås genom att man mäter gångtiden t för en utsänd puls genom att utnyttja sambandet $v = \frac{s}{t}$, se figur 60. För elektromagnetisk strålning är $v = c$ ljushastigheten (ca 300 000 km/s). Sträckan $s = 2r$ (tvåan eftersom pulsen går fram och tillbaka), där r är

avståndet till målet, vilket ger:

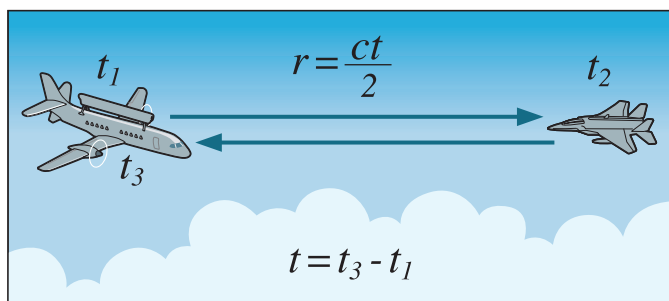
$$r = \frac{ct}{2} \quad (\text{E } 4)$$

Genom att veta i vilken riktning radarns antenn befinner sig i vid sändnings- och mottagningstillfällena kan också asimut och elevation till målet fås.

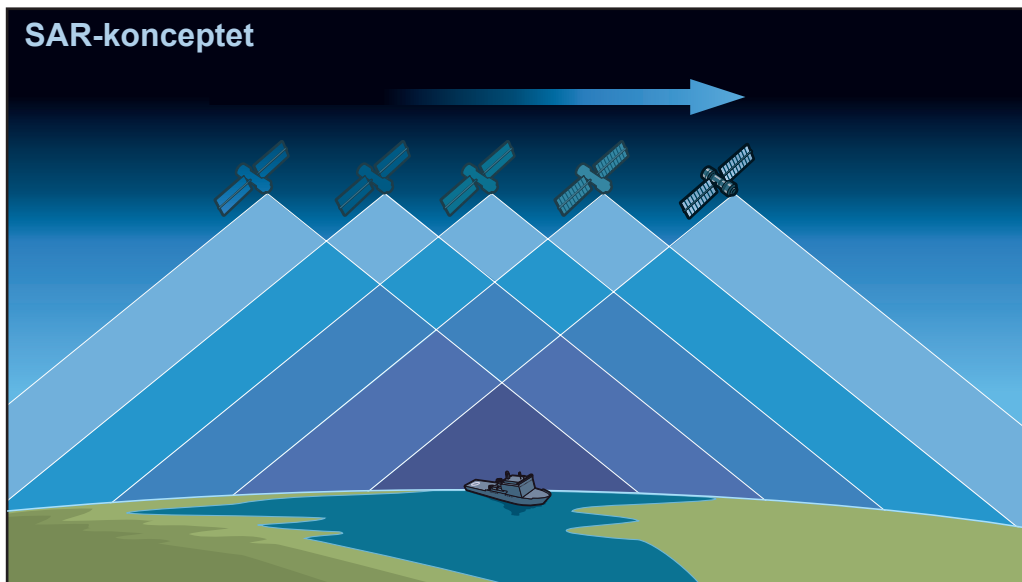
Det finns två klassiska radar typer. Den ena roterar runt en vertikal axel och ger asimuten till målet. Den andra, höjdmättningsradarn, vickar runt en horisontell axel och ger elevationen till målet. Radarekona visas ofta på en plan skärm. Den första typen ovan visar då radarekona på en cirkelskiva där radien är avståndet till ekot och vinkeln är asimuten, ett s.k. planpolärt diagram.

SAR

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 RAR, *Real Aperture Radar*, och dels SAR, *Synthetic Aperture Radar*. I RAR-system bestäms antennens lobbredd av antennens fysiska storlek, d.v.s. upplösningen i asimut begränsas av antennlängden. Den geometriska upplösningen parallellt med satellitbanan blir för RAR ekvivalent med motsvarande bredd hos det momentant belysta markområdet. Detta är bland annat beroende på antennens storlek, den s.k. aperturen (egentligen



Figur 60: Principen för avståndsmätning med hjälp av elektromagnetisk strålning, som t.ex. radar eller laser.



Figur 61: SAR-konceptet med överlappande lobber.

öppning). Ju större apertur desto smalare lob och med en smalare lob kan mindre objekt särskiljas, vilket ju är det som är upplösning¹. För mer information om antenner och lobber, se avsnittet om antenner längre fram.

Av praktiska skäl kan man inte bygga hur stora antenner som helst vilket därmed begränsar möjligheterna till att få hög upplösning. Ett sätt att kringgå denna begränsning är att skapa en konstgjord apertur, *synthetic aperture*, och på så sätt öka upplösningen. Denna princip fungerar så att radarn placeras på en plattform som rör sig. Genom att på ett sinnrikt sätt hålla reda på de utsända radarpulserna allteftersom plattformen rör sig kan man bearbeta de insamlade radarpulserna så att radarn fungerar som om den hade en antenn som är mycket större än den fysiska antennen.

I princip kan den syntetiska aperturen vara hur stor som helst, men den begränsas oftast av den fysiska antennens strålningsdiagram. För SAR gäller emellertid att ju större lob (vid samma våglängd) desto högre upplösning har systemet. Orsaken till detta är att större lob ger större överlappning under rörelsens gång, så att samma område reflekterar flera pulser under satellitpassagen, se figur 61.

Detta innebär att man i satellitfallet ofta skapar syntetiska antenner som är flera kilometer långa. I SAR-systemen skapas alltså bilder med hög upplösning genom signalbehandling av de mottagna signalerna. Se figur 62 för en schematisk illustration av begrepp och storheter för en puls i satellitburen radar (SAR).

I asimutled, d.v.s. längs

med satellitbanan, blir för varje puls upplösningen X_a^{puls} :

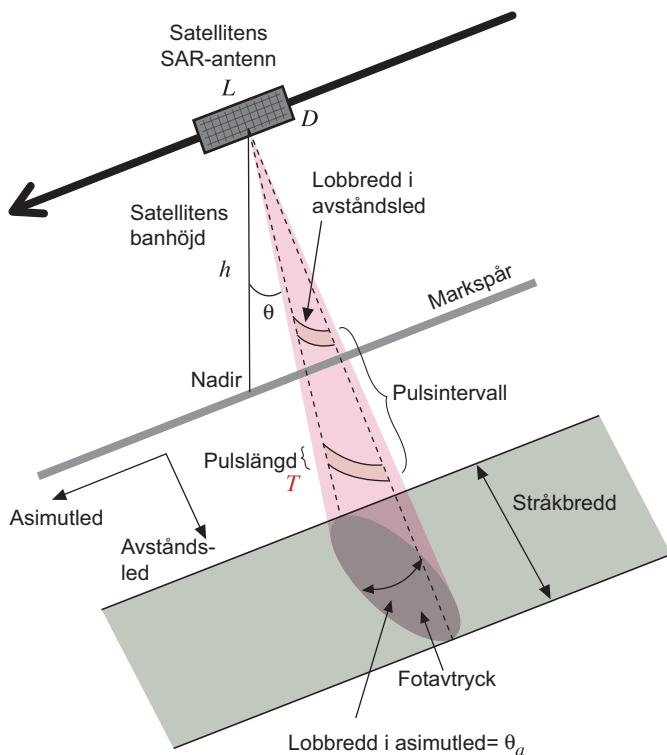
$$X_a^{puls} = \frac{b\Theta_a}{\cos \Theta} = \frac{b\Lambda}{L \cos \Theta} \quad (\text{E } 5)$$

där b är satellithöjden, Θ_a antennens lobbredd i asimutled, Θ infallsvinkeln, Λ våglängden och L antennlängden. Här har inte hänsyn tagits till att jorden inte är plan utan ett klot. Genom att syntetisera en antenn (den syntetiserade antennen motsvarar en linjär matris av antenner vars totala längd alltså motsvarar den syntetiserade antennens längd) blir upplösningen i asimutled:

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

d.v.s. hälften av antennens storlek (längs med färdriktningen). Denna upplösning är oberoende av avståndet mellan radarn och det avbildade området. Dessutom blir upplösningen bättre

¹Vi antar att våglängden är mindre än objekten man vill se. Om objekten är mindre än våglängden minskar reflektionerna och objekten blir svåra eller omöjliga att urskilja.



Figur 62: Geometrisk förhållanden och storheter för satellitburen SAR.

om loben är större. I satellitfallet är:

$$\frac{L}{2} \ll \frac{h\lambda}{L \cos \Theta} \quad (\text{E } 7)$$

d.v.s. upplösningen i asimetled är mycket bättre för SAR än vanlig radar.

I avståndsled, 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 E4):

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

där c är ljushastigheten, $\tau = \frac{1}{B}$, är den minsta upplösbara tidsskillnaden mellan två pulser, B signalens, d.v.s. radar-pulsens, bandbredd och Θ

infallsvinkeln.

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

Bildtolkning

Det finns flera faktorer som påverkar hur objekt avbildas på en bild. Dessa faktorer har större eller mindre betydelse beroende på våglängd, om sensorn är aktiv eller passiv

m.m. 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. Radarekret 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.

Spegelblanka vattenytor ser ofta mörka ut eftersom det mesta av strålningen reflekteras bort. Om däremot vattenytan krusar sig kommer mer strålning att spridas tillbaka till sensorn och vattenytan ser då ljusare ut. Graden av ljushet beror på faktorer som vågornas storlek och rörelseriktning i förhållande till sensorn.

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, eller sidtittande sensor som SAR, skulle egentligen inte få tillbaka någon strålning. I naturen är nu emellertid i allmänhet ytor inte helt släta

utan 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 bakåtreflekter, eller 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.

En av de saker som behöver beaktas vid tolkningen av en SAR-bild är just *backscatter*. Ju mer strålning som SAR-sensorn tar emot desto ljusare blir bilden. Graden av backscatter beror på flera faktorer, såsom t.ex. belysningsförhållanden; materialets reflektionsegenskaper; strålningens polarisation, samt våglängd.

Signalspaning

Satellit som plattform för signalspaning, SIS, är unik med både fördelar och nackdelar som ingen annan plattform uppvisar. Det som främst lockar är möjligheten att göra observationer i stort sett oberoende av terrängmasker över områden som i princip kan väljas fritt över hela jordklotet utan tidsödande materieltransporter på ytan eller genom lufthavet. Vidare gäller att spaningsresultatet lätt kan kommuniceras tillbaka till satellitägaren för fortsatt analys.

De egenskaper som ett satellitburet SIS-system får beror i betydande utsträckning

på den bana man väljer för satelliten. Med en låghöjdsbana (LEO), t.ex. en polär bana på höjden 900 km, blir observationstiden för en ensam satellit mot en given punkt på jordytan vid varje tillfälle kort, ca 10 minuter, men återkommer efter ca en och en halv timme ett fåtal gånger. Därefter upprepas förloppet efter 12 timmar under vilka hela jordytan har kunnat observeras. Från den låga banan blir spaningsavståndet förhållandevis kort, men ändå mycket längre än vad som gäller för andra SIS-plattformar. Kortvågs-SIS är inte aktuell från satellit på grund av jonosfärens avskärmande effekt för våglängder längre än ca 10 m, d.v.s. frekvenser under ca 30 kHz.

