

# ***Global Positioning System***



# ***Global Positioning System***

G.J. Husti

© VSSD

Eerste druk 2000-2007

Uitgegeven door:

VSSD

Leeghwaterstraat 42, 2628 CA Delft, The Netherlands

tel. 015 - 2782124, telefax 015 - 2787585, e-mail: [hlf@vssd.nl](mailto:hlf@vssd.nl)

internet: <http://www.vssd.nl/hlf/>

URL over dit boek: <http://www.vssd.nl/hlf/a030.htm>

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

*All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.*

NUR 930

Trefw.: global positioning system, GPS

ISBN-10 90-407-1977-2

ISBN-13 978-90-407-1977-6

# Voorwoord

Het boek “Global Positioning System” heb ik samengesteld ten behoeve van de basisstudie van de opleiding geodetisch ingenieur.

In 1989 was ik redacteur van “Navigatie en geodetische puntsbepaling met het Global Positioning System”. Dit boek is inmiddels verouderd. Begrijpelijk, want de ontwikkeling van GPS heeft in de laatste 10 jaar een enorme vlucht genomen. Bij de moderne meetmethoden van geodetische puntsbepaling (grondslag- en detailmetingen), navigatie, geodynamica, en Geografische Informatie Systemen, is GPS niet meer weg te denken.

Men vindt deze ontwikkeling ook terug in het onderzoek en onderwijs bij de Afdeling Geodesie. Het GPS-onderzoek is sterk uitgebreid en het aantal college-uren met GPS als onderwerp is aanzienlijk opgevoerd. In het onderwijs maken de studenten tegenwoordig reeds vanaf de basisstudie kennis met GPS. Er is dus behoefte aan een leerboek dat de elementaire begrippen van GPS behandelt. Daarnaast verwijs ik naar diverse uitstekende Engelstalige boeken, o.a. “GPS for Geodesy” van P.J.G. Teunissen en A. Kleusberg (Eds) uit 1998 (zie Referenties). Deze boeken zijn meer geschikt voor specialisatie in de eindstudie.

In Hoofdstuk 1 wordt GPS met de terrestrische radioplaatsbepalings-systemen vergeleken. Een overgang van 2-D naar 3-D. Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de basisbegrippen. De hoofdstukken 3 en 4 heb ik gedeeltelijk overgenomen van “Navigatie en geodetische puntsbepaling met het Global Positioning System”. De coördinatenstelsels in § 3.1 de en de satellietbanen in § 3.3 worden naar de beschrijving van B.H.W. van Gelder behandeld. Hoofdstuk 4, de invloed van de atmosfeer op het GPS-signaal, is naar de beschrijving van J.C. de Munck bewerkt en uitgebreid. Hierbij heb ik dankbaar gebruik gemaakt van de kennis van Frank Kleijer en Dennis Odijk, beiden werkzaam als promovendus bij de sectie Mathematische Geodesie en Puntsbepaling (MGP). Hoofdstuk 5 en Hoofdstuk 6 geven een overzicht van de toepassing van GPS, respectievelijk met code-afstanden (bijv. voor de navigatie) en fase-afstanden (voor precieze geodetische puntsbepaling). In Hoofdstuk 7 wordt de coördinatentransformatie behandeld, speciaal gericht op toepassing in Nederland. Sommige figuren en tabellen heb ik hiervoor met toestemming uit de HTW 1996 overgenomen. In Hoofdstuk 8 worden de permanente referentiestations t.b.v. GPS-metingen behandeld. In Hoofdstuk 9 tenslotte wordt GLONASS besproken, de Russische tegenhanger van GPS. Hierbij heb ik gebruik gemaakt van het (bewerkte) artikel van N.F. Jonkman: “Een inleiding tot GLONASS” (Geodesia, 1998/12).

Tenslotte bedank ik een aantal collegae voor hun bijdrage aan dit boek. Mijn bijzondere dank aan Piet Sluiter en de docenten van de sectie Mathematische Geodesie en Puntsbepaling: Kees de Jong, Frank Kenselaar, Hans van der Marel en Christiaan Tiberius voor het doornemen van concept-teksten en het doen van suggesties.

