INTRODUKTION TIL SATELLITKOMMUNIKATION

Forfatter

Steen Eiler Jørgensen

Indledning

Christoffer Karoff

Institut for Fysik og Astronomi
Institut for Geoscience
Aarhus Universitet

INDUSTRIENS FOND
Denmark esero
NATURVIDENSKABERNES HUS

Indholdsfortegnelse

1. Indledning

Verdens første satellit, Sputnik 1, blev sendt op den 4. oktober 1957, og siden da er der blevet opsendt mere end 6.500 satellitter, hvoraf over halvdelen stadig er aktive. I fremtiden forventes dette tal at stige kraftigt, og firmaer som Starlink, Amazon og Facebook har planer om at opsende i titusindvis af satellitter. Fælles for alle disse satellitter er, at vi skal kunne kommunikere med dem. Langt størstedelen af denne kommunikation foregår ved hjælp af radiobølger.

De danske studerende, der bygger satellitter i Danish Student CubeSat Program, DISCO, skal således også bruge radiobølger til at kommunikere med de satellitter, som de sender op. I DISCO bygger studerende fra Aalborg, Aarhus, Odense og København såkaldte CubeSats, der er små satellitter sammensat af enheder på 10x10x10 cm. Den første af disse satellitter, DISCO-1, er planlagt til opsendelse lige efter nytår 2023.

Som en del af DISCO-projektet har vi bygget en række mobile udgaver af de systemer, som man bruger til at kommunikere med satellitter. Disse bliver kaldt jordstationer, og består af en antenne, en rotator der kan pege antennen mod satellitten, en radio og en computer til at styre det hele. Danske gymnasieelever vil få mulighed for at bruge disse mobile jordstationer til at kommunikere med DISCO-satellitterne og andre satellitter. Kommunikationen vil dog kun være envejs, dvs. at gymnasieeleverne vil lytte til satellitterne. Dette skyldes, at det kræver en såkaldt radio-amatør licens at få lov til at sende radiobølger ud.

Denne introduktion forklarer hvordan de mobile jordstationer virker, og beskriver den underliggende fysik. Den er tiltænkt til brug på Fysik A, men vil også kunne bruges på andre niveauer. Det er tanken, at eleverne ved at følge denne vejledning vil kunne hente data ned fra en satellit. Derudover indeholder introduktionen også en række mindre delopgaver.

God fornøjelse.

2. Koordinatsystemer

2.1. Det lokale koordinatsystem

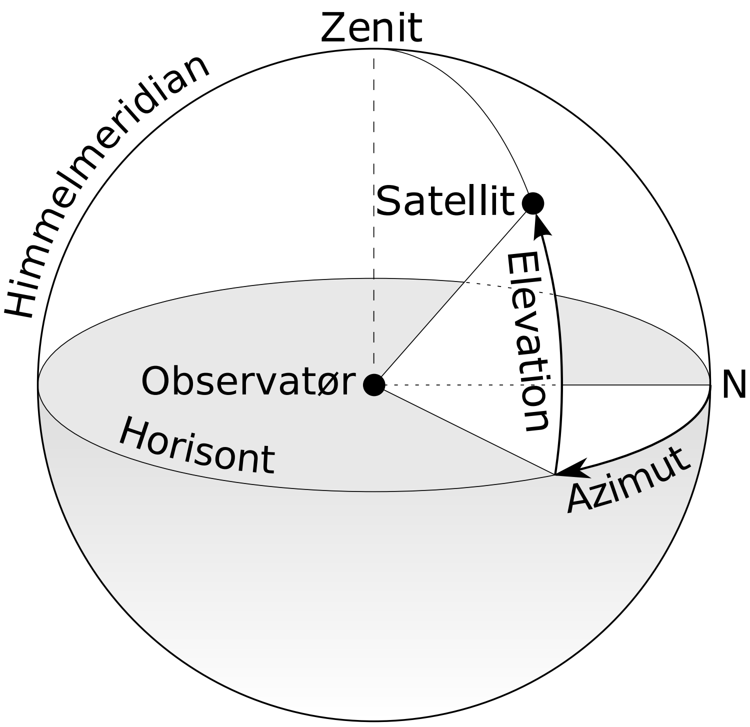
Hvis du står udendørs om aftenen og kigger stjerner, kan du nemt fortælle en ven ved siden af, hvor på himlen f.eks. Sirius er, ved hjælp af to vinker. Så ville du sige ”i syd-sydøstlig retning, cirka 10 grader oppe på himlen.” Her bruger du et lokalt koordinatsystem, som kan bruges her og nu.

Den vinkel, du kalder ”i syd-sydøstlig retning”, hedder *azimut,* og er et tal mellem 0° og 360°, hvor 0° er nord, 90° er øst, og så videre. Så syd-sydøstlig retning ville være azimut = 157,5°.

Den vinkel, du kalder ”10 grader oppe på himlen”, hedder *elevation,* og er et tal mellem 0° og 90°, hvor 0° er din lokale horisont, og 90° er lodret over dit hoved; det punkt, der hedder *zenit.* Så 10 grader oppe på himlen ville være elevation = 10°.

Vinklerne i det lokale koordinatsystem er vist på Figur 1.

Men hvis f.eks. du taler i telefon med en ven i Australien, kan du ikke angive Sirius’ position med dine azimut-elevation-koordinater, for der står Sirius ikke, set fra Australien. Derfor bliver vi nødt til at bruge et andet koordinatsystem. Vi vil dog senere se det lokale koordinatsystem anvendt, når vi ser på satellitkommunikation fra en jordstation.



Figur 1: Det lokale koordinatsystem. Azimut angiver vinklen fra nord, med uret, til satellitten. Elevation angiver hvor mange grader, satellitten er oppe på himlen.[1]

[1] Kilde: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Azimuth-Altitude_schematic.svg

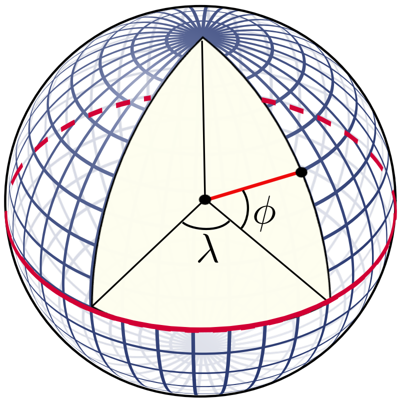
2.2. Det geografiske koordinatsystem

En bedre mulighed ville være at bruge det geografiske koordinatsystem. Ifølge dette system kan ethvert punkt på Jorden beskrives med to vinkler: En længdegrad, som man betegner med det græske bogstav lambda, λ, og en breddegrad, som man betegner med det græske bogstav phi, ϕ, se Figur 2.

Breddegraden er givet ud fra Jordens rotationsakse, der går gennem nordpolen og sydpolen. Nordpolen kalder vi +90° bredde, og sydpolen kalder vi −90° bredde. Midtpunktet imellem dem er ækvator, der har bredden 0°.

Længdegraden har ikke på samme måde et naturligt nulpunkt, så den kræver, at vi definerer et. Af historiske årsager har man valgt den halve storcirkel, der går gennem begge poler *og* Greenwich-observatoriet i London, som dermed ligger på 0° længde. Derfra måler man så positivt i østlig retning, så længdegraden enten er et tal fra 0° til 360° eller fra −180° til +180°.

Så i princippet kan vi fortælle vores ven i Australien, at Sirius står lodret over det punkt på Jorden, der f.eks. har de geografiske koordinater $(\lambda, \phi) = (5°, -20°)$.



Figur 2: Det geografiske koordinatsystem.[2]

Men Jorden drejer rundt, så Sirius' position ændrer sig hurtigt. Hvis vi skal angive Sirius' position på himlen på en måde, så vi kan altid kan referere til den, har vi brug for et andet koordinatsystem.

2.3. Ækvatoriale koordinater

Det ækvatoriale koordinatsystem har to koordinater: Rektascensionen, som man betegner med det græske bogstav alfa, α, og deklinationen, som man betegner med det græske bogstav delta, δ. Deklinationen er nok nemmest at forstå: Den svarer til breddegrad på Jorden. Forestil dig Jordens gradnet bygget i ståltråd, og så tænder vi en pære inde i Jordens centrum, så Jordens koordinatsystem bliver projiceret ud på himlen. Hvis en stjerne har deklinationen $\delta = +90°$ vil den stå lodret over Jordens nordpol. Hvis en stjerne har

[2] Kilde: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Latitude_and_longitude_graticule_on_a_sphere.svg

deklinationen $\delta = -90°$ vil den stå lodret over Jordens sydpol. Hvis en stjerne har deklinationen $\delta = 0°$ står den altid over Jordens ækvator – men det punkt, den står lodret over, flytter sig hele tiden, fordi stjernen står stille, og Jorden drejer rundt.

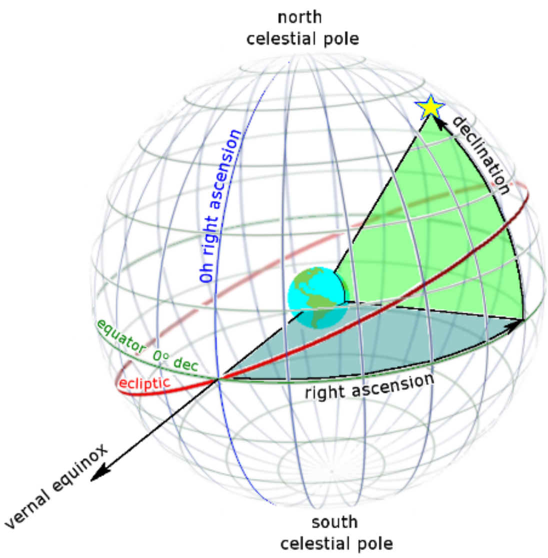
Projektionen af Jordens ækvator ud i rummet kalder vi *himlens ækvator.*

Fordi Jorden snurrer rundt, kan vi ikke længere bruge Greenwich som reference længere. I stedet må vi vælge et sted langt ude i rummet – og gerne et, der har en deklination på nul.

Jordens ækvatorplan hælder ca. 23,5° i forhold til Jordens baneplan om Solen – det plan, vi kalder *ekliptikas plan.* To planer, der ikke er parallelle, skærer altid hinanden i en ret linje. Den linje bruger vi som reference. Når det er forårsjævndøgn på Jorden, altså det øjeblik i slutningen af marts, når Jorden i sin bane om Solen vender sådan, at Solen passerer ækvator fra at stå over den sydlige halvkugle til den nordlige, så står Solen i et punkt på himlen, vi kalder *forårspunktet,* som fra gammel tid har fået samme symbol som symbolet for stjernebilledet Vædderen, ♈. Punktet ligger dog i dag i stjernebilledet Fiskene.

Set fra Jorden ligger forårspunktet derfor altid lodret over et eller andet punkt på Jordens ækvator. Nu kan vi definere den anden himmelkoordinat i det ækvatoriale koordinatsystem, nemlig rektascensionen α som vinklen *fra* forårspunktet, *langs* himlens ækvator.

Nu kan vi angive faste positioner på himlen. I positionen $(\alpha, \delta) = (0°, 0°)$ finder vi forårspunktet, i positionen $(\alpha, \delta) = (101°, -17°)$ finder vi stjernen Sirius, og i positionen $(\alpha, \delta) = (38°, 89°)$ finder vi nordstjernen Polaris – læg mærke til den høje deklination.



Figur 3: Illustration af himmelkoordinaterne rektascension og deklination. Rektascension hedder "right ascension" på engelsk, forårspunktet hedder "vernal equinox", og som det ses, angives forårspunktets rektascension ikke som nul grader, men som nul timer. I astronomien bruger man timer til at angive rektascensiion (24 timer hele vejen rundt), men i rumfarten bruger man grader.[3]

Vi bruger ikke ækvatorialkoordinater til at angive satellitters position, fordi de ikke står stille i rummet, men vi kommer til at møde rektascensionen igen i afsnit 3.1.4.

[3] Kilde: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ra_and_dec_on_celestial_sphere.png

3. Satellitbaner

Satellitters bevægelse om Jorden overholder Keplers love, selvom Kepler formulerede sine love længe før, der var (kunstige) satellitter, og selvom Kepler oprindeligt formulerede sine love for planeternes bevægelse om Solen. Keplers love for satellitter ville i en moderne formulering lyde:

1. En satellits bane om Jorden har form som en ellipse, med Jordens centrum i det ene brændpunkt.

2. Den linje, der forbinder Jordens centrum med satellitten, overstryger lige store arealer i lige store tidsrum.

3. Satellitbanens halve storakse i tredje potens er proportional med satellittens omløbsperiode i anden potens.

Begreberne *brændpunkt, halve storakse* og *omløbsperiode* skal vi kigge nærmere på i næste afsnit.

Ved hjælp af Keplers love kan vi beregne præcist hvordan en satellit bevæger sig rundt om Jorden – det kræver dog, at vi kender satellittens startbetingelser.

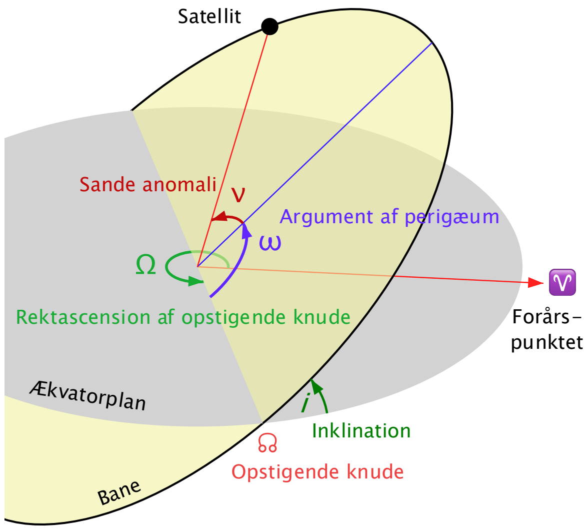
3.1. Baneelementerne

For at kunne beskrive en satellits position i rummet kræver det tre koordinater, fordi vi lever i et tredimensionelt univers. Disse tre positioner kunne f.eks. være et kartesisk koordinatsæt (x, y, z) hvor z-aksen går fra Jordens centrum og ud gennem nordpolen, og x-aksen går ud gennem Jordens ækvator og mod et bestemt punkt i rummet, f.eks. forårspunktet i stjernebilledet Fiskene. De tre koordinater kunne også være det sfæriske koordinatsæt (θ, ϕ, r), hvor θ er længdegraden på det punkt, satellitten står lodret over, ϕ er breddegraden, og r er satellittens afstand til Jordens centrum.

