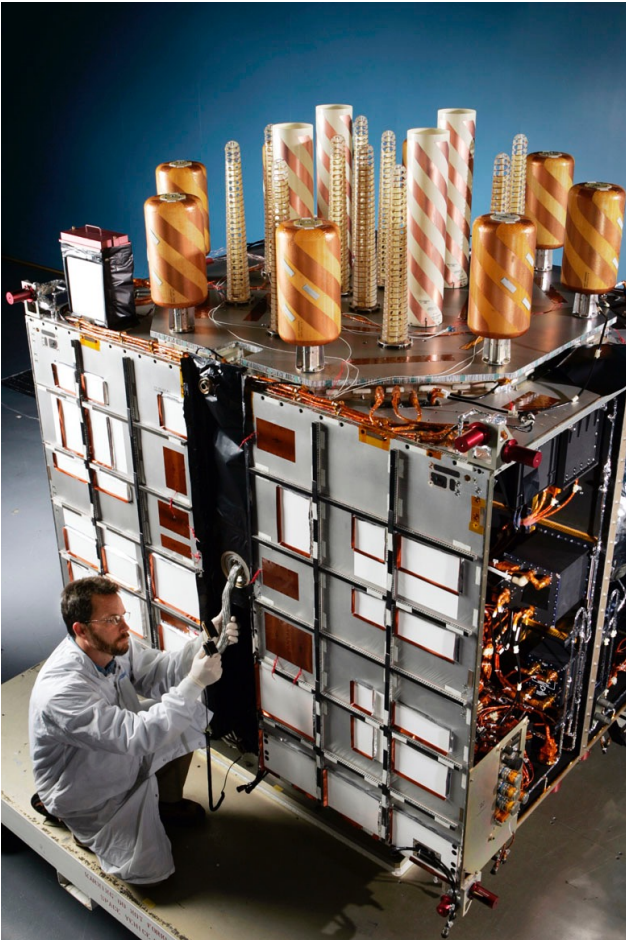


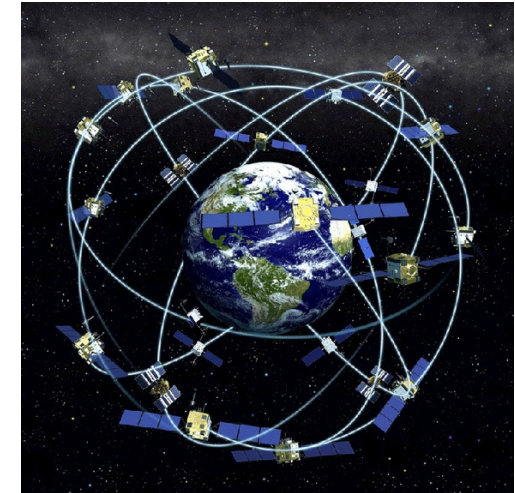
Global Navigation Satellite System (GNSS)



<http://img.gpsreview.net/wp-content/uploads/gps-satellite.jpg>



https://en.wikipedia.org/wiki/GPS_satellite_blocks#/media/File:Navstar-2F.jpg



<http://www.space.com/19794-navstar.html>

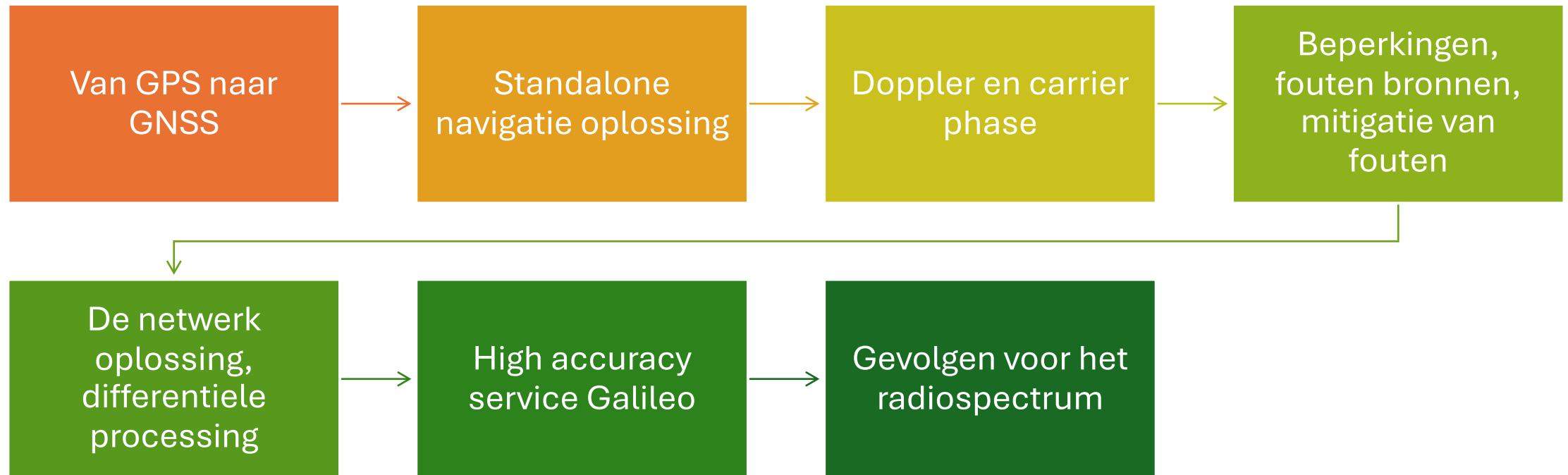


<https://www.wur.nl/en/show/drones-for-agriculture-prepare-and-design-your-drone-uav-mission.htm>



<http://www.apple.com>

Waar ga ik het over hebben



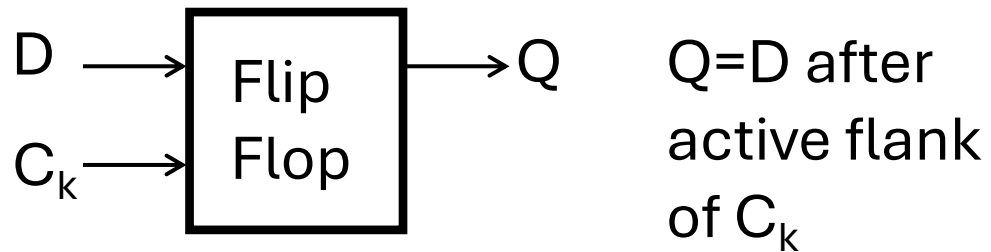
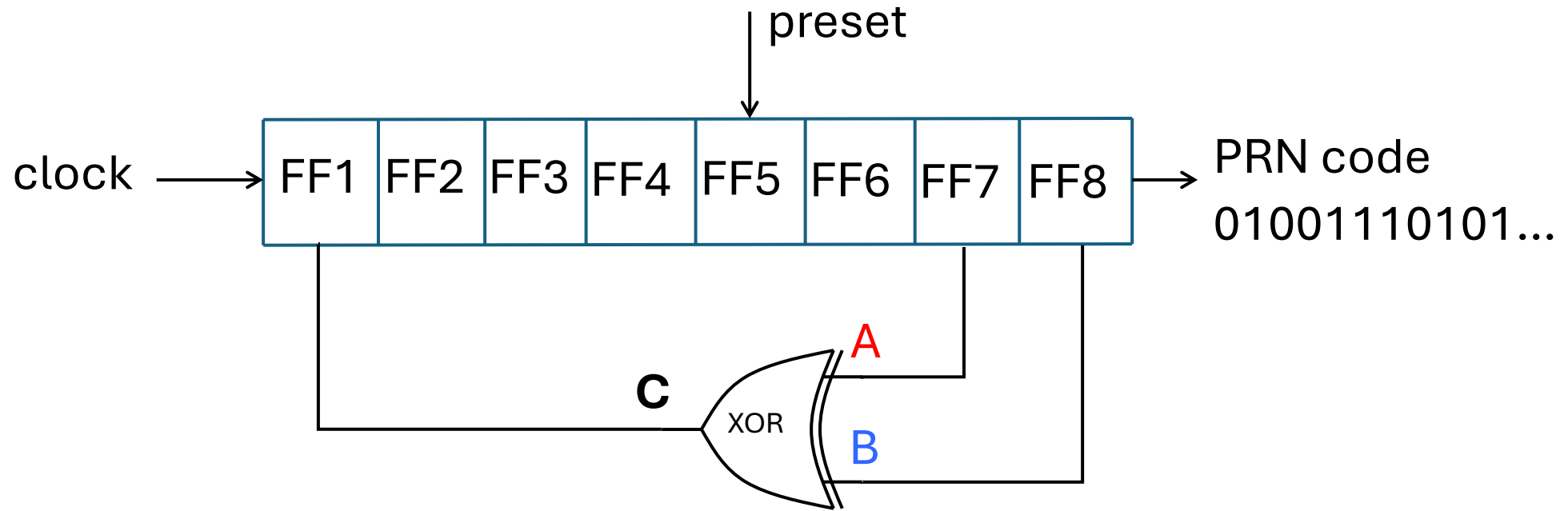
GPS radio signalen

- Spread spectrum modulatie, er zijn 2 frequentie (alhoewel er recentelijk een 3e civiele frequentie aan toegevoegd is)
- L_1 frequency ($1575.42\text{MHz} = 154 \times 10.23 \text{ MHz}$)
- L_2 frequency ($1227.60\text{MHz} = 120 \times 10.23 \text{ MHz}$)
- Twee frequenties helpen om de ionosferische afstands vertraging te bepalen
- Modulatie schema : bi-phase shift keying (BPSK) waarbij een unieke “Gold code” per satellite wordt gebruikt. (S/V)
- Max. aantal PRN codes is 37 → **niet** geheim

GPS signaal structuur

- Wat is belangrijk?
 - L_1 : C/A en P (of Y) codes, Y code is geheim, P code was niet geheim
 - L_2 : bevat alleen de P (of Y) codes
 - C/A code bandbreedte is 1.023 MHz, data snelheid = 50 bps
 - P(Y) code bandbreedte is 10.23 MHz, data snelheid = 50 bps
- PRN codes zijn uniek per satelliet (S/V)
 - Code lengte C/A = 1023, dus binnen 1 millisecond bij 1.023 mbps
 - Code lengte P(Y) = 6.19×10^{12} , oftewel 7 dagen bij 10.23 mbps,
 - The full P(Y)-code cycle is length is much longer
- Dit alles geldt alleen bij GPS terwijl er tegenwoordig nog een aantal andere systemen zijn
- GNSS = GPS + Galileo + Glonass + Beidou (Compass) + QZSS

PRN of Gold code generatie



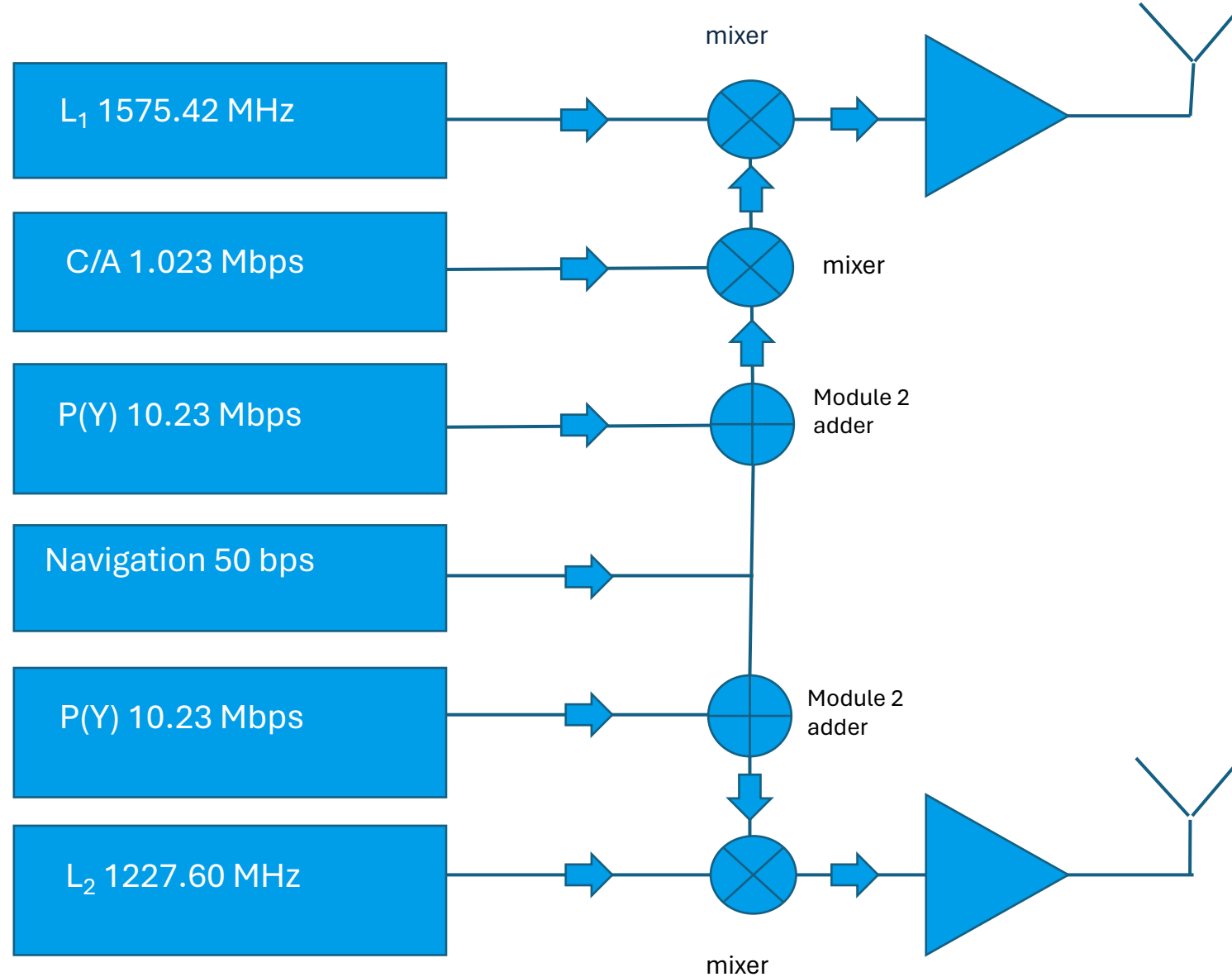
XOR truth table

XOR	0	1
0	0	1
1	1	0

Eigenschappen PRN code

- PRN codes zijn **pseudo random**, de C/A code:
 - Is uniek, zo vind je namelijk de satelliet
 - kunnen zondermeer nageemaakt worden op grond
 - generator: presets en XOR logica in het S/V
 - herhaalt zichzelf na 1 msec
- Code correlatie
 - Ontvangen PRN codes oplijnen met een PRN code replica mbv een digital code generator in de ontvanger
- Oplijnen betekent: Minimaliseer het fase verschil van de PRN signaal, het eind resultaat is een **code fase** registratie