# Inhoud

|   |  |    |
|---|--|----|
| 1 | INLEIDING  | 9  |
| 2 | EEN OVERZICHT VAN GPS  | 14 |
|   | 2.1. Algemene kenmerken  | 14 |
|   | 2.2. GPS satelliet signaal. De uitgezonden datablokken   | 18 |
|   | 2.3. Decodering van de data  | 21 |
|   | 2.4. Overzicht van enkele basisbegrippen   | 22 |
|   | Fysische begrippen 22 / De meetbare grootheden 22 / Meting van<br>code-afstanden 23 / Fasemeting 24 / Frequentieverschuiving<br>(dopplereffect) 24 / Selective Availability (SA) 24 / Anti-Spoofing (A-<br>S) 24 / GPS-ontvangers 25 / Invloed van de atmosfeer 27 /<br>Meetmethoden van GPS 27 / Multipad 28 / Software 29 /<br>Foutenbronnen 29 / Satellietconstellatie 30 |    |
| 3 | COÖRDINATENSTELSELS, TIJDSYSTEMEN EN SATELLIETBANEN  | 33 |
|   | 3.1. Cartesische en ellipsoïdische coördinaten   | 33 |
|   | WGS-84 en ETRS coördinaatstelsels 35 / Topocentrisch<br>coördinaatsysteem 36 / Inertiaal coördinaatstelsel 36  |    |
|   | 3.2. Tijdsystemen  | 37 |
|   | Universele tijd en sterrentijd 37 / GPS-tijd 39  |    |
|   | 3.3. Satellietbaan   | 40 |
|   | Baanvlak van de satelliet 41 / Oriëntering van de baanellips 42  |    |
|   | 3.4. Broadcast Ephemeris   | 44 |
|   | Berekening van klokfout voor de satellieten 45   |    |
|   | 3.5. Berekening van de satellietcoördinaten uit Broadcast Ephemeris  | 45 |
|   | Data format 46   |    |
|   | 3.6. Precise Ephemeris   | 47 |
|   | 3.7. Yuma GPS Almanac  | 47 |
|   | 3.8. Omschrijving van enkele begrippen   | 47 |
|   | Precessie 47 / Nutatie 47 / Aardrotatie 48 / Poolbeweging 48   |    |
|   | 3.9. Voorbeeld van RINEX file  | 49 |
| 4 | INVLOED VAN DE ATMOSFEER   | 52 |
|   | 4.1. Inleiding   | 52 |
|   | 4.2. Geometrische optika   | 52 |
|   | 4.3. De troposfeer   | 54 |
|   | De brekingsindex in de troposfeer 54 / De troposferische vertraging naar<br>het zenit 55 / De troposferische vertraging in schuine richting 56 /<br>Standaardatmosfeer 58  |    |
|   | 4.4. De ionosfeer  | 58 |
|   | Inleiding 58 / De brekingsindex in de ionosfeer 58 / Groepslooptijd en   |    |