Väljer man istället en geostationär bana (GEO) gäller helt andra egenskaper. Från en GEO-position blir knappt halva jordytan åtkomlig. Med tre satelliter i lämpliga positioner blir hela jordytan väl åtkomlig utom polartrakterna.

Ett mellanting mellan LEO och GEO är den starkt elliptiska banan kallad Molniya-banan. I denna blir även de höga latituderna åtkomliga. Med tre satelliter i Molniya-banor jämnt fördelade i samma banplan kan kontinuerliga observationer göras över ett mycket stort område där polartrakterna kan ingå.

Såväl GEO- som den starkt elliptiska banan uppvisar spaningsavstånd som är mycket långa. I båda fallen kan den höga utbredningsdämpningen kompenseras genom hög an-

tennförstärkning, se avsnittet om antenner längre fram.

Samtliga nu nämnda bantyper används sannolikt för såväl radio- som radarsignalspaning.

Ett exempel på radio-SIS-satellitssystem i låghöjdsbana är den franska Essaim, på svenska svärm. NOSS, *Naval Ocean Satellite System*, är också ett kluster av satelliter i låghöjdsbana men med radar-SIS-uppgifter. Orion/Magnum slutligen är troligen en radar-SIS-satellit för geostationärt bruk kännetecknad av en stor antennspegel med över 50 m diameter.

Genom SIS från satellit kan information inhämtas om radio- respektive radaranvändning i områden där internationell insats förbereds eller genomförs. Analys av denna information kan ge ytterligare information av stort värde.

Kommunikationsutrustning

I detta avsnitt tar vi upp en del av den utrustning som behövs för att skapa ett satellitbaserat kommunikationssystem. Vi begränsar oss till de för användarna mest synliga delarna, som t.ex. användarantennerna, och de delar som mest skiljer satellitkommunikationssystem från andra kommunikationssystem, som t.ex. transpondrarna.

Antenner

För att sända och ta emot elektromagnetisk strålning behövs antenner. Sändarantennen om-

vandlar elektriska signaler till elektromagnetiska vågor (radio-vågor) medan mottagarantennen gör det omvända, d.v.s. de omvandlar elektromagnetiska vågor till elektriska signaler. Antenner kan vara riktade eller rundstrålande. Fördelen med rundstrålande antenner är att dessa kan ta emot signaler från alla möjliga riktningar utan att antennen behöver riktas på ett visst sätt.

Det finns många olika typer av antenner, såsom dipolantenn, vertikalantenn, parabolantenn och gruppantenn (också kallat bl.a. antennmatris, elektriskt styrd antenn, *antenna array*). 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
- användaren på jorden, huruvida den är stationär eller rörlig
- vilken typ av plattform som skall hysa antennen

Varje antenn har sina för- och nackdelar. Dipolantennerna sänder mer eller mindre jämt runt omkring antennen. De använda effekterna är ofta ganska låga. Parabolantenn och gruppantenn är riktantenn, d.v.s. de koncentrerar den utsända strålningen i en viss riktning och detta ger då en s.k. antenntöfästärkning, *antenna gain*. Det är då lätt att inse att man i fallet med satellittelefoner för system av satelliter i LEO och MEO använder någon form

av dipolantenn, medan man för geostationära satelliter ofta använder en parabolantenn. I ett LEO-system som Globalstar anpassar terminalerna uteffekten beroende på utbredningsdämpningar och interferenser. Den genomsnittliga effekten ligger mellan 50 och 300 milliwatt. Stora satelliter i GEO kan ha sändareffekter upp mot något hundratal watt.

En gruppantenn består av ett antal s.k. antennelement. Dessa element, som vart och ett är en fysisk antenn, 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. Gruppantennen har den fördelen att dess antennlob snabbt kan riktas om elektriskt utan mekanisk rörelse. Det går t.ex. att styra antennloberna så att ett minimum i antenntdiagrammet hamnar i riktningen mot en stör-sändare varmed effekten av störningen reduceras. Man kan också följa – låsa på – en rörlig sändare, eller ändra antenntdiagrammet för att få andra egenskaper på antennen.

Våglängden sätter vissa begränsningar vad gäller antenntstorlek. 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 ju större måste antennen vara. För gruppantenn gäller också att avstånden mellan elementen skall ha ett visst avstånd be-

roende på den våglängd som den skall sända på.

Den elektromagnetiska strålningens vågor från en antenn interfererar med varandra och orsakar antingen konstruktiv interferens eller destruktiv interferens. I de riktningar där vågorna interfererar konstruktivt blir strålningen förstärkt; där bildas vad som kallas för lobber, medan i riktningar där vågorna interfererar destruktivt blir strålningen försvagad (s.k. lob-minima). Detta kan illustreras i något som kallas antenntdiagram, *antenna pattern*.

Förutom huvudloben har varje antenn flera andra lobber, s.k. sidolobber. I regel vill man ha så små sidolobber som möjligt eftersom strålningen i sidoloberna dels orsakar icke önskvärd störning för andra mottagare 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 sidolobber som möjligt. För parabolantenn beror lobb bredden, d.v.s. huvudlobens bredd, på antenntdiametern.

Transponderar

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 och regenerativa.

De olinjära transpondrarna användes och används för tillämpningar där hög verkningsgrad är viktig, t.ex. för analog TV. De linjära transpondrarna medger att man sänder många bärvågor genom transpondern utan att blandningsprodukter uppstår. Regenerativa transpondrar kan användas vid digital kommunikation. I dessa omkopplas trafiken på satelliten, s.k. *on-board switching*, varvid den inkommande signalen förändras så att den utgående signalen kan komma att se helt annorlunda ut än den inkommande. Detta försvårar störsändning. Om bordbearbetning av signalen medger också ökade möjligheter till kryptering. Fördelar med regenerativa transpondrar är också att den digitala signalen kan sändas vidare utan att bruset förstärks.

Lasrar

Laser har blivit mer och mer aktuellt som sändare av information. För en lasersändare gäller att lobvinkeln är λ/D , där D är sändarteleskopets diameter och λ våglängden. För $\lambda = 1 \mu\text{m}$ och $D = 10 \text{ cm}$ kan en minsta lob på ca 10 μrad erhållas. Om lasern placeras nära Mars kommer stråldiametern vid jorden att som minst uppgå till ca 780 km.

Navigeringsystem

Historik - Kort introduktion

Ett GNSS, *Global Navigation Satellite System*, medför att en mottagare kan bestämma

sin position, hastighet och tid med både hög noggrannhet och tillgänglighet genom att använda satellitsignaler. 1957 skickades den första ryska Sputnik-satelliten upp, vilket var ett teknologiskt genombrott som i hög grad påverkat navigeringsvärlden. Det blev möjligt att använda LOS, *line-of-sight*, radionavigering. Det var när amerikaner studerade Sputnik-signaler som Transit, det första satellitnavigeringssystemet, utvecklades. Man bestämde först Sputniks bana utifrån doppler-skift-mätningar. Därefter insåg man att det omvända också var möjligt, nämligen att om satellitbanan är känd så kan man bestämma en radiomottagares position. 1964 togs Transit i drift för militärt bruk. Kort därefter svarade ryssarna med ett liknande system, Tsikada. Andra generationens amerikanska satellitbaserade navigeringssystem GPS, *Global Positioning System*, kom runt 1980 och byggdes upp av det amerikanska försvaret. Det ryska GLONASS, *Global Navigation Satellite System*, var det omedelbara svaret. Dessa båda efterföljares största fördel var att man slapp långa tider utan satellittäckning.

Operativa GNSS-system

För närvarande finns två satellitnavigeringssystem i drift: det amerikanska GPS och det ryska GLONASS. GPS, som drivs av USAs DoD, *Department of Defense*, är i dag det enda satellitnavigeringssystem som är fullt operativt. Systemet genomgår en modernisering, vilket kommer att medföra fler

civila signaler med förbättrad prestanda och även nya militära signaler med ett effektivare störskydd. GLONASS är för tillfället inte fullt operativt då endast 11 fungerande satelliter är i omloppsbana och 24 behövs för ett komplett system. Det europeiska satellitsystemet GALILEO utvecklas gemensamt av EU och ESA med sikte på att tas i drift under tidsperioden 2008–2010. En ny europeisk myndighet inrättas 2005 som ska ansvara för systemets uppbyggnad och drift. Driften ska läggas ut till en privat koncessionär som ges möjlighet att ta in avgifter från användarna mot medfinansiering av investering och driftkostnad. GALILEO kommer att bestå av 30 satelliter i bana runt jorden, samt ett marksegment med markstationer placerade runt om på jorden vilka har till uppgift att övervaka satelliternas positioner och funktioner.

Systemet ska tillhandahålla fem tjänster (horisontella positionsfelet ska med 95% sannolikhet ligga inom nedan angivna värden):

- OS, *Open Service* – kostnadsfria signaler på två frekvenser (noggrannhet ca 4 m)
- CS, *Civil Service* – krypterad betalsignal på en tredje frekvens (noggrannhet på dm-nivå)
- SOL, *Safety Of Life* – tjänst som ger realtidsinformation om signalernas tillförlitlighet
- PRS, *Public Regulated Service* – statskontrollerade, särskilt robusta signaler på två frekvenser (6,5 m)
- SAR, *Search And Rescue*

– kanal för positionsbestämning av och viss kommunikation med nödställda

PRS är avsedd för kritiska samhällsbehov, t.ex. räddningstjänst, polis etc. Signalerna utformas för hög stör-tålighet. Strikt kontroll ska upprätthållas över vem som förfogar över enskilda mottagare liksom över all detaljerad information om tjänsten.

OS-signalerna utformas för att underlätta interoperabilitet med GPS. Det ska alltså bli enkelt att konstruera mottagare som använder båda systemen tillsammans, vilket ger en tillgång till närmare 60 satelliter och därmed en starkt förbättrad tillgänglighet. GPS-navigering i stadsmiljö kan i dag vara ett problem med endast 28 satelliter. GALILEO och GLONASS har satellitgeometrier som är mer anpassade till nordliga latituder än GPS. Det är ett uttryckligt krav på GALILEO att det ska ge likvärdig täckning i hela Europa.

Vilka frekvenser som an-

vänds av de olika GNSS-systemen kan ses i figur 63.

