

# Spaning mot Rymdteknik 2040, med speciell relevans för försvar och säkerhet

KTH Rymdcenter, 3 juni 2021

## INNEHÅLL

### 1. INLEDNING

1.1 Studiens innehåll och begränsningar

1.2 Grundläggande beskrivning av rymdfart och dess fysikaliska och tekniska begränsningar

### 2. DISKUSSION OM RELEVANT TEKNIK

### 3. TEKNIKOMRÅDEN

3.1 Raketer – rymdtransporter

3.2 Strukturer och mekanismer

3.3 Observation (Optisk, IR, SAR)

3.4 Laser- och annan optisk teknik för rymden

3.5 Rymdlägesbild – upptäckt och inmätning av satelliter och föremål i jordbana

3.6 Antenner och kommunikation

3.7 Signalspaning

3.8 Satellitbaserad positionering, navigering och tidsbestämning (PNT)

3.9 Kvantavkänning och kommunikation för rymden

3.10 Elektronik, speciellt tålig elektronik för rymdtillämpningar

3.11 Artificiell Intelligens (AI) och Kvantdatorer

3.12 Cybersäkerhet i rymden

### 4. SAMMANFATTNING

Deltagande forskare och bidrag

# 1. INLEDNING

## 1.1 Studiens innehåll och begränsningar

KTH Rymdcenter fick ett uppdrag av Försvarets materielverk (FMV) att göra en teknisk prognos av rymdutvecklingen fram till år 2040, och specifikt försöka bedöma militära implikationer. Denna rapport innehåller resultatet och är en sammanställning av bidrag från ett tiotal forskare på KTH i vitt spridda ämnen. Alla bidragsgivare listas i slutet av rapporten.

Vi inleder med en kortfattad grundläggande beskrivning om rymdfart och dess fysikaliska och tekniska begränsningar (kap. 1.2). Den är mest avsedd för en oinsatt läsare av rymdfart och kan hoppas över av andra. Därefter (kap. 2) följer en diskussion om vilken teknik som kan vara relevant för rymdfart och den militära rymddomänen. Kapitel 3 behandlar tolv teknikområden i vart sitt delkapitel. En kort bakgrund inleder delkapiteln, följt av en beskrivning av nuläget och sedan vad som kan förväntas år 2040. Rapporten avslutas med en kort sammanfattning (kap. 4). För att underlätta referenssökande ges referenserna i slutet av varje delkapitel.

Rapporten har fördel av att ha bidrag från många experter i olika områden, men nackdelen är att var och en av dessa haft begränsad tid att behandla sitt område. En annan begränsning är att den militära bakgrundkunskapen relativt rymddomänen för de flesta är närmast obefintlig.

## 1.2 Grundläggande beskrivning av rymdfart och dess fysikaliska och tekniska begränsningar

### a) Historik

Den allra första satelliten, *Sputnik-1*, sköts upp 4 oktober 1957 av Sovjetunionen. Den hade inte mycket mer än en radio, men dess signaler kunde uppfattas av hela världen – när den passerade över olika områden – och närmast chockerade USA. Man förstod omedelbart de möjliga militära implikationerna. Om Sovjet kunde göra detta, vad kunde de då göra mera? Från allra första början var rymdutvecklingen till stor del en militär angelägenhet och de första raketerna som användes var också utvecklingar av interkontinentala ballistiska missiler. Utvecklingen gick mycket fort i början och under många år verkade Sovjet hela tiden ligga steget före USA. Första människan i rymden blev också en sovjet, bara tre och ett halvt år efter *Sputnik-1*, Juri Gagarin den 12 april 1961. När de fantastiska månlandningarna ägde rum, med *Apollo-11* den 20 juli 1969 som den första, så hade dock USA tydligt tagit ledningen och är än i dag den ledande rymdnationen. Sovjetunionen och sedermera Ryssland var under lång tid klar tvåa, men har nu passerats av Kina som även vill hota USA:s ledande position. Apolloprogrammet var civilt, lett av Nasa, men det gjordes i skuggan av det kalla kriget och hade aldrig genomförts annars. Huvudmålet var att en amerikan kunde sätta en amerikansk flagga i mångruset och återvända levande. För det var man beredd till

otroliga insatser och som mest fick Nasa 4,5 % av statsbudgeten i mitten på 1960-talet. Det var ohållbart i längden och man satsade i stället på Rymdfärjan som skulle bli återanvändningsbar och därmed billig och flyga ofta. Den viktigaste delen av rymdfärjesystemet (*Space Transportation System – STS*), den så kallade "Orbitern", kunde visserligen återanvändas, men det blev aldrig billigt och systemet var inte robust. Två katastrofer på 135 starter ledde till att *STS* lades ner 2011, efter att man byggt färdigt (den amerikanska) delen av den internationella rymdstationen *ISS*. Sovjetunionen lyckades aldrig bygga en tillräckligt stor raket för att skicka "sin Apollo" – *Soyuz* – till månen. De övergick i stället till att satsa på rymdstationer. Från 1971 och framåt hade Sovjetunionen, och sedermera Ryssland, nästan hela tiden någon rymdstation med bemanning ombord, där *Mir* var den sista. Både det och Rymdfärjan hade en militär aspekt också. T.ex. så tränades länge kosmonauter att kunna göra specifika observationer från rymdstationerna och rymdfärjorna tog (speciellt i början) hemliga militära laster till rymden. *ISS* är dock helt civil och blev ett resultat av att Ryssland inte hade råd att gå vidare med Sovjetunionens planer på *Mir-2* och USA tvekade om planerna för rymdstationen *Freedom*, som Reagan lanserat med Europa, Japan och Kanada som mindre partners. Man fann en opportunistisk lösning genom att gifta ihop planerna och i viss mån är *ISS* två dockade rymdstationer, i bana på ca 400 km höjd sedan 1998 och kontinuerligt bemannad sedan november 2000. De bemannade rymdprogrammen är visserligen de mest spektakulära och omtalade, men det är ändå bara en mindre del av all rymdverksamhet. Inte militärt i sig, men för att citera US Space Force:s doktrin (US Space Force, 2020): '*Space exploration strengthens diplomatic power by conferring national prestige and generating opportunities for peaceful multinational cooperation*'.

Den kommersiella rymdverksamheten är störst och växer snabbast. Framförallt är det företag som skickar upp tusentals satelliter i låg omlopps bana (LEO) för att kunna ge global täckning av kommunikation för internet, IoT, m.m. Antalet (fungerande) satelliter har fördubblats på bara ett par år till runt 3500 när detta skrivs och förväntas bli minst 10 000, kanske 20 000, inom tio år. Detta är ett resultat av teknikutvecklingen som lett till mindre satelliter och billigare raketer för uppsändning.

För de ledande rymdnationerna (i början USA och Sovjetunionen) har den militära aspekten av rymdens förmågor alltid varit stor och en av de drivande faktorerna till rymdutvecklingen. Det har varit möjligheten att kunna spana över hela jorden, att kunna kommunicera med trupper globalt och sedermera erbjuda exakt positionsbestämning. *GPS* (Global Positioning System) är ett militärt system som opereras av US Space Force, även om det idag har otrolig stor civil användning också. Allmänt kan sägas att den största delen av rymdinfrastruktur har "dual use", d.v.s. kan användas för såväl civila som militära ändamål. Ett snabbt ökat antal länder ser nu de militära möjligheterna och hoten i vad som blivit kallat för rymddomänen.

#### b) Rymdverksamhet

Man talar om tre grenar av rymdverksamhet: Rymdsegment, marksegment och länksegment. Det sista handlar om de signaler, data och kommandon som måste kunna skickas mellan satelliter i rymden och operatörer på marken. Mer generellt bör man säga rymdfarkost. En satellit går i bana runt jorden, men det finns rymdfarkoster

som färdas till Månen, Mars eller andra destinationer. Rymdverksamheten omfattar mycket: Bygga satelliter ("bussen") och de nyttolaster de ska bära. Bygga raketer och skicka upp satelliter med dem. Hantera rymdfarkosterna genom att skicka kommandon och ta emot data de ger. En stor rymdverksamhet är förädlandet av insamlade data och utvecklande av konsumentprodukter från den. Slutligen blir det allt viktigare att hålla koll på alla satelliter, på det rymdskrot som finns och även andra störningar i rymdmiljön som bl.a. kan orsakas av solutbrott och magnetstormar, något som sammanfattas i uttrycket "*Space Situational Awareness*" (SSA). Militärt talar man om rymddomänen och i sammanhanget ofta "*Space Domain Awareness*" (SDA).

c) Satellitbanor

En satellitbana karakteriseras i huvudsak av höjden (de flesta är ganska cirkulära) och banplanets vinkel mot ekvatorn, den s.k. *inklinationen*. Hastigheten sjunker med höjden och omloppstiden ökar. Rymden brukar sägas börja vid 100 km höjd, men där är fortfarande så mycket atmosfär så att ingen satellit kan bli kvar där längre än några dagar. De användbara banorna börjar runt 300 km höjd. Upp till 2000 km talar man om "*Low Earth Orbit*" (LEO) och här befinner sig de flesta satelliter. Omloppstiden i LEO är mellan 90 minuter och två timmar, beroende på höjd. *Polära banor*, där inklinationen är nära 90° är viktiga och populära för jordobservation. När satelliten har gått ett varv har jorden vridit sig en del och nya områden kan observeras. På så sätt kan hela jorden spanas av på låg höjd. Momentant ses bara en begränsad del av jordens yta. Specifikt finns *solsynkrona banor*, som är polära men med en specifik inklination bestämd av höjden som gör att banplanets precession är i takt med jordens rörelse runt solen så att satelliten alltid har solen i samma riktning.

Geostationära banor (GEO) definieras av att omloppstiden är exakt lika med jordrotationen. På så sätt befinner sig satelliten alltid i samma riktning från punkter på jorden (och ser hela tiden samma område, vilket är nästan halva jorden). GEO ligger rakt ovanför ekvatorn och har alltså inklinationen 0°. Avståndet är 36 000 km, alltså 20–100 gånger längre bort än LEO och en tiondel av avståndet till Månen. Kommunikationssatelliter och vädersatelliter är ofta i GEO. En stor fördel är att antenner både på satelliten och på jorden kan orienteras i samma riktning hela tiden, men tidsfördröjningen för en signal är inte försumbar. Det tar runt en kvarts sekund från en punkt på jorden via en satellit i GEO tillbaka till jorden.

Mellan LEO och GEO talar man om *MEO* (Medium Earth Orbit). Speciellt använder *GPS* och andra satellitnavigeringssystem (som Ryska *Glönass*, EU:s *Galileo* och Kinas *BeiDou*) banor runt 20 000 km.

De flesta banor är tämligen cirkulära, men vissa är extremt elliptiska. Speciellt Sovjetunionen hade satelliter kallade *Molniya* som gett namnet till *Molnyabanor*. De går som lägst (periapsis; eng.: *perigee*) på runt 600 km höjd och som högst (apoapsis; eng.: *apogee*) på 40 000 km och har en inklination runt 63°. Då satelliten rör sig mycket fortare på låg höjd än hög så kan den därför i denna bana under en lång tid ligga över samma nordliga latituder (används för bl.a. kommunikation i Ryssland).

d) Raketuppskjutning

Det krävs mycket energi för att komma upp i bana runt jorden. I huvudsak kinetisk energi för LEO, där en hastighet av 7-8 km/s krävs för att inte störta ner på jorden igen.

Den potentiella energin som måste tillföras är bara 10-20% av den totala energin (mer ju högre upp). Grovt kan man säga att det är tio gånger svårare att bli kvar i rymden än att bara nå den (vid 100 km höjd). Av en rakets totalvikt vid starten är det bara några procent som blir över till nyttolasten. Ju större raket, desto effektivare ty andelen "dödvikt" som måste släpas med för att hålla bränslet och själva motorerna (strukturmassan) blir mindre.

Jordrotationen ger ett betydande hastighetsbidrag i östlig riktning vid start. Om möjligt försöker man därför skjuta upp raketer i östlig riktning och väljer en uppskjutningsplats som helst inte ligger på högre latitud än den önskade inklinationen för satelliten. Ska man till GEO önskar man starta från en plats så nära ekvatorn som möjligt. För polära banor spelar startplatsen dock ingen roll.

e) Ändring av satellitbana - Bandydynamik

För att ändra en satellits bana måste man ändra dess hastighet (belopp och/eller riktning). Enda sättet att göra det är med en raketmotor och bränsle (om man bortser från luftmotstånd på mycket låg höjd och möjliga framtida solsegel, men de är hur som helst långsamma processer). Måttet som brukar användas är  $\Delta v$  ('delta-v'), d.v.s. den nödvändiga hastighetsändringen. Med "vanligt" (kemiskt) raketbränsle krävs ungefär 3% av satellitens totalmassa för ett  $\Delta v$  av 100 m/s. Att ändra banhöjden är inte så kostsamt, men att ändra inklinationen signifikant är svårt (kräver mycket bränsle) p.g.a. den höga hastigheten. Men ju högre höjd, desto mindre  $\Delta v$  behövs eftersom hastigheten är mindre.

f) Livstid i rymden

Upp till nästan 1000 km höjd finns det tillräckligt mycket atmosfär kvar för att ge en icke försumbar bromskraft (luftmotstånd). Detta påverkar en satellits livstid i bana, som sjunker exponentiellt med minskad höjd. En kompaktare satellit (högre massa/tvårsnittsyta i färdriktningen) klarar sig längre. En typisk satellit klarar sig runt 100 år på 800 km höjd, tio år vid 500 km men knappt en månad på 300 km. Det finns flera påverkande faktorer, bl.a. solaktiviteter som kan ändra atmosfärens densitet. Det går dock att ligga kvar länge på lägre höjd med hjälp av små raketmotorer som balanseras för att motverka luftmotståndet på den önskade höjden. Ett exempel är ESA:s forsknings satellit *GOCE* som låg på 255 km under flera år. (Man kan roa sig med att göra livstidsberäkningar själv online här:

<https://www.azcalculator.com/calc/satellite-orbital-decay.php> ).

g) Satellitbuss och nyttolast

Det är brukligt att skilja mellan den hårdvara på satelliten som ger, eller utför, den tjänst eller tillämpning som önskas, "nyttolasten" och själva satellitplattformen, "satellitbussen". Exempel på nyttolaster är radio och antenner för kommunikation mellan punkter på jorden (eller andra satelliter), kamera, radar eller annat för observation, atomklockor som ger exakta tider för satellitnavigeringssystem och instrument för forskning. De flesta satellitbussar har samma uppsättning av subsystem: Omborddator för att styra allt; kommunikationssystem för att ta emot styrkommandon och skicka ner data; kraftsystem för att ge elektricitet (oftast solpaneler och batterier); attitydsystem för att orientera satelliten rätt; temperaturstyrning (ofta passivt, men aktiv styrning behövs ibland); banstyrningssystem,

vilket kräver en mindre raketmotor, och finns ofta på större satelliter men saknas på mindre. Det finns många företag som har specialiserat sig på att bygga satellitbussar som de erbjuder kunder som vill få upp en nyttolast i bana och oftast integrerar de även nyttolasten på satelliten åt kunden. Tre sådana företag är verksamma i Sverige: OHB-Sweden (tysk ägare), AAC Clyde (svensk-skotskt) och GomSpace (huvudkontor i Danmark).

#### h) Rymdmiljö

Det finns ett flertal speciella faktorer i rymden som måste beaktas när en rymdfarkost konstrueras.

Tyngdlöshet, vilket gör att många fenomen uppträder annorlunda. Det går t.ex. inte att använda rinnande vätskor på vanligt sätt.

Vakuum, vilket bl.a. sätter begränsningar på de material som används.

Neutrala partiklar i LEO begränsar inte bara livstiden (se ovan) utan utgör även ett problem då partiklarna delvis består av atomärt syre som är mycket kemiskt reaktivt.

Plasma som bärs av solvinden och som kan ladda upp rymdfarkoster och orsaka elektriska problem.

Mikrometeoriter som riskerar att skada rymdfarkoster och i värsta fall helt förstöra dem. Enda skyddet är att göra dem tåligare.

Rymdskrot är ett växande problem, framförallt i LEO. Objekt större än 5-10 cm kan spåras med radar från jorden och om en satellit har möjlighet (raketmotor) kan den ev. hinna manövrera undan. Men de runt en miljon fragment i storleken 1-10 cm kan bara hanteras på samma sätt som mikrometeoriter.

Strålning, som är i huvudsak elektroner, protoner och atomkärnor som kommer från solen och bortom solsystemet med mycket hög energi. Många av dem fångas i jordens magnetfält och vissa områden har mycket hög täthet av dem. Dessa partiklar kan skada elektroniken ombord, vilket gör att det oftast krävs strålningshärdiga komponenter. Strålningen är även skadlig för människor och det finns regler för hur mycket strålning astronauter får utsättas för. UV-ljus från solen är också mycket kraftigare än på jorden och måste beaktas.

#### Referenser

US Space Force (2020), Space Capstone Publication, *Spacepower (SCP)*

<https://www.spaceforce.mil/Portals/1/Space%20Capstone%20Publication%2010%20Aug%202020.pdf>

## 2. DISKUSSION OM RELEVANT TEKNIK

I kapitel 3 berörs ett antal teknikområden som är viktiga för rymdverksamhet och som bedöms vara relevanta på ett eller annat sätt för en förståelse av rymddomänens framtida användning i ett militärt avseende. I detta kapitel diskuteras lite allmänt om olika tekniker och vissa aspekter som inte tas upp i Kap. 3.

Raketer, som behandlas i Kap. 3.1, är uppenbarligen fundamentala för all rymdverksamhet. Än idag är den grundläggande tekniken mer eller mindre densamma som den som nyttjades i början av rymdåldern i slutet på 1950-talet: en kemisk reaktion som ger heta gaser som sänds ut i riktning motsatt dit man vill fara. Priset för raketer faller dock nu snabbt delvis tack vare att de blir återanvändbara men även då bl.a. additiv tillverkning (3D-printning) börjat användas liksom en robustare design. Det ledande företaget är Space X som nu utvecklar en stor bärraket *Starship* med ett startsteg *Super Heavy* som ska kunna ta en last på 100 ton till LEO och vars båda steg skall vara helt återanvändningsbara. VD:n Elon Musk har hävdade att priset kan bli så lågt som 20 \$/kg, vilket skulle motsvara drygt hälften av bränslekostnaden (LOX och metan). Det sker för närvarande ingen utveckling av mer spekulativa uppsändningsmetoder, som elektromagnetiska kanoner eller en "rymdhiss" förankrad i en GEO-bana (först föreslagen av författaren Arthur C. Clarke). Men utvecklingen av "vanliga" raketer går mycket fort och ur militär synvinkel bör man förvänta sig att många nationer år 2040 kommer att ha förmågan att skicka upp satelliter samt att några även rutinmässigt skickar farkoster till Månen, som har potential att kunna utnyttjas militärt t.ex. för att gömma rymdfarkoster långt borta eller placera mer skyddade kommunikations- och övervakningsapparater.