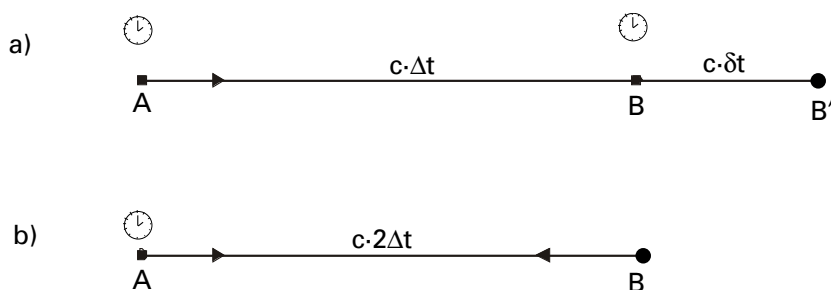
|   |   |     |
|---|---|-----|
|   | faselooptijd 59 / De ionosferische vertraging 60 / Consequenties van dispersie 62   |     |
|   | 4.5. Meting van korte basislijnen   | 63  |
|   | Schaaleffect 63 / Hellingseffect 64   |     |
| 5 | PLAATSBEPALING UIT CODE-AFSTANDEN   | 65  |
|   | 5.1. Inleiding  | 65  |
|   | 5.2. Het mathematische model  | 66  |
|   | 5.2.1. GPS-tijd, satelliet-tijd en ontvanger-tijd 66 / 5.2.2. Pseudoafstand uit code-meting 66 / 5.2.3. Pseudoafstand uit fasemeting 67             |     |
|   | 5.3. Plaatsbepaling uit code-afstanden  | 68  |
|   | 5.4. Invoering van geografische coördinaten als onbekenden  | 71  |
|   | 5.5. Toepassing van constraints voor de onbekenden  | 73  |
|   | 5.6. Invloed van de satellietconfiguratie   | 74  |
|   | 5.7. Kinematische toepassingen  | 75  |
|   | 5.8. Relatieve plaatsbepaling: Differentiële GPS (DGPS)   | 76  |
|   | 5.9. Kalman filter  | 82  |
| 6 | RELATIEVE POSITIE UIT FASEWAARNEMINGEN  | 84  |
|   | 6.1. Inleiding  | 84  |
|   | 6.2. Model van fase-afstanden   | 84  |
|   | 6.3. Covariantiematrix van de verschil-afstanden  | 87  |
|   | Covariantiematrix van de enkel-verschillen 87 / Covariantiematrix van de dubbel-verschillen 88 / Covariantiematrix van de drievoudig-verschillen 88 |     |
|   | 6.4. Cycle slips; detectie en reparatie   | 88  |
|   | 6.5. Lineaire combinatie van L1 en L2 fasewaarnemingen  | 90  |
|   | 6.6. Vereffening van fasewaarnemingen   | 92  |
|   | 6.6.1. Inleiding 92 / 6.6.2. Relatieve positie uit dubbel-verschillen 94  |     |
|   | 6.7. Oplossen van meerduidigheden   | 96  |
|   | 6.7.1. Inleiding 96 / 6.7.2. Oplossing van meerduidigheden met de LAMBDA methode 97   |     |
|   | 6.8. Meting van korte basislijnen (< 30 km)   | 100 |
|   | 6.8.1. Meetmethoden 100 / 6.8.2. Meetkundige grondslag met GPS 102 / 6.8.3. Detailmeting met GPS 105 / 6.8.4. Continu kinematische meting 110       |     |
| 7 | DATUMTRANSFORMATIE  | 114 |
|   | 7.1. Ruimtelijke transformatie met zeven parameters   | 114 |
|   | 7.2. Transformatie tussen ETRS89 (= WGS-84) en RD-stelsel   | 117 |
|   | 7.3. Getallenvoorbeeld voor transformatie   | 120 |
| 8 | REFERENTIESTATIONS  | 122 |
|   | 8.1. Inleiding: meetkundige grondslag   | 122 |
|   | ETRS89-RD 124 / Naar ETRS89-RD ? 124  |     |
|   | 8.2. Referentiestations voor DGPS metingen  | 125 |
|   | Radio Data System (RDS) 126 / Amplitude Modulated Data System (AMDS) 127 / Radiobeacons 127 / International Maritime Satellites                     |     |

|   |     |
|---|-----|
| (Inmarsat) 127  |     |
| 8.3. Permanente referentiestations voor fasemeting  | 128 |
| Actief GPS Referentie Systeem (AGRS) 128 / LNR Globalcom 130  |     |
| 9 OVERZICHT VAN GLONASS   | 131 |
| 9.1. GLONASS-GPS integratie   | 132 |
| 9.2. GLONASS ruimtesegment, besturingssegment en gebruikerssegment  | 134 |
| 9.2.1. GLONASS ruimtesegment 135 / 9.2.2. GLONASS<br>besturingssegment 137 / 9.2.3. GLONASS gebruikerssegment 139 |     |
| 9.3. GLONASS tijdsignaal en navigatieboodschap  | 140 |
| 9.3.1. Structuur GLONASS tijdsignaal 141 / 9.3.2. Inhoud GLONASS<br>navigatieboodschap 143                        |     |
| 9.4. Relatieve plaatsbepaling   | 147 |
| LITERATUUR  | 148 |
| INDEX   | 150 |