Användning av GNSS

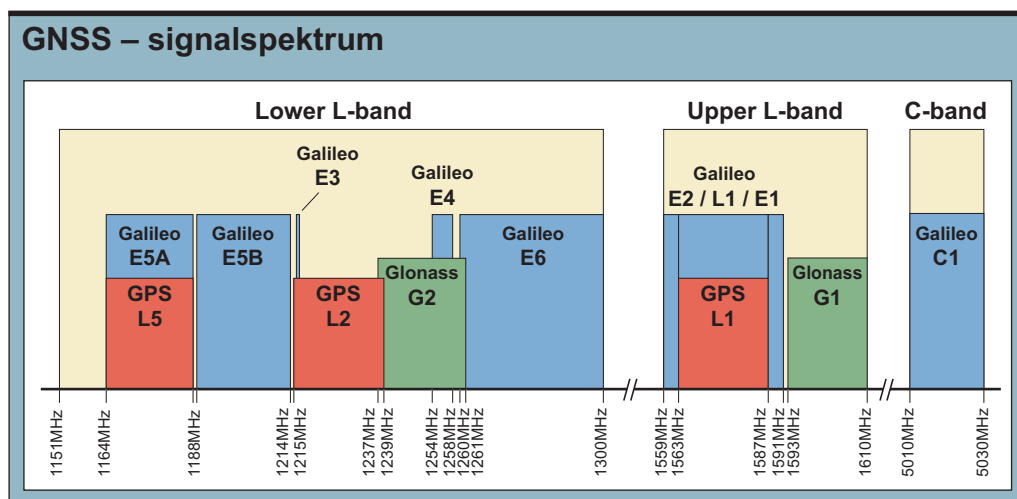
Användning och utveckling av nya tjänster baserade på GNSS ökar kontinuerligt och kommer troligen att få en ännu större betydelse i framtiden när systemen utvecklas och blir mer tekniskt förfinade. Navigering med GNSS används i dag av flygplan, bilar, tåg och båtar. En annan viktig tillämpning är synkronisering och tidhållning i t.ex. mobila kommunikationssystem och finansiella system.

En viktig drivkraft för utvecklingen av personliga positioneringssystem är USA:s FCC-E911, *Federal Communication Commission Enhanced 911*, en service som ställer krav på noggrannhet i positionering av nödsamtal från mobiltelefoner. GPS är idag den enda globala användbara teknologin som klarar de ställda kraven. EU kommer troligen att ställa

liknande krav på en europeisk motsvarande E112-service. Ett sätt att förbättra möjligheten till användning av GNSS, speciellt i stadsmiljö, är att kombinera det med positionsinformation från basstationer för mobiltelefoni.

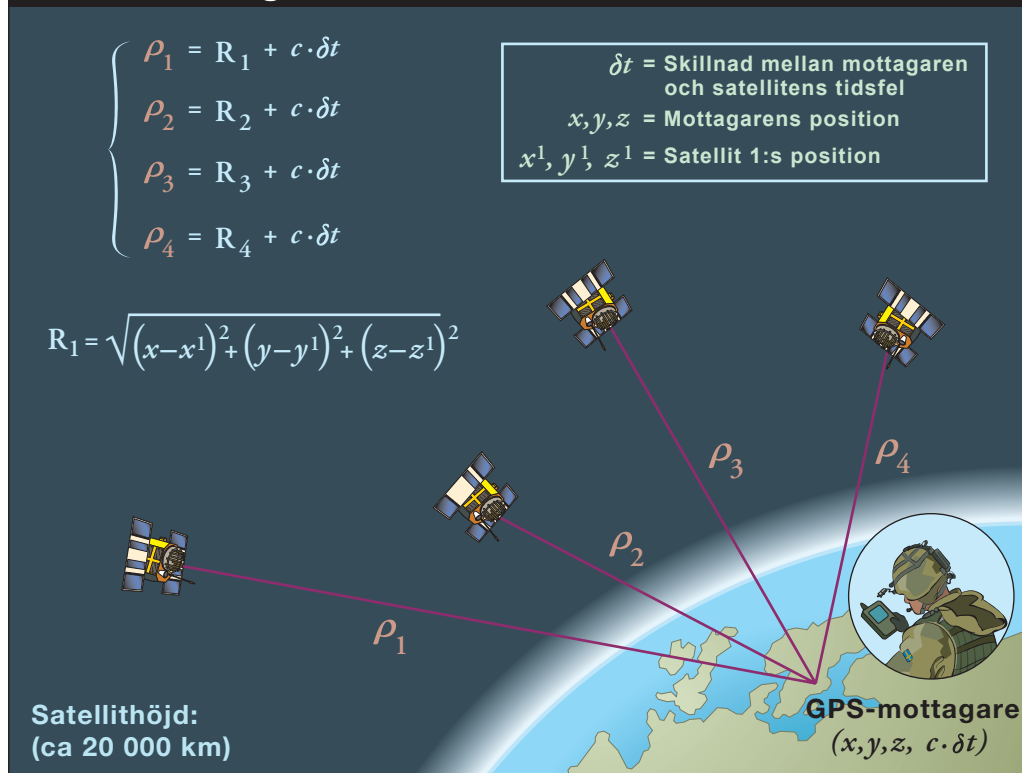
En mängd nya problem kan lösas i takt med att nya avancerade navigeringskomponenter utvecklas. Starka drivkrafter för denna utveckling är det amerikanska programmet CG-IMU, *Common Guidance Inertial Measurement Unit*. I detta program satsar man på att utveckla en mycket liten (två golfbollar), billig (ca 15 000 kr) och bra MEMS-IMU, *Micro Electro Mechanical System Inertial Measurement Unit*. Det skall också finnas en variant med GPS-mottagare. Huvudmålet, har man sagt, är att utveckla en IMU som klarar kraven för 90% av alla styrda vapen hos *Department of Defense*.

Fordonsindustrin ställer också krav på att ta fram och utveckla små, billiga och hög-



Figur 63: Frekvensutnyttjande av GPS, GLONASS och GALILEO.

Positionering med GPS



Figur 64: En GPS-mottagares tredimensionella position (x, y, z) kan bestämmas om man har information från fyra satelliter. Ett tidsfel, δt , måste då också bestämmas.

presterande integrerade sensorsystem baserade på GPS och MEMS-teknik.

Det forskas idag mycket på att förfinas GPS-tekniken för att göra det möjligt att använda GNSS för inomhusnavigering. Den nya typen av GPS-mottagare kallas HSGPSR, *High Sensitivity GPS Receiver*, och gör det t.ex. möjligt att i 80–90% av alla nordamerikanska hem, som mest byggs av gips- och plywood-skivor, kunna positionera sig med GPS inomhus.

Beskrivning av GPS

GPS kan delas upp i tre segment: rymdsegment, kontrollsegment

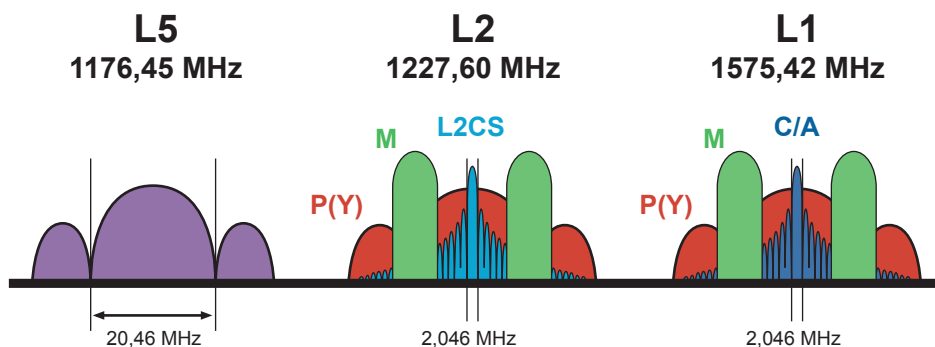
och användarsegment. Rymdsegmentet består av minst 24 satelliter i sex omloppsbanor med fyra satelliter i respektive bana. Kontrollsegmentet kontrollerar status för satelliterna och korregerar fel som uppstår. Användarsegmentet består av GPS-mottagarna.

En GPS-mottagare beräknar sin antens absoluta position, se figur 64. Beräkningarna baseras på att avståndet mellan satelliter och mottagare mäts och kan i princip göras på två sätt, antingen med hjälp av överföringstid, d.v.s. kodmätning, eller fas, d.v.s. bär vågmätning.

Satelliterna sänder på två frekvensband centrerade kring 1,575 (L1) respektive 1,227 (L2) GHz, se figur 65.

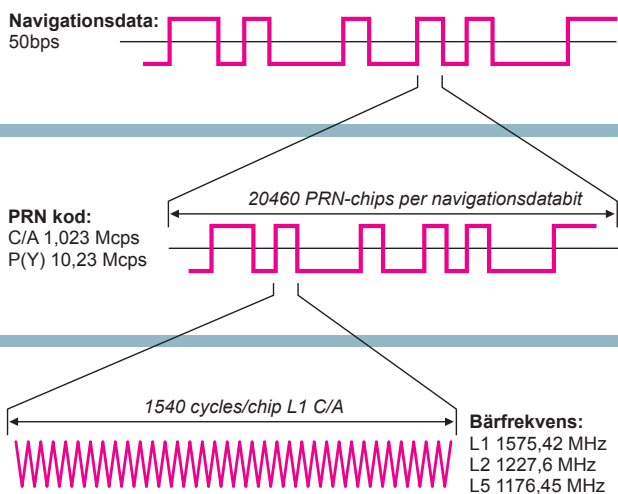
En GPS-signal innehåller ett navigeringsmeddelande, en sekvens av bitar, med nödvändig information om bland annat beräknade satellitpositioner och korrektioner till satellitklockan. Satellitsignalerna är bandspridda med direktsekvens, vilket innebär att innan ett navigeringsmeddelande sänds ut från en GPS-satellit så multipliceras det med en för denna satellit unik bitsekvens (spridningskod) med större bandbredd, se figur 66. Detta får till följd att den utsända

Signalspektrum



Figur 65: GPS-signalspektrum före och efter modernisering. Före modernisering sänds både P(Y) (röd) och C/A (blå) signalen på L1, medan enbart P(Y) signalen sänds på L2. Efter modernisering kommer en ny civil signal finnas med i L2 bandet, L2CS (ljusblå), samt nya militära signaler M-kod (grön). Dessutom kommer ett nytt frekvensband, L5, att användas (lila).

GPS-signalen



Från varje GPS-satellit skickas tre signaler L1, L2 och L5. Här visas ett exempel på vilken information (signal-komponenter) som finns i L1-signalen.

signalen sprids ut i frekvens och blir mer bredbandig. Samtidigt minskar den utsända energin per chip (bit i spridningskod) och därmed kommer satellitsignalerna att ligga under det omgivande termiska bruset. Den frekvens spridningskoden har anges i Mcps, megachip per sekund.

I GPS-mottagaren multipliceras den mottagna signalen med en kopia av den unika spridningskoden, vilket medför att energin per bit ökar samtidigt som signalen återigen blir smalbandig. Om en störsignal finns närvarande kommer den att undertryckas lika mycket som energin per informationsbit i mottagaren ökar och denna dämpning brukar kallas för

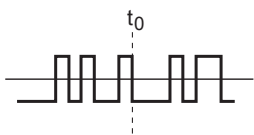
Figur 66: Signalstruktur. GPS-signalen består av tre komponenter: underst visas en bärvåg, i mitten en PRN-spridningskod, unik för varje satellit, och överst ett binärt navigeringsmeddelande.