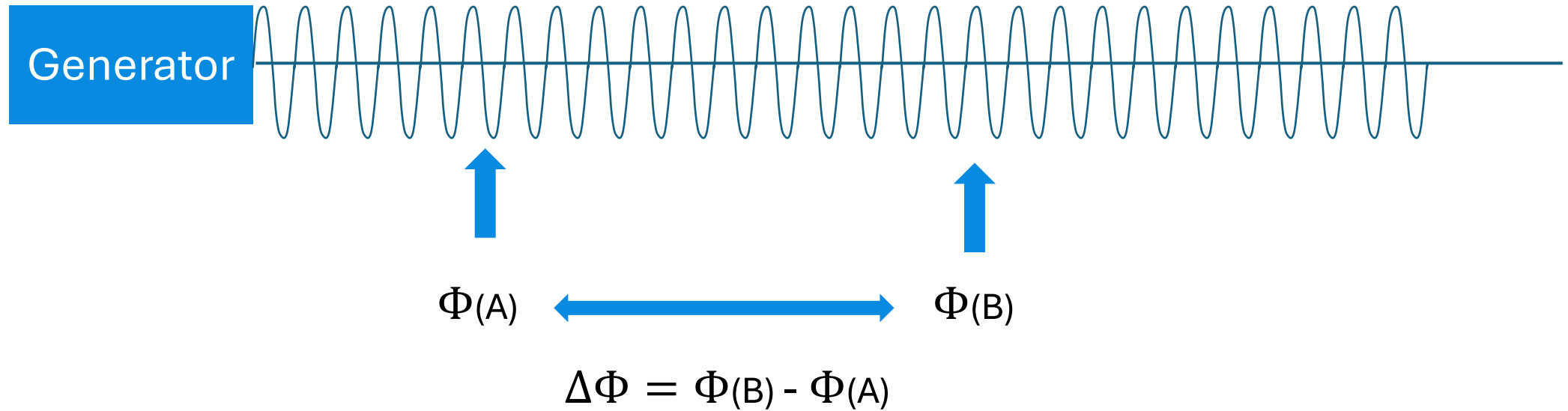
GPS signaal opbouw



Wat is nu het uitgangspunt?

- Elke satelliet vertelt waar hij is op een bepaald tijdstip
- Daarvoor moet je een vrij langzame datastroom verzamelen, en decoderen, data snelheid is 50 Hz.
- Wat je krijgt zijn:
 - Baanparameters (actueel en lange termijn),
 - Klok correctie informatie
 - Ionosferische correctie parameters
- GPS LNAV informatie: er zijn 5 subframes ieder 300 bits groot
- Het duurt 30s per satellite om de LNAV informatie te verzamelen
- Voor de hele constellatie ben je ca 15 tot 30 minuten bezig
- Tegenwoordig hebben we >12 kanaals ontvangers, vroeger moest je wachten ivm multiplexen met bv 1 ontvangst kanaal
- Verschil tussen “cold start”, “assisted start”, “warm start”

Fase verschil meting

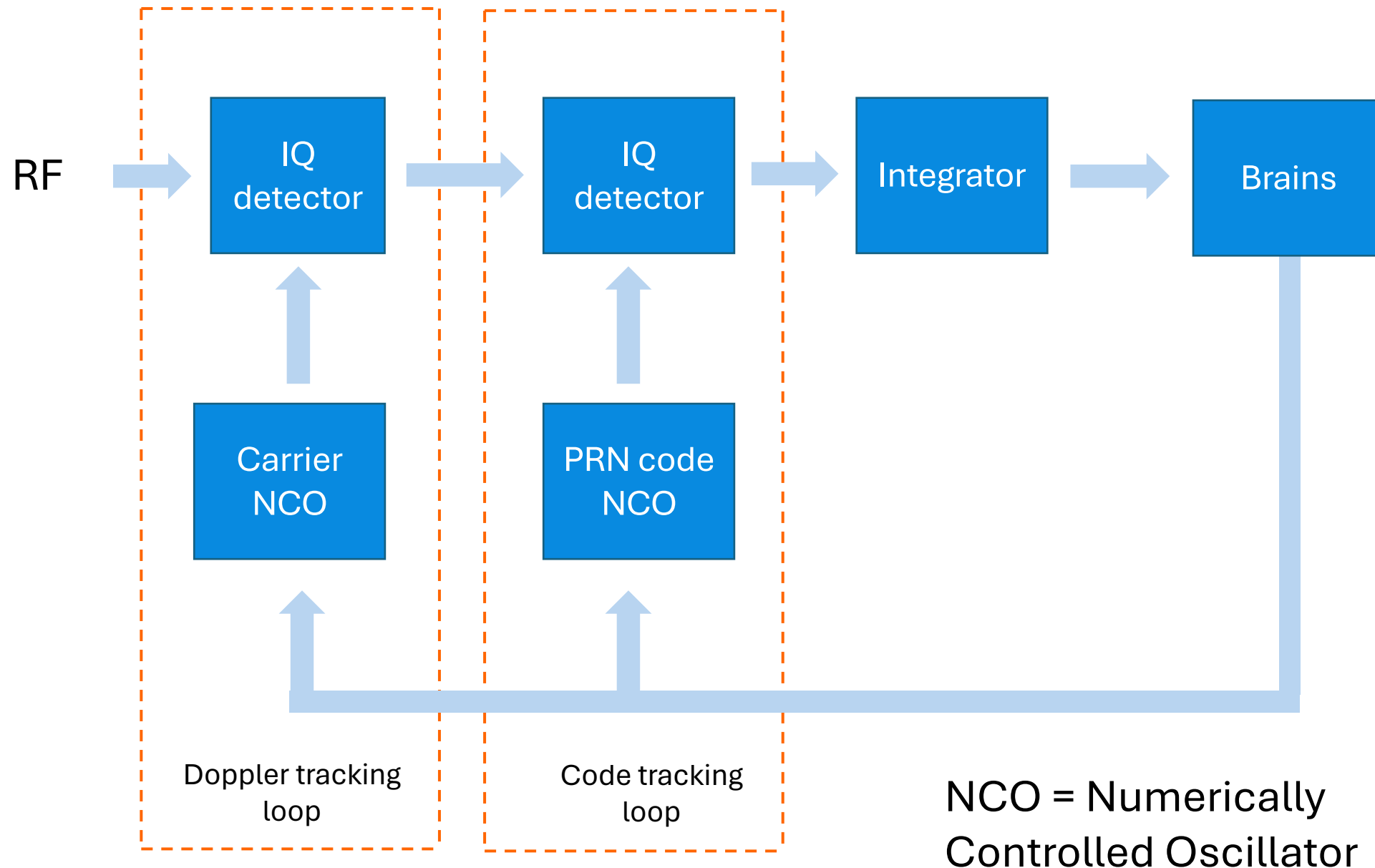


Dit concept is fundamenteel voor alle navigatie technieken, bij GNSS worden op punt A en B onafhankelijke **lokale oscillatoren** gebruikt

Terminologie: lokale oscillator, fase verschil metingen (of carrier of code)

De GPS ontvanger

- In de L-band (ca 1 tot 2 GHz) zou je met een ontvanger niets horen:
 - Alle PRN signalen zitten door elkaar heen (Door Doppler en PRN codes)
 - De signaal sterkte zit onder het thermische ruisniveau van de ontvanger
- Digital code correlatie lost dit probleem op:
 - Genereer PRN code **replica's** voor C/A, of P-codes, (“Y-codes” zijn niet beschikbaar), wat je eruit krijgt is een data stroom: 50 Hz
 - Wat kunnen we meten: **code phase (offset)** en de **Doppler frequentie (offset)** van het signaal uitgaande van een lokale oscillator
 - Er zijn minstens **two tracking loops** in de GPS receiver, een volgt de **code** en de ander volgt de **carrier**.



GPS navigatie

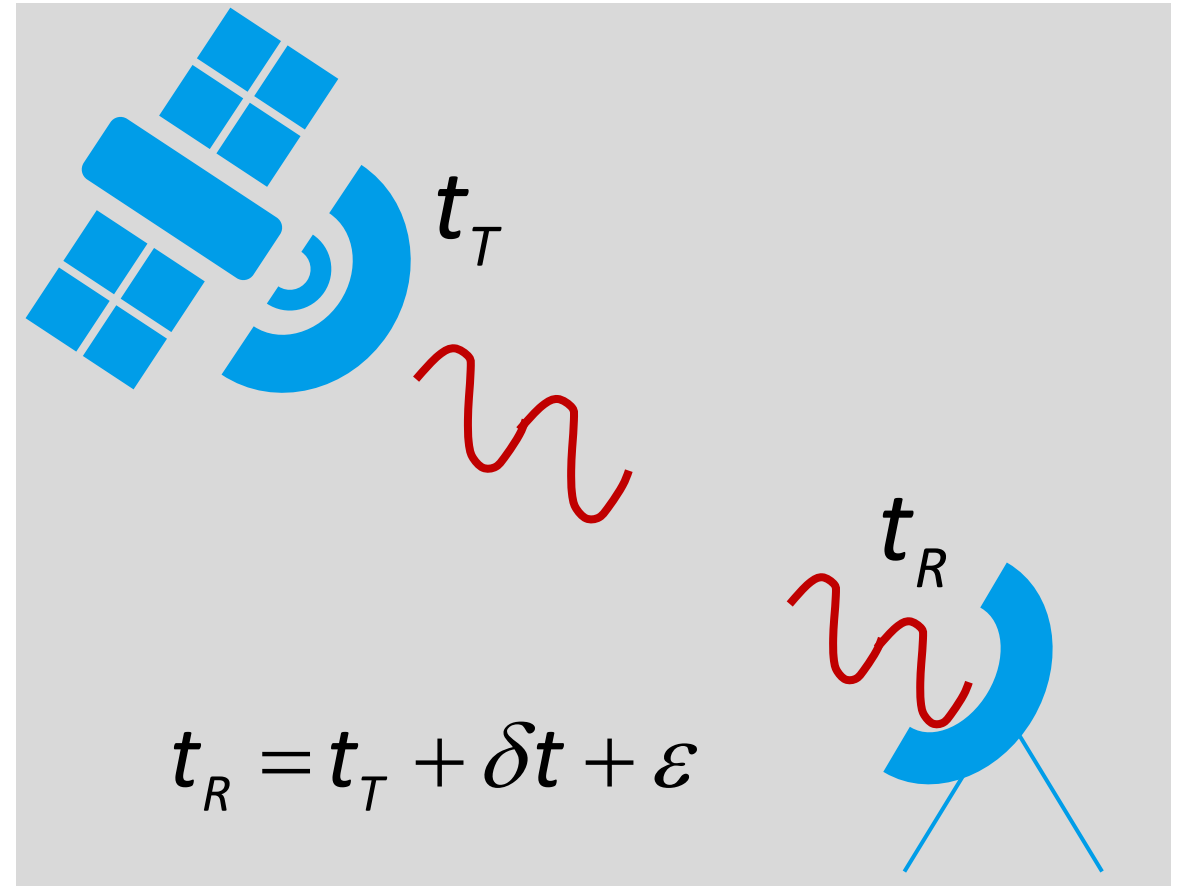
- Het tijdstip van uitzenden is bij de satelliet bekend
- Je ontvangt van iedere satelliet $(X,Y,Z,T)_{\text{satelliet}}$
- Waargenomen: Fase verschillen tussen de uitgezonden C/A code en een lokale C/A replica code
- Dit noemen we de pseudo-range informatie (dubbelzinnig tot op de 1msec)
- $\text{Pseudo range} = c \cdot (T_{\text{received}} - T_{\text{send}}) + \text{Bias}_{\text{receiver clock}}$
- Fase range $\rightarrow$ integreer het Doppler effect. Dit noemen we de zgn carrier fase meting.

Terminologie

- **Fase metingen**: we meten een fase verschil tussen een ontvangen signaal en de fase referentie in de ontvanger (hangt dus af van een lokale oscillator)
- **Fase verschil metingen** zijn “afstands - verschil” metingen
- **Code-fase**: dit is de fase van de PRN code oftewel van het gemoduleerde signaal.
- **Carrier-fase**: de fase meting van de draaggolf, dus alles wat **niet** gemoduleerd is.

Pseudo-afstandsmeting (pseudo-range: PR)

- PR bepaald door het tijdstip van **uitzending** en **ontvangst**
- Alleen het tijdsverschil is relevant
- PR volgt uit de PRN code
- Fout in de ontvanger klok is altijd dominant aanwezig
- Daarom spreken we van een zgn **pseudo-range**



Nauwkeurigheid van de pseudo afstands meting

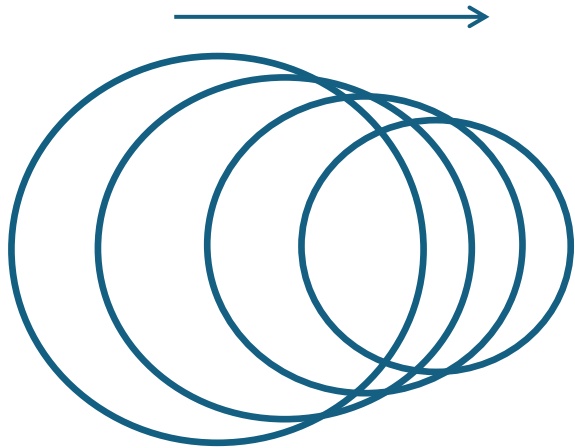
De gemoduleerde C/A code bestaat uit 1023 samples per milliseconde, de **chiplengte** is daarom 293 m. Deze C/A code is gemoduleerd via een spread spectrum techniek op de L1 carrier oftewel op 1575.42 MHz

De **resolutie** van de digitale fasemeting is 0.1%-1% ten opzichte van de chiplengte : ruwweg $\sim 0.3\text{-}3\text{m}$

Dit is een wetmatigheid bij alle fase meting, beter dan 0.1% ten opzichte van de golflengte wordt twijfelachtig

Afstands verandering & Doppler effect

Doppler effect: de waarnemer kijkt naar een oscillator waarvan de positie gedurende de waarneming verandert