# 1 Inleiding

De ontwikkeling van radioplaatsbepaling begint na de tweede wereldoorlog met de terrestrische radioplaatsbepalingssystemen. Diverse terrestrische systemen werden ontwikkeld: Decca, Hifix, Loran-C, Pulse-8, Syledis, Omega etc. Elk systeem heeft specifieke eigenschappen met betrekking tot de gekozen frequentie van het radiosignaal. Het kenmerkende hierbij is de samenhang tussen frequentie, precisie en reikwijdte. Met een radiogolf van hoge frequentie kan men een hoge precisie verkrijgen, maar de reikwijdte is beperkt. Hoogfrequente radiosignalen hebben nu eenmaal een rechtlijnige voortplanting en daardoor, in verband met de kromming van de aarde, een kleine reikwijdte. Een voorbeeld hiervan is het systeem van Syledis (ca. 400 MHz, ofwel  $\lambda = 0,75$  m) met een reikwijdte van 100 km en met een precisie op Meterniveau. In tegenstelling tot Syledis heeft het systeem van Omega een zeer grote reikwijdte, want de laagfrequente signalen van dit systeem (10 kHz, ofwel  $\lambda = 30$  km) buigen met de aardkromming mee. Zo heeft men met acht grondstations voldoende voor een wereldwijde bedekking. Maar de precisie ligt op kilometerniveau! Met de keuze van de frequentie moet men dus bij de terrestrische plaatsbepalingssystemen een compromis sluiten tussen precisie en reikwijdte.



Figuur 1.1. Meting van de looptijden tussen station A en B op twee manieren.

Radioplaatsbepalingssystemen zijn op de meting van looptijden (of looptijdverschillen) van radiogolven gebaseerd. De looptijd kan men op twee manieren meten: a) enkele looptijd met twee klokken, of b) dubbele looptijd met één klok. Beschouw de punten A en B volgens figuur 1.1a, waarbij de looptijd van een puls wordt gemeten met twee klokken. Vroeger werd hierbij een analoge puls toegepast, later werd de analoge puls door digitale code vervangen. Met een digitale code kan men de tijdmeting met een hogere precisie uitvoeren. De looptijd wordt gedefinieerd als aankomsttijd minus vertrektijd. De afstand tussen A en B kan men berekenen door de gemeten looptijd met de snelheid van de radiogolf ( $c$ ) te vermenigvuldigen:

$$\overline{AB} = c \cdot \Delta t \quad (1.1a)$$

Het blijkt echter praktisch onmogelijk om de twee klokken precies gelijk te laten lopen

# 2 Een overzicht van GPS

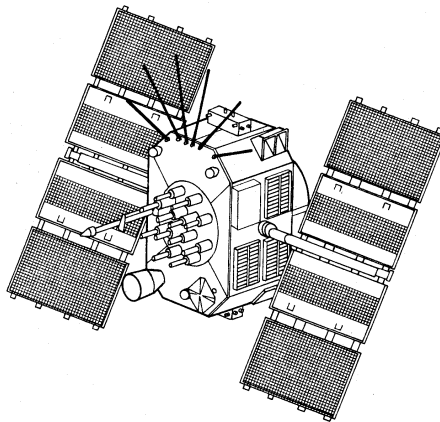
## 2.1. Algemene kenmerken

GPS is een plaatsbepalingssysteem dat op afstandsmeting naar satellieten is gebaseerd. De afstanden worden uit gemeten looptijden van radiogolven afgeleid. Het systeem is continu 24 uur per dag in bedrijf, overal ter wereld bruikbaar en werkt onder alle weersomstandigheden. Het is een militair systeem dat door de overheid van de Verenigde Staten kosteloos aan civiele gebruikers ter beschikking wordt gesteld; ook buiten de Verenigde Staten. Voor civiele gebruikers zijn echter twee beperkingen opgelegd die bekend staan onder de naam Selective Availability (SA) en Anti-Spoofing (A-S). Deze beperkingen hebben consequenties voor de nauwkeurigheid van het systeem. De voornaamste componenten van GPS zijn: het ruimtesegment, het besturingssegment en het gebruikerssegment.

