



1 GPS bij HiSPARC

Bij HiSPARC is het belangrijk dat we van ieder meetstation precies weten waar het zich bevindt en op welk moment het iets meet. Voor zowel de tijd als positie bepaling gebruiken we GPS. In dit document wordt uitgelegd wat GPS is, waarom we het gebruiken, hoe de GPS bij een HiSPARC meetstations moet worden afgesteld en gekalibreerd en waarom we voor bepaalde instellingen hebben gekozen.

2 Het Global Positioning System

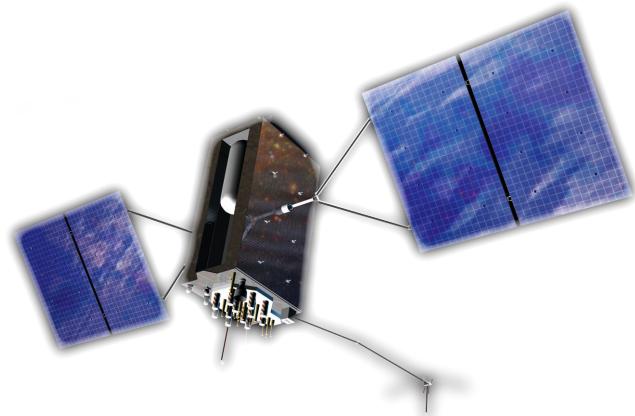
GPS staat voor Global Positioning System; een satelliet systeem voor wereldwijde plaatsbepaling. Het bestaat uit een groep satellieten die radiosignalen uitzendt waarmee het mogelijk is om wereldwijd te bepalen waar je bent [1]. Het Amerikaanse project is in 1973 begonnen. De uitvinding van het systeem wordt toegekend aan Roger L. Easton [2]. Sinds 1994 is het systeem actief. GPS bestaat momenteel uit 31 satellieten die in banen rond de aarde zijn gebracht. In Figuur 2.1 is een voorbeeld tekening van zo'n GPS satelliet weergegeven. Elke GPS satelliet zit in een baan van ongeveer 20 200 km boven de aarde. Elke satelliet cirkelt in 12 uur om de aarde en zal daardoor (de aarde draait immers zelf ook) elke 24 uur boven dezelfde plek op aarde zijn. Er zijn ook een aantal tegenhangers van GPS ontwikkeld, namelijk het Russische GLONASS en het Europese Galileo¹. Tegenwoordig wordt GPS door bijna iedereen gebruikt. Zo zitten er GPS ontvangers in onder andere telefoons, auto's en ook de HiSPARC elektronica.

3 Klokken

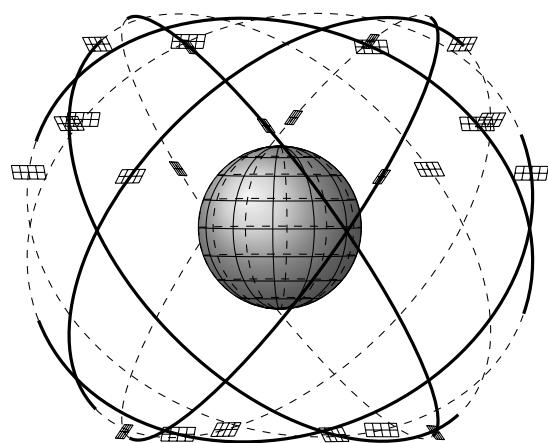
Vroeger gebruikte men de zon en sterren om een ruwe schatting te maken van de tijd [3]. Vanaf de dertiende eeuw werd er in Europa gebruik gemaakt van mechanische uurwerken, maar deze waren zo onnauwkeurig dat ze elke dag aan de hand van de stand van de zon moesten worden bijgesteld. In 1656 werd door Christiaan Huygens het slingeruurwerk uitgevonden. Deze was tot op een aantal seconden nauwkeurig over een aantal dagen. Zo'n 10 jaar later ontwierp hij een klok met een spiraalveer die in kleinere uurwerken gebruikt kon worden; zo kon men ook een nauwkeurigere tijd bij zich dragen.

