

Wachten op een betere plaats

Dr.ir. Sandra Verhagen (DEOS, TU Delft)

In 2008 zou het gebeuren: een compleet en gloednieuw satellietnavigatiesysteem genaamd Galileo zou operationeel zijn, en van onszelf! Niet meer afhankelijk van de Amerikanen en tegelijkertijd nog beter onze plaats kunnen bepalen. Dat was het idee. En nog steeds, maar 2008 werd 2010, 2010 werd 2011, en de laatste berichten zijn dat zelfs dat niet gaat lukken. Waarom het systeem zo lang op zich laat wachten heeft alles te maken met politiek en geld. Daar zal dit stuk niet over gaan. De vraag waar het hier om draait: is Galileo het wachten waard?

Om deze vraag te kunnen beantwoorden, zullen we eerst naar een stukje geschiedenis moeten kijken. Hoe het Amerikaanse Global Positioning System (GPS) uitgroeide van een militair plaatsbepalingssysteem, tot een systeem dat door Jan en alleman, van wandelaar tot wetenschapper, gebruikt wordt. Daarbij zal ook kort het principe van plaatsbepaling met satellieten uitgelegd worden.

Vervolgens iets over de redenen waarom Europa dan zo graag een eigen systeem wil hebben. Vooral na het besluit om het systeem te gaan lanceren is er veel onderzoek gedaan, grotendeels gefinancierd door de Europese Unie, naar de toegevoegde waarde van Galileo. Op de resultaten van dit onderzoek zal de focus van dit artikel liggen. Daarnaast zal ingegaan worden op andere ontwikkelingen op het gebied van plaatsbepaling en navigatie, in de vorm van alternatieve sensoren of aanvullende systemen.

GPS: van militair tot burger

Geschiedenis van plaatsbepaling met satellieten

De eerste pogingen om elektromagnetische golven te gebruiken voor plaatsbepaling van vliegtuigen zijn gedaan tijdens de Tweede Wereldoorlog. Later werd ontdekt dat de Dopplerverschuiving van het signaal dat uitgezonden wordt door een satelliet, gebruikt kan worden als een waarneming van het exacte tijdstip dat de satelliet zich op de kleinste afstand bevindt. Met behulp van Kepler's wetten is het mogelijk om de satellietposities te berekenen. En aldus was het idee geboren voor een plaatsbepalingssysteem met satellieten.

De directe voorganger van GPS is TRANSIT, ook een systeem van de Amerikaanse militairen. Dit systeem bestond uit slechts zeven satellieten die op een hoogte van

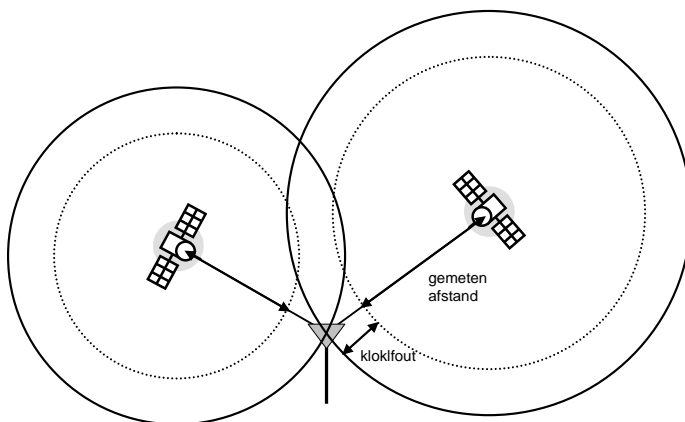
1100 kilometer rond de aarde cirkelden. In eerste instantie werd TRANSIT vooral gebruikt voor plaatsbepaling van militaire schepen en vliegtuigen. Later werd het ook in de civiele wereld gebruikt. Groot nadeel van het systeem was dat satellieten gemiddeld elke 90 minuten overkwamen; in de tussentijd moesten gebruikers hun posities interpoleren.

GPS betekende een grote doorbraak. Positie, tijd en snelheid konden overal op aarde op elk moment, snel en nauwkeurig bepaald worden, dankzij de 24 satellieten op ongeveer 20.000 kilometer boven de aarde. De ontwikkeling begon in de jaren zeventig van de vorige eeuw. Het systeem was volledig operationeel begin jaren negentig.

