Satellitfysik og Jordobservation

Henning Heiselberg

Center for Security DTU

DTU SPACE



Illustrationer af satellitter om Jorden. Th NASA's global regnmåler GPM over en hurricane.



Satellitter er ideelle til arktisk overvågning.

Indholdsfortegnelse

1. Indledning ... 3
2. Satellittyper og anvendelser ... 4
Jordobservation ... 4
Navigation ... 5
Kommunikation ... 5
Astronomi ... 5
3. Grundlæggende Rumfysik ... 5
3.1 Gravitation ... 5
3.2 Raketter ... 7
3.3 Jordens atmosfære ... 8
3.4 Det elektromagnetiske spektrum ... 10
3.5 Optik, Opløsning og Genkendelsesafstande ... 11
3.6 Satellit Guidance, Navigation og Kontrol ... 13
4. Satellitbaner ... 14
4.1 Grænsen mellem Jordens atmosfære og rummet ... 15
4.2 Jordnære baner (Low Earth Orbits) ... 15
4.3 Medium Earth Orbits ... 18
4.4 Geostationære og geosynkrone baner ... 19
4.5 Jordfjerne baner (High Earth Orbits) ... 19
4.6 Space Junk og Kessler Syndromet ... 19
4.7 Elliptiske Molniya og Tundra baner ... 20
4.8 Lagrange punkter ... 21
4.9 Spiral baner ... 23
5. Sensorer og satellitdata ... 24
5.1 Syntetisk Apertur Radar (SAR) ... 25
5.2 Multispektrale Kameraer - visuelle og infrarøde ... 26
5.3 Kommunikationssatellitter (SATCOM) ... 29
5.4 Skibs-Identifikation: AIS ... 29
5.5 Fly-Identifikation: ADS-B ... 30
5.6 Globale Navigation Satellit Systemer: GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou ... 31
5.7 Andre sensorer ... 33
6. Anvendelser - Show Cases ... 33
6.1 Skibsgenkendelse ... 33

6.2 Arktisk Overvågning, klassifikation og Machine Learning 36
6.3 Præcisionslandbrug 39
7. Fremtiden 41
8. Guide til download af ESA Copernicus Sentinel Data 42
9. Referencer 44
10. Figurliste 45
11. Opgaver 47

1. Indledning

Danmark har hidtil haft fokus på videnskabelige og teknologiske gevinster ved deltagelse i internationalt rumsamarbejde, fortrinsvist gennem det danske medlemskab af ESA - European Space Agency. Men rumfart udgør i dag også en essentiel del af moderne infrastruktur og spiller en væsentlig rolle for vigtige økonomiske, politiske og samfundsmæssige områder, som kommunikation, sikkerhed, navigation, varsling, beredskab, suverænitetshævdelse, identifikation og overvågning.

Primo 2016 blev en tværministeriel arbejdsgruppe oprettet under Styrelsen for Forskning og Innovation, der har lavet en Dansk Rumstrategi [1] baseret på en rapport fra 2015 over "Kortlægning af rumområdet i Danmark" [2], og "Rummet skaber bedre liv på jorden, Fem gode grunde til en dansk rumstrategi" [3] fra 2011, som dog blev lagt i skuffen, men nu genoptaget ifm. Andreas Mogensens rumtur. Den store interesse for rummet afspejles ligeledes i digre rapporter fra danske universiteter og industri [4,5,6]. "Forsvarsministeriets fremtidige opgaveløsning i Arktis" i 2016 [7] og Taksøe rapporten [8] påpeger Forsvarets vigtige rolle i Arktis, idet Forsvaret har til opgave at løse mange civile opgaver på Grønland, Færøerne og Arktis.

Rapporterne påpeger den begrænsede anvendelse af satellitdata i Danmark især set i lyset af de kraftigt voksende frit tilgængelige datamængder, eg. under European Space Agency (ESA) Copernicus program, hvor Sentinel satellitterne opsendes fra 2013 til 2020 [9-10]. Øget anvendelse og udnyttelse af satellitdata (også kaldet *downstream* aktiviteter, hvor *upstream* dækker opsendelser af satellitter) vil være gavnligt for styrelser, ministerier, universiteter og erhvervslivet.

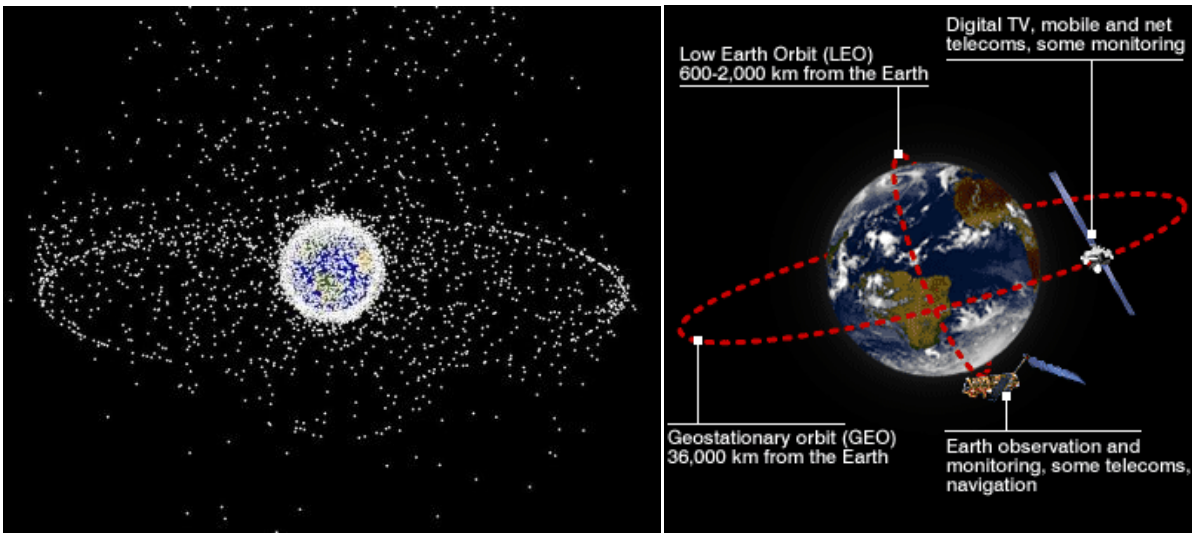
Højtflyvende satellitter kan suppleres af fly og droner i forskellige højder. Deres sensorer inkluderer radarer, billeddannende radarer, kameraer, mv., og de fornyes jævnligt for at følge den højteknologiske udvikling. Deres sensorer er på flere punkter foran satellitternes, idet planlægning, bygning og opsendelse af satellitter tager adskillige år. Satellitternes højere baner tillader dækning af større områder men med lavere opløsning. Kendskab til de forskellige sensordata muliggør bedre udnyttelse og anvendelse.

Formålet med disse noter er, at beskrive de muligheder og begrænsninger, der ligger i satellitter og sensorernes data, samt illustrere og demonstrere lovende anvendelser downstream.

2. Satellittyper og anvendelser

Satellitter kræver kraftige raketter til at bringe dem i kredsløb. Selve satellitten kan opfattes som en platform, der bærer brændstof, styreraketter til banejustering, solpaneler til levering af strøm, antenner til transmission af satellitdata, og sidst men ikke mindst sensorerne. I den sidste ende er det anvendelsen, der bestemmer sensoren, der igen bestemmer satellittype og bane indenfor de fysiske og tekniske begrænsninger og muligheder.

Der kredser omk. 3600 satellitter om jorden, hvoraf godt 1000 er operationelle: 500 satellitter til jordobservation og kommunikation kredser i jordnære baner, ca. 50 navigationssatellitter til GPS systemer kredser i Medium Earth Orbits, og de resterende 500 kredser i den geostationære bane omkring ækvator, og er hovedsagelig kommunikations- og vejrsatellitter. Endelig er der enkelte satellitter i stærkt elliptiske Molniya og Tundra baner (se afsnit 4.7), samt få interplanetare satellitter, der udforsker solsystemet.



Figur 1: Satellit fordeling om Jorden.

For at få et overblik, vil vi indledningsvis give en kort beskrivelse af satellittyperne til observation, navigation og kommunikation, samt deres vigtigste anvendelser.

Jordobservation

Rundt regnet halvdelen af satellitterne anvendes til jordobservation fra jordnære eller geostationære baner. De er udstyret med forskellige sensorer, der peger ned på jordoverfladen, hvor de scanner eller tager billeder i varierende opløsning og arealdækning, og derved moniterer ønskede områder. Hovedanvendelser er:

- Meteorologi: vejr, is, havstrømme

- Reconnaissance: spionage, missilvarsel, nukleare eksplosioner
- Overvågning: skibe, fly, havmiljø, landbrug, fiskeri, trafik
- Suverænitetshævdelse fx i Arktis, Færøerne, Grønland og Syddanmark

Navigation

Navigationssystemer (Navcom) satellitdata til:

- Global Navigation Satellit Systemer (GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou).
- Automatic Identification System (AIS): monitoring af skibstrafik.
- Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B): monitering af flytrafik.

Kommunikation

Halvdelen af satellitterne benyttes til kommunikation (Satcom) som tv, radio, telefoni og anden dataoverførsel. Hovedparten af satellitterne ligger i den geostationære bane, som dog ikke dækker breddegrader over 70-80 omkring polerne. Satcom på især nordlige breddegrader dækkes derfor af Iridium og andre jordnære satellitsystemer, samt satellitter i Molniya og Tundra baner.

Astronomi

En lang række satellitter med rumteleskoper er sendt op gennem årene af især NASA og ESA. Hubble, Planck, Kepler, Spitzer, osv. anvendes til astronomisk og kosmologisk forskning. Ørsted satellitten er Danmarks første og største satellit, der på 15. år måler Jordens magnetfelt. Endelig må man ikke glemme rumstationerne ISS, Skylab, MIR, eller måneraketterne.

En lang række interplanetare satellitter er sendt ud for at passere eller lande på planeter, måner, asteroider og kometer. De fleste er fløjet til Mars og Venus, færre til Merkur, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun, enkelte til Halley's og andre kometer, samt flere asteroider.

3. Grundlæggende Rumfysik

I dette kapitel samler vi vigtige og grundlæggende naturlove og formler, der bestemmer "rumlovene" for satellitter og jordobservation.

3.1 Gravitation

Bevægelse i et tyngdefelt er bestemt af Newton's og Kepler's love. Tyngdeaccelerationen i afstanden r fra Jordens centrum er: $a = \frac{GM_J}{r^2}$, hvor M_J er Jordens masse og G gravitationskonstanten. Vi befinder os på Jordens overflade i radius R_J=6.371km fra Jordens centrum, hvor tyngdeaccelerationen er: $g=GM_J/R_J^2= 9{,}8 m/s^2$. Derfor er $GM_J=gR_J^2$, og tyngdeaccelerationen $a = g\frac{R_J^2}{r^2}$.

I en cirkulær bane med radius r tilbagelægges omkredsen 2πr i løbet af omløbstiden T, hvilket giver en hastighed v=2πr/T. Centripetal accelerationen i en cirkelbevægelse er $a=v^2/r$, som modsvares af tyngdeacceleratione. Herfra kan radius relateres til omløbstiden:

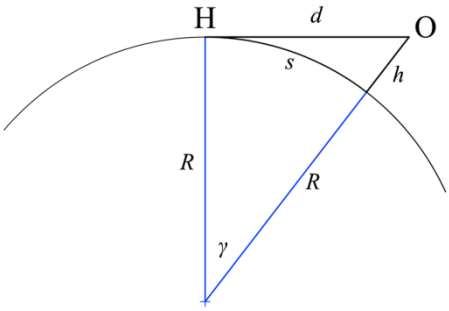
$$r = g^{\frac{1}{3}}\left(\frac{R_J T}{2\pi}\right)^{2/3} . \qquad (3.1.1)$$

Højden over Jordoverfladen: $h=r-R_J$, bliver derfor

$$h = g^{\frac{1}{3}}\left(\frac{R_J T}{2\pi}\right)^{2/3} - R_J \qquad (3.1.2)$$

Satellittens fart er

$$v = R_J\sqrt{g/r} = R_J\sqrt{g/(R_J + h)} \qquad (3.1.3)$$



Figur 2: Satellitten O i højden h over jordoverfladen, kan se ud til horisonten H.

Satellitten kan ikke se hele Jorden, men kun ud til horisonten. Bruger man Pythagoras på trekanten i Figur 2, finder man synsvinklen $\gamma = Arccos(\frac{R_J}{R_J+h})$, og afstanden til horisonten

$$d = \sqrt{2hR_J + h^2} \qquad (3.1.4)$$

Nær Jorden ligger horisonten $d \approx \sqrt{2hR_J}$ væk. Ser man fra en sandklit på 10m, Empire State building i 380m, rutefly eller toppen af Mt. Everest i 9km, eller ISS i 410km højde, ligger horisonten hhv. 11km, 50km, 480km, og 2270km væk.

3.2 Raketter



Figur 3: Raketterne V2 (1944), Saturn V (1965), Space Shuttle (1998) og Space-X (2015) [20].

Det kræver kraftige raketter for at undslippe jordens tyngdefelt. For helt at undslippe Jordens tyngdefelt skal raketten have en kinetisk energi svarende til tyngdefeltets potentielle energi: $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GmM_J}{R_J}$, hvorfra vi kan beregne undslippelseshastigheden

$$= \sqrt{2gR_J} = 11{,}4km/s \qquad (3.2.1)$$

Skal raketten blot op i en jordnær bane ($r \approx R_J$) skal centripetal accelerationen $a=v^2/R_J$ modsvare g, og vi får $v = \sqrt{gR_J} = 8{,}4km/s$.

Vi betragter nu en raket med masse m og hastighed v. Den forbrænder en masse dm (bemærk dm er negativ), der udskydes med konstant hastighed u i forhold til raketten. Herved vokser rakettens hastighed med dv. Impulsbevarelse før og efter giver:

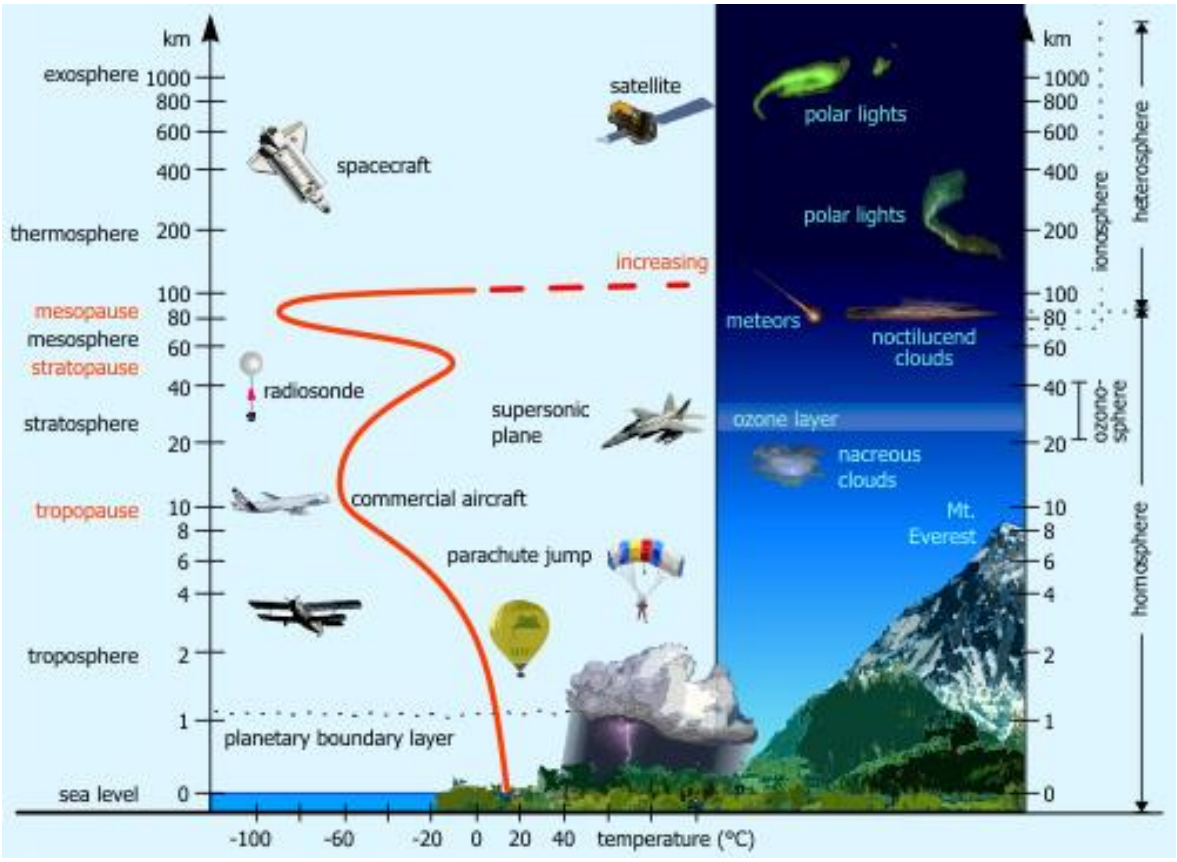
$$mv = (m+dm)(v+dv) + (u-v)dm \qquad (3.2.2)$$

Vi kan ignorere det lille led $dm \cdot dv$, og får $u \cdot dm = -m \cdot dv$. Hvis raketten starter med masse m_{start} og hastighed $v=0$, er løsningen til denne differentialligning *raketligningen*

$$v = u \cdot \ln(m_{start}/m) \qquad (3.2.3)$$

Raketmotorer forbrænder ved temperaturer $T \approx 3000°K$, hvor gassen har hastighed $u \approx 3km/s$ [16], som også er udstødningshastigheden. For at sende en masse m op i en jordnær bane med $v=9km/s$, skal $m_{start}/m = e^{9/3} \approx 20$. Massen m inkluder både satellitten og raketten uden brændstof. Fx vejede Apollo raketten Saturn V 3.000 tons, og kunne bringe en nyttelast på 118 tons op i jordnære baner. Det er fordelagtigt, at dele raketten op i flere trin, som kan skydes af, når brændstoffet i dem er opbrugt, så mindre masse skal bringes op i orbit. Det lykkedes SpaceX at lande en raket i 2015 [20], hvilket gør fremtidig genanvendelse mulig, og vil kunne reducerer raketprisen væsentligt.

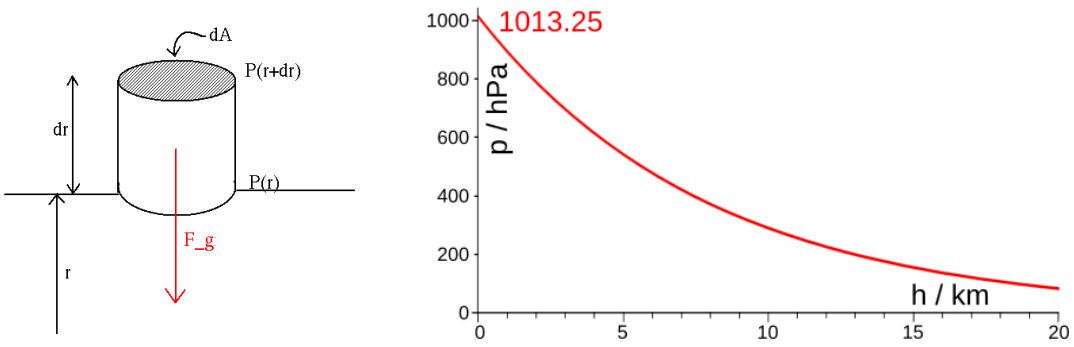
3.3 Jordens atmosfære



Figur 4: Atmosfæren og de nederste rumlag. Den røde kurve angiver temperaturen op gennem atmosfæren.

