

GNSS-plaatsbepaling in de bebouwde omgeving

GPS lijkt een geschikte techniek voor locatiegebonden diensten. Er is geen extra infrastructuur voor nodig en de nauwkeurigheden die onder ideale omstandigheden gehaald worden zijn veelbelovend. Maar in stedelijk gebied, juist daar waar de meeste (potentiële) gebruikers zijn, presteert GPS het minste. Omdat de gebouwen de signalen blokkeren is de beschikbaarheid van satelliet signalen vaak onvoldoende. Hoewel met hogegevoeligheidsontvangers dat probleem grotendeels kan worden ondervangen moet er rekening mee gehouden worden dat voor toepassingen waar de nauwkeurigheid kritisch is, GPS zo zijn beperkingen heeft.

Met vier waarnemingen kunnen vier parameters bepaald worden: drie coördinaten en de ontvangerklofkout. En om met een combinatie van GPS- en Galileo-satellieten plaatsbepaling te doen is een vijfde waarneming nodig voor tijdsynchronisatie tussen beide systemen. Omdat de looptijden van de signalen van satellieten naar ontvanger als maat voor de afstand worden gebruikt, zijn voor de berekening van zuivere posities open zichtlijnen ('lines of sight') nodig. Op die manier worden ongedempte signalen gebruikt die via een directe weg bij de ontvanger komen. In een stedelijke omgeving is dat een probleem omdat gebouwen, auto's, personen en dergelijke deze zichtlijnen kunnen blokkeren, waardoor onvoldoende satellieten 'zichtbaar' zijn. Ook kunnen signalen via meerdere routes (multipath) bij de ontvanger arriveren. Signalen die via een omweg komen hebben vaak wel een lagere signaalsterkte maar ze kunnen met de directe signalen (mits die er zijn) interfereren, hetgeen met name als de reflecties van dichtbij komen, voor de ontvanger niet is te detecteren.

GPS is momenteel het enige volledig operationele GNSS (Global Navigation Satellite System). Het Russische GLONASS is gedeeltelijk operationeel, terwijl het Europese Galileo en het Chinese COMPASS nog in ontwikkeling zijn. Om werkelijk op één of meer GNSS'en te kunnen vertrouwen moet voor veel soorten locatiegebonden diensten toch in elk geval plaatsbepaling mogelijk zijn voor zo'n 95% van de tijd en locaties. Maar hoeveel procent van de tijd is er in de bebouwde omgeving werkelijk plaatsbepaling met GNSS mogelijk en welke nauwkeurigheid heeft die plaatsbepaling? Om hiervan een indruk te krijgen laat dit artikel aan de hand van een stadsmodel en satellietalmanakken een aantal voorspellingen zien van de beschikbaarheid en nauwkeurigheid. We hebben ons hierbij beperkt tot GPS en een gecombineerde constellatie van GPS en Galileo. Verder laten we een illustratief voorbeeld zien van een test met een hogegevoeligheids-GPS-ontvanger op Schiphol. Met hogegevoeligheidsontvangers kunnen onder veel meer omstandigheden coördinaten worden bepaald dan met klassieke ontvangers. Daarmee zijn ze het antwoord op het probleem van beperkte beschikbaarheid, maar de prijs die daarvoor betaald wordt is een lagere nauwkeurigheid. De berekeningen en tests uit dit artikel zijn gedaan als onderdeel van het (Ruimte voor Geo-Informatie) onderzoeksproject RGI-150 '3D-plaatsbepalingsinfrastructuur in de bebouwde omgeving'.

Zichtlijnen

Om met GPS of Galileo plaatsbepaling te kunnen doen zijn steeds vier waarnemingen nodig naar verschillende satellieten.