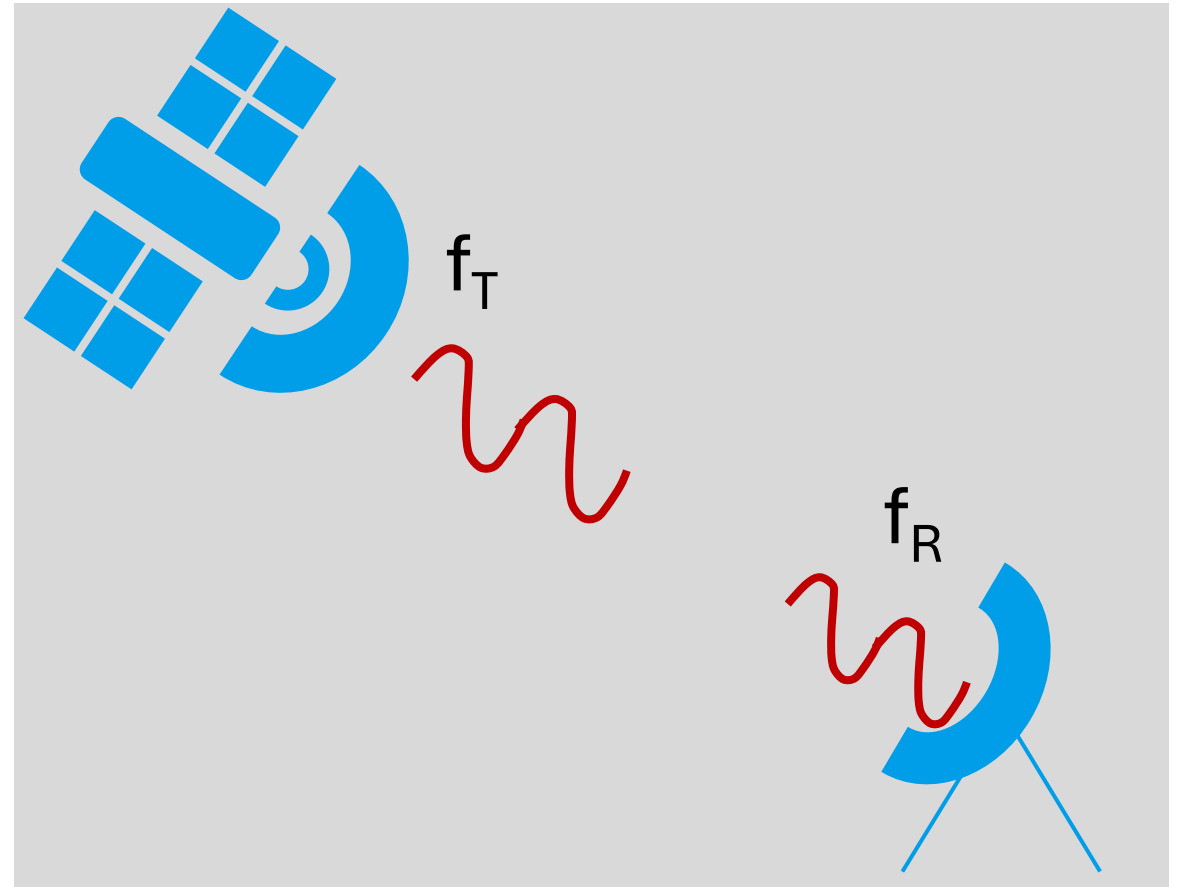


- $f + \Delta f = \left(1 + \frac{v}{c}\right) f$
- $\Delta f = \frac{v}{c} f$ zodat $v = \frac{\Delta f}{f} c$
- f : frequentie
- Δf : het Doppler effect
- v : snelheid langs het pad
- c : lichtsnelheid (3×10^8 m/s)

Doppler metingen

De waarneming van het **Doppler effect** van de “carrier” van het signaal geeft je de afstands verandering door de tijd

Twee dingen onderscheiden, **Doppler frequentie verschuiving**, en de som van alle verschuivingen (de integraal) → **carrier phase**



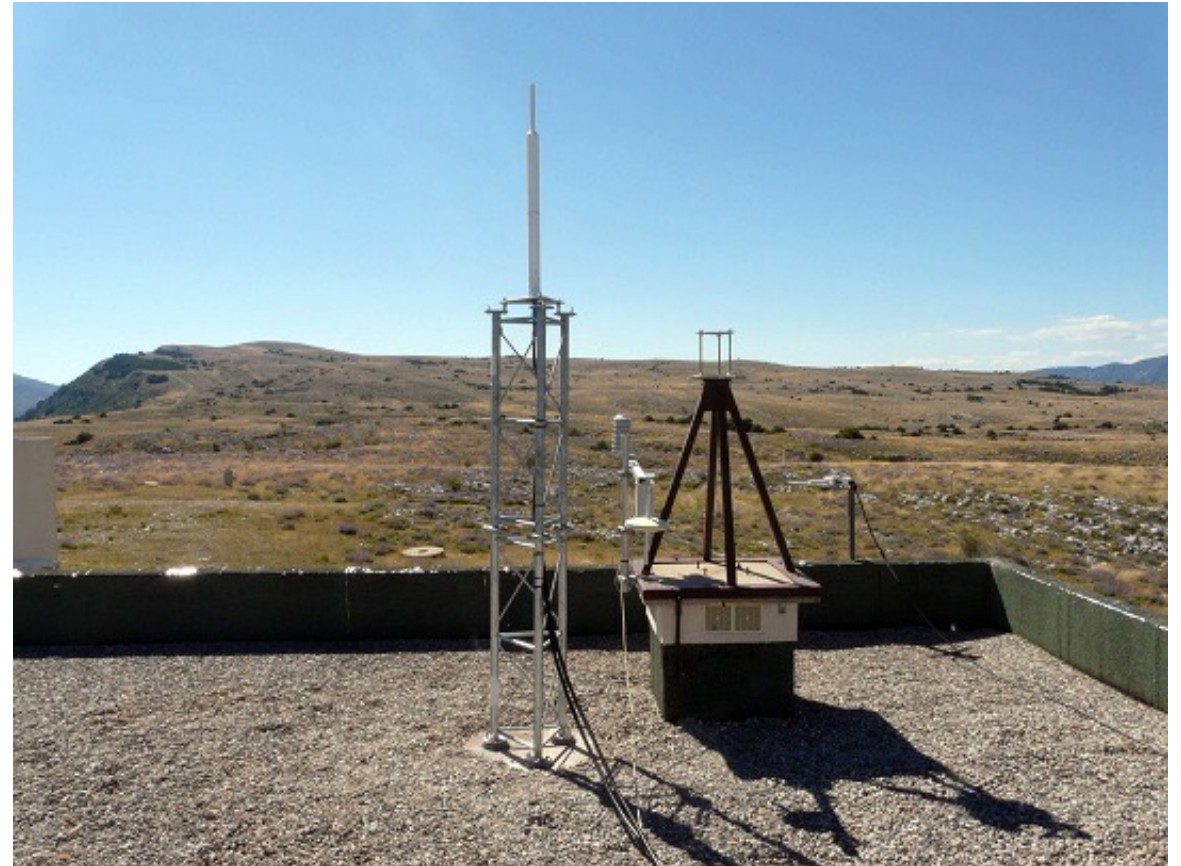
DORIS system, 'alleen' maar Doppler

- Network van bakens (ca 50)
- Ontvanger in de satelliet
- Nauwkeurig uitrekenen waar de satelliet is, eventueel autonoom
- Toepassing: bepaalde aardobservatie satellieten



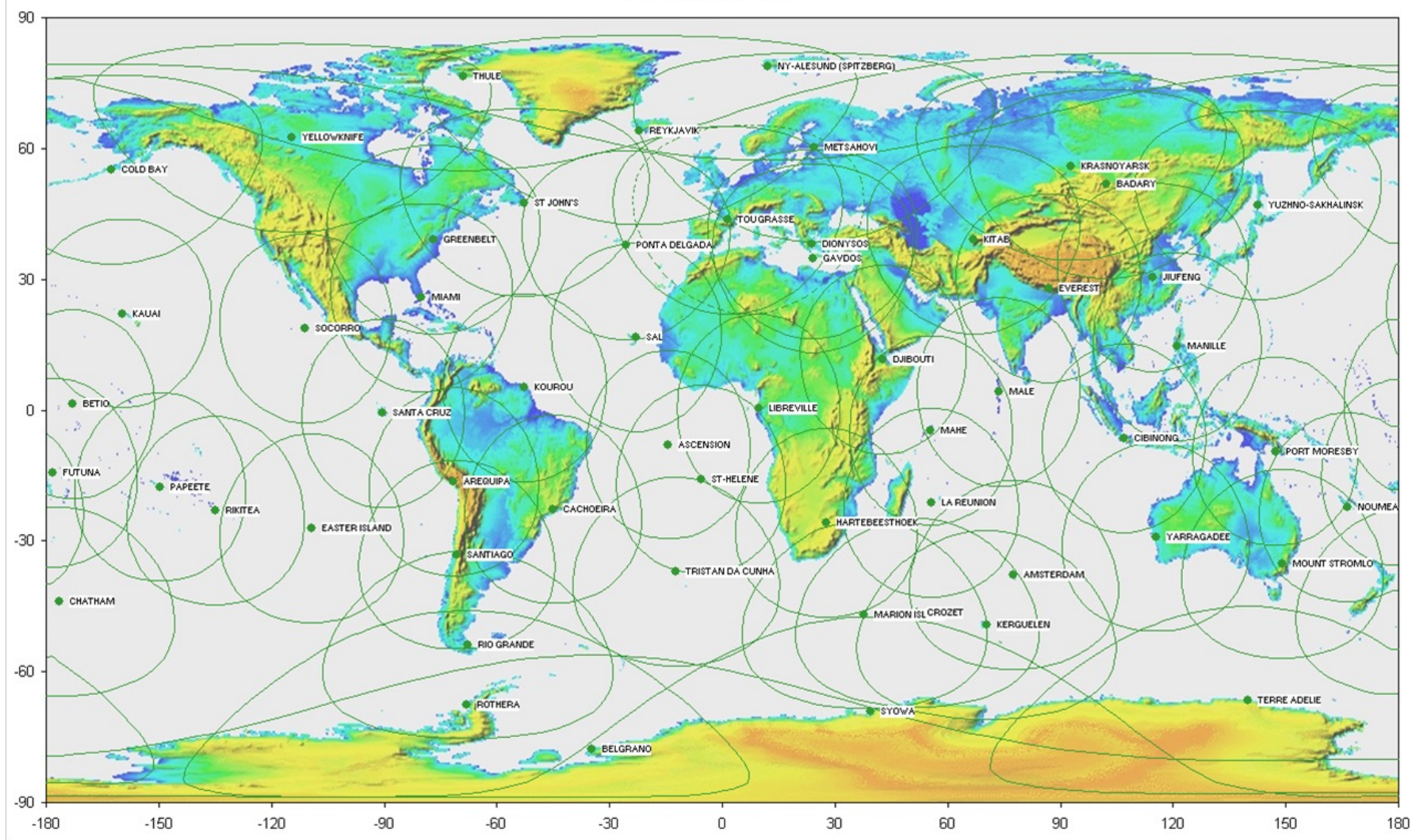
Radio tracking station (DORIS)

- DORIS baken Grasse, Frankrijk
- Sommige bakens hangen aan een tijd referentie (TAI)
- Bakens zenden ook synchronisatie pulsen uit
- En alle bakens zenden meteo gegevens uit