Raketmotorer är också väsentliga för att rymdfarkoster ska kunna manövrera i rymden. För detta har en ny teknik börjat användas, elektrisk framdrivning. Ett elektromagnetiskt fält accelererar plasma som skickar iväg joner med väldigt hög hastighet och som därmed skapar den reaktiva kraften på rymdfarkosten (O'Reilly, 2021). Dessa motorer kan inte ge stor kraft (och kan därför inte användas för uppsändning från jorden) men är mycket effektiva i förhållande till bränslevikten. Den specifika impulsen  $I_{sp}$ , som ger ett mått på hur effektiv ett bränsle är, ligger på 1000-tals Ns/kg. Detta kan jämföras med  $I_{sp}$  för de bästa kemiska bränslena som ligger runt 400 Ns/kg. En begränsning är genereringen av det elektromagnetiska fältet och den energi som behövs för det. I framtiden kommer sannolikt kärnkraft att användas för detta på vissa rymdfarkoster och där talas det om en  $I_{sp}$  på 10 000 Ns/kg (O'Reilly, 2021).

Kärnkraft som ger elektricitet på satelliter har använts i Sovjetunionen under 70- och 80-talen (Grah, 2004), men har hittills varit närmast tabu i västvärlden. Den är bra inte bara för elektrisk framdrivning, utan även för satelliters apparatur (radar, datorer, radio...) där den begränsande faktorn ofta är tillgänglig energi. År 2040 bör man räkna med att användning av kärnkraft på rymdfarkoster, däribland satelliter, har börjat nyttjats och därmed ökat satelliternas prestanda avsevärt.

Miniaturisering av elektronik, men även mekanik, är en drivande faktor till att satelliter kan göras mycket mindre idag än tidigare med samma prestanda. Standardisering av många

produkter gör att konstruktion och tillverkning blir billigare, liksom en ökande användning av additiv tillverkning. Ett exempel på standardisering är CubeSat-formatet för struktur och storlek av små satelliter. Det föreslogs av professorerna Jordi Puig-Suari vid California Polytechnic State University och Bob Twiggs vid Stanford University år 1999 för att ge studenter en möjlighet att konstruera egna satelliter. Basenheten är en kub på 1 dm x 1 dm x 1 dm, vilket idag kallas en 1U CubeSat. Numera finns CubeSats i multiplar av detta, såsom 2U, 3U, 6U, 12U etc. vilket blivit en industristandard. En annan utveckling är att satellitkomponenter görs mer och mer av COTS-produkter (*Commercial-Off-the-Shelf*). Det kan vara billigare att låta en och annan satellit gå sönder än att bygga noggrant och testa utförligt. Dessa trender lär fortsätta varvid allt fler kommer att få råd med egna satelliter, återigen inklusive många militära användare som idag inte anser sig ha det. Strålningshärdig elektronik är dock en ganska speciell komponent för satelliter och diskuteras i Kap. 3.9.

Den mycket snabba utvecklingen av datorer, AI och ML (maskininlärning) påverkar förstås också rymdverksamheten (Kap. 3.11). Mer datorkapacitet kommer att kunna installeras på satelliter och redan idag börjar AI användas på vissa. Med AI ombord kan satelliten själv avgöra om något den observerar (Kap. 3.3) eller "hör" (Kap. 3.7) är av intresse och välja om, och när vilken specifik information som ska skickas ner. Dels sparar det bandbredd för nerladdning (som är en begränsande faktor idag), dels kan viktig information som beslutsfattare behöver snabbt få hög prioritet och fort nå fram. Detta är speciellt relevant för försvaret både i gråzonsläge och stridssituationer. En begränsande faktor idag för AI på satelliter är att det drar mycket elektrisk ström, men med kombination av än effektivare datorer och mer tillgång på el (även solpaneler blir billigare och effektivare förutom lösningen med kärnkraft längre fram) lär det komma att finnas mycket kraftfull AI som nyttjas på satelliter år 2040.

För snabb kommunikationen med satelliter och för att öka datamängderna arbetas det för närvarande i (åtminstone) två områden: optisk kommunikation (diskuteras delvis i Kap. 3.4 och 3.9) och mellansatellitkommunikation (ISL – *InterSatellite Link*). Förutom den högre hastigheten för dataöverföring har optiska länkar fördelen att de är betydligt svårare att tjuvlyssna på då dessa är väldigt fokuserade. Detta är naturligtvis av betydande militärt intresse. Nackdelen är att strålen måste kunna peka mycket noga och att den störs av moln. Kommunikation mellan satelliter har använts länge, ofta via GEO-satelliter. T.ex. så använder NASA det GEO-baserade TDRSS (Tracking and Data Relay Satellite System) för att upprätthålla (nästan) kontinuerlig kontakt med ISS. Signaler från ISS går sällan direkt till marken utan via dessa satelliter i GEO. (Ryssland använder sig dock mest av markstationer inom sina gränser för direkt kommunikation med sin del av ISS, men kan även utnyttja NASA:s TDRSS varvid signaler går ISS-TDRSS-Houston-Moskva.) Den kvartssekund fördröjning av signaler som ändå fås av att gå via GEO kan minskas signifikant genom att utnyttja nät av satelliter i LEO, men det kräver ett bra system för kommunikation mellan satelliterna. Den första fungerande satellitkonstellationen för internet, Space X:s *Starlink*, har nu börjat beta-testats. Den använder optiska länkar mellan satelliterna (Starlink, 2021).

Alltefter att resurser och infrastruktur, både civila och militära, stationeras i rymden ökar risken för att de störs eller slås ut av främmande makt, terrorister eller hackers. Teknik för detta tas inte upp speciellt i denna rapport, utan här nämns bara olika metoder. Kinetiska



missiler från mark, flygplan eller satellit i omloppsbanan som direkt krockar med en satellit man vill slå ut. Detta har visats av flera nationer redan (USA, Ryssland, Kina och Indien). Den stora nackdelen är att mycket rymdskrot skapas och nationer som själva har (eller vill ha) satelliter är nog obenäga att använda detta, men för en svag motståndare (t.ex. Nordkorea, Iran) kan det vara frestande. Icke-kinetiska vapen som diskuteras är smygsatellit, laser, högenergi mikrovågor och kärnvapendetonationer på hög höjd. En smygsatellit kan t.ex. vara en mycket liten satellit som kan släppas av från en större satellit vid tillfälle och helst (från angriparens synpunkt) obemärkt ta sig till en fiendesatellit och göra den obruklig på ett eller annat sätt. Lasrar har testats, men är ännu inte tillräckligt kraftiga för att åstadkomma större skador än att de kan blända (och förstöra) optiska sensorer i LEO. År 2040 kan dock mycket väl lasrar vara så kraftiga att de kan slå ut satelliter i LEO och kanske även i GEO från marken. Lasrar på satelliter behöver inte vara lika kraftiga för att ändå vara effektiva vapen, men begränsas av den tillgängliga energin (se ovan). En kärnvapendetonation skulle kunna skapa en strålningsmiljö som omöjliggör användning av någon satellit i stora områden men det får nog anses vara mycket liten risk att det används. Den största risken är störning, spoofing eller spionering av signaler från eller till satelliter på olika sätt. Framför allt tidssignalerna från GPS och andra GNSS är lättstörda och det finns många dokumenterade fall då detta skett. Ett motmedel som utvecklas är smartare analys av signalen där man bl.a. kan se vilken riktning den kommer ifrån. En falsk signal kommer troligen från en riktning nära horisonten medan en äkta från himlen. Slutligen är cyberattacker en risk för satelliter, vilket tas upp i Kap. 3.12. Av allt i detta stycke kan man förstå att det kommer bli önskvärt att utveckla försvars- och skyddsmekanismer för värdefulla satelliter.

Med allt fler och allt kapablare satelliter bör man förvänta sig att inom några år, och definitivt 2040, att varje punkt på jorden kan observeras i stort sett när som helst på något sätt. Emellertid är t.ex. optiska kameror inte användbara för observationer genom moln och knappast på natten. Å andra sidan kan SAR (*Synthetic-Aperture Radar*) ta bilder när som helst och kan därför, liksom signalspaning, pågå alla tider på dygnet och se genom moln. Det stora flertalet av satelliterna kommer att vara kommersiella och i konfliktsituationer kan det bli begränsningar när det gäller vem som får köpa vad. Ryssland kommer sannolikt inte ha tillräckligt många egna satelliter för kontinuerlig bevakning och därmed blir det extra intressant för svenska försvaret att veta när och var de ryska satelliterna är – och vad de klarar av. Radarsignaler från SAR är inte svåra att störa och störapparatur kommer helt säkert att utvecklas (vissa kanske har det redan).

## Referenser

Grahn, S., (2011) *The US-A program (Radar Ocean Reconnaissance Satellites - RORSAT) and radio observations thereof*. <http://www.svengrahn.pp.se/trackind/RORSAT/RORSAT.html>

O'Reilly, Dillon; Herdrich, Georg; Kavanagh, Darren F. 2021. *Electric Propulsion Methods for Small Satellites: A Review*. *Aerospace* 8, no. 1: 22. <https://doi.org/10.3390/aerospace8010022>

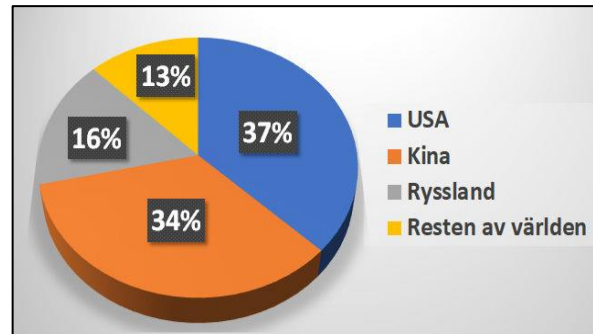
Starlink (2021) [https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink#Constellation\\_design\\_and\\_status](https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink#Constellation_design_and_status)  
[28/5/2021]

### 3. TEKNIKOMRÅDEN

#### 3.1 Raketer – rymdtransporter

##### Bakgrund

**Trafikintensitet:** Under det Kalla Kriget utfördes 120–130 satellituppskjutningar om året. Därefter följde en lång nedgångsfas, men nu är antalet uppsändningar på väg upp till forna nivåer. Den stora ökningen är p.g.a. att små satelliter har blivit mycket vanligare och att de kan leverera användbara tjänster och driftsättning av stora satellitkonstellationer för internettjänster. Figur 1 visar den geografiska fördelningen av uppsändningar under 2020.



Figur 1: 105 uppsändningar under 2020. 24 med Falcon 9. Totalt användes 21 olika rakettyper för dessa 105 uppskjutningar!

**Kommersialisering:** Dessa två kundtrender (många små satelliter och stora konstellationer) har gjort att utbudet av kommersiella uppsändningstjänster ökat påtagligt. För mindre satelliter finns ett utbud av "bussresor" (många satelliter på en raket). "Taxi"-uppskjutningar, d.v.s. med bara en satellit ombord är relativt ovanliga. Idag erbjuds satellituppsändningar t.o.m. på Internet till angivna priser.

**Uppsändningspris:** För närvarande anges öppet priser för satelliter på upp till 300 kg:s massa och för sådana är priset 6 000 \$/kg (Spaceflight, 2021). För att belysa hur uppsändningspriset sjunkit kan nämnas att SSC 1990 köpte uppskjutningen av Freja-satelliten (274 kg) från Kina som en medpassagerare för 15 000 \$/kg i den tidens penningvärde, motsvarande 30 000 \$/kg i dagens penningvärde. Priset för den satellitklassen har således fallit med en faktor 5 på trettio år. För transporter till geostationär transfer bana ligger lägsta priset (SpaceX) runt 10 000 \$/kg, om man köper hela raketens kapacitet.

##### Nuläge

**Återanvändning:** Efter SpaceX:s framgång med återanvändningen av första steget av Falcon 9 pågår utveckling av liknande system i hela världen. Återanvändbara raketsteg utmärks av att de "byter" återanvändbarhet mot prestanda. För att undvika höga påkänningar på raketmotorerna går trenden mot fler och mindre raketmotorer med lägre brännkammарtryck och vars turbindrivna bränslepumpar arbetar på lägre effektuttag per massenhet (Preklik, 2011). Ju lägre effektuttag desto längre tid mellan översyner. Hittills har inga övre raketsteg återvunnits och använts igen. Orsaken är att övre steget i en tvåstegsraket måste återvända från omloppsbanehastighet med åtföljande höga termiska påkänningar.

**Drivmedel:** Utfasningen av giftiga, hypergola, drivmedel har pågått det senaste decenniet. Endast i vissa övre steg och i rymdfarkoster kommer dessa drivmedel kanske att finnas kvar, men annars är det endast Kina och Ryssland som fortfarande använder dessa bränslen, men även dessa länder arbetar intensivt på att eliminera dem. Den bränslekombination som ersätter de hypergola bränslena är oftast fotogen/flytande syre ("kerolox"). ESA:s nya Ariane 6 använder dock flytande syre/väte (LOX/LH2) i de två första stegen (och startraketer med fast bränsle) och detsamma gäller Kinas största bärraket Långa Marschen 5.

### Prognos 2040

**Full återanvändbarhet** hos flera bärraketer/ uppsändningssystem är högst sannolik. Det utvecklingsarbete som pågår f.n. mot detta mål är det intensiva testprogrammet för SpaceX:s gigantiska tvåstegsraket Starship där försök att lösa landningsproblemet för andra steget pågår. Hittills har detta innefattat själva aerodynamiken under den allra sista landningsfasen. Nästa steg i utvecklingen är att prova värmeisoleringen som skall skydda raketerna mot aerodynamisk uppvärmning. Ett modernare och radikalt mindre underhållskrävande "kakelmateriale" än det som användes på Rymdfärjan behövs.

**Metan är nyckeln till återanvändbarhet.** En stor del av översynen av en Falcon 9-raket mellan uppsändningar är att "sota" raketmotorerna, d.v.s. ta bort rester från förbränningen av fotogen (RP-1). Därför går trenden mot att använda metan i stället för fotogen. Metan ger inte upphov till samma problem med fotogen-sot och har prestanda som är relativt jämförbar med fotogen. SpaceX Starship är utrustat med SpaceX:s Raptor-motor som drivs med LOX/Metan och har ett rekordhøgt brännkammtryck (330 bar). Ett forskningsprojekt finansierat av Rymdstyrelsen och ESA pågår på KTH i samarbete med GKN Aerospace för att studera användningen av metan i raketmotorer med fokus på koksning av metan i kylkanaler. Forskningen är relaterat till ESA:s Ariane 6 program och den metandrivna raketmotorn Prometheus (KTH, u.å.).

**Små/stora raketer:** SpaceX arbetar på sin gigantiska Starship-raket (se ovan) som företaget säger kan täcka marknadens alla behov! Samtidigt pågår på tre kontinenter för närvarande utveckling av ett tiotal större bärraketer och ett tjugotal små bärraketer (nyttolast till låg bana <1500 kg). Finns det en marknad för alla dessa raketer? Hur många av dessa finns på marknaden om 20 år? Hur många aktörer kommer det överhuvudtaget att finnas på uppskjutningsmarknaden? I Sverige satsar SSC, med regeringens stöd på att bygga ut Esrange för att kunna sända upp medelstora raketer (med vätskemotorer) med nyttolast till omloppsbana, som visar en tydlig vilja att göra Sverige till ett "uppskjutningsland" – sannolikt i konkurrens med främst Norge (Andøya) och UK. Esrange har dessutom byggt upp och tagit i drift anläggningar för raketutvecklarens markprov med vätskeraketmotorer.

Om uppbyggnaden av konstellationer för internetkommunikation med tiotusentals satelliter fortsätter behöver dessa konstellationer ständigt fyllas på. Så marknaden för medelstora och stora bärraketer finns med stor sannolikhet också om tjugo år. Små satelliters förmågor kommer att öka och utgöra en marknad för små bärraketer som kan

ha behov av "taxi"-tjänster till speciella banor. En viss utslagning eller sammanslagning av vissa små raketföretag kan man förvänta sig.

**Reaktionstid:** Ett behov av att snabbt kunna placera en satellit i omloppsbanan, även en liten satellit, har länge framförts av militära planerare i USA och termen "Responsive Space" var mycket omtalat för 5-10 år sedan. Idéer om att på en vecka bygga ihop satelliter med nya förmågor med s.k. "plug-and-play"-teknik var en del av idéerna bakom "Responsive Space". I mitten av 2010-talet pågick åtskilliga studier av bäraketer med sådan snabb reaktionsförmåga, även



Figur 2: Den flygplanburna ALASA-raketen som projekterades av DARPA.

flygplanburna. USA:s DARPA<sup>1</sup> arbetade aktivt på sådana projekt, särskilt det originella ALASA-projektet (Fig. 2). Inget av dessa projekt har resulterat i något användbart system. Nyligen har DARPA ånyo startat ett program för att "Launch Fast, Change Sites, Launch Fast again" den s.k. [DARPA Launch Challenge](#). 18 förslag har kommit in till denna tävling. De nya små bäraketer som redan är under utveckling kan tillhandahålla kort reaktionstid från fasta startplatser, men DARPA:s nya initiativ förefaller vara inriktat på att snabbt kunna växla startplats – förmodligen för att göra uppskjutningssystemet mindre sårbart.

**Flygplanburna bäraketer:** Redan 1958 försökte USA:s flotta placera en satellit i omloppsbanan med en flygplanburen raket. Det finns två operativa flygplanburna bäraketer – det trettio år gamla Pegasus-systemet och Virgin-koncernens LauncherOne. Pegasus används mycket sparsamt och snabb reaktionstid är inte det första man tänker på när det gäller Pegasus. Launcher One har en vätskedriven (Kerolox) raket som bärs upp av en Boeing 747. Raketen väger 30 ton och kan sända 300 kg till en bana på 500 km. Flygplanburna bäraketer diskuterades mycket i fackpress och på konferenser för några år sedan (Talbot, 2008) och studerades också i Sverige (Sigvant, 2020). Om någon stat vill, i hemlighet, skaffa sig förmågan att skicka upp satelliter med hjälp av flygplan är detta fullt tekniskt möjligt. Sådana uppsändningar kan sedan ske över avlägsna havsområden och uppsändningen möjligen döljas. Den satellit som sänds upp kommer att upptäckas, men ursprunget kan vara svårare att ta reda på.