Men det er ikke gjort med at beskrive, hvor satellitten er henne på et bestemt tidspunkt. For at kunne beregne, hvor den vil være henne om en halv time, er vi nemlig også nødt til at kende dens hastighed langs disse koordinater. Vi er altså nødt til at kende seks størrelser, plus et tidspunkt.

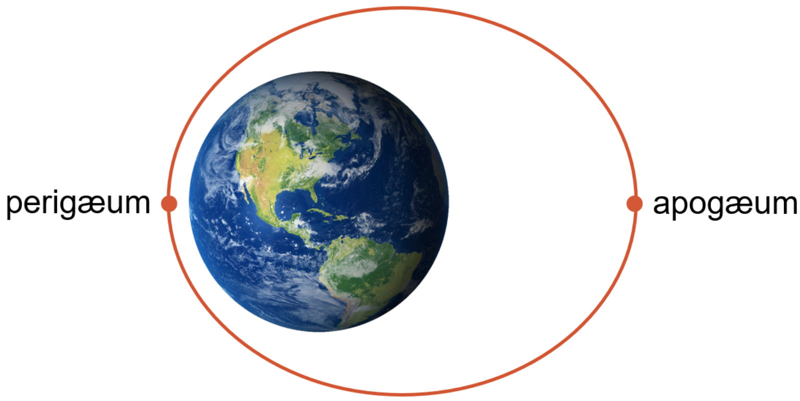
I princippet kunne vi sagtens bruge $(x, y, z, v_x, v_y, v_z, t)$, men efterhånden som tiden går, ændrer *alle* disse seks størrelser sig hele tiden. Der er et andet koordinatsæt vi kan bruge, som er mere hensigtsmæssigt: *De klassiske baneelementer.* Der er seks klassiske baneelementer, nemlig en længde (den halve storakse a), et tal uden enhed (excentriciteten e), og fire vinkler.

De fire vinkler er illustreret på Figur 4, og alle seks baneelementer beskrives nærmere på de næste sider.



Figur 4: De fire vinkler, der indgår i baneelementerne.[4]

Som det ses, skal vi lige kende til et par interessante steder i et kredsløb. Perigæum er det punkt, hvor kredsløbet er tættest på Jorden; det modsatte punkt hedder apogæum, se Figur 5.



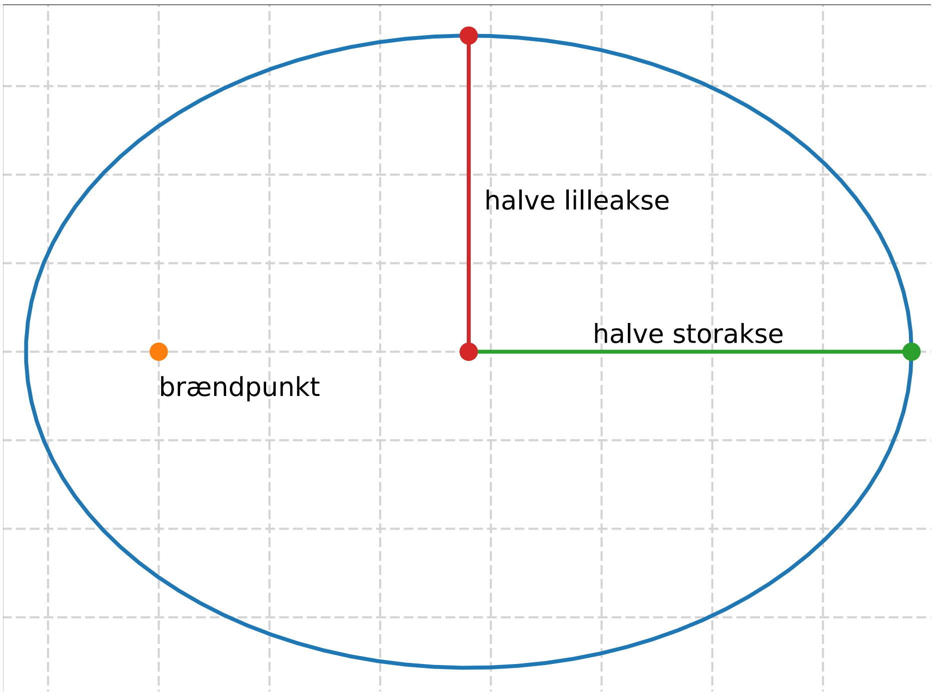
Figur 5: Definition af perigæum og apogæum.

3.1.1. Den halve storakse

En ellipse er en fladtrykt cirkel med to symmetriakser: Storaksen og lilleaksen – se Figur 6. Længden af storaksen kaldes $2a$, og størrelsen a kaldes *den halve storakse.* På engelsk hedder storaksen *major axis,* og a hedder derfor *semimajor axis.*

Den halve storakse giver os ellipsens *størrelse.*

[4] Kilde: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Orbit1.svg



Figur 6: Ellipse med markering af det ene brændpunkt, halve storakse og halve lilleakse.

Omløbstid

Keplers tredje lov giver en entydig sammenhæng mellem den halve storakse og omløbstiden. Kender vi længden af den halve storakse a i meter, er omløbstiden T i sekunder givet ved

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{a^3}{G \cdot M_J}}$$

Hvor $G = 6{,}67 \cdot 10^{11}\ \mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{kg}^{-1} \cdot \mathrm{s}^{-2}$ er den universelle gravitationskonstant, og $M_J = 5{,}97 \cdot 10^{24}\ \mathrm{kg}$ er Jordens masse.

Kender vi omløbstiden, kan vi finde den halve storakse:

$$a = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M_J \cdot T^2}{4 \cdot \pi^2}}$$

En ellipse har selvfølgelig også en lilleakse; den halve lilleakse kaldes b, men bruges sjældent i praksis, når vi snakker om satellitbaner. I stedet anvendes excentriciteten, e.

3.1.2. Excentriciteten

En ellipses *excentricitet* er givet ved

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$$

og er et mål for, hvor fladtrykt ellipsen er; hvis $a = b$, så er $e = 0$, og ellipsen er en cirkel. Jo mere fladtrykt ellipsen bliver, desto tættere kommer e på 1.

Kender vi den halve storakse a og excentriciteten e, kan vi nemt finde afstanden fra Jordens centrum til henholdsvis perigæum, $r_p = a(1 - e)$ og apogæum, $r_a = a(1 + e)$.

Excentriciteten giver os ellipsens *form.*

Alternativ angivelse af banehøjde

Nogle gange kan man høre folk sige f.eks. ”satellitten skal ind i et 250 × 350 km kredsløb” – her refererer de to tal til henholdsvis perigæums og apogæums højde over jordoverfladen, altså r_p og r_a fratrukket Jordens radius. Det er ikke specielt logisk, men man kan støde på det.

3.1.3. Inklinationen

Inklinationen i angiver den vinkel, baneplanet danner med ækvator. Hvis satellittens bane hele tiden går lodret hen over ækvator, er inklinationen nul. Hvis banen tager satellitten hen over skiftevis nordpolen og sydpolen, er inklinationen 90°. Inklinationen kan også være større end 90°, i så fald fortæller den os, at satellitten begynder at bevæge sig i den modsatte retning rundt om Jorden.

Inklinationen er den mørkegrønne vinkel *i* på Figur 4.

Omløbsretning

Lad os kigge ned på Jordens nordpol oppefra. Hvis satellitten bevæger sig rundt om Jorden *mod uret,* siger vi, at satellitten har positiv, *direkte* eller *prograd* omløbsretning. (Jorden roterer selv mod uret, set fra et punkt over nordpolen.) Hvis satellitten bevæger sig rundt om Jorden *med uret,* siger vi, at satellitten har negativ eller *retrograd* omløbsretning.

Hvis inklinationen ligger omkring de 90° siger vi, at kredsløbet er *polært,* fordi det går hen over polerne.

Inklinationen kan antage en værdi mellem −180° og +180°, eller bare fra 0° til 360°.

Hvorfor er de fleste baner prograde?

De fleste satellitter er i prograde baner, fordi man ved opsendelse fra Jorden får en hastighed på 465 m/s foræret pga. Jordens rotation. Hvis vi skulle sende en satellit i en ækvatorial, retrograd bane, skulle vores raket levere næsten en hel kilometer pr. sekund hastighedsændring ekstra.

3.1.4. Rektascension af den opstigende knude

Nu ligger kredsløbets størrelse, form, og hældning i forhold til ækvator fast, men baneplanet kan stadig rotere frit om Jordens polakse. For at fastlægge denne vinkel skal vi have fat i en af himmelkoordinaterne i det ækvatoriale system, nemlig rektascension.

Ethvert ikke-ækvatorialt kredsløb har to særlige punkter i kredsløbet, nemlig der, hvor satellitten passerer ækvator i nordgående retning (opstigende knude, ☊, se Figur 4), og der, hvor satellitten passerer ækvator i sydgående retning (nedstigende knude, ☋).

Fordi den opstigende knude altid ligger i Jordens ækvatorialplan kan vi nøjes med at specificere ved hvilken rektascension, satellitten passerer fra den sydlige til den nordlige halvkugle – rektascensionen af den opstigende knude.

Rektascensionen af den opstigende knude betegnes med det store græske omega, Ω, men kaldes også ofte RAAN – *Right Ascension of the Ascending Node,* og er den lysegrønne vinkel på Figur 4.

Hvis RAAN er nul, ligger den opstigende knude i forårspunktet. RAAN kan have en værdi fra 0° til 360°.

3.1.5. Argumentet af perigæum

Nu ligger banens grundlæggende orientering i rummet fast, men vi har stadig ikke specificeret hvor langs banen perigæum og apogæum ligger. Det gør vi med parameteren ω (det lille græske omega) som kaldes *argumentet af perigæum,* og er simpelthen vinklen mellem den opstigende knude og perigæum. Vi er vant til at ordet *argument* har noget med en diskussion at gøre, men det *kan* altså også betyde en vinkel.[5]

Argumentet af perigæum er den blå vinkel på Figur 4.

Argumentet af perigæum kan ligge mellem 0° og 360°. Hvis $\omega = 0$ ligger perigæum *i* den opstigende knude.

[5] I matematikken henviser ordet *argument* til en uafhængig variabel for en funktion, dvs. et *input.* Perigæums argument er den vinkel, der fastlægger både perigæum og apogæum.

Hvis perigæums argument ligger mellem 0° og 180°, har satellitten perigæum over den nordlige halvkugle. Hvis argumentet er mellem 180° og 360°, har satellitten perigæum over den sydlige halvkugle.

3.1.6. Den sande anomali

Lige før lærte vi, at en vinkel også kan hedde et *argument,* men en vinkel kan altså også hedde en *anomali.* Bare rolig, der er ikke noget unormalt ved den – det er bare en vinkel. Den sande anomali angives med det lille græske bogstav ny, ν.

Den sande anomali angiver hvor i kredsløbet satellitten er, eller var, til det angivne tidspunkt. Man regner anomalien *fra* perigæum og rundt i kredsløbet samme vej som satellitten. Hvis en satellits sande anomali var nul ($\nu = 0$) klokken 17.45 ved vi altså, at satellitten var i sit perigæum kl. 17.45.

Læg mærke til, at den sande anomali er vinklen mellem perigæum og satellittens position *målt fra Jordens centrum,* som jo sidder i baneellipsens ene brændpunkt, og altså ikke fra baneellipsens centrum.

Den sande anomali er den røde vinkel på Figur 4.

3.1.7. Epoken

Nu har vi angivet seks baneelementer $(a, e, i, \Omega, \omega, \nu)$, som til sammen fortæller os præcis hvor satellitten er. Men vi mangler stadig at specificere *hvornår* satellitten var dér. Dette tidspunkt kalder vi *epoken.*

Det var alle seks baneelementer. Nu kan vi se fidusen ved at bruge dem i stedet for f.eks. (x, y, z, v_x, v_y, v_z) – der er kun ét af de seks baneelementer, der ændrer sig, når tiden går – alle de andre er (stort set) konstante!

Stort set – hvis de vitterlig var konstante, ville disse seks baneelementer for enhver satellit nøjagtigt beskrive dens bevægelse i al fremtid. Sådan er virkeligheden (desværre!) ikke indrettet; der er en hel del *perturbationer,* dvs. forstyrrelser af kredsløbet.

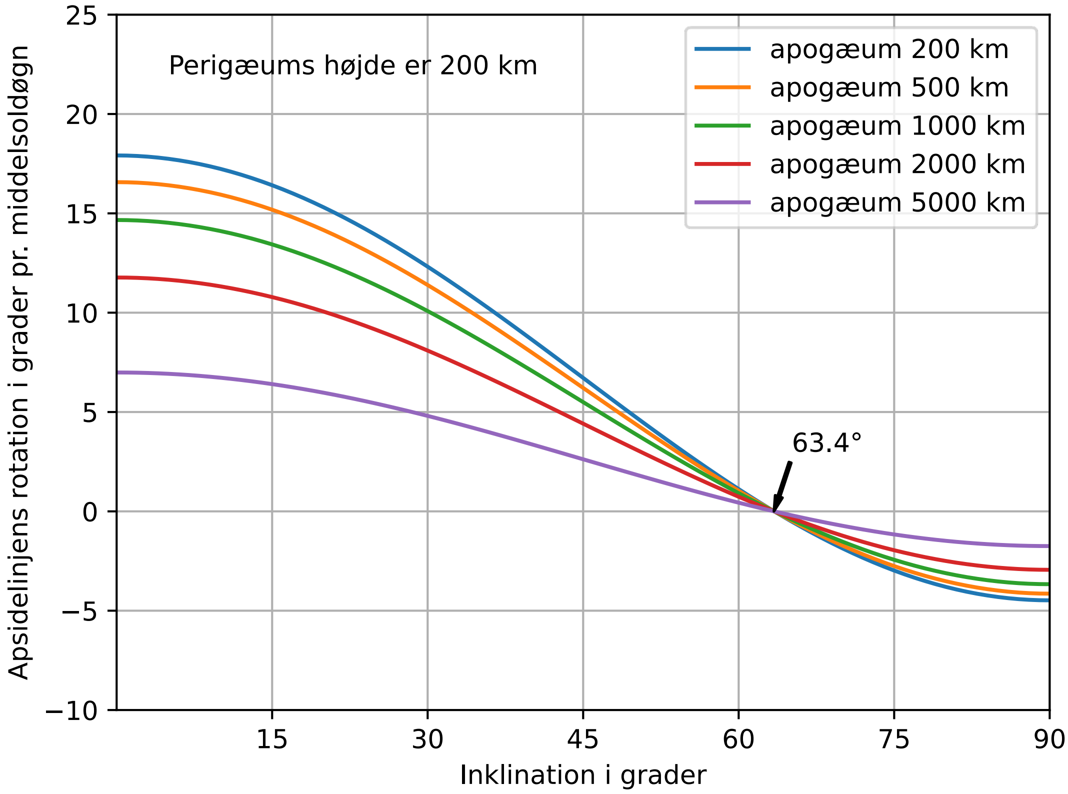
3.2. Perturbationer

Der er en hel del faktorer der påvirker en satellits bane: Luftmodstand, gravitationel påvirkning fra Solen, gravitationel påvirkning fra Månen, og påvirkning fra inhomogeniteter i Jordens tyngdefelt.