Het principe

Het principe is als volgt. Een aantal grondstations verspreid over de aarde houden de satellieten continu in de gaten en bepalen nauwkeurig de satellietbanen. De posities van de satellieten zijn dus bekend en worden door de satellieten zelf meegezonden met het signaal. Verder zijn de satellieten uitgerust met zeer nauwkeurige klokken. Dit is essentieel, omdat het principe gebaseerd is op een looptijdmeting: de satelliet zendt een signaal uit, een ontvanger op aarde meet het tijdsverschil tussen uitzenden en ontvangst van het signaal. Dit tijdsverschil vermenigvuldigd met de lichtsnelheid waarmee het signaal reist, geeft dan de afstand tussen satelliet en ontvanger. Zodra de afstand van ontvanger tot minstens drie satellieten bekend is, kan in principe de driedimensionale plaats van de ontvanger bepaald worden omdat de satellietposities bekend zijn (zie figuur 1).

In werkelijkheid zijn er minstens vier satellieten nodig, omdat de klokken in de ontvanger niet zo nauwkeurig zijn – dit zou veel te duur zijn. Het gevolg is een



Figuur 1. Het principe van plaatsbepaling met satellieten.

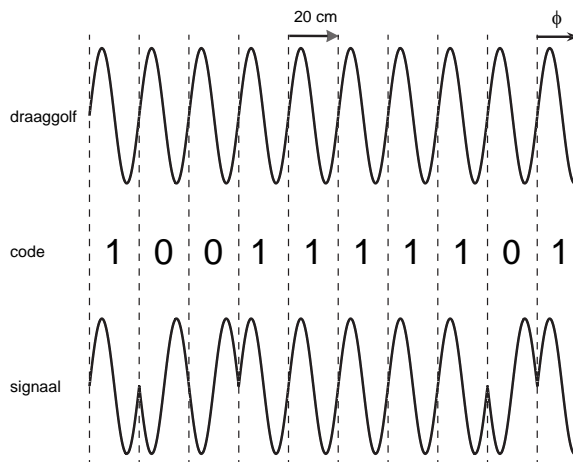
klokfout die hetzelfde is voor de looptijdmetingen naar alle satellieten, en deze zorgt ervoor dat alle gemeten afstanden iets te kort of te lang zijn. Vandaar dat ze pseudo-afstanden genoemd worden. De onbekende klokfout zorgt voor een extra onbekende naast de drie coördinaten van de plaats.

De signalen

De GPS-satellieten zenden hun signalen uit op twee frequenties: 1575.42 MHz (L1) en 1227.60 MHz (L2). Dit betekent dat de draaggolven een golflengte van respectievelijk ongeveer 19 en 24,5 centimeter hebben. Op deze draaggolven zijn codes en de navigatieboodschap gemoduleerd (zie figuur 2). Deze codes zijn uniek voor elke satelliet. Zodra een ontvanger een signaal ontvangt, kan deze hierdoor herkennen van welke satelliet deze afkomstig is. Bovendien 'weet' de ontvanger wanneer een bepaald stukje code in de satelliet is gegenereerd. Door te bepalen hoe lang dat geleden is, kan de ontvanger aldus de looptijd van het signaal meten.

De uiteindelijke nauwkeurigheid waarmee op deze manier een positie bepaald kon worden, was lange tijd niet veel beter dan enkele tientallen meters doordat de Amerikanen het signaal moedwillig verslechterden voor civiele toepassingen (Selective Availability). In 2000 zijn ze daar mee gestopt. Hierdoor werd het mogelijk plaats te bepalen met nauwkeurigheden van enkele meters.

Maar als het om echt hoge precisie gaat, dan hebben we niet voldoende aan de codemetingen. In dat geval zullen we ook gebruik moeten maken van de fasemetingen van de draaggolf zelf. De fase is de fractie van de sinusvormige golf op het moment van ontvangst en kan met een nauwkeurigheid van enkele millimeters gemeten worden. Zoals bekend is de golflengte slechts ongeveer 20 centimeter en we kunnen dus alleen de lengte van het laatste stukje van de draaggolf meten, Φ in



Figuur 2. GPS-sigitaal (zonder navigatieboodschap).

figuur 2. Hoeveel hele golven er aan voorafgegaan zijn, is onbekend. Zodra we in staat zijn deze zogenaamde fasemeerduidigheden voor alle ontvangen signalen te bepalen, kunnen we onze positie berekenen met centimeterprecisie. Het bepalen van de geheeltallige meerduidigheden is een complex probleem, waarvoor Teunissen (1993) een oplossing heeft bedacht in de vorm van de LAMBDA-methode, en die geschikt is voor realtimetoepassingen.