### Sammanfattning

Trender som kan förväntas fortsätta fram till 2040: Ökad trafik, kommersialisering, återanvändbarhet, sjunkande priser för uppsändningar, ständigt kortare tid från kontrakt till uppsändning, raketer i olika storleksklasser, uppsändningstjänster för både "taxi"- och

---

<sup>1</sup> Defense Advanced Research Projects Agency.

”buss”-resor. System för militärt bruk med snabb reaktionstid och förmåga att växla startplats och starta från dold plats (flygburen start) är möjliga men inte troliga – det kan vara klokare att förvara sina rymdresurser insatsberedda i rymden än på marken.

## Referenser

KTH (u.å.) [Methane in Rocket nozzle cooling channels - conjugate heat Transfer measurements \(MERiT\)](#) [29-4-2021]

Preclik, D. et al. (2011), *Reusability aspects for space transportation rocket engines: programmatic status and outlook*. CEAS Space J, 2011, 1:71–82, DOI 10.1007/s12567-011-0006-x

Sigvant, J., (2020) KTH M.Sc. thesis, [Conceptual Design of an Air- launched Multi-stage Launch Vehicle](#).

Spaceflight Services (2021), [Pricing - Spaceflight](#) [29-4-2021]

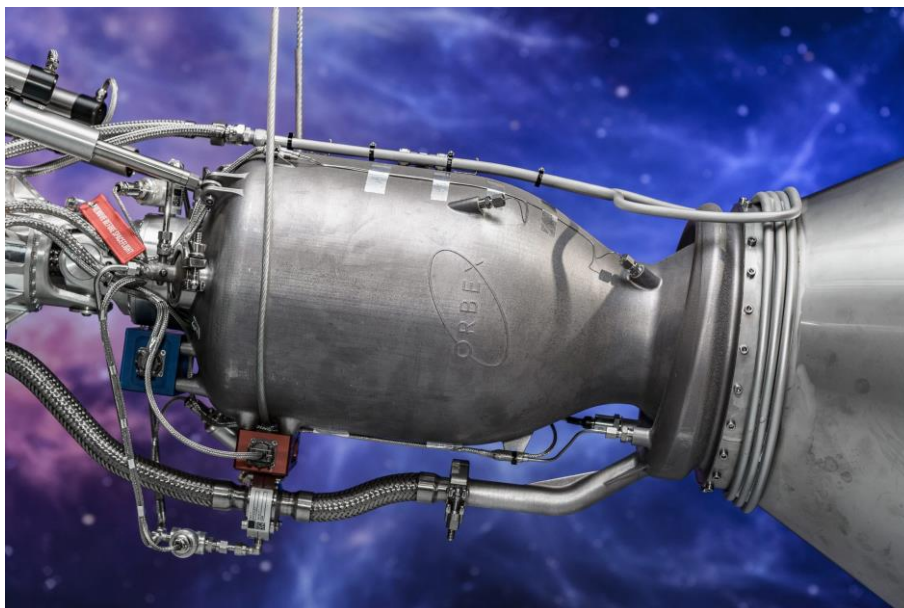
Talbot, C. and Bonna, C. (2008), [Air Launch Solutions for Microsatellites CNES, Launcher Directorate \(Evry, France\)](#) [30-5-2021]

## 3.2 Strukturer och mekanismer

### Nuläge

Sedan rapporten *State of the Art: Small Spacecraft Technology* (NASA, 2018) publicerades har additiv tillverkning av delar och subsystem för bärraketer och satellitstrukturer tagit rejäla steg och bidragit till en fundamental förändring av rymdindustrin genom större utformningsfrihet, reducerad vikt och lägre kostnader. Den internationella rymdstationen (ISS) är numera en testbädd för tekniker för kommersiell additiv tillverkning. Listan på rymdföretag som använder additiv tillverkning i en mängd olika material för olika delar av bärraketer och satelliter växer hela tiden (Listek, 2021): *3D Bioprinting Solutions* (Ryssland), *ABL Space Systems* (USA), *Aerojet Rocketdyne* (USA), *AgniKul Cosmos* (Indien), *AI Space Factory* (USA), *Airbus* (Nederländerna), *Anywaves* (Frankrike), *Astra Space* (USA), *Axiom Space* (USA), *Blue Origin* (USA), *Boeing* (USA), *Dawn Aerospace* (Nya Zeeland & Nederländerna), *Dhruva Space* (Indien), *Dynetics* (USA), *Gilmour Space Technologies* (Australien), *Intuitive Machines* (USA), *KULR Technology Group* (USA), *Lockheed Martin* (USA), *Masten Space Systems* (USA), *Mini-Cubes* (USA), *Northrop Grumman* (USA), *OHB* (Tyskland), *Optisys* (USA), *Parabilis Space Technologies* (USA), *Rocket Crafters* (USA), *RUAG* (Schweiz), *Skyroot Aerospace* (Indien), *Skyrora* (Storbritannien), *SpaceX* (USA), *Stratodyne* (USA), *Swissto12* (Schweiz), *Thales Alenia Space* (Frankrike & Italien), *United Launch Alliance* (USA), *Ursa Major Technologies* (USA) och *Virgin Orbit* (USA).

Företaget *AgniKul Cosmos* (Indien) använder additiv tillverkning för att tillverka sin raketmotor *Agnilet*, för flytande bränsle, i ett stycke; motorn är tillverkad och klar att monteras i deras bärraket *Agnibaan* (för mikro- och nanosatelliter) på mindre än 72 timmar, (Listek, 2021). Företaget *Launcher Space* (USA) har genom det tyska företaget AMCM (och deras 3D-printer M4K) additivt tillverkat vad som påstås vara världens största förbränningskammare för flytande raketbränsle. Företaget *Rocket Lab* (USA) har i sin bärraket *Electron* en raketmotor (*Rutherford*) som kan tillverkas på endast 24 timmar. Bärraketen *Orbex Prime*, utvecklad av det brittiska företaget *Orbex*, kommer att använda en raketmotor som tillverkats i ett enda stycke (utan skarvar eller svetsar), Figur 3.





Figur 3: Additivt tillverkad raketmotor från företaget Orbex, <https://orbex.space>.

Företaget *Relativity Space* (USA) har utvecklat en egen utrustning för additiv tillverkning, som tillverkar en hel bärraket på endast två månader. Raketstrukturen tillverkas i ett enda stycke och företaget har reducerat antalet delar i bärraketen med en faktor 100, från 100 000 till 1 000 delar, Figur 4.



Figur 4: Additiv tillverkning av en hel raketstruktur, <https://www.relativityspace.com>.

Mekanismer, eller utfällbara strukturer, är kritiska subsystem för satelliter för ökade prestanda, t.ex. solpaneler för högre elkraftsproduktion och antenner för kommunikation med mer information. De senaste åren har flera utfällbara strukturer för små satelliter utvecklats; produkter med högre packningsgrad än tidigare. Det israeliska företaget NSLcomm har utvecklat en reflektorantenn för kommunikation med hög bandbredd med hjälp av minnespolymer (*shape memory polymer*) som hopfälld har en volym av två liter och ryms inom 2U, Figur . För att kompensera för imperfektioner i ytan på den utfällda reflektorantennen används en subreflektor med ett adaptivt felkorrektionsystem. Denna antenn var ombord på en 6U-satellit som skickades upp 2019 och som byggdes av *AAC Clyde Space* (FMV, 2020). Flera andra rymdföretag utvecklar och tillverkar utfällbara strukturer för satelliter av olika storlek (Werner, 2019; Hill, 2021): *Oxford space systems* (Storbritannien), *MMA Designs* (USA) och *Redwire* (USA). Behovet av nya koncept för nya utfällbara strukturer med ännu högre packningsgrad och funktionalitet är stort, t.ex. för solenergisatelliter (Gdoutos et al., 2020).





Figur 5: Utfällbar reflektorantenn för nanosatellit, <https://www.nslcomm.com>.

Företaget *Made In Space* (USA) har arbetat med additiv tillverkning i rymden sedan ca 2010. Deras första utrustning för additiv tillverkning i tyngdlöshet skickades till ISS år 2014. En uppdaterad utrustning, *Additive Manufacturing Facility* (AMF), skickades till ISS år 2016. (Listek, V., 2021). *Made In Space* utvecklar nu den additiva tillverkningsutrustningen *Archinaut* (Fig. 6), som är försedd med en robotarm och som är tänkt att installeras externt på ISS för bl.a. additiv tillverkning och montering av reflektorantenn, men också för reparationer. En robotiserad tillverkningsplattform på ISS öppnar upp för helt nya möjligheter till storskalig tillverkning av strukturer i rymden (All3dp, 2021). Företaget *Kleos Space* (USA, Luxemburg och Storbritannien) utvecklar utrustning för additiv tillverkning av kolfiberkomposit som kan användas för att bygga upp stora solarpaneler. En prototyp av utrustningen har på marken tillverkat en 100 m lång I-balk i kolfiber, Figur , (Werner, 2021).



Figur 6: Archinaut One för additiv tillverkning i rymden, <https://madeinspace.us>.



Figur 7: Rymdtillverkningsutrustning för tillverkning av kolfiberkompositer, <https://kleos.space>.

### Prognos 2040

Rapporten Militärteknik 2045 (Kindvall & Lindberg, 2020) har en bra genomgång av additiv tillverkning. Genomgången ovan visar att inom några år kommer additiv tillverkning av raketer och satelliter vara den dominerande tillverkningsmetoden, nästan oberoende av material, eftersom företag redan nu använder additiv tillverkning för i princip hela raketer och raketmotorer, men även raketbränsle. Additiv tillverkning i rymden kommer att vara möjligt så fort de additiva tillverkningsutrustningarna *Archinaut* från *Made In Space* och *Futrism* från *Kleos space* tas i bruk, vilket sannolikt inte är många år bort (framförallt gällande *Archinaut*). Detta kommer att öppna upp för tillverkning av mycket stora solpaneler och antenner, med en kapacitet som idag inte är möjlig genom endast utfällbara strukturer. Tillverkning av strukturer i rymdens tyngdlöshet och vakuum var en av punkterna på Bekey's lista "*High-leverage principles to pursue in space concepts: don't fight the space environment – use it to advantage*" (Bekey, 2003) och mycket snart är detta en realitet. Prognosen är att år 2040 finns det fullt fungerande (TRL 9) additivt tillverkade solpaneler och reflektorantennor i mindre storlek i bana runt jorden. Solpaneler och reflektorantennor av större storlek antas fortfarande ha lägre TRL år 2040.

### Referenser

All3dp, *3D Printing in Space: To Boldly Go Where 3D Printing Has Never Gone Before*, <https://all3dp.com/2/3d-printing-in-space-projects/> [2021-05-11].

Bekey, I., *Advanced Space System Concepts and Technologies: 2010–2030+*, The Aerospace Press, El Segundo, USA, 2003.

FMV, *Miniatyrsatelliter – en bakgrundsstudie*, Dokumentnummer: 19FMV5706-27:1, Datum: 2020-09-09, 45 sidor.

Gdoutos, E. E., Truong, A., Pedivellano, A., Royer, F., and Pellegrino, S. *Ultralight Deployable Space Structure Prototype*. SciTech 2020, Orlando (FL), 2020, AIAA-2020-0692.

Hill, J., *Redwire Delivers the ISS' New Roll-Out Solar Arrays to Boeing*, <https://www.satellitetoday.com/innovation/2021/05/07/redwire-delivers-the-iss-new-roll-out-solar-arrays-to-boeing/>, 2021. [Publicerad: 2021-05-07].

Kindvall, G. & Lindberg, A. (red.), *Militärteknik 2045: Ett underlag till Försvarsmaktens perspektiv-studie*, FOI-R--4985--SE, November 2020.

Listek, V., *3D Printing and the Future of Space*, <https://3dprint.com/278887/3d-printing-and-the-future-of-space/>, 2021. [Publicerad: 2021-03-22].

NASA, *State of the Art: Small Spacecraft Technology*, NASA/TP-2018-220027, Ames Research Center, 2018.

Werner, D., *Seeking Next-gen Antennas? Remain Flexible.*, <https://spacenews.com/seeking-next-gen-antennas-remain-flexible/>, 2019. [Publicerad: 2019-09-02].

Werner, D., *Kleos Space Develops Tool for In-space Manufacturing of Large Structures*, <https://spacenews.com/kleos-in-space-manufacturing/>, 2021. [Publicerad: 2021-04-30].

Hill, J., *Redwire Delivers the ISS' New Roll-Out Solar Arrays to Boeing*, <https://www.satellitetoday.com/innovation/2021/05/07/redwire-delivers-the-iss-new-roll-out-solar-arrays-to-boeing/>, 2021. [Publicerad: 2021-05-07].

### 3.3 Jordobservation

#### Bakgrund

Sedan Explorer 6 tog den första bilden av jorden 1959 har det skjutits upp över niohundra satelliter för jordobservation (EO från *Earth Observation*). Av dem är 419 kommersiella satelliter, 278 och 26 tillhör regeringar och universitet, medan 175 är militära och 7 är militära och statliga samarbeten. Förenta staterna (USA) är ledande när det gäller ägande och kontroll av EO-satelliter, med 407 helägda satelliter och 7 som ägs gemensamt av USA och andra länder. Kina kommer på andra plats, med 201 helägda satelliter och 3 samägda satelliter som ägs av Kina och andra länder. Japan, Ryssland, Indien och Europeiska rymdorganisationen (ESA) har också betydande andelar av EO-satelliterna. Av de 905 EO-satelliterna är 317 CubeSats (1-10 kg) och 100 mikrosatelliter (10-100 kg), nästan hälften av det totala antalet EO-satelliter, enligt uppgifter från Union of Concerned Scientists (USC, 2021). Kommersiella enheter har varit drivkraften bakom den exponentiella tillväxten av EO-satelliter med uppskjutningar av CubeSats och mikrosatelliter under de senaste åren. Som en jämförelse kan nämnas att det totala antalet civila EO-satelliter är 197 år 2013 med endast 4 CubeSats, dvs. Planet Labs Dove-1 till 4 (Belward, 2015).

#### Nuläge

Sensorerna på EO-satelliterna omfattar multispektrala sensorer, hyperspektrala sensorer, termiska skannrar, passiva mikrovågor och syntetisk aperturradar (SAR). Det senast introducerade instrumentet för fjärranalys via satellit är lasern, som främst används för topografisk kartläggning och kartläggning av istäcken, men även för att mäta atmosfäriska egenskaper och jordens yta (Tatem, 2008). Majoriteten av sensorerna på EO-satelliter ombord är optiska, medan endast 74 är SAR-sensorer. När det gäller den spatiala upplösningen varierar den från flera km för geostationära satellitsensorer till 30 cm för polära satellitsensorer i omloppsbanan. Den tidsmässiga upplösningen ökar också för högupplösta satellitsensorer, med 180+ Planet Labs *Doves* som dagligen samlar in data var som helst på jorden med 3-5 m upplösning. De viktigaste tillämpningsområdena är bland annat atmosfär, land, hav, klimatförändringar, nödsituationer och säkerhet.

Med det ökande antalet jordobservationssatelliter som ger långa och täta tidsserier (big data) krävs datainfrastruktur för att lagra och hantera data och effektiva modeller och algoritmer för att utvinna värdefull information. Under de senaste åren har molnbehandlingsplattformar utvecklats med bidrag från open source-grupper (Open data Cube), rymdorganisationer (ESA Thematic Exploitation Platform, DIAS) och privata företag (Google Earth Engine, Amazon Web Services, Azure, Sentinel-Hub). Den största utmaningen är bristen på funktioner för analys av stora datamängder inom ekologisk geovetenskap (dvs. API (*Application Programming Interface*) för bearbetning på hög nivå) för att omvandla stora datamängder till användbar information i rätt tid och på ett tillförlitligt sätt.

## Prognos 2040

Satelliter för kommersiell jordobservation kommer att fortsätta sin exponentiella tillväxt med flera tusen satelliter för jordobservation som kommer att skjutas upp till 2040. Optiska sensorer fortsätter att vara ledande, medan andelen aktiva sensorer som SAR och LiDAR kommer att fortsätta att öka. Men de största förändringarna kommer främst från de icke etablerade nya datatyperna (NSR, 2021). Konstellationer av satelliter (optiska eller SAR) kommer att bli normen för att tillhandahålla global övervakning med hög rumslig upplösning (5 cm) och tidsmässig frekvens (var 15:e minut). På den optiska sidan har till exempel BlackSky redan planerat en konstellation med 60 satelliter för att tillhandahålla optiska bilder med en upplösning på 1 meter och som täcker USA var 18:e minut. På SAR-sidan kommer Capella Space's 30+ satellitkonstellationer att ge bilder med en upplösning på 25 cm globalt var tredje timme. Dessa data kommer att ge kapacitet för en permanent övervakning dygnet runt. Dessutom kommer hyperspektrala sensorer att ha mycket bättre spektral, spatial, radiometrisk och tidsmässig upplösning. Satellitvideor kommer också att bli en vanlig datakälla år 2040. Man förväntar sig också att framtida jordobservationssatelliter kommer att tillhandahålla högupplösta 3D-data så att en digital tvilling av jorden lätt kan skapas. (Se t.ex. Vricon, en produkt utvecklad på Saab (Maxar, 2021)). Med jordobservationssatelliternas frekventa återbesök kan kontinuerliga upptäckter av förändringar stödja den dynamiska digitala tvillingen i framtiden.

En annan trend är att se fler specialiserade EO-satelliter för specifika tillämpningar, t.ex. övervakning av skogsbränder (t.ex. kanadensiska WildfireSat) eller övervakning av global biomassa (ESA:s BIOMASS-uppdrag). Fler satelliter för snabb övervakning av katastrofer och för mätning av luftkvalitet kommer att lanseras. Framtiden kommer också att präglas av mer internationellt samarbete och samordning mellan regeringar och internationella organisationer för att säkerställa långsiktig kontinuitet i jordobservationsdata och för att främja förverkligandet av dess fulla samhällsnytta.

Regeringar och militärer har varit och kommer att fortsätta att vara de största användarna av elektromagnetisk information. Man förväntar sig dock en ökad användning av EO inom en rad olika industrier, finanssektorer, övervakning av ekonomisk verksamhet och i individers dagliga liv. Med hjälp av en molnbehandlingsplattform och AI/Deep Learning-baserade analyser kommer det i framtiden att vara lika enkelt att få tillgång till data och tjänster från EO på mobiltelefoner, surfplattor och datorer som att välja en TV-kanal.