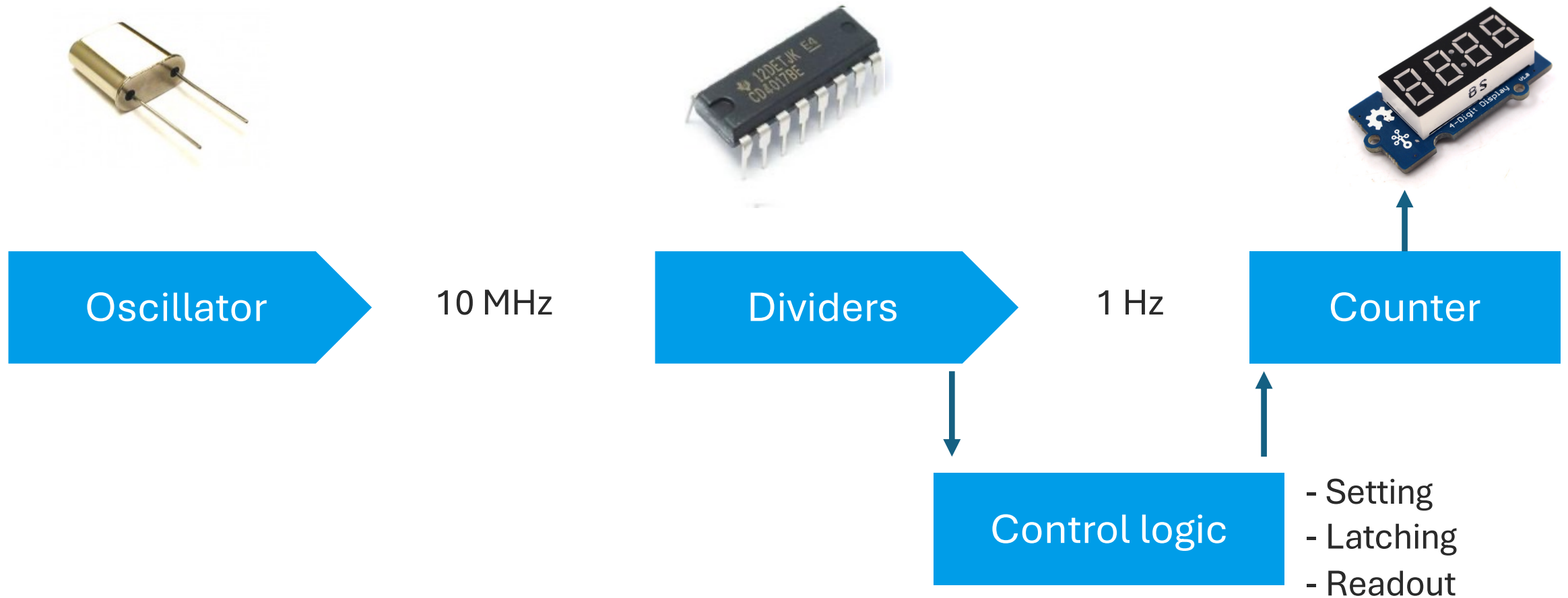


Cryosat-2 stations visibilities

Elevation 5°



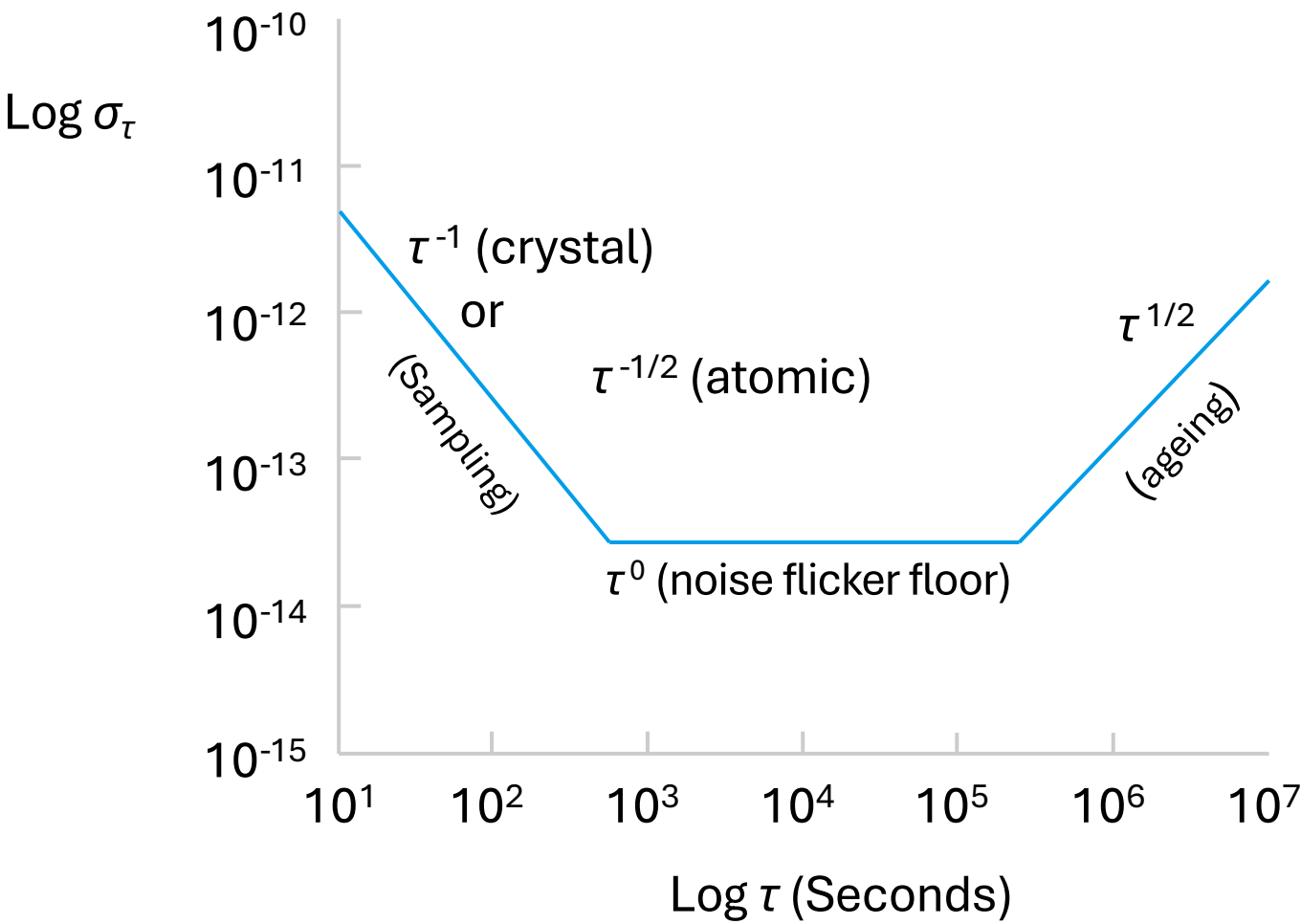
De meeste navigatie technieken hangen af van tijdsbepaling, oftewel, een nauwkeurige klok



Het “modelleren” van een klok

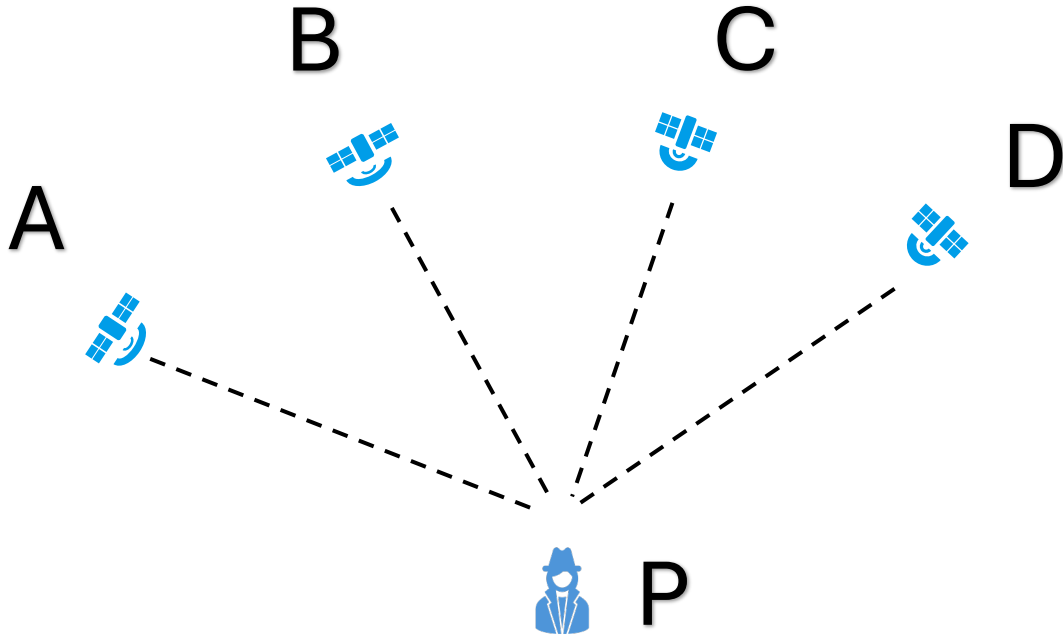
- Er is een referentie tijdstip per klok
- Frequentie van de oscillator is zo goed mogelijk bekend
- Verschillen tussen klokken zie je pas na verloop van tijd
- Vandaar de formule: $\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta t}{T}$
- Hoe synchroniseer je twee of meerdere klokken?
 - De methode van de horlogemaker
 - Gebruik een tijdzender (VLF LF en HF)
 - Tegenwoordig gebruik je uiteraard GNSS
 - Glasvezel en dedicated netwerken

Allan deviatie van oscillatoren en klokken



Oscillator	Noise flicker floor
Unconditioned quartz	10^{-7}
Oven special cut quartz	10^{-10}
Rubidium cell	10^{-12}
Cesium reference	10^{-14}
Hydrogen maser	10^{-14}
CS fountain	10^{-15}

Onder de 10^{-10} is magnetische afscherming essentieel vanwege het zgn Zeeman effect



$$p_P^A = r_P^A + k$$

$$p_P^B = r_P^B + k$$

$$p_P^C = r_P^C + k$$

$$p_P^D = r_P^D + k$$

Het probleem hangt voornamelijk af van

- Positie van de waarnemer,
- De klokfout van de ontvanger

Los een stelsel vgl op $\rightarrow x_p \ y_p \ z_p$ en k .

Er minimal 4 waarnemingen voor nodig. In werkelijkheid zijn er tientallen waarnemingen

k : klokfout ontvanger

$$r_P^A = \sqrt{(x^A - x_p)^2 + (y^A - y_p)^2 + (z^A - z_p)^2}$$

Eigenschappen van de navigatie oplossing

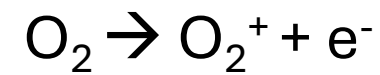
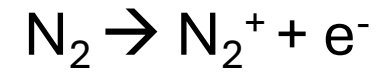
- De lokale oscillator in de ontvanger is niet zo heel erg goed, op zijn best misschien een kwartsoscillator
- Tijd informatie: 50 nano sec nauwkeurigheid uit de GPS ontvanger
- Positie komt tot circa 5 meter uit de ontvanger
- Maar we willen het graag beter doen:
 - Leiding registratie (graag binnen de cm)
 - Agrarische toepassingen (bv tot 5 cm)
 - Luchtvaart: real time en minstens zo goed als ILS
 - Offshore toepassingen: denk aan plaatsing van booreilanden etc

Waarom lukt je dit niet met de standaard GPS navigatie oplossing?

Beperkingen GPS navigatie oplossing

- Verstoring door de Ionosfeer
- Multipath nabij de ontvanger antenne
- Overgebleven klokfouten op satelliet en ontvanger
- De baan van de satelliet (zoals uitgezonden) heeft een beperkte nauwkeurigheid
- Tot nu toe hebben we nog niet naar carrier phase gekeken
- We kunnen een aantal dingen echt beter doen met een netwerk van GNSS ontvangers op de grond

Ionosfeer

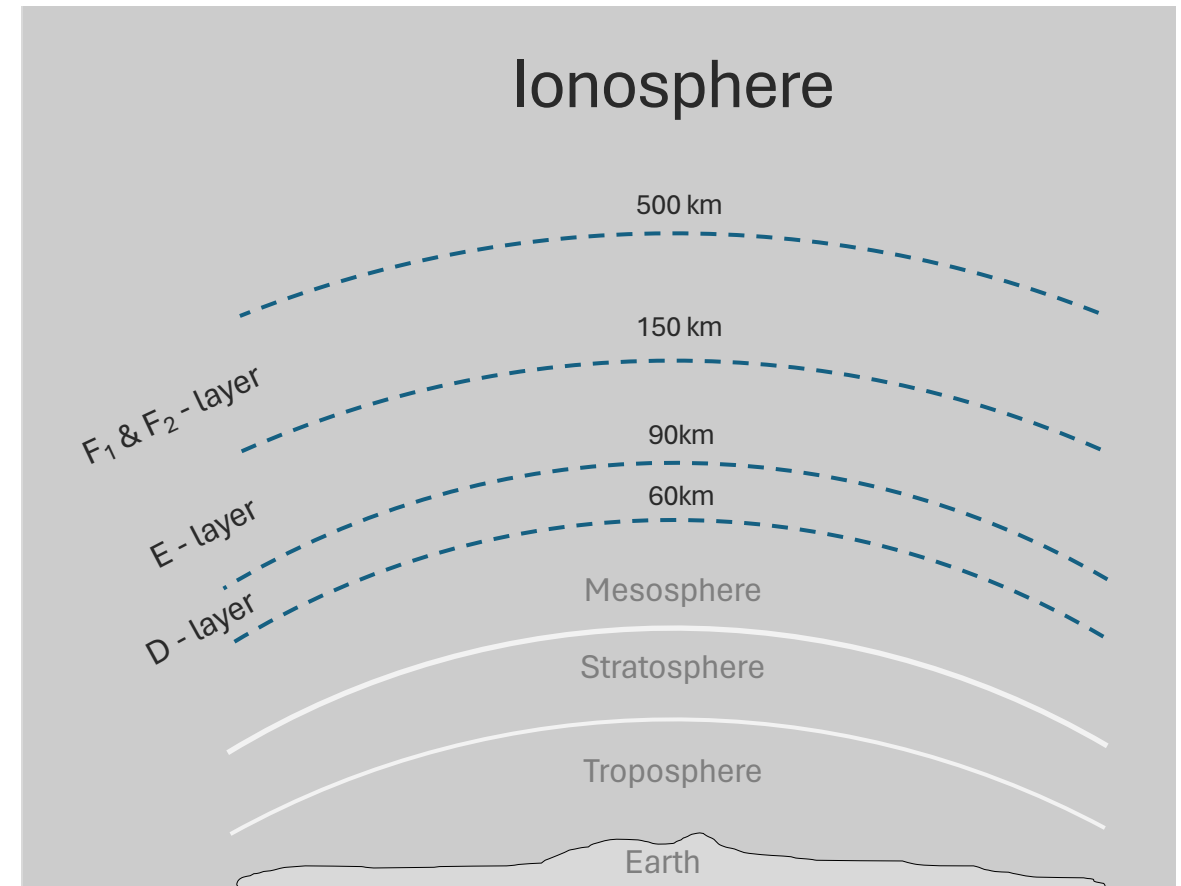


e^- is belangrijk

Ionisatie vanaf 70 km. Ionen en vrije elektronen worden gevormd, de vrije elektronen concentratie en de gyrofrequentie is belangrijk voor radio propagatie

Er is een **D laag** (60-90 km), een **E laag** (90-150 km), en twee **F lagen**, F_1 en F_2 (150-500 km)

Dag / Nacht effecten (jullie weten het beter dan ik)



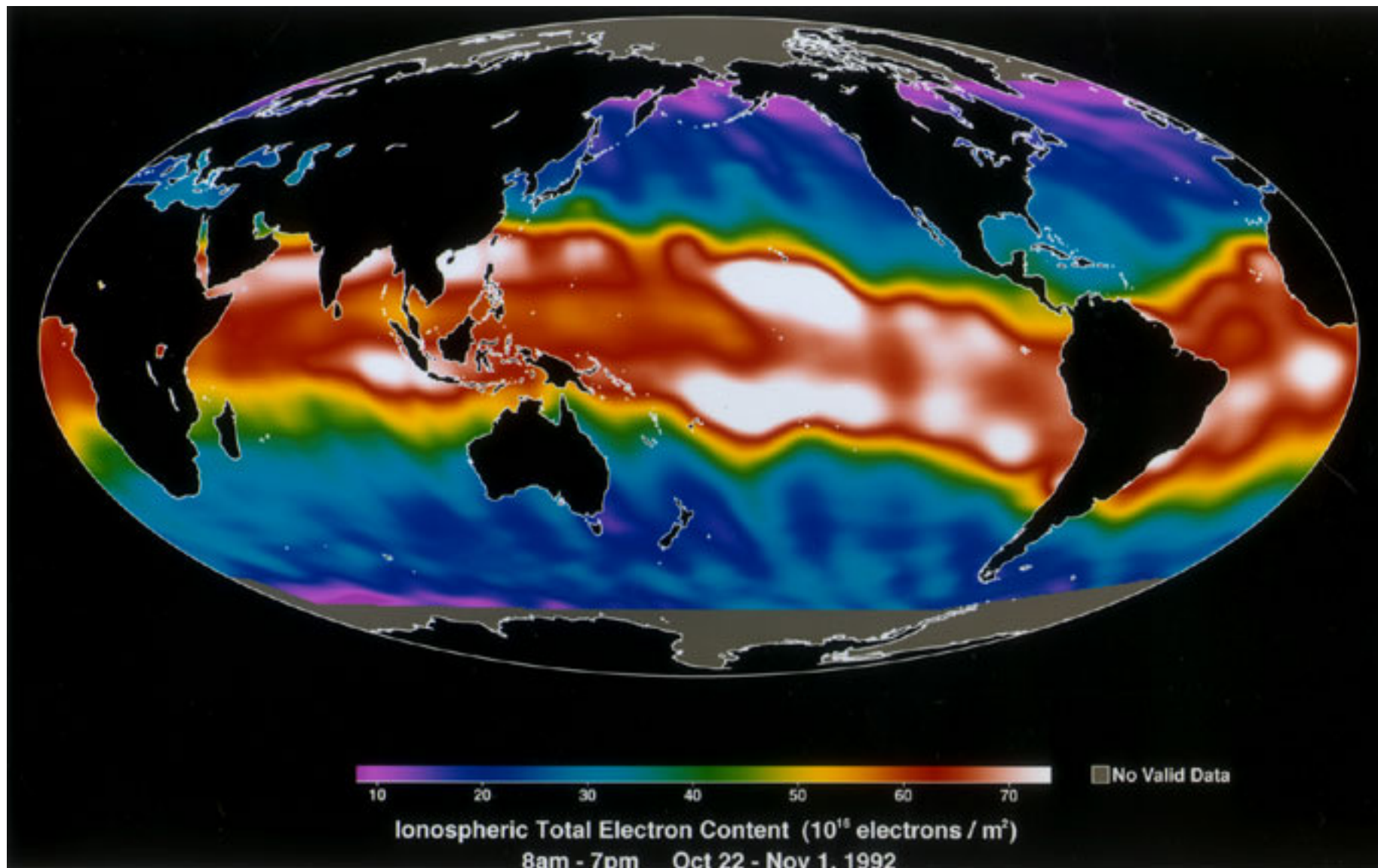
Ionosferische looptijd vertraging

- Ionosferische vertraging is **omgekeerd evenredig** met de frequentie in het kwadraat,
- d_1 en d_2 worden waargenomen,
- Quiz: laat zien hoe je r_0 en α kan berekenen
- Er is een relatie tussen α en de zgn total electron content (TEC) in het pad tussen zender en ontvanger
- 30 pagina's theorie over plasma en gyro frequenties en hun relatie met refractie heb ik vandaag overgeslagen

