

De invloed van de frequentiekeuze voor GALILEO op de bepaling van de fasemeerduidigheden voor lange basislijnen

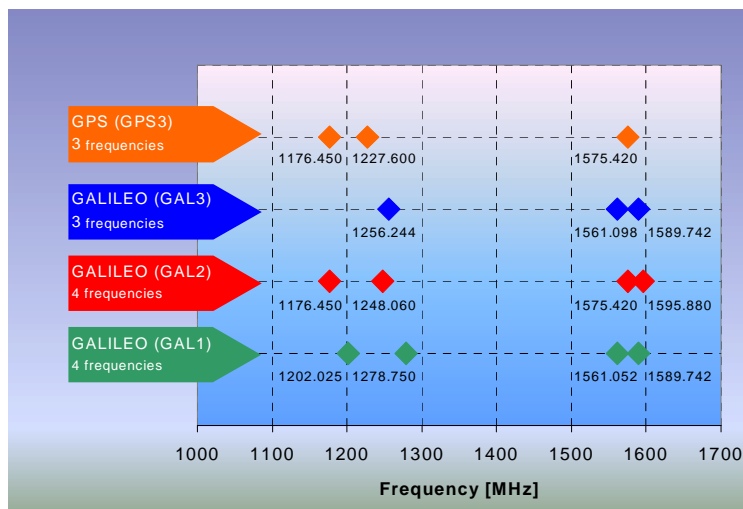
C.D. de Jong, P. Joosten, P.J.G. Teunissen
Sectie Mathematische Geodesie en Puntbepaling
Technische Universiteit Delft, Thijsseweg 11, 2629 JA Delft

Inleiding

Het Europese GALILEO systeem is momenteel in de definitiefase. In deze fase, die zal lopen tot december 2000, moet o.a. een beslissing worden genomen over de frequenties die voor dit nieuwe GNSS (Global Navigation Satellite System) gebruikt zullen worden. Hierbij gaat het niet alleen om het aantal frequenties, maar ook om de frequenties zelf. In het algemeen gaat men ervanuit dat GALILEO gebruik zal maken van tenminste twee frequenties om ionosferische effecten te kunnen elimineren. De beschikbaarheid van twee of meer frequenties is ook belangrijk voor de snelle bepaling van de fasemeerduidigheden, zie [Joosten, 2000]. Er

geldt dat naarmate het aantal frequenties groter is, men eerder in staat is deze geheeltallige meerduidigheden te bepalen. Dit is een van de belangrijkste redenen voor het besluit dat GPS in de toekomst gebruik zal gaan maken van drie verschillende draaggolf-frequenties. Figuur 1 bevat een overzicht van deze GPS frequenties en de verschillende, voor GALILEO voorgestelde, combinaties van drie en vier frequenties.

Snelle bepaling van de fasemeerduidigheden is vooral belangrijk voor



Figuur 1: Enkele van de voorgestelde GALILEO frequenties en de frequenties voor het gemoderniseerde GPS.

RTK (real-time kinematic) toepassingen, een van de populairste GPS meettechnieken van dit moment. De kans dat de geschatte geheeltallige meerduidigheden inderdaad de juiste zijn, wordt aangeduid met success-rate, [Joosten, 2000]. De success-rate hangt af van een aantal factoren:

1. Het waarnemingsmodel, dat de relatie tussen waarnemingen en te schatten parameters beschrijft.
2. Het kansmodel van de waarnemingen, dat hun precisie en onderlinge correlatie beschrijft.
3. De gebruikte methode voor het bepalen van de integer meerduidigheden.

Er bestaan twee waarnemingsmodellen. In het in de praktijk meest gebruikte model worden uit de waarnemingen de onbekende stationsposities geschat. Doordat hiervoor de waarnemingen gelineariseerd moeten worden rondom benaderde stationscoördinaten en gebruik wordt gemaakt van de satellietposities, is men afhankelijk van de geometrie van de satellieten t.o.v. de ontvanger. In het tweede model schat men niet de onbekende stationsposities, maar slechts de afstanden tussen satelliet en ontvanger. Doordat hierbij geen stations- en satellietposities worden gebruikt, m.a.w., doordat men niet afhankelijk is van de satelliet-ontvanger geometrie, wordt het hierbij gebruikte model het geometrievrije model genoemd. Dit model is lineair en het is het meest eenvoudige model waarmee het mogelijk is de integer fasemeerduidigheden te schatten. Het feit dat het model geen gebruik maakt van satellietposities is een belangrijke eigenschap, omdat de GALILEO banen nog niet zijn

gedefinieerd. De analyses in deze bijdrage zullen daarom zijn gebaseerd op het geometrievrije model.