Framtiden kommer också att präglas av fler klimatförändringsrelaterade katastrofer och kriser. Satellitbilder i rätt tid och AI-baserade analyser är kraftfulla verktyg för krishantering. De kan hjälpa till med att följa utvecklingen av skogsbränder, bedöma omfattningen av översvämningar och jordskred och utvärdera konsekvenserna av industriolyckor. De kan också ha militära tillämpningar genom att detektera fartyg, marktrupper eller flygplatsaktivitet och bedöma effekterna av flygattacker. För

tillämpningar i nära realtid och i realtid kan man tänka sig satellitkonstellationer som tar bilder flera gånger om dagen, eller varje timme, och som har egen bearbetningskapacitet ombord på satelliterna.

## Referenser

Belward, A. S. and Skøien, J. O. (2015). *Who launched what, when and why; trends in global land-cover observation capacity from civilian earth observation satellites*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 103, pp. 115-128.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.03.009>

Maxar (2021). *Vricon Explorer*. <https://www.maxar.com/products/vricon-explorer> [3-6-2021]

North Sky Research (NSR) (2020). *Satellite Based Earth Observation (EO)*, 12th Edition.

Tatem, A. J., Goetz, S. J. and Hay, S. I. (2008). *Fifty Years of Earth-observation Satellites*. *American Scientist*, 96 (5) p. 390. DOI: [10.1511/2008.74.390](https://doi.org/10.1511/2008.74.390)

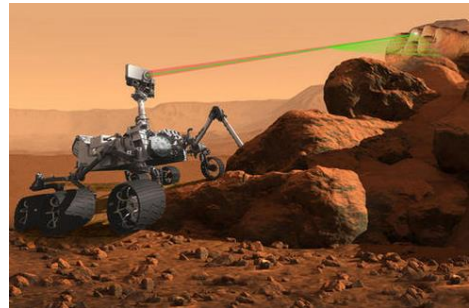
Union of Concerned Scientists (UCS) (2021). *UCS Satellite Database*. <https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database>

### 3.4 Laser- och annan optisk teknik för rymden

#### Bakgrund

Fördelarna med att använda laserteknik i rymden, härrör från den noggrannhet med vilken laservåglängder kan ställas in och mätas, oöverträffad ljusstyrka, tillgänglighet till stora spektralområden samt möjlighet att manipulera kvantegenskaper på nivån enstaka fotoner. Laser- och optiska applikationer relaterade till rymden omfattar två huvudområden: marksegment som betjänar rymdtillämpningar och rymdburna system. Rymdburna system kräver vanligtvis mogen teknik, **d.v.s** har hög TRL. Först nyligen har TRL

för de material som används i lasrar och relaterade system nått den nivå där prestandamarginalen är tillräckligt stor för större rymduppdrag. De viktigaste applikationerna relaterade till **mark- och luftbaserade segment** är: 1. Spårning av objekt i omloppsbanan för rymdtrafikhantering, geodesi och gravimetri. 2. Korrektion för riktningsmätningar från störningar i atmosfären. 3. Riktad energi mot antibalistisk missil och antisatellitförsvar. 4. Upp- och nedlänk i de optiska överföringsfönstren i atmosfären där kvantkommunikationsprotokoll kan utnyttjas. **Rymdbaserade system:** 1. LIDAR som ett fjärranalysverktyg för mätning av molekyler och vindmönster i atmosfären som en avancerad datainmatning för klimatmodeller. 2. Laserinducerade nedbrytningspektroskopisonder (LIBS - *Laser-induced breakdown spectroscopy*) för bestämning av materialsammansättning på främmande himlakroppar, som Mars (Fig. 8). 3. Optiskt kommunikationsnät. 4. Precisionsinterferometri för inmätning av formationsflygande rymdfarkoster som används för gravimetri och observation av gravitationsvågor. 5. Riktad energi mot rymdskrot, som antisatellitvapen och för missilförsvar.



1bild av en Mars-rover när den utför LIBS-mätning av Mars sammansättning med infraröd laser och hyperspektral kamera (NASA, u.å.).

#### Nuläge

Idag finns det ett välfungerande globalt markstationsnät för **avståndsmätning och spårning** av objekt i olika banor med laser (International Laser Ranging Services, 2021). Bättre än centimeternoggrannhet av satellitpositioner i låg jordbana (LEO) har uppnåtts med laser och korrelerad enfotonsdetektering (Otsubo, 2015). Laser som skapar en **guidestjärna**, vilket möjliggör korrigerande av optiska teleskop för spårning av rymdobjekt, en teknik initierad under Reagans *Strategic Defense Initiative* (SDI) och som nu är en mogen teknik i många civila och militära markbaserade system. Denna situation gör det möjligt för precisionsinriktning av **riktade energisystem** som består av infraröda lasrar i MW området. Detta segment stagnerade under en period på grund av den rådande andan av det tidigare ABM-fördraget samt p.g.a. tekniska hinder för att kunna använda kemisk laserteknik på ett säkert sätt. När nu ABM-avtalet är avskaffat verkar det finnas ett ökat stöd för uppfattningen att de riktade energiförsvarssystemen mot satelliter och



interkontinentalrobotar inte längre är begränsade på grund av avtal (US DoD, 2007; Gleason, 2020). Aktiv utveckling av kraftiga lasersystem baserade på fasta tillståndet som är kompakta och robusta nog för utplacering åtminstone på luftburna plattformar sker mycket snabbt (Lockheed Martin, 2019). För närvarande är effekten i sådana system av storleksordning 100 kW – inte tillräcklig för ett rymdbaserat ABM-försvar. Man kan nog öka det en storleksordning, särskilt genom att utnyttja spektralintervall runt 2  $\mu\text{m}$  där optiska fibrer har låg känslighet för skador av joniserande strålning i rymden (Fox, 2007). Relaterat till den riktade energin är användning av laserteknik för **avlägsnande av rymdskrot**. Nuvarande uppskattningar visar att andelen rymdskrot på 400–2000 km höjd riskerar att nå instabilitetspunkten, där tätheten exponentiellt ökar främst på grund av interna kollisioner och ytterligare fragmentering (Kessler, 1978). Fragment i storlek 1–10 cm är mest oroande eftersom man inte kan spåra dem eller skydda sig mot dem. Det har bedömts att användning av antingen markbaserade eller rymdbaserade lasrar skulle kunna vara det mest ekonomiska sättet att avlägsna sådana faror (Phipps, 2012; Ebisuzaki, 2015). **Upplänks- och nedlänkskommunikation** har hittills använt frekvenser i mikrovågsområdet, vilka är utmärkta för utsändningstillämpningar (t.ex. globala satellitnavigeringssystem som GPS) och är relativt okänslig för moln och andra meteorologiska förhållanden. Men länkens bandbredd och kapacitet blir begränsad. US DoD uppskattar att behovet av försvarets bandbredd för satellitlänk växte från 99 Mb/s under *Desert Storm* 1991 till 16 Gb/s 2010 (Dmytryszyn, 2021). Kommersiella rymdbaserade satellitkonstellationer för internet och annan kommunikation växer nu snabbt (t.ex. *Starlink*, *OneWeb*, m.fl.). Det är uppenbart att det finns behov av att införa optiska system för upp- och nedlänk inom en snar framtid. De nuvarande ansträngningarna ägnas åt att fastställa viktiga tekniska krav och framtida standarder för sådana kommunikationslänkar (Dmytryszyn, 2021). **Satellit-till-satellit-kommunikation** använder huvudsakligen radiofrekvenser. Med tillkomsten av stora satellitnät måste optisk, med mer precis riktad, laserkommunikation införas som ökar både bandbredden och säkerheten. Till exempel kan kvantoptiska protokoll för krypteringsnyckeldistribution (QKD – *Quantum Key Distribution*) enkelt implementeras med hjälp av detta. Till skillnad från terrestra fiberoptiska nät begränsas rymdkommunikationen inte av förluster, spridning eller icke-linjär utbredning som gör det möjligt att utnyttja allt spektrum där lasrar finns tillgängliga. Dessutom kan inte kvantkommunikationsprotokoll använda optiska förstärkare och kan därför inte implementeras i stamfiberoptiska länkar på jorden, men kan fungera utan problem i rymdmiljön där förstärkare i princip inte behövs. Det vore mycket klokt att bli strategiskt involverad på detta område nu, i tid, för att delta i fastställandet av standarder för den framtida viktiga kommunikationstekniken. **LIDAR-sensorer** är sedan länge etablerade för mark- och luftbaserade avståndsmätningar och mätningar av vindhastighet, koncentration och fördelning av molekylära gaser, aerosoler samt för avbildning på distans. Först nyligen nådde TRL för laser-relaterad teknik en nivå



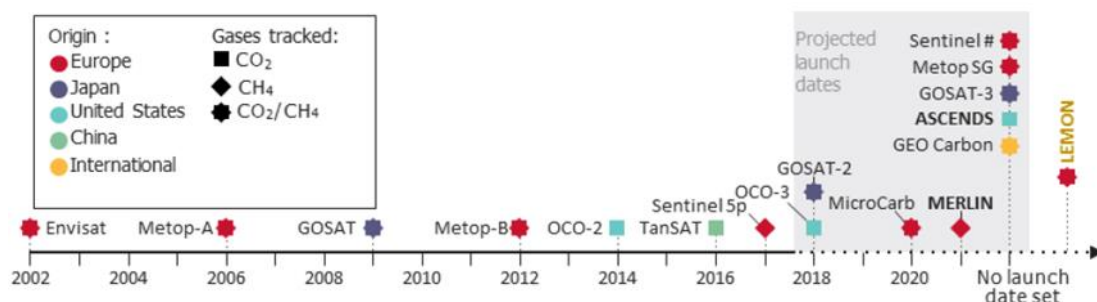
Figur 9: Satelliten AEOLUS med Atmospheric Laser Doppler Instrument (ALADIN) ombord. Uppsändes 2018 (Källa: ESA).



för att man kan börja utforma jordobservation från rymden med hjälp av aktiva optiska sensorer, dvs LIDAR. Figur 9 visar en av de första LIDAR-systemen för vindmätning, uppskickat av ESA 2018. Behovet av högre vertikal upplösning av fördelningen av växthusgaser i atmosfären gör att det krävs aktiva jordobservationsplattformar som använder LIDAR till skillnad mot dagens passiva system som använder spektrometrar och solstrålning. Data behövs för klimatmodeller med högre upplösning. Utvecklingen av aktiv laserbaserad jordobservationsförmåga ligger helt i linje med planerna för ESA (European Space Agency, 2015), ESRE (European Space Research Establishments, 2020) och NASA (Sun, 2018) och stöds av särskild finansiering från Europeiska kommissionen. En översikt av passiva och aktiva, nuvarande och framtida satellituppdrag för klimatstudier visas i Figur 10. I Sverige är KTH involverat och utvecklar teknik för ett av de framtida LIDAR-uppdragen (LEMON). KTH och FOI samarbetar för att utveckla framtida högupplösta LIDAR-tekniker med korrelerad enfotonräkning. **Interferometri i rymden** som utnyttjar laserteknik och precisionsvägda massor som inte påverkas av rymdfarkosten som omger dem, placerade i formation vid Lagrangepunkter, är i planeringsstadiet (Monnier, 2020). Detta *LISA Gravitational Wave Interferometer*-uppdrag, som drivs av NASA och ESA, kommer att kräva utveckling av ett antal olika tekniker som skulle kunna användas för många andra formationsflygande rymduppdrag. Det första prototypprojektet *LISA Pathfinder* skickades upp av ESA 2015 och gav resultat långt över förväntan.

### Prognos 2040

De skisserade tillämpningarna av laserteknik visar på stora möjligheter och de kommer att förbättras ytterligare. Man kan förvänta sig att "ledstjärnetekniken" med laser och adaptiv optik kommer att installeras vid markstationerna för satellitinmätning och följning, vilket ger bättre rumslig upplösning. Här kommer tekniken för korrelerad enfotonräkning att användas regelmässigt. Laser för upp- och nedlänkskommunikation med hjälp av mellan-infraröda atmosfäriska transmissionsfönster kommer att få betydande användningar och börja ersätta äldre mikrovågssystem, särskilt för nyetablerade satellitnät som involverar hundratals rymdfarkoster. Ökade krav på datatrafik kommer att fortsätta att ställas och kommer att kräva användning av laser för satellit-till-satellit-kommunikation med vars



Figur 10: Översikt från (Tellefson, 2016) för aktuella och planerade "kolräkning"-uppdrag. Antalet satelliter som övervakar de viktigaste växthusgaserna kan tredubblas till 2040. Uppdrag baserade på aktiva LIDAR-mätkoncept lyfts fram i fetstil. LIDAR-uppdrag CALIPSO, Aeolus och EarthCARE visas inte på diagrammet, eftersom de är dedikerade till balåtspridning eller vindmätningar men inte till gaskoncentrationsmätning. De flesta passiva instrument har också kanaler för övervakning av vattenångor, medan nuvarande aktiva instrument (MERLIN och ASCEND) är inriktat på en molekylsort.

hjälp även säkring av kvantkryptografiprotokoll skulle kunna införas. Allt fler satelliter sänds upp, särskilt i LEO, och problemet med kollision med rymdskrot blir alltmer akut. Därför kan man förvänta sig att brådskan att hitta lösningar för effektiv borttagning av rymdskrot kommer att öka. Det är för närvarande inte självklart att den slutliga lösningen kommer att använda markbaserade eller luft- och rymdburna lasrar för att lösa uppgiften, men det kan bli en viktig bidragande del. Tekniska faktorer och vissa grundläggande hinder (som att atmosfären är optiskt icke-linjär) förblir ganska höga. För laserinterferometri i rymden och formationsflygning bör vi förvänta oss betydande genombrott med tanke på att *LISA*-uppdraget optimistiskt är planerat att skickas upp 2030. I allmänhet kommer utnyttjandet av laserteknik att växa exponentiellt i rymdapplikationer och andra lasertekniker som kamspektroskopi, ultralåg tidsjitterfördelning, som vid det här laget demonstrerats på marken och som kommer att nå tillräcklig mognad och TRL för att användas ombord på rymdfarkoster.

## Referenser

Dmytryszyn, M. et al. (2021) *Laser for satellite uplinks and downlinks*. Sci, 3, 4.

<https://doi.org/10.3390/sci3010004>

Ebisuzaki, T. et al., (2015) *Demonstration designs for the remediation of space debris from the International Space Station*. Act. Astr. 112, 102-113

<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.03.004>

European Space Agency (2015) *Earth Observation Science Strategy For ESA*. ISBN 978-92-9221-427-2

European Space Research Establishments (2020) *White Paper*.

Fox, B. P. et al., (2007) *Gamma radiation effects in Yb-doped optical fibers*. Proc. of SPIE, 6453, 645328.

Gleason, M. P., Hays, P. L. (2020) *A roadmap for assessing space weapons*. Space Agenda 2021, Center for Space Policy and Strategy, Aerospace (2020).

International Laser Ranging Services (2021)

<https://ilrs.gsfc.nasa.gov/network/stations/active/index.html> [20-5-2021]

Kessler, D. J. and Cour-Palais, B. G. (1978) *Collision frequency of artificial satellites: The creation of a debris belt*. J. Geophys. Res. 83, 2637.

Lockheed Martin (2019) [https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/rms/documents/directed-energy/Laser\\_Weapon\\_Systems\\_BRO.pdf](https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/rms/documents/directed-energy/Laser_Weapon_Systems_BRO.pdf) [20-5-2021]

Monnier, J. et al (2020) *A realistic roadmap to formation flying space interferometry*. Astro 2020 APC White Papers.

NASA (u.å.) <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/instruments/supercam/for-scientists/> [20-5-2021]

Otsubo, T. et al. (2015) *Center of mass corrections for sub-cm-precision laser ranging targets: Starlette, Stella and LARES*. J. Geodesy, 89 303.

Phipps, C. R. et al. (2012) *Removing orbital debris with lasers*. Adv. Space Res., 49, 1283.

Sun, X. (2018) *Lidar Sensors from space*. Comprehensive remote Sensing, v.1 p 412 Elsevier.

Tellefson, J. (2016) *Carbon sensing satellite system faces high hurdles*. Nature 533, 446.

US DoD (2007), *Directed Energy Weapons*, Defense Science Board.

### 3.5 Rymdlägesbild – upptäckt och inmätning av satelliter och föremål i jordbana

#### Bakgrund

Rymdlägesbild (SDA – *Space Domain Awareness* i amerikansk militär terminologi) är något av det viktigaste för den militära rymddomänen (Harrison, Johnson och Young, 2021). SDA är ett paraplybegrepp som inbegriper STM (*Space Traffic Management*) och SSA (*Space Situational Awareness*) samt SST (*Space Surveillance and Tracking*). Uttrycken är ännu inte helt etablerade; för ett val av definitioner se (Eurospace, 2021). Antalet satelliter kommer att öka exponentiellt, från ca 3500 idag till flera tiotusentals, år 2040 kanske så många som 50 000. Ur försvarssynvinkel är det mycket viktigt att veta var de satelliter finns som bedöms vara relevanta ur säkerhetssynpunkt. Man bör också ha i beaktande att makter kan tänkas skicka upp ”sovande” satelliter som man försöker gömma så gott det går t.ex. med signaturanpassning (litet radareko och så låg ljusreflektions som möjligt). De kan även tänkas finna gömställen långt bort, t.o.m. i Månens närhet, t.ex. vid L2 eller L3. Här diskuterar vi SDA i huvudsak från synvinkeln hur väl satelliter kan observeras och kartläggas, men även det stora problemet med rymdskrot berörs indirekt.

#### Nuläge

Radar och optiska instrument (teleskop och LIDAR) är de huvudsakliga instrumenten för att spåra rymdobjekt. Även om man i särskilda kampanjer med ”stirrande” radarmoder kan detektera cm-stora objekt i MEO som råkar passera radarloben, så används radar i huvudsak för ned till 5 cm stora objekt i LEO (Muntoni, 2021). Dessa system nyttjar i huvudsak de s.k. L- och S-banderna och utsänder antingen kontinuerliga eller repetitivt pulsade signaler. Antennerna realiserar som reflektorsystem, fasstyrda antenner eller på senare tid som tidsstyrda, mångkanaliga digitalantennerna. Sänd- och mottagarfunktionerna konfigureras antingen i en antenn (monostatisk konfiguration) eller flera separerade (bi- eller multistatiska konfigurationer, en grupp dit också interferometrar kan tänkas tillhöra). För att öka inmätningens precisionen är det en fördel om radarn kan följa en satellit och därför används vridbara reflektorsystem. Fasstyrda antenner (*Phased arrays*) kan snabbt växla mellan sådan följning och att övervaka lite större områden i syfte att fånga upp okända föremål. Digitala antensystem kan t.o.m. utföra dessa uppgifter samtidigt. Satelliter i LEO kan endast följas några minuter per dag av en given radarstation varför god noggrannhet i de bestämda banparametrarna kan kräva flera passager. Satelliter längre bort än i LEO spåras företrädesvis med optiska system, teleskop. Dessa begränsas bl.a. av att satelliten måste befinna sig i solljus. Förutom hårdvara i form av radar och teleskop använder systemen avancerad mjukvara för att hålla reda på alla observationer och beräkna banor samt för att automatiskt kunna varna för kollisionsrisker.