Vores atmosfære er et tyndt lag af gas på få km's tykkelse rundt om Jorden. Vi vil nu vise, at tryk og tæthed falder nogenlunde eksponentielt med højden h. Hertil betragter vi en lille kasse med areal A og højde dh. Luften i kassen har masse m= ρAdh, hvor ρ er massetætheden. Tyngdekraften fra denne kasse er mg, som leverer et tryk (=kraft per areal) på mg/A. Dette må udligne trykforskellen mellem kassens bund (P) og kassens top (P+dP), og vi får:

$$P - (P+dP) = mg/A = g\rho dh \qquad (3.3.1)$$



Figur 5: Hydrostatisk tryk på en kasse med areal A og højde dr. Th. eksponentiel trykfald i atmosfæren.

Nu bruger vi idealgas ligningen $P=\rho(R/\mu)\,T$, hvor R=8,3 J/mol/K er gaskonstanten og μ=28,96g/mol er molmassen for luft (knap 80% $^{14}N_2$ og 20% $^{16}O_2$). Vi får

$$dP = -P(g\mu/RT)\,dh. \qquad (3.3.2)$$

Temperaturen er nogenlunde konstant op gennem atmosfæren (T=200-300°K), så løsningen til denne differentialligning er approksimativt

$$P = P_0 \exp\left(-\left(\frac{g\mu}{RT}\right)h\right) \qquad (3.3.3)$$

Her er trykket ved Jordens overflade $P_0 \approx 1$atm. Tilsvarende formel gælder for lufttætheden ρ. Sættes T ≈ 0°C = 273°K, fås *henfaldshøjden*

$$h_0 = RT/g\mu \approx 8 \text{ km} \qquad (3.3.4)$$

Tryk og tæthed falder eksponentielt som $\approx \exp(-h/h_0)$. I 8km's højde er trykket faldet med en faktor e^{-1}. Derfor er trykkabiner nødvendige på rutefly, og iltmasker på Mount Everest.

Da satellitter har meget stor hastighed, skal der meget lidt atmosfærisk friktion til, før de brænder op. Re-entry højden for rumskibe er omk. 120km, hvor atmosfæretrykket er faldet med faktoren $e^{-120/8} \approx 3 \cdot 10^{-7}$, hvilket dog stadig er nok til aerodynamiske manøvrer ved de store hastigheder. Der findes ikke en præcis grænse for rummet, men definitionen på en astronaut vs. pilot er over/under 60km's højde. Jordnære satellitbaner starter over 160km.

Dis, skyer, absorption og turbulens i atmosfæren kan reducere sigtbarheden ved at billedet sløres. Heldigvis forekommer dis, tåge og turbulens hovedsageligt nær jordoverfladen og skyldes termisk konvektion pga. temperatur forskelle mellem luft og jord/hav. Blæst giver også turbulens ved overfladen. Ser man nede fra Jorden og langs overfladen, så akkumulerer disse effekter langs strålebanen og er ødelæggende på lang afstand. Ser man der imod ned på overfladen fra fly eller en satellit, så påvirkes billedet

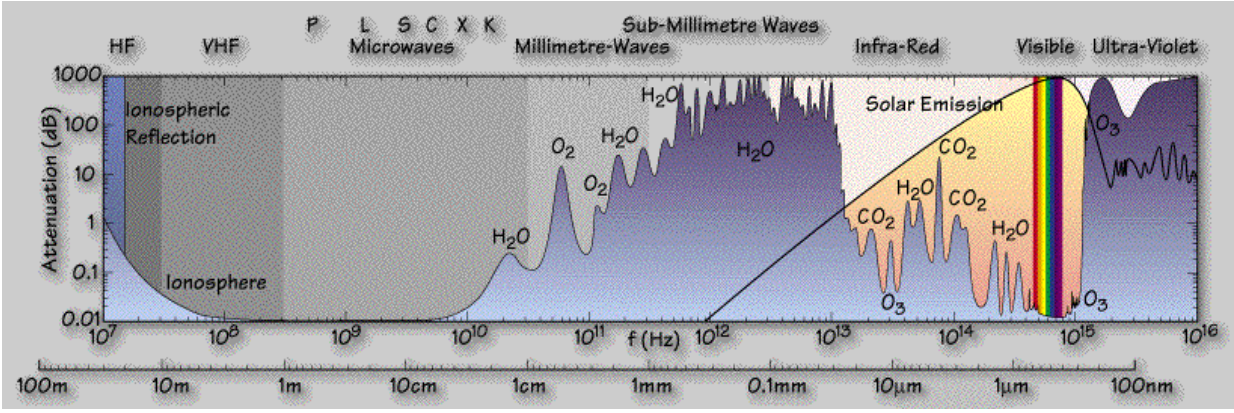
kun få meter nær overfladen og turbulens er et mindre problem. Det altoverskyggende problem for optiske satellitter er skyer.

3.4 Det elektromagnetiske spektrum

Radiobølger, mikrobølger, varmestråling, lys, ultraviolet, Røntgen og Gamma stråling er alle elektromagnetiske bølger, der bevæger sig med lyshastigheden

$$c = \lambda \bullet \nu = 299.792 km/s \qquad (3.4.2)$$

i det tomme rum. Den eneste vigtige forskel er bølgelængden λ og dermed frekvensen ν=λ/c.



Figur 6: Absorption gennem atmosfæren af EM stråling ved forskellige bølgelængder/frekvenser.

Jordens atmosfære absorberer ved mange bølgelængder, som vist i Fig. 6. Her er himlen "sort" og uigennemsigtig. Især vand, CO_2, ilt og ozon i atmosfæren absorberer lys ved bestemte bølgelængder, hvor lyset har den rigtige fotonenergi til at excitere molekylerne. Ozonlaget blokerer især for ultraviolet lys og beskytter mod solforbrændinger. Vand og CO_2 absorberer især infrarødt og termisk stråling, hvilket holder på Jordens varme og bevirker drivhuseffekten.

Mellem absorptionsbåndene er atmosfæren delvis gennemsigtig især for radio langbølger (5cm-5m) og i det synlige område fra blåt (400nm) til rødt (700nm) – ellers kunne vi ikke modtage radio eller se stjernerne.



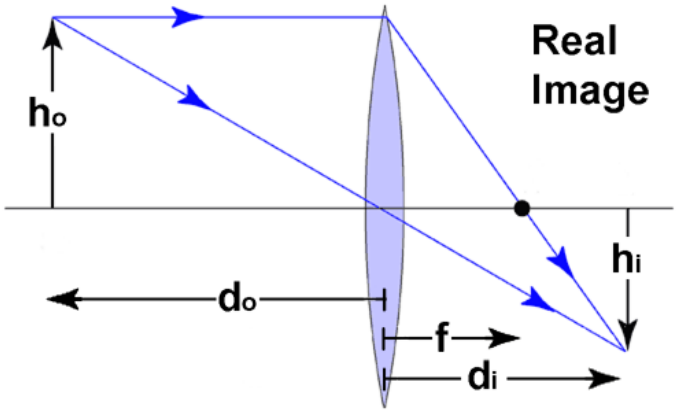
Figur 7: Det elektromagnetiske spektrum har mange teknologiske anvendelser. Øverst længdeskalaer og bølgelængder.

3.5 Optik, Opløsning og Genkendelsesafstande

For at se benytter kameraer, teleskoper og øjne optik som linser eller hulspejle. Deres krumning bestemmes af fokallængden f, som er afstanden fra linsen til brændpunktet. Et objekt med højde h_o i afstanden d_o til linsen, afbildes i fokalplanen med højde h_i og afstand d_i, der er relateret ved

$$h_o = h_i \cdot (d_o/d_i) \qquad (3.5.1)$$

Moderne kameraer justerer automatisk afstanden d_i, så billedet står i fokus i billedplanen. Kameraets autofokus fungerer ved at maksimere kontrasten, hvor billedet står skarpest.



Figur 8: Klassisk optik: objekt med højde h_0 og afstand d_0, afbildes i billedplanen med højde h_i med afstand d_o. Linsens krumning bestemmer brændpunktets afstand f (fokallængden) fra linsen.

Ud fra Figur 8 kan vi udlede en vigtig optisk formel for tynde linser. Først betragter vi de to trekanter med siderne (katederne) d_0 og h_0 samt d_i og h_i. Da de er kongruente, gælder: $h_i/h_0 = d_i/d_o$. Dernæst ser vi på de to trekanter på højre side af Figur 8 med siderne h_o og f, samt (h_o+h_i) og d_i. Da de også er kongruente gælder: $d_i/f = (h_i+h_o)/h_o$. Ud fra disse to formler udledes *tyndlinse formlen*

$$1/f=1/d_i+1/d_o \qquad (3.5.2)$$

For tykkere linser skal man korrigere for strålegangen inde i linsen, og man får en mere kompliceret (*linsemagerens*) formel.

Normalt er objektet langt væk, $d_o>>d_i$, så $d_i \approx f$ og billed- og fokalplan falder sammen og

$$h_o \approx h_i \bullet d_o / f \qquad (3.3.3)$$

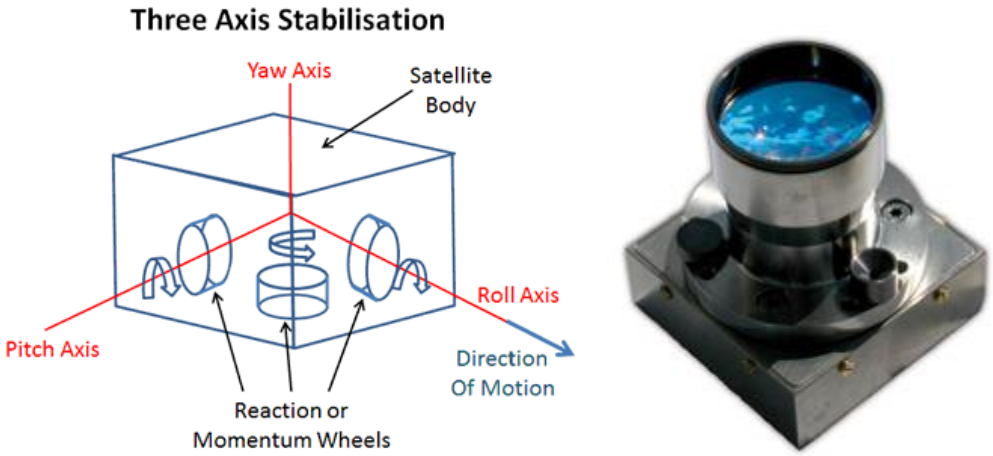
Et kamera's opløsning er derfor bestemt af pixel størrelsen h_i på detektoren forstørret med faktoren (d_o/f). Optikken kan have flere linser og hulspejle med justerbare afstande, hvilket giver muligheder for zoom. I så fald skal den resulterende (effektive) fokallængde bruges i linseformlerne.

Eksempelvis for Sentinel 2A er detektor pixel længden h_i=10µm, linserne har en fokallængde på f=0,6m ved standard zoom, og afstanden til satellittens jordnære bane er d_o=600km, hvilket giver en pixel opløsning på Jordens overflade på h_o=10m. Spionsatellitter har endnu bedre opløsning.

Én pixel rækker dog kun til detektion. Genkendelse og identifikation kræver flere pixels (hhv. 8 og 13 pixels ifølge Johnson kriteriet). Formlen ovenfor kan vendes om for at bestemme afstanden $d_o = f \bullet h_o/h_i$, hvor man kan detektere, genkende og identificere et objekt af størrelse h_o.

3.6 Satellit Guidance, Navigation og Kontrol

Raketten bringer satellitten i orbit. Større satellitter har raketdysere og brændstof til at kunne justere og evt. ændre bane samt styre satellitten og dens sensorer. Satellitten må drejes præcist, så dens kameraer og radarantenner konstant peger ned mod Jorden. Styringen kan foregå med reaktionsgyroer, som vist på Figur 9. Newton's 2. lov: Aktion=Reaktion bevirker, at hvis en gyro roteres, må satellitten rotere modsat, så impulsmomentet bevares. Tre gyroer med små elektromotorer kan derfor rotere satellitten omkring de tre akser og pege satellitten i den ønskede retning.

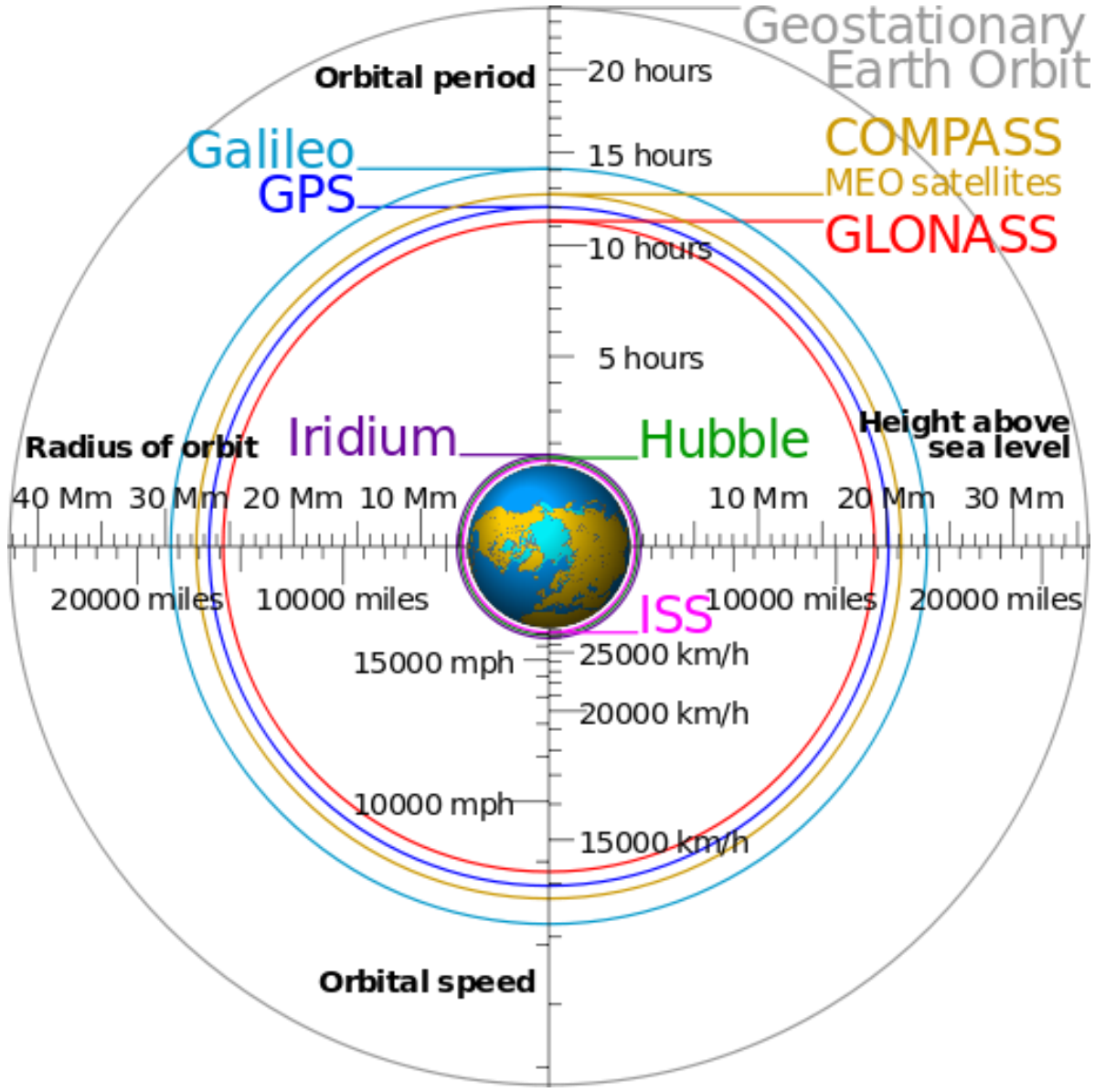


Figur 9: Tv. Principskitse over en satellit med tre gyroer. Th. DTU's stjernekamera.

Alternativt kan satellitten udstyres med spoler, der påvirkes af Jordens magnetfelt. Den resulterende kraft kan så dreje satellitten. Da Jordens magnetfelt er svagt, kan det kun bruges til at styre mindre satellitter. Magnetspolerne kan også udnyttes til at nedbremse gyroer, som med tiden er blevet bragt til at spinne for hurtigt. Da Jordens magnetfelt er meget ikke-linært og varierer med solvinden, kræver magnetisk styring omfattende beregninger og justeringer. Ved den mindste fejl tumler satellitten rundt i rummet som GomSpace's første cubesat.

For præcist at vide hvor satellitten peger, byggede DTU deres berømte stjernekamera til Ørsted satellitten og efterfølgende også til Smart-1 og Juno satellitterne til hhv. månen og Jupiter. Kameraet taget et digitalt billede af stjernehimlen, sammenligner med et lagret stjernekort, og finder derfra ud af, hvor det peger.

4. Satellitbaner



Figur 9: Satellitbaner. Yderst geostationære, i midten navigation satellitterne GPS, Galileo og Glonas, og inderst de jordnære satellitter, som inkluderer ISS, Hubble, Iridium og ca. 500 observationssatellitter.

Den grundlæggende himmelmekanik bestemmer og begrænser banerne, og de beskrives derfor i det følgende. Satellitter i Jordens gravitationsfelt bevæger sig i elliptiske Kepler baner, som dog er en smule perturberet af, at Jorden er let fladtrykt ved polerne. Baner længere væk fra Jorden bliver også ændret af Månens, Solens og planeternes gravitationsfelt.

Satellitter i kredsløb om Jorden vil have længere omløbstid (T) jo større afstand, de er fra Jorden. De fleste satellitter benytter cirkulære baner, hvor højden over Jordens overflade (h) vokser med omløbstiden som

$$h = g^{\frac{1}{3}}\left(\frac{R_J T}{2\pi}\right)^{2/3} - R_J \;=\; R_J\left(\frac{17{,}2}{q}\right)^{\frac{2}{3}} - R_J \qquad (4.0.1)$$

hvor R_J=6.371km er Jordens radius, og g=9,8m/s^2 er tyngdeaccelerationen ved Jordens overflade. En bekvem størrelse er antal omløb per døgn q=24timer/T. Typiske værdier er givet i Tabel 1.

Omløb per døgn, q	Omløbstid, T	Højde h (km)	Inklination i	Maksimal breddegrad	Satellit Eksempler
17	1t 25m	79			Brænder op
16	1t 30m	282	96,6°	83,4°	
15	1t 36m	574	97,7°	82,3°	Sentinel
14	1t 43m	901	99,0°	81,0°	Sentinel
13	1t 51m	1.269	101,7°	79,3°	
12	2t	1.688	103,0°	77,0°	
11	2t 11m	2.169	106°	74,0°	
10	2t 24m	2.730	111,1°	69,9°	
9	2t 40m	3.392	116°	64,0°	
8	3t	4.189	125,3°	54,7°	
7	3t 26m	5.172	142,1°	37,9°	
….					
2	12t				GPS, Molnyia
1	24t	35.785			Geosynkron
1/28	28dage	384.403			Månen

Tabel 1: Solsynkrone baner over Jordens atmosfære og ud til den geosynkrone.

4.1 Grænsen mellem Jordens atmosfære og rummet

Som beskrevet i 3.3 falder tryk og tæthed nogenlunde eksponentielt op gennem Jordens atmosfære. Henfaldshøjden er knap 8 km. Da satellitter har meget stor hastighed, skal der meget lidt atmosfærisk modstand til, før de brænder op. Re-entry højden for rumskibe er omk. 120km. Normalt placeres satellitter udenfor 160km, hvor atmosfæretrykket er faldet til $e^{-160/8} \approx 2 \cdot 10^{-9}$ af 1atmosfæres tryk ved overfladen.