Het bijstellen van de openbare klokken werd binnen een stad vaak door een lokale klokkenmaker gedaan; er was nog geen algemene tijd. Dit betekende dat er tussen de meeste steden een tijdsverschil was. Naarmate de nauwkeurigheid van de klokken toenam werd het interessanter om betere tijd afspraken te maken binnen een land. Zo werd in veel Europese landen de middelbare zonnetijd gebruikt. In Nederland was daar nog weerstand tegen omdat niet elke gemeente over de financiële middelen beschikte om de nauwkeurigere klokken aan te schaffen.

¹Dit systeem is nog niet compleet, maar wordt verwacht binnen een paar jaar operationeel te zijn.



Figuur 2.1 – Concept tekening van de volgende generatie GPS satellieten genaamd GPS Block IIIA. De eerste hiervan wordt in 2014 gelanceerd. Deze zullen een aantal nieuwe signalen uitzenden en meer zendkracht hebben. Dit moet leiden tot hogere nauwkeurigheid voor de gebruikers.



Figuur 2.2 – Dit is een schematische weergave van de banen van de GPS satellieten rond de aarde. De satellieten zijn verdeeld over 6 verschillende banen.

Mogelijkheden voor snellere communicatie over langere afstanden (telegraaf) en sneller reizen (spoorwegen) maakte het halverwege de negentiende eeuw noodzakelijk om bijna overal in Nederland de middelbare tijd van Amsterdam aan te houden. Toch was er nog lang onenigheid over welke tijd precies aangehouden moest worden. Uiteindelijk werd in 1908 een wet aangenomen in Nederland, die stelde "De wettelijke tijd in Nederland is de middelbare zonnetijd van Amsterdam" (Staatsblad 1908/236). Later kwamen er Europese en wereldwijde afspraken over tijdstones, zomer- en wintertijd.

Tegenwoordig wordt de tijd bijgehouden door atoomklokken, uitgevonden door de Amerikaanse National Institute of Standards and Technology (NIST). Het NIST heeft een klok die zo nauwkeurig is dat het in 100 miljoen jaar nog geen seconde verkeerd zal lopen [7].

GPS doet niet mee aan zomer- en wintertijd, en ook niet aan de schrikkelseconde². Dit betekent dat de GPS precies het aantal seconden sinds 1 January 1970 aangeeft. In het verleden werkte HiSPARC met UTC-tijd, maar dat had als nadeel dat vanwege de schrikkelseconden een tijdstempel twee keer kon voorkomen. Daarom wordt voor HiSPARC nu gebruik gemaakt van GPS-tijd.

4 Tijd en positie bepaling

Bij HiSPARC is het belangrijk dat we van ieder meetstation weten waar het zich bevindt en precies op welk moment het iets meet. Deze gegevens zijn namelijk nodig om te bepalen of verschillende meetstations dezelfde shower hebben gemeten hebben en voor het uitvoeren van richting en energie reconstructie. De meetstations liggen te ver uit elkaar om de onderlinge posities met een meetlint en kompas te bepalen. Ook is het niet mogelijk om de stations zo aan elkaar te koppelen dat hun klokken tot op een aantal nanoseconden nauwkeurig gelijk staan.

Je eigen positie in 3 dimensies kun je bepalen als je de afstanden weet ten opzichte van 3 bekende posities. Deze methode heet trilateratie. Je zal dan namelijk 2 mogelijke posities vinden die precies die 3 afstanden heeft tot de andere posities. Van deze twee posities is er maar één logisch.