USA har länge haft förmåga att följa rymdobjekt i bana. *Space Surveillance Network* (SSN) leds idag av US Space Force och består av ett 30-tal markbaserade radarstationer och optiska teleskop plus 6 satelliter (Wikipedia, 2021). Dess optiska system heter GEODSS (Ground-based Electro-Optical Deep Space Surveillance) och uppges kunna spåra halvmeterstora objekt i GEO. USSTRATCOM (*US Strategic Command*) har den största databasen av föremål i banor runt jorden. EU skapade 2015 ett konsortium för SST (EU

SST), där först fem länder ingick: Frankrike, Italien, Spanien, Storbritannien och Tyskland, men sedan 2018 deltar även Polen, Portugal och Rumänien. Konsortiet har fyra radarstationer för spaning (*surveillance radars*), åtta radarstationer för följning (*tracking radars*), fyra laserstationer och ett nätverk av 34 teleskop vilket ger god täckning för alla satellitbanor (Faucher, 2020). Det uppskattas att de idag kan detektera objekt i GEO ner till 35 cm storlek och i LEO ned till 7 cm samt spåra 35% av alla objekt större än 10 cm i LEO. År 2028 uppskattas att konsortiet detekterar över 32 000 objekt större än 7 cm, att alla radarstationer tillsammans gör mer än 200 000 följningar om dagen, vilket möjliggör att katalogisera över 19 500 föremål, inklusive 65% av alla föremål större än 10 cm (Faucher, 2020).

Idag finns endast ett begränsat antal radarstationer i världen, och de flesta är militära. Men privata aktörer har börjat erbjuda kommersiell service, som LeoLabs (LeoLabs, 2020) och många civila och statliga organisationer diskuterar upprättande av nya radarstationer, ev. för dual-use, d.v.s. både för civila och militära tillämpningar.

### Prognos 2040

Den tekniska utvecklingen medför att större, många fler och högre presterande radarstationer kommer att finnas. Särskilt digitala radarsystem i bi- och multistatiska konfigurationer ger fler och noggrannare inmätningar och kan p.g.a. sin skalbarhet efterhand enkelt byggas ut om ökad prestanda erfordras. Högre frekvens och kraftigare sändareffekt för radar gör att det är möjligt att detektera föremål ner till en storlek av bara 1 cm. Den amerikanska *Haystack* radarn har en 36 m stor parabolantenn och använder X-bandet (10 GHz) med en sändareffekt upp till 400 kW. Den har upptäckt fragment av rymdskrot med en diameter 1 cm på 1000 km:s avstånd (Foster, 2005; Muntoni, 2021). Fas- och tidsstyrda gruppantennor skulle däremot behöva ett såpass stort antal sändar/mottagarmoduler (för att i ett regelbundet gitter realisera erforderlig uteffekt och antennvinst) att kostnaden skulle skena. Antennelementen kan förvisso glesas ut (jfr franska GRAVES) i ett oregelbundet gitter men detta tenderar att fördyra en annars kostnadseffektiv tillverkning av delpaneler med regelbundet utplacerade element. Det är därtill tveksamt om det föreligger något militärt intresse av <5 cm stora satelliter i LEO, då dessas sensor- och kommunikationsförmågor är begränsade.

Det kommer att byggas fler och större teleskop för optisk spårning av satelliter på högre höjder. Det lär knappast röra sig om någon väsentligt ny teknik, även om användande av system som korrigerar för störningar i atmosfären troligen kommer att börja användas av de mest avancerade satellitspaningsteleskopen (Travouillon, 2021). Idag används sådana metoder på de mest avancerade teleskopen för astronomisk forskning. Gissningsvis kommer det vara möjligt att mäta in satelliter så små som 10 cm i GEO vid 2040.

Satelliter kommer att finnas som är specialiserade på att spana in andra satelliter i bana. Tester har redan gjorts, bland annat det amerikansk-svenska samarbetet SPARC-1 (Craig, 2019) och flera system planeras att vara i bana redan inom några år (Space News, 2020) Datasystem kommer att utvecklas, inkluderande AI, för att hantera och samla den

exponentiellt växande datamängden från de mångdubbelt fler detektorer som förväntas jämfört med idag.

### Sammanfattning

Många fler mätstationer kommer att finnas, spridda globalt. Dessa kommer att kompletteras med satelliter för inmätning av andra satelliter. Ett internationellt regelsystem för STM kommer att finnas liksom stora data-baser för både satelliter och rymdskrot. Trots detta kommer många försvarsorganisationer att ha egna oberoende system. ....

### Referenser

Craig, K. et al. (2019) *SPARC – 1: A New, Improved Modular 6U Spacecraft*. 2019 IEEE Aerospace Conference, 2019 IEEE Aerospace Conference, 2019, pp. 1-8, doi: 10.1109/AERO.2019.8742248.

Eurospace position paper (2021), [https://eurospace.org/wp-content/uploads/2021/03/eurospace-pp\\_space-traffic-management\\_opportunity-for-europe\\_final\\_february-2021.pdf](https://eurospace.org/wp-content/uploads/2021/03/eurospace-pp_space-traffic-management_opportunity-for-europe_final_february-2021.pdf) [28-5-2021]

Faucher, P., Peldszus. R. and Gravier, A. (2020) *Operational space surveillance and tracking in Europe*. Journal of Space Safety Engineering 7, p.420-425. <https://doi.org/10.1016/j.jsse.2020.07.005>

Foster, J.E.; Benbrook, J.R.; Stansbery, E.G. (2005) *Detection of Small Radar Cross-Section Orbital Debris with the Haystack Radar*. Adv. Space Res. **2005**, 35, 1210–1213.

Harrison, T., Johnson, K., and Young, M. (2021) Defense Against the Dark Arts in Space - Protecting Space Systems from Counterspace Weapons. CSIS

LeoLabs (2020), webbsida <https://www.leolabs.space/> [besökt 26-5-2021]

Muntoni, G. et al, (2021) *Crowded Space: A review on Radar Measurements for Space Debris Monitoring and Tracking*. Appl. Sci. 11 p. 1364-90. <https://doi.org/10.3390/app11041364>

Space News (2020). *NorthStar orders three satellites to collect space situational awareness data*. <https://spacenews.com/northstar-orders-three-satellites-to-collect-space-situational-awareness-data/> [3-6-2021]

Travouillon, T., d'Orgeville, C. and Bennet, F. (2021) *Seeing Clearly*. Sci.Am. April 2021, p.34-39.

Wikipedia (2021), [https://en.wikipedia.org/wiki/United\\_States\\_Space\\_Surveillance\\_Network](https://en.wikipedia.org/wiki/United_States_Space_Surveillance_Network), [26-5-2021]

## 3.6 Antenner och kommunikation

### Bakgrund

Alla satelliter har antenner. Dessa antenner används bland annat för kommunikation av data (mellan satelliter och mellan satelliten och jorden), navigation, övervakning, jordobservation och radar. Antennerna (ombord på satelliter och i markstationer) är uppdragsberoende och ser därför olika ut. I dagsläget används satelliter främst av stora entiteter (till exempel myndigheter och forskningsinstitut) men i framtiden förväntas en större kommersiell användning av satelliter. Detta medför andra krav på antennerna i satelliter och markstationer.

### Nuläge

I dagsläget använder satelliter och markstationer frekvensbanden under 18 GHz (ESA, u.å.). Dessa delas vanligtvis upp i L-bandet (1-2 GHz), S-bandet (2-4 GHz), C-bandet (4-8 GHz), X-bandet (8-12 GHz) och K<sub>u</sub>-bandet (12-18 GHz). L-bandet används framför allt till positionering och satellittelefoni. S-bandet används till radar, kommunikation och jordobservation. C- och K<sub>u</sub>-banden används framför allt till kommunikation och X-bandet används framför allt militärt.

Kommunikationsantennerna för dessa frekvenser är reflektorantennerna (om hög datahastighet behövs) eller tråd- och mikrostripsantennerna (för låg datahastighet eller på små plattformar). För att få hög upplösning används ofta reflektorantennerna på radar- och jordobservationsuppdrag. Dessa antennteknologier är beprövade och har hög prestanda på frekvenser under 18 GHz.

### Prognos 2040

Antalet satelliter har nyligen ökat och förväntas fortsätta att öka de kommande decennierna. En stor del av denna ökning kan spåras till uppskjutningen av megakonstellationer av satelliter i icke-geostationär omloppsbana för kommersiell höghastighetskommunikation av användardata (Oneweb, u.å.) och (Starlink, u.å.). De traditionellt använda frekvensbanden (under 18 GHz) har fyllts upp och för att kunna uppnå önskad hastighet måste högre frekvenser användas. Därför har K och K<sub>a</sub>-banden föreslagits för framtida satellitkommunikation. Dessa täcker 18-40 GHz. För att lyckas kommersiellt med de nya K/K<sub>a</sub>-bandsystemen måste kommunikationsantennerna (ombord på satelliten och i markstationen) vara högpresterande. På dessa frekvenser ökar förluster i utbredning och material. Därför är det viktigt att antennerna har hög direktivitet och låga förluster. Dessutom måste de kunna styra sin strålning i en stor region. Lanseringen av dessa megakonstellationer har redan börjat och de första antenngenerationerna är mestadels reflektor- eller gruppantennerna. Dessa typer av antenner är beprövade vilket är önskvärt. Däremot är de dyra, har höga förluster och/eller kan inte enkelt styra sin strålning. Därför behövs nya antennlösningar för att lyckas kommersiellt med de nya K/K<sub>a</sub>-bandsystemen.

Lovande teknologier för att möta utmaningarna i de nya K/K<sub>a</sub>-bandsystemen är metaytor och linsantennerna. Metaytor består av små (relativt våglängden) inlagringar som kan

designas för att kontrollera utbredningen av vågor (Faenzi, 2019). På så sätt ger de en utökad kontroll av strålningsbilden från antenner. Metaytor har använts i portabla markstationer för satellitkommunikation (Kymeta, u.å.) och billiga antenner för höghastighetskommunikation med satelliter (WaveUp, 2021) i K- och  $K_a$ -banden. Linsantenner kan bidra med en bred strålstyrning till en låg kostnad. Låga förluster i linsantenner kan uppnås med helt metalliska linser. Dessa kan designas med hjälp av metaytor (Quevedo-Teruel, 2018) eller geodetiska ytor (Fonseca, 2020). För att göra linsantenner mindre skrymmande kan transformationsoptik användas (Roberts, 2009).

### Sammanfattning

Lanseringen av nya megakonstellationer av satelliter i icke-geostationär omlopps bana väntas öka antalet satelliter avsevärt. Kommunikation med dessa satelliter förväntas ske i K- och  $K_a$ -banden, vilket medför nya krav för antennerna i dessa system. För att möta dessa behövs nya tekniska lösningar. Metaytor och linsantenner har attraktiva egenskaper för dessa applikationer.

### Referenser

ESA (u.å.) *Satellite frequency bands*

[https://www.esa.int/Applications/Telecommunications\\_Integrated\\_Applications/Satellite\\_frequency\\_bands](https://www.esa.int/Applications/Telecommunications_Integrated_Applications/Satellite_frequency_bands) [13-05-2021].

Faenzi, M. et al. (2019), *Metasurface Antennas: New Models, Applications and Realizations*. Scientific Reports, volym 9, artikelnummer 10178, 2019.

Fonseca, N. J. G., Liao, Q., and Quevedo-Teruel, O. (2020) *Equivalent Planar Lens Ray-Tracing Model to Design Modulated Geodesic Lenses Using Non-Euclidean Transformation Optics*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, volym 68, nummer 5, sidor 3410-3422.

Kymeta (u.å.) <https://www.kymetacorp.com/> [13-05-2021].

Oneweb (u.å.), <https://www.oneweb.world/> [13-05-2021].

Starlink (u.å.), <https://www.starlink.com/> [13-05-2021].

WaveUp (2021) <http://www.wave-up.it/> [13-05-2021].

Quevedo-Teruel, O. et al. (2018) *Glide-Symmetric Fully Metallic Luneburg Lens for 5G Communications at Ka-Band*. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, volym 17, nummer 9, sidor 1588-1592.

Roberts, D. A., Kundtz, N. and Smith, D. R. (2009) *Optical lens compression via transformation optics*. Optics Express, volym 17, sidor 16535-16542.



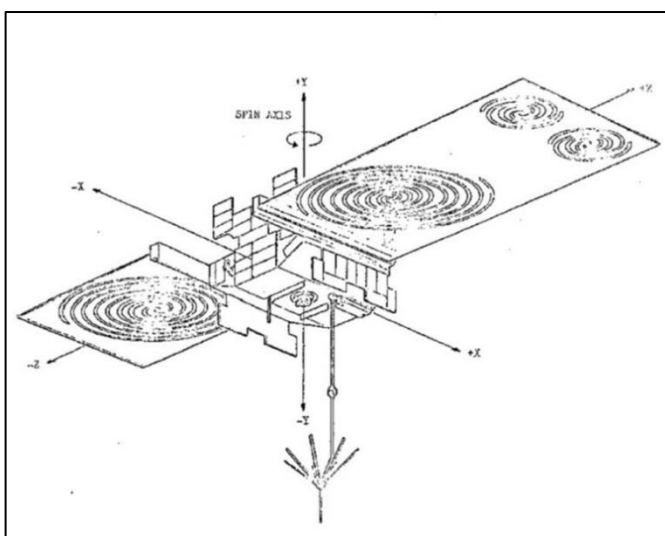
## 3.7 Signalspaning

### Bakgrund

Signalspaning brukar på engelska ges den övergripande termen SIGINT som i sin tur delas upp i ELINT och COMINT. Det senare gäller avlyssning av kommunikation, d.v.s. något slags meddelanden som sänds via "etern". ELINT är spaning mot radiotekniska anläggningar som till exempel radarstationer. För de satellitplattformar som numera anses vara basen för olika typer av signalspaning gäller typiskt att COMINT ofta använder geostationära satelliter och att ELINT företrädesvis utförs från satelliter i låg bana, men någon knivskarp gräns mellan dessa kategorier finns knappast.

Signalspaning är det område av rymdverksamheten som omges av den tätaste sekretessen. Viss avhemligande av amerikanska rymdbaserade

signalspaningssystem från 60-talets slut och början av 70-talet har förekommit nyligen – speciellt kring kortlivade små satelliter som sändes upp som "snålskjutsåkare" med stora fotospaningssatelliter (Figur 131). De avhemligade projekten berörde både COMINT och SIGINT och det senare användes tydligen även taktiskt under Vietnamkriget för att använda spaningsdata i realtid mot den sovjetiska luftvärnsroboten SA-2. I övrigt får den som saknar hemlig information försöka dra slutsatser utifrån satelliternas banor och uppträdande i rymden.



Figur 13 En nyligen avhemligad 53 år gammal amerikansk signalspaningssatellit (kodnamn VAMPAN) för spaning mot radar i banden: 100–400 MHz, 400–1000 MHz. Interferometri och satellitens rotation gav riktningen till målet. Antennpanelerna fälldes ut som rullgardiner och var av dacrontyg med tunna guldantennor 1. (US Intelligence Board, 1968).

Att spana av en yta för att etablera "the Electronic Order of Battle" (EOB) är något som kan utföras som ett rutinemässigt letande efter signalkällor relaterade till olika vapensystem. Rörliga anläggningar kräver en ofta återkommande övervakning medan fasta anläggningar inte behöver övervakas lika ofta. Vapensystem för korta avstånd tenderar att ha svagare radarstöd än de för långa avstånd. Låga satellitbanor gynnar därför spaning mot rörliga vapensystem. Bestämningen av dessa vapensystems läge och signalkaraktäristika definierar naturligtvis vilket hot de utgör.

Det krävs kännedom om tre grupper av parametrar för att bestämma det geografiska läget hos till exempel en rörlig radarstation: satellitens position, satellitens inriktning samt riktningen från satelliten till radarsignalen. När det gäller de två första är nutidens

rymdteknik långt kommen. Inriktningen av satellitens antensystem kunde redan med den 2001 uppsända svenska Odin-satelliten bestämmas med stjärnkameror med en noggrannhet på 5-7 bågsekunder. Kommersiellt tillgängliga GNSS-mottagare för Cubesats har positionsprestanda på bättre än 10 meter (RMS). Meternoggrannhet och bättre är väl inte helt orealistiskt att tänka sig år 2040. Troligen kommer gränsen för hur noga man kan lokalisera en sändare på marken att sättas av spaningsantennens styvhet (stjärnkameran förutsätts sitta monterad på antennen – precis som på Odin) och den rent radiotekniska förmågan att med hjälp av interferometri (egentligen det som numera kallas AOA - *Angle of Arrival*) bestämma signalkällans riktning.

Om man antar att antensystemets inriktning är känd på 15 bågsekunder när och att ett typiskt observationsavstånd är <1000 km., så motsvarar det en osäkerhet på marken för antennens inriktning på kanske 100 meter. Lägg sedan till satellitens positionsosäkerhet som kanske är några tiotal meter. Osäkerheten hos den rent radiotekniska riktningsbestämningen av den observerade signalen bör helst vara lika med eller mindre än summan av antennpekefel och positionsosäkerhet.

En typisk antenn för den här typen av satellit ser man på bilden nedan av den ryska signalspanings satelliten Lotos (Figur ). Fyra antennbommar är försedda med s.k. ”patch” antenner av olika storlekar – för olika frekvensband. Somliga sitter tätt, andra sitter glest. De som sitter tätt ger hög vinkelupplösning medan de som sitter glest löser upp tvetydigheter. Signalbehandling ombord och överföring av spaningsinformationen i realtid via datareläsatsatelliter är sådant som stormakter redan förfogar över.

En annan typ av ELINT från satellit är riktad mot flottstridskrafter, kanske särskilt hangarfartygseskadrar. Dessa är ofta utrustade med radarsystem med hög effekt och därmed räckvidd för att göra sig mindre sårbara mot anfall från flygstridskrafter. Sådana radar-stationer röjer naturligtvis läget för värdefulla örlogsfartyg och den informationen kan användas för att rikta in t.ex. kryssnings-robotar.