4.2 Jordnære baner (Low Earth Orbits)

De jordnære satellitbaner ligger lige uden for atmosfæren fra 160 km over jordens overflade og op til 2.000 km's højde, som stadig er noget mindre end Jordens radius. Disse baner ligger nærmest jordens atmosfære og overflade, og bruges især til jordobservation. De fleste ligger i så tæt på Jorden som muligt i 600-800km's højde. Tættere på bremses de og falder ned indenfor leve- og forældelsestiden på ca. 10 år. Fjernere baner giver dårligere opløsning, kræver kraftigere signaltransmission og mere brændstof til raketten.

De fleste jordnære satellitter ønskes *solsynkrone*, dvs. de står samme sted over jorden på et bestemt tidspunkt hver dag, så man ved, hvor man har dem. Billeder har dermed også samme perspektivvinkel, belysning og skygger (om end årstidsafhængig), hvilket gør sammenligning og detektion af ændringer nemmere. Den solsynkrone betingelse stiller skrappe krav til satellitbanen, som kun få baner kan opfylde.

Banen bestemmes af satellittens position og hastighedsvektor til et givet tidspunkt, dvs. seks frihedsgrader. For at vide, hvor satellitten er, forlanger vi ofte, at satellitten hver dag skal befinde sig i en given position på et givet tidspunkt (fx over København ved middagstid). Dette bestemmer to af de tre stedkoordinater. Den tredje koordinat, højden, bestemmes af, at satellitten skal befinde sig samme sted hver dag. Omløbstiden skal derfor være T=24/q timer, hvor q=1,2,3,…,16 er antal gange, som satellitten cirkulerer om jorden i løbet af 24 timer[1]. De diskrete værdier q for antal omløb "kvantiserer" ifølge Eq. (1) højden som givet i tabel 1. For q≥16 er satellitten inde i jordens atmosfære og vil brænde op. Den geostationære bane har q=1. GPS og Molnya satellitter roterer om jorden to gange i døgnet, i.e. q=2. Low Earth Orbits ligger typisk så tæt på atmosfæren som mulig, og har derfor q≈14-15.

Sommetider vælges satellitten til blot at vende tilbage til samme punkt efter mere end én dag, dvs. q ikke længere er et helt tal men et rationelt tal q=n/m, hvor n er antal omløb i løbet af m dage. Fx kredser Sentinel-1A n=175 gange om Jorden i løbet af m=12 dage, så q=175/12=14+7/12. Sentinel-2A kredser n=143 gange om Jorden på m=10 dage, så q=14,3. Sentinel-3A kredser n=385 gange om Jorden på m=27dage, så q=14+7/27. Rationel q er fordelagtigt for et høj-opløselig kamera med stort zoom, der sweeper et smalt bånd, men som sammenlagt lige dækker hele jordens overflade i løbet af genbesøgelsestiden på m dage.

Fra 2016 opsendes Sentinel-1B,2B,3B, som har identiske baner på nær at de er 180° forskudt. Herved bliver genbesøgelsestiden for e.g. Sentinel-2 satellitterne 5 dage ved ækvator, hvor afstanden mellem satellitbanerne og deres kamera dækning (swath) er størst. Imidlertid ses de fleste punkter i Europa fra to baner, så reelt overvåges vi hver 2. eller 3. dag af hver satellittype. Nær polerne ligger banerne tæt og kameraernes genbesøgelsestid er dagligt. De solsynkrone jordnære satellitter er derfor særdeles velegnede til arktisk overvågning.

Jordnære satellitter er normalt cirkulære, hvor farten er bestemt af højden ifølge (3.3). Dermed resterer blot én frihedsgrad, som er hastighedens retning eller vinkel ift. jordoverfladen. Banens vinkel til ækvator kaldes *inklinationen*, i. Skal banen være stabil er inklinationen dog også bestemt. Dette skyldes at Jordens rotation gør den lettere fladtrykt ved polerne, og det elliptiske tyngdefelt får satellitbanen til at præcessere, dvs. dreje en lille vinkel for hver omgang. For en jordnær cirkulær bane er præcessionsvinklen

$$\Delta\Omega = -2\pi \frac{J_2}{g R_J^4} \frac{3}{2} \cos(i)$$

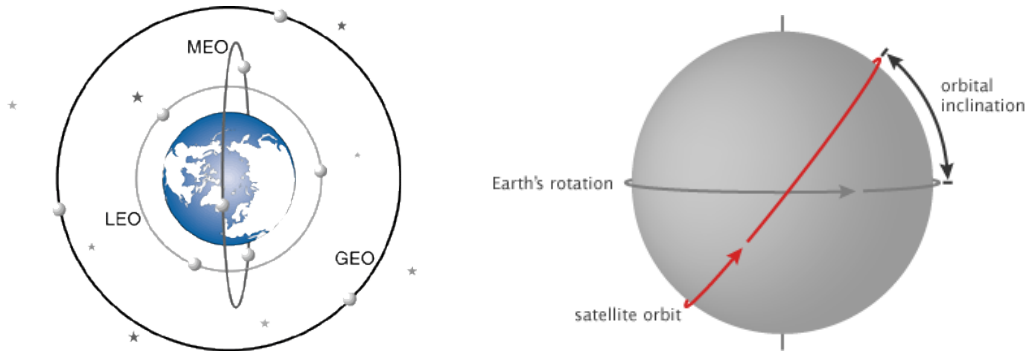
hvor $J_2 = 1.7555 \times 10^{10} km^5/s^2$ er Jordens deformationsparameter (oblateness). [27]

[1] Mere præcist et siderisk døgn på 23timer, 56min og 4sek. Da Jordens roterer om solen på 365dage, forkortes døgnet med 24timer/365≈4min.

Hvis denne lille præcessionsvinkel summeret over et helt (siderisk) år netop er 360°, dvs. det samme som jordens bane om solen, så forbliver banen solsynkron. En længere udregning (se [27])) giver inklinationen for en stabil bane:

$$i = \arccos(-(T/3{,}8timer)^{7/3}) = \arccos(-(6{,}3/q)^{7/3}) \qquad (4.2.1)$$

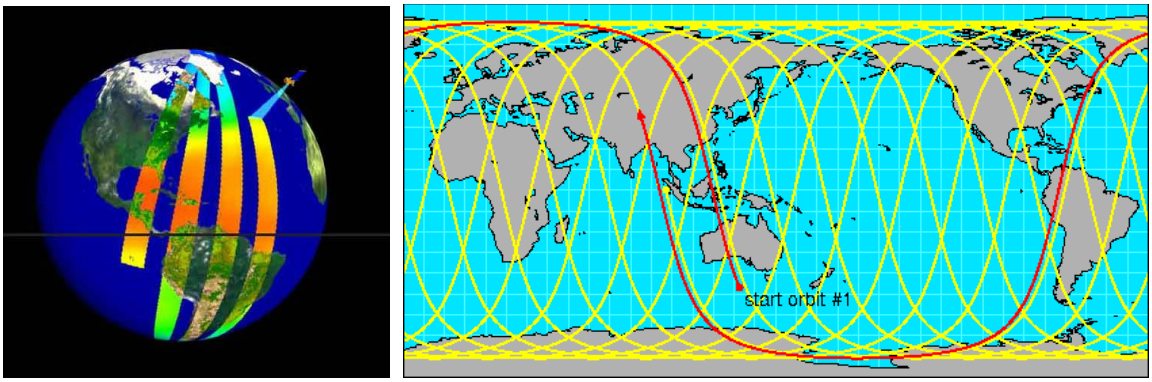
Inklinationen er for jordnære baner godt 90°, når satellitten flyver sydvest (descending), 180˚-i, når satellitten er på vej nordvest over (ascending) (se tabel 1). I begge tilfælde er banen næsten vinkelret på ækvator og passerer tæt forbi polerne. Solsynkrone baner kaldes derfor polare baner, om end de ikke krydser polerne. For T>3,795timer svarende til q<7 findes der ingen solsynkrone baner.



Figur 10: Satellitbaner

De eneste tilbageværende frihedsgrader for en cirkulær solsynkron satellitbane er derfor antal rotationer i døgnet (q), positionen (x,y) over jordoverfladen til et givet tidspunkt, samt om satellitten skal bevæge sig nordvest (ascending) eller modsat (descending) på tidspunktet. På landkortet bevæger polære satellitter sig derfor i baner, som vist i Figur11. For hvert omløb har Jorden drejet sig 360°/q grader, og banen er tilsvarende forskudt set fra jordoverfladen. Hvor banerne krydser kan satellitten ses igen 12 timer efter (om natten) samme sted på himlen, men flyvende i modsat retning. De fleste polare satellitter er descending på dagsiden og ascending på natsiden ca. halvanden timer efter. Ved ækvator er der længst mellem de polare baner, mens de ligger tæt nær polerne med god dækning. Alle ikke-militære satellitters øjeblikkelige position og track kan følges live på www.N2YO.com.

Observations- og spionsatellitter bruger Low Earth Orbits. Visse spionsatellitter kan ændre bane, og flyve over et kritisk område, men det kræver raketmotor og brændstof. Billigste kilopris er 20.000$ for opsendelse fra Baikonur Kosmodrome i Kazakhstan.



Figur 11: En jordnær solsynkron satellitbane med 14 omløb om dagen overflyver forskudte områder pga. Jordens rotation.

Den Internationale Space Station kredser i 366km's højde om jorden i løbet af T=1t32,69m med i=51,65°, og Hubble teleskopet i 540km's højde med omløbstid T=95,47min og i=28.47°. Begge baner er ikke solsynkrone.

De 66 Iridium kommunikationssatellitter kredser om jorden i højden 781km på 1t40m, i=86,4grader. De ligger fordelt med 11 satellitter i 6 ikke-solsynkrone baner forskudt 30˚, og danner et netværk, der dækker hele Jordens overflade. De afløses af Iridium-Next generation af satellitter, der opsendes fra 2016 med øget datahastighed til satellittelefoni og måske også kameraer. Iridiums jordnære baner er 500 gange nærmere end de geostationære, og kræver derfor langt mindre sendestyrke. Satellitterne kan også sende via hinanden således, at der kræves færre modtagerstationer på Jorden.



Figur 12: De 66 Iridium satellitter. Oprindeligt var 77 planlagt, hvilket er atomnumeret for Iridium.

4.3 Medium Earth Orbits

Banerne udenfor de jordnære baner og ud til den geostationære bane kaldes ”medium earth orbits”. En rotation om jorden tager mellem 2 og 24 timer. Disse baner bruges mest til kommunikations- og navigationssatellitter, eg. GPS, Galileo og Glonas med rotationstider på hhv. 12, 14 og 11 timer.

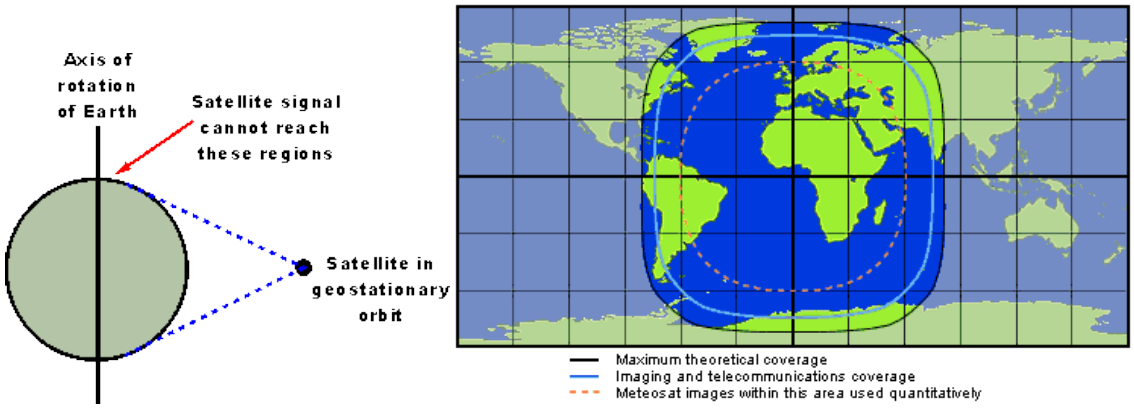
4.4 Geostationære og geosynkrone baner

Geosynkrone baner har omløbstid på et (siderisk) døgn (q=1). Den geostationære bane er den geosynkrone bane præcis over ækvator. Den ligger i 35.786 km's højde lige over ækvator, og satellitten flytter sig ikke set fra jorden. Derfor behøver alle vores (fastmonterede) parabol satellitmodtagere ikke at dreje. Geosynkrone baner ligger normalt tæt på ækvator, og deres bane vil svinge om ækvator.

Det tager lys og radiobølger $2 \cdot 35.786km/c=0,253$ sekund at bevæge sig fra jordoverfladen op til en geostationær satellit og tilbage igen, hvilket er nok til forsinkelsen kan høres ved satellittelefoni. Geostationære satellitter kan ikke ses nær nordpolen (og Nordgrønland), når breddegraden er over (se Figur 13)

$$\arccos(R_J/(R_J+35.785km))=81,3^o \qquad (4.4.1)$$

nordlige breddegrad, eller nær sydpolen under -81,3° sydlige breddegrad. Hvis horisonten er skjult af isbjerge, klipper, bølger, huse, træer eller andet mistes signalet ved lavere breddegrader, typisk 70-80° i Grønlandske fjorde.



Figur 13: Dækning for en geostationær satellit på 0° bredde- og længdegrad. Dækningen er cirkulær med vinkel 81,3°, men fortegnes i plankortet.

4.5 Jordfjerne baner (High Earth Orbits)

Baner udenfor de geosynkrone baner kaldes "high earth orbits". Satellitter herude moniterer solen og rumvejret.

Efter endt levetid skal geostationære satellitter parkeres i Graveyard/junk orbit, som ligger 300km udenfor den geosynkrone bane.

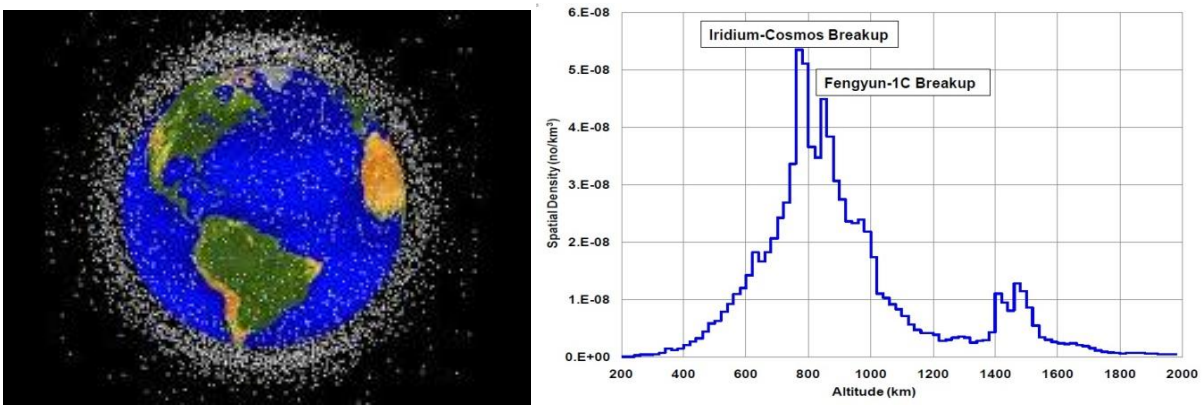
4.6 Space Junk og Kessler Syndromet

Der kredser ca. 170 millioner stumper affald (space junk) om Jorden hovedsagelig i de jordnære og den geostationære bane. Af disse er ca. 700.000 større en 1cm, og kan som højhastigheds kugler forårsage stor skade. Flere lande har desværre testet anti-satellit våben, hvor gamle satellitter er sprængt i tusindvis af stumper, se Figur 14. Desuden ligger der efterhånden et støvlag (space debris) af raketbrændstof, kølevæske, overflade maling, m.v. i de jordnære baner. Af samme grund har satellitter normalt et Whipple

skjold, der skal tage de værste kollisioner, men teleskopspejle og solpaneler må have frit udsyn og "sandblæses" efterhånden af rumstøv. Derfor er levetiden af observationssatellitter kortere end kommunikationssatellitter, og de er derfor normalt adskilt af økonomiske grunde. Større satellitter som e.g. ESA Sentinel har levetid på ca. 7 år, mens de mindre nanosatellitter kun overlever få år. Teknologien og sensorerne forældes også i løbet af få år.

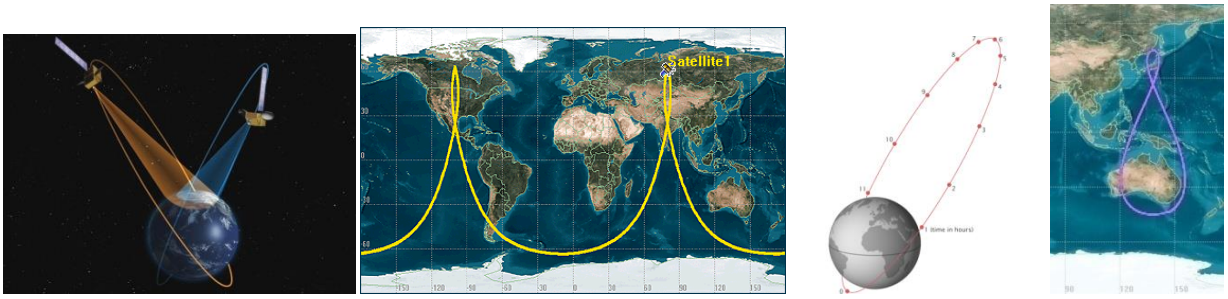
Den hidtil eneste kollision mellem to satellitter skete i 2009 mellem Iridium 33 og Kosmos 2251. Kina sprængte i 2007 Fengyin satellitten i en missiltest. Fragmenternes baner fra begge episoder kan tydeligt ses i Figur 14. Man frygter en kædereaktion, hvor stumperne fra en satellitkollision skaber en kaskade af "space debris" (Kessler syndromet), som beskrevet i filmen Gravity. Space junk moniteres tæt, og man foretager jævnligt baneændringer, så de kostbare satellitter undgår kollision.

Efter endt levetid skal jordnære satellitterne brændes op i atmosfæren for at undgå kollisioner med andre dyrebare satellitter. Den om end meget tynde atmosfære i de jordnære baner får satellitten til langsom men sikkert at spiralere ind mod Jorden, og evt. krydse andre satellitters baner. Derfor bringes de ned i atmosfæren efter sidste salgsdag, og brænder op i atmosfæren. Jordnære satellitter må derfor ikke indeholde grundstoffer med højt smeltepunkt som tungsten, da de overlever turen og kan forårsage skade ved nedslag. Tungsten er ellers det bedste materiale til afskærmning. I stedet bruges guld.



Figur 14: Space junk kredser hovedsageligt i den geostationære og jordnære baner. Iridium-Kosmos satellit kollisionen og den kinesiske Fengyun-1C anti-satellit sprængning topper space junk fordelingen.

4.7 Elliptiske Molniya og Tundra baner



Figur 15: Tv. Molniya og Tundra baner. Th. det japanske QZSS i en tundra bane.

Molniya og Tundra baner er stærkt elliptiske baner med omløbstid på hhv. 12 og 24 timer. Begge baner har inklination

$$i = \sin^{-1}\left(\sqrt{4/5}\right) = 63{,}4^0 \qquad (4.7.1)$$

eller 180º-63,6º=116,4º, så satellittens fjerneste punkt (apogee) er samme sted over Jorden efter 24 timer. De stærkt elliptiske baner har den fordel, at satellitten vil svæve i lang tid i apogee, hvor den kan ses fra samme punkt fra jorden, og at apogee kan ligge over den nordlige halvkugle.