Tidsmätning

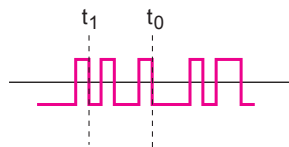
GPS-signalen skickas från satelliten vid tiden t_0 och tas emot av mottagaren vid tiden t_1 . Den mottagna signalen jämförs sedan med en kopia som mottagaren genererat. Överföringstiden Δt är ett mått på avståndet till satelliten, d.v.s pseudoavståndet ρ .



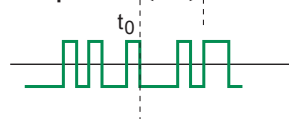
Utsänd GPS-signal (spridningskod)



Mottagen GPS-signal



GPS-mottagar-genererad kopia



ρ



Figur 67: Principen för mätning av överföringstid Δt , även kallad kodmätning.

spridningsvinst. Man kan säga att GPS-systemet genom detta förfarande, bandspridning, har ett inneboende skydd mot interferenser.

Den civila GPS-signalen, som är helt öppen, är bandspridd med en spridningskod som brukar kallas för C/A-koden, *Coarse Acquisition code*. C/A-koden är 20 460 bitar lång, vilket ger en spridningsvinst på 43 dB. Den militära signalens spridningskod P(Y)-koden är 10 ggr längre, 204 600 bitar, vilket ger en spridningsvinst på 53 dB.

På grund av att P(Y)-koden har en högre bittakt än C/A-koden ger den militära signalen en högre positionsupplösning än den civila. Den militära koden är dessutom krypterad, vilket medför att endast militära mottagare kan av-

koda datameddelandet och därigenom få en position. Krypteringen består av två delar, dels specialkretsar i mottagaren och dels en kryptonyckel som distribueras. Det innebär att USAs DoD i alla lägen har full kontroll över vilka som ska kunna använda P(Y)-koden och den högre positions- och tidsnoggrannheten.

Trots att satelliterna sänder på samma frekvens, t.ex. L1, kan man särskilja de olika satelliternas information. Det sker genom att varje satellit använder en unikspridningskod. Mottagaren känner till dessa spridningskoder och genom att synkronisera en kopia med den mottagna signalen kan signalen detekteras och fördröjningen, tiden det tar för signalen att nå mottagaren, bestämmas. Detta kallas kodmätning, se figur 67. Fördröjningen är ett mått på

avståndet mellan satellit och mottagare. Detta förfarande repeteras för alla koder tills dess att samtliga synliga satelliter har hittats. En GPS-signal består av tre komponenter, en bärvåg, en för varje satellit unik binär PRN, *pseudo-random noise* eller spridningskod, och ett binärt navigeringsmeddelande.

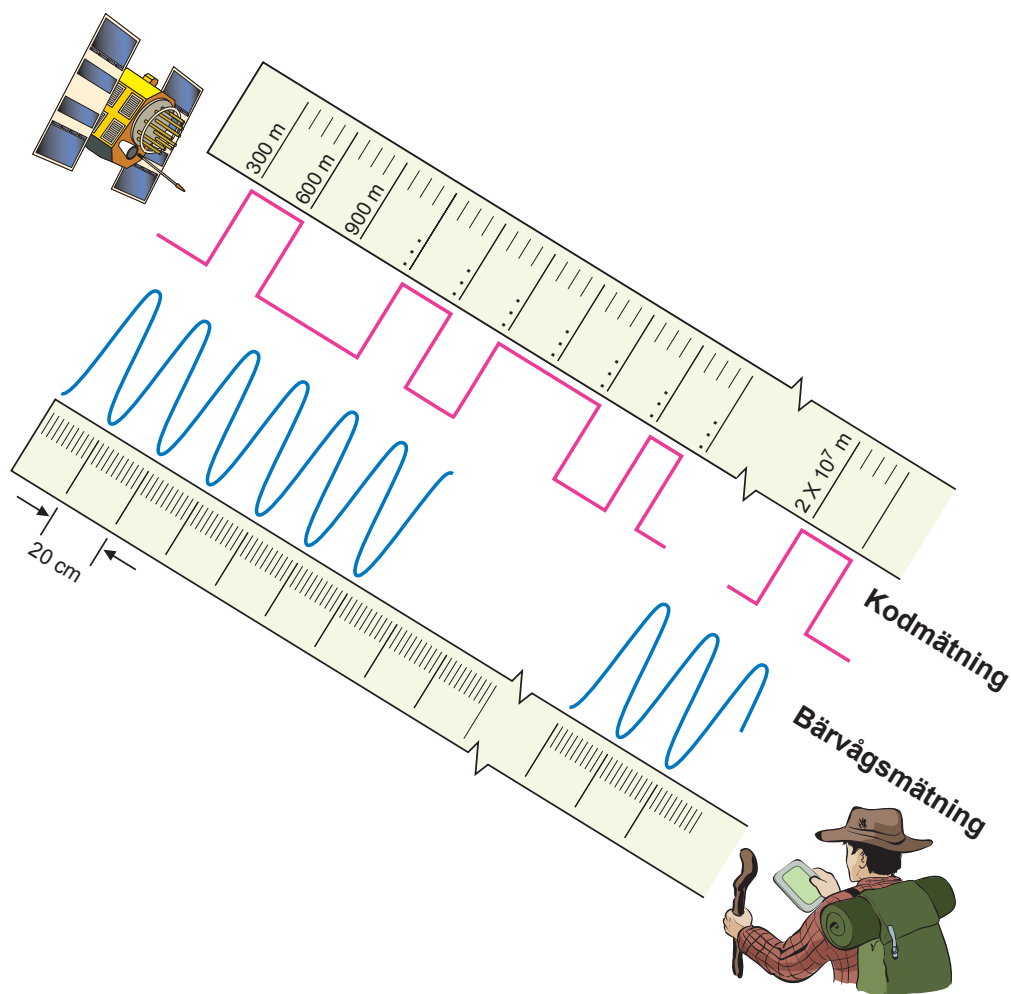
Den uppmätta överföringstiden kan omräknas till avstånd genom att multipliceras med ljusets hastighet och kallas då för pseudoavstånd betecknas med ρ . Pseudoavståndet är en felbehäftad mätning av det sanna geometriska avståndet mellan mottagarantennen och satelliten. Det mest dominanta felet i mätningen beror på en okänd tidsskillnad mellan GPS-mottagarens tid och GPS-satellitens tid, Δt . För att en ensam GPS-mottagare, såväl civil som militär, skall kunna

bestämma en tredimensionell position och det okända tidsfelet behövs fyra stycken pseudoavståndsmätningar, se figur 64. Det är dock möjligt att använda GPS-informationen även med färre än fyra satelliter genom att använda ett tröghetsnavigeringssystem, TNS, i så kallad tät koppling med GPS.

Förutom kodmätningen (pseudoavståndet) kan en GPS-mottagare även mäta skillnaden mellan bärvågens fas och en mottagargenererad

kopia av densamma. En GPS-mottagare kan mäta både kod och fas för L1 och L2. I figur 68 jämförs de två olika typerna av GPS-mätningarna, bärvåg och pseudoavstånd, med måttbandsprincipen. För fallet med pseudoavstånd har måttbandet en grov upplösning på en meter och är markerat från 0 till 26 650 km för att visa det absoluta avståndet till satelliterna från jordens centrum. När det gäller måttbandet för bärvågsmätningen finns det fina markeringar med en

upplösning på 0,01 våglängd (en våglängd är ungefär 19 cm för L1 och 24 cm för L2). När en mätning görs ser man endast en andel av en hel våglängd. Trots att denna andel (fas i grader, där en våglängd är 360 grader), kan mätas mycket noggrant så vet man inte hur många hela våglängder det är mellan mottagaren och satelliten. Tricket med denna typ av mätning är att man hela tiden måste hålla ögonen på måttbandet och räkna antalet våglängder. I GPS-mottagaren

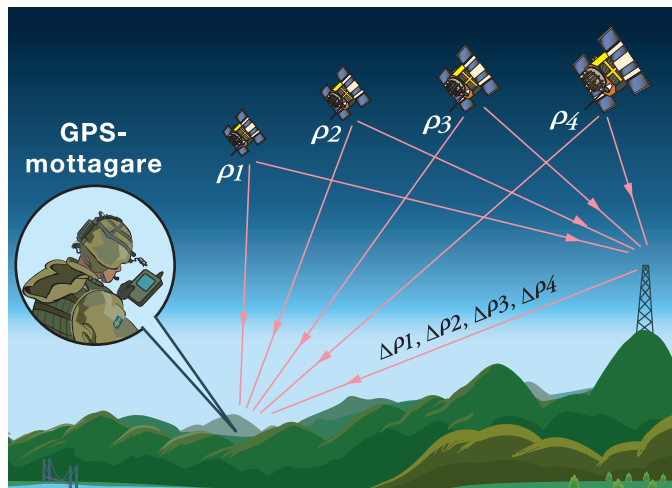


Figur 68: En liknelse mellan kodmätning och fasmätning med måttbandsprincipen.

kallas denna funktion på engelska för *tracking*. Ett problem med praktisk GPS-fas-mätning är att GPS-mottagaren vid startögonblicket måste bestämma hur många hela våglängder signalen svängt sedan utsändningen från satelliten, *integer ambiguity*, vilket kan vara svårt och ta lång tid.

Relativ mätning med GPS

En förbättrad noggrannhet vid absolut mätning kan erhållas genom att man använder s.k. relativ mätning. Vid relativ mätning används två eller flera mottagare tillsammans där man kombinerar mätdata från de satelliter och de mottagare som har använts. En eller flera mottagare brukar placeras på redan kända punkter. Förfarandet används för såväl kod- som bärvågsmätning. Principen vid relativ kodmätning är att mottagaren på en känd position (referensstationen), med hjälp av skillnaden mellan den mätta positionen och kända positionen, beräknar korrekationer för pseudoavstånden till satelliterna, se figur 69. Om basavståndet mellan mottagaren och basstationen inte är allt för stort så kommer en signal att utsättas för ungefär samma felkällor på sin väg till både den fasta GPS-mottagaren, basstationen, och rörliga GPS-mottagaren, *rovern*. De vanligaste relativa mätmetoderna är DGPS, *Differential GPS*, och RTK, *Real Time Kinematic*. Noggrannheten är betydligt bättre än vid absolut positionsbestämning. Relativ kodmätning, DGPS, ger en



Figur 69: Principen för relativ mätning med GPS. En basstation med känd position beräknar och skickar ut korrekationer till en GPS-mottagare.

noggrannhet på en halv meter till några meter. Relativ bärvågsmätning, RTK, i realtid ger centimeternoggrannhet, medan relativ mätning med efterberäkningar kan ge millimeternoggrannhet.