$$d_1 = r_o + \frac{\alpha}{f_1^2} + \dots$$

$$d_2 = r_o + \frac{\alpha}{f_2^2} + \dots$$

Vrije elektronen concentratie gemeten op 13.3 GHz



Troposferische looptijdvertraging

Refractie speelt een rol

- **droge** component 90%
- **natte** component 10%

2.4 m zenith, 25 m bij 5° elevatie

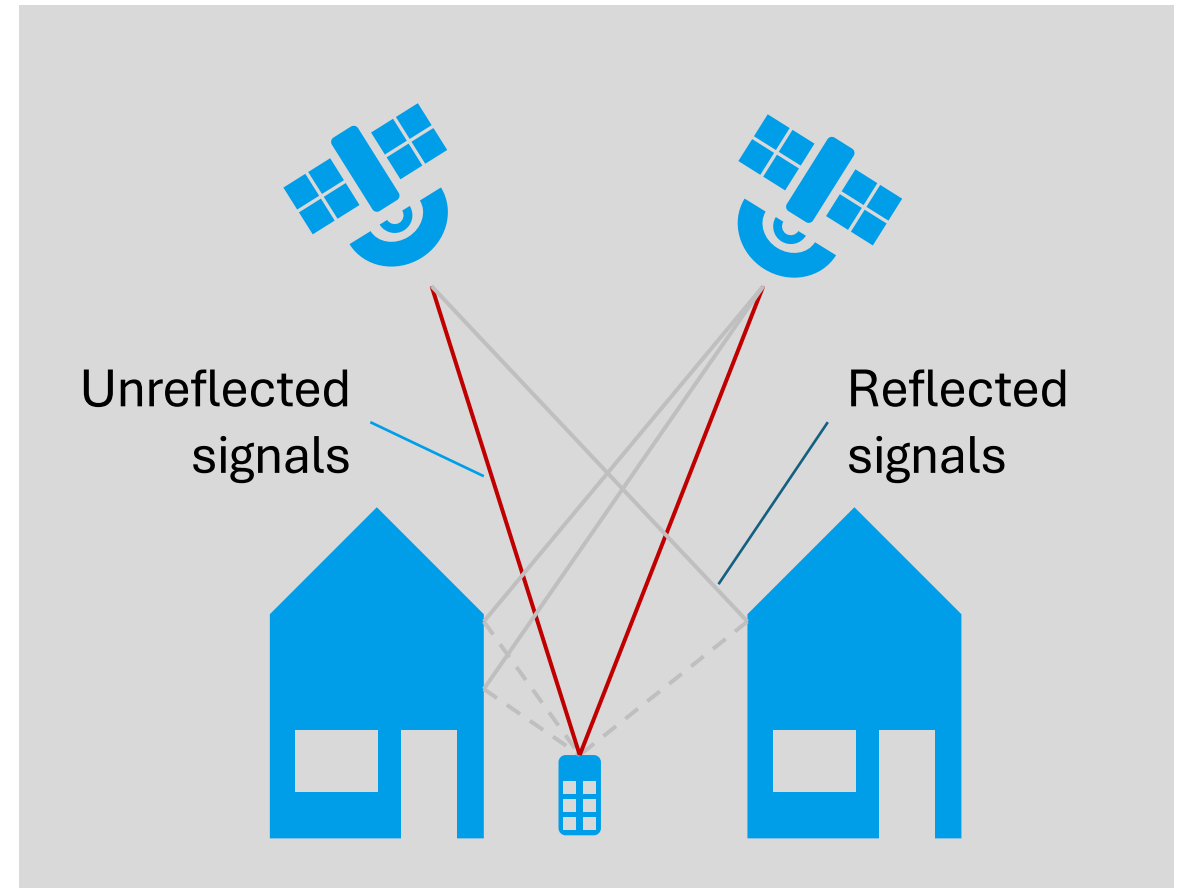
$d_{\text{dry}}/d_{\text{wet}} = f(\text{height, pressure, temperature, temperature gradient, water vapor pressure, water vapor gradient, empirical constants})$

$$\Delta S = m(d_{\text{dry}} + d_{\text{wet}})$$

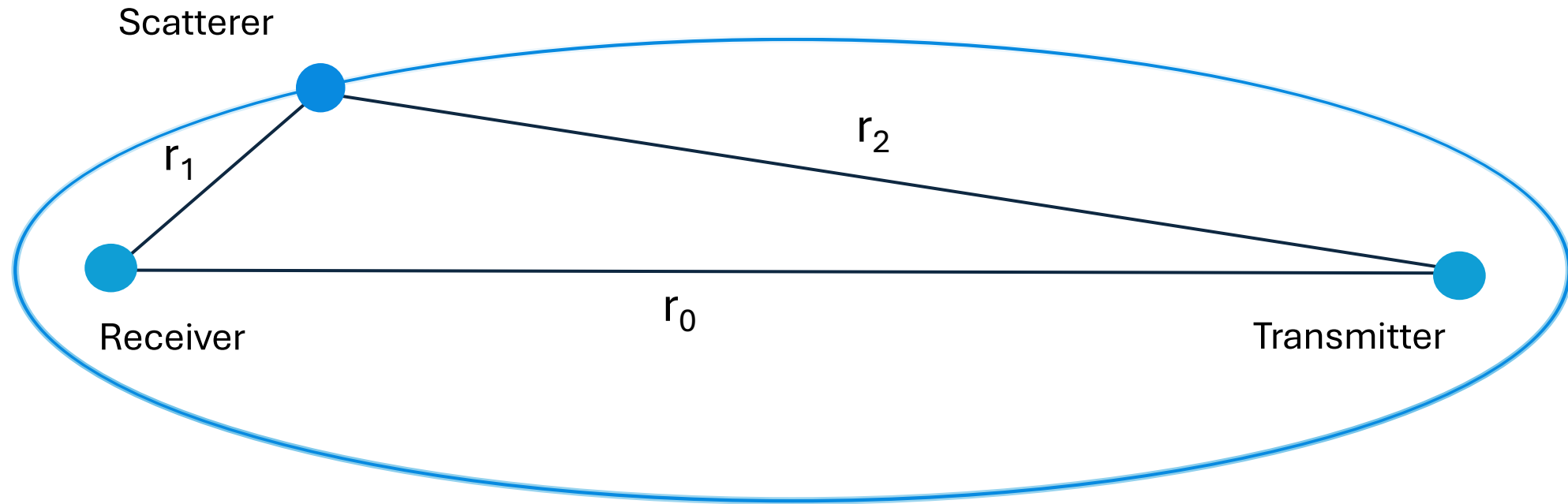
$m = \text{mapping function} = f(\text{elevation})$

Multipath

- Typical fouten gedrag:
- Code: 20 cm (of meer)
- Fase: 2 cm (of meer)
- Grootste bron van fouten na ionosfeer en troposfeer
- Circulaire polarisatie onderdrukt multipath met meer dan 30dB
- Dankzij patch antenne technologie zijn er ook compacte dongles die je op het dak van de auto kunt plakken



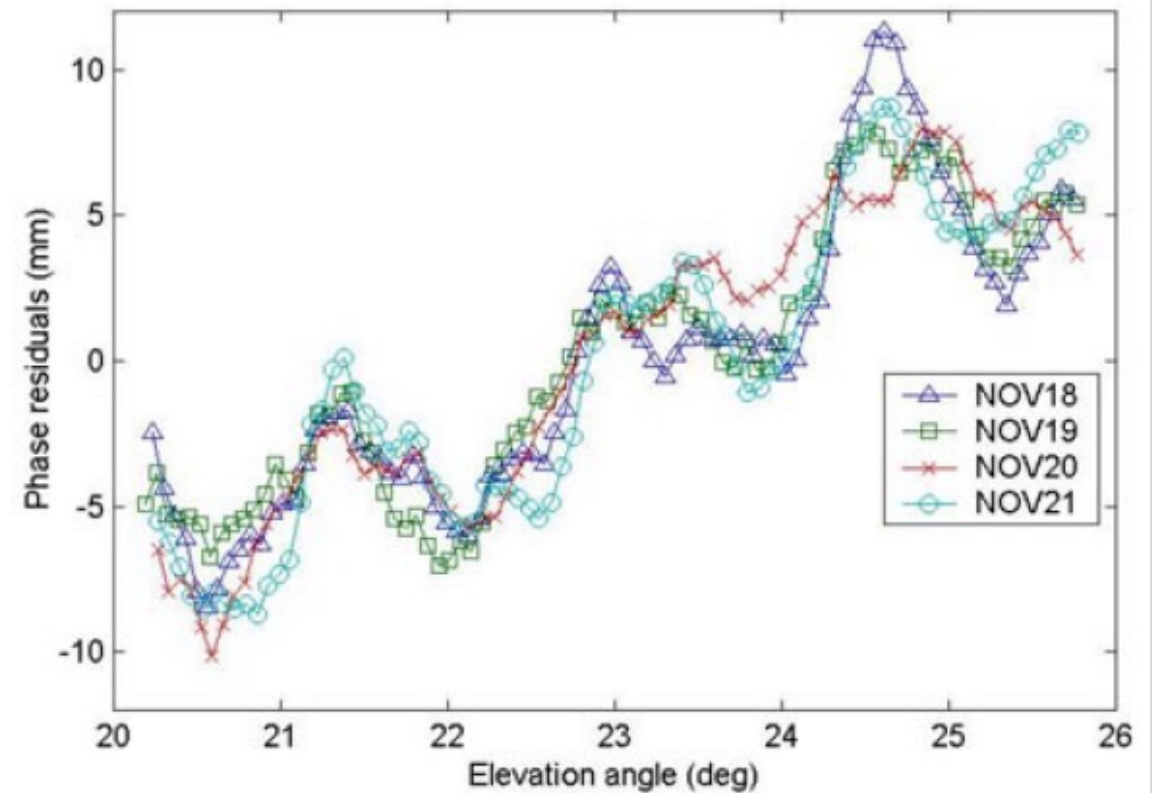
Fresnel ellips



Zender en ontvanger zijn gepositioneerd op brandpunten van de Fresnel-ellips. Nu is r_0 het directe pad dat we willen waarnemen, terwijl er een reflectie langs $r_1 + r_2$ ontstaat in wat we een multipath-sigitaal noemen (in GNSS onderdrukt door circulaire polarisatie), de verbinding van alle $r_1 + r_2 = \text{constante}$ zijn de ellipsen genoemd naar Fresnel, $r_1 + r_2 - r_0 = n\lambda$ is een voorwaarde voor multipath-situaties. De best passende ellips treedt op bij $n = 1$, dat wil zeggen optimaal voor navigatiesystemen. Met andere woorden, fase (kleine λ) is beter dan code (grote λ).

Multipath

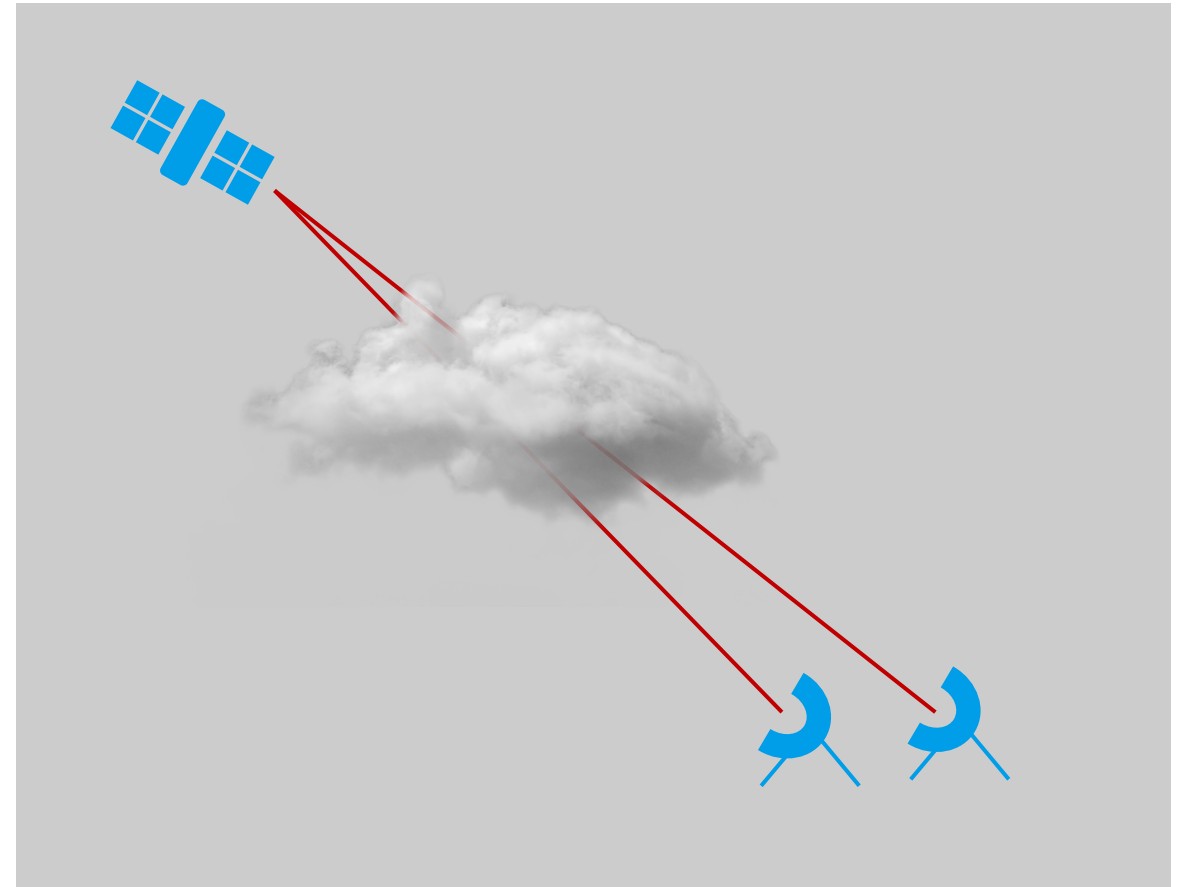
- Herhalende fase verschillen
- Hier van GPS PRN 1 binnen 4 dagen



(Park et al. ION 2002)

Gecorreleerde fouten

- Fouten gecorreleerd in de tijd (klok fouten) of in de ruimte (atmosferische fouten)
- En hoe gaan we met deze fouten om? En nu wordt het interessant...