De russiske Molniya kommunikations- og spionsatellitter kredser om jorden to gange i døgnet, og svæver skiftevis næsten 11 timer over det russiske kontinent og (ikke tilfældigt) igen over Nordamerika forskudt med 12 timers mellemrum.

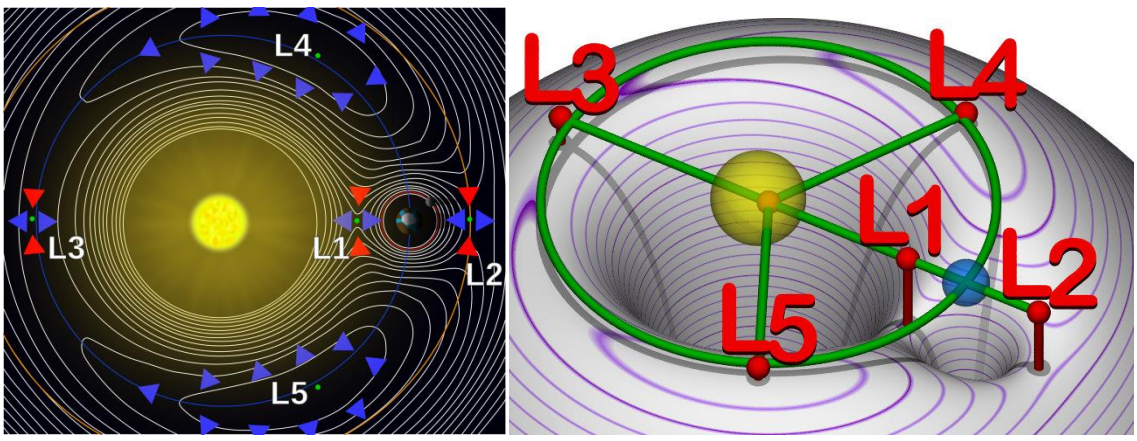
Tundra baner benyttes af Sirius Satellite Radio og det russisk missilvarslingssystem EKS, samt det japanske GNNS system Quasi Zenith Satellite System, som vist i Figur 15.

4.8 Lagrange punkter

De stabile baner beskrevet ovenfor antager, at kun Jordens tyngdefelt føles, så satellitten bevæger sig i en elliptisk Kepler bane (to-legeme problemet). De fleste baner i solsystemet er Kepler baner, som kan synes stabile, men tyngdekræfterne fra solen og flere planeter perturberer banerne.

Perturbationer fra månen og solen er skyld i tidevand to gange dagligt på Jorden. De bevirker også, at nordpolen roterer i løbet af 26.000år (præcession), og at rotationsaksen vipper over 41.000år. Jupiter får Jordbanens ellipticitet om Solen til at svinge med perioden 100.000år. Det er bemærkelsesværdigt, at disse astronomiske tider passer med istidsvariationerne de seneste par milliarder år. Da solens indstråling på Jorden varierer en smule med banens vinkel, kan det være skyld i istiderne [17]. Klimamodeller har dog problemer med at få amplituder og faser til at passe. Istidernes temperatur variation er langt større end beregnet ud fra de små variationer i indstråling, og opvarmning sker ikke altid, når indstrålingen stiger, dvs. årsag-virkning eller causalitet passer ikke for godt.

Månens tiltrækning gør jordfjerne baner ustabile, når de nærmer sig månen. Satellitter bliver perturberet og vil langsom men sikkert slynges ud af sin oprindelige bane.



Figur 16: De 5 Lagrange punkter for Sol-Jord systemet, hvor det effektive tyngdefelt (gravitation og centrifugal kræfter) er fladt. L1, L2 og L3 er ustabile saddelpunkter, mens L4 og L5 er stabile.

Generelt er tre-legeme problemet ustabilt på nær i de 5 Lagrange punkter vist i Figur 16.For hvert par Jord-Måne, Jord-Sol, Sol-Jupiter, osv. findes der 5 sæt Lagrange punkter, hvor et tredje legeme (satellitten) kan "parkeres". Disse Lagrange punkter følger og roterer med det tunge par. Tre af Lagrange punkterne L1, L2 og L3 ligger på aksen mellem parret hhv. imellem og på hver side. Disse punkter er placeret på et saddelpunkt i gravitationspotentialet, og er derfor semi-ustabile. Perturbationer fra solen, månen eller andre planeter vil få satellitten til at rulle væk. En raketmotor er derfor nødvendig for at korrigere satellittens position for at holde den i Lagrange punkterne L1, L2 og L3.

I Sol-Jord systemet ligger L2 i skyggen af Jorden set fra Solen, og dermed beskyttet mod sollys og solvinden. Derfor er det et godt sted at placere James Webb teleskopet, som er afløseren til Hubble, og Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, der skal studere Universets mikrobølge stråling.

De to Lagrange punkter L4 og L5 ligger i en ligesidet trekant på hver sin side i vinklen 60°. Disse to er stabile [13], når de to masser M_1 og M_2 opfylder:

$$\frac{M_1}{M_1+M_2} < \frac{1}{2}\left(1-\sqrt{\frac{23}{27}}\right) = 0.0385 \qquad (4.8.1)$$

Dvs. månen må ikke veje mere end knap 4% af Jorden for Jord-måne L4+5, og ligeledes må en planet ikke veje mere end 4% af Sol-planet L4+5. I så tilfælde vil satellitter eller asteroider i nærheden af L4 eller L5 rotere langsomt rundt i en bønneformet bane omkring L4 og L5 og forblive der, selv om de udsættes for perturbationer. Disse kan defor bruges til satellitparkering. L4 og L5 kaldes også *Trojanske* punkter: L4 for den græske lejr og L5 for den trojanske.

Solar Terrestial Relations Observatory er to tvillingesatellitter placeret i Jord-Sol L4 og L5, der skal give et tre-dimensionelt vue af solen. I 2010 blev asteroiden TK_7 opdaget i L4 sammen med interplanetart støv. Mars har syv og Jupiter, Saturn, Neptun tusindvis af asteroider indfanget i deres Sol-planet Trojanske punkter.

ESA planlægger at placere en satellit i L3 for Venus-Solen, hvorfra den kan scanne Jordens bane for asteroider, der reflekterer sollys tilbage. Den skal monitere asteroider faretruende tæt på Jorden, så vi kan undgå at lide samme kranke skæbne som dinosaurerne.

Endelig findes der også quasi-stationære baner gennem Lagrange punkterne fx. Lissajous og Halo baner, og disse benyttes til at slynge interplanetare satellitter ud i vores solsystem eller galakse. Apollo missionerne fløj i en otte-tals formet bane gennem Jord-Månens saddelpunkt L1.

4.9 Spiral baner

Satellitter og meteorer, der kommer ind i Jordens atmosfære, vil føle luftmodstand, tabe kinetisk energi og brænde op. Jordnære satellitter vil spiralere ind i atmosfæren mod slutningen af levetiden.

Vi vil her gennemgå et tilsvarende eksempel, hvor to tunge neutronstjerner i tæt orbit udsender gravitationsbølger pga det kraftigt varierende tyngdefelt. Disse blev første gang observeret af LIGO 17. august 2017, og medvirkede til nobelprisen 2017. Gravitationsbølgerne tapper energi fra det binære neutronstjerne system, så de langsom men sikkert spiralerer ind mod hinanden og til sidst sammensmelter i en gigantisk eksplosion, der kan mærkes og ses i den anden ende af universet.

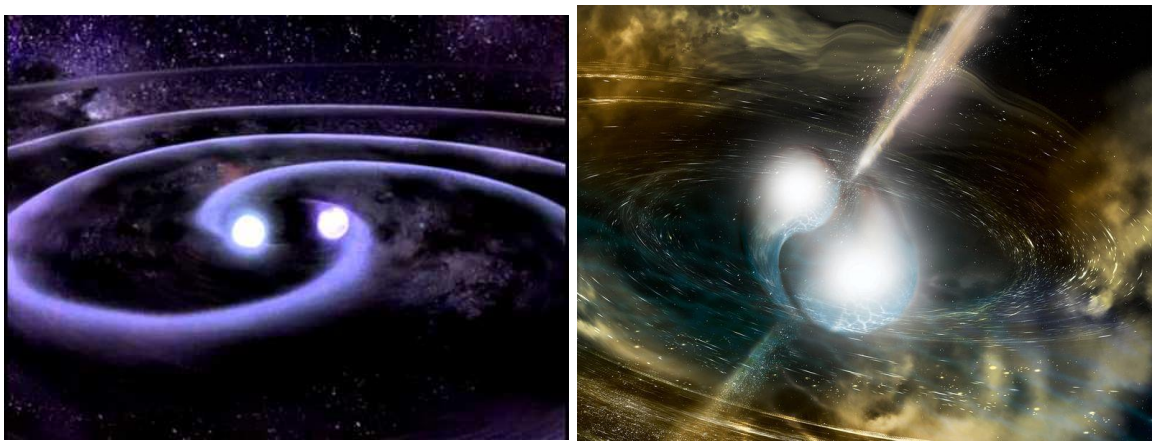


Fig. 16.5: To neutronstjerner spiralerer mod hinanden og merger.

To masser M_1 og M_2 med afstand r roterer om hinanden (næsten) cirkulært. Deres banerotation har frekvens f=1/T, hvor T er omløbstiden. Fra Newtons ligninger (se 3.1) fås

$$f = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{G(M_1+M_2)}{r^3}\right)^{1/2} \qquad (4.9.1)$$

Den samlede energi (gravitationel og kinetisk) for de to masser er:

$$E = -G\frac{M_1 M_2}{2r} \qquad (4.9.2)$$

Gravitationsbølgerne tapper systemet for energi. Energitabet per tid kan beregnes fra Einstein's generelle relativitetsteori, om end temmelig vanskeligt. Man finder:

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{32G^4}{5c^5r^5}\frac{M_1^2 M_2^2}{M_1+M_2} \qquad (4.9.3)$$

Energien erstattes nu med radius r ud fra Eq. (2), og indsættes i Eq. (3). Hermed fås:

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{64G^3}{5c^5r^3}\, M_1\, M_2\, /(M_1+M_2) \qquad (4.9.4)$$

Løses denne første ordens differentialligning for r(t) med begyndelsesbetingelsen r(t=0)=R, fås

$$R^4 - r^4 = t\,\frac{256G^3}{5c^5r^3}\, M_1\, M_2\, /(M_1+M_2) \qquad (4.9.5)$$

Altså mindskes radius i fjerde potens linært med tiden, hvilket giver en spiral bane. Sættes r=0 fås tiden, når de to neutronstjerner merger.

Da tyngdefeltet følger masserne, udsendes gravitationsbølger med frekvensen 2f, som kan ses og høres som et chirp på https://www.youtube.com/watch?v=CH9JSqUfnSw

Kort før merge deformeres neutronstjernerne, og ud fra chirp'et håber man at kunne bestemme deres radius nærmere, forventeligt ca. 12km [30]. Radius afhænger af kompressibiliteten i tæt kernestof og afslører tilstandsligningen i neutronstjerners indre.

5. Sensorer og satellitdata

Satellitter har den store fordel, at deres sensorer kan dække et meget stort område – faktisk hele jorden, hvis banerne beskrevet ovenfor tillader. Stor dækning giver desværre dårlig rumlig opløsning. Både radar, kamera og andre sensorer er ofte bygget med forskellige grader af zoom, så de kan opnå bedre rumlig opløsning i mindre men interessante områder (spots). Udfordringen er så ofte, at finde "nålen i høstakken".

Sensorerne har ligeledes forskellig dækning og opløsning spektralt, dvs. hvilke bølgelængder eller frekvenser der "ses". Man omtaler også tidslig opløsning, dvs. hvor mange dage der går, før området bliver set på igen. Endelig er der radiometrisk opløsning, dvs. hvor følsom sensoren er til at skelne mellem strålingsintensiteter – også kaldet kontrast.

I det følgende vil de nye Sentinel satellitter under ESA's Copernicus program blive brugt som eksempler, idet de bærer moderne sensorer, og gode satellitbilleder kan downloades frit, som smukt illustrerer mulige anvendelser. Der er eller vil blive opsendt to satellitter (A+B) af hver type i konstellation forskudt med 180º. Deres forventede levetid er omk. 7 år. Sentinellerne komplementerer eller erstatter ældre eller defunkte europæiske satellitter som: ERS, Envisat, Earth Explorers, MSG, METSAT, EUMETSAT, MetOp, SPOT, TerraSAR, COSMO-SkyMed, DMC, JASON, Pleiades, samt ikke-europæiske GeoEye, Worldview 1-3, IKONOS, Quickbird, LANDSAT, GEOSAT, RADARSAT.

Sentinel	Opsendt År/md	Sensorer	Frekvens / Bølgelængde	Swath Km	Opløsning
S-1A	2014/4	Syntetisk Apertur Radar (SAR)	5.405 GHz (C-bånd)	20-400	5 - 40m
S-1B	2016/4				
S-2A	2015/6	MultiSpektral Imager (MSI) 13 bånd	443-2190nm	290	10/20/ 60m
S-2B	2017/3				
S-3A S-3B S-3C	2016/2 2018/4 2019	Ocean+Land Color Instr. Sea Land Surface Temp. SAR Højdemåler Mikrobølge Højdemåler	400-1020nm 550nm-12µm Ku+C 23.8+36.5GHz	1270 1420/750	300m 500m 300m
S-4	2021	Hyperspektral i 3 bånd: UV+VIS+NIR	300-750nm		8km
S-5	2021	Hyperspektral i 7 bånd	270-2385nm		8-50km

S-5P	2021	Troposfærisk Monitor 4 Spektrometre	UV+VIS+NIR +SWIR		7km

Tabel 2: ESA Sentinel satellitters sensorer og dækning. Swath er kameraets dækning vinkelret på banen, se Fig. 11.

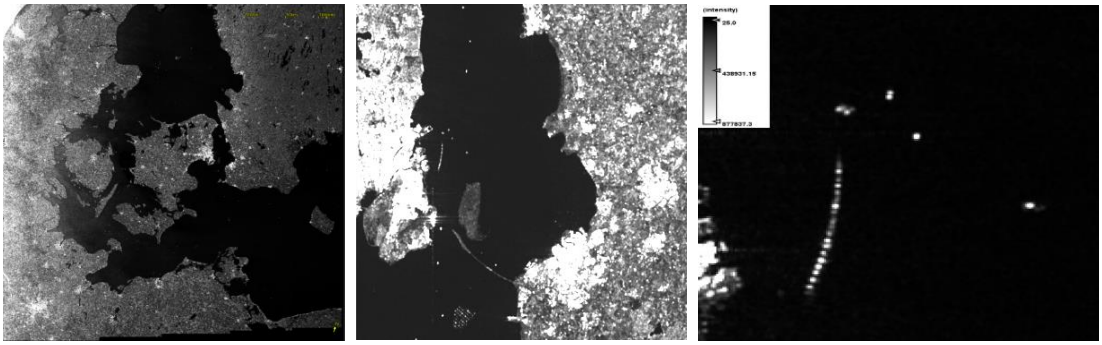
5.1 Syntetisk Apertur Radar (SAR)

SAR billeder optages fra satellit eller fly ved at sweepe en radar på tværs af bevægelsesretningen, hvorved et billede scannes ind. Radiobølgerne reflekteres på jordoverfladen tilbage til satellitten, som derved optager et reflektionsbillede af især metal og andre "hårde" genstande. Disse giver et noget andet billede end det optiske. SAR billedernes variation med frekvens og polarisation kan også udnyttes. Sentinel-1 SAR opererer ved frekvensen ν=5.4GHz, svarende til bølgelængden $\lambda=c/\nu$=6cm. Da radiobølgelængden er længere end de små fortættede dråber i skyerne, kan SAR trænge gennem skyer. Den store fordel ved SAR er, at de virker dag og nat overskyet eller ej. Omvendt tager det længere tid at skanne et område, opløsningen er begrænset og genkendelse er ikke visuel, men kræver særlig ekspertise eller "radarbriller".



Figur 17: Tv. princippet i SAR. Th. ESA's Sentinel 1B opsendt april 2016.

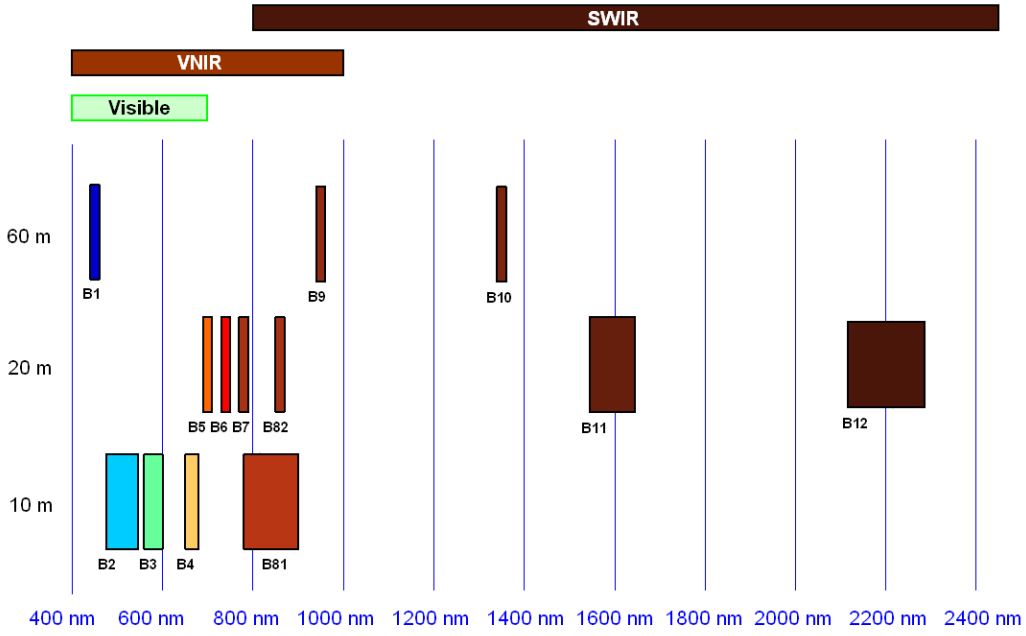
Sentinel-1 kan optage SAR billeder i fire modes. Interferometric Wide Swath scanner en stribe 250km bred med opløsning på 5x20m. Wave mode scanner et mindre område på 20x20km med 5x5m opløsning med 100km interval. Strip Map mode scanner en small stribe på 80km med 5x5m opløsning. Extra Wide Swath scanner en 400km bred stribe med opløsning 20x40m. Radiobølgerne overlapper dog mellem pixels så reelt er opløsningen ringere. Oftest optages i Extra Wide Swath, så et større område dækkes dagligt, men med ringere opløsning.



Figur 18: Sentinel 1A SAR billede af Danmark, som i midten er zoomet ind på Øresund med Kbh. og Amager tv, Saltholm og Øresundsbroen i midten. Til højre yderligere zoomet ind på striben af vindmøllerne ved Flakfortet, hvor der også ses enkelte godt 100m lange containerskibe, der fylder 2-3pixels. Fra 2015.03.04 kl. 09.28.17.

5.2 Multispektrale Kameraer - visuelle og infrarøde

Fordelen fra sort/hvid til farvebilleder er velkendt. I CCD farvekameraer er hver pixel faktisk delt op i fire kvadrater med en rød, to grønne, og en blå pixel detektor (RGB). De fleste af Danmark's 6% farveblinde kan se to farver, men ikke skelne rød-grøn. Total farveblindhed er sjælden pånær på Stillehavsøen Pingelap og før i tiden på Limfjordsøen Fur.