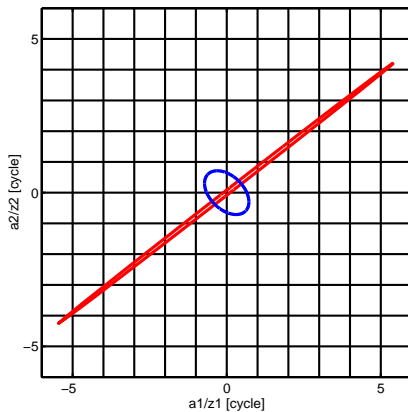
De waarnemingsvergelijkingen, behorende bij het geometrievrije model, voor een double difference (DD) code (pseudo range) en fasemeting tussen twee satellieten en twee ontvangers, kunnen worden geschreven als

$$\begin{aligned} p_\alpha(i) &= \rho(i) + (\lambda_\alpha / \lambda_1)^2 I(i) \\ \phi_\alpha(i) &= \rho(i) - (\lambda_\alpha / \lambda_1)^2 I(i) + \lambda_\alpha a_\alpha \end{aligned} \quad \alpha = 1, \dots, n_f \quad (1)$$

met p en ϕ de code- en fasewaarnemingen, uitgedrukt in meters, ρ , a en I de onbekende afstand, de integer fasemeerduidigheid en de ionosferische vertraging, λ de golflengte van de draagolf, i het tijdstip van waarneming en n_f het aantal frequenties. Voor elke frequentie is er één paar code- en fasewaarnemingen. De afstandsparameter bevat ook het troposferisch effect. De oplossing voor dit model kan al worden berekend indien slechts twee satellieten worden waargenomen. De zgn 'fixed' oplossing (de oplossing waarbij de fasemeerduidigheden worden vastgehouden op hun integer waarden, zie [Joosten, 2000]), bestaat uit een schatting van DD afstand en ionosferische vertraging. De geschatte DD afstanden kunnen worden gebruikt als waarnemingen bij eventuele verdere verwerking, bijvoorbeeld voor het schatten van stationsposities. Deze verwerking is betrekkelijk eenvoudig: per satelliet slechts één waarneming en geen ionosferische effecten en fasemeerduidigheden.

Het stochastisch model bestaat uit de a priori precisie van code- en fasewaarnemingen. Hier wordt aangenomen, tenzij anders vermeld, dat de standaardafwijkingen van de oorspronkelijke ('undifferenced') waarnemingen 25 cm en 2.5 mm bedragen voor respectievelijk code en fase. De DD standaardafwijkingen zijn dus twee keer zo groot. Er wordt aangenomen dat er geen tijdcorrelatie en correlatie tussen waarnemingen is.

Er bestaan verschillende methoden voor het schatten van de integer meerduidigheden, zie [Joosten, 2000]. De hoogste success-rate wordt verkregen met integer least squares. Een efficiënte implementatie hiervan is de LAMBDA (Least Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment)-methode, ontwikkeld door de Sectie Mathematische Geodesie en Puntbepaling



Figuur 2: Twee-dimensionaal voorbeeld van de zoekruimte voor de integer meerduidigheden vòòr (langgerekt) en nà LAMBDA-decorrelatie.

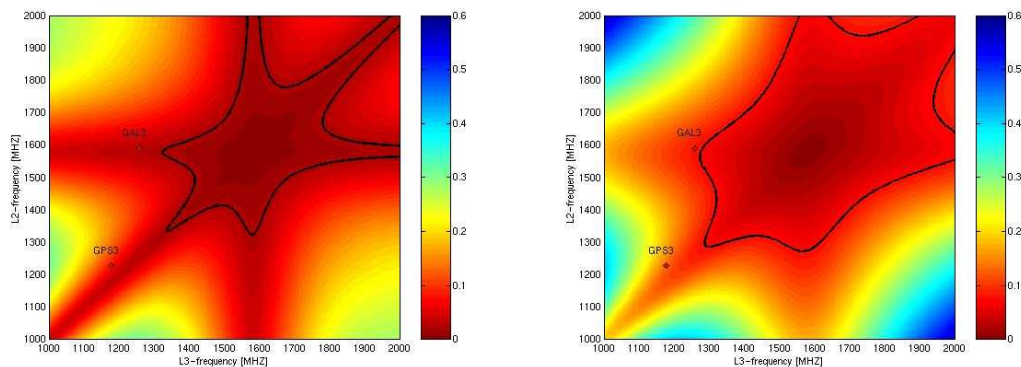
(MGP) van de TU Delft. De eerste stap van deze methode bestaat uit een transformatie van de meerduidigheden. Door deze transformatie worden de meerduidigheden gedecorreleerd en krijgt de langgerekte zoekruimte voor de integer meerduidigheden een vorm die meer op een bol lijkt, waarin het efficiënter zoeken is. Het zoeken naar de getransformeerde integer meerduidigheden vindt plaats in de tweede stap. Een voorbeeld van oorspronkelijke en getransformeerde zoekruimte is weergegeven in Figuur 2.