Militär användning av GNSS

Satellitnavigering har inneburit något av en revolution såväl för militära som för civila tillämpningar. Genom att använda ett satellitnavigeringssystem får man på ett enkelt sätt position, hastighet och tid med bra noggrannhet och tillgänglighet. Militärt har man nu under goda förhållanden fått det som befälhavare i alla tider har önskat, nämligen att alla enheter vet var de är och alla har en synkroniserad tidsuppfattning, vilket är två viktiga förutsättningar för gemensamma operationer.

Man kan i dag säkerställa navigeringsnoggrannheten hos missiler och andra styrda vapen.

Detta reducerar civila incidenter och skador på civil infrastruktur nära militära mål samtidigt som rätt mål träffas med färre vapen och mindre verkansdelar. Ett mål kan också attackeras på längre avstånd vilket minskar risken för militär personal. Satellitnavigering medför också en mycket god tidsmätning vilket är en nödvändighet för effektiv gruppssamverkan av anfallande farkoster.

I normalfallet, med god tillgång till satelliter och utan störning, är GNSS ett mycket pålitligt och högpresterande navigeringssystem. Användning av satellitbaserade navigeringssystem medför emellertid alltid en viss risktagning då dessa, liksom andra system som använder radiovågor, är känsliga för störningar. När det gäller störkänsligheten har den svenska försvarsmakten tagit fram riktlinjer för användande av GNSS. Där påtalas bland annat vikten av att GNSS inte ensamt skall utgöra ett huvudnavigeringssystem utan skall



Figur 70: Stadsmiljö och telekrig är exempel på scenarion som ställer höga krav på GNSS-baserade navigeringssystem.

vara ett i krigstid umbärligt komplement till metoder eller system som är robusta och nationellt kontrollerade.

Exempel på svåra fall som ställer extra höga krav på navigeringssystemet är telekrigsmiljö, d.v.s. en del satelliter utstörda, urban miljö eller tät vegetation, d.v.s. en del satelliter blockerade, se figur 70. Det gäller även när en farkost utsätts för hög dynamik då mottagarens

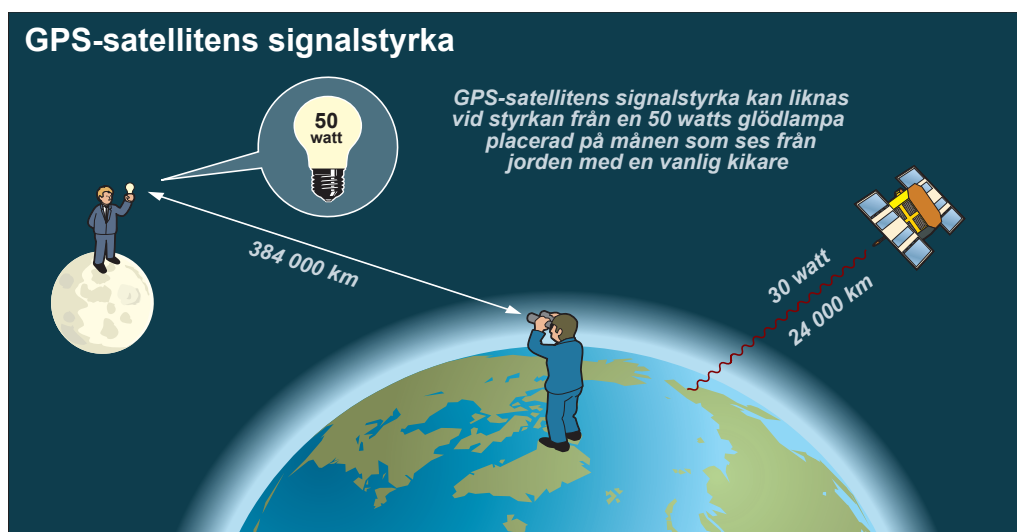
tracking-loopar inte klarar av att följa satellitsignalerna. I dessa exempel har navigeringssystemet få eller inga satellitsignaler tillgängliga.

GPS Störkänslighet

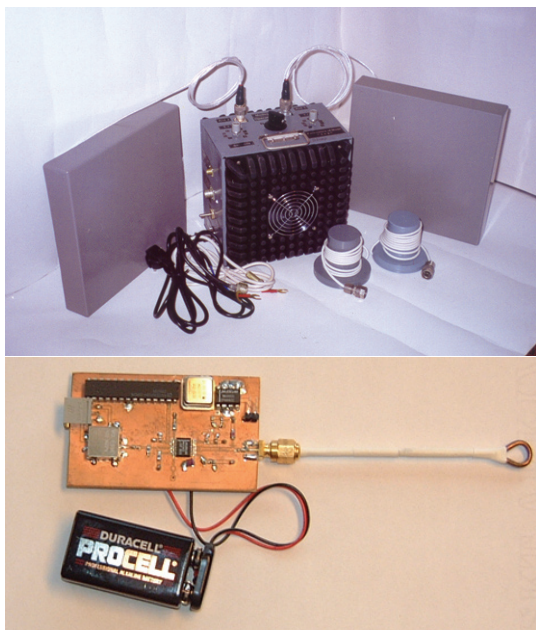
Den mottagna signaleffekten från ett GNSS är extremt liten och ligger långt under det omgivande termiska bruset. För GPS är den mottagna

signaleffekten i storleksordningen 10^{-16} watt. I figur 71 jämförs den mottagna GPS-signalen med en 50 watts lampa på månen.

Med relativt enkel teknik kan man effektivt slå ut både civil och militär användning av GPS-mottagare som är oskyddade och ostöttade. Stöttning innebär att man tar hjälp av andra system eller andra användare. En enkel bredbandig störare med en uteffekt på 20 watt kommer att slå ut en civil GPS-mottagare på avstånd upp till 20 mil. Det finns militärt utvecklade GPS/GLONASS-störare tillgängliga att köpa. Det är också relativt enkelt att konstruera en GPS-störare och komponenterna kan köpas från en godtycklig elektronikfirma, figur 72. Från Internet kan ett flertal utförliga beskrivningar på störsändare, med tillhörande kopplingsscheman, laddas ner.



Figur 71: Signalstyrkejämförelse glödlampa mot GPS-signal. (Här bortses från månens bakgrundsljus och problemet att hålla kikaren stilla).



Figur 72: Två GPS-störare. Övre bilden: En rysk militär störare från Aviaconversiya med uteffekt 20 W, störavstånd upp till 20 mil mot en civil GPS-mottagare. Kostnad ca 40 000 USD. Nedre bilden: En enkel GPS-störsändare framtagen av FOI med uteffekt 100 mW, och störavstånd upp till några km. (Bilder: Lars Falk, FOI)

Navigation Warfare - GPS modernisering

Idag är GPS, som drivs av USAs DoD, det enda satellitnavigeringssystem som är fullt operativt. Systemet genomgår en modernisering, vilket kommer att medföra fler civila signaler med förbättrad prestanda och även nya militära signaler med starkare störskydd. Ett koncept kallat *Navigation Warfare*, fritt översatt navigationskrigsföring, som beskriver militär användning av GPS, har utvecklats i USA. Konceptet beskriver mer än bara användningen av GPS och kan sammanfattas med att man ska maximera effekten av den egna användningen av GPS samtidigt som den fiendliga eller

icke önskade användningen av GPS minimeras och förhindras. Den amerikanska definitionen av *Navigation Warfare* brukar beskrivas enligt följande tre punkter:

- Skydda egna styrkors användande av GPS
- Förhindra motståndarens användande av GPS
- Upprätthålla civilt användande av GPS i operationsområdet

På senare tid har den sista punkten lagts till, vilket är en viktig aspekt idag med tanke på den spridda användningen av GPS i civila tillämpningar. För att konceptet *Navigation Warfare* ska kunna genomföras krävs användning av den nya militära GPS-signalen M-kod,

se figur 65, som finns tillgänglig i den senaste versionen av GPS satelliter, block IIR-M. Denna typ av satellit ingår som del i den påbörjade moderniseringen av GPS.

För att ytterligare öka möjligheterna att genomföra *Navigation Warfare* kommer satelliterna, från och med införandet av block IIF-satelliter, att kunna sända *spot beams*, d.v.s. rikta energin mot ett begränsat område på jorden. Inom området kommer den mottagna signaleffekten att kunna ökas med upp till 20 dB.

Robust Navigering

Ett militärt navigeringssystem måste klara av en svår situation med få satellitsignaler. I figur 73 visas receptet för ett robust navigeringssystem. Det gäller att (1) skydda GPS-mottagaren (maximera antalet satelliter som den kan ta emot signaler från) med tanke på att ju fler satellitsignaler som används för positionsberäkningen desto bättre positionsnoggrannhet får man. Ett effektivt störskydd kan man få genom att använda en gruppantenn som kan störundertrycka med hjälp av lobformning. Men inget enskilt störskydd klarar alla typer av störningar och störstrategier. Det är därför viktigt att använda integrerade navigeringssystem med GNSS och extra stöttande sensorsystem (2), som till exempel TNS, laser, kompass, magnetometer eller trippmätare för att kunna fortsätta navigera när störskyddet har slutat fungera och GPS-mottagaren är helt eller delvis utslagen. Man kan även kombinera GPS med

andra radionavigeringssystem som till exempel Loran eller GSM-basstationer, detta beskrivs i "Radionavigeringsplan för Sverige" (2003). Om den navigerande farkostens navigeringsprestanda ändå inte räcker till för att lösa uppdraget kan samverkande navigering (3) vara en lösning på problemet, vilket innebär att en grupp av farkoster samverkar. Under förutsättning att de "ser" olika satelliter så kan de minska varandras positionsfel genom att utbyta information sinsemellan.

Störskydd av GNSS

Ett effektivt skydd som ökar antalet tillgängliga satelliter är att använda en elektriskt styrbar gruppantenn med adaptiv lobformning. Detta innebär att antennförstärkningen ökar i riktning mot satelliterna och minskar i övriga riktningar så att störkällor undertrycks, se figur 74. I figur 75 visas exempel på två olika lobformningsmetoder MV, *minimum variance*, och LCMV, *Linearly Constrained Minimum Variance*, för ett enkelt störscenario med en störare (röd linje i riktning 120°) och två satellitsignaler (blå och grön linje i riktning 0° respektive 60°). För MV krävs ingen riktningssinformation om satelliterna vilket behövs för LCMV.