Figur 19: Sentinel-2 MSI dækker 13 spektrale bånd i ultraviolet (B1), blå (B2), grøn (B3), rød (B4), nær (B5-B9)- og kortbølge infrarødt (B10-B12). B82 ligger i B81 båndet.

Multispektrale kameraer har ofte forskellige infrarøde detektorer, der kan måle flere bølgelængder. Infrarøde og termiske kameraer kan se varmestråling dag og nat. Sentinel-2 har en Multi Spectral Imager (MSI), der måler i 13 spektrale bånd i de visuelle og nærinfrarøde bånd. Sentinel-3 OLCR måler i 21 spektrale bånd. Multispektrale kameraer giver et avanceret "Predator" syn, hvor flere farver og finere nuancer kan ses. Derved kan

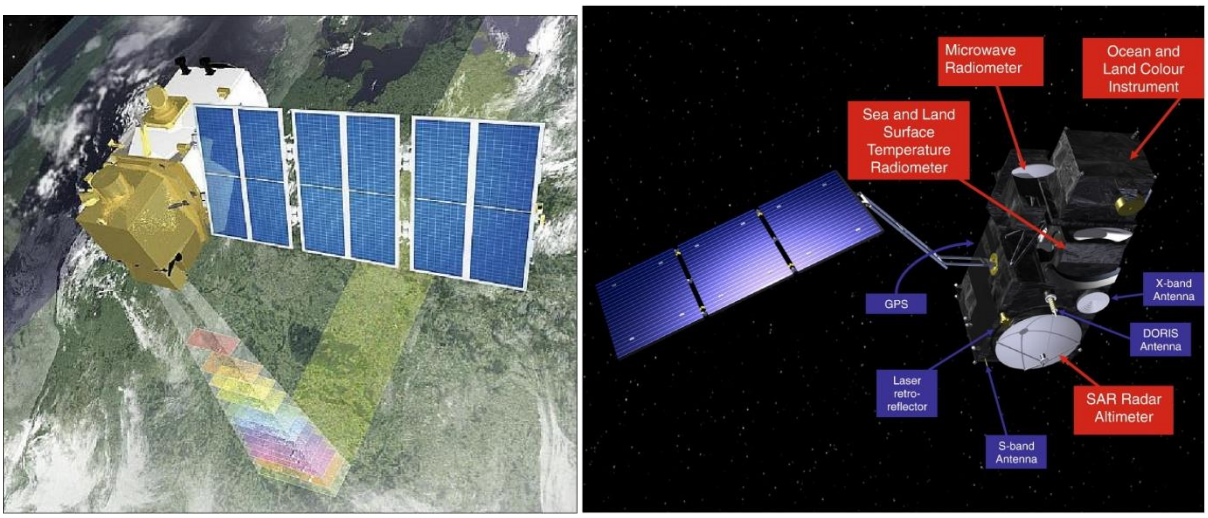
mangel på vand, gødning eller sygdom i afgrøder eller skovbrug afsløres tidligere, og olieforurening og alger kan opdages i havene.



Figur 20: GeoEye satellitbillede fra Google Maps af Trump's indsættelse som præsident foran Capitol i DC, USA, 20. jan. 2017. Opløsning 25cm.

Kameraernes rumlige opløsning er en vigtig parameter, der sætter grænsen for, hvor små objekter man kan se. Opløsningen er givet ved den længde, som en pixel dækker. Som beskrevet i 3.6 afhænger den af pixelstørrelsen i detektorer, optikkens fokallængde, samt afstanden til objektet. Sentinel-2 kan opløse ned til 10m. Google Earth opløser ned til 25cm visse steder, se Fig. 20.

Spionsatellitter kan opnå endnu bedre opløsning. Under den kolde krig opsendte US Air Force flere Hexagon satellitter med optiske kameraer. Da ccd chippen ikke var opfundet dengang, måtte billederne optages på filmrulle, sparkes ud fra satellitten, og opsamles med Herkules fly i stor højde. En uheldig designfejl bevirkede desværre at filmene blev sparket ud i rummet i stedet for ned mod Jorden. Hubble teleskopet havde også en uheldig konversionsfejl (fra tommer til cm), som medførte en linsefejl, der efterfølgende måtte korrigeres med "briller". Der er mange vigtige detaljer, som skal huskes.

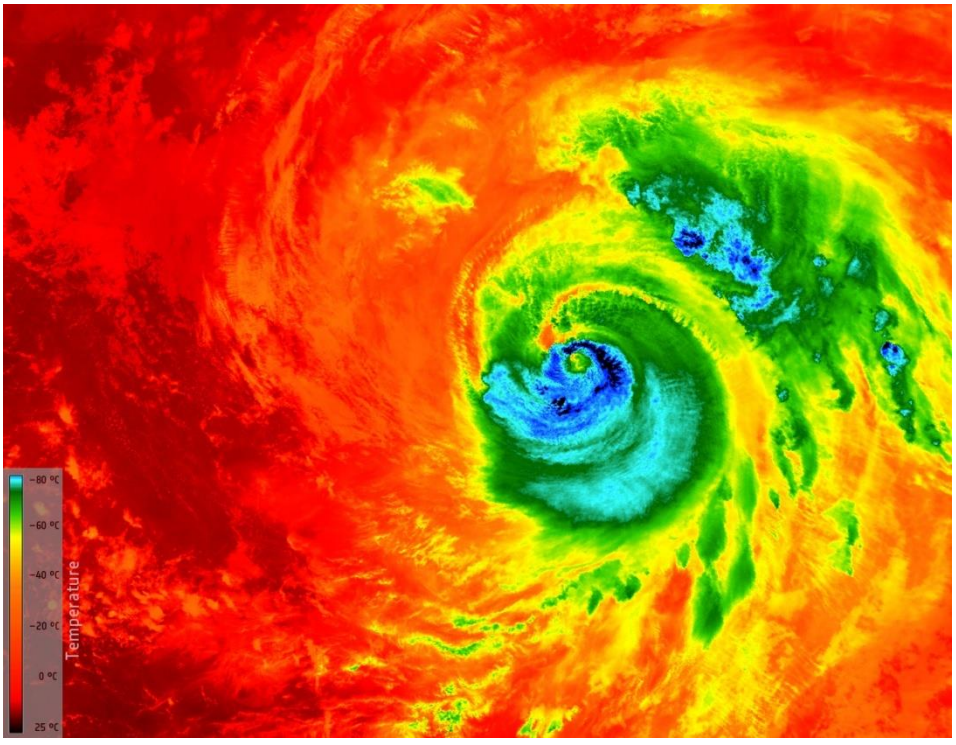


Figur 21: Sentinel-2 og -3.



Figur 22: Sentinel-2A farvebillede (RGB) af Øresund og indsejlingen til Kbh. Vindmøller, mindre skibe og deres kølvand kan ses, da opløsningen er 10m. Fra 2016.03.23 kl. 06.29.45.

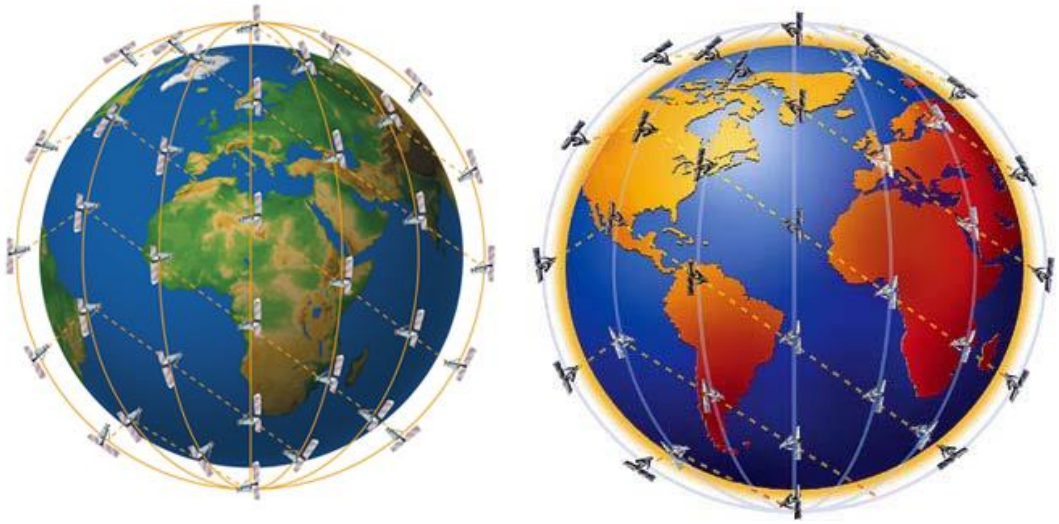
Sentinel 3, 4 og 5 har forskellige hyperspektrale kameraer om bord. Hyperspektrale kameraer bruger en prisme eller diffraktionsgitter til at splitte lysets spektrum op, hvorved alle bølgelængder i princippet kan ses og måles. Sentinel-4 har spektrometre i tre bånd: ultraviolet, visuelt og nærinfrarødt, hvor hver spektrometer opløser bølgelængder ned til 0.5nm. Den høje spektrale opløsning kan udnyttes til at identificere gasser, kemiske sporstoffer og aerosoller i atmosfæren, fordi de ofte har specifikke absorptionslinier i spektret. Sentinel-4 skal måle ozon O_3, svovldioxid SO_2, formaldehyd HCHO, glyoxal CHOCHO, aerosoller og skyer. Udover disse skal S-5 desuden måle kvælstofdioxid NO_2, kulilte CO, metan CH_4, m.fl. Herved måles og moniteres atmosfærens kemiske komposition, luftkvalitet, klima, forurening, mv., Jorden rundt.



Figur 23: Sentinel-3A termisk billede af Hurricane Matthew over den Mexicanske Golf, 7/10 2016. Temperaturen varierer fra -80°C (blåt) i orkanens øje til +25°C (rødt).

5.3 Kommunikationssatellitter (SATCOM)

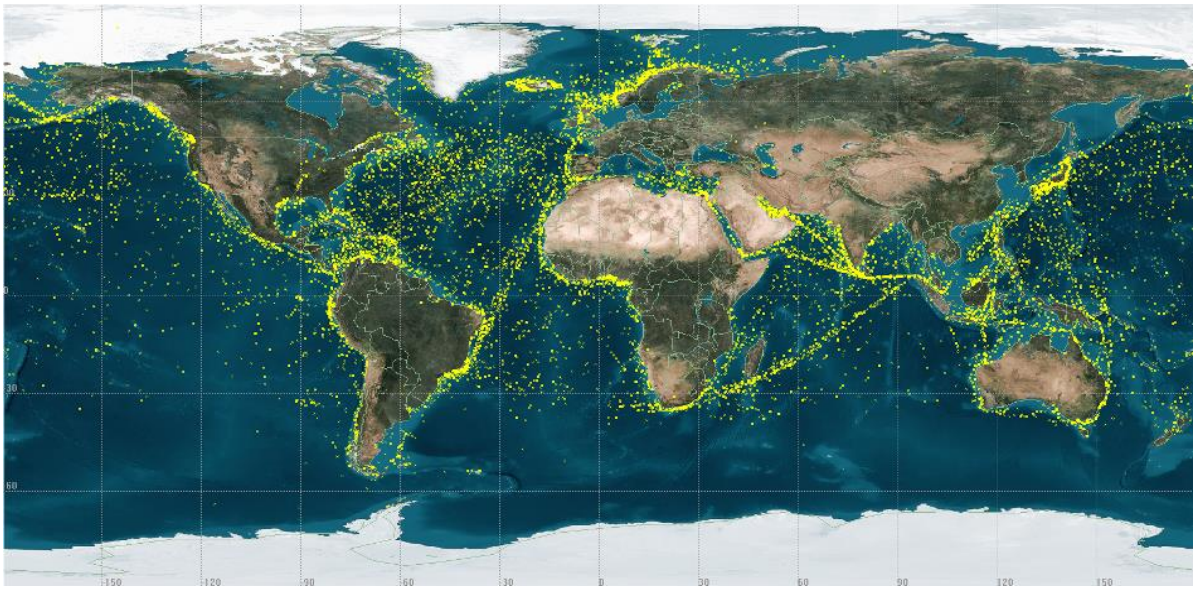
Kommunikationssatellitter (SATCOM) videresender kommunikation fra Jorden eller via satellitter i alle baner. Telefoni leveres af Iridium og Globalstar satellitsystemer i jordnære baner, hvorfra signalstyrken er stærkere. De bruges hovedsageligt i fjerne og isolerede områder uden fiberoptisk og mobil dækning.TV og Radio transmitteres mest via geostationære satellitter til paraboler. Rusland benytter også Molniya satellitter til SATCOM. Satcom kan nu også levere internet i øde og fjerne områder. Militær satellitter Milstar, Skynet, m.fl. leverer satcom og overvåger radiotransmissioner (sigint).



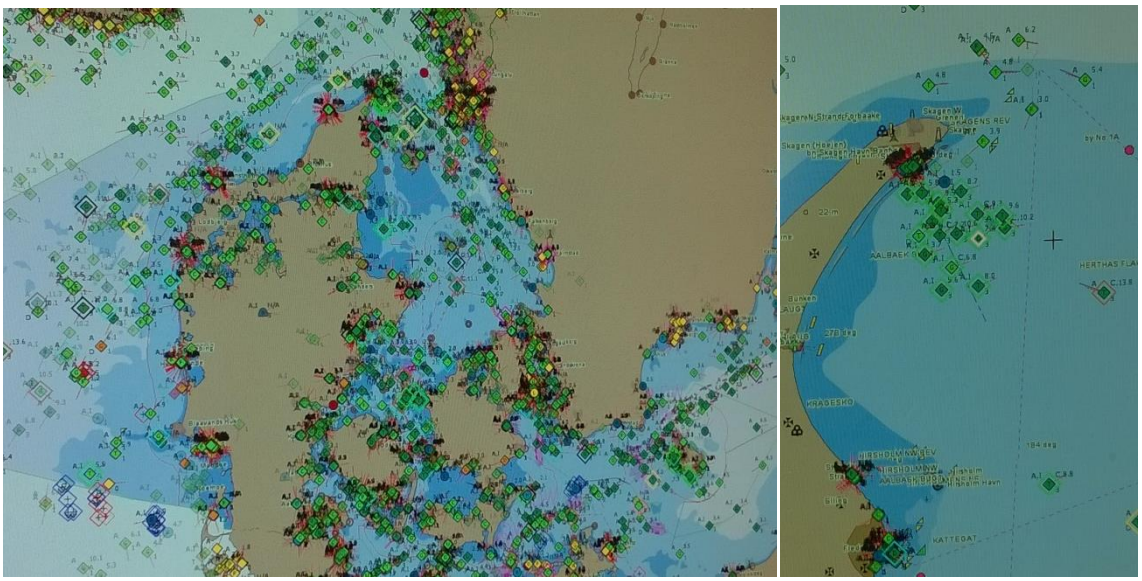
Figur 24: Iridium

5.4 Skibs-Identifikation: AIS

Alle skibe over 300 bruttotons samt alle fiskerbåde over 15m skal i EU være udstyret med Automatic Identification System (AIS). De spores i linket i Ref. [18]. AIS er traditionelt et jordbaseret radiokommunikationssystem, hvor skibe transmitter deres position og data til kyststationer. Rækkevidden ved overfladen er kun ca. 70 km grundet jordens krumning, mens signaler nemt kan nå satellitter i jordnære baner forudsat, at der befinder sig en AIS satellit over horisonten. Norge har opsendt AISAT1+2 med AIS til monitering af skibstrafik, og dermed indirekte oliespild, fiskeri, smugleri, pirateri, m.m. Aalborg Universitet har opsendt små cubesat $(10cm)^3$ AAUSAT3 i 2013 og AAUSAT5 i 2015 med AIS.



Figur 25: Skibstrafikken moniteret af ExactEarth AIS.



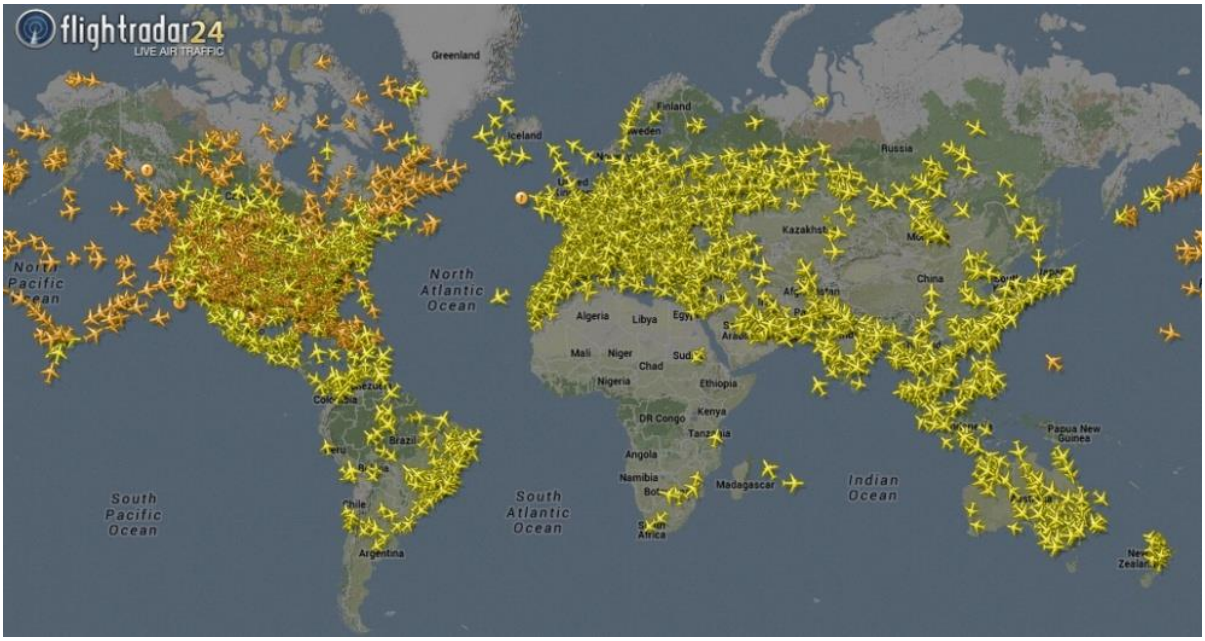
Figur 26: Skibstrafikken fra Navicon AIS over Danmark og Skagen. 5. okt. 2016.

AIS anvendes til monitering og kontrol af trafik og fiskeri, kollisionsforhindring, maritim sikkerhed, hjælp til navigation og ruteoptimering, redningshjælp, eftersøgning og undersøgelser af ulykker, kommerciel flåde og cargo tracking, havstrømsmålinger, mv. Det er dog vigtigt også at kunne tracke skibe uden AIS, fordi de netop ikke transmittere, når de dumper spildeolie, fisker illegalt, smugler, indtrænger ulovligt eller er i havsnød.