Hvis Jordens massefordeling var fuldstændig homogen, ville satellitbaners storakse aldrig ændre sig. Men fordi Jorden drejer rundt, er den også en smule fladtrykt, dvs. Jordens ækvatorialradius er større dens polarradius. Når man står på Sydpolen er man ca. 21 km tættere på Jordens centrum, end hvis man står på ækvator. Denne fladtrykning gør, at både perigæums argument og RAAN flytter sig lidt, afhængig af banens inklination.

3.2.1. Drift af perigæum og Molnija-baner

Linjen fra perigæum til apogæum kaldes også *apsidelinjen,* fordi -gæum kun refererer til Jorden – mere generelt kaldes de *periapse* og *apoapse.* Apsidelinjen er altså den linje, der forbinder begge *apser.* Som det ses af Figur 7, så driver apsidelinjen langsomt rundt i banens plan, *medmindre* inklinationen er præcis 63,4°. Hvis inklinationen er 63,4° vil satellitten altid have perigæum i den samme vinkel fra den opstigende knude. Dette faktum har været udnyttet af en række russiske kommunikationssatellitter, først Molnija-, og senere Meridian-satellitterne.



Figur 7: Hvis inklinationen er forskellig fra 63,4°, vil apsidelinjen - linjen fra perigæum til apogæum - rotere rundt i kredsløbet.

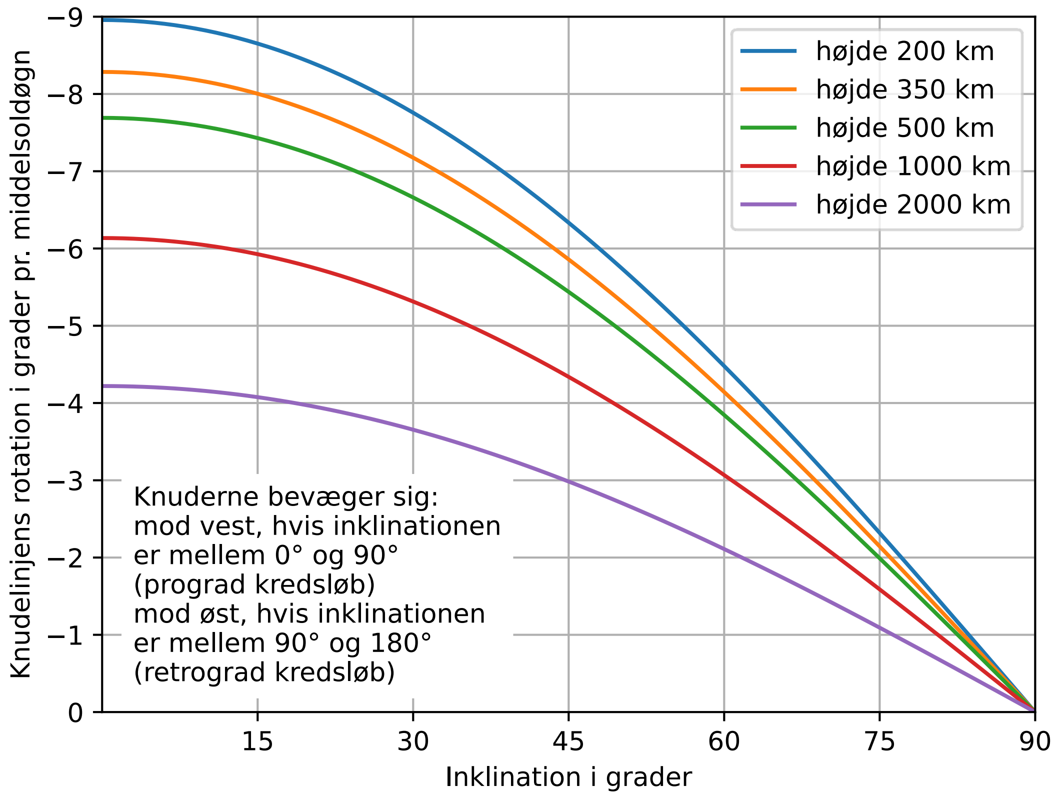
Molnija- og Meridian-satellitter indsættes typisk i et meget excentrisk $(e = 0{,}737)$ kredsløb med en omløbstid på 12 timer $(T = 12\ \mathrm{t}, a = 26\ 600\ \mathrm{km})$, og en inklination på 63,4°, hvor perigæum ligger over den sydlige halvkugle $(\omega = 270°)$ og apogæum dermed ligger højt over den nordlige halvkugle. Resultatet er en række af satellitter, der bevæger sig meget langsomt hen over den nordlige halvkugle, jf. Keplers anden lov. Store dele af Rusland ligger langt mod nord, og satellitter nær apogæum i en Molnija-bane har en langt højere elevationsvinkel end de geostationære kommunikationssatellitter.

Læg mærke til, at hvis inklinationen er større eller mindre end 63,4°, så vil perigæum drive rundt i baneplanet, og argumentet af perigæum, ω, vil gradvist ændre sig. Baneplanet selv ændrer sig altså ikke.

3.2.2. Drift af RAAN og solsynkrone baner

Hvis en satellits inklination er 90°, står baneplanet stille i rummet, men hvis inklinationen er forskellig fra 90°, vil baneplanet langsomt dreje sig rundt om Jordens rotationsakse, se Figur 8. Prograde baner roterer den ene vej, retrograde baner roterer den anden, og jo lavere inklinationen er, desto hurtigere roterer baneplanet.

En anden måde at sige, at baneplanet roterer om Jordens polakse, er, at linjen mellem den opstigende og nedstigende knude, også kaldet *knudelinjen,* roterer.



Figur 8: Hvis inklinationen er forskellig fra 90°, vil knudelinjen rotere rundt om Jordens ækvator.

Når den internationale rumstation passerer lodret hen over Madrid, ser den nogle gange lodret ned på Madrid om dagen, nogle gange om natten, og nogle gange ved solopgang og solnedgang. Hvis vi kan indsætte en satellit i en bane, hvor satellitten altid passerer hen over områder på Jorden til samme lokale tid, så vil vi altid kunne fotografere lodret nedad under ensartede belysningsforhold.

En sådan bane har et baneplan, der altid danner samme vinkel til Solen. Det kaldes en sol-synkron bane (eng. *solar-synchronous orbit,* SSO) og anvendes af mange jordobservations-satellitter.

Som det ses af Figur 8 er knudelinjens rotation negativ for prograde baner. Det tager Jorden 365,25 døgn at bevæge sig rundt om Solen, så for at skabe en solsynkron bane har vi brug for, at knudelinjen flytter sig cirka +1° om dagen. På figuren kan vi se, at knudelinjens rotation går i nul, når excentriciteten bliver 90°. For at opnå en rotationshastighed på +1° om dagen skal vi derfor have en inklination et sted mellem 96°−100°, afhængig af banehøjden.

Satellitter, der passerer områder ved middag på den ene side af Jorden og midnat på den anden, siges at være i *noon-midnight-orbit,* mens satellitter, der altid kigger lodret ned på skillelinjen mellem lys og skygge – dag og nat – siges at være i *dawn-dusk-orbit.*

3.2.3. Luftmodstand

Satellitter i lavt jordkredsløb oplever en vis luftmodstand, *drag* på engelsk. Lufttrykket er ganske vist *meget* lavt, men det er ikke helt nul, og satellitten bevæger sig *meget* hurtigt. Det giver en modstand, som påvirker kredsløbet. Jo større satellitten er, og jo tættere den er på Jorden, desto større drag.

Satellitter i lave bane (under cirka 400 km højde) oplever et vist *decay,* dvs. de taber højde løbende, indtil de til sidst går ind i Jordens atmosfære og brænder op. Den internationale rumstation får med jævne mellemrum et *reboost* fra et af de rumskibe, der er dokket til rumstationen, for at modvirke dette.

3.3. Satellitbaner i praksis

3.3.1. To-linje-elementer

En satellit ude i rummet er i kredsløb om Jorden, og flytter sig derfor hele tiden. For at holde styr på hvor satellitterne er, bestemmer man løbende deres baner, og offentliggør de data man skal bruge for at genskabe deres baner på en computer. Disse banedata kaldes *baneelementer* eller *Kepler-elementer.* Dataene fylder ikke særlig meget, og kan stå på to linjers tekst – i dette format kaldes det *to-linje-elementer* eller TLE. TLE-filer for stort set alle ikke-klassificerede satellitter kan downloades fra celestrak.org. En TLE for den danske Ørsted-satellit ser f.eks. sådan her ud:

```
ORSTED
1 25635U 99008B   22153.15196856  .00000140  00000-0  41046-4 0  9995
2 25635  96.4618  21.6471 0136877 229.7475 129.1689 14.48468400228339
```

Og ja, med navnet på satellitten er det faktisk tre linjer, men selve data fylder ikke mere end to. Ud fra denne fil kan man se alle de data, man skal bruge for at rekonstruere satellittens bane og bevægelse om Jorden.

Katalognummer

```
ORSTED
1 25635U 99008B   22153.15196856  .00000140  00000-0  41046-4 0  9995
2 25635  96.4618  21.6471 0136877 229.7475 129.1689 14.48468400228339
```

Både linje 1 og 2 begynder med ”25635”, som er den Ørsteds katalognummer, også kaldet SATCAT eller NORAD ID. Alle satellitter bliver tildelt et katalognummer efter vellykket opsendelse. Da antallet af objekter i kredsløb[6] nærmer sig 100 000, og katalognumre ikke genbruges, når gamle satellitter falder ned, vil man begynde at bruge bogstaver i stedet for tal, for at få plads til dem alle sammen.

U’et efter katalognummeret står for *Unclassified,* altså ikke hemmelig. Hemmelige satellitter har et C her, men det ser man af gode grunde aldrig.

International betegnelse

```
ORSTED
1 25635U 99008B   22153.15196856  .00000140  00000-0  41046-4 0  9995
2 25635  96.4618  21.6471 0136877 229.7475 129.1689 14.48468400228339
```

Efter katalognummeret kommer i linje 1 den internationale betegnelse, som for Ørsteds vedkommende er ”99008B”. 99 betyder, at Ørsted blev opsendt i 1999. 008 betyder, at Ørsted blev opsendt med den ottende raketopsendelse til kredsløb det år. B’et betyder, at Ørsted var den anden satellit fra den opsendelse, der gik i kredsløb.

Epoke

```
ORSTED
1 25635U 99008B   22153.15196856  .00000140  00000-0  41046-4 0  9995
2 25635  96.4618  21.6471 0136877 229.7475 129.1689 14.48468400228339
```

Næste tal er epoken, hvor det indledende 22 betyder, at epoken for denne TLE er for år 2022. De efterfølgende 153.15196856 er dagen på året. Dag 153 i året var d. 2. juni, og 0,15196856 er 3 timer 38 minutter og 50 sekunder inde i døgnet, altså kl. 03:38:50. Alle tider er UTC.

Inklination

```
ORSTED
1 25635U 99008B   22153.15196856  .00000140  00000-0  41046-4 0  9995
2 25635  96.4618  21.6471 0136877 229.7475 129.1689 14.48468400228339
```

Ørsteds bane havde en inklination på $i =$ 96,4618° ved epoken.

---

[6] Den opmærksomme læser bemærkede i indledningen, at der er opsendt omkring 6500 satellitter – hvorfor er antallet af objekter i kredsløb så meget større? Det skyldes, at en enkelt opsendelse kan resultere i mange ting, der skal trackes: Udbrændte rakettrin, brændstoftanke, og ting, der falder af gamle satellitter. Fra tid til anden taber astronauter på rumvandring også diverse udstyr, og der har været satellitter med officielle navne som `CAMERA` og sågar `TOOL BAG`. Flere lande har også sprængt udtjente satellitter i stykker, hvilket har bidraget til antallet af stumper, der skal trackes.

RAAN

```
ORSTED
1 25635U 99008B   22153.15196856  .00000140  00000-0  41046-4 0  9995
2 25635  96.4618  21.6471 0136877 229.7475 129.1689 14.48468400228339
```

Ørsteds opstigende knude lå $\Omega = 21{,}6471°$ fra forårspunktet ved epoken.

Excentricitet

```
ORSTED
1 25635U 99008B   22153.15196856  .00000140  00000-0  41046-4 0  9995
2 25635  96.4618  21.6471 0136877 229.7475 129.1689 14.48468400228339
```

Excentriciteten angives med en række cifre, hvor et foranstillet ”nul komma” er underforstået – Ørsteds banes excentricitet var altså $e = 0{,}0136877$ ved epoken.

Argument af perigæum

```
ORSTED
1 25635U 99008B   22153.15196856  .00000140  00000-0  41046-4 0  9995
2 25635  96.4618  21.6471 0136877 229.7475 129.1689 14.48468400228339
```

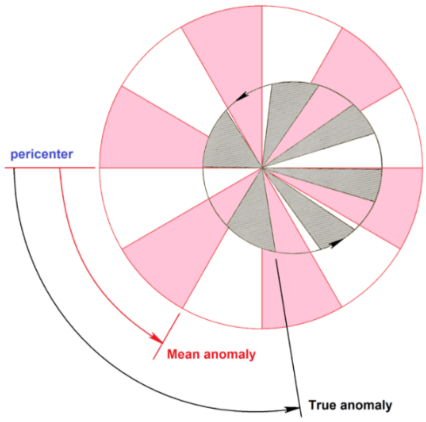
Næste tal er argumentet af perigæum. Ørsteds perigæumsargument ved epoken var $\omega = 229{,}7475°$, og Ørsted har dermed perigæum over den sydlige halvkugle.

Middelanomali

```
ORSTED
1 25635U 99008B   22153.15196856  .00000140  00000-0  41046-4 0  9995
2 25635  96.4618  21.6471 0136877 229.7475 129.1689 14.48468400228339
```

I TLE-filen angives ikke den sande anomali (vinklen mellem perigæum og satellit ved epoken, set fra Jordens centrum), men derimod *middelanomalien* M (eng. *mean anomaly*), som er den sande anomali, satellitten *ville have,* hvis den var i en cirkulær bane med samme omløbstid, se Figur 9. Fordelen ved at bruge middelanomalien M i stedet for den sande anomali ν er, at middelanomalien ændrer sig med konstant hastighed, i modsætning til den sande anomali, der ændrer sig hurtigere omkring perigæum end omkring apogæum, jf. Keplers anden lov.