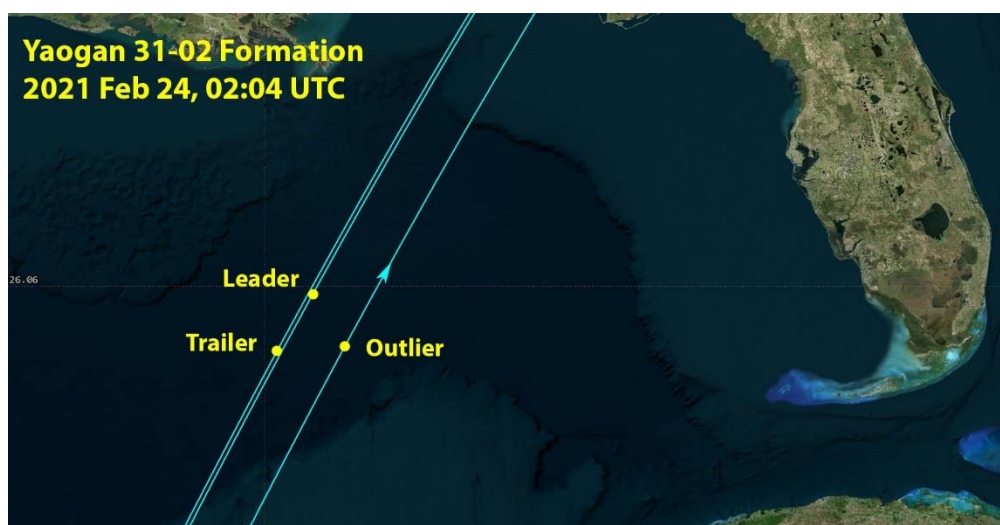
Figur 12: Den ryska signalspanings satelliten av typ LOTOS (Hendrickx, 2021).

Redan på 1970-talet driftsatte USA ett system (har flera namn: bland andra Whitecloud, PARCAE) för detta ändamål med tre satelliter i formation som använder en något annorlunda spaningsmetod – TDOA – *Time Difference of Arrival*. De tre satelliterna observerade samma signal och kunde med kännedom om satelliternas inbördes läge och den avspanade signalens ankomsttid till respektive satellit bestämma dess läge. För detta

krävdes att satelliternas ombordklockor var synkroniserade, att det inbördes läget mellan dem var väl känt samt en pålitlig datalänk mellan satelliterna. Modern teknik (GNSS) har gjort det avsevärt lättare att uppfylla kraven på klocksynkronisering och inbördes lägesbestämning.

### Nuläge

Kina har sedan en tid satt ett liknande system (Yaogan 30/31) i drift med hittills elva satellit-”tripplar” i banor på 600 km eller 1000 km höjd och med 35° eller 63,4° inklination (Fig. 13) (Christy, 2021). Inga ytterligare tekniska detaljer om satelliterna är kända. Det stora antalet av dessa tripletter tyder på att man strävar efter att kunna spana mot samma mål dygnet alla timmar, vilket i sin tur tyder på taktisk användning av spaningsinformationen snarare än att etablera EOB.



Figur 13: En av Yaogan-trippletterna i nästan likbent triangel (Christy, 2021).

En intressant kombination av signalspaning och avbildande spaning med rymdbaserad radar är det planerade ryska satellitsystemet PION (Hendrickx, 2021) som kombinerar ett antennsystem liknande det ovan nämnda Lotos-systemets och kompletterar detta med en sidspanande syntetisk-apertur-radar (Fig. 14). Tanken är att avbilda havsytan för att försöka upptäcka eventuella flottstridskrafter och korrelera dessa bilder med signalspaningsinformation. Förhoppningen synes vara att direkt kunna identifiera källan till signalobservationerna. Med mönsterigenkänning i radarbilden kan man också försöka identifiera precis vilka fartyg som finns i bilden. Här finns kanske en roll för rymdbaserad AI? PION har ännu inte sänts upp. Idén med att kombinera signalspaning och avbildande radar förefaller nästan självklar och kanske redan realiserats av någon annan stormakt.

Förutom militära satelliter kommer nu även kommersiella konstellationer av satelliter för signalspaning, som bedömer att det finns en marknad att sälja produkter baserade på radiosignaler de kan spåra. Kunder är ofta säkerhetsorganisationer, men vissa även kopplade till försvar. Ledande företag är det amerikanska HawkEye 360 (HawkEye, 2021). HawkEye skickade upp sin första formation av tre satelliter till en bana på 575 km i december 2018, sin andra formation i mars 2021 och siktar mot ett 30-tal satelliter för



Figur 14: Spanings satelliten Pion (Bild: konstruktionsbyrån Arsenal).

global täckning med frekventa överflygningar av samma område. Satelliterna väger inte mer än 15 kg och har bl.a. en mjukvarudefinierad radio (SDR – *software defined radio*) för att kunna skanna av ett brett spektrum av frekvenser (eoPortal Directory, 2020). Ett annat företag är franska Unseenlabs som med avancerad analysteknik bara använder en liten satellit (6U CubeSat) med vilken de kan lokalisera en källa till havs på en kilometer när, i nära realtid (eoPortal Directory, 2021).

### Prognos 2040

Tekniken för att bestämma satellitplattformars orientering måste betraktas som relativt mogen och har nu med hjälp av stjärnkameror nått 1 bågsekund. Ytterligare miniatyrisering kan man vänta sig och kommer att ge även små satelliter goda prestanda när det gäller att bestämma deras orientering. Att bestämma läget hos en satellit är avhängigt av GNSS-tekniken och dess utveckling, men även här förefaller tekniken närma sig en slags mogenhetsasymptot. Dessutom kan direkt inmätning av satellitbanan från marken och ombordberäkning av satellitens position användas om GNSS inte är tillgänglig – och vara lika noggrann. Signalbehandling ombord och även utvärdering av spaningsdata ombord på satelliten (rymdbaserad AI) kommer att kunna utföras även på små satelliter. Hur liten en signalspanings satellit i låg bana kan bli begränsas av den avspanade signalens

våglängd, systemets bandbredd och fysikens lagar. Tekniken för att driftsätta stora grupper av signalspaningssatelliter (liknande Whitecloud och Yaogan 30/31) kommer sannolikt att bli billigare genom att använda existerande satellitplattformar som nu sänds upp i stort antal för kommersiella bredbandskonstellationer som Starlink och OneWeb.

I geostationär bana erfordras antenner av annan karaktär – stora reflektorantennor med hög ytnoggrannhet – och utfällbara. Idéer om att med robotik bygga sådana antenner på plats skulle kunna lösa utfällningsproblemet och ge reflektorantennor med helt nya, och bättre prestanda, men det är tveksamt om denna teknik är mogen om tjugo år (se även Kap. 3.2).

## Referenser

Christy, R. (2021). *Yaogan 31-02 formation*, [www.zarya.info](http://www.zarya.info). [Mission Event Timeline \(zarya.info\)](http://www.zarya.info) [4-5-2021]

eoPortal Directory (2020) <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/h/hawkeye>, [26-5-2021]

eoPortal Directory (2021) <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/u/unseenlabs>, [27-5-2021]

HawkEye 360 websida (2021), <https://www.he360.com>, [26-5-2021]

Hendrickx, B. (2021) The status of Russia's signals intelligence satellites. The Space Review. [The status of Russia's signals intelligence satellites](https://www.space-review.com) [4-5-2021]

US Intelligence Board (1968), *Technical Mission description of VAMPAN SIGINT Mission 7325*, (Erhållen via privatpersons FOIA<sup>2</sup>-ansökan).

---

<sup>2</sup> Freedom Of Information Act.

### 3.8 Satellitbaserad positionering, navigering och tidsbestämning (PNT)

#### Bakgrund

När det gäller satellitbaserad positionering, navigering och tidsbestämning (PNT) finns det för närvarande två huvudtrender som förväntas påverka den militära användningen av GPS inom de kommande 5–10 åren. Den första är användningen av GPS tillsammans med data från andra globala satellitnavigeringssystem (GNSS) och den andra är användningen av andra satellitkonstellationer (dvs. inte GNSS) för framtida PNT.

#### Nuläge

USA:s *Global Positioning System* (GPS) är ett mycket välkänt system för satellitbaserad PNT. Systemet har använts sedan mitten av 1970-talet och har formellt varit fullt operativt sedan 1995 (Kaplan och Hegarty, 2005). En pågående moderniseringsprocess inkluderar utveckling av nya satellitsignaler, ny satellitteknik, en genomgående modernisering av kontrollcentret för GPS samt en snabb utveckling inom mottagar- och antennteknik på användarsidan. Denna utveckling inkluderar en modernisering av GPS noggranna positioneringstjänst (PPS - *Precise Positioning Service*) inklusive de nya M-koderna som endast är tillgängliga för auktoriserade användare (Teunissen och Montenbruck, 2017).

Parallellt med utvecklingen av GPS moderniseras det ryska GLONASS-systemet, utvecklas det europeiska GNSS-systemet Galileo liksom det kinesiska Beidou-systemet. Den grundläggande utformningen av dessa system är liknande och kombinerad användning av data från ett eller flera av systemen i samma GNSS-mottagare är ett viktigt utvecklingsområde.

Precis som GPS, så utvecklas GLONASS och Beidou med både civila och militära segment och mycket lite offentlig information finns tillgänglig om de militära elementen i GLONASS och Beidou.

Galileo är dock ett civilt system, men den krypterade tjänsten som ska erbjudas av Galileos offentliga tjänst PRS (*Public Regulated Service*), är av intresse för det svenska försvaret. Galileos PRS-tjänst kommer att ha begränsad åtkomst baserad på krypterade signaler som endast kan användas av behöriga användare (Teunissen och Montenbruck, 2017), liknande M-kodsignalerna hos GPS. Vidare kan Galileos *Commercial Authentication Service* (CAS) också vara av intresse för militära applikationer med tanke på att det ger ett medel för kryptering av Galileo-signalerna för att skydda mot avancerad spoofing (Fernandez-Hernandez, Vecchione och Díaz-Pulido, 2018).

På användarsidan finns en viktig trend i utvecklingen av programvara och mottagare för användning av signaler från GPS i kombination med data från andra system samt för hög noggrannhet i realtidpositionering (dvs. 10 cm eller bättre). På den civila sidan drivs denna utveckling för närvarande av tillämpningar inom autonom navigering, som självkörande bilar, autonoma drönare, fartyg etc. Med hjälp av bärvågsbaserade (*carrier phase based*) GNSS-data är centimeter-nivåpositionering möjlig med hjälp av markbaserade referensstationer och tjänster som ger korrigeringar för några av felkällorna i GNSS-baserad positionering, såsom jordatmosfärens påverkan på GNSS-signalen. Ytterligare robusthet och pålitlighet i positioneringen kan erhållas genom tillämpning av bärvågsbaserade data från GNSS tillsammans med data från andra sensorer såsom till exempel tröghetsnavigeringssystem (INS), laser-, radar- och optiskt baserade system. Kombinationen av GPS och INS är en teknik



som har varit känd i flera år (Cox, 1979) och har använts i fartyg och flygplan. Men tekniken förfinas så att den kan användas på mindre plattformar som smarta telefoner, klockor och andra soldatburna enheter.

En av fördelarna med att använda signaler från fler GNSS samt integration med andra sensorer är en ökad robusthet mot störning som för närvarande anses vara de viktigaste hoten mot användningen av GNSS. Undersökningar med hjälp av data från markbundna installationer har visat att störning mycket ofta förekommer (McCreadie, 2019). Med tanke på att jammers är baserade på överföring av signaler med en starkare effekt än GNSS-signalerna, kan jammers detekteras genom spektrumfrekvensskanning. Idag sker sådan detektion manuellt, men pågående forskning syftar till att utveckla metoder för automatisk detektion och identifiering av jammers med hjälp av till exempel markbundna permanenta referensstationer för GNSS (Olesen *et al.*, 2020).

Slutligen måste rymdväder nämnas som ett hot mot GNSS som är svår att överkomma. Starka solutbrott kan orsaka scintillation och andra effekter i jordens jonosfär som kan störa överföringen av GNSS-s signaler från satelliterna till mottagare på eller nära jordens yta (Jensen och Mitchell, 2011).

### Prognos 2040 - PNT med hjälp av andra satellitkonstellationer

För närvarande utvecklas ett antal nya satellitkonstellationer för kommunikation av företag som OneWeb, Space X, m.fl. Dessa konstellationer är baserade på satelliter i låg jordbana (LEO) i motsats till GNSS-satelliter som huvudsakligen ligger på mycket högre höjder inom intervallet MEO. De nya LEO-konstellationerna är huvudsakligen utvecklade för kommunikationsändamål, men det är möjligt att utveckla sådana konstellationer så att de kan användas även för positionering och navigering (Faragher och Marek, 2020). För närvarande finns inga PNT-tjänster tillgängliga från dessa konstellationer, men det förväntas att detta kommer att utvecklas inom de närmaste 5-10 åren. Tack vare det stora antalet satelliter kan en positionsnoggrannhet liknande GPS erhållas (3 m horisontellt, 4-5 m vertikalt) (Hein, 2020). Det är också mycket troligt att sådana tjänster kommer att användas tillsammans med GNSS för mer robusta positionerings- och navigationslösningar.

### Friskrivning

Denna text om PNT är baserad på *oklassificerat* material. Inom området pågår flera forsknings- och utvecklingsprojekt bland försvarsorganisationer i Europa, Nordamerika och andra länder. Ämnen som undersöks och resultat från sådan sekretessbelagd verksamhet är dock inte kända för allmänheten.

### Referenser

Cox, D. B. (1979) *Integration of GPS with inertial navigation systems*. AGARD Principles and Operational Aspects of Precision Position Determination Systems 10 p(SEE N 80-10154 01-04).

Faragher, R. and Marek, Z. (2020) *OneWeb LEO PNT: Progress or Risky Gamble? Inside GNSS, September 2020*. Available at: <https://insidegnss.com/oneweb-leo-pnt-progress-or-risky-gamble/>.

Fernandez-Hernandez, I., Vecchione, G. and Díaz-Pulido, F. (2018) *Galileo authentication: A programme and policy perspective*, in 69th International Astronautical Congress.

- Hein, G. (2020) *Status, perspectives and trends of satellite navigation*, Satell Navig 1:22 <https://doi.org/10.1186/s43020-020-00023-x>
- Jensen, A. B. O. and Mitchell, C. (2011) *GNSS and the ionosphere*. GPS world, 22(2), pp. 40–42.
- Kaplan, E. and Hegarty, C. (2005) *Understanding GPS: principles and applications*. Artech house.
- McCreadie, M. (2019) *Standardisation of GNSS Threat Reporting and Receiver Testing Through International Knowledge Exchange, Experimentation and Exploitation STRIKE 3*. Available at: <https://www.nordicgeodeticcommission.com/wp-content/uploads/2019/12/NKG-White-Paper-on-Future-Positioning-Services-2019.pdf>.
- Nordic Geodetic Commission (2019) *White Paper – Future Positioning Services*. Available at: <https://www.nordicgeodeticcommission.com/wp-content/uploads/2019/12/NKG-White-Paper-on-Future-Positioning-Services-2019.pdf>.
- Olesen, D. H. *et al.* (2020) *Robustness of High Accuracy GNSS-based Positioning using GNSS Reference Stations in Urban Environments*. Proceedings of the 33rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2020), pp. 2453–2467.
- Teunissen, P. and Montenbruck, O. (2017) *Springer handbook of global navigation satellite systems*. Springer.

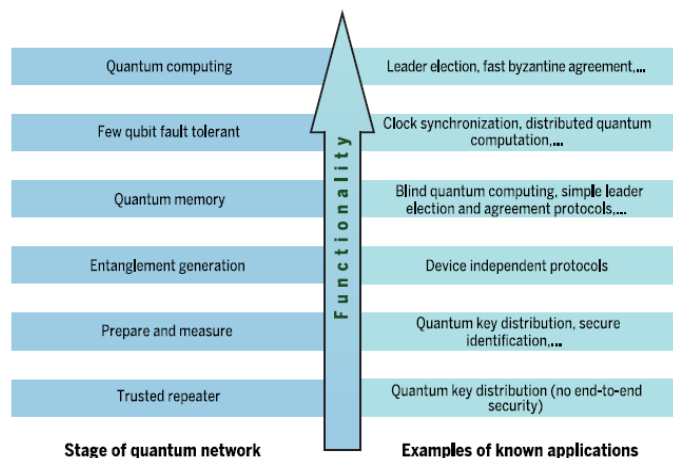


### 3.9 Kvantavkänning och kommunikation för rymden

#### Bakgrund

Kvantavkänning eller mätning avser växelverkan med ett fysiskt system, vars resultat inte kan beskrivas med klassiska eller halvklassiska teorier. Detta innebär att objektet och fältet som växelverkar måste beskrivas av kvantfysik och fältens icke-klassiska egenskaper utnyttjas för att förstå resultaten. Till exempel att räkna fotoner i en laserstråle är en halvklassisk mätning, men att utnyttja kvantkorrelationer eller sammanflätning (eng.: *entanglement*) mellan fotoner för att uppnå högre upplösning i en mätning skulle vara en kvantmätning (Erkmen, 2012). Semiklassiska mätmetoder ingår dock ofta i området för kvantavkänning (Degen, 2017). I det nuvarande skedet av teknikutvecklingen är distinktionen inte av avgörande betydelse, men man måste betänka det framtida slutliga målet att bygga ett nät av kvantsensorer i rymden som interagerar och utbyter information över rymdens kvantkommunikationskanaler, inklusive kvantupplänkar och nedlänkar samt att informationen sedan bearbetas av kvantdatorer för att lösa de uppgifter som skulle vara otänkbara med klassiska medel. En sådan hopflätad helhet av kvantteknologier kallas vanligt *quantum internet* (Wehner, 2018). Utvecklingen mot det illustreras i Fig. 15. Den första praktiska tillämpningen i rymden blir sannolikt kvantnyckelutbyte (QKD – *Quantum Key Distribution*) som nu har nått en TRL av 6.