5.5 Fly-Identifikation: ADS-B

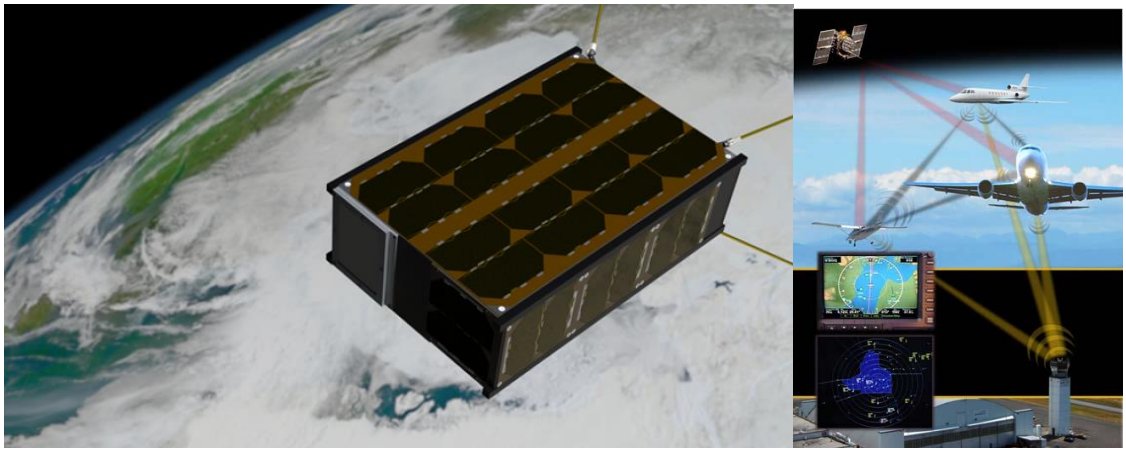
Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) er et automatisk overvågningssystem af fly via satellitter. De kan følges på [19]. Flyet modtager og transmitterer radiobølger med positionsdata til satellitter, så flyene kan spores og følges af kontroltårne i alle lufthavne. ADS-B bruges i Australien og Canada, og indføres i Europa (2017) og USA (2020) for visse fly. ADS-B kræver satellitmodtager stationer, som

allerede er opbygget på Island, Grønland, Færøerne, Sverige, Kina, og flere er på vej. På sigt kan lufthavnsradar spares væk, fordi de alligevel kun har begrænset rækkevidde fra landjorden, og dermed mister fly-track. Mange fly er forsvundet grundet manglende installation af ADS-B på flyene og manglende jordstationer især over asiatiske havområder.



Figur 27: Flightradar24.com er et internet- og app-baseret flytracking service baseret på ADS-B.

Oprindeligt udviklet af to svenske flyentusiaster. World Airline Traffic (24-hour time lapse) kan ses på youtube: https://www.youtube.com/watch?v=yx7_yzypm5w



Figur 28: DTU Space og GomSpace opsendte 2. feb. 2018 Forsvarets første satellit "Ulloriaq" (stjerne på Innuit) med AIS og ADS-B.

5.6 Globale Navigation Satellit Systemer: GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou

Det første og mest kendte Global Navigation Satellite System (GNSS – også kaldet Satnav) er det amerikanske Global Positioning System (GPS). Dets forløber NAVSTAR blev udviklet af US Navy til at bestemme deres atomubådes position. For at kunne

ramme, skal langdistance raketten vide, hvorfra man skyder. En scrambled GPS version blev frigivet til offentligheden i 1993 af Ronald Reagan, efter at et Sydkoreansk passagerfly forvildede sig ind over Nordkorea og blev skudt ned. Jimmy Carter frigav fuld GPS i 2000. Satellitter dør efter en årrække og erstattes med nye, eg. fungerer pt. 31 ud af 70 opsendte GPS satellitter. Det russiske GLObal NAvigation Satellite System (GLONASS) er blevet kraftigt opdateret under Putin, og er nu det mest benyttede af smart phones. Det Europæiske navigationssystem Galileo var oppe at køre og blev testet primo 2017, hvor 18 af de 30 satellitter var opsendt. Desværre er der fundet fejl på flere af de vigtige ultrapræcise brint-maser baserede atomure. Fuldt operationelt i 2020 forventes en nøjagtighed på 1m alment tilgængelig og 1cm krypteret. Udover højere nøjagtighed dækker Galileo også højere breddegrader, og kan videresende nødsignaler. Kina er i fuld gang med at opgradere deres GNSS kaldet BeiDou[2] fra tre geostationære satellitter til 30 satellitter i medium og geosynkrone baner. Geostationære satellitter alene har begrænset dækning på højere breddegrader især i storbyer, hvor højhuse skygger for radiosignalerne. Vi kender alle ventetiden, mens vores GPS leder efter satellitforbindelser.

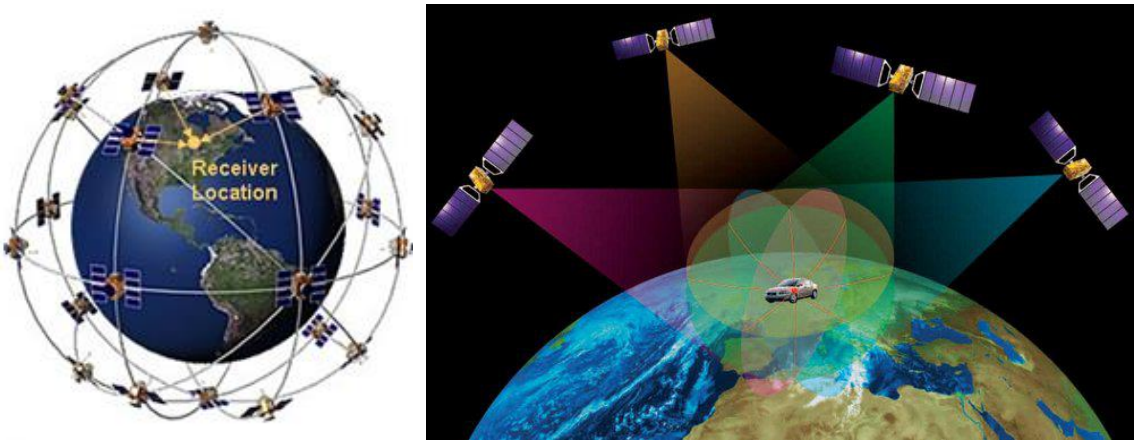
Princippet i GNNS er triangulering fra mindst fire satellitter [14]. Hver satellit signal indeholder satellittens koordinater (X_s,Ys,Zs) og er tidsstemplet. GNSS modtagerens ur bestemmer derfor forsinkelsen i modtagelsen Δt, som ganget med lyshastigheden giver afstanden R_s fra modtagerens koordinater (x,y,z) til satellitten:

$$R_s = c\Delta t = \sqrt{(X_s - x)^2 + (Y_s - y)^2 + (Z_s - z)^2} + c \bullet urfejl \qquad (5.1)$$

Forsinkelsen har dog også en urfejl, som skyldes at GNSS modtagernes ure er forholdsvis billige og har nogle mikrosekunders unøjagtighed. Ganget med lyshastigheden giver dette en uacceptabel unøjagtighed på flere kilometer. Fejlen kan dog fjernes ret enkelt med en fjerde satellit, således at de fire afstande R_s, s=1,2,3,4, bestemmer modtagerens tre koordinater (x,y,z) samt urfejlen. Pointen her er, at urfejlen ligger i modtageren og er derfor den samme for alle fire afstande. Satellitterne bærer hver især ultrapræcise atomure, så deres urfejl er alle neglicible. Tiden på satellitterne skal korrigeres for effekter fra både den specielle og generelle relativitetsteori, hhv. tidsforkortning og at rummet krummer.

Beregningen af positionen ud fra de fire satellitters afstande kan gøres simpelt. Man approksimerer (Taylor udvikler) de fire ligninger omkring sidst fundne position, og får et simpelt lineariseret udtryk for (x,y,z). Dette gør også løbende opdatering hurtig. Positionen kan gøres mere nøjagtig ved at gentage (iterere) positionsbestemmelsen, hvilket kan være nødvendigt, hvis GNSS modtageren har været slukket og transporteret langt væk fra sidste position. Modtages signaler fra flere end fire GNSS satellitter, benytter modtageren dem alle til at beregne en mere præcis gennemsnitsposition. Selv efter korrektion for urfejl er der unøjagtigheder fra atmosfæriske forstyrrelser, støj i modtageren, o.a. Disse resulterer i nogle meters unøjagtighed i positionsbestemmelsen.

[2] Stjernetegnet Karlsvognen på kinesisk, hvori nordstjernen ligger og som bruges til navigation.



Figur 29: GPS satellitterne og triangulering fra fire satellitter.

Omvendt kan atmosfæriske forsinkelser udnyttes til at bestemme temperatur og luftfugtighed i atmosfæren [15]. Radiobølger brydes ligesom lys en smule gennem atmosfæren, og brydningsindekset afhænger af tryk og temperatur, fx stiger det fra n=1,00005 ved 0 ºC til n=1,0003 ved 30ºC. Brydningen bevirker en afbøjning, som forsinker signalet en smule, hvilket kan måles med de ultrapræcise GNSS atomure. Forsinkelsen måles af en anden GNSS satellit. Derved måles brydningsindekset, og vha. tilstandsligningen for ideale gasser [16] bestemmes temperatur, tryk og luftfugtighed gennem atmosfæren.

5.7 Andre sensorer

LIDAR og laser højdemålere (altimetre) benytter lasere ved forskellige bølgelængder til at måle absorption og refleksion i atmosfæren og fra jord- og havoverfladen. Laser og radar altimetre kan måle præcise afstande og dermed gletsjer nedsmelting, havstigning, havstrømme, mv.

Detektorer til gamma-stråling blev under den kolde krig opsendt til måling af nukleare eksplosioner. Det var en overraskende stor succes, idet mange såkaldte ”gamma-ray bursts” blev målt. De kom bare ikke fra Jorden, men fra kosmiske katastrofer langt væk i Universet.

De mange forskellige typer sensorer giver hver især interessante, komplementære og ikke sjældent overraskende data, der også kan fusioneres til et mere komplet billede af Jorden og Universet.

6. Anvendelser - Show Cases

I dette kapitel beskrives konkrete anvendelser af satellitdata i mere detalje.

6.1 Skibsgenkendelse

Maritim overvågning er essentiel for at monitere og kontrollere pirateri, smugling, illegal fiskeri, flygtningetrafik, territoriale overskridelser, spionage, trafiksikkerhed, skibe i havsnød, miljøet, olie og kemisk dumpning, algevækst, etc. I disse tilfælde kan

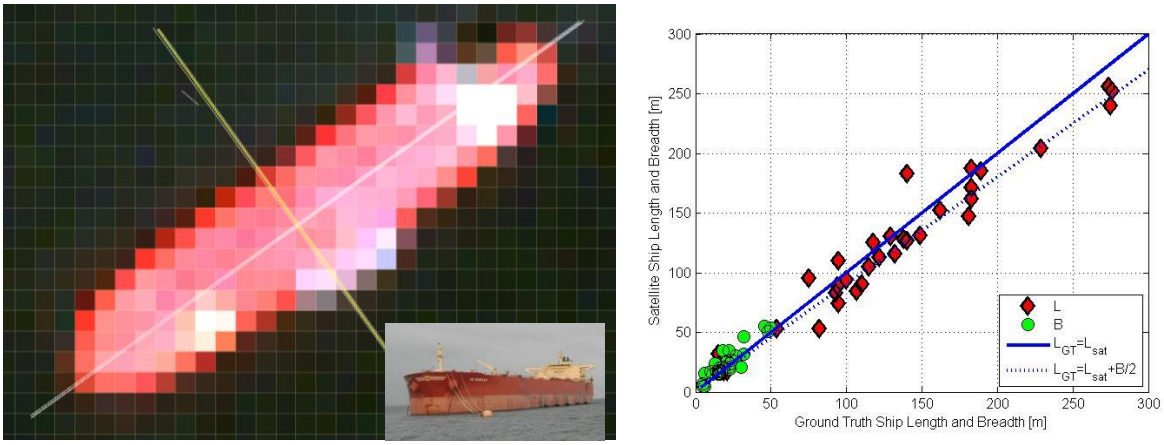
kooperative transponder systemer som AIS, VMS og LRIT være ude af funktion. De kan være i stykker, uden for rækkevidde, jammet, spoofet eller bevidst slukket. Derfor er andre ikke-kooperative overvågningssystemer nødvendige såsom overvågning fra satellit eller fly.

Skibe reflekterer både radarsignaler og sollys, og kan derfor let detekteres i satellitbilleder, forudsat skibet ikke er stealth. Detektion kræver blot én pixel, der lyser op. For at genkende det som et skib og ikke et isbjerg eller havvindmølle, skal det kunne ses i adskillige pixels som et aflangt objekt. Hvis det sejler, kan striben fra kølvandet også ses.



Figur 30: Udsnit af Sentinel-2A billed tile 32VNK fra 2016-08-23 kl. 10:30 UTC over Skagen.

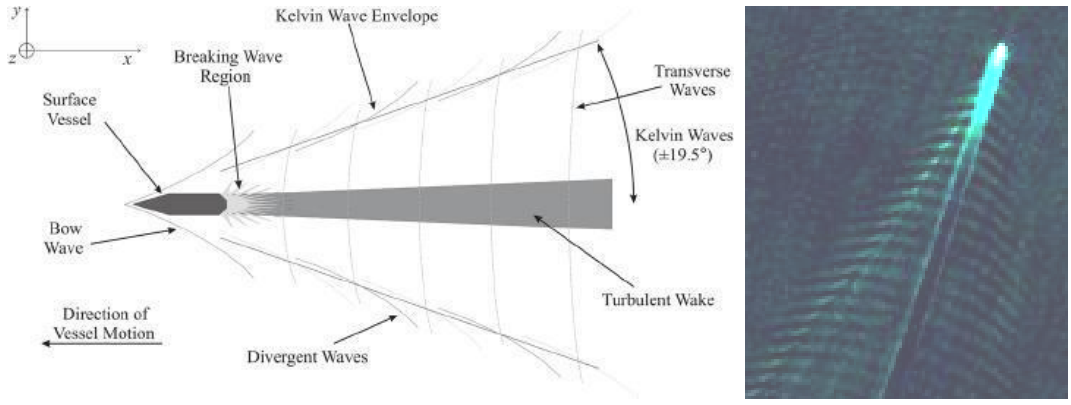
Billedet er RGB kontrast forbedret. Adskillige container og tank skibe ligger forankret i det stille Kattegat øst for Skagen, mens de afventer brændstofskibe. Nær kysten ses skyer, der kaster skygger mod nord.



Figur 31: Tv. RGB billede zoomet ind på skibet NS Burgas fra Figur 30. Hver pixel er 10mx10m.

Th. sammenlignes længder og bredder for 27 skibe givet ved hhv. AIS og målt ud fra satellitbilleder. Fra [24].

Det er et klassisk problem at bestemme skibets længde og bredde ud fra et satellitbillede. Hvis pixelopløsninger er 10m som på Sentinel-2 MSI, vil et skib med længde over 20m kunne ses i mindst 3 pixels og burde kunne genkendes som et skib. For at bestemme skibets refleksion, position (x,y), sejlretning, længde og bredde (6 parametre) skal skibet kunne ses i mindst 6 pixels og jo flere, desto bedre bestemmes parametrene. I Figur 31 ses en containerskib med bredde B=5pixels=50m og længde L=28pixels=280m. Ifølge AIS er skibets bredde 48m og længde 275m. Sammenlignes skibsparametrene fra AIS og målt ud fra Sentinel-2 satellitbilleder, finder man god overensstemmelse indenfor få meter [24].



Figur 32: Tv. En skitse af Kelvin bølger og turbulent kølvand fra et sejlende skib. Th. satellitbillede, hvor både kølvand og Kelvin bølgerne ses tydeligt.

Kølvandet kan ligeledes give information om skibet. Det afslører sejlretning og én af skibets positionskoordinat. Skibets bovbølger (Kelvin wakes) har vinklen $\sin^{-1}(1/3)=19{,}5^{o}$ til sejlretningen. Skibets hastighed V bestemmes ud fra Kelvin bølgerne, som har bølgelængde

$$\lambda = \frac{2\pi V^2}{g}. \qquad (6.1)$$

I Figur 32 er bølgelængden λ=5,5pixels=55m, så skibets hastighed er V=9,3m/s=18knob.

Bredden af skibets turbulente kølvand W vokser svagt med afstanden fra skibets stavn (r) nogenlunde som [24]

$$W(r) \approx B \cdot (r/B)^{1/5} . \qquad (6.2)$$

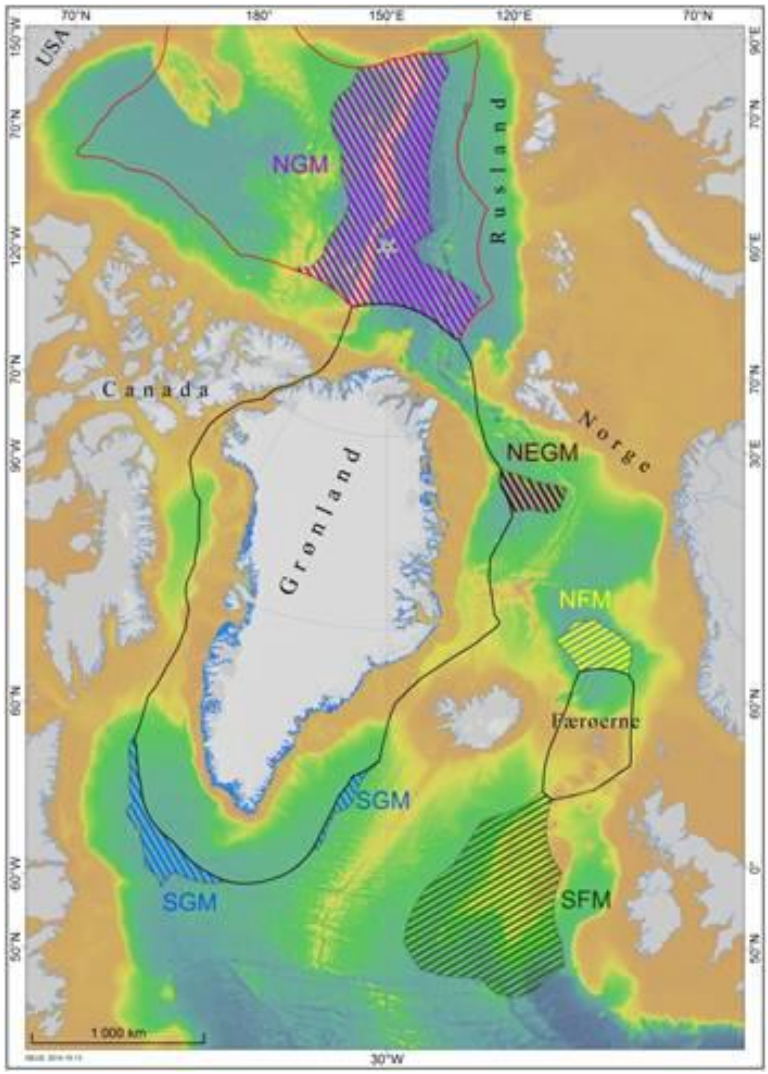
Selvom man kun kan se skibets kølvand, kan skibets bredde B estimeres ud fra kølvandets W(r). Kølvandets længde og bredde vokser normalt med hastigheden og afhænger også af skibstype, bølgegang, mv. Derfor kan skibsparametrene ikke bestemmes præcist herfra. Kølvandet ses som en lys stribe visuelt samt nær- og mellembølge IR, men som en mørk stribe i langbølge IR.

Sentinel-2 MSI bestemmer hele 13 farver på skibet, hvilket muliggør spektral genkendelse af visse skibe. Små skibe er dog kun synlige i få pixels og er notorisk hvide. De er derfor nemme at detektere, men vanskelige at genkende.

Multi- og hyperspektrale kameraer bruges også af US Coast Guard til at finde speedbåde, som drugsmuglere har for uvane at camouflere med blåt overtrækssejl, så snart de ser eller hører en helikopter. Hvis båden er usynlig visuelt men synlig ved andre bølgelængder, er den camoufleret og dermed særdeles suspekt!