dr.ir. F. Kleijer,
OTB, TU Delft

Beschikbaarheid

Om te bepalen onder welke omstandigheden er voldoende open zichtlijnen naar satellieten beschikbaar zijn, hebben we een eenvoudig model van een fictieve stad ontwikkeld [Kleijer et al., 2008] op een locatie in Nederland (centrale RD-coördinaten: 113200, 480250). Het model bestaat uit twaalf bouwblokken (zie fig. 3) van gelijke hoogte waarmee de stedelijke canyons worden voorgesteld. In dit model is op verschillende plaatsen bepaald hoeveel procent van de tijd voldoende GPS- en/of Galileo-satellieten zichtbaar zijn. Hiervoor zijn de richtingen berekend naar de GPS- en Galileo-satellieten voor 96 epochen (tijdstippen waarop waarnemingen gedaan worden) verdeeld over tien dagen met een interval van 2,5 uur. Dit geeft een mooie regelmatige verdeling van de richtingen naar de satellieten van zowel de individuele systemen als van de combinatie daarvan. GPS-satellietconfiguraties herhalen zich namelijk twee maal per dag en Galileo-satellietconfiguraties herhalen zich zeventien keer per tien dagen, waardoor na tien dagen ook de combinatie zich herhaalt. Voor de richtingsberekeningen is gebruik gemaakt van een bestaande GPS-almanak en een

voorspelde Galileo-almanak op basis van het ontwerp van de satellietbanen. Voor ieder positie-satellietcombinatie is bepaald of de bebouwing de zichtlijn blokkeert.

In fig. 3 staan vier typische locaties aangeduid waarvoor we de resultaten laten zien. Om te begrijpen hoe de bebouwing op die plaatsen de zichtlijnen naar de satellieten blokkeert is in fig. 1 voor elk van deze locaties een skyplot gemaakt. In skyplots worden de hoeken ten opzichte van het zenit afgebeeld als afstanden, terwijl de azimuths bewaard blijven. De richtingen naar in dit geval alleen de GPS-satellieten staan hierin geploteerd in combinatie met de dakranden (en zijmuren) van de bebouwing.

In tabel 1 staan van de vier locaties en voor drie verschillende bouwhoogtes, de percentages van de tijd dat er voldoende satellieten zichtbaar zijn. Hoewel de bouwhoogtes en de straatbreedte niet extreem ongunstig zijn, is te zien dat de beschikbaarheidspercentages voor GPS toch vaak onder de acceptabele 95% liggen. De resultaten zijn natuurlijk beter voor de toekomstige situatie waarin ook Galileo operationeel is maar ook dan wordt 95% beschikbaarheid niet overal gehaald. De situatie is met name slecht in noord-zuid georiënteerde straten omdat daar in drie richtingen directe satellietensignalen ontbreken.

In tabel 2 staan de aantallen satellieten die gemiddeld zichtbaar zijn. Om 95% van de tijd voldoende satellieten beschikbaar te hebben moet dat gemiddelde voor GPS ruim boven het minimum van vier liggen: gemiddeld blijken er ongeveer vijf satellieten nodig. Vooral daar waar het gemiddelde aantal satellieten stijgt van onder de vier à vijf bij GPS alleen naar meer dan vijf à zes in de gecombineerde constellatie is veel winst te halen in de beschikbaarheidspercentages.

Nauwkeurigheid

Niet alleen wordt de beschikbaarheid van satellieten door bebouwing beperkt maar ook de nauwkeurigheid. Fouten in de GNSS-waarnemingen (zoals door atmosferische vertragingen, satellietklokfouten of multipath) werken door in de posities die op basis van