Hieronder zijn de vergelijkingen te zien die horen bij de trilateratie methode. Eerst voor 1, dan voor 2 en tenslotte voor 3 dimensies. Er komt steeds een onbekende coördinaat bij. Omdat er ook steeds een vergelijking bij komt is het stelsel vergelijkingen telkens op te lossen. Voor het 1 dimensionale geval kun je veronderstellen dat je ergens op een lijn staat, bijvoorbeeld de x -as. Jouw onbekende positie is dan x . Als je de absolute afstand d_1 tussen jou en een ander punt x_1 op dezelfde lijn weet, dan kan je x vinden door de volgende vergelijking op te lossen:

$$d_1^2 = (x_1 - x)^2 \tag{4.1}$$

Hier zijn twee oplossingen voor, namelijk $x = x_1 + d_1$ en $x = x_1 - d_1$. In 2 dimensies komt er een tweede onbekende coördinaat bij, y . Als je alleen de afstand d_1 tot een ander punt weet is de oplossing voor x en y een cirkel met middelpunt (x_1, y_1) en straal d_1 . De afstand d_2 tot een tweede punt (x_2, y_2) is dus noodzakelijk om je positie te bepalen. Dan onstaat het volgende stelsel

²Een extra seconde die af en toe aan de tijd wordt toegevoegd ter correctie van het verschil tussen de zonnedag en de 24 uur die als dag gezien wordt.

vergelijkingen:

$$\begin{aligned} d_1^2 &= (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 \\ d_2^2 &= (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Het stelsel heeft twee mogelijke oplossingen (de snijpunten van de twee cirkels). In 3 dimensies willen we ook onze z coördinaat bepalen. Het stelsel vergelijkingen wordt dan:

$$\begin{aligned} d_1^2 &= (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 \\ d_2^2 &= (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2 \\ d_3^2 &= (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

In deze 3 vergelijkingen zijn x , y en z de 3 onbekenden. Ook nu zijn er 2 mogelijke oplossingen (de snijpunten van 3 bollen).

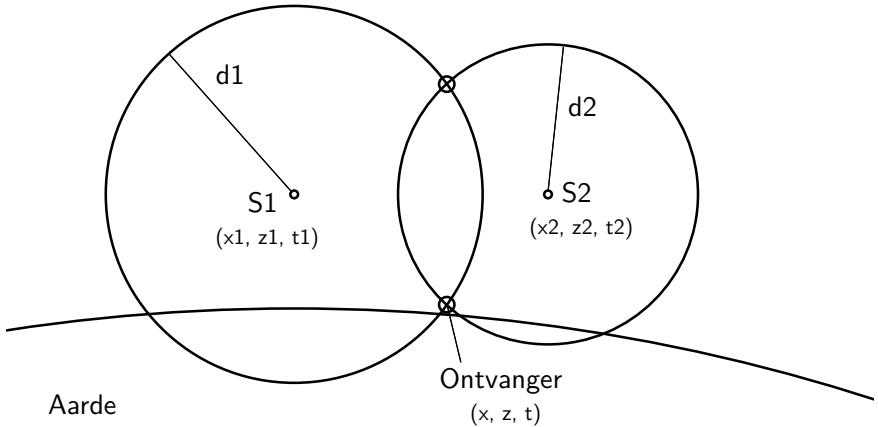
Bij GPS wordt, uiteraard, geen meetlint tussen de ontvanger en de satelliet gespannen om achter de 3 benodigde afstanden te komen. In plaats daarvan kijkt de ontvanger naar het tijdverschil tussen de tijd waarop de GPS satelliet het signaal uitzendt en de tijd waarop hij dit signaal ontvangt [5]. Als dit tijdverschil vermenigvuldigd wordt met de lichtsnelheid (radiosignalen gaan met de lichtsnelheid) heb je een afstand. De GPS satellieten zenden ook een datapakket uit waarmee de posities van alle GPS satellieten op een bepaalde tijd te bepalen valt. De positie van een GPS satelliet hangt dus af van de tijd waarop een satelliet een signaal uitzendt. Het is echter nog onzeker of de tijd op de klok van de ontvanger correct is. Om deze extra onbekende op te lossen is het signaal van een 4e satelliet nodig. Het stelsel van vergelijkingen wordt daardoor als volgt:

$$\begin{aligned} d_1^2 &= (c(t_{s,1} - t_{r,1}))^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 \\ d_2^2 &= (c(t_{s,2} - t_{r,2}))^2 = (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2 \\ d_3^2 &= (c(t_{s,3} - t_{r,3}))^2 = (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2 \\ d_4^2 &= (c(t_{s,4} - t_{r,4}))^2 = (x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + (z_4 - z)^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Eigenlijk volgen hier ook 2 mogelijke posities uit, maar meestal bevindt de ontvanger zich op de Aarde, en zal de oplossing het dichtst bij de Aarde is dan logischerwijs de correcte oplossing. Deze situatie is in 2D geschetst in Figuur 4.1.

5 Tijd bepaling

Als de ontvanger eenmaal zijn eigen positie precies weet, dan kan die met één satelliet al een precieze tijd bepalen. Dan hoeft namelijk alleen de afstand tot die satelliet bepaald te worden om zo de reistijd van het signaal te bepalen. Door die tijd op te tellen bij de tijd van het signaal volgt daar de tijd bij de ontvanger uit. Toch worden vaak meerdere satellieten gebruikt om de tijd nauwkeuriger te krijgen. De reden hiervoor is dat onder andere de atmosfeer ook effect kan hebben op het signaal, de signalen van verschillende satellieten gaan door verschillende stukken van de atmosfeer, door dus gebruik te maken van meerdere satellieten kunnen deze effecten uitgemiddeld worden.



Figuur 4.1 – Dit is een schematische weergave van trilateratie met GPS signalen. In dit voorbeeld is de y -as weggelaten. De satellieten ($S_{1,2}$) sturen signalen uit waar hun tijd en posities in zitten. De posities van de satellieten zijn dus bekend. De afstanden $d_{1,2}$ zijn te bepalen met behulp van het tijdverschil tussen $t_{\text{verzonden}}$ en $t_{\text{ontvangst}}$, als de tijd bij de ontvanger niet accuraat is is een extra satelliet nodig. Met deze afstanden zijn twee punten te vinden die die afstanden tot de satellieten hebben, maar er is er maar één op de Aarde!

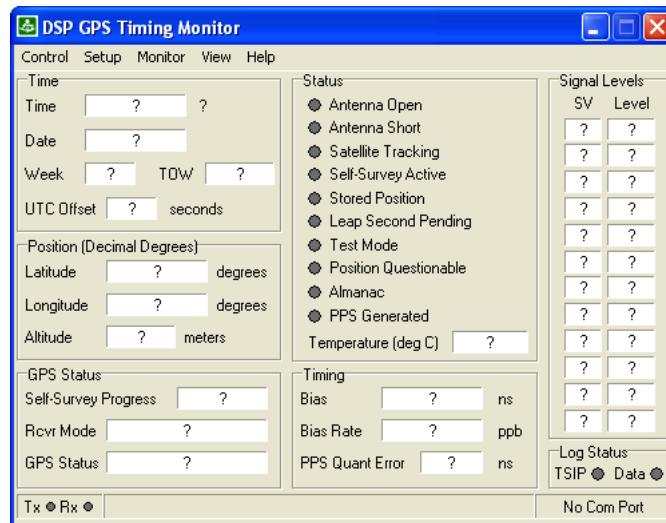
Elke GPS satelliet heeft een zeer nauwkeurige cesium of rubidium atoomklok aan boord die heel nauwkeurig de tijd kan bijnouden. Ook nauwkeurige atoomklokken zijn onderworpen aan de wetten van de relativiteitstheorie. Enerzijds worden de klokken in GPS satellieten iets vertraagd, omdat ze rond de aarde bewegen met zo'n 14 000 km/h. Anderzijds worden de klokken in GPS satellieten iets versneld, vanwege de kromming van de ruimte door de zwaartekracht. Netto lopen de klokken in de GPS satellieten per dag zo'n 38 μs op ons voor. Hier wordt natuurlijk voor gecorrigeerd [6]. Dit levert uiteindelijk een signaal op waarmee we tot 10 ns nauwkeurig het begin van een seconde kunnen aangeven op aarde. De meeste GPS modules geven een PPS af, een Pulse Per Second, dus elke seconde geven ze aan dat die seconden begonnen is. In de HiSPARC elektronica wordt deze PPS gebruikt om de interne klok te synchroniseren. Tussen de hele seconden wordt de tijd bij gehouden met een 200 MHz klok. Deze klok wordt op een slimme manier gebruikt wat uiteindelijk leidt tot een nauwkeurigheid van $\sigma_t \sim 4,5 \text{ ns}$ [8].