6.2 Arktisk Overvågning, klassifikation og Machine Learning

Polare satellitter er ideelle til overvågning af Arktis, som er et enormt område på størrelse med Europa om end noget tyndere befolket. Grundet global opvarmning og afsmeltning i Arktis er dets betydning voksende indenfor fiskeri, olie- og mineraludvinding, transport via nordøst og nordvest sejlruterne, turisme, mv. Den 15. dec. 2014 fremsatte Kongeriget Danmark krav til Sokkelkommisionen på fem områder i Arktis (se Figur 33) med samlet areal 1.070.000km^2. Dermed bliver Kongeriget Danmark verdens syvende største nation. Efterfølgende har Rusland dog fremsat tilsvarende kontinentalkrav, der overlapper med vores. Det er muligt pga global opvarming, at antallet af isbjørne falder i Arktis, men antallet af russiske bjørne vokser!



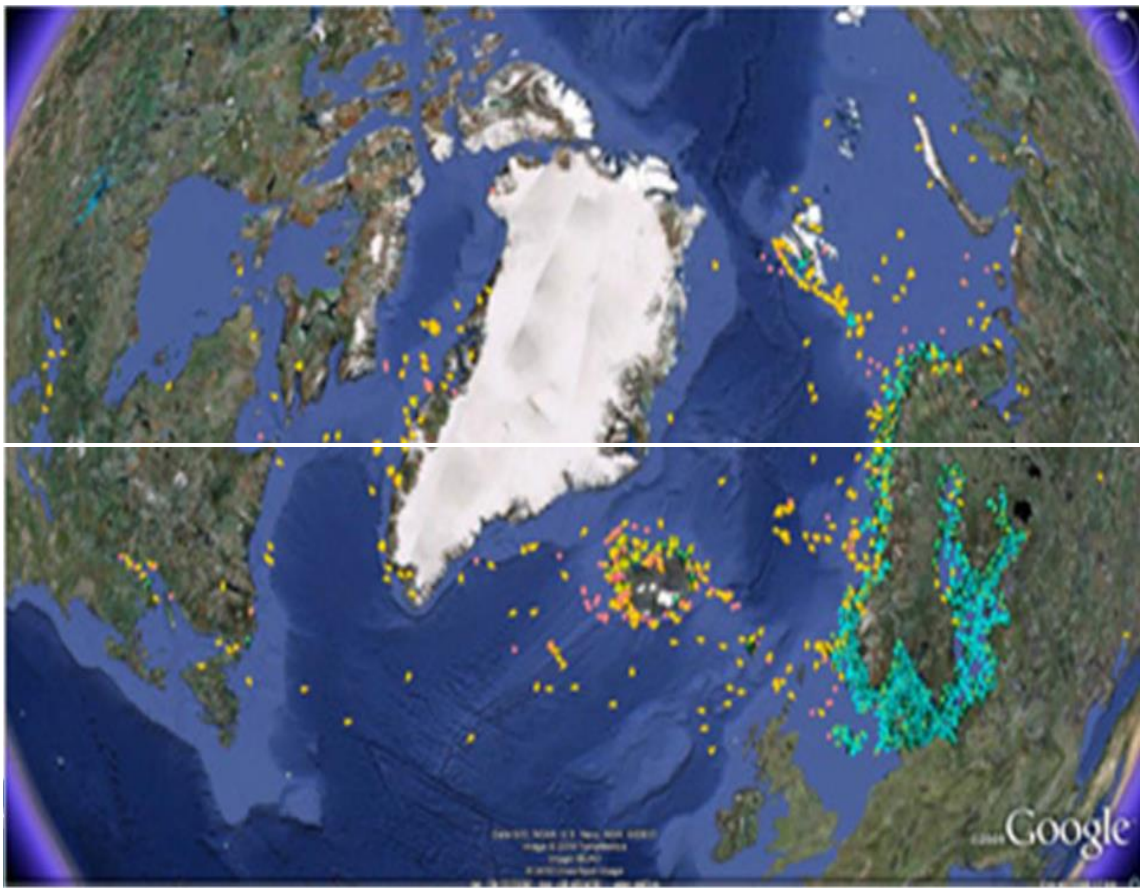
Figur 33: Med skravering er vist de fem områder i det arktiske og nordatlantiske område, hvor Danmark har gjort krav på havbunden. Endvidere er vist den eksklusive økonomiske zone ved Grønland og Færøernes fiskerizone (sort streg). Kilde: www.kontinentalsokkelprojektet.dk

Forsvaret har opgavevaretagelsen for Arktis, som indebærer mange civile opgaver som sø- og flyveredning, havmiljø opgaver, fiskeriinspektion og nukleart beredskab. Disse og fremtidige opgaver er beskrevet i "Forsvarets Fremtidige Opgaveløsning i Arktis" rapporten fra 2016 [7]. Efterfølgende har Forsvaret i 2016 indgået aftale med det danske satellit firma GomSpace samt DTU om opsendelse af nanosatellitten *Ulloriaq*, hvilket betyder *stjerne* på innuit. Ulloriaq vil bære både AIS og ADS-B transmittere til overvågning af hhv. skibe og fly. Ulloriaq blev opsendt 2. februar 2018.

DTU Space nedtager løbende satellitdata fra ESA over Arktis. Haviskort kan ses på www.seaice.dk. DTU gennemfører i disse år en automatisering af havis kort og klassifikation sammen med DMI. Ligeledes detektions og klassifikation af skibe, isbjerge, øer, mv.

Tonsvis af satellitdata downloades og analyser af dem er meget ressource krævende. Man kan fordelagtigt benytte Machine Learning klassifikationsalgoritmer, hvor man træner algoritmerne på et annoteret datasæt. Fx var der i Kaggle's konkurrence januar 2018 lagt

et træningssæt op med 1400 SAR billeder af isbjerge og skibe udover et test sæt på mange tusinde. Den der havde flest rigtige i test sættet vandt 50.000 euro fra Statoil. Algoritmerne har indbygget mønstergenkendelse meget lig de, som vores hjerne bruger, og kaldes derfor "convoluted neural networks". Algoritmerne har flere hundrede tusinde parametre, som tilpasses numerisk ved at optimere scoringen på træningssættet. Objekterne i billederne klassificeres derfor ud fra erfaring med genkendelse. Objekter i nye satellitbilleder kan nu køres gennem Machine Learning algoritmerne, som beregner en klassifikations sandsynlighed: isbjerg, skib, ø, bølger, ea.

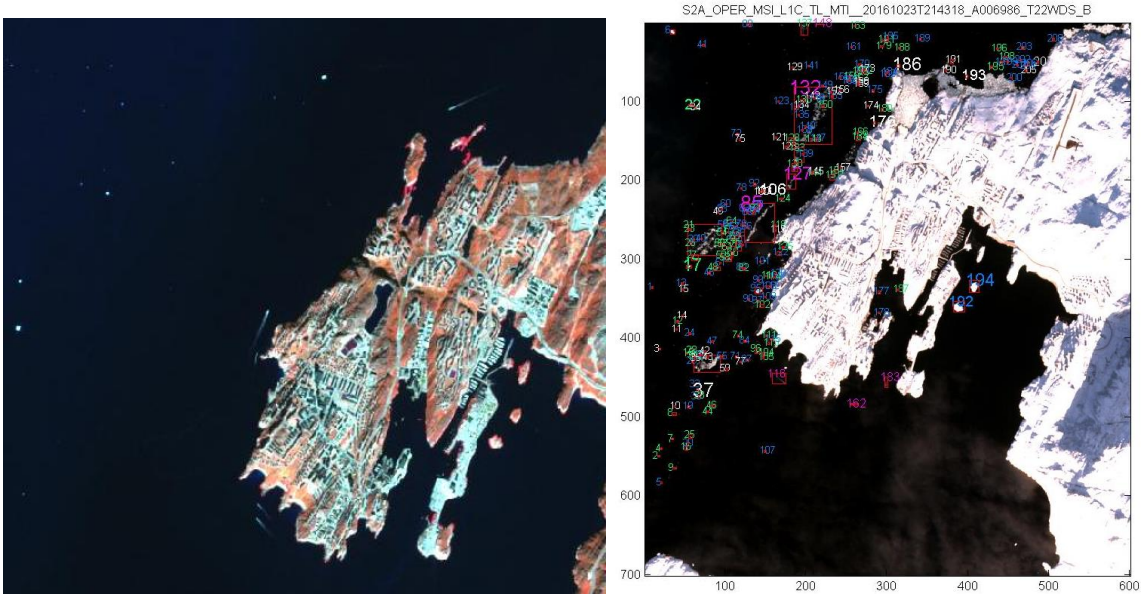


Figur 34: AIS skibstracking over Arktis fra de norske AISAT.



Figur 35: Forrest inspektionskutteren TULUGAQ, i midten inspektionsfartøjet KNUD RASMUSSEN og bagest inspektionsskibet VÆDDEREN.

Kilde: Forsvaret. Til højre to nyindkøbte SEAHAWK-helikoptere. Kilde: http://www.sikorsky.com



Figur 36: Sentinel-2 billeder (grøn, rød og nærinfrarød) af Nuuk, Grønland, i tile 22WDS.

Isbjerge/flager og fiskerbåde med kølvand ses i fjorden. Tv. grøn, rød og nærinfrarød fra august 2016. Th. fra 23. oktober 2016, hvor flere hundrede forskellige objekter/segmenter klassificeres automatisk, hovedsageligt isflager, isbjerge og få fiskerbåde og øer. Fra [25].

6.3 Præcisionslandbrug

Sentinel-2's 13 multispektrale billeder indeholder en righoldig information, der bl.a. kan afsløre afgrøders tilstand. Fx afsløres graden af vegetation af vegetationsindekset, defineret som (B81-B4)/(B81+B4), dvs. den relative forskel mellem nær-infrarød og rød. Ligeledes afsløres vandindholdet ud fra vandindekset (B81-B11)/(B81+B11). Ud fra disse to indekser kan man monitere vækst, sygdomme og vandmangel på marker og i skove [21].

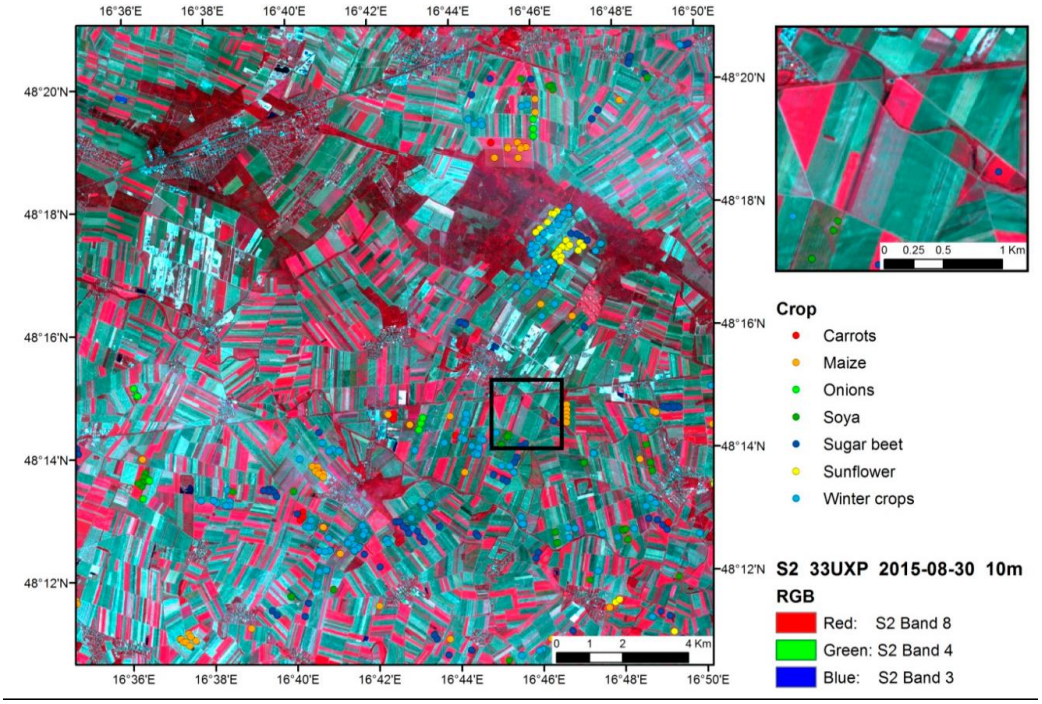
De mange multispektrale farver gør det også muligt at diskriminere mellem forskellige afgrøder. Figur 37 viser solsikke og majs marker, der begge synes grønne set med øjet, men kan skelnes, når de farvelægges anderledes (falske farver) ud fra tre specielt udvalgte nærinfrarøde spektrale bånd. Således kan selv små nuanceforskelle ses med de 13 spektrale bånd i Sentinel-2 MSI kameraet.



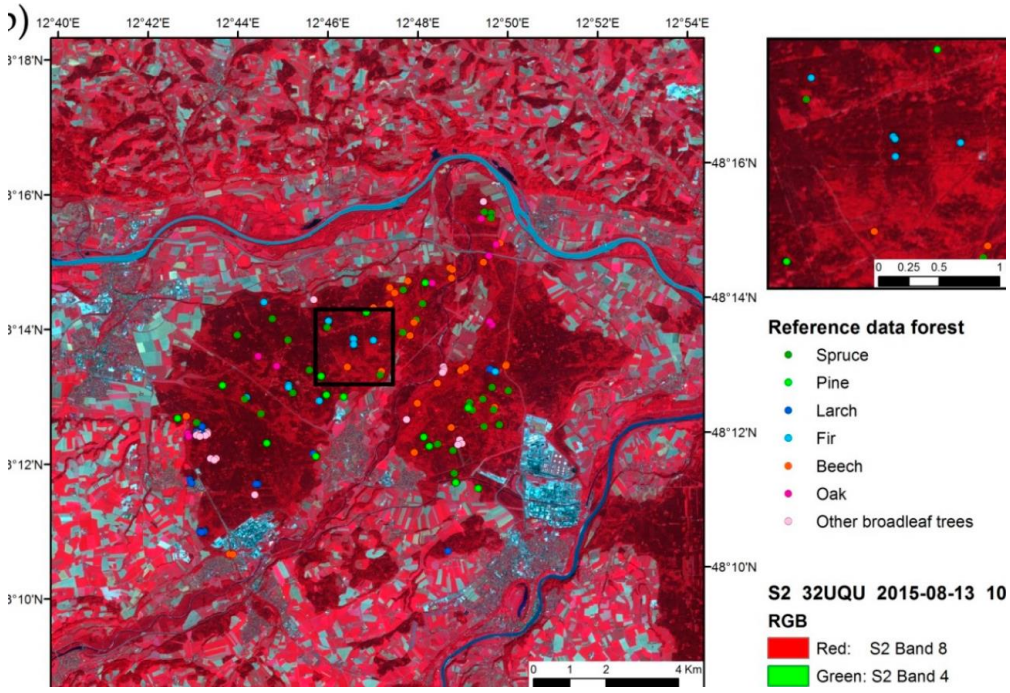
Figur 37: Sentinel-2A billeder i tre nærinfrarøde bånd. Tv. solsikke- og majsmarker nær Toulouse farvet hhv. orange og gule.

Th. Saudi Arabiske marker vandet fra vandkanoner i cirklernes centre.

I Figur 38 vises et landbrugsområde, hvor gulerødder, majs, løg, soja, sukkerroer, solsikker og vinterafgrøder kan skelnes med 77% sikkerhed. I Figur 39 skelnes syv forskellige trætyper med 66% sikkerhed, men visse typer forveksles. Man kan opstille en *confusion matrix*, der afslører, hvilke afgrøder eller træer, der typisk forveksles.



Figur 38: Marchfield nedre Østrig, august 2015. Klassifikation af diverse afgrøder ud fra de 13 multispektrale Sentinel-2 MSI bånd. Fra [22].



Figur 39: Skovområde nær Altoetting, Bayern, 13. august 2015. Klassifikation af trætyper. Kilde [22].

Talking Fields er et ESA program for præcisionslandbrug, der hjælper landmænd med at monitere vanding, gødning, sygdomme, mv. Det tyske firma Vista leverer Sentinel-2A billeder og analyser af markerne til landmanden sammen med GPS pinpointing, som fremtidigt forventeligt kan kobles til en selvkørende traktor. Billeder anvendes også til skovbrug, fiskeri, miljøkontrol, mm. Myndigheder skal nok også finde ud af at bruge satellit billeder til kontrol af landbrugsstøtte, braklægning, fiskerikvoter, oliespild, etc. Kreative græske landmænd er blevet taget i fusk med EU landbrugstøtte, da de flyttede falske oliventræer rundt til "nye" olivenplantager.

7. Fremtiden

Rumæraen blev kickstartet, da Sovjetunionen opsendte Sputnik satellitten i 1957. Under den kolde krig kappedes stormagterne om at udvikle og sende raketter og satellitter op i rummet, hvilket kulminerede i 1969 med NASA's første månelanding. Rumkapløbet var dog enormt kostbart ift. udbyttet, og interessen skiftede hurtigt fra månelandinger til sportskanalerne. De sidste Apollo missioner blev finansieret for at kunne køre bil og spille golf på månen, og efterfølgende blev måne- og marslandinger droppet.

Størstedelen af rumaktiviteter er kommercielle eller militære satellitter, der kigger ned mod Jorden. Satellitdata har ændret vores hverdag gennem satellit TV, GPS, vejrkort, overvågning, klimamålinger, og meget mere. Dette vil fortsætte – sågar accelerere. Fx vil GPS nøjagtighed på 1cm muliggøre førerløse biler, fly, tog, sporing af demente, præcise højdemålinger af have og gletsjere, etc. Høj-opløselige kameraer vil kunne monitere land- og skovbrug, fiskeri, miljøovervågning, katastrofeområder. Samtidigt kan de sweepe og overvåge enorme områder som Arktis. Nye og uventede anvendelser dukker op løbende.

Ministerier elsker at beregne ”returfaktoren”, i.e. hvor meget afkast en investering giver. Rumrelaterede aktiviteter har en høj returfaktor omk. 5, dvs. for hver investeret krone indtjenes fem. Trods denne store investeringsgevinst er Danmark meget tilbageholdende med at satse på rummet i forhold til vores nabolande. Finansministeriets spændetrøje afspejles tydeligt i den nyligt udarbejdede nationale rumstrategi 2016, der anbefaler "mere intelligent udnyttelse indenfor nuværende økonomiske rammer" med vægt på ESA.

Enkelte satellitter har også udforsket vores planetsystem, og nye rumnationer som Kina samt det private selskab SpaceX planlægger igen måne- og marslandinger. Det seneste årtis opdagelser af Jordlignende planeter få[3] lysår væk vækker måske menneskehedens pionerånd igen.