Verbeterde nauwkeurigheid

De belangrijkste factoren die van invloed zijn op de nauwkeurigheid zijn:

- De voortplanting van het signaal: de atmosfeer zorgt voor refractie van het signaal, wat resulteert in een vertraging van het signaal, waardoor de gemeten afstand langer is dan de werkelijke afstand.
- Reflecties van het signaal: de signalen kunnen reflecteren op objecten in de omgeving van de ontvanger. Als deze gereflecteerde signalen ook ontvangen worden, kan dit een aanzienlijke fout in de gemeten positie opleveren.
- Klok- en instrumentfouten van satellieten en ontvanger.
- Fouten in de satellietposities.

Een enorme verbetering in de nauwkeurigheid is te behalen door gebruik te maken van het principe van relatieve plaatsbepaling in de vorm van Differentieel GPS (DGPS) of Real Time Kinematic (RTK). In beide gevallen wordt gebruik gemaakt van een referentiestation, die tegelijk met de gebruikersontvanger metingen verricht. De exacte locatie van het referentiestation is nauwkeurig bekend, waardoor de positie niet meer bepaald hoeft te worden. Een deel van de fouten in de looptijdmetingen van beide ontvangers is (ongeveer) hetzelfde afhankelijk van de afstand tussen de ontvangers en vallen dus weg als de metingen naar dezelfde satellieten van elkaar afgetrokken worden.

Voor toepassingen waar een nauwkeurigheid op decimeterniveau voldoende is, kan in plaats van relatieve plaatsbepaling ook gebruik gemaakt worden van het Precise Point Positioning concept. Daarbij wordt gebruik gemaakt van onder andere nauwkeurige banen en ionosfeercorrecties die berekend zijn door een globaal referentienetwerk. Nadeel is dat deze informatie (nog) niet real time beschikbaar is en dat er een lange initialisatietijd is.

Satellite Based Augmentation Systems (SBAS) vormen een andere ontwikkeling waardoor GPS ook voor zogenaamde veiligheidskritische toepassingen, zoals het landen van vliegtuigen, gebruikt kan worden. Met een SBAS wordt een GPS-achtig signaal uitgezonden door een geostationaire satelliet*. Dankzij dit signaal kan een

* Een geostationaire satelliet bevindt zich steeds boven dezelfde plek op aarde en heeft dus ook steeds hetzelfde dekkingsgebied.

positie bepaald worden met een nauwkeurigheid van één meter. Het signaal bevat correcties voor de pseudo-afstanden, correcties voor de atmosferische vertragingen in de ionosfeer, en kan als extra pseudo-afstandmeting gebruikt worden. Maar het belangrijkste is de informatie over de integriteit die meegezonden wordt: dit levert de gebruiker een gecertificeerde grens voor de positiefout.

De toepassingen

Met de ontwikkeling van de differentiële technieken en de LAMBDA-methode, ontdekte de civiele wereld de mogelijkheden van GPS. Je kunt gerust stellen dat het aantal toepassingen explosief is toegenomen in de laatste vijftien jaar. Voorbeelden zijn:

- Geodetische toepassingen: handhaving van referentiestelsels, landmeetkundige toepassingen.
- Navigatie van voertuigen (ter land, ter zee, en in de lucht).
- Deformatiemetingen: zowel bodemdaling als horizontale verplaatsingen door plaattektoniek.
- Meteorologische toepassingen: atmosferische vertraging van signaal is een maat voor de hoeveelheid waterdamp in de atmosfeer.

Met de beschikbaarheid van GPS voor dit brede scala aan toepassingen, zijn ook de kosten van de ontvangers erg gedaald. Bovendien kunnen de ontvangers steeds kleiner gemaakt worden dankzij technologische ontwikkelingen. GPS op je mobiele telefoon zal binnen afzienbare tijd de standaard zijn.