I baneelementerne for Ørsted kan vi se, at middelanomalien ved epoken var $M = 129{,}1689°$.



Figur 9: Middelanomali (rød) og den sande anomali (sort). På figuren ses en satellit i den sorte bane; satellittens position ved epoken er ved den sande anomali – det punkt, den sorte streg peger på. Satellittens sande anomali ændrer sig dog ikke jævnt med tiden – den ændrer sig hurtigere omkring perigæum end omkring apogæum. De grå skraverede felter repræsenterer segmenter af banen, som det tager satellitten lige lang tid at tilbagelægge. De røde felter viser, hvad satellittens sande anomali ville være, hvis banen var cirkulær og havde samme omløbstid som den sorte. Fordelen ved at bruge middelanomali i stedet for sand anomali er, at middelanomalien ændrer sig med konstant hastighed.[7]

Middelbevægelse

```
ORSTED
1 25635U 99008B   22153.15196856  .00000140  00000-0  41046-4 0  9995
2 25635  96.4618  21.6471 0136877 229.7475 129.1689 14.48468400228339
```

I TLE-filen angives ikke den halve storakse, men derimod en størrelse, der hedder *middelbevægelse* n (eng. *mean motion*), som simpelthen er antallet af kredsløb, satellitten gennemfører på et døgn,

$$n = \frac{1}{T_d} \qquad \text{og} \qquad T_d = \frac{1}{n}$$

hvor T_d er omløbstiden, målt i døgn. I TLE'en kan vi se, at Ørsted går rundt om Jorden $n = 14{,}48468400$ gange i døgnet. (I afsnit 3.1.1. så vi, hvordan vi kan bruge Keplers tredje lov til at finde den halve storakse ud fra omløbstiden.)

Hvis vi ved, at satellitten var i perigæum til tiden t_0, kan vi finde middelanomalien M til tiden t ud fra middelbevægelsen n på en dejligt enkel måde:

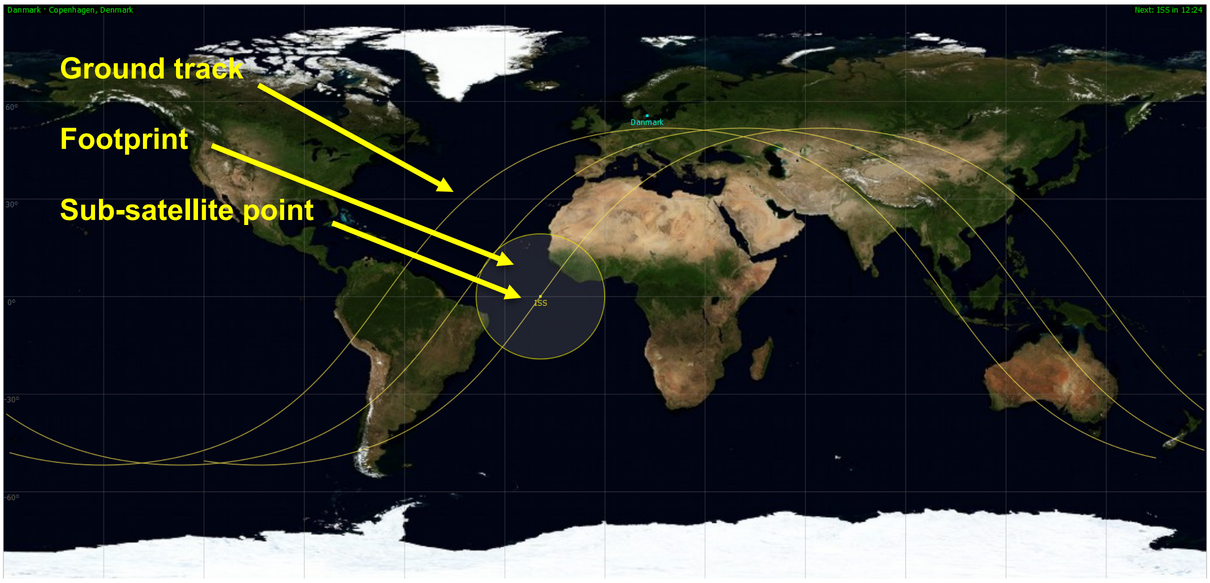
$$M = n(t - t_0)$$

[7] Kilde: https://en.wikipedia.org/wiki/Mean_anomaly#/media/File:Mean_anomaly_diagram.png

3.3.2. Gpredict

Til visualisering af satellitter, deres positioner, baner og bevægelse, kan man bruge mange forskellige programmer, men det mest udbredte er Gpredict (http://gpredict.oz9aec.net/), som er et gratis open-sourceprogram. Gpredict er udviklet af den danske radioamatør Alexandru Csete, og kan downloades til både Windows, Mac og Linux.

Hvis vi downloader og starter Gpredict, skal vi først fortælle programmet, hvor vi er, så den kan beregne passager korrekt. Dernæst skal vi vælge en eller flere satellitter, den skal holde øje med. Lad os som eksempel vælge den internationale rumstation; se Figur 10.



Figur 10: Gpredict

Det første vi lægger mærke til er, at kredsløbet ikke er hverken en cirkel eller en ellipse, men snarere ligner en sinusfunktion. Den internationale rumstation er i en bane, der er meget tæt på at være cirkulær, men når man projicerer den runde jord ned på et fladt plan, ser det sådan ud.

Vi kan altså se rumstationens bane, eller rettere, dens *ground track,* dvs. de punkter på jordoverfladen, rumstationen kommer lodret hen over i løbet af de næste tre kredsløb. Vi kan også se rumstationens *sub-satellite point,* altså det punkt på Jorden, rumstationen står lodret over lige nu.

Til sidst kan vi se en rund ring rundt om ISS; det er dens *footprint.* Det er det område af Jorden, man kan se fra rumstationen lige nu.[8] Jo tættere man kommer på Jorden, desto mindre af den kan man se. Derfor har satellitter i høje kredsløb et meget større footprint end satellitter i lave kredsløb.

[8] I visse andre sammenhænge anvendes udtrykket *footprint* om en satellitantennes dækningsområde.

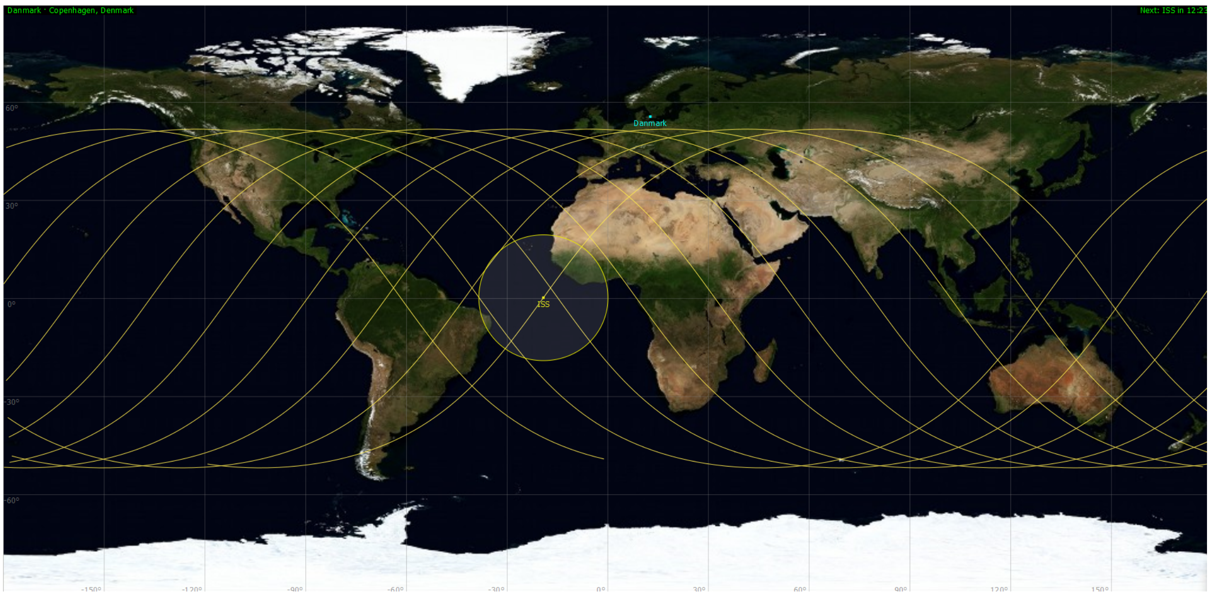
Jo tættere man er på Jorden, desto mindre af den kan man se

ISS er typisk cirka 400 km over Jordens overflade.
En typisk globus er cirka 30 cm i diameter, og i den skala flyver ISS rundt om Jorden 9 mm over overfladen. Man ser ikke særlig meget af globussen på den afstand.

ISS bevæger sig rundt om Jorden med en omløbstid på 1½ time. Kig en gang på groundtracket. I løbet af den næste 1½ time vil rumstationen bevæge sig op over det vestlige Afrika, lige nord om Sortehavet, hen over Kina, nord om Papua Ny Guinea, ned over det sydlige Stillehav, op over Chile og Brasilien – og krydser nu ækvator i nordgående retning 22,5° længere mod vest end for 1½ time siden. Det skyldes simpelthen, at Jorden har drejet sig 22,5° i løbet af de 1½ time. Det er derfor, at vi bruger rektascensionen, og ikke længdegraden, af den opstigende knude.

Hvis vi beder Gpredict om at vise de næste ti kredsløb, kan vi se på Figur 11, at rumstationen overflyver alle områder på Jorden mellem 51,6°N og 51,6°S (rumstationens inklination er 51,6°.) Det vil sige, at jo højere, inklinationen er, desto større område af Jorden vil man kunne kigge ned på. Derfor – og for at opnå en solsynkron bane, som vi så i afsnit 3.2.2. – er stort set alle jordobservationssatellitter i polære baner, med inklinationer omkring 90°.

Gpredict er et godt og gratis program til visualisering af satellitbaner, men i forbindelse med de mobile jordstationer anvendes SatNOGS.



Figur 11: Rumstationen overflyver alle områder på Jorden mellem 51,6°N og 51,6°S.

4. SatNOGS

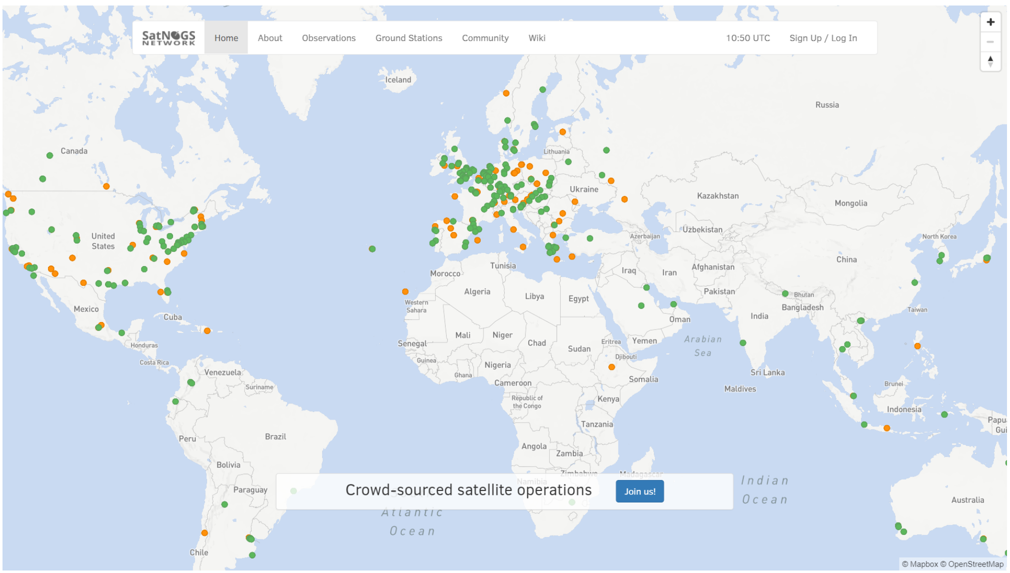
SatNOGS står for Satellite Networked Open Ground Station, og er et internationalt netværk af satellitmodtagestationer, hvor enhver kan planlægge og udføre observationer af signaler fra satellitter, der passerer over jordstationen. Projektet er primært rettet mod mindre, ikke-professionelle aktører, f.eks. et universitet, der bygger og opsender satellitter. Ideen er god, af to årsager.

Før SatNOGS konstruerede man typisk en satellit og en jordstation med det resultat, at man dels kun kunne lytte til sin satellit de cirka seks gange ti minutter, satellitten passerede hen over ens jordstation pr. døgn; dels havde man en fin jordstation stående ubenyttet hen 23 ud af døgnets 24 timer.

Med SatNOGS kan man dele sin jordstation med andre, når man ikke selv bruger den, og låne andres jordstationer, når *de* ikke selv bruger dem.

Dertil kommer, at små software-definerede radioer som RTL-SDR er blevet uhyre billige, samt at SatNOGS-softwaren kan køre på en Raspberry Pi, hvilket har medført, at mange private har oprettet og driver SatNOGS-stationer, simpelthen fordi de synes, at det er sjovt. Når man går ind på `network.satnogs.org` får man vist et kort over alle aktive SatNOGS-stationer, se Figur 12.

I forbindelse med DISCO-projektet (se indledningen) er der fremstillet et antal mobile jordstationer. På Figur 13 kan du se en af de mobile jordstationer, bestående af en kontrolboks og selve antennen på en azimut-elevation-rotor. På Figur 14 kan du se et nærbillede af rotoren, som er en Yaesu G5500.



Figur 12: Forsiden på network.satnogs.org viser alle de SatNOGS-jordstationer, der er i drift pt. De grønne stationer er aktive, de gule stationer er i testmode.

Figur 13: En af de mobile SatNOGS-jordstationer med rotérbar antenne.

Figur 14: Yaesu G5500-rotor til styring af antenne. Nederst kan hele opstillingen dreje omkring den lodrette akse (azimut), og metalrøret, der går igennem rotoren kan rotere omkring den vandrette akse (elevation).