6 Instellingen

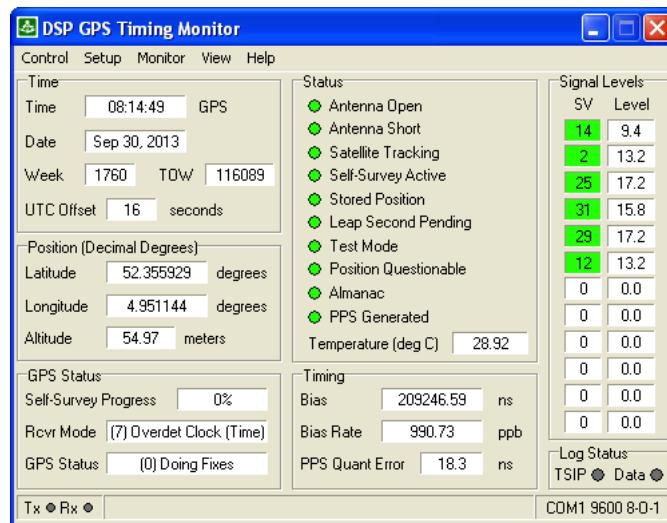
De HiSPARC Primary heeft een ingebouwde GPS module. De instellingen van de GPS worden in het kastje opgeslagen. Het is belangrijk om vóór gebruik, en af en toe tijdens gebruik, deze instellingen te controleren. Vooraf moet de GPS een zogenoemde *Self-Survey* uitvoeren om zijn positie vast te leggen zodat het mogelijk is de GPS als nauwkeurig tijdinstrument te gebruiken.

Het GPS monitor programma (DSPMon) is te vinden onder HiSPARC in het *Start* menu. Als in alle tekstvelden een vraagteken staat en de indicatielampjes op grijs staan, zoals in Figuur 6.1, dan heeft het programma de GPS nog niet gevonden. Rechts onderin het venster kan door rechts-klikken op *No Com Port* de juiste COM poort³ gekozen worden. Ga ze één-voor-één af, er is er slechts één die zal werken. Mocht het voorkomen dat er geen COM poorten te kiezen zijn terwijl

³De COM poort identificeert het apparaat waarmee de software praat.



Figuur 6.1 – Dit is het hoofdvenster van DSPMon als de COM poort niet goed staat.



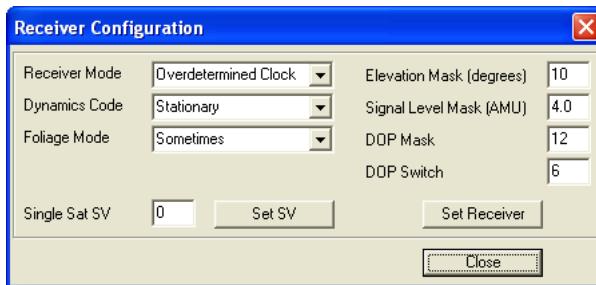
Figuur 6.2 – Het hoofdvenster van DSPMon met goed herkende GPS, en signaal van 6 satellieten.

alles wel aangesloten zit, kijk dan in de online documentatie⁴ over hoe dit opgelost kan worden. Als de goede COM poort gekozen is zal er meer informatie in het hoofdscherm verschijnen, zie Figuur 6.2.