Het *ruimtesegment* bevat nominaal 24 satellieten, waarvan 21 actieve en 3 actieve reserve satellieten. Een GPS satelliet wordt in figuur 2.1 afgebeeld. Een configuratie van 21 satellieten volgens een oude opzet wordt in figuur 2.2a afgebeeld en de verdeling van 27 satellieten in zes baanvlakken (configuratie in 1999) wordt in figuur 2.2b gegeven. De satellieten worden vaak 'Space Vehicles' (SV's) genoemd.

Typische baangegevens zijn:

- hoogte van de baan (boven de aardoppervlakte): 20.240 km;
- vorm van de baan: bijna cirkelvormig;
- omlooperperiode (in sterrentijd): 12 uur;
- inclinatie van het baanvlak t.o.v. de equator:  $i = 55^\circ$ .



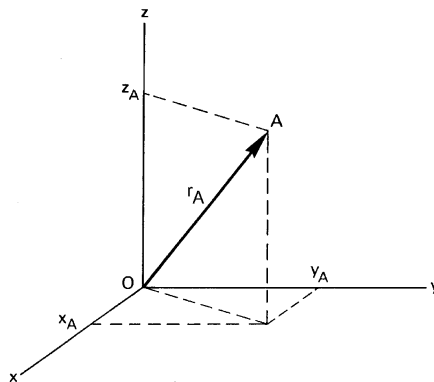
Figuur 2.1. GPS satelliet met zonnepanelen en gerichte antenne.

# 3 Coördinatenstelsels, tijdsystemen en satellietbanen

## 3.1. Cartesische en ellipsoïdische coördinaten

Om punten in een driedimensionale ruimte vast te leggen worden meestal Cartesische coördinaten gebruikt. In figuur 3.1 wordt punt A door middel van de positievector  $r_A$  afgebeeld. De drie componenten van deze vector in het driedimensionale assenstelsel noemt men coördinaten:

$$\vec{r}_A = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} \quad (3.1)$$



Figuur 3.1. Cartesische coördinaten.

In plaats van Cartesische coördinaten worden vaak ellipsoïdische coördinaten gebruikt. Hiervoor wordt een referentie-ellipsoïde (omwentelingsellipsoïde) geïntroduceerd. In figuur 3.2 doorsnijden we de ellipsoïde met twee loodrechte vlakken die ook beide door het middelpunt van de ellipsoïde gaan: een referentie meridiaanvlak en een referentie equatorvlak. Ook hier hebben we drie grootheden nodig om de positie van een punt A in de drie dimensionale ruimte vast te leggen. De hoek van de normaal op het ellipsoïdisch oppervlak met het referentie equatorvlak noemen we de geodetische breedte ( $\varphi$ ). De hoek van het lokale meridiaanvlak met het referentie meridiaanvlak noemen we geodetische lengte ( $\lambda$ ). De afstand tot het ellipsoïdisch oppervlak (langs de normaal) noemen we de geodetische hoogte ( $h$ ). Dus nu is de positie van een punt A met  $\varphi$ ,  $\lambda$  en  $h$  vastgelegd.

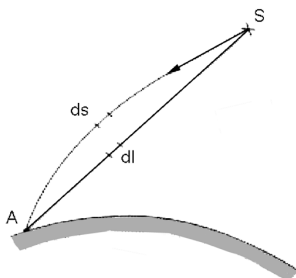
# 4 Invloed van de atmosfeer

## 4.1. Inleiding

Aangezien de atmosfeer niet erg veel verschilt van de vrije ruimte, worden de metingen in eerste instantie berekend alsof de radiosignalen door vrije ruimte lopen: rechtlijnige voortplanting met een snelheid  $c = 299792458$  m/s (gedefinieerd getal). Door de aanwezigheid van moleculen in de troposfeer en van ionen, en vooral vrije elektronen in de ionosfeer, wijkt de voortplantingssnelheid  $v$  van radiogolven evenwel iets af van  $c$ . Dit wordt meestal uitgedrukt in de brekingsindex  $n$ , gedefinieerd als:  $n = c/v$ . Deze brekingsindex is afhankelijk van de plaats in de atmosfeer, van het tijdstip van meting en van de frequentie van de radiogolven.