En jordstation skal løse følgende opgaver:

1. Finde ud af, hvornår og i hvilken retning, en satellit dukker op over horisonten,
2. Sende et signal til antennerotoren, så antennen peger i den rigtige retning,
3. Beregne satellittens nøjagtige bane hen over himlen, og sørge for, at antennen altid peger på satellitten under passagen (eng. *tracking*),
4. Indstille radiomodtageren til den rigtige frekvens, og tage højde for Dopplerforskydning,
5. Optage (sample) radiosignalet under hele passagen, og gemme den som en fil, når passagen er slut.

Hvis man har den nødvendige hardware, kan SatNOGS løse alle disse opgaver for os.

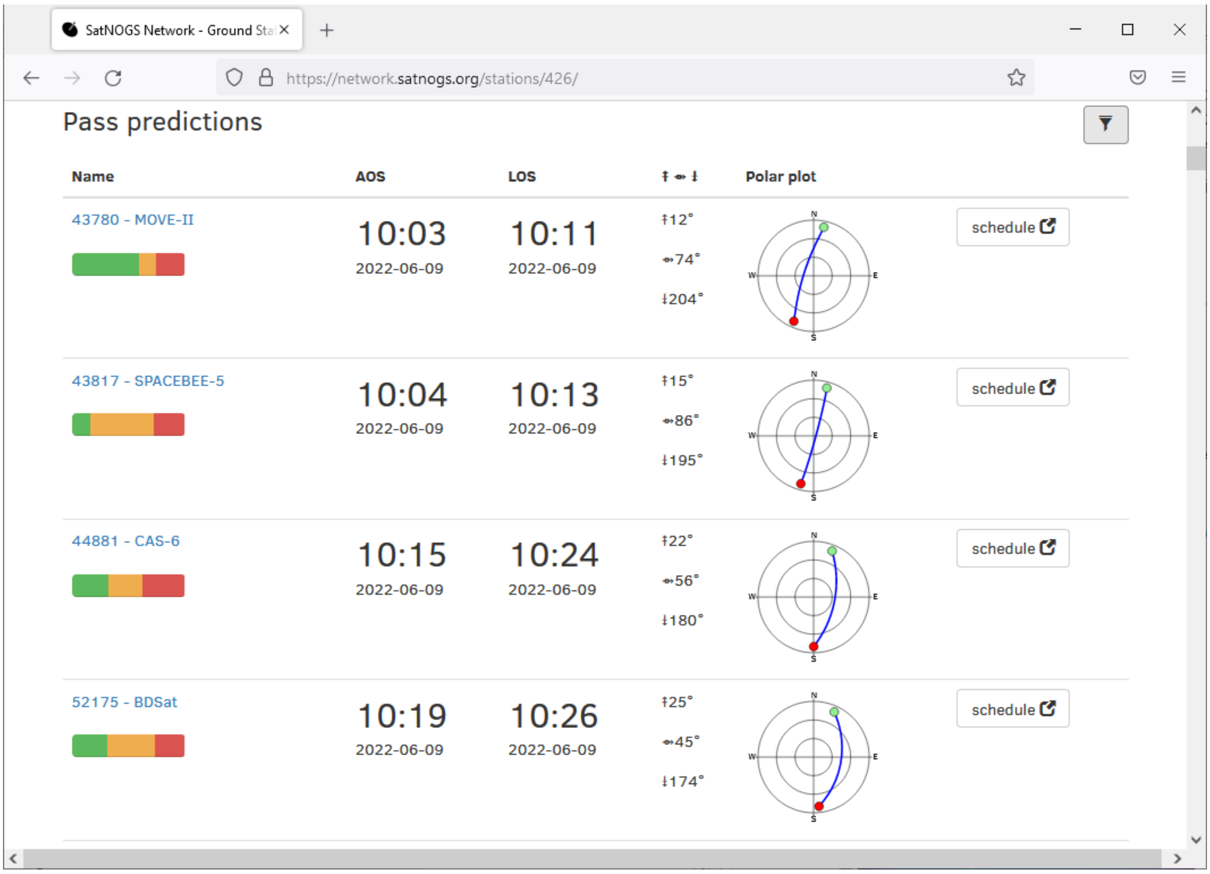
4.1. Planlægning af passager

På Figur 15 kan du se, hvordan det ser ud, når man planlægger at lytte til en satellit vha. en SatNOGS-jordstation. Til venstre står satellittens navn, derefter kommer de to tidspunkter, der hedder AOS og LOS – *Acquisition of Signal* og *Loss of Signal.* AOS markerer det tidspunkt, hvor satellitten kommer indenfor jordstationens rækkevidde, og LOS hvornår den forsvinder igen.

Dernæst kommer tre vinkler: Først azimut for AOS (altså kompasretningen, hvor satellitten kommer op over horisonten), dernæst den højeste elevation, satellitten kommer op i under passagen, og til sidst azimut for LOS.

Polarplottet viser passagen set fra jordstationen – AOS er markeret med en grøn prik, og LOS med en rød. Hvis jordstationen ikke kan modtage under en vis elevation, f.eks. på grund af omkringliggende bygninger, vil den grønne og røde prik være over horisonten. Den blå kurve viser satellittens bane hen over jordstationen. ”Skydeskiven” har cirkler ved elevationsvinkler på 0°, 30° og 60°, og centrum er zenit, altså 90° elevation.

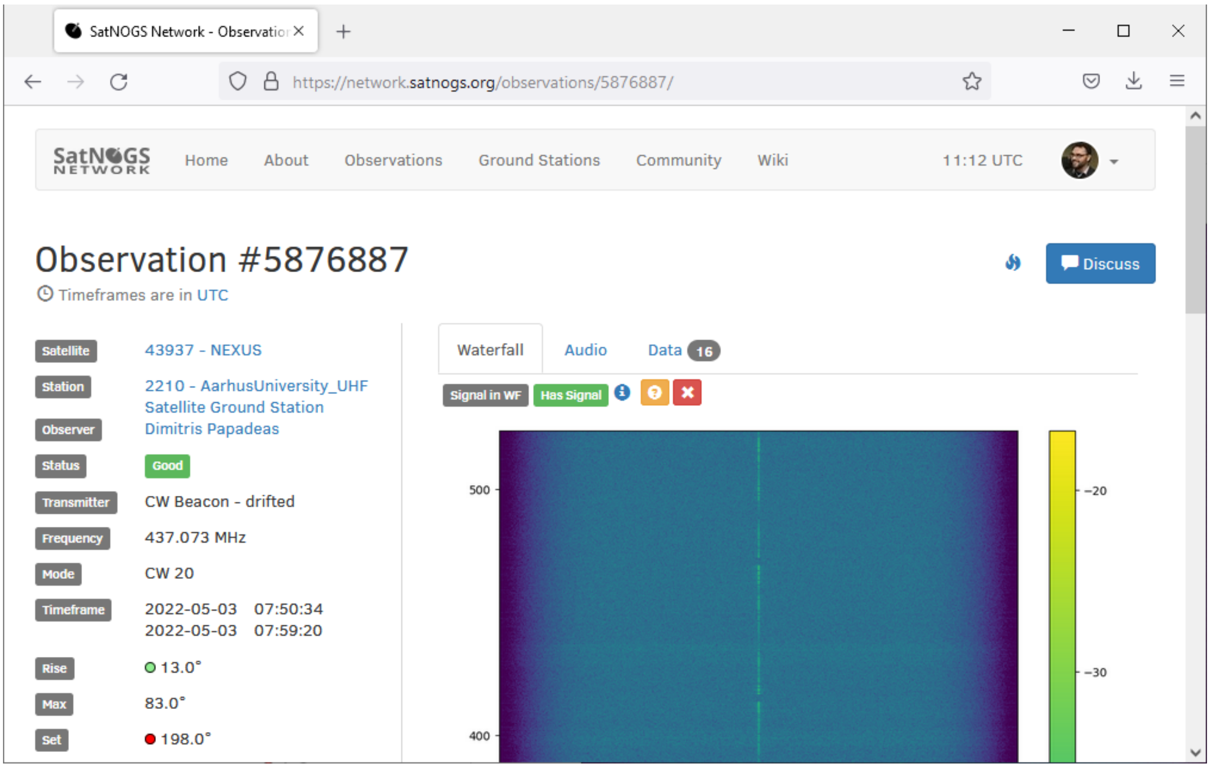
Når man klikker på *schedule*-knappen, vil jordstationen lytte på den frekvens, der i SatNOGS-databasen står som satellittens sendefrekvens.



Figur 15: Oversigten over kommende passager, hvor man kan planlægge en observation med SatNOGS.

4.2. Den enkelte observation

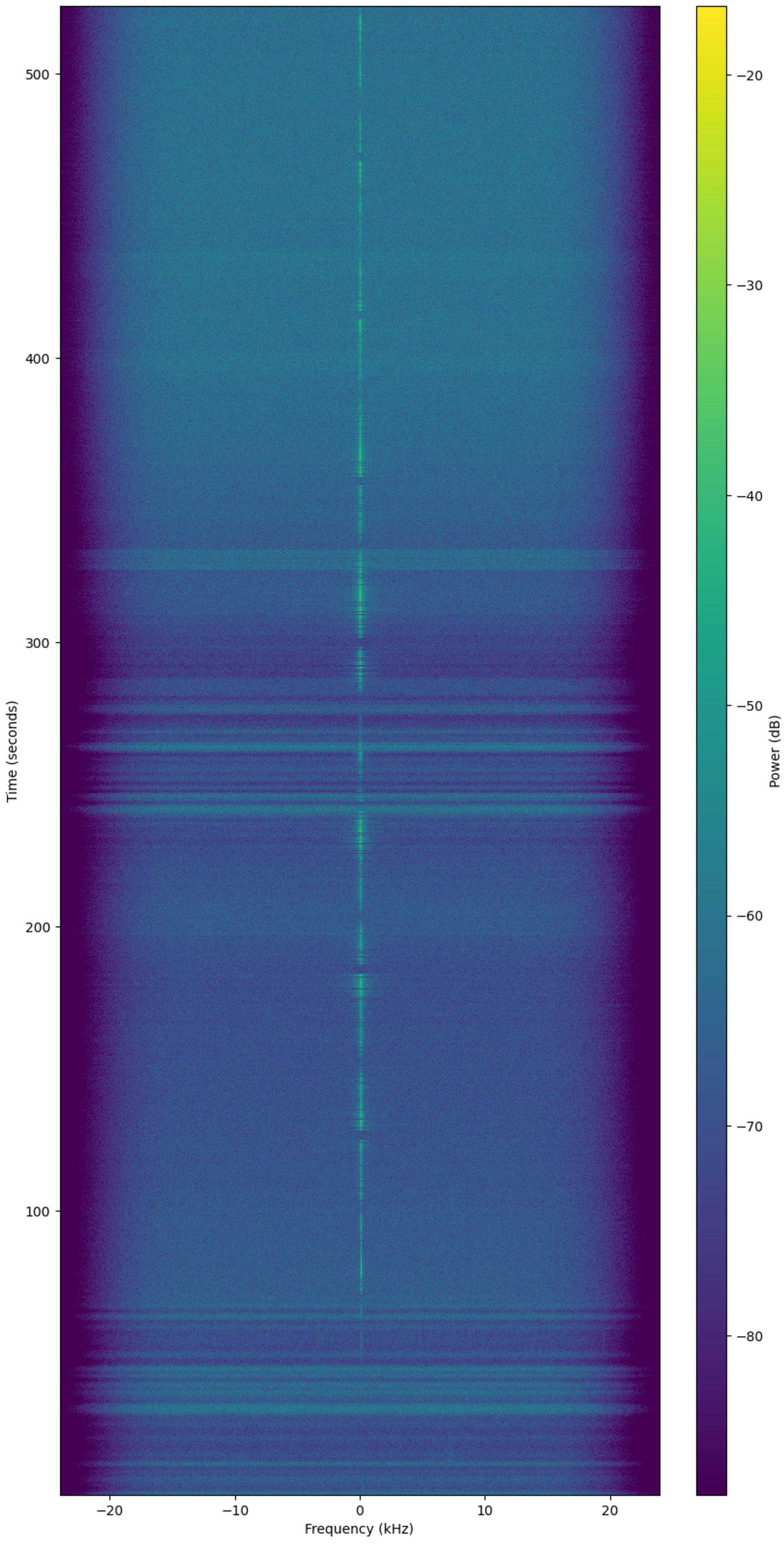
På Figur 16 kan du se, hvordan det ser ud, når observationen er overstået, og kan ses i SatNOGS. Alle observationer bliver tildelt et fortløbende observationsnummer. På figuren kan man se, at satellitten NEXUS, en japansk cubesat, opsendt i 2019, blev observeret af jordstationen ”2210 - AarhusUniversity_UHF Satellite Ground Station”. Det var brugeren Dimitris Papadeas, der havde planlagt observationen, og der blev lyttet på 437,073 MHz. Senderens modulationsformat er CW 20 (morse), og observationen er blevet markeret som ”god”, dvs. den indeholdt et signal, som kunne demoduleres og dekodes, og de dekodede data kan ses under fanebladet ”Data”.



Figur 16: Sådan ser det ud i SatNOGS, når en observation er foretaget.

Hele observationen er vist i form af et *vandfald* på Figur 17. I vandfaldsdiagrammet ses signalet fra satellitten i midten. Observationen starter i bunden af billedet og slutter i toppen, og varede cirka 700 sekunder. Centerfrekvensen går ned gennem midten af billedet, og signalstyrken er markeret med en farveskala, der går fra −90 dB til −30 dB. Decibel skal vi lære mere om i kapitel 7.

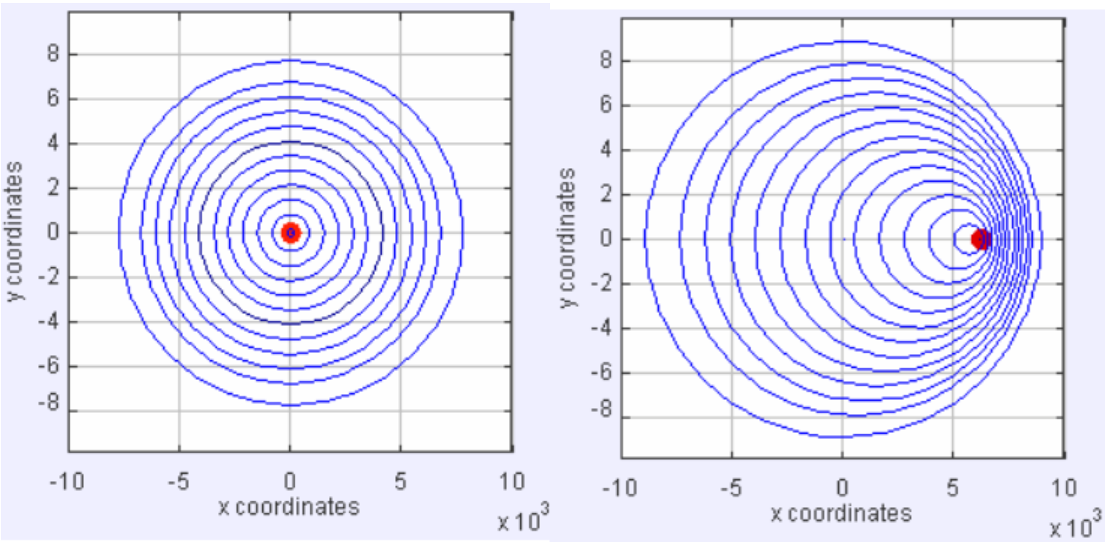
Under fanebladet *Audio* kan man høre en lydoptagelse af observationen, og hvis signalstyrken var god nok til, at man kan dekode signalet og få data ud af det, kan man under fanebladet *Data* se de dekodede data.