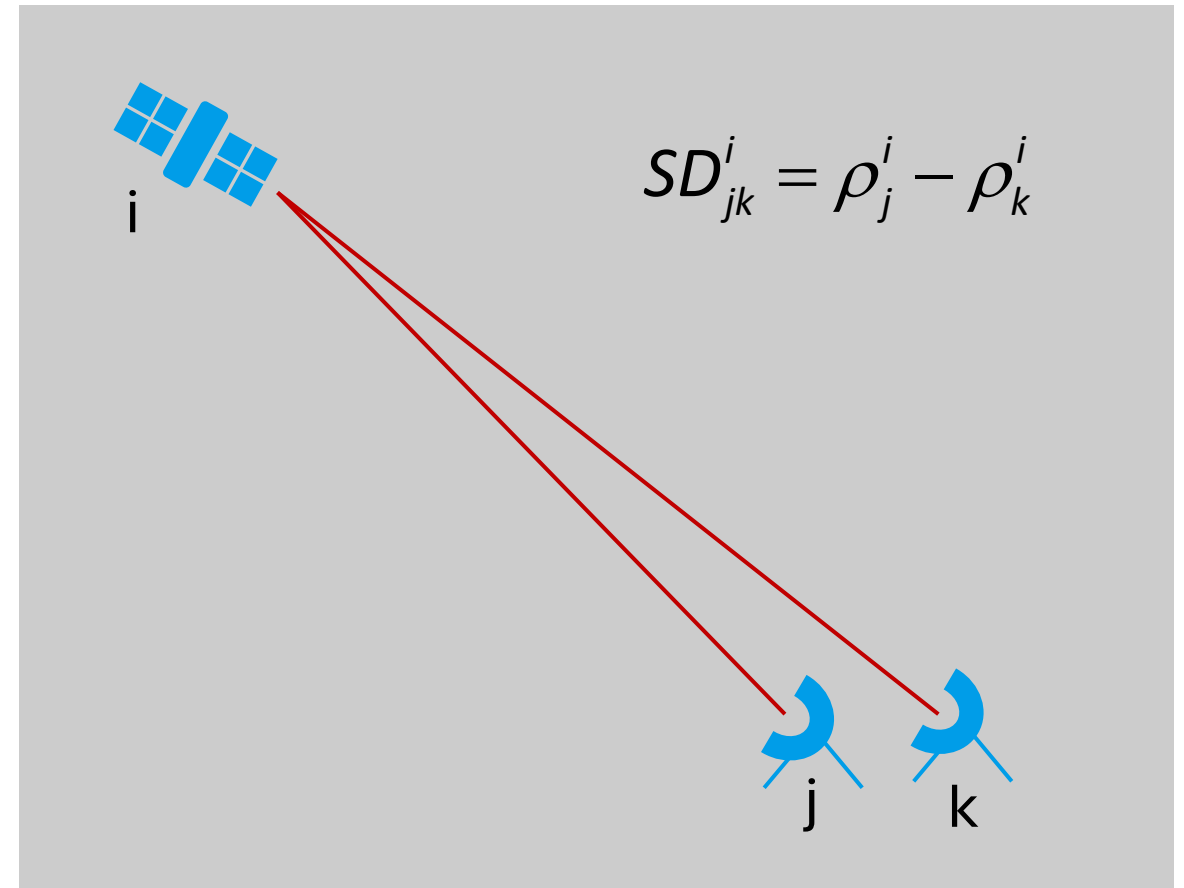


Single difference

Wat verdwijnt er in het verschil?

- A. receiver clock,
- B. satellite clock,
- C. satellite orbit,
- D. atmospheric errors,
- E. measurement noise,
- F. multipath

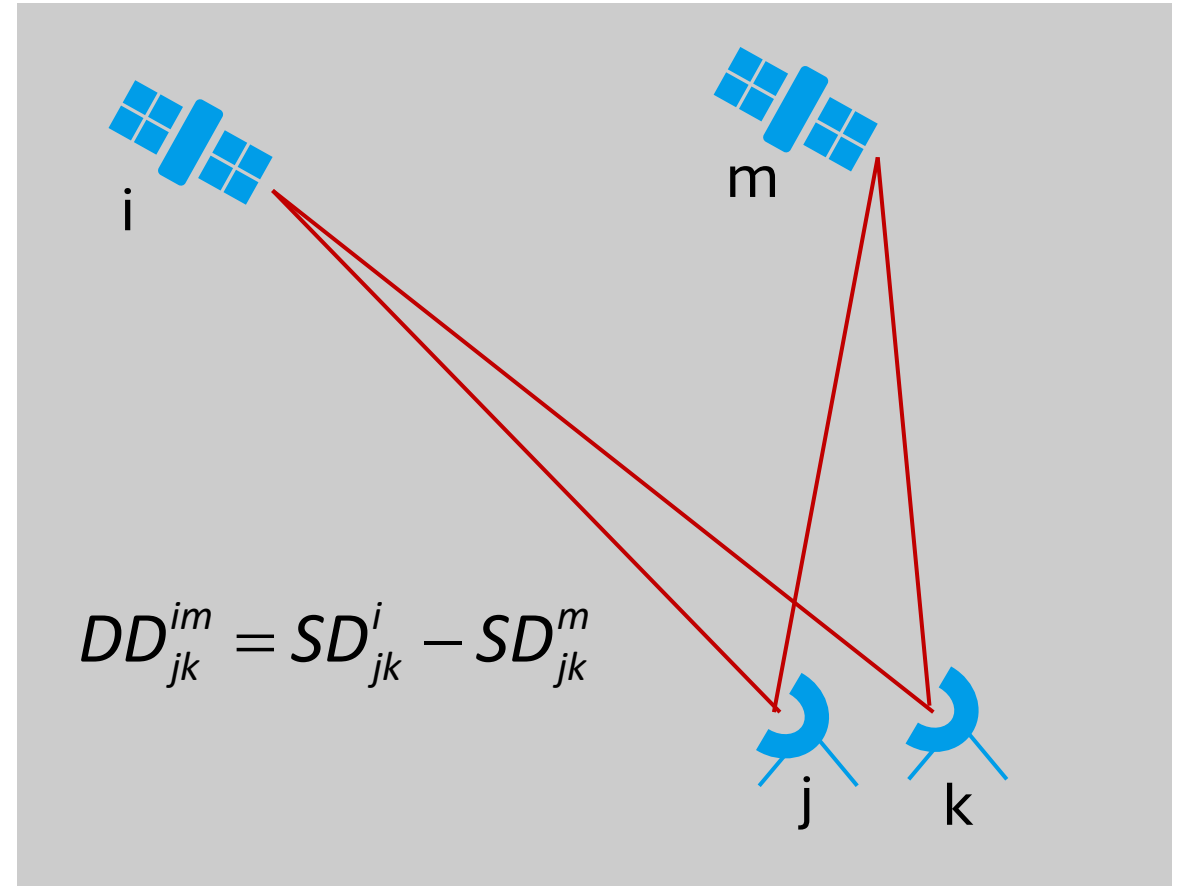
Roept u maar



Double difference

Je mag weer raden:

- A. receiver clock,
- B. satellite clock,
- C. satellite orbit,
- D. atmospheric errors,
- E. measurement noise,
- F. multipath



Nauwkeurigheid GNSS na differencing

Hangt er vanaf wat we doen

Groen : Navigatie oplossing C/A

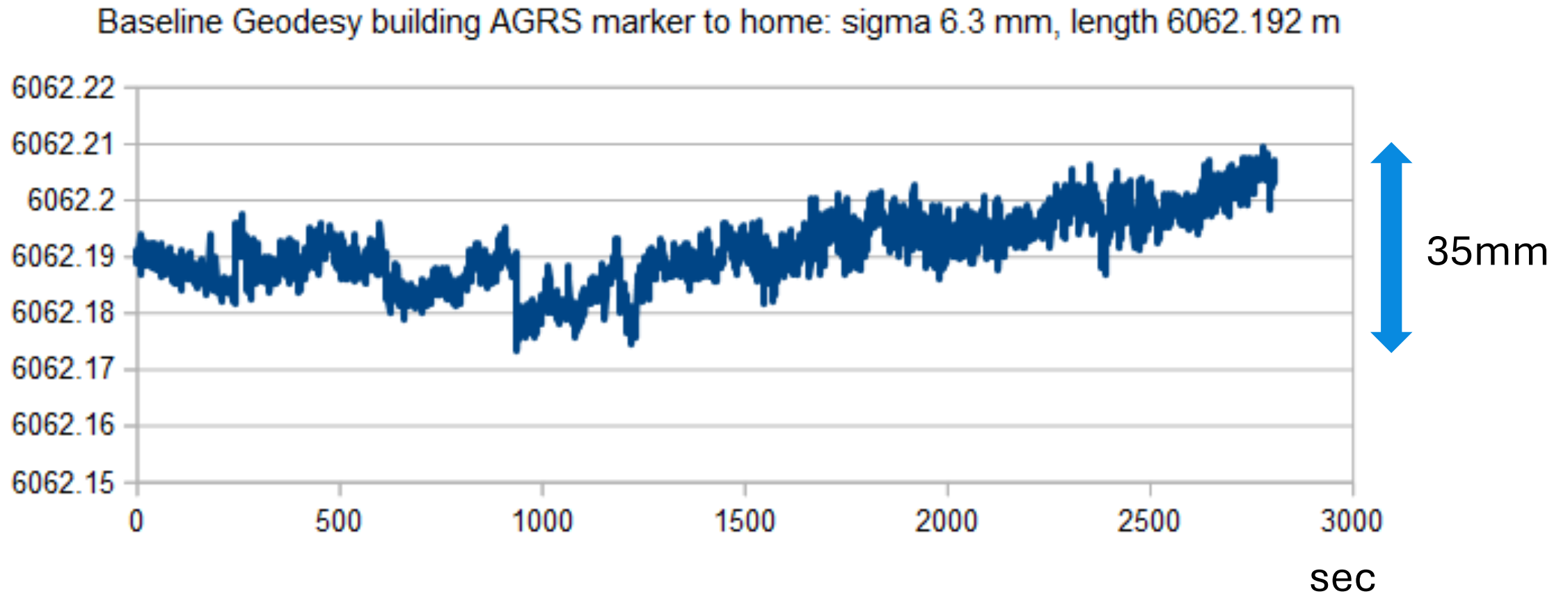
Rode stip : Double difference carrier phase oplossing naar de NTRIP caster op de TU Delft

Eenvoudige processing: U-blox software, geen verbetering in de satelliet banen of andere info