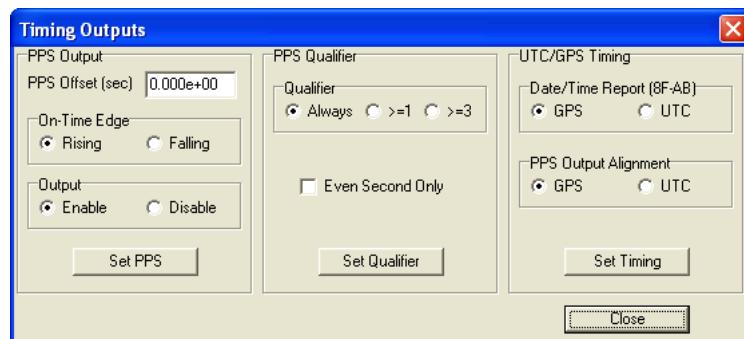
Controleer alle instellingen van de GPS (onder het *Setup* menu in DSPMon) en zorg ervoor dat ze nauwkeurig overeenkommen met de screenshots in de figuren 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 en 6.7. Onder de figuren staat beschreven waar de instellingen belangrijk voor zijn. Deze instellingen zijn in het programma te vinden onder het menu *Setup*. Als een instelling aangepast moet worden, druk dan op de bijbehorende *Set* knop (soms meerdere per scherm) om de aanpassingen op te slaan en toe te passen.

Als de GPS antenne positie nog niet bepaald is moet deze met behulp van de Self-Survey gevonden worden. De Self-Survey kan gestart worden via het *Control* menu. Start hier de Self-Survey (na

⁴<https://docs.hisparc.nl/maintenance/known-issues.html#com-port-to-high>



Figuur 6.3 – In dit venster wordt gekozen hoe de GPS zich moet gedragen. Voor HiSPARC is het van belang dat de tijd heel nauwkeurig bepaald wordt en staat de GPS vast. Vandaar dat we kiezen voor *Overdetermined Clock* en *Stationary*. De *Elevation Mask* geeft aan dat satellieten minimaal 10 degree boven de grond moeten zijn om meegegenomen te worden, omdat het signaal van lage satellieten eerder verstoord is door de atmosfeer.



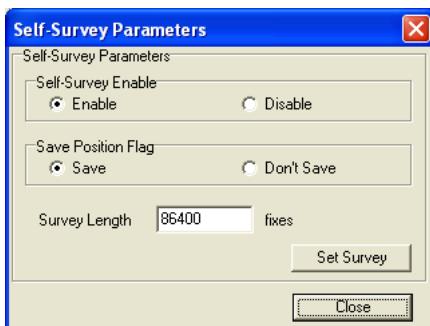
Figuur 6.4 – Hier worden de tijdsinstellingen gedaan. Het is zeer belangrijk om hier goed te controleren dat de GPS de GPS tijd geeft, en geen UTC-tijd.

deze ingesteld te hebben zoals in Figuur 6.5) en kom een dag later terug om het instellen af te maken! Vergeet niet na het bepalen van de positie om in de HiSPARC DAQ de DAQ mode uit en weer aan te zetten om zo de nieuwe positie door te geven. Bij het aanzetten van de DAQ mode wordt namelijk de configuratie van het meetstation verstuurd naar de server.