Figur 17: Vandfaldsdiagram af hele observationen. Signalet fra satellitten ses i midten. De vandrette striber er udefra kommende støj, der forstyrrer signalet.

4.2.1. Dopplerforskydning

Radiosenderen ombord i satellitten sender på en bestemt frekvens, men når radiosignalet når frem til os, er det blevet *dopplerforskudt,* se Figur 18. Når satellitten kommer op over horisonten, bevæger den sig imod os. Det betyder, at når vi skal modtage signalet fra satellitten, skal vi lytte på en *højere* frekvens end den sender. Når satellitten er tættest på os – når den er højest på himlen – står linjen fra satellitten til os vinkelret på satellittens hastighedsvektor, og dopplerforskydningen er nul. Under den sidste halvdel af passagen vil vi modtage signalet fra satellitten på en gradvist *lavere* frekvens.



Figur 18: Doppler-effekten blev første gang beskrevet af den tyske fysiker Christian Doppler. Radiosenderen på det venstre billede står stille, og radiobølgerne udbreder sig symmetrisk omkring senderen. Radiosenderen på det højre billede bevæger sig langsomt mod højre, hvorfor en modtager bag senderen vil modtage en lavere frekvens end den udsendte, mens en modtager foran senderen vil modtage en højere frekvens end den udsendte.[9]

Størrelsen af dopplerforskydningen Δf kan vi finde, hvis vi kender satellittens sendefrekvens f_0 og senderens og modtagerens relative fart, Δv:

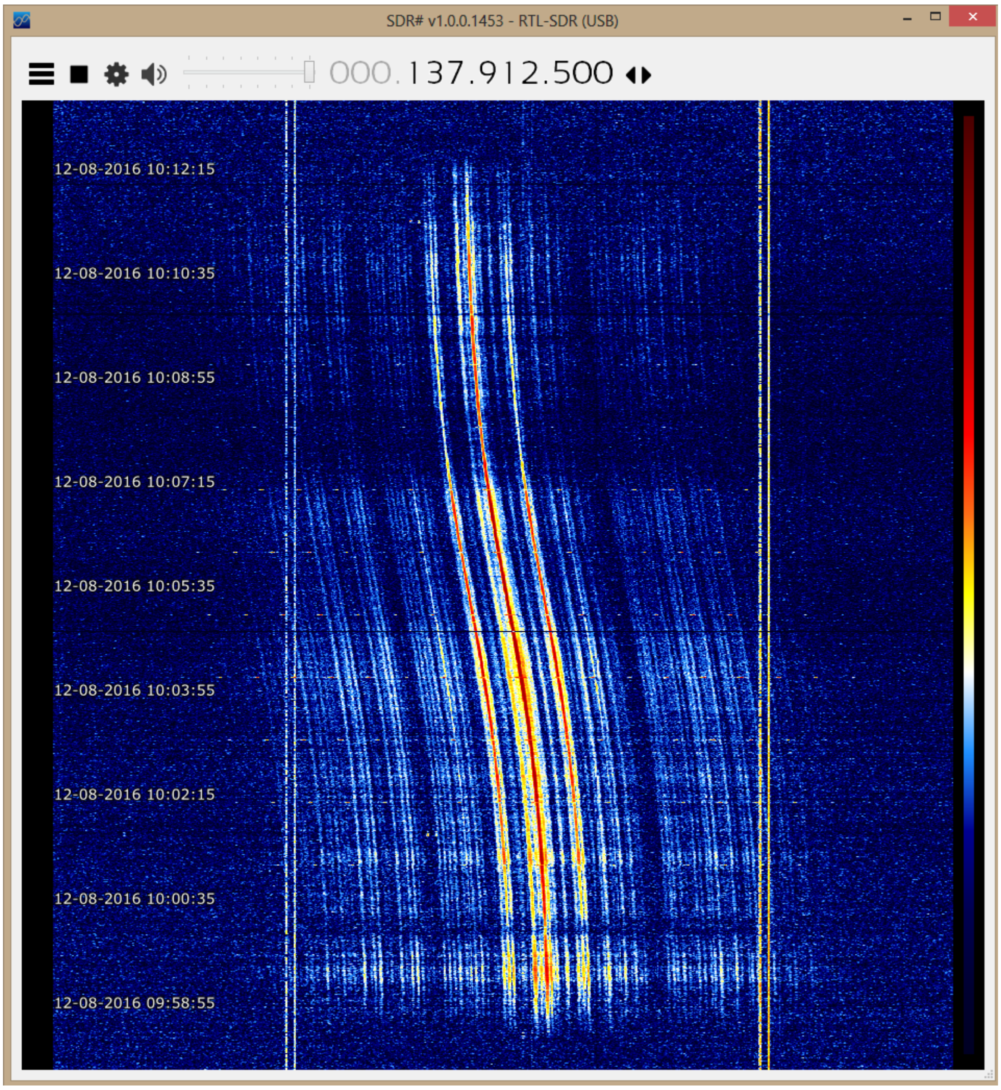
$$\Delta f = \frac{\Delta v}{c} \cdot f_0$$

hvor c er lysets hastighed.

Hvis satellitten bevæger sig imod os, er Δv positiv – hvis satellitten bevæger sig væk fra os, er Δv negativ. Som det ses, er dopplerforskydningen proportional med sendefrekvensen. Vi har altså relativt små dopplerforskydninger ved lave frekvenser, og højere dopplerforskydninger ved høje frekvenser.

[9] Kilde: https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_effect

På Figur 19 ses signalet fra den amerikanske vejrsatellit NOAA-19, modtaget ved passage over Danmark d. 12. august 2016. I løbet af det kvarter, passagen varer, ses det tydeligt i vandfaldsdiagrammet, at frekvensen af det modtagne signal falder på grund af dopplereffekten.



Figur 19: Dopplerforskydning af signal fra den amerikanske vejrsatellit NOAA-19.

SatNOGS kender satellittens bane, og kompenserer automatisk for dopplerforskydning. Signalet fra satellitten vil derfor altid være centreret i vandfaldsdiagrammet.

Eksempel

Den internationale rumstation ISS foretager af og til udsendelser på 145,800 MHz FM. Hvor stor er dopplerforskydningen?

ISS er i lavt jordkredsløb, hvor banehastigheden er omkring 7600 m/s. Når rumstationen kommer op over horisonten, bevæger den sig altså aldrig imod os med en større hastighed. Det sætter vi ind i formlen – som en slags *worst case:*

$$\Delta f = \frac{\Delta v}{c} \cdot f_0 = \frac{7600\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{3 \cdot 10^8\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}} \cdot 145800000\ \mathrm{Hz} = 3694\ \mathrm{Hz}$$

Det vil sige en dopplerforskydning på omkring 3,7 kHz – vi vil altså modtage rumstationen på 145,803 MHz, når den kommer op over horisonten, og så vil frekvensen falde til 145,797 under passagen.

Eksempel

Hvis vi i stedet kigger på en satellit, også i lav jordbane, der f.eks. sender på 436 MHz (det frekvensområde, de mobile jordstationer er indrettet til), får vi en noget højere dopplerforskydning:

$$\Delta f = \frac{\Delta v}{c} \cdot f_0 = \frac{7600\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{3 \cdot 10^8\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}} \cdot 436000000\ \mathrm{Hz} = 11045\ \mathrm{Hz}$$

eller cirka 11 kHz.

5. Datatransmission

En satellitmission generer data, som skal ned til Jorden. Det kan være måledata fra sensorer, billeddata, videodata, metadata om de videnskabelige måledata og *housekeeping-data,* som er data om hvordan satellitten har det, f.eks. temperaturer, batterispænding, ladestrøm, output fra solceller, CPU-belastning, hukommelsesforbrug, diskforbrug, etc.

Datatransmission til og fra en satellit deles groft op i to slags: Telemetri og telekommandoer. Telemetri er dybest set alt, hvad der *downlinkes* fra satellitten, mens telekommandoer er kommandoer, der *uplinkes* fra Jorden til satellitten, altså simpelthen en liste over hvad computeren ombord på satellitten skal gøre hvornår.

5.1. Opløsning

Ethvert måleinstrument måler en fysisk størrelse, det kan f.eks. være en temperatur eller en magnetisk feltstyrke. En måling kan angives mere eller mindre præcist. 7 m/s er ikke det samme som 7,00 m/s – den første angivelse kan være hvor som helst mellem 6,5 m/s og 7,49 m/s. I titalssystemet øger vi præcision ved at tilføje decimaler. En computer arbejder med totalssystemet, hvorfor præcisionen af en måling angives i bits. En bit er den mindste informationsenhed, og kan være 0 eller 1.

Hvis vi f.eks. vil måle en temperatur, så vil en opløsning på 1 bit kun fortælle os, om temperaturen er under eller over en bestemt værdi. Det kan selvfølgelig i visse tilfælde være tilstrækkeligt, men ofte vil vi gerne have en lidt højere præcision.

Hver gang vi tilføjer en bit, fordobler vi antallet af mulige værdier. Antallet af værdier *N*, vi kan repræsentere med *n* bits er $N = 2^n$. Med otte bits kan vi altså repræsentere $2^8 = 256$ forskellige værdier.

Jo mere data, vi genererer, jo mere data skal vi transmittere til Jorden, medmindre vi vælger at smide overflødige data overbord.

5.2. Samplerate

Typisk er vi interesseret i mange regelmæssige målinger, så vi kan se, hvordan den fysiske størrelse udvikler sig over tid. Ønsker vi at kortlægge Jordens magnetfelt fra en satellit i lavt jordkredsløb, går det ikke an, hvis vi kun måler magnetfeltet hver 1½ time. Men måske er en måling hvert mikrosekund i overkanten? Inden missionen er det vigtigt at overveje, hvor lidt data man kan nøjes med, altså en klassisk *nice-to-have/need-to-have*-overvejelse.

Hvis vi sampler en otte-bit værdi hvert sekund generer vi otte bits i sekundet. Generelt kan man sige, at hvis vi sampler en værdi *r* gange i sekundet, og hver værdi er repræsenteret af *n* bits, så genererer vi en datarate på $r \cdot n$ bits/s.

5.3. Downlink

Der er flere måder at få data ned fra sin satellit på, men primært to:

1. Kontinuert transmission
2. Kommanderet transmission

Ved kontinuert transmission udsender satellittens radiosender blot en kontinuert strøm af data. Hvis nogen lytter, kan de modtage disse data. Dette anvendes typisk som en *beacon,* hvor de væsentligste housekeeping-data downlinkes hele tiden, f.eks. spændingen på solcellerne og temperaturen strategisk udvalgte steder på satellitten.

Ved kommanderet transmission sendes ingen data før satellitten enten modtager en direkte telekommando fra Jorden om at begynde at downlinke, eller satellitten har haft et skemalagt downlink liggende i sin jobkø.

Nogle satellitter benytter en kombination, så de hele tiden transmitterer housekeeping-data som en beacon med lav datarate, mens store datamængder transmitteres planlagt, når satellitten passerer over en særlig, dedikeret modtagestation med en stor antenne, med højt antennegain, så der kan downlinkes med en høj datarate.

6. Modulation af digitale data

For at sende data fra satellitten og ned til jorden skal vi først skabe en *bærebølge* – en bølge, der kan bære vores data. Det gøres med en *oscillator,* som skaber en elektrisk vekselstrøm med en høj frekvens. Vi skal dernæst gøre vores data klar til at blive transmitteret, og det gøres oftest ved at bringe dem på binær form. Vil vi f.eks. transmittere tekststrengen ”HALLO”, vil det være oplagt først at opskrive den som ASCII[10]-data:

Bogstav	ASCII-værdi	Binært (8-bit)
H	72	01001000
A	65	01000001
L	76	01001100
L	76	01001100
O	79	01001111

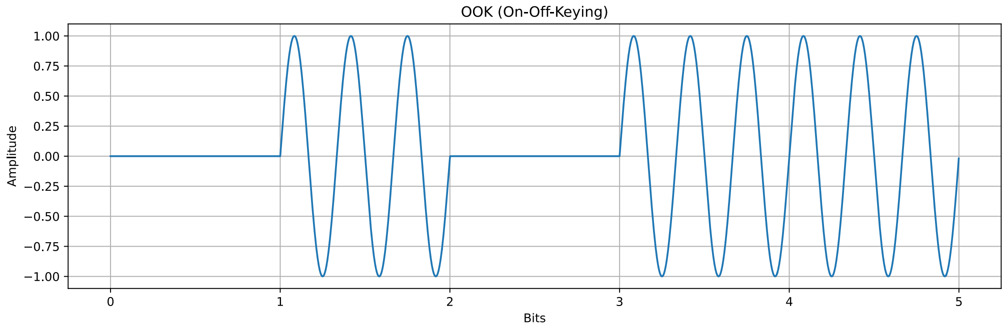
Kombinerer vi alle tegnene, får vi 0100100001000001010011000100110001001111. Det skal vi nu have udsendt ved hjælp af vores bærebølge. For at gøre det, skal vi *modulere* vores bærebølge med disse data. Der er mange forskellige modulationsformater at vælge imellem – i det følgende gennemgår vi nogle af de mest udbredte.

6.1. On-off-keying

Den simpleste måde at modulere vores bærebølge på ville være f.eks. at tænde for den, når vi skulle sende et 1-tal, og slukke for den, når vi skulle sende et 0 – en slags digitalt morsealfabet. Princippet er skitseret i Figur 20, hvor en bitsekvens på 01011 sendes med OOK[11].

Modulationsarten bruges dog sjældent i praksis, og stort set aldrig i forbindelse med satellitkommunikation. Ulempen er, at hvis man har en radiosender til rådighed, som kan sende med en effekt på f.eks. 1 W, så vil senderen være slukket i gennemsnit halvdelen af tiden, nemlig når der sendes nuller. Det er derfor mere effektivt at anvende et modulationsformat, hvor senderen er tændt hele tiden.