Väsentliga fördelar erbjuds av kvantavkänning. Genom att ta fotoniska lösningar, t.ex. för positions- eller frekvensmätningar (tidsmätningar), skalar känsligheten hos de konventionella teknikerna som  $1/\sqrt{N}$ , medan i kvantsensorer som  $1/N$ , där  $N$  är antalet uppmätta fotoner. Kvantkommunikation kan koda betydligt fler bitar per detekterad foton jämfört med klassisk kommunikation och detta resulterar i ökad energieffektivitet med en faktor 4 i kvantkanaler (Shapiro, 2009). Samtidigt fås en betydande ökning av kanalkapaciteten, upp till den så kallade *Holevo's bound* (ökningen av kanalspektrala användningen uppskattas till en storleksordning (Erkmen, 2012). Kostnads-nyttanalyser av hela kvantnätssystemet är inte meningsfullt i dag eftersom många nödvändiga praktiska lösningar ännu inte har hittats. Mycket internationellt arbete pågår dock för att utveckla nödvändiga resurser för kvantavkänning och kommunikation, särskilt för rymdsegmentet, eftersom de vanliga faktorerna som förlust, spridning och icke-linjäritet minskar drastiskt i omloppsbana, vilket ökar koherenstiden för kvantsystemen. Sådana resurser för kvantmätning och



Figur 15: Steg i utvecklingen av kvantinternet. Svårighet och funktionalitet ökar längs pilen (Wehner, 2018).

kommunikation är: **källor till generering av kvantkorrelerade fotoner på begäran, matriser av energikänsliga enfotondetektorer, rymdqualificerade atomkondensat som avkänningsmedium och ett kvantlagringsmedium samt förutsättning för rymdqualificerade atomklockor med hög precision**, optiskt kylta och avlästa **optomekaniska resonatorer med högt Q-värde för precisionströghetsmätning och elektromagnetisk fältavkänning** som i huvudsak är makroskopiska mekaniska analogier av kalla atomsystem. Hjälptekniker som **optiska beläggningar för ultra-låg förlust och komponenter** för strålningsmiljön i rymden måste fulländas eftersom kvanttillstånd inte kan klonas, varför kvantförstärkare inte ens i princip kan göras. Rymdbaserade **interferometrar med lång bas**, t.ex. som ESA:s *LISA*-uppdrag, kan göras för att tjäna flera mål. Den oöverträffade stabilitet som kan förväntas utifrån resultaten av *LISA Pathfinder*-uppdraget (ESA) och **kvantum-förbättrad** genom att undertrycka hagelbrus med en korrelerad fotonkälla, förutom en känslig gravitationsvågdetektor, kan bli en utmärkt **frekvensstandard** för framtidens rymd- och marknät. Genomförandet av en sådan standard skulle kräva länkar för **kvanttids- och frekvensöverföring** (EU COST Quantum Space, 2019), t.ex. genom att utnyttja sammanflätade fotonpar. Mycket exakt tidmätning är avgörande för **gravitationssensorer** i rymden med hjälp av små satelliter som flyger i formation samt interferometri. En föregångare till detta tillvägagångssätt är de mycket framgångsrika gravimetriuppdragen *GRACE* (NASA-ESA) (ESA, 2021) och *GOCE* (ESA) (ESA, u.å.), vilken producerade värdefulla observationsdata relaterade till de förändringar av jordens densitet som påverkas av klimatfaktorerna.

## Nuläge

Under de senaste åren har både nationella och internationella initiativ inom kvantteknik lanserats med betydande finansiering. Dessa inkluderar EU:s *Quantum Technology Flagship* (Quantum flagship, 2021), Storbritanniens *Quantum Technology Hub* (UK National Quantum Technologies Programme), USA:s *National Photonics Initiative* (US Congress, 2018), Tysklands Quantum Technology Institute vid DLR (DLR, u.å.) och stora ansträngningar lanserades i Kina 2016. Alla dessa program ägnar stor uppmärksamhet åt rymdrelaterad kvantteknik. En svensk satsning finansieras av Knut och Alice Wallenberg (KAW) stiftelse med visst statligt stöd. KAW-initiativet ägnas främst åt kvantberäkning och rymdapplikationer behandlas inte. Den första demonstrationen av kvantanvändning på satellit kom från Kina med *QUESS* (Quantum Experiments at Space Scale) på LEO-satelliten *MICIUS*, som drivs av Chinese Academy of Sciences (Pan, 2018). *MICIUS* har ombord källor till korrelerade fotoner med spontan parametrisk nedkonvertering (SPDC, *spontaneous parametric downconversion*). Det gav mycket PR för Kina även om teknik som användes ombord har varit känd och visad på marken i över 30 år. Uppdraget demonstrerade generering och distribution av kvantkryptografinycklar (QKD) över Kina och mellan Asien och Europa, distribution av kvantsammanflätning distribution samt teleportering. Efter den kinesiska demonstrationen har omkring 64 CubeSat-uppdrag föreslagits runt om i världen. Alla handlar om olika aspekter av distribution av kvantkryptografinycklar (QKD) och tester av säkra optiska metoder för upp- och nedlänk. För närvarande är det bara *UK-QT Hub* som använder en 12U CubeSat-plattform som har ett preliminärt uppsändningsdatum: 2023–2024. ESA och Europeiska kommissionen har under 2019 nått

en överenskommelse om att stödja framtida rymduppdrag om ultrasäker kvantkommunikation genom ESA:s ARTES-program och inkludera *Security And CryptoGraphic Mission (SAGA)*, en del av EU:s program för rymdsystem för säkerhet och trygghet (ESA, 2019). QKD och kryptografi med hjälp av satelliter börjar nå kommersiella tillämpningar. Inom detta segment stödjer ESA de kommersiella uppdragen *QKDSat* och *QUARTZ*. Detta visar att de två lägsta stegen i utvecklingen av kvantkommunikationsnät redan har nått en betydande mognad och ett tydligt kommersiellt intresse. **Frekvensstandarder** i rymdmiljö utforskas aktivt av ESA:s *ACES*-experiment (eoPortal Directory, 2021) med en ultrastabil atomklocka ombord på ISS. Dessa experiment kommer att fastställa riktlinjer för framtida rymdkvalificerade atomtidsstandarder. Att synkronisera klockor i omloppsbanan och på marken i kvantkommunikationsnätverk kräver att man använder säkra kvantprotokoll i upp- och nedlänken. **Tids-frekvensöverföring** i kvantsatellit-marklänkar har undersökts av *QUESS* och uppnått 9 kHz datahastighet med en precision av tidsöverföringen på 30ps (Dai, 2020).

### Prognos 2040

Trots de nämnda prestationerna är detta bara ett första steg mot kvantsensorer och kommunikationsnät i rymden. Nuvarande begränsning tillåter endast generering av hundratals Mbit av säkra nycklar per år med hjälp av föreslagna satellitplattformar (Sidhu, 2021). Man kan också dra slutsatsen att kvantkommunikation med satelliter sannolikt inte kommer att överstiga hastigheter av 1 Gbit/s under de kommande 10 åren. Vissa viktiga komponenter i nätverket som kvantminnen saknas i huvudsak och behöver utvecklas. Implementeringen av hela kvantinternet, inklusive omfattande distribuerade kvantavkänningsnätverk, ligger utanför rapportens 20-åriga horisont. Därför är det ett bra tillfälle att investera i att utveckla kompetens inom kvantanalys och kvantkommunikation i rymden för att placera Sverige närmare fronten i dessa framtida viktiga teknikområden. Samtidigt är det realistiskt att förvänta sig förbättrad mätning och sensorer med helt eller delvis ingående kvantteknik, även om den fortfarande använder klassiska kommunikationsnät under de kommande 20 åren. Dessa kommer att omfatta kvanttröghetsensorer för gravimetriuppdrag, frekvensstandarder i rymden med hjälp av atomklockor med hög precision och interferometrar med mycket lång bas, som *LISA* med noder placerade i Lagrange-punkterna.

### Referenser

Dai, H. et al (2020). *Towards satellite-based quantum-secure time transfer*. Nature Physics, 16, 848.

Degen, C. L. et al. (2017). *Quantum sensing*. Rev. Mod. Phys. 89, 2.

DLR (u.å.). *Institute of Quantum Technologies*.

[https://www.dlr.de/qt/en/desktopdefault.aspx/tabid-13498/23503\\_read-54020/](https://www.dlr.de/qt/en/desktopdefault.aspx/tabid-13498/23503_read-54020/) [22-5-2021]

eoPortal Directory (2021). *ISS Utilization: ACES (Atomic Clock Ensemble in Space)*.

<https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/i/iss-aces>

- Erkmen, B. I., Shapiro, S. and Schwab, K. (2012). *Quantum Communication, Sensing and Measurement in Space*. Keck Institute for Space Studies Report  
[http://kiss.caltech.edu/final\\_reports/Quantum\\_final\\_report.pdf](http://kiss.caltech.edu/final_reports/Quantum_final_report.pdf)
- ESA (2019). *European quantum communications network takes shape*.  
[http://www.esa.int/Applications/Telecommunications Integrated Applications/European quantum communications network takes shape](http://www.esa.int/Applications/Telecommunications_Integrated_Applications/European_quantum_communications_network_takes_shape) [22-5-2021]
- ESA (2021). <https://earth.esa.int/eogateway/missions/grace> [22-5-2021]
- ESA (u.å.). *GOCE*. [http://www.esa.int/Applications/Observing the Earth/GOCE](http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/GOCE) [22-5-2021]
- EU COST Quantum Space (2019). *Quantum Technologies in space*. Policy White Paper
- Pan J. (2018). *Progress of the Quantum Experiment Science Satellite (QUESS) "Micius" Project*. In *Space Science Activities in China, National report 2016-2018*, s. 51-56.  
<http://english.nssc.cas.cn/ns/NU/201809/W020180906583002411445.pdf>
- Quantum flagship (2021). *The future is Quantum*. <https://qt.eu> [22-5-2021]
- Shapiro, J. H. (2009). *The quantum theory of optical communications*. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 15, 1547.
- Sidhu, J. S. et al. (2021). *Finite keys in satellite quantum key distribution*.  
arXiv:2012.07829v2
- UK National Quantum Technologies Programme (2021). <http://uknqt.epsrc.ac.uk> [22-5-2021]
- US Congress (2018). *National Quantum Initiative Act*.  
<https://www.congress.gov/congressional-report/115th-congress/house-report/950/1>  
[22-5-2021]
- Wehner, S. et al, (2018). *Quantum internet: A vision for the road ahead*, Science, 362 (2018). DOI: 10.1126/science.aam9288

### 3.10 Elektronik, speciellt tålig elektronik för rymdtillämpningar

#### Bakgrund

Elektronik som ska användas i rymdtillämpningar måste tåla större påfrestningar än jordbunden elektronik. För att klara vibrationerna vid uppskjutningen till rymdens vakuum och potentiellt stora temperaturväxlingar sorteras och testas elektroniken. Livslängden påverkas av strålningståligheten, eftersom effektiv skärmning skulle ta för stor del av viktbudgeten. Effektsnål elektronik är av intresse både för energibudgeten (begränsad av satellitens solpaneler med batterier) och för temperaturbudgeten (eftersom vi inte kan förlita oss på konvektion via kylflänsar för kylning). I militära sammanhang diskuteras även tåligheten mot HPM (*High Power Microwave*) riktad mikrovågsstrålning som är avsedd att störa ut eller förstöra känsliga radiosteg.

Några möjligheter har kommit fram på senare tid som skulle tillåta tåligare elektronik även i satelliter. Den ena är bredbandgapshalvledarna kiselkarbid (SiC) och galliumnitrid (GaN). Den andra är en strålningstålig anpassning av konsumentelektronik till ett lägre pris än tidigare och som kan tillverkas i vanliga halvledarfabriker, s k Foundries.

#### Nuläge bredbandgapselektronik

De båda bredbandgapshalvledarna SiC och GaN används idag i högspänningstillämpningar (600 – 1700 V) och finns som kommersiella diskreta halvledare, både Schottkydioder och MOSFET-switchar. Tack vare lägre ledförluster även vid höga switchfrekvenser kan stora vinster göras på systemnivå genom mindre transformatorer för omvandlare och mindre behov av kylflänsar. Detta minskar vikten och volymen, vilket är av intresse för både rymd- och flygtillämpningar. Lägre ledförluster minskar behovet av kylning, vilket är en stor fördel för rymdelektronik.

Tack vare starkare bindningar mellan atomerna och större elektroniskt bandgap har SiC i sig större strålningstålighet än kiselelektronik, både för permanenta strålskador (TID) och för tillfälliga feltillstånd (SEE/SEU). De exakta gränserna är inte lika väl utforskade som för kisel. Forskning pågår på KTH i ett projekt finansierat av Rymdstyrelsen (SUPERHARD IC). Processteknologin för integrerade kretsar ligger långt efter kisel (ca 30 år), men kan utvecklas snabbt om tillräckliga resurser skulle tillkomma. Resultat från forskning finns på KTH (Zetterling, 2017).

För att öka tåligheten mot HPM kan bredbandgapshalvledaren GaN vara en möjlighet. Det finns högfrekvenstransistorer av HEMT-typ som kan användas upp till tiotals GHz och flera 100 W (Wolfspeed, 2021). Viss forskning bedrivs/bedrevs vid Chalmers, FOI och KTH. Idag tillverkas GaN på SiC av ett svenskt företag (SweGaN, 2021). Idag finns även billigare material där GaN har tillverkats på kiselskivor, men detta är främst avsett för högspänningstillämpningar (Imec, 2021).

Bredbandgapshalvledarna klarar också högre arbetstemperaturer (Cressler, 2013). I ett projekt på KTH ([workingonvenus.se](http://workingonvenus.se)) har integrerade kretsar tillverkats och testats upp till 500 eller 600 °C. Integrerade kretsar med upp till ca 5000 transistorer har gjorts som implementerar en enklare dator, minnen, förstärkare, A/D-omvandlare, D/A-omvandlare och drivkretsar för kraftkomponenter (Zetterling, 2020). Även radiokretsar som arbetar vid

59 MHz och 500 °C har visats (Mantooth, 2021). Även NASA arbetar med högtemperaturelektronik sedan länge (Neudeck, 2017).

### Nuläge strålningstålig kiselelektronik

Strålningstålig elektronik har till stor del handlat om kiselelektronik som gjorts mer tålig via kretsdesignförändringar eller ändringar i tillverkningsprocessen. Utprovningen är dyrbar och tidskrävande. Nu har företaget Vorago lanserat sin Hardsil-process som möjliggör tillverkning av avancerade kiselkretsar i strålningståligt format utan stora förändringar vid tillverkningen, inklusive ARM-kärnor (Vorago, 2021). Kretsarna har testats bl.a. på SpaceX Falcon 9 (Vorago, 2021). Den stora FPGA-tillverkaren Achronix samarbetar nu med Vorago (Achronix, 2021). Många etablerade högprestandakretsar kan därmed bli tillgängliga för rymdtillämpningar till lägre pris. Dock inga svenska forskningsinsatser på detta område ännu.

### Prognos 2040

Tekniken för högspänningselektronik i SiC och GaN är redan idag kommersiell, men med högre spänningar kan elektrisk framdrivning av småsatelliter bli möjlig. Ett nytt forskningsprojekt vid KTH från Rymdstyrelsen kommer att undersöka möjligheterna (ICARUS).

Integrerade kretsar i SiC har demonstrerats med 5000 transistorer. Inom en period på 20 år och med en stor forskningsinsats skulle man kunna öka packningstätheten med en faktor 1000 enligt Moore's lag. Därmed skulle många system som idag byggs med kisel kunna byggas med SiC för rymdtillämpningar. Det skulle ge kraftfullare satelliter som överlever längre tid i omloppsbanan.

En riktad satsning på HPM-tålig elektronik i GaN skulle kunna öppna för användning även på marknaden. FOI hade ett projekt för flera år sedan, som då såg stora utmaningar i materialkvalitet och pris, men som nu skulle kunna återupptas med bättre material.

### Referenser

Achronix (2021). <https://semiwiki.com/events/296154-webinar-achronix-and-vorago-deliver-innovation-to-address-rad-hard-and-trusted-soc-design/> [23-05-2021]

Cressler, J., and Mantooth, H. A. (2013). *Extreme Environment Electronics*, CRC Press. DOI: 10.1201/b13001

ICARUS, Zetterling, C.M., KTH, SNSA 2021 – 2024.

Imec, <https://www.imec-int.com/en/press/imec-and-aixtron-demonstrate-200-mm-gan-epitaxy-aix-g5-c-1200v-applications-breakdown-excess> [23-05-2021]

Mantooth, A., Zetterling, C.-M., Rusu, A. (2021). *Venus Calling Silicon Carbide Radio Circuits Can Take The Heat Needed To Phone Home From Our Hellish Sister Planet*, IEEE Spectrum, 58(5), 24-30. DOI: 10.1109/MSPEC.2021.9423815

Neudeck, P. G. et al. (2017). *Demonstration of 4H-SiC Digital Integrated Circuits Above 800 °C*, IEEE Electron Device Letters, 38(8), 1082 – 1085. DOI: 10.1109/LED.2017.2719280

SweGaN, <https://swegan.se/quanfine/> [23-05-2021]

SUPERHARD IC, Zetterling, C.M., KTH, SNSB 2017 – 2022.

Vorago <https://www.voragotech.com/products-main/#arm-microcontrollers> samt  
<https://www.voragotech.com/flight-heritage> [23-05-2021]

Wolfspeed, <https://www.wolfspeed.com/rf/products> [23-05-2021]

Zetterling, C.-M., Hallen, A., Hedayati, R., Kargarrazi, S., Lanni, L., Malm, B.G., Mardani, S., Norstrom, H., Rusu, A., Suvanam, S.S., Tian, Y., and Östling, M., (2017). *Bipolar integrated circuits in SiC for extreme environment operation*, Semiconductor Science and Technology, 32, p. 034002. DOI: 10.1088/1361-6641/aa59a7

Zetterling C.-M., Kargarrazi S., Shakir M. (2020). *Wide Bandgap Integrated Circuits for High Power Management in Extreme Environments*. In: Baschiroto A., Harpe P., Makinwa K. (eds) *Next-Generation ADCs, High-Performance Power Management, and Technology Considerations for Advanced Integrated Circuits*. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-25267-0\_10

## 3.11 Artificiell Intelligens (AI) och Kvantdatorer

### Bakgrund

Det finns ingen tvekan om att Artificiell Intelligens (AI) och dess underområden Machine Learning (ML) och Deep Neural Networks (DNN) är här för att dominera teknikutvecklingen för ansiktsigenkänning, signalspaning, självkörande fordon med mera. Detta öppnar upp för såväl civil som militär användning, och mer AI i rymden kan möjliggöra många tillämpningar.

Anledningen till de stora genombrott som kommer nu är större datorkraft i form av parallella datorer, grafikprocessorer och speciell hårdvara. Det som inte alltid nämns är att framstegen kostar i energi. Datorerna för de första självkörande bilarna kan dra betydande mängd energi. Snabbare och kraftigare datorer kan oftast uppnås om bara tillräcklig energi och pengar finns. Energibehovet är dubbelt problematiskt för rymdtillämpningar, eftersom både energin och kylförmågan är begränsad.