Galileo: waarom?

Veel gebruikers van GPS zullen zich afvragen wat Galileo ons te bieden heeft. TomTom (of een vergelijkbaar systeem) brengt ons overal met de auto; en uit het lijstje hierboven blijkt dat professionele gebruikers ook al uit de voeten lijken te kunnen met GPS. Toch heeft Galileo ons wel degelijk iets te bieden. Ten eerste natuurlijk onafhankelijkheid van de Amerikanen, maar ten tweede nog meer mogelijkheden door verbeterde nauwkeurigheid, betrouwbaarheid en beschikbaarheid van satellietnavigatiesystemen.

Een onafhankelijk Europa

Met het toenemende gebruik van GPS voor zowel geodetische als commerciële toepassingen in met name de transportwereld, groeide in de jaren negentig in Europa het verlangen naar een onafhankelijk satellietnavigatiesysteem. In die tijd werden de GPS-signalen nog moedwillig verslechterd door de Amerikanen. Bovendien

gaven de militairen geen toegang tot alle informatie over de signalen en dreigden ze om GPS helemaal 'uit' te zetten voor civiel gebruik in oorlogstijd. Overigens hebben ook de Russen een eigen systeem, Glonass. De ontwikkeling ging lange tijd gelijk op met GPS, maar eind jaren negentig zakte het systeem in het slop door gebrek aan onderhoud. Inmiddels wordt er hard aan de weg getimmerd om ook Glonass te moderniseren en volledig operationeel te krijgen.

De ontwikkeling van een eigen systeem door Europa werd op alle vlakken in gang gezet. In 2008 zou Galileo volledig operationeel moeten zijn. Om het systeem te financieren wilde de Europese Unie gebruik maken van Publiek-Private-Samenwerking, met het idee dat bedrijven en industrie geïnteresseerd zouden zijn in het systeem en er daarom voor willen betalen. Ook de exploitatie zou door een consortium van bedrijven ter hand genomen moeten worden. De huidige vertraging in de komst van het systeem is toe te schrijven aan de onenigheid over de vorming van dit consortium.

Galileo versus GPS

Galileo is gebaseerd op hetzelfde principe als GPS. De belangrijkste verschillen zijn:

- De satellietconstellatie. Galileo zal bestaan uit 30 satellieten, waarvan drie reserve. De satellieten zullen op iets grotere hoogte rond cirkelen dan die van GPS. GPS heeft een nominale constellatie van 24 satellieten, alhoewel het werkelijke aantal al jarenlang rond de 28 ligt.
- De Galileosignalen worden op vier frequenties uitgezonden. GPS zendt nu nog op twee frequenties en in de toekomst op drie frequenties uit (zie tabel 1).

Band	Frequentie [MHz]	Golflengte [cm]	GPS		Galileo		
			O	O	C	PRS	SoL
L1	1575.42	19,03	●	●	●	●	●
L2	1227.60	24,42	●	○	○	○	○
L5 / E5a	1176.45	25,48	●	●	●	○	●
E5b	1207.14	24,83	○	●	●	○	●
E6	1278.75	23,44	○	○	●	●	○

O = Open, C = Commercial, PRS = Public Regulated, SoL = Safety-of-Life

Tabel 1. Toekomstige signalen en diensten van GPS and Galileo.

- Galileo biedt verschillende diensten. Dit houdt in dat niet alle signalen vrij beschikbaar zijn (zie tabel 1 en volgende paragraaf). GPS maakt wel onderscheid tussen civiele en militaire codes, maar op elk van de drie frequenties zal in de toekomst een civiele code beschikbaar zijn.

De toegevoegde waarde van Galileo

De verwachting is dat Galileo betere nauwkeurigheid, betrouwbaarheid en beschikbaarheid kan bieden ten opzichte van het huidige GPS. Ten eerste door de iets gunstigere satellietconstellatie, ten tweede doordat gebruik gemaakt zal worden van nieuwe ontwikkelingen op het gebied van codemodulering. Hierdoor zal niet alleen de precisie van de codewaarnemingen veel hoger zijn, maar ook de invloed van fouten door reflecties zal minder groot zijn. Hierbij dient natuurlijk opgemerkt te worden dat ook GPS gemoderniseerd wordt, dus met GPS zal straks eveneens een hogere nauwkeurigheid behaald kunnen worden.