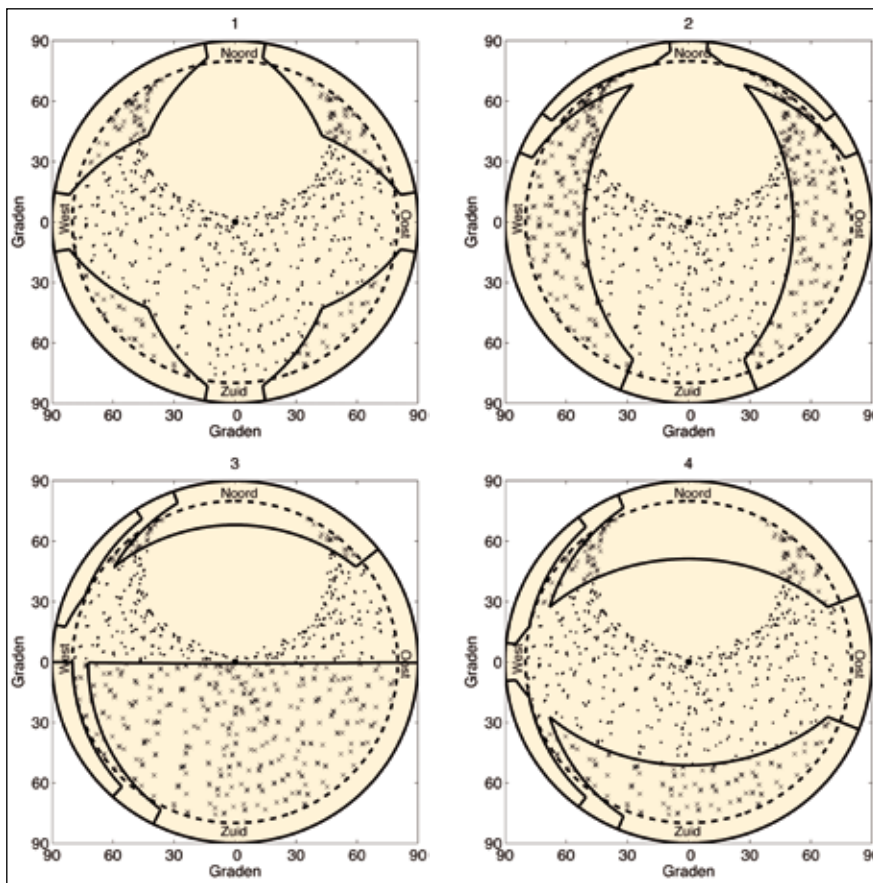


Fig. 1. Skyplots voor vier locaties in het stadsmodel (zie fig. 3). Cirkels en kruizen geven aan de zichtbare en niet-zichtbare GPS-satellieten voor 96 epochen bij een spreiding van 2,5 uur tussen de epochen. Linksboven: locatie 1; rechtsboven: locatie 2; linksonder: locatie 3; rechtsonder: locatie 4. De stippellijn geeft een elevatiehoek van 10 graden aan waaronder wordt verondersteld dat de signalen voor plaatsbepaling onbruikbaar zijn.

die waarnemingen worden berekend (gefilterd). De mate waarin dat gebeurt is afhankelijk van de verdeling van de satellieten over de hemel en kan worden uitgedrukt in een getal: de PDOP (Position Dilution of Precision). Een grote PDOP betekent een slechte configuratie en daardoor een lagere nauwkeurigheid van de gefilterde posities.

Fig. 2 illustreert dat de satellietconfiguratie nadelig wordt beïnvloed door het blokkeren van lage zichtlijnen. Als vuistregel geldt dat de PDOP gedeeld door de wortel van drie (1,7) de factor is waarmee de fout in de enkele waar-

Hoogte	1. GPS	1. G2	2. GPS	2. G2	3. GPS	3. G2	4. GPS	4. G2
8 m	100	100	82	100	53	98	100	100
15 m	95	100	16	84	26	93	86	100
30 m	50	99	0	10	17	59	22	81

Tabel 1. Percentage beschikbaarheid van voldoende GPS-satellieten en GPS- en/of Galileo-satellieten (G2) voor de vier locaties in het stadsmodel. Lengte en breedte van de straten zijn respectievelijk 50 m en 20 m.

Hoogte	1. GPS	1. G2	2. GPS	2. G2	3. GPS	3. G2	4. GPS	4. G2
8 m	6,5	13,4	4,6	9,6	3,6	7,9	5,9	12,2
15 m	5,1	10,4	2,7	5,8	3,1	6,6	4,5	9,2
30 m	3,5	7,2	1,7	3,3	2,5	5,3	2,9	6,0

Tabel 2. Gemiddeld aantal satellieten waarnaar open zichtlijnen zijn voor de vier locaties van het stadsmodel. Lengte en breedte van de straten zijn respectievelijk 50 m en 20 m.