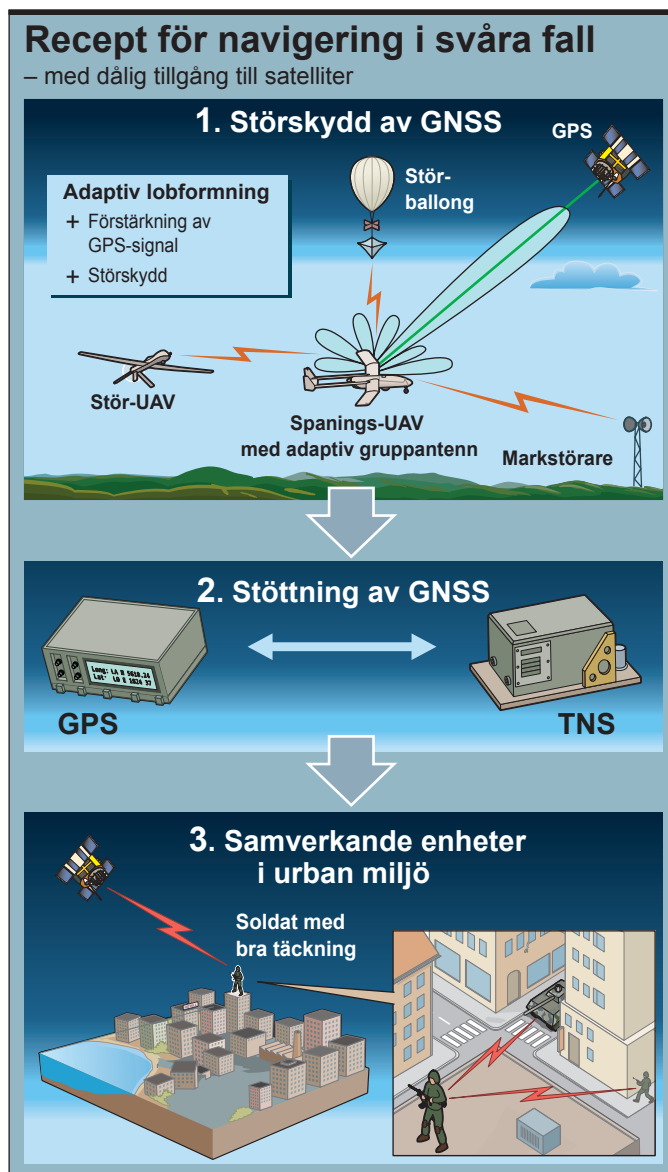
Stöttning av GNSS

GPS-mottagaren kan inte alltid skyddas från störning på grund av antennens fysikaliska begränsningar. Antennens

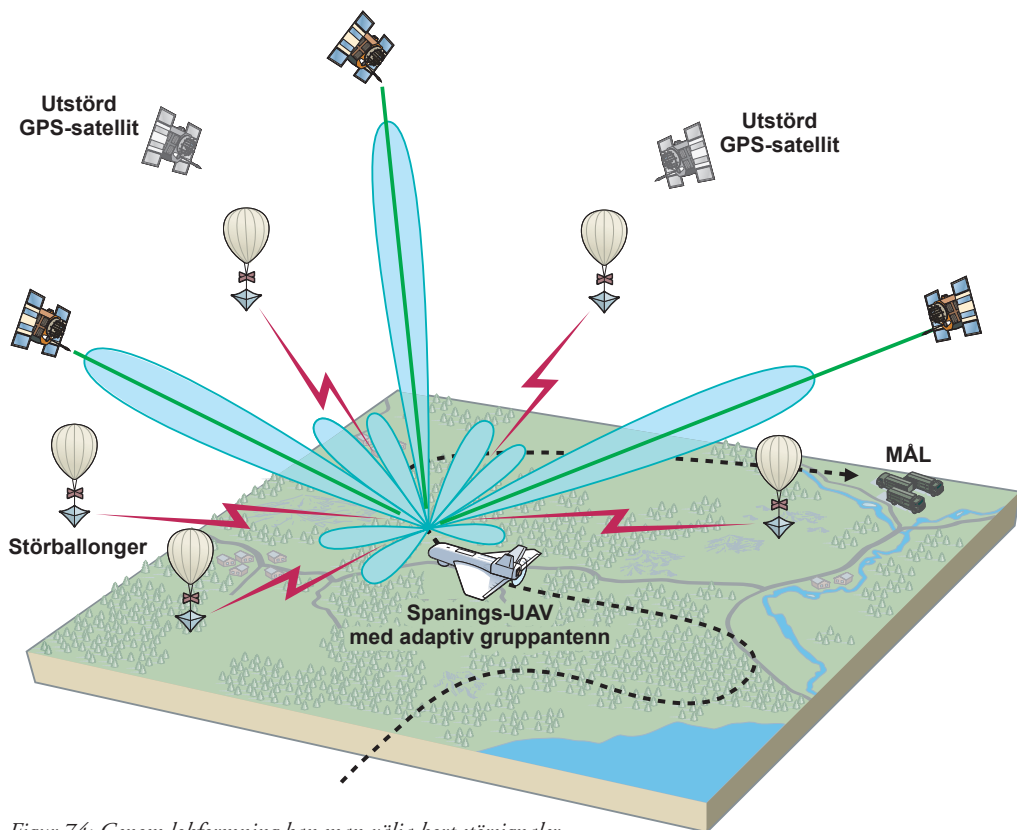
störundertryckning bestäms av antalet mottagarelement samt antalet och placeringen av störarna. Det medför att navigeringssystemet bara har några få satelliter, eller i värsta fall ingen alls att mäta in på, ett s.k. totalt satellitbortfall. I dessa lägen bör GPS integreras med till exempel ett TNS. Då

kan både GPS- och TNS-fel estimeras och kompenseras för, se figur 76.

Ett TNS består av tre accelerometer och tre gyron som mäter acceleration respektive vinkelhastighet för den navigerande plattformen vars position, attityd och hastighet man är intresserad av. GPS



Figur 73: Receptet för navigering i svåra fall med dålig tillgång till satelliter.



Figur 74: Genom lobformning kan man välja bort störsignaler.

och TNS har komplementära egenskaper och en integrering av de båda systemen ger därför bättre navigeringsprestanda och robusthet än systemen var för sig. Figur 76 visar exempel på fel från TNS, GPS och ett integrerat GPS/TNS samt de viktigaste för- och nackdelarna. Genom att använda GPS och TNS kombinerat med en gruppantenn och lobformning får man ett mycket robust navigeringssystem med bra navigeringsprestanda i svåra miljöer. Nackdelar för dagens integrerade navigeringssystem är hög kostnad, storlek, vikt och effektförbrukning.

Vid totalt satellitbortfall, d.v.s. när GPS-mottagaren är helt utstörd, förlitar sig ett

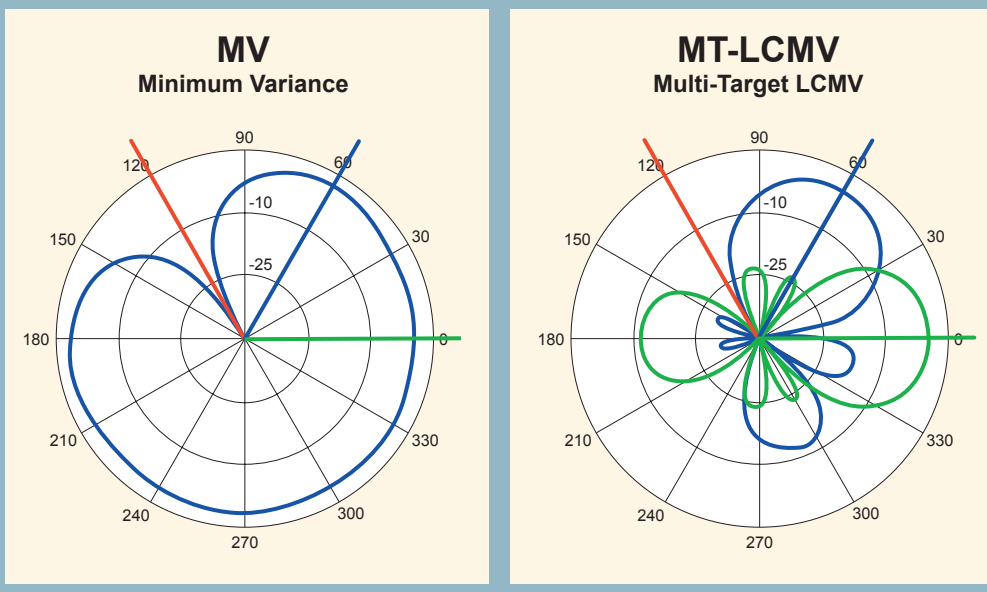
integrerat navigeringssystem på det stöttande TNS. Ett integrerat navigeringssystem estimerar både GPS- och TNS-fel vilket betyder att om det hinner starta upp innan GPS-mottagaren blir utstörd klarar systemet sig bättre än om man bara har TNS. Detta illustreras i figur 76 där ett enkelt TNS (blå kurva) jämförs med ett integrerat TNS/GPS-system (röd kurva) för ett fall då GPS helt störs ut under 2 minuter. Det integrerade GPS/TNS-navigeringssystemet har en lägre feltillväxt.

En GPS-standardmottagare kräver fyra synliga satelliter för att kunna beräkna en tre-dimensionell position (longitud,

latitud, höjd). Ett tätt integrerat TNS/GPS-system har dock möjlighet att minska feltillväxten även då färre än fyra satelliter är tillgängliga. Framtida försvarsnavigeringssystem baserade på GPS, TNS och gruppantenn kommer inom en snar framtid att vara ännu tätare, s.k. ultratätt integrering, vilket innebär att TNS används för att stötta GPS-mottagarens inre *tracking-loopar*. För ett svårt störscenari eller för navigering i stadsmiljö där få satelliter är synliga är detta en mycket viktig egenskap som avsevärt förbättrar chanserna att lyckas med svåra militära uppdrag.

Adaptiv lobformning

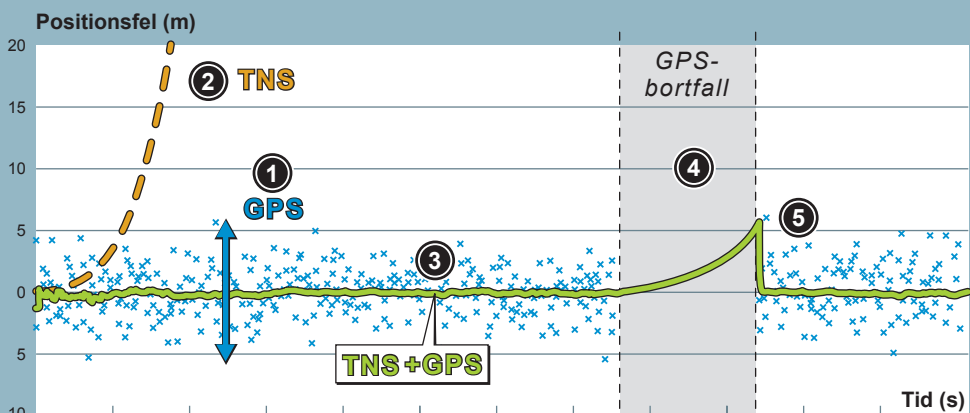
Antennendiagram för två olika lobformningsmetoder (MV, minimum variance och LCMV, Linearly Constrained Minimum Variance) för ett enkelt störscenariö med en störare (röd linje i riktning 120°) och två satellitsignaler (blå och grön linje i riktning 0° respektive 60°). För MV krävs ingen riktningssinformation om satelliterna, vilket behövs för LCMV.