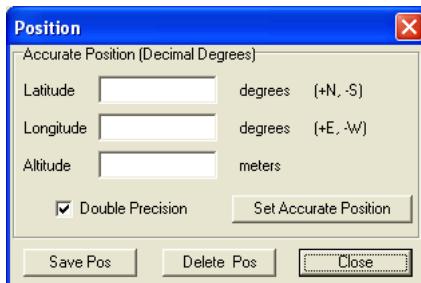
Na het instellen van de GPS en het doorlopen van de Self-Survey is in de HiSPARC DAQ als het goed is de GPS positie te zien en kan je in het Satellites tabblad de signaal sterktes van de satellieten zien. Dit is een grafiek waarin de kleur de sterkte van het signaal aangeeft, de *y*-as het satelliet nummer en de *x*-as de tijd (tot 2 dagen in het verleden). Na verloop van tijd zal er dus een grafiek zijn opgebouwd waarin je goed kan zien hoe GPS signalen zich gedragen over het verloop van de dag. In Figuur 6.8 is hier een voorbeeld van te zien.

Referenties

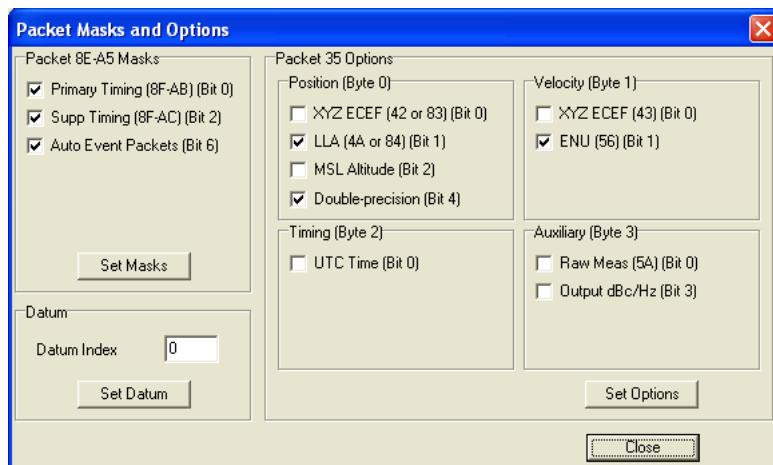
- [1] National Coordination Office (NCO), *Basics of the GPS Technique: Observation Equations* (2013),
<https://www.gps.gov/>.
- [2] R. Easton, *Who invented the Global Positioning System?* (2006),
<https://www.thespacereview.com/article/626/1>.