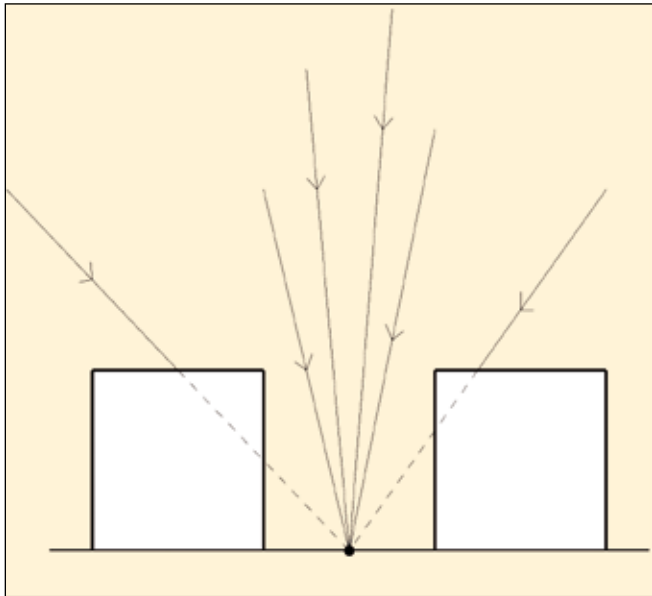


Fig. 2. Doordat gebouwen GPS-signalen sterk dempen zijn met traditionele (niet gevoelige) GPS-ontvangers die signalen niet te ontvangen en daarom niet te gebruiken voor de plaatsbepaling. De spreiding van de satellieten die wel bruikbaar zijn wordt daardoor ongunstiger. De PDOP zal in die gevallen groter zijn dan wanneer er naar alle satellieten open zichtlijnen zouden zijn.

neming moet worden vermenigvuldigd om de radiale fout van de positie te krijgen. Als de fout in een enkele waarneming bijvoorbeeld 5 m is, dan wordt bij een PDOP van zes de radiale fout in de positie dus: $5 \times 6 / 1,7 = 18$ m. Voor alle locaties in het stadsmodel zijn de PDOP-waarden uitgerekend voor een ontvanger op straatniveau. Voor dezelfde 96 epochen als gebruikt voor de beschikbaarheidsberekeningen zijn daarvan de mediaanwaarden afgebeeld in fig. 3 (N.B. als er onvoldoende satellieten zijn is de PDOP oneindig groot). Op veel locaties, en met name in noord-zuid georiënteerde straten, zijn de PDOP's aanzienlijk groter dan bij vrij zicht (zoals op de hoeken van het model). In de gecombineerde GPS-Galileo-constellatie liggen de PDOP's aanzienlijk lager.

Hogegevoeligheids-GPS-ontvangers

Bij de beschikbaarheids- en PDOP-berekeningen hebben we aangenomen dat gebouwen de satelliet signalen volledig blokkeren. In werkelijkheid worden de signalen echter gedempt. Signaalsterktes worden vaak uitgedrukt in C/N0-waarden ('Carrier-to-Noise density ratio'). Maar hierin wordt ook de verzwakking in de ontvanger zelf verdisconteerd. Traditionele GPS-ontvangers gaan niet lager dan een C/N0 van 32-35 dBHz. Dat is voldoende voor signalen via ongeblokkeerde zichtlijnen. Hoewel de C/N0's kleiner zijn voor lage elevaties (zie fig. 4), met name door het ontwerp van de ontvanger zelf, liggen ze zelfs voor 10 graden elevatie nog boven de 35 dBHz. Maar gebouwen zullen de signalen dusdanig dempen dat de signalen te zwak zijn voor traditionele GPS-ontvangers. Met hogegevoeligheidsontvangers kunnen echter wel zwakkere signalen gebruikt worden. Deze ontvangers kunnen ongeveer 100-1000 maal zwakkere signalen (20-30 dB) verwerken. Veel van dergelijke signalen zullen via reflecties bij de ontvanger terechtkomen (zie fig. 5) waardoor ze zelfs binnenshuis, onder bruggen, of in (korte) tunnels posities kunnen geven. Dat betekent dat met dergelijke ontvangers doelbewust gecorrumpeerde signalen gebruikt worden. De nauwkeurigheid van de gefilterde coördinaten uit dergelijke ontvangers kan dus (onvoorspelbaar) slecht zijn en de PDOP kan niet meer als indicator voor de nauwkeurigheid gebruikt worden. Maar daar staat