Om success-rates te berekenen hoeft men niet de beschikking te hebben

over echte waarnemingen. Het enige dat men nodig heeft is de covariantiematrix van de reëelwaardige meerduidigheden. Deze matrix hangt af van het waarnemingsmodel en het stochastisch model van de waarnemingen, maar niet van de waarnemingen zelf. De success-rate is daarom niet alleen een ontwerpparameter, die kan worden gebruikt voor de planning van GNSS metingen, vergelijkbaar met de populaire DOP waardes, maar ook een parameter

voor het ontwerp van een systeem, bijvoorbeeld voor het doen van een goed gefundeerde keuze voor de frequenties van een toekomstig GNSS.

Voor korte basislijnen, waarbij ionosferische effecten geen rol spelen, is snelle schatting van de integer meerduidigheden vaak mogelijk. Een meer uitdagende situatie is die waarbij ionosferische effecten wel van belang zijn, dus bij lange basislijnen. In dit artikel worden daarom de success-rates bekeken voor deze lange basislijnen, te bepalen met GALILEO.

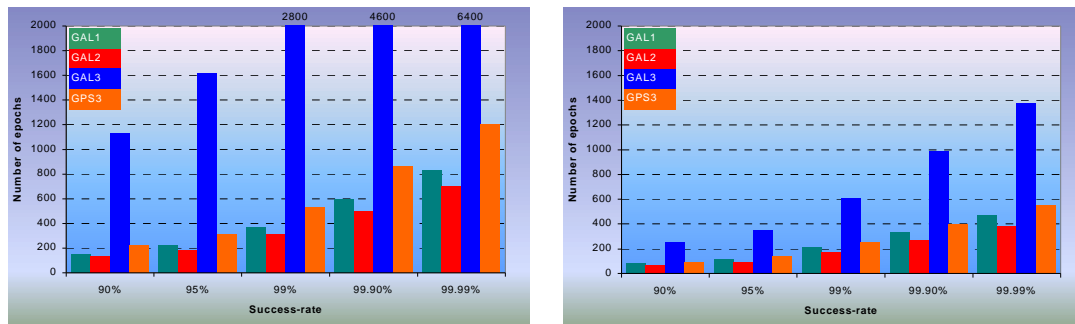


Figuur 3: Success-rates voor instantane bepaling van de meerduidigheden (lange afstanden, geometrievrij model) als functie van twee van de drie draaggolffrequenties. Eén frequentie werd vastgehouden op 1580 MHz. Standaardafwijkingen van de codewaarnemingen waren 25 cm (links) en 10 cm. De contourlijn geeft de success-rate aan voor het huidige twee-frequentie GPS.

Bepaling van de integer meerduidigheden

In deze paragraaf worden eerst de success-rates beschouwd voor drie-frequentie GALILEO (GAL3) en vergeleken met die voor het gemoderniseerde GPS (GPS3). Tevens zal worden onderzocht of de drie voorgestelde frequenties voor elk van beide systemen de best mogelijke zijn vanuit het standpunt van het bepalen van de fase-meerduidigheden. Dit zal worden gedaan door één frequentie vast te houden op 1580 MHz en de andere twee te laten variëren tussen 1000 en 2000 MHz. De resultaten voor al deze drie-frequentiesystemen en voor een enkel waarnemingsstijdstip zijn weergegeven in Figuur 3 voor standaardafwijkingen van de codewaarnemingen van 25 en 10 cm. In deze figuur is ook de contourlijn afgebeeld die correspondeert met de success-rate van het huidige twee-frequentie GPS. Uit de figuur kunnen we concluderen dat de success-rate afhangt van de gebruikte frequenties. Alle drie-frequentie success-rates die binnen de twee-frequentie contourlijn vallen zijn kleiner dan de huidige twee-frequentie success-rate. Het toevoegen van een derde frequentie levert dus niet altijd voordeel op. Gelukkig is dit voor GAL3 en GPS3 wel het geval. Betere combinaties van drie frequenties dan die voorgesteld voor GALILEO en GPS zijn echter mogelijk. Door bijvoorbeeld de huidige GPS L2 frequentie te kiezen en een frequentie in de buurt van 1000 MHz, neemt de success-rate toe. De success-rate neemt ook toe wanneer de precisie van de codewaarnemingen toeneemt. Echter zelfs voor een standaardafwijking van 10 cm is de success-rate altijd kleiner dan 50%. De conclusie luidt dus dat betrouwbare instantane bepaling van de integer meerduidigheden niet mogelijk is voor de beschouwde frequenties.