Figur 75: Antennendiagram för de två olika lobformningsmetoderna MV och LCMV.

Integration av TNS och GPS - Satellitbortfall

Här visas hur GPS, TNS och ett integrerat GPS/TNS-navigeringssystem klarar ett satellitbortfall. GPS och TNS har olika egenskaper som gör att de är lämpliga att kombinera.



1. GPS
+ begränsat fel
- störkänslig
- låg uppdateringstakt

2. TNS
+ störfast
+ hög uppdaterings-takt
+ små fel på kort tid
- fel växer obegränsat

3. TNS+GPS-systemet
har en bra precision och är robust mot störning. Tiden före satellitbortfall hinner systemet förbereda sig genom att lära sig GPS- och TNS-fel samt kompenserar för dem.

4. Unders satellitbortfallet
växer TNS/GPS-felet men långsammare än för bara TNS. Jämför med (2).

5. Efter störningen
återhämtar sig TNS/GPS-systemet snabbt.

Figur 76: Störkänslighet hos olika navigeringssystem.

Term	Förklaring
apogeum	Den punkt i satellitbanan som är längst bort från jorden.
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.
attityd	Satellitens orientering given som tre vinklar: rotation kring längdaxel, <i>roll</i> , rotation kring tvärsaxel, <i>pitch</i> , och rotation kring vertikalaxel, <i>yaw</i> .
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. I datorsammanhang används bandbredd ibland som mått på ett överföringsmediums maximala överföringshastighet. 1 Hz motsvarar ungefär 1 bit/s.
banelement	De sex storheter som fullständigt och entydigt bestämmer en satellits position. Även känt som Keplers element.
elevation	Vinkeln över horisonten från 0 grader vid horisonten till 90 grader i zenit.
excentricitet	Mått på hur långsträckt en ellips är.
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.
FFA	Flygtekniska Försöksanstalten.
FOA	Försvarets Forskningsanstalt.
FOI	Totalförsvarets Forskningsinstitut.
Frirymdutbredningsförlust	<i>Free-space loss</i> , den dämpning av signalen som orsakas av avståndet. Dämpningen ökar med kvadraten på avståndet.
GEO	<i>Geostationary</i> , eller <i>Geosynchronous Earth Orbit</i> : Cirkulär satellitbana i ekvatorsplanet på höjden 35 800 km; omloppstid: 24 h.
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> . Beteckningen på positioneringssystem baserat på signaler från satelliter.
GSO	<i>GeoSynchronous Orbit</i> : 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	<i>Geostationary Transfer Orbit</i> : Temporär elliptisk bana för slutlig positionering i GEO-bana.
HEO	<i>Highly Eccentric Orbit</i> : Extremt elliptisk satellitbana, typ Molniya-banan.
HEO	<i>High Earth Orbit</i> : satellitbana på hög höjd bortom GEO.
incidensvinkel	Infallsvinkel. Det är den vinkel som en infallande stråle bildar vid reflektionspunkten med normalen till ytan som strålen träffar.

inklination	Vinkeln mellan satellitens banplan och ekvatorsplanet.
LEO	<i>Low Earth Orbit</i> : Satellitbana vanligen nästan cirkulär och inom höjdiintervallet 100–5 000 km. (Alternativ definition: 100–500 km.)
länkbudget	Summan av förluster och förstärkningar av signalen mellan sändare och mottagare.
marksegment	De delar av ett satellitsystem som finns på jorden.
markspår	Satellitbanans projektion på jordytan; kallas också subsatellit-spår.
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i> : 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 400–1 000 km över södra jordklotet och apogeum på ca 40 000 km över norra jordklotet, och med en inklination på ca 63 grader; omloppstid: 12 h.
Multispektral	Samlingsnamn för ett antal spektralband som kan användas för att skapa en färgbild.
nadir	Den punkt på jorden som ligger rakt under satelliten. (Jfr begreppet zenit som är "punkten" rakt ovanför en punkt på jorden.)
nedstigande nod	<i>Descending node</i> , den punkt där satellitens bana korsar ekvatorsplanet från nord mot syd.
nodlinje	Linjen mellan centralkroppen och den uppstigande noden.
nyttolast	Den utrustning på satelliten som används direkt för satellitens uppgift.
omloppstid	Den tid det tar för satelliten att fullgöra ett varv kring centralkroppen.
operativ livslängd	Den tid systemet fungerar. För satelliter är denna tid ofta mycket kortare än den tid som satelliten befinner sig i omloppsbana.
Pan	<i>Panchromatic</i> : Täcker ett spektralband som ger en bild motsvarande svart-vitt.
perigeum	Den punkt i satellitbanan som är närmast jorden.
perigeums argument	Vinkeln längs med satellitbanans plan mellan den uppstigande noden och banans perigeum mätt längs med satellitens rörelse.
polarisation	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. Polariserad elektromagnetisk strålning består av vågor som svänger i samma plan till skillnad från opolariserad, där det elektriska fältet svänger i alla möjliga plan.
polär bana	En satellitbana med inklinationen 90 grader.
rektascension	Vinkel längs med jordens ekvatorsplan mätt österut från vårdagjämningpunkten till satellitbanans uppstigande nod.

rymdsegment	De delar av ett satellitsystem som finns i rymden.
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i> : radarsystem där man åstadkommer hög asimut upplösning genom att lagra och processa data på doppler-förskjutningen hos flera radarpulser på ett sådant sätt att man får samma effekt som från en mycket längre antenn.
SAR	<i>Search and Rescue</i> , tjänst i GALILEO.
SIS	Signalspaning; Teknik och metoder för insamlande och analys av elektromagnetisk strålning i radio- och radarområdet. Signalspaning är passiv, d.v.s. signalspaningsutrustningen sänder själv inte ut någon strålning. Därmed utesluts avbildande radar-tekniker.
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 på banhöjden men ligger i allmänhet runt 98 grader).
spektralband	Term som används inom optiken; detsamma som våglängdsband och frekvensband.
stråkbredd	<i>Ground swath</i> , hur stort område en sensor ser från satelliten, d.v.s. bredden på det område som sensorn sveper över.
subsatellitspår	Satellitbanans projektion på jordytan; kallas också markspår.
telemetri	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 <i>housekeeping telemetry</i> eller <i>maintenance telemetry</i> .
transponder	Kombinerad sändare och mottagare för t.ex. radio eller radar, som vid mottagande av viss signal automatiskt svarar med egen signal. I satellitsammanhang en kombinerad sändare och mottagare som tar emot sändningen på en frekvens och sänder ut en förstärkt signal på något ändrad frekvens.
täckningsintervall	Återbesöksfrekvensen, d.v.s. hur ofta en viss ort teoretiskt kan avbildas. Återbesöksfrekvensen påverkas av stråkbredden, banhöjden, sensortyp, möjligheten att vinkla instrumentet eller hela satelliten samt latituden (huvudsakligen för satelliter i nära polär bana).
upplösning	Förmågan att separera två objekt, d.v.s. att se dessa som två separata enheter.
uppstigande nod	<i>Ascending node</i> , den punkt där satellitens bana korsar ekvatorsplanet från syd mot nord.
vinkelupplösning	Sett från sensorn den minsta vinkel mellan två objekt som fordras för att de skall ses separerade, d.v.s. som två objekt.

Refererad litteratur

RAND/Douglas Aircraft Company (1946), *Preliminary design of an experimental world-circling spaceship*, Santa Monica: RAND.

Lupton, David E. (1998), *On Space Warfare: A Space Power Doctrine*, Maxwell Air Force Base: Air University Press.

Clausewitz, Carl von (2002), *Om kriget*, Stockholm: Bonnier.

European Space Agency (ESA) (2002), *By Sun power to the Moon* (Elektronisk), Noordwijk: ESA Publications Division (ESA BR-191 June 2002), PDF format, Tillgänglig: <http://sci2.esa.int/smart1/docs/smart1_broch.pdf>(2005-02-01).

Kurtsiefer, Ch., Zarda, P., Halder, M., Weinfurter, H., Gorman, P.M., Tapster, P.R. & Rarity, John (2002), 'A step towards global key distribution', *Nature*, vol. 419, s. 450.

Le Figaro (2002), 'Galileo, trente satellites pour concurrencer l'Amerique', 27 mars.

Commission of the European Communities (2003), *White Paper Space: a new European frontier for an expanding Union-An action plan for implementing the European Space policy*, Bryssel: Commission of the European Communities. (COM(2003) 673)

Luther W. & Zweck A. (2003), *Applications of Nanotechnology in Space Developments and Systems* (Elektronisk), Technological Analysis (No. 43 EN), Dusseldorf: VDI-Technology Center, Tillgänglig: <<http://www.vdi.de/vdi/organisation/schnellauswahl/techno/arbeitsgebiete/zukunft/sub/11264/index.php>>(2005-02-08).

Sjöfartsverket (2003), *Radionavigeringsplan för Sverige 2003 - systembeskrivning*, Norrköping: Sjöfartsverket.

Orbital Sciences Corporation (2004), *OrbView-3*, (Elektronisk) Tillgänglig: <<http://www.orbital.com/SatellitesSpace/LEO/OV3/index.html>>(2004-10-22).

Alenia Spazio (2004), *SICRAL - A new ally for defence communications*, (Elektronisk) Tillgänglig: <<http://www.alespazio.it/program/tlc/sicral/sicral.htm>>(22 oktober 2004).

Rekommenderad läsning

Inledning

Burrows, William E. (2001), *By any means necessary: America's Secret Air War in the Cold War*, New York: Farrar Straus & Giroux.

Volkman, Ernest (2002), *Science Goes to War: The Search for the Ultimate Weapon-From Greek Fire to Star Wars*, New York: Wiley & Sons.

Taubman, Philip (2003), *Secret Empire: Eisenhower, the CIA, and the Hidden Story of America's Space Espionage*, New York: Simon & Schuster.

Användningsområden

Ball, Des (1988), *Pine Gap Australia and the US geostationary signals intelligence satellite program*, Sydney: Allen & Unwin.

Dutton, Lyn, Garis, David de, Winterton, Richard & Harding, Richard (1990), *Military Space*, London: Brassey's.

Erfarenheter från militär användning

Burrows, William E. (1986), *Deep Black Space espionage and national security*, New York: Random House.

Peebles, Curtis (1987), *Guardians Strategic reconnaissance satellites*, London: Ian Allan Ltd.

Ekblad, Ulf (1997), 'USA kan inte tänka sig att gå ut i krig utan satelliter', *FOA-tidningen*, Nr. 5/6, ss. 34 - 37.

Militär rymdstrategi och policy

Johnson, Dana J., Page, Scott & Gabbard, C. Bryan (1998), *Space: Emerging options for National Power*, Santa Monica: RAND.

Hays, Peter L. m.fl. (2000), *Spacepower for a new millenium*, New York: McGraw-Hill.

Lambakis, Steven (2000), *On the edge of the Earth - the future of American space power*, Lexington: University Press of Kentucky.