Gebruikers die bereid zijn ervoor te betalen, kunnen via het E6-signaal ook integriteitsinformatie ontvangen. Met Galileo is men hierdoor niet afhankelijk van een SBAS.

Toekomst met GPS + Galileo

Verbeterde plaatsbepaling

Verschillende studies zijn uitgevoerd naar de te verwachten prestaties van GPS en Galileo, zie bijvoorbeeld Verhagen (2002, 2006). De belangrijkste conclusies worden hieronder samengevat.

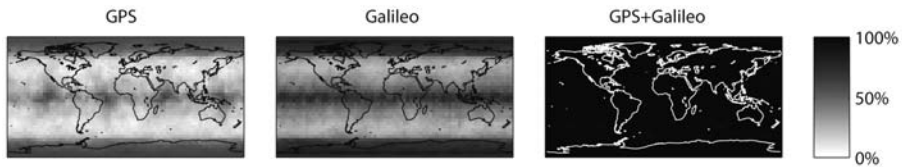
Galileo maakt gebruik van meer satellieten in een andere constellatie en een ander type codemodulatie. Dit zal betere nauwkeurigheid en betrouwbaarheid opleveren. De succeskans van correcte meerduidigheidsbepaling (in het vervolg simpelweg succeskans genoemd), de detectiekans van fouten in de waarnemingen of het model en de precisie van de positie zullen dan ook hoger zijn dan met GPS. Toch zal dit niet continu en overal op aarde een afdoende verbetering opleveren ten opzichte van de huidige situatie.

Het gebruik van drie of meer frequenties met GPS of Galileo heeft wel een prestatieverhogend effect in termen van precisie en succeskans, maar de verschillen ten opzichte van 2-frequentie GPS of Galileo zijn marginaal.

Het meest valt te verwachten van het gecombineerde gebruik van GPS en Galileo door het veel grotere aantal satellieten dat zichtbaar zal zijn, zelfs in omgevingen met veel hoogbouw. Indien van beide systemen de L1 en L5/E5a frequentie worden

gebruikt, zal de succeskans enorm verbeteren ten opzichte van het gebruik van een enkel systeem (GPS òf Galileo).

Figuur 3 illustreert deze resultaten. De figuur toont het percentage van een dag dat de succeskans boven de 99% ligt met GPS, Galileo en GPS+Galileo. In alle gevallen gebruikmakend van de L1 en L5/E5a frequenties. Met GPS is de succeskans gemiddeld 32% van de dag hoger dan 99% over de hele wereld genomen, met Galileo is dat gemiddeld 51% van de dag, en met GPS+Galileo gemiddeld 99.8% van de dag.



Figuur 3. Percentage van een dag dat de succeskans boven de 99% ligt met GPS, Galileo en GPS+Galileo.

Nieuwe toepassingen

Voor veel toepassingen (ook hedendaagse) is het gebruik van GNSS (Global Navigation Satellite System) zeer wenselijk, omdat vrijwel alle voertuigen in de toekomst standaard uitgerust zullen zijn met een ontvanger en omdat het alternatieve of aanvullende systemen overbodig maakt. Soms zal de betrouwbaarheid van het systeem een kritische factor zijn. Voorbeelden van GNSS-toepassingen waar hogere nauwkeurigheid, betrouwbaarheid en/of beschikbaarheid nodig zijn:

- Aardobservatie: het meten van deformaties van ijskappen; plaattektoniek; Tsunami-detectiesysteem; getijdemetingen op zee; numerieke weersmodellen en weersvoorspelling; geodetische toepassingen; GIS en Location Based Services.
- Ruimtevaarttoepassingen: navigatie en standbepaling van satellietlanceerraketten, satellieten in lage banen, formaties van satellieten.
- Wetenschappelijke toepassingen: zwaartekrachtmissies; bepaling van zeer nauwkeurige tijd en synchronisatie; volgen van dieren; atmosferisch onderzoek.
- Veiligheidskritische en verkeerstoeppassingen: vliegtuignavigatie bij aanvliegen en landen; lokaliseren van noodoproepen en de inzet van hulpdiensten; management bij rampen; (automatische) voertuignavigatie (op water of land); rekeningrijden; het aansturen van machines bij constructiewerkzaamheden.