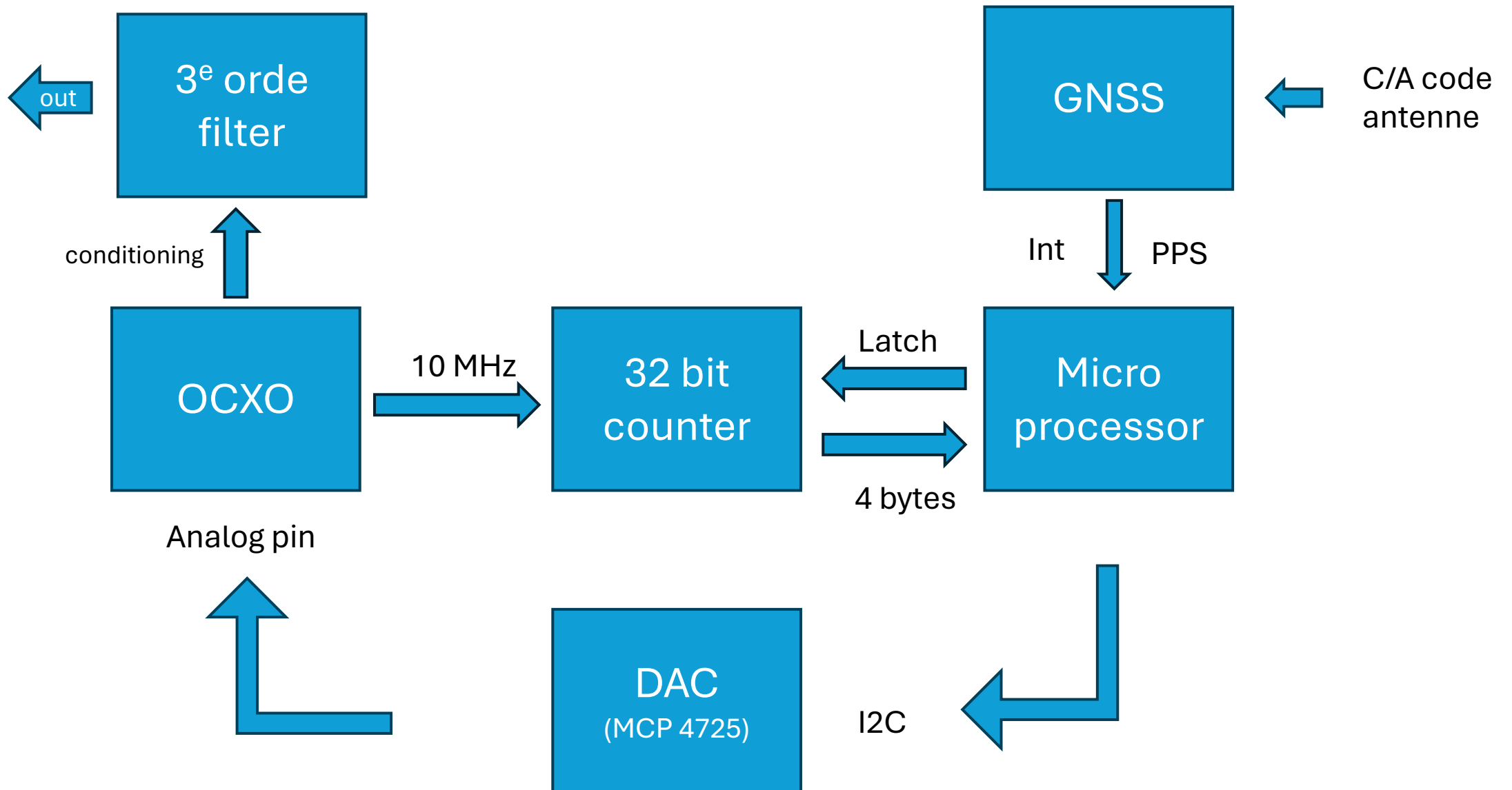
Beweging in het midden van de rode stip

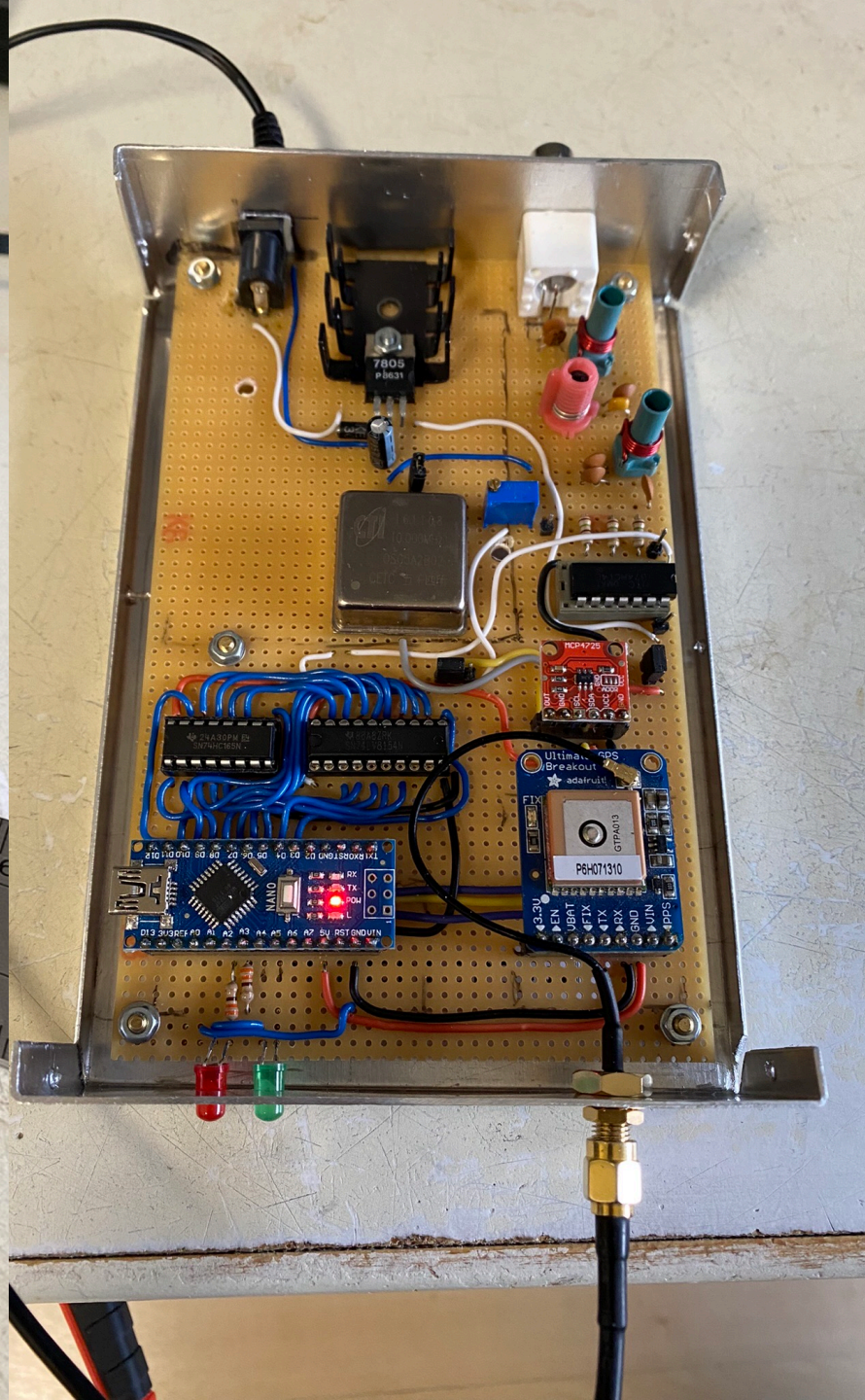
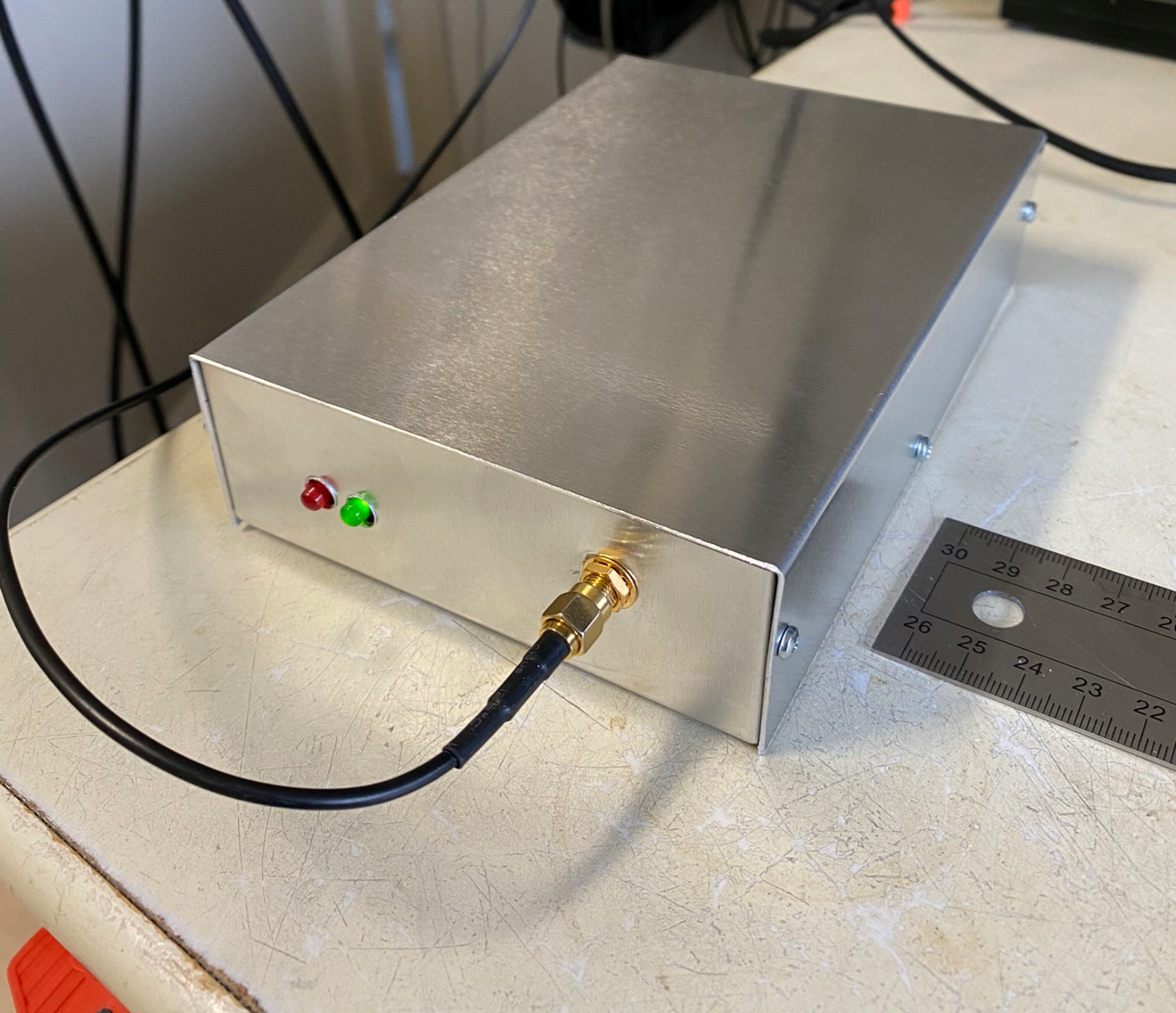
m



10 MHz referentie frequentie

- Veel meetapparatuur → externe ingang voor 10 MHz
- Boven de 1 GHz frequentie wordt de nauwkeurigheid van de lokale oscillator een steeds moeilijker verhaal
- Op QO100 hebben we een uplink op 2.4 GHz en een downlink op 10.5 GHz voor de NB transponder
- Met $df/f = 10^{-9}$ binnen 10 minuten heb je een acceptabel systeem
- 10^{-9} komt overeen met 30cm, vrij goed voor een C/A ontvanger
- 10^{-9} komt overeen met 10 Hz bij 10 GHz (goed voor CW SSB QSO)
- Oplossing, neem een OCXO en vergelijk met de 1 PPS van GNSS



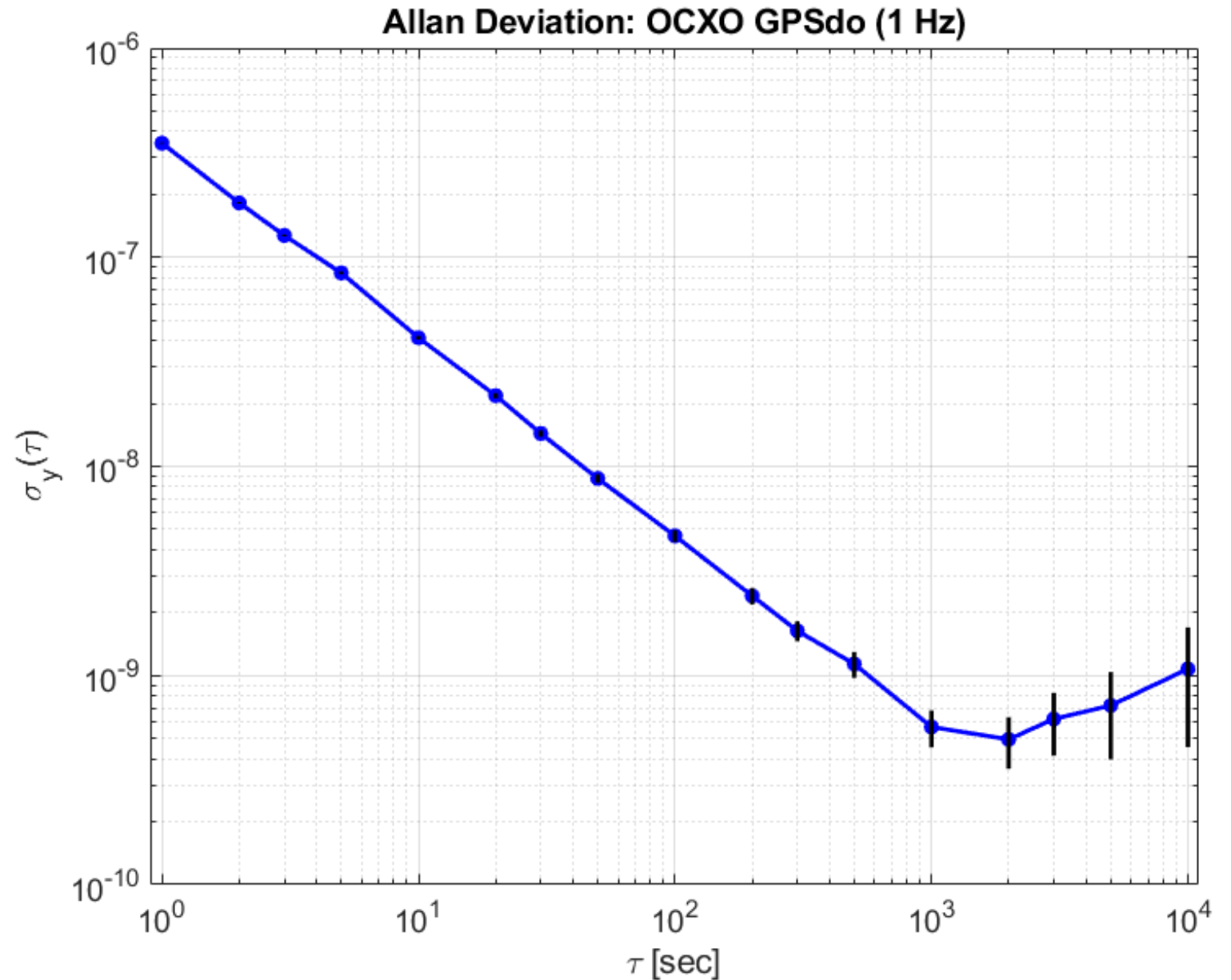


Frequentie fout $\frac{\Delta f}{f}$ tegenover, de tijd nodig om het te berekenen.