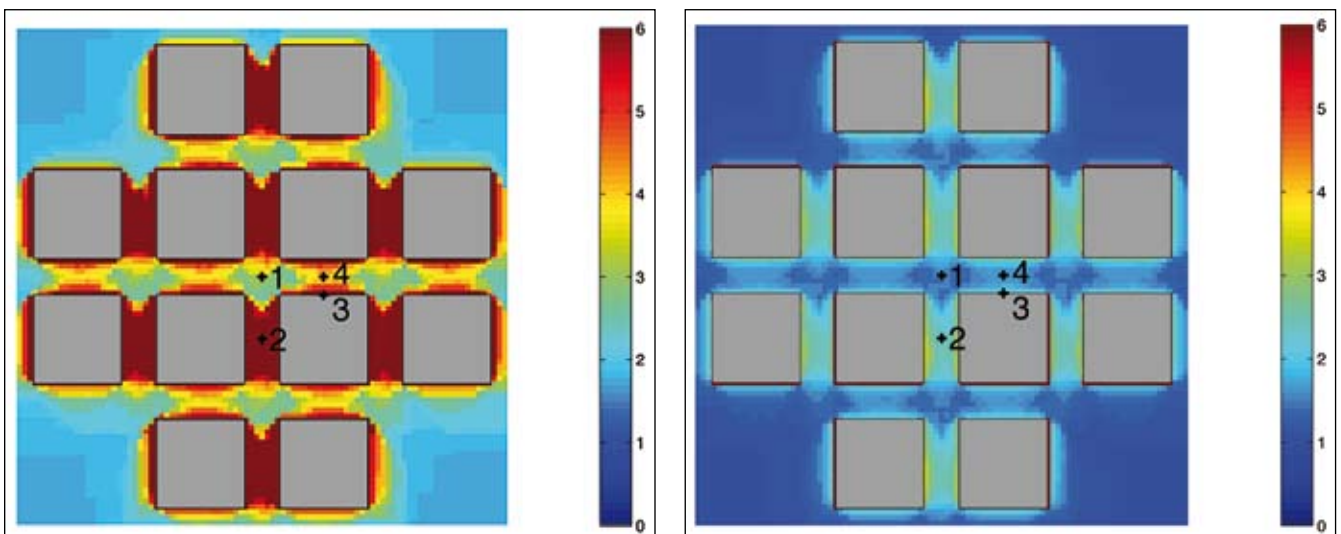


Fig. 3. Stadsmodel met PDOP-mediaanwaarden in kleur. In grijs zijn de bouwblokken weergegeven. De straatlengte en -breedte zijn respectievelijk 50 m en 20 m; de bouwblokhoogte is 8 m. De ontvanger wordt verondersteld zich op straatniveau te bevinden. Links: Wanneer alleen GPS wordt gebruikt. Rechts: Wanneer zowel GPS als Galileo worden gebruikt. De aangegeven locaties 1 t/m 4 corresponderen met de skyplots van fig. 1. Waarden groter dan zes hebben dezelfde kleur gekregen als de waarde van zes.

tegenover dat de kans op het ontvangen van voldoende signalen voor positiebepaling aanzienlijk wordt vergroot.

Tests

We hebben verschillende tests met een hogegevoeligheidsontvanger uitgevoerd [Odijk et al., 2008]. Daarbij is gebruik gemaakt van de u-blox AEK-4T Evaluation Kit met ANTARIS 4 Positioning Engine. Bij één van de tests is met een personenauto over de luchtzijdige rondweg van Schiphol gereden en zijn vier logs per seconden gedaan, zowel in het standaard NMEA-formaat (National Marine Electronics Association) met gefilterde posities van de ontvangerprogrammatuur, als de ruwe waarnemingen in RINEX-formaat (Receiver INdependent EXchange). De rondweg loopt gedeeltelijk langs en gedeeltelijk onder de pieren. Fig. 6 laat een gedeelte van deze weg zien waar deze onder een pier doorloopt. Met name rond de D-pier zijn grote stukken die onder de pier doorlopen. Fig. 7 laat de posities zien die met de ontvanger bepaald zijn. In het linker deel zijn de gefilterde posities uit de ontvanger te zien. Het rechter deel toont de posities die we met ons eigen filter hebben bepaald op basis van de ruwe waarnemingen. Het door de ontvanger bepaalde traject verloopt veel gladder dan de door ons eigen filter bepaalde traject. Het verschil is waarschijnlijk te verklaren uit het gebruik van een Kalman-filter met strakke constraints in de ontvangerprogrammatuur. In ons eigen filter zijn expres hele zwakke constraints gebruikt zodat de berekende posities meer lijken op wat haalbaar is met alleen GPS-waarnemingen. In beide gevallen kunnen de gefilterde posities tot ongeveer 100 m afwijken. Daar staat tegenover dat we voor alle epochen een positie hebben (100% beschikbaarheid). Met een traditionele ontvanger zou dat niet mogelijk geweest zijn. In het rechter deel van fig. 7 is met rood aangegeven wanneer van minder dan drie satellieten signalen zouden zijn ontvangen als we signalen met een C/N0 kleiner dan 35 dBHz niet zouden kunnen gebruiken. Dit komt ongeveer overeen met het gedeelte van de weg onder de pieren. In fig. 8 staan de gemiddelde C/N0-waarden per epoc gegeven die corresponderen met dit deel van het traject. In rood staan hier de gemiddelde waarden onder de 35 dBHz; wederom corresponderen die ongeveer met de gedeelten van de weg onder de pier.