De beperkingen van satellietnavigatie

Het gecombineerde gebruik van GPS en Galileo in de toekomst zal een grote verbetering betekenen voor de inzet van GNSS voor allerlei toepassingen. Denk bijvoorbeeld aan het grotere aantal satellieten dat zichtbaar zal zijn in stedelijk gebied, waar gebouwen veel signalen tegenhouden. Toch zal GNSS niet de oplossing zijn voor alle toepassingen. In stedelijke gebieden met veel wolkenkrabbers zal een blinde niet altijd alleen met behulp van GNSS kunnen navigeren. Veel onderzoek wordt gedaan naar het gebruik van GNSS voor indoortoepassingen. Maar ook daar zullen de mogelijkheden beperkt blijven tot grote kantoorgebouwen of winkelcentra en zal aanvullende informatie nodig zijn vanwege de slechte ontvangst. Niet alleen de beschikbaarheid van voldoende signalen kan een reden zijn om gebruik te maken van aanvullende sensoren. Ook de eisen aan betrouwbaarheid voor met name veiligheidskritische toepassingen kunnen een reden zijn. Voorbeelden van aanvullende sensoren en systemen:

- Gyroscopen voor het bijhouden van de richting waarin het voertuig beweegt.
- Map-matching algoritmes voor navigatie van motorvoertuigen.
- Assisted-GNSS. Assistentie-informatie voor snellere beschikbaarheid van de positie, met name in stedelijk gebied, wordt door een dienstverlener naar de ontvanger verstuurd, bijvoorbeeld in de vorm van satellietefemeriden, navigatieboodschap en precieze GPS-tijd.
- Lokale plaatsbepalingssystemen met beacons of camera's.

Echter, voor veel toepassingen zullen deze aanvullende systemen of sensoren niet meer nodig zijn, op voorwaarde dat algoritmes ontwikkeld worden waarmee de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid gewaarborgd kunnen worden.

Onderzoek

Een mooie toekomst is dus mogelijk voor het gebruik van GNSS, maar er zijn nog genoeg (onderzoeks-) uitdagingen. Enkele belangrijke onderwerpen waar binnen DEOS (Department of Earth Observation and Space Systems, TU Delft) aan gewerkt wordt, zijn:

- Meerduidigheidsbepaling en kwaliteitscontrole: het valideren van de oplossing, zodat de betrouwbaarheid gegarandeerd kan worden.
- Precise Point Positioning en Wide-Area RTK: snelle en nauwkeurige plaatsbepaling (beter dan 10 cm) zonder een lokaal referentienetwerk.
- Standbepaling: met behulp van meerdere GNSS-antennes op een platform (bijvoorbeeld een satelliet of een vliegtuig) is het mogelijk de stand te bepalen. Onderzoek is nodig naar de algoritmes om dit zo nauwkeurig mogelijk in real-time te doen.

- Navigeren van formaties van satellieten: in plaats van alle sensoren op één satelliet, zullen in de toekomst sensoren verspreid worden over meerdere satellieten die in een formatie vliegen. Daarvoor is het nodig de relatieve posities nauwkeurig en in real-time te bepalen.

Afsluiting

Concluderend kunnen we stellen dat Galileo inderdaad een toegevoegde waarde heeft ten opzichte van GPS. Het is alleen een kwestie van geduld totdat we onze plaats echt bijna overal en altijd met nog hogere precisie kunnen bepalen dan nu het geval is.

Aanbevolen literatuur

- Commissie van de Europese Gemeenschappen (2006). Groenboek betreffende satellietnavigatietoepassingen http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/galileo/green-paper/doc/com_2006_gp_galileo_nl.pdf.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H. en Collins J. (2001). *Global Positioning System: Theory and Practice*. Springer-Verlag, Berlijn.
- Leick A. (2003). *GPS Satellite Surveying*, John Wiley and Sons, New York, 3rd edition.
- Misra P. en P. Enge (2005). *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*. 2e editie, Ganga-Jamuna Press, Lincoln MA.
- Borre K. en G. Strang (1997). *Linear Algebra, Geodesy, and GPS*. Wellesley-Cambridge Press, Wellesley MA.