Det som skulle göra det möjligt att nyttja mer AI av olika slag i rymden är den forskning som nu görs på lågenergidatorer för AI. Ett mål har länge varit att bygga datorer som förbrukar lika lite el som den mänskliga hjärnan (100 W), s.k. brain-like computing. För att åstadkomma detta har nya arkitekturer föreslagits, som använder äldre forskningsområden som stokastiska/probabilistiska/approximativa beräkningar. Detta har möjliggjorts genom framsteg inom memristortekniken.

De olika tekniker som används tangerar även utvecklingen av kvantdatorer. Här finns förhoppningen om mycket hög beräkningskraft, men också farhågan att en hel del etablerade krypteringstekniker skulle bli obsoleta. Det finns också farhågan att AI kommer att användas för militära ändamål som leder till slutet för mänskligheten.

### Nuläge lågenergi-AI

Energiförbrukningen i en klassisk dator i CMOS-teknik kan beräknas från kapacitans, klockfrekvens och matningsspänning. Trots förbättringar som framkommer via skalning enligt Moore's lag, så kvarstår faktum att fler och snabbare beräkningar alltid kostar mer energi. För att drastiskt kunna minska energiförbrukningen måste nya paradigmer och arkitekturer tas fram. Moderna datorer och mobiltelefoner använder DVFS (*Dynamic Voltage Frequency Scaling*) för att dynamiskt styra klockfrekvens och matningsspänning, och kan även stänga av delar av processorn som inte används. För mycket låg energiförbrukning används subtröskeldesign av logiken, men i gengäld kan dessa kretsar bara användas vid en tusendel av klockfrekvensen, så det är inte en option för AI.

*Brain-like computing* (även *neuromorphic* eller *cognitive computing*) försöker efterlikna hjärnans beräkningar med komponenter som liknar neuroner. Tekniken föreslogs redan 1990, men senare års framsteg inom memristortekniken och spintroniken har lett till ökat intresse. Memristorer kan tillverkas tex med ReRam, MRAM och phase-change memory. Förhoppningen är att eftersom varje neuron behandlar mer information än en bit, så kan den totala energiförbrukningen minskas. Exempel på tekniken är Loihi (Intel, 2021) och eBrainII (Stathis, 2020), som använder SNN (Spiking Neural Networks) alternativt ANN (*Artificial Neural Networks*).



Förutom kvantdatorer görs mycket arbete på tekniker som på engelska kallas Probabilistic computing (p-computing). Ofta hänvisas till släktskapet enligt figuren (Camsari, 2019). Fördelen med p-computing och relaterade områden är att de fungerar vid rumstemperatur, till skillnad från kvantdatorer som oftast byggs för att operera vid mycket låg temperatur. P-bits har fått ett uppsving tack vare spintroniken, de kan byggas med en MTJ (*Magnetic Tunnel Junction*) (Camsari, 2019).

CMOS / Stable magnets	Unstable magnets	Single spins
Bits	p-bits fluctuate between 0 & 1	q-bits delicate superposition of 0 & 1
either 0 or 1		
Digital computing	p- circuits p- computing	Quantum computing
	Room temperature	

Några andra varianter, främst för bildbehandling inom AI är Approximative computing och Stochastic computing.

### Nuläge kvantdatorer och kryptering

Det leder oss till kvantdatorer, som finns av flera typer. Den mest omtalade är kanske Adiabatic Quantum computing (även quantum annealing) med datorer från D-Wave som köpts av både Lockheed-Martin och Google (D-wave, 2021). Det behövs stora resurser för arbete med kvantdatorer, eftersom kvantdatorerna oftast bygger på "qubits" som måste hållas kylda med helium mycket nära den absoluta nollpunkten. En sådan satsning är EU:s Quantum Flagship, som även forskar på kvantkommunikation och kvantsensorer. Området är för stort för att sammanfattas här men är definitivt värt att bevaka.

Med Shor's algoritmen kan en kvantdator faktorisera ett långt heltal till dess två primfaktorer. Eftersom många populära krypteringssystem, inklusive RSA, använder asymmetrisk kryptering, så hotas många hemligheter av kvantdatorernas användning. Hemliga meddelanden kan sparas idag och läsas i framtiden. Post-kvantdatorerkryptografi handlar om kryptografisystem som inte bygger på asymmetrisk kryptering. Exempel är SHA-256 och alla former av kryptografi som bygger på elliptiska kurvor (ECC, *Elliptic Curve Cryptography*). Därmed borde Bitcoin och andra block-kedjor klara sig (Huang, 2020).

Ett annat område inom kryptering som inte bygger på kvantdatorer är PUF (*Physically Unclonable Functions*) (Maes, 2010; McGrath, 2019). Men även om kryptona inte kan angripas matematisk så kan de oftast angripas via en sidokanalsattack, tex genom att mäta strömförbrukningen eller utstrålade radiovågor från elektroniken, se t.ex. (Xu, 2014) eller (Yu, 2020). För sidokanalsattacker (eng Side-channel attacks) finns en ledande grupp på KTH med Prof. Elena Dubrova.

### Prognos 2040

AI kommer förr eller senare nyttjas för rymdtillämpningar, det beror lite på vad man definierar som AI. Mycket stora satsningar görs inom området. Om kvantdatorer kommer att finnas 2040 är svårt att avgöra. Det debatteras om de finns idag, se tex debatten om Quantum Supremacy och D-Wave.

En aspekt av all AI, i rymden eller inte, är det hot som AI i vapensystem utgör mot människorasen som helhet (Tegmark, 2017).

## Referenser

Barua, H.B. and Mondal, K.C. (2019). *Approximate Computing: A Survey of Recent Trends—Bringing Greenness to Computing and Communication*, J. Inst. Eng. India Ser. B, 100(6), 619–626. DOI: 10.1007/s40031-019-00418-8

Camsari, K. Y., Sutton, B. M. and Datta, S. (2019). *p-Bits for Probabilistic Spin Logic*, Applied Physics Reviews 6, 011305. DOI: 10.1063/1.5055860 samt <https://nanohub.org/resources/28491> (besökt 2021-05-23)

D-wave Computing, <https://www.dwavesys.com/> och [https://en.wikipedia.org/wiki/D-Wave\\_Systems](https://en.wikipedia.org/wiki/D-Wave_Systems) och [https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_supremacy](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_supremacy) [23-05-2021]

EU Quantum Flagship <https://qt.eu/> [23-05-2021]

Huang, R. (2020). *Here's Why Quantum Computing Will Not Break Cryptocurrencies*. Forbes <https://www.forbes.com/sites/rogerhuang/2020/12/21/heres-why-quantum-computing-will-not-break-cryptocurrencies/?sh=b9b7a35167b5> [23-05-2021]

Intel (2021). *Neuromorphic Computing*. <https://www.intel.com/content/www/us/en/research/neuromorphic-computing.html> [23-05-2021]

Maes R. and Verbauwheide I., *Physically Unclonable Functions: A Study on the State of the Art and Future Research Directions*. In: Sadeghi AR., Naccache D. (eds) *Towards Hardware-Intrinsic Security, Information Security and Cryptography*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.

DOI: 10.1007/978-3-642-14452-3\_1

McGrath, T. et al. (2019). *A PUF Taxonomy*. Applied Physics Reviews, 437 (6), 011303 DOI: 10.1063/1.5079407

Stathis, D. et al. (2020). *eBrainII: a 3 kW Realtime Custom 3D DRAM Integrated ASIC Implementation of a Biologically Plausible Model of a Human Scale Cortex*. J. Signal Process. Syst., vol. 92, no. 11, pp. 1323–1343. DOI: 10.1007/s11265-020-01562-x.

Tegmark, M. (2017). *Life 3.0 Being Human in the Age of Artificial Intelligence*, Knopf; Future of Life Institute (FLI), <https://futureoflife.org/> [23-05-2021]

Xu, X. and Burleson, W. (2014). *Hybrid side-channel/machine-learning attacks on PUFs: A new threat?*. Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), pp. 1-6. DOI: 10.7873/DATE.2014.362.

Yu, Y., Moraitis, M. and Dubrova, E. (2020). *Profiled Deep Learning Side-Channel Attack on a Protected Arbiter PUF Combined with Bitstream Modification*. IACR Cryptology ePrint Archive: Report 2020/1031 <https://eprint.iacr.org/2020/1031> [23-05-2021]

## 3.12 Cybersäkerhet i rymden

### Bakgrund

Under de senaste årtiondena har samhället digitaliserats i allt större utsträckning. Denna digitalisering är på olika sätt förbunden med mänsklig verksamhet i rymden. Kommunikationssatelliter fyller en central roll i det digitala samhället. Digitala tjänster som Google Maps bygger på högupplösta satellitfoton, och globala positioneringssystem som GPS är av stor och ökande betydelse för den fortsatta digitaliseringen. Kommunikationen mellan jorden och rymdbaserade system, som satelliter, rymdstationer och obemannade farkoster är också digital. Via digital kommunikation sker även den kritiska styrningen av satelliter och andra system.

Digitala system har, emellertid, visat sig vara överraskande sårbara för cyberangrepp. Det finns anledning att ta cyberhotet på stort allvar även vad gäller rymdbaserade system.

### Nuläge

Dagens digitala system är sårbara för cyberangrepp. Det har visat sig märkvärdigt svårt att bygga system som saknar allvarliga sårbarheter. Det har också visat sig vara mycket svårt att försvara dessa sårbara system med externa skyddssystem och -rutiner. Många typer av system som man tidigare trodde var immuna mot cyberangrepp har på senare tid visat sig sårbara. Driftstödssystem för samhällets kritiska infrastruktur, som elkraftsystem, vattendistributionssystem, trafiksystem och kommunikationssystem har alla visat sig innehålla sårbarheter (Smith, 2019; Robles, 2021; Shaik, 2019), och i flera fall har sådana sårbarheter utnyttjats av illasinnade angripare. Ett exempel är när eldistributionssystem i Ukraina hackades och stängdes ned under 2015 (Zetter, 2016). Även militära system har visat sig oroväckande sårbara för cyberattacker (GAO, 2018). På senare tid har frågor till och med väckts om cybersäkerheten i ledningsstödsystem för kärnvapen (Afina, 2020). Amerikanska myndigheter har också uttryckt stor oro över cybersäkerheten i satellitsystem (GAO, 2019). Det finns rapporter om cyberangripare som hackat satelliter, tagit över styrningen och förstört systemen (Tucker, 2019).

Ett ytterligare bekymmer är att de resurser som stater och kriminella grupper lägger på att utveckla och använda sig av offensiva cyberförmågor har ökat dramatiskt under senare år. Sverige och övriga västvärlden är särskilt bekymrade över mer eller mindre ständigt pågående angrepp från bland andra Ryssland, Kina och Iran (Säkerhetspolisen, 2021).

### Prognos 2040

Två nyckelfrågor kommer att vara av stor betydelse för utvecklingen av cybersäkerhetsproblemet inom den närmaste 20-årsperioden: (i) i vilken utsträckning vi finner metoder för att bygga säkra programvarubaserade system, och (ii) utvecklingen inom artificiell intelligens.

Som ovan nämnts har det visat sig överraskande svårt att bygga säkra digitala system. Trots att omfattande resurser under senare år lagts på att lösa cybersäkerhetsproblemet så har gapet mellan hot och skydd fortsatt att öka. Det finns emellertid fortfarande hopp om att finna metoder för att bygga system som inte lider av ett stort antal allvarliga sårbarheter. Sårbarheterna utgörs nästan alltid av små och lättträttade programmeringsmisstag. Det är inte otänkbart att verktyg kommer att utvecklas för att identifiera sådana misstag redan under utvecklingsfasen.

Som en konsekvens av påtagliga framsteg under de senaste åren, befinner vi oss nu i en period av optimism kring möjligheterna för artificiell intelligens (AI) att lösa problem som under decennier har gäckat utvecklarna av digitala system. Det är inte otänkbart att AI inom den närmaste tjugoårsperioden kommer att förändra dynamiken i cybersäkerhetsarenan. AI kan komma att användas för både defensiva och offensiva uppgifter. Hotbilden kommer starkt att påverkas av var de största landvinningarna görs.

	Säkra system	Osäkra system
Offensiv AI	Minskad risk	Mycket hög risk
Harmlös AI	Minskad risk	Ökad risk

Om det blir möjligt att på ett kostnadseffektivt sätt utveckla digitala system utan allvarliga sårbarheter så kommer cyberhotet att minska. Om problemet med säker utveckling är fortsatt olöst, så kommer hotbilden att bero på utvecklingen inom AI. Om AI framgångsrikt appliceras på offensiva uppgifter så kommer situationen att förvärras avsevärt i jämförelse med idag. Om de närmaste tjugo åren inte ser några genombrott inom systemutveckling eller AI så kommer risken ändå att öka på grund av den ökande digitaliseringen och utvecklingen av mer potenta offensiva förmågor.

### Sammanfattning

Bristande cybersäkerhet är idag ett påtagligt bekymmer för utveckling, förvaltning och nyttjande av digitala system. Satelliter och andra rymdbaserade system utgör inget undantag. En speciell aspekt är dock att det är betydligt svårare att fysiskt nå en rymdbaserad dator varför det kan vara mycket svårare att återställa ett hackat system. Om metoder för utveckling av säkra system får ett genombrott inom de närmaste 20 åren så kommer cybersäkerhetsrisken att minska. Annars kommer den i stället att öka. Om AI framgångsrikt tillämpas för offensiva cyberoperationer så kommer risken att ytterligare öka.

### Referenser

Afina, Y., Inverarity, C., & Unal, B. (2020). *Ensuring Cyber Resilience in NATO's Command, Control and Communication Systems*. International Security Programme. <https://www.chathamhouse.org/2020/07/ensuring-cyber-resilience-natos-command-control-and-communication-systems>

GAO (2018). *Weapon Systems Cybersecurity: DOD Just Beginning to Grapple with Scale of Vulnerabilities*. United States Government Accountability Office, <https://www.gao.gov/assets/gao-19-128.pdf>

GAO (2019). *Space Acquisitions: DOD Faces Significant Challenges as it Seeks to Address Threats and Accelerate Space Programs*. United States Government Accountability Office, <https://www.gao.gov/assets/gao-19-482t.pdf>

Robles, F., Perlroth, N. (2021). *'Dangerous Stuff': Hackers Tried to Poison Water Supply of Florida Town*. The New York Times, <https://www.nytimes.com/2021/02/08/us/oldsmar-florida-water-supply-hack.html>

Shaik, A., & Borgaonkar, R. (2019). *New vulnerabilities in 5G networks*. Black Hat 2019, <https://i.blackhat.com/USA-19/Wednesday/us-19-Shaik-New-Vulnerabilities-In-5G-Networks-wp.pdf>

Smith, R., Barry, R. (2019). *America's Electric Grid Has a Vulnerable Back Door—and Russia Walked Through It*. The Wall Street Journal, <https://www.wsj.com/articles/americas-electric-grid-has-a-vulnerable-back-door-and-russia-walked-through-it-11547137112>

Säkerhetspolisen (2021). *Säkerhetspolisens Årsbok 2020*. Säkerhetspolisen, [https://www.sakerhetspolisen.se/download/18.4ffee9b31787cb4eddc24f/1620385093007/Arsbok\\_2020.pdf](https://www.sakerhetspolisen.se/download/18.4ffee9b31787cb4eddc24f/1620385093007/Arsbok_2020.pdf)

Tucker, P. (2019). *The NSA Is Studying Satellite Hacking*. Defense One, <https://www.defenseone.com/technology/2019/09/nsa-studying-satellite-hacking/160009/>

Zetter, K. (2016). *Inside the Cunning, Unprecedented Hack of Ukraine's Power Grid*. Wired, <https://www.wired.com/2016/03/inside-cunning-unprecedented-hack-ukraines-power-grid/>

#### 4. SAMMANFATTNING

Rymdverksamhet omfattar teknik från väldigt många områden. Det är inte bara bygge och nyttjande av raketerna och satelliter, utan med kreativitet kan det mesta numera hitta en tillämpning relaterat till rymden. I den här rapporten har ett antal forskare på KTH med anknytning till KTH Rymdcenter beskrivit sina respektive teknikområdens rymdtillämpningar och försökt göra en prognos av teknikutvecklingen fram till år 2040. Men som all framtidsspaning så blir det ofrånkomligt en hel del gissning. Utvecklingen går i alla fall nu fort och kommer inom flera områden med stor sannolikhet att öka exponentiellt de närmaste decennierna. Det är dels "etablerade" produkter som raketerna och satelliter, vilka kommer byggas billigare och bättre. Därmed ökas möjligheterna att utnyttja rymdens strategiska läge för olika ändamål – fredliga såväl som fientliga – både i vad som kan göras och för många nya aktörer. Redan idag använder gemene man såväl som ett otal samhällsfunktioner service på marken som tillhandahålls kontinuerligt via rymden. Det är bekvämt men det gör oss liksom samhället i stort starkt beroende av rymdfunktionerna och därmed sårbara. Liksom alla samhällsfunktioner måste även dessa försvaras mot hot.

Några tekniker att hålla ett extra öga på är sensorutveckling, där bland annat utnyttjande av kvantfenomen kan leda till en tidigare aldrig skådad känslighet, och små kärnkraftsgeneratorer för satelliter, då eltillgången på satelliter idag är kanske den största begränsningsfaktorn till vad en satellit kan utföra. AI-utvecklingen som kommer att leda till mer och mer "intelligenta" satelliter och en ökad autonomi är en annan nyckelteknik.

Avslutningsvis, kontinuerlig teknikspaning tillsammans med lärande genom utveckling av viss egen förmåga och deltagande i rymdverksamhet ger de bästa förutsättningarna för att hålla koll på möjligheter och även hot ett par decennier fram i tiden.

#### **Deltagande forskare och deras huvudbidrag**

Christer Fuglesang (Redaktör, Kap. 1, 2, 3.5, 3.7, 4)

Mohammad Bagherbandi (Kap. 3.8)

Yifang Ban (Kap. 3.3)

Jens Fridh (Kap. 3.1)

Sven Grahn (Kap. 1, 3.1, 3.6, 3.7)

Anna Jensen (Kap. 3.8)

Pontus Johnson (Kap. 3.12)

Göran Marklund (Korrektur)

Valdas Pasiskevicius (Kap. 3.4, 3.9)

Oscar Quevedo-Teruel (Kap. 3.6)

Gunnar Tibert (Kap. 3.2)

Carl-Mikael Zetterling (Kap. 3.10, Kap. 3.11)

Oskar Zetterström (Kap. 3.6)