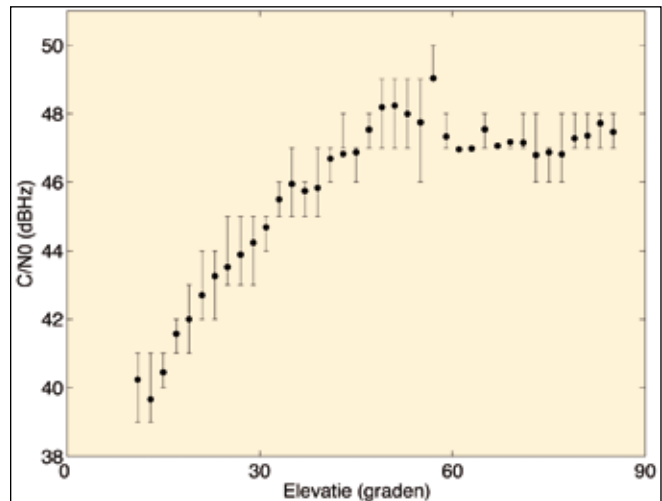


Fig. 4. C/N0-waarden als functie van de elevatie bij vrij zicht voor een experiment met de u-blox-ontvanger op het dak van het gebouw van de voormalige faculteit Geodesie in Delft. De stippen representeren gemiddelden over alle waarden in twee-graden-intervals. De balken geven de 25%- en 75%-waarden aan (50% bevindt zich tussen de onderste en bovenste waarde van de balk).

Ook binnen in de terminalgebouwen hebben we een aantal tests gedaan. Op de bovenste verdieping van de D-pier konden goede posities worden bepaald. Op de onderste verdieping is dat niet gelukt. Omdat de ramen gecoat zijn is vermoedelijk het signaal op de bovenste verdieping door het dak gekomen. In de C-pier waren de ramen niet gecoat en konden de signalen die door de ramen penetreerden vermoedelijk gebruikt worden voor de plaatsbepaling. Op veel plekken in de terminalruimten bleek plaatsbepaling helemaal niet mogelijk.

Conclusie

In de bebouwde omgeving zijn de nauwkeurigheid en beschikbaarheid voor GNSS-plaatsbepaling lager dan op plaatsen waar vrij zicht is naar alle satellieten. Met meer satellieten kunnen op meer locaties posities bepaald worden, maar zelfs onder tamelijk milde stedelijke omstandigheden zijn er in een gecombineerde GPS-Galileo-constellatie op veel locaties onvoldoende open zichtlijnen om zonder andere sensoren plaatsbepaling te doen. In een toekomstige