8. Guide til download af ESA Copernicus Sentinel Data

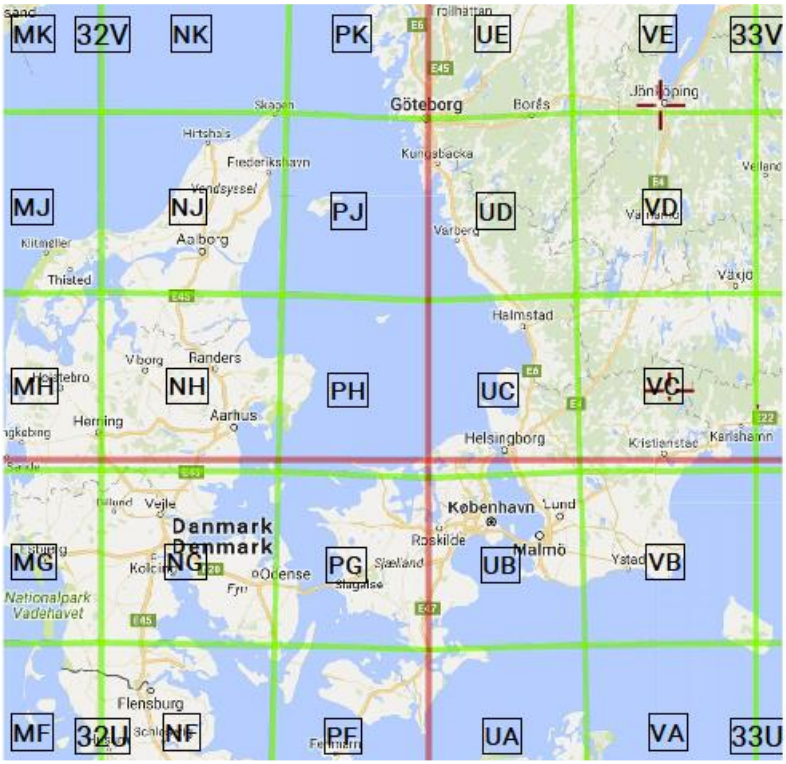
Enhver kan frit og gratis downloade de enorme mængder billeddata fra Sentinel satellitterne, som nedtages og behandles på jordstationer. Det er dog ikke altid let, så vi inkluderer en guide:

1. Man kan læse om Sentinel satellitterne og data på ESA Copernicus *https://**sentinel**.esa.int/*
2. På Sentinel Scientific Data Hub https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home kan man oprette brugernavn og password, og har dermed fri adgang til satellitbillederne. SciHub er dog jævnligt nede pga. tekniske problemer eller opdateringer.
3. Man kan nu afmærke hvor på verdenskortet, man vil have billeder fra.
4. På Insert Search Criteria kan man udvælge satellit og datoer. I øverste felt kan vælges område (fx Denmark) eller data type (fx IW for højopløselig SAR). Desværre vises kriterierne ikke på alle pc'er, så find hvor fingerpointeren dukker op. Tricky så prøv jer frem.
5. Tryk på Search. Nu listes alle satellittens datafiler over stedet i tidsperioden, og fra 2017 kronologisk efter nedtagningstidspunkt. På quicklook kan man se og udvælge en optagelse. Sentinel-2 billeder fra før oktober 2016 dækker et areal på omkring halvdelen af Danmark og er typisk på 7GB. Nu er de opdelt de mindre tiles på ca. 0,5GB. Sentinel-1 tiles fylder typisk 0,5GB
6. Tryk på download og vent 5min (0,5GB) eller en time (7GB) afhængig af, hvor hurtig din internetforbindelse er. Bed samtidigt til, at forbindelsen ikke knækker.
7. Dine downloadede satellitbilleder er komprimeret i en folder, så unzip dem. Zip7 kan anbefales.
8. Folder og filnavne er utroligt lange, hvilket kan give problemer på visse windows pc'er. Filnavnene indeholder en masse unødvendig og redundant info. Vigtigst er datoen. Sentinel-2 passerer altid over Europa omk. 10.40 UTC, Grønland 15.10 UTC. Disse må ikke forveksles med den irrelevante nedtagningstid og -dato. Sommertid er DK +2 timer, Grønland -2 timer. Sentinel-2 optager ikke data på natsiden. Det gør Sentinel-1, typisk morgen og aften afhængig af bredde- og længdegrad samt tidszone.

[3] Ved høj hastighed forkortes tiden ifølge Einstein.

9. De mange GB billeder kan analyseres i SNAP, som også kan downloades fra Sentinel Toolboxes, se link under 1. En hurtig pc med stor memory anbefales, men mindre kan gøre det med god tålmodighed.
10. Start SNAP op, click File>Open Product, og upload en tile/granule med fil extension .xmp - disse findes i din datafolder under granule. Her ligger en række granules/tiles med NATO Military Grid Reference, hvis KML fil kan ses i google Earth. Fx. ligger Øresundsområdet (inkl. København) i tile 33UUB, Storebælt i 32UPG, og Jylland i 12 tiles (se Figur 39). Nuuk i 22WDS. Den ønskede tile åbnes nu i SNAP ved click på open.
11. Click på tilen i Product Explorer. Click på menubar øverst på Window -> Open RGB window, click ok, og billedet kan ses efter nogle sekunder. Leg med zoom og placering.
12. Sentinel-2 har 13 bånd (farver) fra blå, grøn, rød og adskillige infrarøde. Forskellige kombinationer kan vælges, dog med samme opløsning (10, 20 eller 60m). Standard er normal RGB color. Man kan benytte software som Sen2Cor til atmosfæriske korrektioner og kalibrering.
13. Sentinel-1 har SAR billeder med to polarisationer vertikal og horisontal, HH og HV eller VV og VH. Radar reflektionerne fra havet vokser i blæsevejr pga bølger. Vinkelafhængighed og kalibrering kan foretages i SNAP.
14. Billederne har mange bits, så man kan kontrastforbedre billeder ved at clicke på Optical>Spectral View i SNAP.
15. SNAP indeholder mange andre muligheder for billedanalyse via de forskellige menu punkter.
16. Man kan også analysere billederne i eg. MATLAB, hvis man foretrækker dette. Kontakt mig for et script.
17. Sentinel-1 SAR billeder har to polarisationer VV og VH, eller HH og HV, som ligeledes kan vælges og ses i SNAP. Umiddelbart dukker billederne dog op spejlvendt og på hovedet. I Matlab kan flipud og fliplr vende dem rigtigt.
18. Ønsker man at overvåge et bestemt sted i Europa, er der data fra hver satellit to ud at ti dage altid ca. kl. 10.40 UTC, dvs. 12.40 dansk sommertid og 11.40 vintertid. Da der snart er to satellitter (A+B) af hver type, er der derfor dækning hver 2. eller 3. dag for hver satellittype. Til sammenligning er Google Earths billeder nok i meget bedre opløsning men ofte flere år gamle, og derfor ikke brugbare til overvågning.
19. Satellitbillederne kan ikke direkte lægges på landkort pga Jordens krumning. SNAP kan korrigere herfor.
20. Der findes programmer, der kan lægge satellitbilleder oveni højopløselig google map som baggrund.

21. Man kan skrive til ESA Copernicus help desk, som er blevet bedre til at svare.



Figur 40: Sentinel granules/tiles følger Military Grid Reference System, eg. ligger København midt i 33UUB og Skagen i hjørnet af 32VNK.

9. Referencer

1. *Danmarks Nationale Strategi for Rummet.* Tværministeriel rapport, Forsknings- og Innovationsstyrelsen, juni 2016.
2. *Kortlægning af rumområdet i Danmark*, Forsknings- og Innovationsstyrelsen, 2015.
3. *Rummet skaber bedre liv på jorden, Fem gode grunde til en dansk rumstrategi,* Forsknings- og Innovationsstyrelsen, 2011.
4. *Satellitter og droner i Arktis - multiuse af en rumbaseret infrastruktur,* Jens Olaf Pepke, DTU-Space, 2016.
5. *Rummet kalder Jorden,* DTU/CenSec rapport 2014.
6. *Mulig anvendelse af satellitter og UAV-platforme over Arktis*, Terma rapport, 2013.
7. *Forsvarsministeriets fremtidige opgaveløsning i Arktis*, Forsvarsministeriet, juni 2016.
8. *Styrk Forsvarets Indsats i Arktis*, Taksøe rapporten, 2016.
9. ESA Copernicus Program: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus
10. *ESA Galileo Program:* http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation
11. *Satellit tracking:* http://www.n2yo.com/
12. *Kessler Syndromet,* ekstramateriale til filmen Gravity, 2014.
13. *Satellitparkering*, DTU projekt på MAT1, 2014.
14. *GPS,* DTU projekt på MAT1, 2015.

15. *Meteorologi med GPS-signaler*, K.M. Kinch og K.B. Lauritzen, Aktuel Naturvidenskab 6, 2011.
16. *Plasmafysik og Fusionsenergi – Fremtidens Energikilde*, B. og H. Heiselberg, Fysik i det 21. århundrede, Fysikforlaget 2015.
17. *Milankovitch Cycles, https://en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch_cycles*
18. *AIS skibs tracking: http://www.marinetraffic.com/dk/ais/home/centerx:2.2/centery:41.3/zoom:14*
19. *ADS-B fly tracking: https://www.flightradar24.com/60,15/6*
20. *Elon Musk SpaceX: https://www.youtube.com/user/spacexchannel*
21. *http://www.digital-geography.com/using-sentinel-2-for-crop-monitoring/*
22. *"First Results with Sentinel-2 Data for Crop and Tree Species Classifications in Central Europe"* , M. Immitzer, F. Vuolo, C. Atzberger, *Remote Sensing* **2016**, *8*, 166. http://www.mdpi.com/2072-4292/8/3/166.
23. *Fusion of SAR and EO Imagery for Arctic Surveillance.* E. Krogager, H. Heiselberg, J.G. Møller, S. von Platen, *Proc. NATO IST-SET-128 Specialist Meeting*, **2015**, paper no. 18.
24. *A Direct and Fast Methodology for Ship Recognition in Sentinel-2 Multispectral Imagery.* H. Heiselberg, *Remote Sens.* **2016**, *8*(12), 1033.
25. *Ship-Iceberg Discrimination in Sentinel-2 Multispectral Imagery by Supervised Classification.* P. & H. Heiselberg. *Remote Sens.* **2017**, *9*(11), 1156
26. ESA Introducing Sentinel-2. Available online: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Introducing_Sentinel-2.
27. ESA Sentinel-2 Delivers First Images. Available online: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Sentinel-2_delivers_first_images.
28. Sun-synchronous orbits: https://en.wikipedia.org/wiki/Sun-synchronous_orbit
29. Se løbende satellitbilleder og film over Arktis på www.seaice.dk.
30. Se neutronstjerne merge på https://www.youtube.com/watch?v=CH9JSqUfnSw
31. Se forelæsningsnoter, H.Heiselberg, DTU Space.

10. Figurliste

Figur 1: Satellit fordeling om Jorden. 4
Figur 2: Satellitten O i højden h over jordoverfladen, kan se ud til horisonten H. 6
Figur 3: Raketterne V2 (1944), Saturn V (1965), Space Shuttle (1998) og Space-X (2015) [20]. 7
Figur 4: Atmosfæren og de nederste rumlag. Den røde kurve angiver temperaturen op gennem atmosfæren. 8
Figur 5: Hydrostatisk tryk på en kasse med areal A og højde dr. Th. eksponentiel trykfald i atmosfæren. 9
Figur 6: Absorption gennem atmosfæren af EM stråling ved forskellige bølgelængder/frekvenser. 10
Figur 7: Det elektromagnetiske spektrum har mange teknologiske anvendelser. Øverst længdeskalaer og bølgelængder. 11

Figur 8: Klassisk optik: objekt med højde h_0 og afstand d_0, afbildes i billedplanen med højde h_i med afstand d_o. Linsens krumning bestemmer brændpunktets afstand f (fokallængden) fra linsen. 12
Figur 9: Satellitbaner. Yderst geostationære, i midten navigation satellitterne GPS, Galileo og Glonas, og inderst de jordnære satellitter, som inkluderer ISS, Hubble, Iridium og ca. 500 observationssatellitter. 14
Figur 10: Satellitbaner 17
Figur 11: En jordnær solsynkron satellitbane med 14 omløb om dagen overflyver forskudte områder pga. Jordens rotation. 18
Figur 12: De 66 Iridium satellitter. Oprindeligt var 77 planlagt, hvilket er atomnumeret for Iridium 18
Figur 13: Dækning for en geostationær satellit på 0º bredde- og længdegrad. Dækningen er cirkulær med vinkel 81,3º, men fortegnes i plankortet. 19
Figur 14: Space junk kredser hovedsageligt i den geostationære og jordnære baner. Iridium-Kosmos satellit kollisionen og den kinesiske Fengyun-1C anti-satellit sprængning topper space junk fordelingen. 20
Figur 15: Tv. Molniya og Tundra baner. Th. det japanske QZSS i en tundra bane. 20
Figur 16: De 5 Lagrange punkter for Sol-Jord systemet, hvor det effektive tyngdefelt (gravitation og centrifugal kræfter) er fladt. L1, L2 og L3 er ustabile saddelpunkter, mens L4 og L5 er stabile. 22
Figur 17: Tv. princippet i SAR. Th. ESA's Sentinel 1B opsendt april 2016. 25
Figur 18: Sentinel 1A SAR billede af Danmark, som i midten er zoomet ind på Øresund med Kbh. og Amager tv, Saltholm og Øresundsbroen i midten. Til højre yderligere zoomet ind på striben af vindmøllerne ved Flakfortet, hvor der også ses enkelte godt 100m lange containerskibe, der fylder 2-3pixels. Fra 2015.03.04 kl. 09.28.17. 26
Figur 19: Sentinel-2 MSI dækker 13 spektrale bånd i ultraviolet (B1), blå (B2), grøn (B3), rød (B4), nær (B5-B9)- og kortbølge infrarødt (B10-B12). B82 ligger i B81 båndet. 26
Figur 20: GeoEye satellitbillede fra Google Maps af Trump's indsættelse som præsident foran Capitol i DC, USA, 20. jan. 2017. Opløsning 25cm. 27
Figur 21: Sentinel-2 og -3. 27
Figur 22: Sentinel-2A farvebillede (RGB) af Øresund og indsejlingen til Kbh. Vindmøller, mindre skibe og deres kølvand kan ses, da opløsningen er 10m. Fra 2016.03.23 kl. 06.29.45. 28
Figur 23: Sentinel-3A termisk billede af Hurricane Matthew over den Mexicanske Golf, 7/10 2016. Temperaturen varierer fra -80ºC (blåt) i orkanens øje til +25ºC (rødt). 29
Figur 24: Iridium 29
Figur 25: Skibstrafikken moniteret af ExactEarth AIS. 30
Figur 26: Skibstrafikken fra Navicon AIS over Danmark og Skagen. 5. okt. 2016. 30
Figur 27: Flightradar24.com er et internet- og app-baseret flytracking service baseret på ADS-B. 31
Figur 28: DTU Space og GomSpace opsendte 2. feb. 2018 Forsvarets første satellit "Ulloriaq" (stjerne på Innuit) med AIS og ADS-B. 31
Figur 29: GPS satellitterne og triangulering fra fire satellitter. 33
Figur 30: Udsnit af Sentinel-2A billed tile 32VNK fra 2016-08-23 kl. 10:30 UTC over Skagen. 34

Figur 31: Tv. RGB billede zoomet ind på skibet NS Burgas fra Figur 30. Hver pixel er 10mx10m..... 35
Figur 32: Tv. En skitse af Kelvin bølger og turbulent kølvand fra et sejlende skib. Th. satellitbillede, hvor både kølvand og Kelvin bølgerne ses tydeligt. 35
Figur 33: Med skravering er vist de fem områder i det arktiske og nordatlantiske område, hvor Danmark har gjort krav på havbunden. Endvidere er vist den eksklusive økonomiske zone ved Grønland og Færøernes fiskerizone (sort streg). Kilde: www.kontinentalsokkelprojektet.dk 37
Figur 34: AIS skibstracking over Arktis fra de norske AISAT..... 38
Figur 35: Forrest inspektionskutteren TULUGAQ, i midten inspektionsfartøjet KNUD RASMUSSEN og bagest inspektionsskibet VÆDDEREN. 39
Figur 36: Sentinel-2 billeder (grøn, rød og nærinfrarød) af Nuuk, Grønland, i tile 22WDS. 39
Figur 37: Sentinel-2A billeder i tre nærinfrarøde bånd. Tv. solsikke- og majsmarker nær Toulouse farvet hhv. orange og gule. 40
Figur 38: Marchfield nedre Østrig, august 2015. Klassifikation af diverse afgrøder ud fra de 13 multispektrale Sentinel-2 MSI bånd. Fra [22]..... 40
Figur 39: Skovområde nær Altoetting, Bayern, 13. august 2015. Klassifikation af trætyper. Kilde [22]. 41
Figur 40: Sentinel granules/tiles følger Military Grid Reference System, eg. ligger København midt i 33UUB og Skagen i hjørnet af 32VNK. 44

11. Opgaver

1. Cirkelbevægelse: x=r cos(wt), y=r sin(wt), hvor w=2π/T er vinkelfrekvensen. Vis at hastigheden er v=rw, og centripetal accelerationen er $a=rw^2$ ($=v^2/r$).
2. ISS tager en tur om Jorden på T=1t32,69m. Hvor mange rundture i døgnet, og hvor højt flyver den? Svar: q=16, og h=385km over Jorden.
3. Er ISS med inklination i=51,65˚ solsynkron? Svar: Nej.
4. Hvad er q for en jordnær bane i hovedhøjde? Svar: h=0 giver q=17,2
5. Din rige onkel ringer fra USA via en geostationær satellit. Hvad er tidsforsinkelsen?
6. Din spionsatellit 600km oppe har pixel størrelse på 5µm og fokallængde f=2m. Beregn opløsningen?
7. Dit øje har diameter 2cm. Mål øjets opløsning (fx 1cm på 10m). Beregn din retinas opløsning?
8. Antag at en pixel i din spionsatellit dækker $(10cm)^2$ på Jorden. Hvis den har 100Mpixels, hvor stort et område dækker billedet? Svar: $(1km)^2$
9. Du flyver i en rumraket med v=0,99c mod nærmeste stjerne 4.365 lysår væk. a) Hvor lang tid tager det set fra Jorden? b) Ifølge Einstein's specielle relativitetsteori

forkortes tiden i rumskibet med faktoren $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$. Beregn denne. c) Hvilken rejsetid måler du? Svar: 4,4år $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ = 0,6år.

10. Tvillingeparadokset: a) Din tvillingesøster tager med Elon Musk til trippelstjernesystemet Alpha Centauri 4,365 lysår væk. Raketten flyver med 99% af lysets hastighed. Hvor længe tager det hende? b) Ingen af de tre planeter var beboelige, så hun sling-shotter tilbage. Hvor meget yngre end dig er hun ved hjemkomsten? c) Hun hævder hårdnakket, at fra hendes synsvinkel er det dig, der har fløjet frem og tilbage, og derfor er du nu lillebroder/søster. Hvem har ret? Svar: Einstein's tidsforkortning gælder kun i inertialsystemer, der bevæger sig med konstant hastighed. Hun har accelereret flere gange, så derfor har du ret.
11. Din GPS modtager kan kun finde 3 satellitter og har en urfejl på 5μs. Vurder fejlen på din position? Svar c*5 μs = 1,5km.
12. Akustisk GPS: a) To højtaler er placeret på hjørneflagene på langsiden af en fodboldbane 108m lang. De udsender en lyd samtidigt, som du modtager hhv. 0.1s og 0.2s efter. Lydhastigheden er 360m/s. Hvor står du? Svar: på sidelinien hhv. 36m og 72m fra hjørneflagene. b) Du har glemt at synkronisere dit ur, så du har en ukendt urfejl og ved nu kun, at der er 0.1s mellem lydsignalerne. Hvor kan du stå? Svar: På en parabel gennem punktet ovenfor.
13. Beregn GPS satellitters hastighed $v = \sqrt{gR_J^2/R_{gps}} =$ 3 km/s. Beregn tidsforkortningen: $1-\sqrt{1-v^2/c^2}$= 5*10^{-10}. Hvor meget forkortes et år og kan det mærkes? Svar: et år er 3x10^{7}s, som ganget med tidsforkortningen giver 15ms. Den relativistiske urfejl ganget med lyshastigheden er 4500km.
14. Ifølge Einstein's generelle relativitetsteori krummer rummet med faktoren ≈$GM_J/R_J\ c^2 = gR_J/c^2$ = 7*10^{-10}, nær Jordens overflade. Hvor meget krummes tiden på et år? Svar: 3x10^{7}s x 7x10^{-10}= 21ms.
15. Antag luft består af 80% $^{14}N_2$ og 20% $^{16}O_2$. Beregn molmassen? Svar: 0,8*14*2+0,2*16*2=28,8.