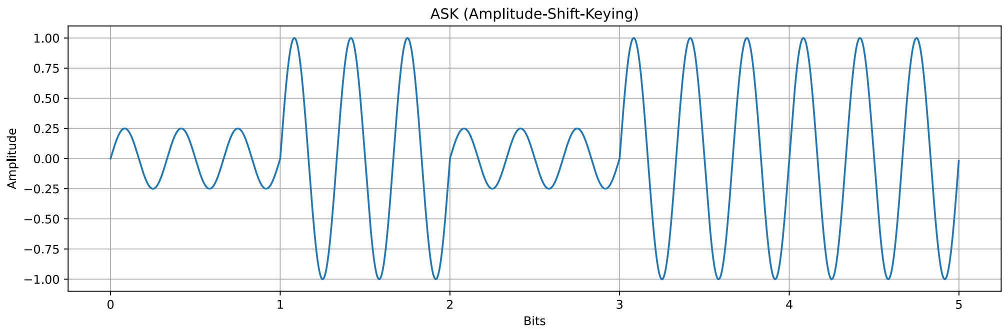
[10] ASCII står for American Standard Code for Information Interchange, og er vidt udbredt til kodning af tekst. A er 65, B er 66, osv.
[11] Mange udtryk inden for radioteknik bærer præg af telegrafiens udbredelse i radioens barndom. K’et i OOK, ASK, FSK og PSK står for *keying,* på dansk *nøgling,* som er det man gør, når man betjener en *telegrafnøgle,* engelsk *telegraph key.* Visse steder kan man da også se udtryk som *frekvensskiftnøgling* og *faseskiftnøgling.*



Figur 20: On-off-keying, hvor en bærebølge tændes og slukkes i takt med bitsekvensen 01011.

6.2. Amplitudeskiftmodulation

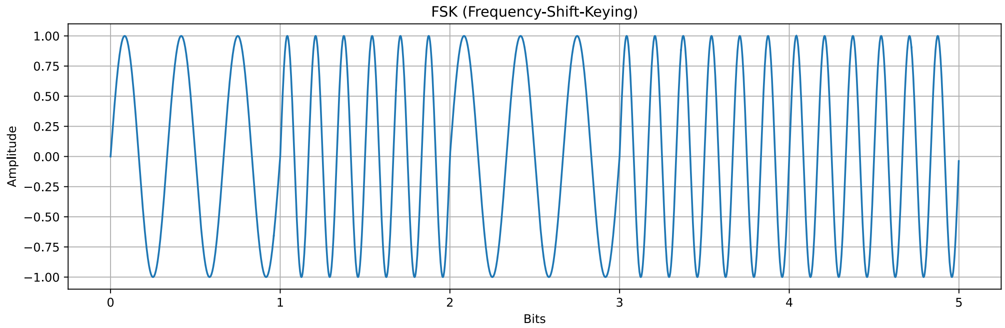
Alternativt kunne vi blot lade være med at slukke helt for senderen, men f.eks. sende nullerne på halv eller kvart effekt – se Figur 21. Problemet med denne modulationsart er, at mange former for støj påvirker amplituden af signalet på vej fra sender til modtager, og at der derfor er stor risiko for at modtage et 0, selvom et 1 blev sendt, eller vice versa.



Figur 21: Amplitudeskiftmodulation, hvor bitsekvensen 01011 moduleres som et skift mellem to forskellige amplituder.

6.3. Frekvensskiftmodulation

Alternativt kan vi skifte frekvensen af signalet en smule – så nuller f.eks. sendes på bærebølgefrekvensen, og ettaller f.eks. 200 Hz højere. Princippet er vist på Figur 22. Denne modulationsart er forholdsvis udbredt.

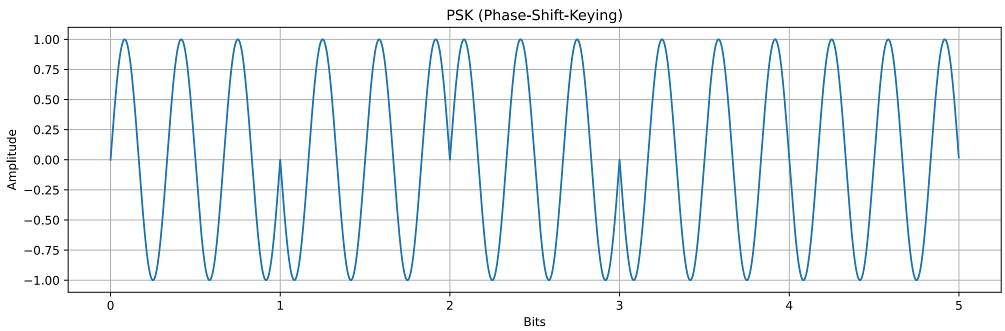


Figur 22: Frekvensskiftmodulation, hvor bitsekvensen 01011 moduleres som et skift mellem to frekvenser, her vist med den dobbelte frekvens for forståelighedens skyld - i praksis skiftes typisk mellem to frekvenser med en indbyrdes afstand på få hundrede hertz.

6.4. Faseskiftmodulation

I stedet for at skifte frekvensen kan vi skifte *fasen* af det udsendte signal. Det har den fordel, at vi sender med konstant amplitude *og* frekvens hele tiden – det er blot fasen af signalet, der ændrer sig.

Figur 23 viser princippet, hvor man har valgt at skifte signalet 180° - kaldet BPSK for *Binary Phase-Shift-Keying*. Ved f.eks. kun at skifte signalet 90° kan man sende to bits pr. tidsenhed, kaldet QPSK, hvor Q står for *Quaternary* – på dansk ville vi sige "faseskift-kvadratur". Både BPSK og QPSK er meget udbredte modulationsarter.



Figur 23: Faseskiftmodulation, hvor bitsekvensen 01011 er moduleret som et 180° skift i fasen af signalet. Læg mærke til, at både amplitude og frekvens holdes konstant – kun fasen ændrer sig.

6.5. Andre modulationsarter

Der er mange andre digitale modulationsarter som f.eks. QAM, OQPSK, MSK, GMSK, GFSK, og mange flere, som det vil være for omfattende at komme ind på her. Det væsentlige er, at valget af digital modulationsform lang hen ad vejen er en afvejning af, hvor stor datahastighed man har brug for, og hvor mange bitfejl, man kan acceptere. Generelt er det sådan, at jo hurtigere man sender, og jo flere bits der bliver repræsenteret i ét ”tidsslot”, desto større er risikoen for en bitfejl, altså at et ettal bliver modtaget, selvom det var et nul, der blev sendt, eller vice versa.

Bitfejl håndteres generelt med *forward-error-correction* (FEC), som dækker over en lang række teknikker, hvor man sender *lidt* mere data end højest nødvendigt (men så lidt som muligt) mod til gengæld at kunne korrigere eventuelle bitfejl efter dekodning.

7. Decibel

Inden for radioteknik (og mange andre fysiske discipliner, f.eks. akustik) arbejder man ikke bare med absolutte signalstyrker, men også med hvor kraftige signaler er i forhold til hinanden. Sender vi f.eks. et signal igennem en ledning - eller gennem det tomme rum - vil vi gerne vide, i hvor høj grad signalet bliver dæmpet. Anvender vi en retningsantenne, vil vi gerne vide hvor meget stærkere signalet bliver, *i forhold til* hvis vi havde anvendt en omnidirektionel (rundstrålende) antenne.

For at kunne arbejde nemt med forstærkning og dæmpning af signaler anvender man decibel, dB. Sammenligner man f.eks. en effekt P med en reference, P_0, siger man, at *forstærkningen* eller *dæmpningen* i decibel er givet ved

$$A = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{P}{P_0}\right)$$

Vi siger, at signalet P er A dB højere end P_0. A kaldes *forstærkningen* (eng. *gain*) hvis den er positiv, eller *dæmpningen* (eng. *loss*) hvis den er negativ. Ved at anvende en logaritmisk skala bliver multiplikation og division til henholdsvis addition og subtraktion. Hvis f.eks. et signal bliver forstærket til den dobbelte effekt, ændres signalstyrken med

$$10 \cdot \log_{10}(2) = +3{,}01 \text{ dB}.$$

Hvis et signal mister halvdelen af sin effekt, ændres signalstyrken med

$$10 \cdot \log_{10}\left(\frac{1}{2}\right) = -3{,}01 \text{ dB}.$$

Et antal decibel skal altså altid ses i forhold til en eller anden reference. Dog anvendes decibel også sommetider som en absolut angivelse, f.eks. af effekt. I disse tilfælde angives da også en referenceværdi; f.eks. kan man angive en effekt i dBW, som er effekten i forhold til 1 watt:

$$P_{\text{dBW}} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{P_{\text{W}}}{1 \text{ W}}\right)$$

eller i dBmW (også bare dBm), som er effekten set i forhold til 1 mW:

$$P_{\text{dBm}} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{P_{\text{mW}}}{1 \text{ mW}}\right)$$

Således svarer en sendeeffekt på 50 mW til 17 dBm eller −13 dBW. Da der er en faktor 1000 til forskel på W og mW, og titalslogaritmen til 1000 er 3, og 10 gange 3 er 30, vil man altid skulle lægge 30 til, eller trække 30 fra, for at konvertere mellem dBm og dBW.

For at regne den anden vej, altså fra f.eks. dBm til mW, vendes beregningen om:

$$P_{\text{mW}} = 10^{\left(\frac{P_{\text{dBm}}}{10}\right)}$$

Decibel bruges især, når man skal lægge et linkbudget. F.eks. har mange modtagere en *følsomhed* (eng. *sensitivity*) ned til −130 dBm, dvs. de kan modtage et signal på

$$P_{\mathrm{mW}} = 10^{-\left(\frac{130\ \mathrm{dBm}}{10}\right)} = 10^{-13}\ \mathrm{mW} = 10^{-16}\ \mathrm{W}$$

Det er jo i sig selv ret imponerende, men hvis man kan regne ud, at den modtagne signalstyrke vil være lavere end dette, f.eks. −140 dBm, så skal man altså finde +10 dBm i sit linkbudget; f.eks. kunne man skifte til en antenne med 10 dB højere gain.

8. Antenner

Antenner bruges til at omsætte et elektrisk signal i en ledning til elektromagnetiske bølger, og til at modtage de elektromagnetiske bølger og omsætte dem til et elektrisk signal i en ledning. Hvis en antenne udstråler lige meget energi i alle retninger, siger man, at den er *isotropisk.* 100% isotropiske antenner findes ikke i virkeligheden, og så regel er man – i hvert fald i rumfartssammenhæng – sjældent interesseret i at sprede sine signaler så meget som muligt; ønsket er snarere at koncentrere signalet så meget som muligt.

Der er mange forskellige slags antenner, men mange antenner er variationer over en bestemt, grundlæggende antennetype, *dipol-antennen.*

8.1. Dipol-antennen

Hvis vi sender en vekselstrøm med en bestemt frekvens gennem en ledning og hen til en antenne, vil antennen udstråle energi, hvis den er i resonans på den frekvens.

Den simpleste antennetype kaldes en *dipol-antenne,* se Figur 24, og består af to ledere, der sidder i forlængelse af hinanden. En dipol-antenne er i resonans, når dens længde er lig med halvdelen af bølgelængden. Derfor kaldes den også nogle gange for en "halvbølge-dipol".

Figur 24: Principskitse af en dipolantenne. Antennens samlede længde skal være en halv bølgelængde, for at antennen er i resonans.

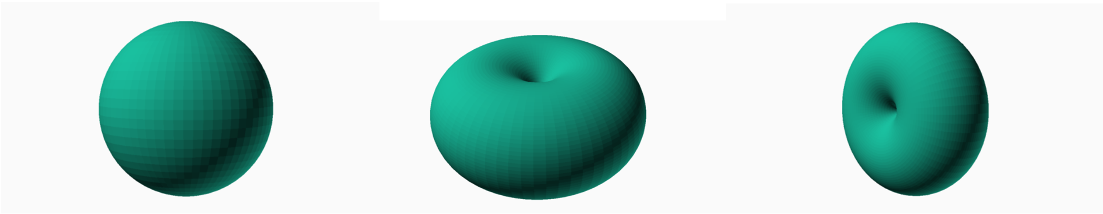
Hvis en antenne er i resonans, kan den både anvendes til at sende og modtage på resonansfrekvensen.

Elektromagnetiske bølger udbreder sig med lysets hastighed, c. Bølgens frekvens f og bølgelængde λ hænger sammen ifølge *bølgeligningen:*

$$c = f \cdot \lambda$$

Kender vi bølgelængden, kan vi således altid finde frekvensen, og vice versa.

Dipolantennen udstråler ikke lige meget energi i alle retninger – den er ikke isotrop. Dipolantennen udstråler mest energi vinkelret på sin længdeakse, og stort set ingen energi langs sin længdeakse. Et diagram der viser, hvor meget energi en antenne udstråler i hvilke retninger, kaldes et *udstrålingsdiagram.*



Isotrop antenne Lodret dipolantenne Vandret dipolantenne

Figur 25: Udstrålingsdiagrammer

På Figur 25 er vist udstrålingsdiagrammer for tre antenner: En isotrop antenne, en lodret dipolantenne, og en vandret dipolantenne. En isotrop antenne udsender pr. definition lige meget energi i alle retninger, og udstrålingsdiagrammet er derfor en kugle. Isotrope antenner findes ikke i virkeligheden – alle antenner har en eller anden form for retningsvirkning. På figuren sidder antennen inde i midten, og overfladens afstand fra antennen viser, hvor meget energi, der udsendes i den retning. Af illustrationen kan man se to ting: 1) Dipolantenner udsender ingen energi langs deres længdeakse; 2) Den lodrette dipolantenne udsender lige meget energi hele vejen rundt langs horisonten.

I den retning, hvor halvbølgedipolen udsender mest energi, udsender den 2,15 dB mere end en isotrop antenne – man siger, at halvbølgedipolen har et *gain* på 2,15 dBi – dB i forhold til en isotrop antenne. For visse antenner er antennegainet opgivet i dBd, som betyder dB i forhold til en dipolantenne. For at få gainet i dBi, skal man så lægge 2,15 dB til.