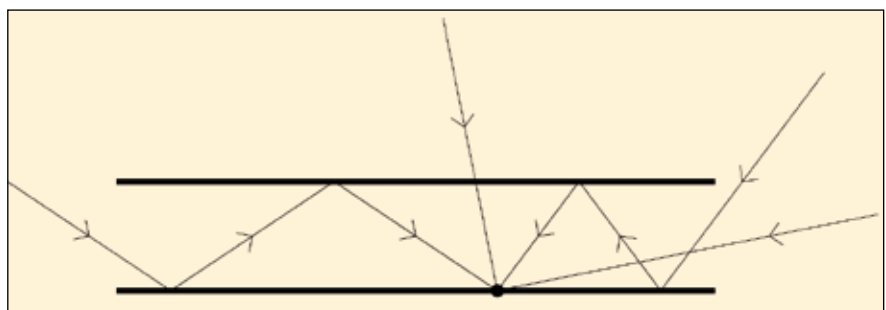


Fig. 5. Op de bovenste bouwlaag van bijvoorbeeld een flatgebouw kunnen GPS-signalen door het plafond dringen of via de ramen aan de zijkant binnenkomen en al dan niet verscheidene malen via vloer, plafond of andere objecten reflecteren. Een vergelijkbare situatie kan verwacht worden onder bruggen of in korte tunnels. Hoewel indirecte (gereflecteerde of penetrerende signalen) een lagere signaalsterkte hebben dan directe signalen, kunnen ze, mits niet al te sterk gedempt, toch door hogegevoeligheids-GPS-ontvangers gebruikt worden om tot een positiebepaling te komen. Op lagere bouwlagen of onder dikke of metalen plafonds is het minder waarschijnlijk dat de signalen nog door het plafond kunnen binnendringen.



Fig. 6. De Schiphol-rondweg loopt gedeeltelijk onder de pieren zoals hier. Hoewel er amper directe zichtlijnen zijn naar de GPS-satellieten is hier toch plaatsbepaling mogelijk met een hogegevoeligheids-GPS-ontvanger.

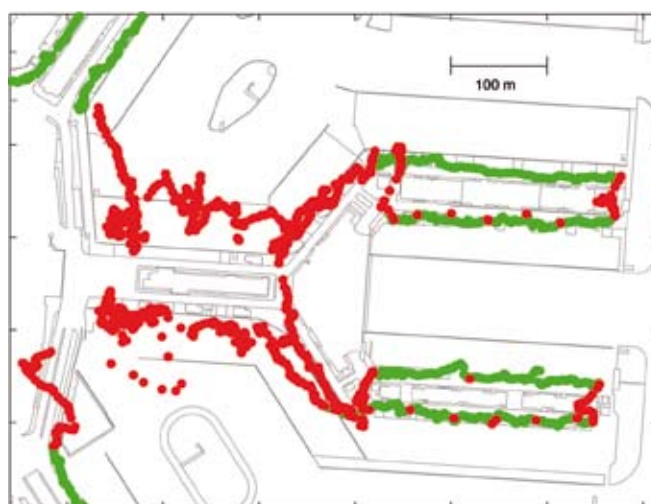


Fig. 7. Gefilterde posities die bepaald zijn voor een experiment met een u-blox-ontvanger op de Schiphol-rondweg onder de D-pier. Links: De uitvoer van het ontvangerfilter geprojecteerd op een Google Earth-foto. Rechts: De resultaten van een eigen filter geprojecteerd op een kaart. In groen is aangeven waar minimaal vier satellietensignalen zijn ontvangen met een C/N0 groter dan 35 dBHz; in rood waar dat er minder zijn dan vier.

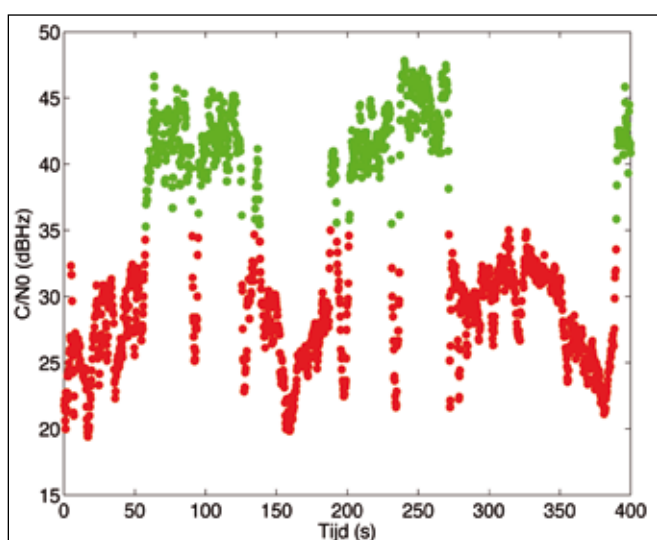


Fig. 8. Gemiddelde C/N0's voor het traject rond de D-pier. Waarden kleiner dan 35 dBHz zijn in rood aangegeven; waarden groter dan 35 dBHz zijn in groen aangegeven. Lage waarden corresponderen met gedeelten waar onder de pier is gereden; hoge waarden corresponderen met gedeelten waar langs de pier is gereden.