## 4.2. Geometrische optika

We beschouwen nu het geval dat de signalen uitgezonden worden vanuit één punt (de satelliet S) en ontvangen worden in een ander punt (de antenne A van de ontvanger), zie figuur 4.1. Indien de frequentie van de radiogolven voldoende hoog gekozen wordt, zodat de golflengte klein is vergeleken bij de relevante afstanden (zoals de afstand zender-ontvanger, de laagdiktes in de atmosfeer, enz.), dan heeft alle energie die van S in A aankomt, zich voortgeplant langs een (rechte of kromme) lijn, de zogenaamde lichtstraal of radiostraal. Men spreekt dan van “stralenoptiek” of “geometrische optiek”. Bij een korte golflengte wordt dan van buiging of diffractie gesproken; in dit geval doet een deel van de ruimte mee, namelijk het deel in de naaste omgeving van de lichtstraal. Voor radiogolven is de geometrische optika een goede benadering.



Figuur 4.1. Geometrische optiek.

Vrijwel alle geodetische metingen met radiosatellieten zijn gebaseerd op meting van de looptijd  $t$  van een signaal van S naar A:

# 5 Plaatsbepaling uit code-afstanden

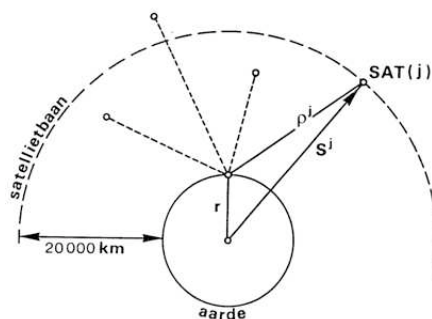
## 5.1. Inleiding

De code-afstandsmeting (of pseudo-afstandsmeting) uit PRN-code wordt beschouwd als de normale opzet van GPS en is vooral bedoeld voor plaatsbepaling in real-time. De belangrijkste toepassingen hiervan zijn de navigatie te land, ter zee en in de lucht.

In § 2.4 werd de meting van de looptijden met digitale code besproken. Uit de gemeten enkele looptijd van een satelliet naar de waarnemer wordt een afstand berekend door deze looptijd te vermenigvuldigen met de voortplantingsnelheid van de radiogolf. De looptijd wordt met twee, in feite onafhankelijke klokken gemeten die niet exact gesynchroniseerd kunnen worden. Men mag aannemen dat alle satelliet-klokken (na het aanbrengen van een klokcorrectie) in voldoende mate gelijk lopen in GPS-tijd terwijl de klok in de ontvanger een significante afwijking heeft. Deze afwijking wordt de klokfout van de ontvanger genoemd. Door deze klokfout hebben ook alle afstanden een afwijking. Vandaar de ook veel gebruikte naam pseudo-afstand (zie Hoofdstuk 1).

Zonder deze klokfout zouden drie satellieten voldoende zijn om de positie van de waarnemer vanuit de bekende satelliet posities te bepalen met een ruimtelijke insnijding. De oplossing is het snijpunt van drie bollen met de satellieten in het middelpunt. De meting van een vierde satelliet is nodig om ook de klokfout als een vierde onbekende te bepalen.

Een simpele opzet van enkelpuntsbepaling (*single point positioning*) uit gemeten code-afstanden naar vier satellieten, wordt in figuur 5.1 voorgesteld.



Figuur 5.1. Positiebepaling uit vier afstanden.

In figuur 5.1 zijn:  $r$  de onbekende positievector van de waarnemer  $(X_r, Y_r, Z_r)$ ,  $S(t) = [X^s(t), Y^s(t), Z^s(t)]$  de positievector van de satelliet (deze kan uit de uitgezonden Keplerse baanparameters worden berekend) en  $\rho(t)$  de geometrische afstand (range) tussen satelliet en waarnemer.