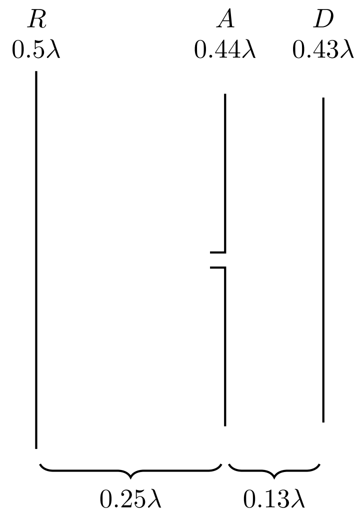
8.2. Yagi-antennen

Hvis man anbringer en elektrisk leder i nærheden af dipolen, ændres udstrålingsdiagrammet. En metalpind, der er lidt længere end dipolen, vil reflektere signalet tilbage mod dipolen, mens en metalpind, der er lidt kortere end dipolen, vil koncentrere mere energi i samme retning. Den lidt længere metalpind kalder man en *reflektor,* og den lidt kortere kalder man en *direktor.* I princippet kan man godt nøjes med enten den ene eller den anden, men med begge får man en væsentlig forøget retningsvirkning.

En dipolantenne med en reflektor og en til flere direktorer kaldes en Yagi-Uda-antenne, eller bare en Yagi, efter dens opfindere, se Figur 26. Yagi-antennen kan sagtens have et gain på op mod 20 dBi.

Reflektorer og direktorer kaldes *passive* eller *parasitiske* elementer, mens dipolantennen i Yagi-antennen kaldes det *aktive* eller *drevne* element.

Yagi-antenner benævnes ofte efter hvor mange elementer de har i alt – en Yagi-antenne med et drevent element, en reflektor og tre direktorer kaldes derfor en 5-element Yagi.



Figur 26: Tre-element Yagi-antenne med en reflektor til venstre, et drevent element på en halv bølgelængde i midten, og en direktor til højre. De præcise længder og afstande kan varieres afhængig af det ønskede udstrålingsdiagram.[12]

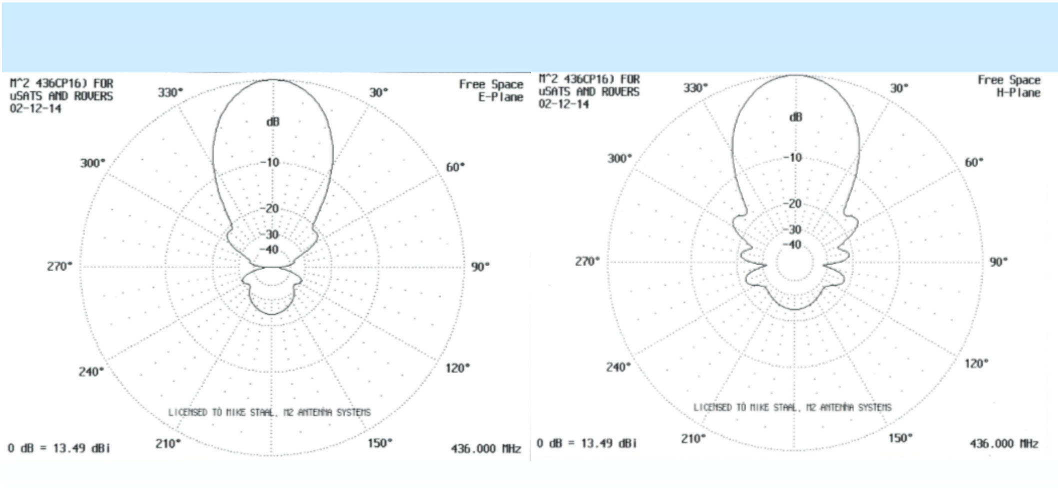
Figur 27: En moderne high-gain UHF Yagi-antenne med 17 direktorer, og en reflektor, der består af fire elementer, formet som en hjørnereflektor.[13]

8.2.1. Udstrålingsdiagram

Typisk er det tilstrækkeligt at vide, hvad en Yagi-antennes gain er *on-axis,* dvs. målt direkte ind på antennen, men det kan også være rart at vide, hvordan gainet falder, hvis man peger den lidt ved siden af. Derfor kan man udmåle et udstrålingsdiagram for antennen, der viser dens gain som funktion af vinklen. Udstrålingsdiagrammer for retningsantenner vises oftest som et polært plot, som vist på Figur 28. Figuren viser udstrålingsdiagrammer for den

[12] Kilde: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Yagi_3_element.svg
[13] Kilde: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:UHF_TV_Antenna_001.JPG

antenne, der anvendes på de mobile jordstationer, en 16-element kryds-Yagi til 432−438 MHz fra M^2 Antenna Systems.



Figur 28: Udstrålingsdiagrammer for antennen på de mobile jordstationer. Diagrammet er udmålt ved udsendelse af et lineært polariseret signal, dvs. kun den ene af de to vinkelrette antenner er i brug. Billedet til venstre viser E-planet, dvs. det plan, hvor E-felt-vektoren svinger, og billedet til højre viser H-planet, dvs. det plan, der står vinkelret på E-planet.

8.3. Polarisering

Som vi så i Figur 25 er det ikke helt ligegyldigt, om vi vender vores dipolantenne lodret eller vandret. Det er faktisk meget væsentligt, at modtagerantennen har samme *polarisering* som senderantennen – ellers kan man miste meget af signalstyrken.

Hvis man bruger en Yagi-antenne som modtagerantenne, er det selvfølgelig vigtigt, at den peger mod senderen, men det er også vigtigt, at polariseringen er den samme som senderantennens. Husk, at Yagi-antennen dybest set er en dipol-antenne med en masse passive elementer, som blot tjener til at kanalisere mere energi ind i det aktive element. Direktorerne og reflektoren ændrer ikke på, om signalet fra senderantennen er lodret eller vandret polariseret.

8.3.1. Lineær polarisering

Når en antenne udsender elektromagnetiske bølger, gør den det langs sin længdeakse. En antenne udsender både et elektrisk felt (kaldet E-feltet) og et magnetisk felt (kaldet H-feltet), og de to står vinkelret på hinanden. Som regel udnytter man kun den elektriske del af den elektromagnetiske bølge.

Man kan betragte det udsendte elektriske felt som en vektor, der beskriver udsvinget i E-feltet. En lineært polariseret antenne får E-felt-vektoren til at svinge lineært frem og tilbage, og vi får induceret størst antennestrøm i modtagerantennen ved at anbringe den, så den peger i samme retning som E-felt-vektoren svinger. Eller sagt på en anden måde: Hvis senderantennen er vandret, skal modtagerantennen også være det.

Men hvordan holder vi styr på, om en satellitantenne vender lodret eller vandret, når vi står på Jorden og skal pege en modtagerantenne mod den? Problemet kompliceres dels af, at ”vandret” for én modtager på Jorden måske er ”lodret” for en anden modtager et andet sted på Jorden; dels af, at mange satellitter ikke har nogen attitudekontrol, dvs. de “tumler” rundt i rummet, og kan vende på alle mulige måder.

Problemet kan løses ved at anvende en kombination af lodret og vandret polarisering, så signalet bliver *cirkulært polariseret.*

8.3.2. Cirkulær polarisering

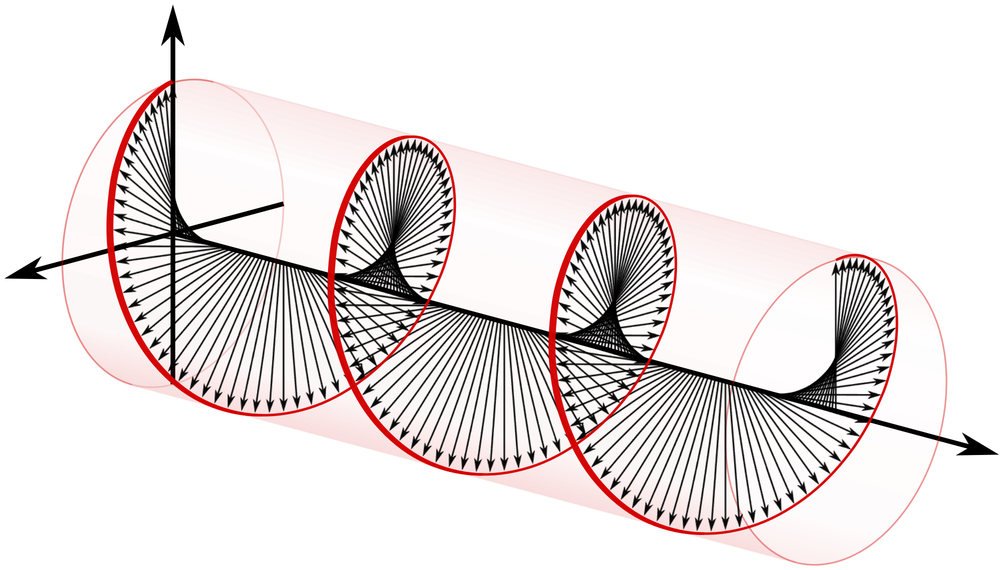
Lad os forestille os en lodret, lineært polariseret dipolantenne, se Figur 29. Hvis vi nu anbringer en vandret antenne “oven i” den lodrette, så vil vi kunne udsende et lodret og et vandret signal samtidig. Hvis de to antenner svinger i takt, får vi udsendt et lineært polariseret signal, der hælder 45°. Men hvis vi nu i stedet forsinker signalet til den vandrette antenne, så det ankommer til antennen 90° ude af fase, forsinket i forhold til signalet til den lodrette antenne, vil E-felt-vektoren fra den vandrette antenne svinge frem og tilbage en kvart omgang ude af fase med, og forsinket i forhold til, E-felt-vektoren fra den lodrette antenne, som svinger op og ned. Resultatet er, at E-felt-vektoren, set fra modtagerantennen, drejer rundt hele tiden som vist på Figur 29.

Vi vil altså kunne modtage signalet lige så godt med en vandret som med en lodret antenne. Og allerbedst med en tilsvarende antennetype, der kan modtage cirkulært polariserede signaler.

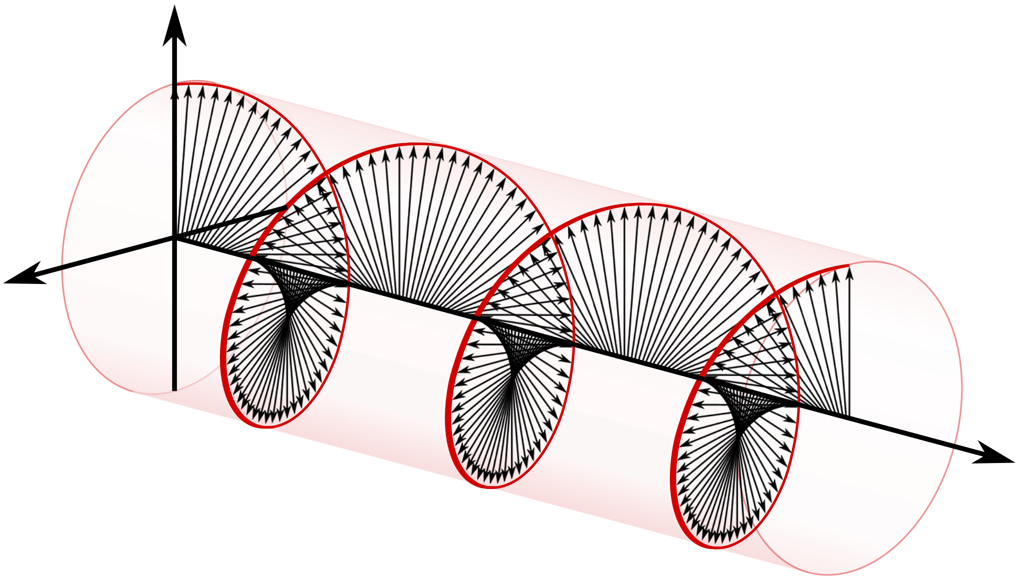
Som det ses på Figur 29 er den vandrette dipol forsinket 90° i forhold til den lodrette, hvilket resulterer i *højresnoet cirkulær polarisering.* Konventionen er, at man lægger sin højre hånd sådan, at tommelfingeren peger i samme retning, som bølgen udbreder sig fra antennen. Hvis de øvrige fingre peger i samme retning, som E-felt-vektoren roterer, er der tale om højresnoet, cirkulær polarisering.

Hvis den vandrette antenne er foran den lodrette, får vi venstresnoet cirkulær polarisering, som vist på Figur 30. Her passer udbredelsesretningen og E-felt-vektorens rotation med fingrene på venstre hånd.

Højresnoet cirkulær polarisation kaldes da også *Right-Hand Circular Polarization* på engelsk, eller RHCP. Venstresnoet hedder LHCP.



Figur 29: Et højresnoet, cirkulært polariseret signal udbreder sig fra en turnstile-antenne i koordinatsystemets origo. Her er den lodrette dipol 90° i fase foran i forhold til den vandrette, hvilket får den sorte E-felt-vektor til at rotere med uret, set fra origo, hvilket producerer højresnoet cirkulær polarisering, eller RHCP.[14]



Figur 30: Et venstresnoet, cirkulært polariseret signal udbreder sig fra en turnstile-antenne i koordinatsystemets origo. Her er den lodrette dipol 90° i fase bagud i forhold til den vandrette, hvilket får den sorte E-felt-vektor til at rotere mod uret, set fra origo, hvilket producerer venstresnoet cirkulær polarisering, eller LHCP.[15]

[14] Kilde: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Circular.Polarization.Circularly.Polarized.Light_Without.Components_Right.Handed.svg

[15] Kilde: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Circular.Polarization.Circularly.Polarized.Light_Without.Components_Left.Handed.svg

To dipoler, der er lagt over kors på denne måde, kaldes en "krydset dipol" eller på engelsk en "turnstile"-antenne, se Figur 31.

Et RHCP-signal kan kun modtages med en antenne, der er konstrueret til RHCP. Ligeledes kan man kun modtage LHCP med en antenne, der er bygget til det. På nogle antenner er der en omskifter, så man kan vælge, om man vil modtage RHCP eller LHCP.

På Figur 13 så du et billede af en af de mobile SatNOGS-jordstationer. På Figur 32 er der zoomet ind på antennen, så man kan se, at der er tale om to 8-element Yagi-antenner, der sidder vinkelret på hinanden. Her er signalet til den ene antenne forsinket 90° i forhold til den anden ved simpelthen at forskyde hele antennen en kvart bølgelængde bagud i forhold til den anden.

Figur 31: En krydset dipol, eller turnstile-antenne, til modtagning af cirkulært polariserede signaler. De to dipoler sidder øverst; længere nede sidder to reflektorer, der giver antennen lidt retningsvirkning opad. Så teknisk set er der tale om to krydsede to-element-Yagier.[16]

[16] Kilde: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SatelliteAntenna-137MHz_closeup.jpg

Figur 32: Nærbillede af den krydsede Yagi på den mobile SatNOGS-jordstation.

August 2022