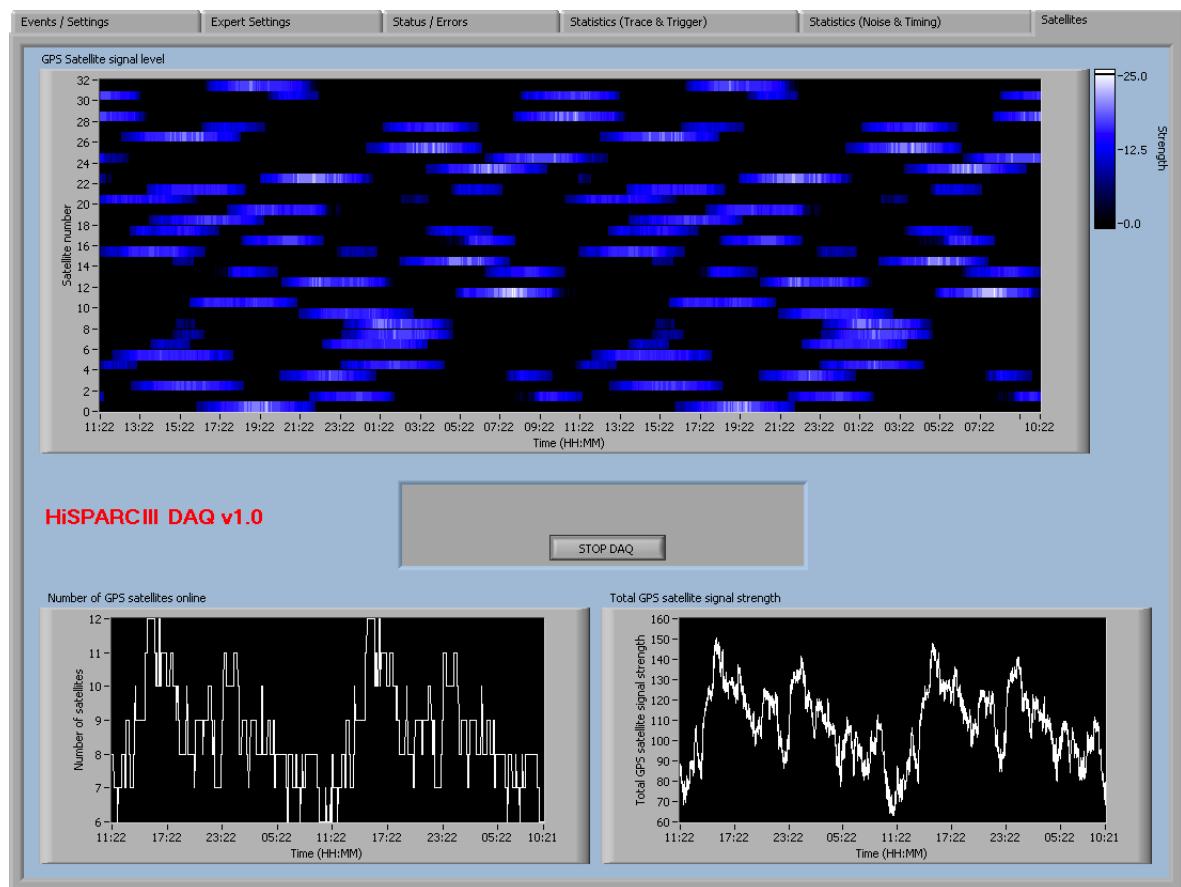
Figuur 6.5 – In dit venster worden instellingen voor de *Self-Survey* gemaakt. De Self-Survey wordt gebruikt om de positie van de GPS te bepalen. Hierbij middelt de GPS over alle posities gemeten tijdens de Self-Survey. Het is belangrijk dat deze lang genoeg duurt, namelijk één dag (dus 86 400 s). In paragraaf 2 is uitgelegd dat de posities van de GPS satellieten zich iedere ongeveer iedere 24 uur herhalen boven de aarde zich.



Figuur 6.6 – Dit venster kan gebruikt worden om een eerste schatting van de positie in te vullen, maar let hier mee op dat deze niet wordt vastgezet als definitieve positie. Het is veiliger om deze instellingen leeg te houden en de GPS zelf zijn positie te laten bepalen door middel van de Self-Survey.



Figuur 6.7 – De GPS kent vele opties waarvan een aantal door de HiSPARC software worden gebruikt. Controleer deze vinkjes goed.



Figuur 6.8 – In de HiSPARC DAQ kan men een overzicht zien van de sterkte van de satelliet signalen. Hier is duidelijk te zien dat het signaal zich iedere 24 uur herhaald.

- [3] R.H. van Gent, *De wettelijke tijdregeling in Nederland* (2003–2009),
<https://www.staff.science.uu.nl/~gent0113/wettijd/wettijd.htm>.
- [4] Het HiSPARC team, *HiSPARC software documentatie* (2009–2012),
<https://docs.hisparc.nl/station-software/doc/>.
- [5] G. Blewitt, *Basics of the GPS Technique: Observation Equations* (1997),
<https://www.nbmng.unr.edu/Staff/pdfs/Blewitt%20Basics%20of%20GPS.pdf>.
- [6] N. Ashby, *General relativity in the global positioning system* (1997),
<https://www.phys.lsu.edu/mog/mog9/node9.html>.
- [7] R. Easton, *NIST-F1 Cesium Fountain Atomic Clock* (2013),
<https://www.nist.gov/pml/div688/grp50/primary-frequency-standards.cfm>.
- [8] Trimble, *Resolution-T Data Sheet* (2007),
<https://tr1.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-550777/>.