situatie waarin zeker vier GNSS'en beschikbaar zijn is het aantal locaties waar plaatsbepaling mogelijk is op basis van ongeblokkeerde zichtlijnen natuurlijk hoger. Aan de andere kant, als gebruik wordt gemaakt van hogegevoeligheidsontvangers kunnen nu al op de meeste plekken posities worden bepaald zonder extra sensoren. De prijs die daarvoor wordt betaald is de lagere nauwkeurigheid. Toch mag wel verwacht worden dat op het gebied van multipath-onderzoek vorderingen gemaakt worden [Hein et al., 2008] die de nauwkeurigheid nog kunnen verbeteren. Natuurlijk kan ook door combinatie met ander sensoren, zoals door gebruik van traagheidsnavigatie, betere resultaten verwacht wor-

den dan met alleen GNSS. Of GNSS'en voor binnentoepassingen een grote vlucht zullen nemen zal de tijd leren. Voorlopig lijkt het daar niet op gezien de sterke verzwakking van de signalen in lager gelegen bouwlagen en de relatief hoge onnauwkeurigheid (juist binnenshuis hebben plaatsbepalingstoepassingen hogere eisen). ■

Literatuur

- Hein, G., M. Paonni, V. Kropp, A. Teuber, *GNSS indoors: Fighting the fading*, Inside GNSS 2008, maart/april, p. 43-52.
- Kleijer, F., D. Odijk, E. Verbree, *Prediction of GNSS availability and accuracy in urban environments-Casestudy Schiphol Airport*, ingediend bij International Journal of Geographical Information Science 2008.

- Odijk D., F. Kleijer, *Can GPS be used for location based services at Schiphol Airport, the Netherlands?*, proceedings van de 5de Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC) 2008, Hannover, Duitsland, p. 143-148.

Samenvatting

De haalbare beschikbaarheid en nauwkeurigheid van GPS en Galileo in stedelijke omgeving zijn voorspeld met behulp van satellietalmanakken en een fictief stadsmodel in Nederland. Zelfs onder relatief milde stedelijke condities is de beschikbaarheid van voldoende satellieten veelal onder de 95% voor alleen GPS, terwijl bij een gecombineerde constellatie van GPS en Galileo dat nog steeds zo is in noord-zuid georiënteerde straten van 20 m breed en bij een bouwblokhoogte van 15 m. Een test met een hogegevoeligheids-GPS-ontvanger wijst erop dat het beschikbaarheidsprobleem opgelost kan worden, maar er moet rekening gehouden worden met een lage nauwkeurigheid.

Summery

The attainable availability and accuracy of GPS and Galileo in the urban environment are predicted using satellite almanacs and a fictitious city model in the Netherlands. Even under relatively mild urban conditions the satellite availability for GPS alone is often below 95%, whereas this is still so for a combined GPS-Galileo constellation in 20-m wide north-south oriented streets and a building block height of 15 m. A test with a high-sensitivity GPS receiver shows that the availability problem can be solved, but one should take into account a low accuracy.

Résumé

La disponibilité et la précision réalisable par GPS et Galileo en milieu urbain peuvent être prédites au Pays-Bas à l'aide d'almanachs satellitaires et d'un modèle urbain fictif. Même sous des conditions urbaines généreuses la disponibilité des satellites est généralement en dessous des 95% dans des environnements urbains. Dans une constellation combinée GPS et Galileo ceci reste le cas pour des voies orientées nord-sud de 20 m de large et avec des hauteurs des pâtés de maisons de 15m. Un test avec un récepteur GPS très sensible suggère que le problème de disponibilité des signaux peut être résolu, mais on doit tenir compte d'une précision moindre.