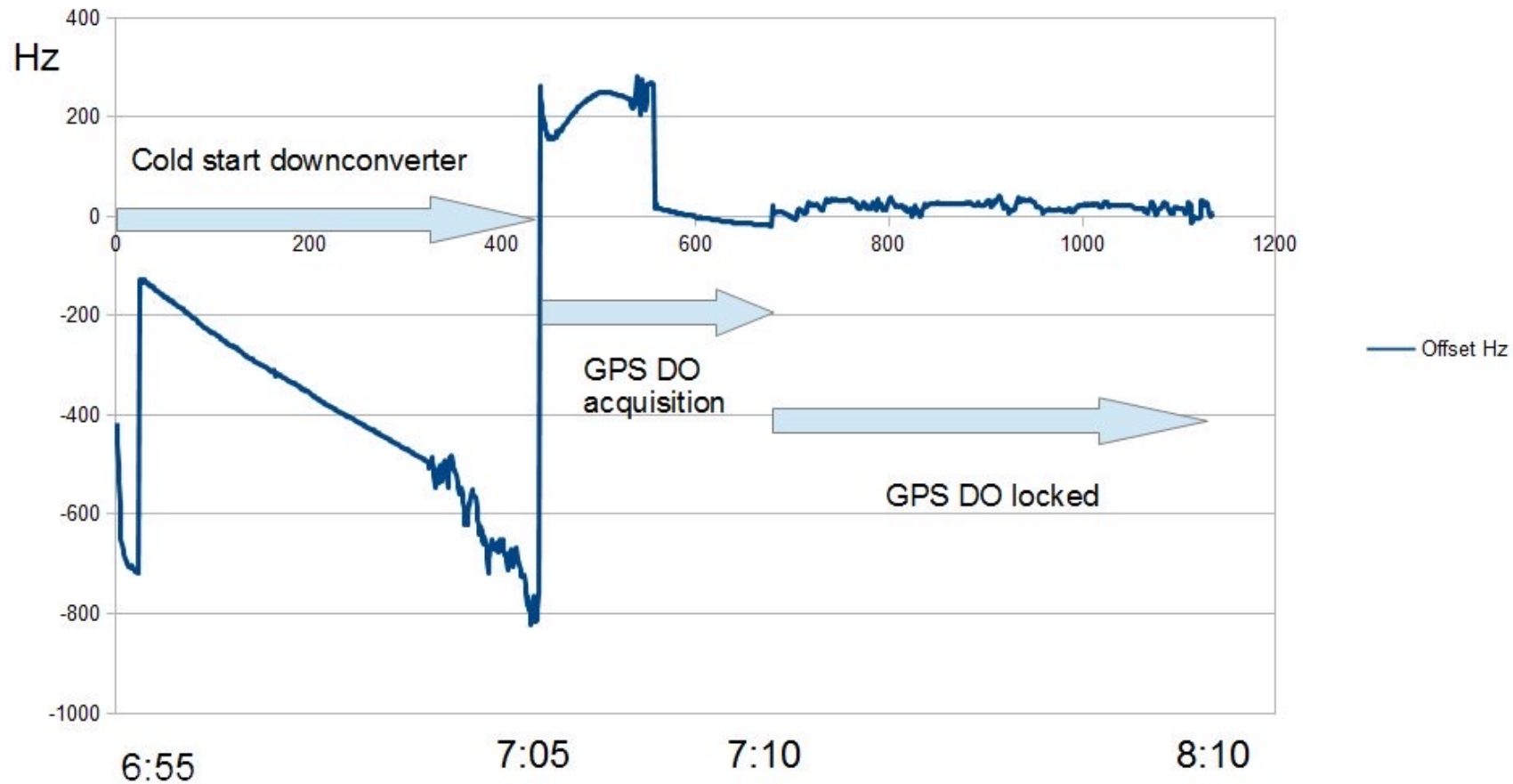
Deze grafiek is uitgerekend door de stuurspanning van de OCXO vast te houden en de drift verschillen eenmalig te minimaliseren.

De aanname is dat GNSS de perfecte tijd levert, natuurlijk is dit niet zo.

Grootste stoorbron is hier de manier waarop de Arduino interrupts afhandelt.



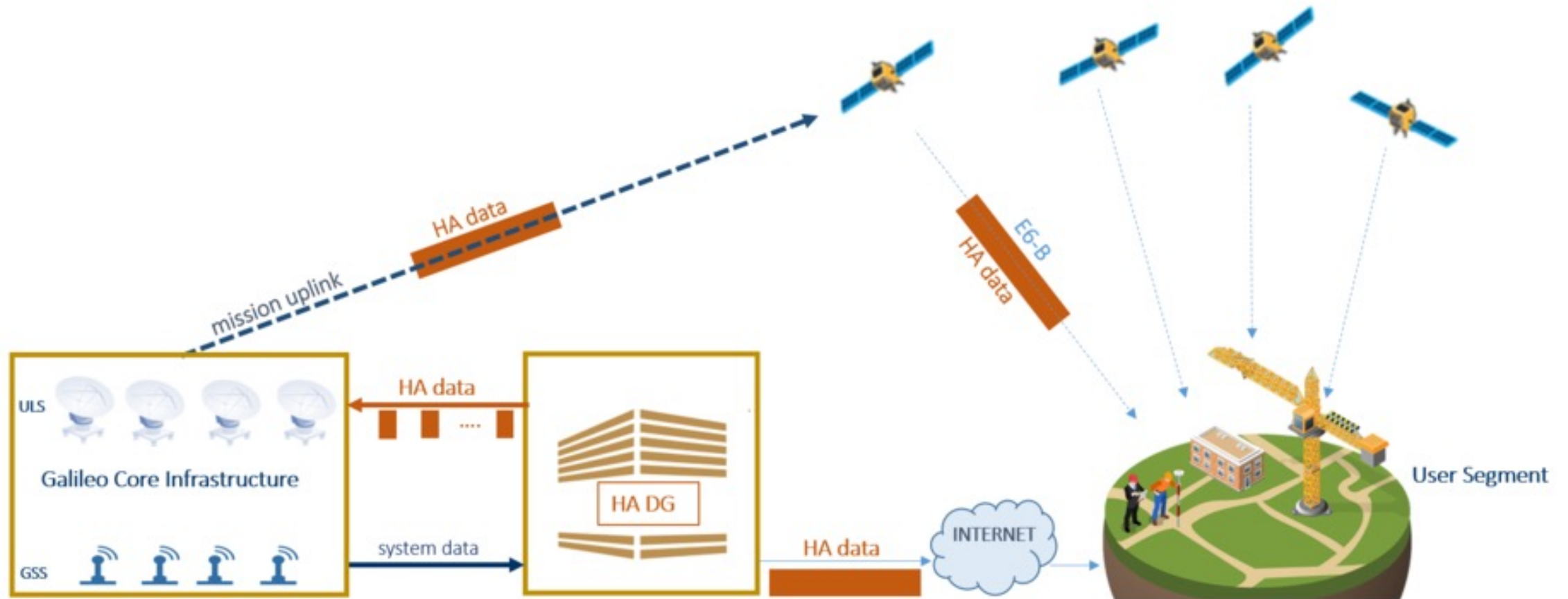
Effect GNSS DO on QO100



Oorspronkelijk GPS vs huidige GNSS

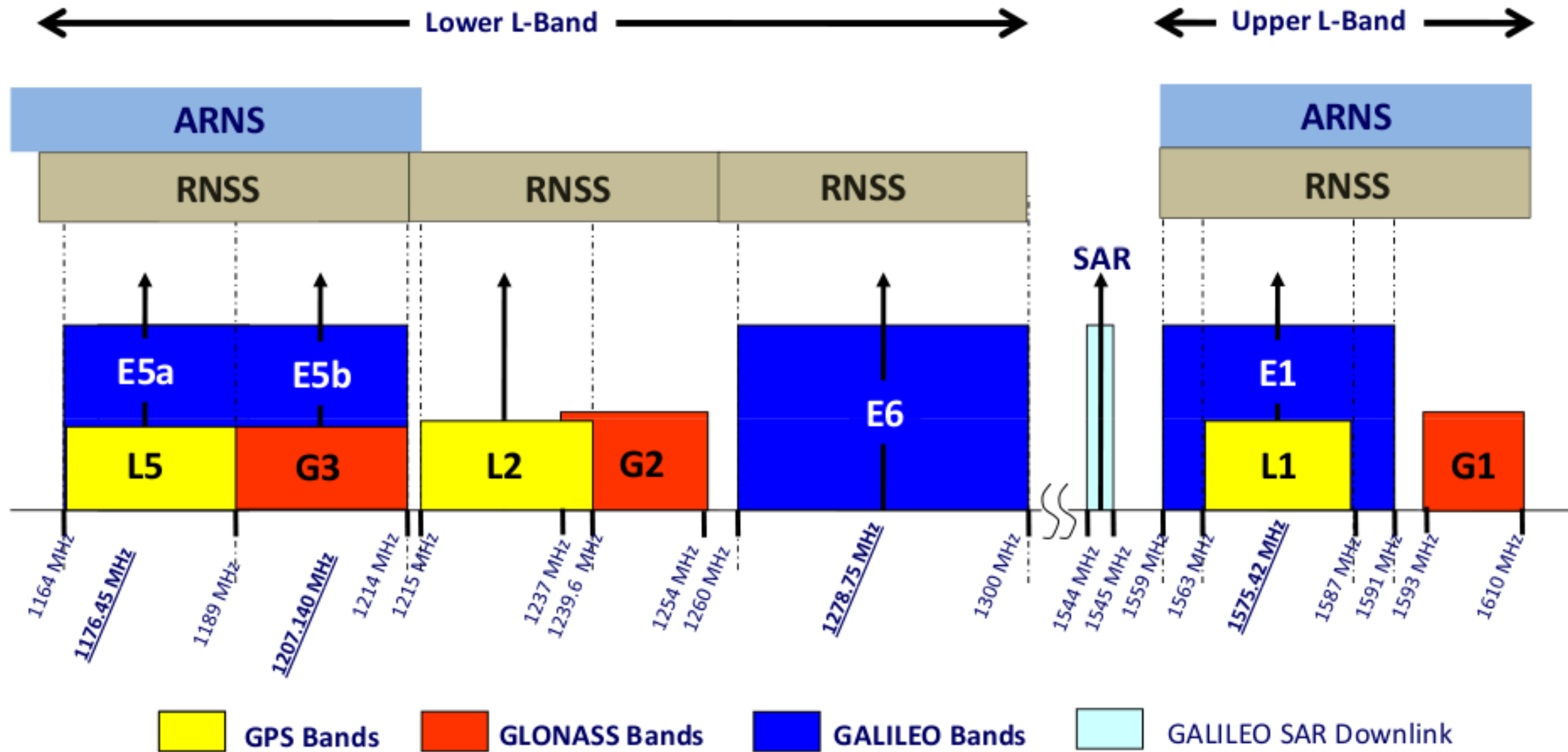
- Militair en stand alone
- Selective availability en spoofing, militaire eisen waren leidend,
- De politiek kreeg er genoeg van en president Clinton heeft ingegrepen, SA en AS gingen uit.
- Alleen universiteiten etc deden carrier phase processing
- Meerdere satelliet systemen
Glonass, Galileo, Beidou, EGNOS, en WAAS
- QZSS kwam er ook bij
- Betere kwaliteit voor diverse civiele toepassingen
- Real-time 20 cm voor iedereen die Galileo gebruikt
- Het systeem minder gevoelig maken voor jamming

Galileo High Accuracy Service (HAS)



Galileo High Accuracy Service

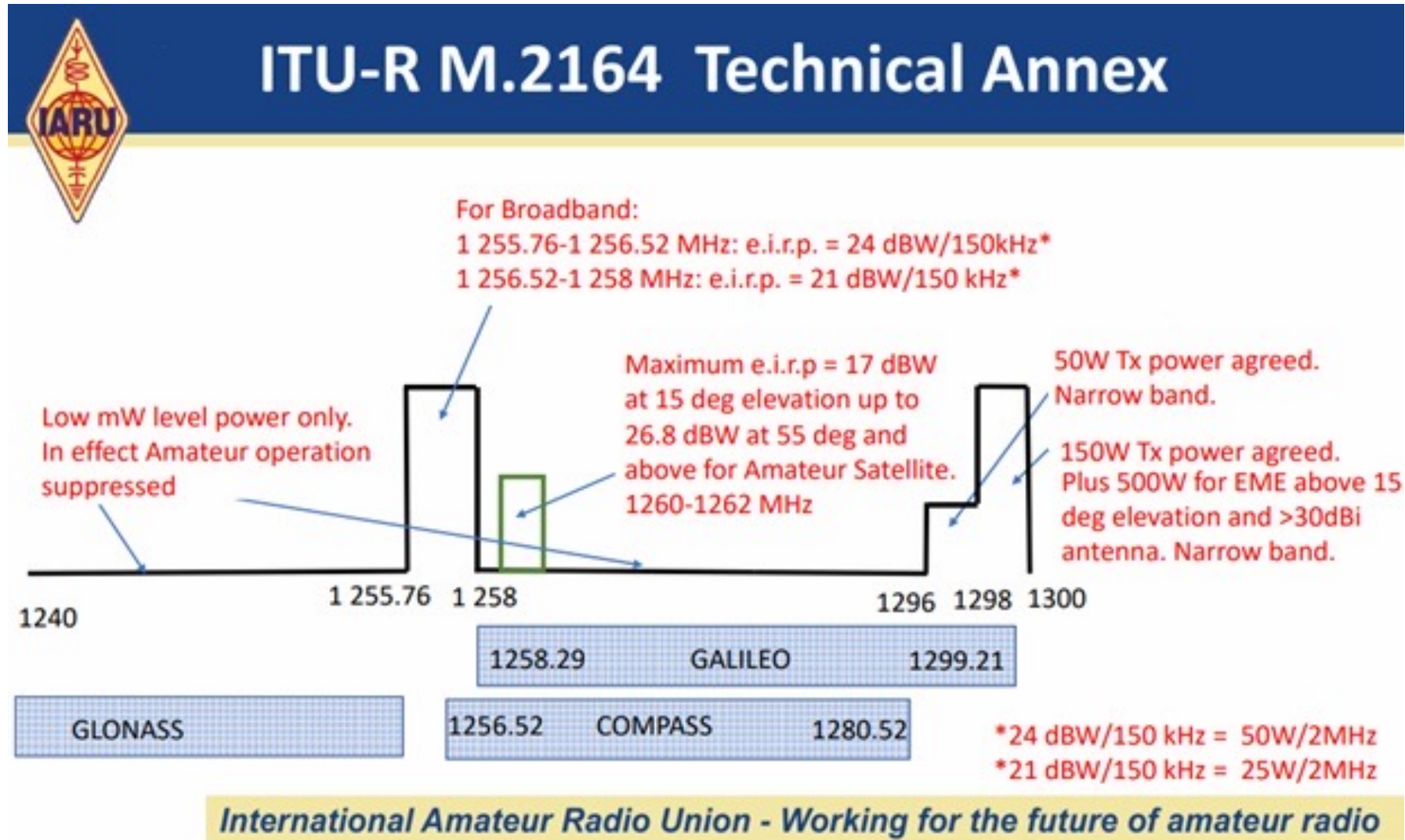
- HAS gaat alle klokfouten en banen zo goed mogelijk bepalen en correcties uitzenden via de satellieten
- Wie heeft baat bij Galileo HAS? Hydro International Artikel <https://www.hydro-international.com/content/article/who-will-benefit-from-the-galileo-high-accuracy-service>
- Hoe Galileo HAS verkocht werd: https://www.esa.int/Applications/Navigation/New_Galileo_service_set_to_deliver_20_cm_accuracy



ARNS : Aviation Radio Navigation Service

RNSS : Radio Navigation Satellite Service

23cm band outcome approved at the 7th Plenary meeting of WRC-23 (EI7GL)



Repeaters

1298.625 PI6RTD
Shift -28 MHz
Krijg ik de repeater
met 100 mW open?

EME

Blijf onder de 50 tot
150 Watt

ATV

Niet meer doen

Tenslotte

- Voor RZAM: wat worden de nieuwe richtlijnen?
- Of Nederland zegt: niets geen E6 mode, dit soort toepassingen (bv geadverteerd voor zelfrijdende auto's), willen we niet. Gebruik je telefoon maar met een aparte dataverbinding
- Of Nederland zegt: we implementeren de Europese richtlijnen, alles op non-interference basis, in dat laatste geval komen er op een gegeven moment beperkingen.
- RZAMs: we zijn secondaire gebruikers tussen 1240 en 1300 MHz, er is nog geen sprake van dat we iets opgeven