In het bovenstaande werd voor één waarnemingsstijdstip de bijbehorende success-rate berekend. Het is natuurlijk ook mogelijk voor een bepaalde success-rate het bijbehorende aantal waarnemingsstijdstippen dat nodig is om deze success-rate te bereiken, te berekenen. Dit is gedaan voor alle vier scenario's uit Figuur 1 en weer voor standaardafwijkingen van de codewaarnemingen van 10 en 25 cm. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 4. Uit deze figuur blijkt dat, voor een vooraf gedefinieerde success-rate, voor GAL3 een veel langere waarnemingsperiode nodig is dan voor GPS3. Voor een standaardafwijking van 25 cm is deze periode zo'n 5.3 keer zolang, voor een standaardafwijking van 10 cm 2.5 keer. Voor de twee vier-frequentiesystemen GAL1 en GAL2 is het aantal benodigde waarnemingsstijdstippen ongeveer hetzelfde. Dit aantal, hoewel nog steeds groot, is kleiner dan voor beide drie-frequentiesystemen.



Figuur 4: Aantal benodigde waarnemingstijdstippen voor het bereiken van een vooraf gedefinieerde success-rate voor de vier systemen uit Figuur 1. Standaardafwijkingen van de codewaarnemingen waren 25 cm (links) en 10 cm.

Conclusies

Belangrijke factoren bij de bepaling van de integer meerduidigheden zijn: aantal en gebruikte frequenties, precisie van de codewaarnemingen en de satelliet-ontvanger geometrie. In deze bijdrage moest de laatste factor buiten beschouwing gelaten, omdat nog niets bekend is over de satellietbanen van de GALILEO-satellieten. Het blijkt dat naarmate de precisie van de codewaarnemingen beter wordt, de verschillen tussen de verschillende drie- en vierfrequentie scenario's kleiner worden. Betrouwbare instantane bepaling van de integer fasemeerduidigheden is niet mogelijk met het geometrievrije model. Dit geldt zowel voor drie- als voor vierfrequentiesystemen.

Literatuur

Ashkenazi, V.: *Galileo – Challenge and opportunity*. Galileo's World, Vol. 1, No. 1, 2000, pp. 42-44.

Divis, D.A.: *Finally! A Second Signal Decision*. GPS World, Vol. 10, Number 2, February 1999, Advanstar Communications, pp. 16-20

Divis, D.A.: *Galileo – Enthusiasm and Money Propel Europe's GNSS*. GPS World, Vol. 10, No. 11, November 1999, Advanstar Communications, pp. 12-16.

Forsell, B., Martin-Neira, M. and Harris, R.: *Carrier phase ambiguity resolution in GNSS-2*. In: Proceedings ION GPS-97 (1997), pp. 1727-1736.

de Jonge, P.J., C.C.J.M. Tiberius: *The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects*. Publications of the Delft Geodetic Computing Centre, No. 12, 1996, 49 pp.

Joosten, P.: *De kans op het vinden van de juiste fase-meerderduidigheden*. Deze GPS Nieuwsbrief.

Teunissen, P.J.G., P.J. de Jonge, C.C.J.M. Tiberius: *A New Way to Fix Carrier-Phase Ambiguities*. GPS World, Vol. 6, No. 4, 1995, pp. 58-61.

Teunissen, P.J.G., Odijk, D. and Joosten, P.: *A probabilistic evaluation of correct GPS ambiguity resolution*, in: Proceedings ION GPS-98 (1998), pp. 1315-2323.

Vollath, U., S. Birnbach, H. Landau, J.M. Fraile-Ordoñez, M. Martin-Neira: *Analysis of Three-Carrier Ambiguity Resolution (TCAR) Technique for Precise Relative Positioning in GNSS-2*. Proceedings ION GPS-98, Sep. 15-18, 1998, Nashville, TN, The Institute of Navigation, Alexandria, VA, pp. 417-426.

Zie ook www.geo.tudelft.nl/mgp voor meer artikelen over meerduidigheidsbepaling en de LAMBDA-methode.