Rymden och den säkerhetspolitiska utvecklingen

Hurwitz, Bruce A. (1986), *The Legality of Space Militarization*, Amsterdam: North-Holland.

Baker, Howard A. (1989), *Space Debris: Legal and Policy Implications*, Dordrecht: Martinus Nijhoff.

Martel, William C. & Yoshihara, Toshi (2003), 'Averting a Sino-U.S. Space Race', *Washington Quarterly*, no. 26:4.

Dempsey, Judy (2004), 'U.S. and EU poised to agree on satellite navigation networks', *Financial Times*, 3 februari.

Dempsey, Judy (2004), 'U.S. and EU reach agreement in Galileo talks', *Financial Times*, 25 februari.

Ekblad, Ulf (2004), *Earth satellites and detection of air and ground based activities*, (Elektronisk) Diss. Kungl. Tekniska Högskolan, Tillgänglig: <<http://media.lib.kth.se/dissengrefhit.asp?dissnr=3775>>(2005-02-07).

Framtida rymdkrig

US Space Command (1998), *Long Range Plan*, (Elektronisk) Peterson AFB: US Space Command, Tillgänglig:<<http://www.fas.org/spp/military/docops/usspac/lrp/toc.htm>>(2005-05-04).

Handberg, Roger (2000), *Seeking New World Vistas - The Militarization of Space*, Westport: Praeger.

Preston, Bob, Johnson Dana J. m.fl. (2002), *Space Weapons Earth Wars*, MR-1209-AF, Santa Monica: RAND.

Rymdteknik

Maral, Gérard & Bousquet, Michel (1986), *Satellite Communications Systems*, Chichester: John Wiley & Sons.

Brown, Charles D. (1995), *Spacecraft Propulsion*, Washington, D.C. : American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Fortescue, P. & Stark, J. (1995), *Spacecraft Systems Engineering*, Andra upplagan, New York: Wiley & Sons.

Wertz, James & Larson, Wiley (1999), *Space Mission Analysis and Design*, Tredje upplagan, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers Group.

Saccoccia, G., Gonzalez del Amo, J. & Estublier, D. (2000), *Electric Propulsion: A Key Technology for Space Missions in the New Millennium* (Elektronisk), Noordwijk: ESA Directorate for Technical and Operational Support, ESTEC (ESA bulletin 101 - february 2000), PDF format, Tillgänglig: <<http://esapub.esrin.esa.it/bulletin/bullet101/saccoccia.pdf>> (2005-02-01).

Rymdteknik - nyttolaster

Hansson, Erik & Arnberg, Wolter (2003), 'Satellitburen radar för översvämningskartering', *Kart & Bildteknik*, 2003:2, Kartografiska Sällskapet.

Robinson, Bruce T. (2003), 'Who goes there? - How the U.S. Army's new satellite tracking system helped averted friendly fire and lift the fog of war in Iraq', *IEEE Spectrum*, 2003:10, IEEE.

FOA-/FOI-rapporter

Ekblad, Ulf (1988), *Minimum Number of Satellites for Periodic Coverage*, FOA: Stockholm (FOA Report C 30511-9.4).

Wallin, Lars B., Ekblad, Ulf, Grahn, Sven, Orhaug, Torleiv & Sveding, Ulf (1988), *Multinationell verifikationssatellit? - en förstudie*, FOA: Stockholm (FOA-rapport C 10312-9.3).

Ekblad, Ulf, Mylén, Leif (1995), 'System för upptäckt av ballistiska robotar'(FOA-R--95-00168-9.4, 3.3--SE, Augusti 1995), i Tarras-Wahlberg, Erland & Sjöberg, Eric et al. (1995), *Skydd mot ballistiska robotar*, FOA: Stockholm (FOA-R--95-00136-1.1,1.2--SE).

Ekblad, Ulf (2000), *Rymdvapen och åtgärder mot satelliter*, FOA: Stockholm (FOA-R--00-01456-20--SE).

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

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

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

Höstbeck, Lars (red.), Andersson, Marie, Arnzén, Sylve, Berglund, Erik, Ekblad, Ulf, Hamnér, Ola, Lindblad, Anders & Wingborg, Niklas (2001), *Rymd och försvar*, FOI: Stockholm (FOI-R--0188--SE).

Andersson, Marie & Ekblad, Ulf (2003), *Rymdsystem för internationella insatser*, FOI: Stockholm (FOI-R--1077--SE).

Clevström, Jenny & Winnerstig, Mike (2003), *Defence Technology as Security Policy: Defence R&T as a Security Policy Tool in Europe, France, and the UK*, FOI: Stockholm. (FOI-R--0813--SE)

Lindström, Sandra (2003), *Rymdverksamhet vid FOI*, FOI: Stockholm, (FOI-R--0867--SE).

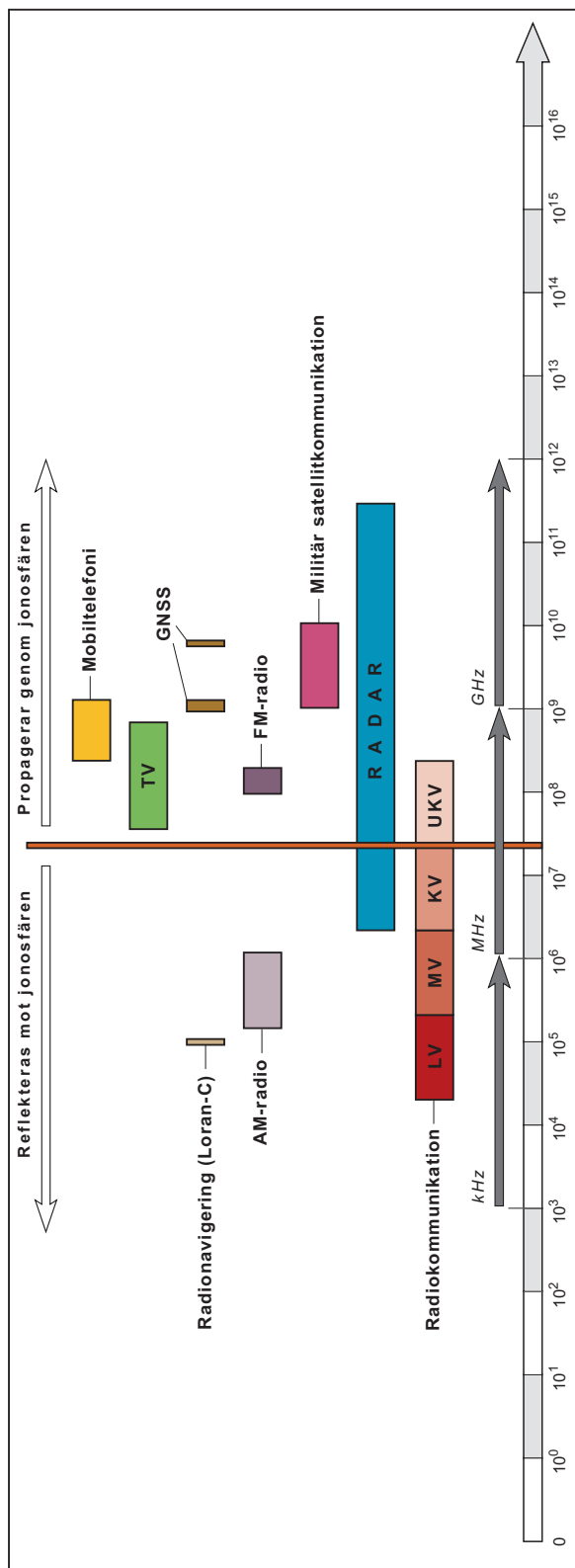
Andersson, Marie (2004), *Satellitspaning vid SamMarin -03*, FOI: Stockholm (FOI-R--1274--SE).

Egnér, Eskil, Höstbeck, Lars & Winnerstig, Mike (2004), *Militarisering av rymden*, FOI: Stockholm (FOI-R--1264--SE).

Ekblad, Ulf, Andersson, Marie, Bergdal, Hans, Lindström, Sandra & Pettersson, Mats (2004), *System av små samverkande satelliter*, FOI: Stockholm. (FOI-R--1149--SE)

Höstbeck, Lars, Waldenvik, Mattias & Winnerstig, Mike (2004), *Strategy for Space*, FOI: Stockholm (FOI-R--1264--SE)

Lindström, Sandra & Waldenvik, Mattias (2004), *Rymdväder - effekter på militära och civila system*, Stockholm, FOI: Stockholm (FOI-R--1464--SE).



Figur 77: De ur rymdteknik intressanta delarna av spektrumet för elektromagnetisk strålning.

Storhet	Längd [m]
1 AE (astronomisk enhet)	149 600 000 000
1 ljussekund	300 000 000
1 ljusminut	18 000 000 000
1 ljusår	9 460 000 000 000 000

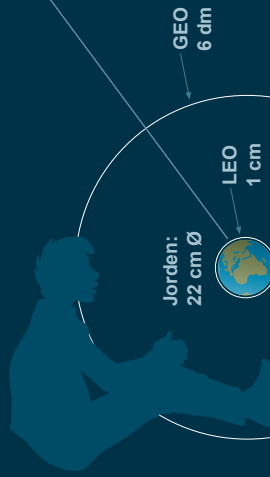
Objekt	Diameter [m]	Avstånd från jorden [m]
Satellit i LEO		200 000 – 5 000 000
Satellit i MEO		10 000 000 – 20 000 000
Satellit i HEO		500 000 – 40 000 000
Satellit i GEO		35 800 000
Månen	3 476 000	384 400 000
Solen	1 392 000 000	149 600 000 000
Jorden	12 756 340	-

Objekt	Avstånd från solen [AE]
Merkurius	0,39
Venus	0,72
Jorden	1,00
Mars	1,52
Jupiter	5,20
Saturnus	9,54
Uranus	19,18
Neptunus	30,07
Pluto	39,44
Närmaste stjärna (4,2 ljusår)	266 000

Om jorden var stor som en fotboll

Bilden visar de relativa storleks- och avståndsrelationerna mellan jorden, månen och solen (undantaget avståndet till solen). Dessutom ser vi avstånden för LEO- och GEO-satelliter. Jämförelsen utgår från att jorden, inför ögonen på en människa, krymper till en fotbolls storlek, d.v.s. 22 centimeter i diameter.

En pojke (170 cm) står vid ett jordklot lika stort som en fotboll. 1 cm från ytan kretsar LEO-satelliterna. 6 dm ifrån ytan kretsar GEO-satelliterna. Drygt 6,5 meter från jorden kretsar månen och drygt 2,5 kilometer från jorden hittar vi solen, vilken som sagt är indragen i bilden.



Avstånd till solen: 2,5 kilometer

Solen 24 meter Ø

Avstånd till månen: 66 meter

Månen: 6 cm Ø



Om solen låg på Karlaplan

Ett annat exempel visar hur långt från solen ett antal planeter skulle ligga om solen hade en diameter på en meter och placerades på Karlaplan i Stockholm.

