

Precise Point Positioning und Möglichkeiten für präzise Echtzeit-Anwendungen



Katrin Huber, Roman Lesjak, Graz und Fabian Hinterberger, Wien

Kurzfassung

Precise Point Positioning (PPP) ist eine moderne Prozessierungstechnik für Globale Satellitennavigationssysteme (GNSS) zur Bestimmung dreidimensionaler Koordinaten auf Basis von Code- und Phasenbeobachtungen einzelner GNSS Empfänger. Um die Positionsgenauigkeit zu steigern, werden sogenannte präzise Ephemeriden verwendet, die beispielsweise von Analysezentren zur Verfügung gestellt werden. Des Weiteren wird bei PPP eine Vielzahl an zusätzlichen Modellkorrekturen berücksichtigt (Phase Windup, Gezeiten, Instrumentenfehler, etc.), die bei der herkömmlichen relativen Positionierung (z.B. RTK) aufgrund der Differenzbildung zwischen Beobachtungen von mehreren Empfängern herausfallen.

Die extern bezogenen Ephemeriden und Korrekturdaten sind in der Regel global gültig und deren Übertragung erfordert im Falle der Echtzeit-Auswertung geringere Datenraten, verglichen mit RTK-Diensten. Dadurch bietet PPP die Möglichkeit zur genauen Positionsbestimmung an Orten, wo kein dichtes Referenzstationsnetz oder auch keine gute mobile Datenverbindung vorhanden ist. Die erhaltenen Positionen, wie auch Troposphären- oder Uhrparameter beziehen sich alleine auf das Datum der verwendeten Ephemeriden.

Allerdings ist PPP für Echtzeitanwendungen erst in seiner Anfangsphase, da die dafür notwendigen Korrekturdaten erst seit kurzem in ausreichender Genauigkeit verfügbar sind. Erst 2011 wurde die Übertragung von PPP-spezifischen Korrekturen für Satellitenbahnen und -uhren in RTCM Version 3.1 standardisiert. Mit dieser sogenannten State Space Representation (SSR) ist es nun möglich, Koordinaten mit wenigen cm Genauigkeit in Echtzeit zu bestimmen. Allerdings wird für sub-Dezimeter Genauigkeiten immer noch eine Initialisierungsphase von bis zu 30 Minuten benötigt. Diese Konvergenzzeit rührt daher, dass die Ambiguitäten bei PPP üblicherweise nicht auf ganzzahlige Werte fixiert werden können, da deren Schätzung zusätzlich zu den eigentlichen Ambiguitäten noch instrumentelle Fehlerterme beinhaltet, die bei RTK durch die Differenzbildung wegfallen. Die reell-wertigen Anteile der satellitenspezifischen Instrumentenfehler können durch in einer Netzwerklösung berechnete Phasenkorrekturen beseitigt werden.

Dieser Beitrag stellt aktuelle Entwicklungen für PPP in Hinblick auf Echtzeitanwendungen sowie dazu laufende Forschungsprojekte in der Arbeitsgruppe Navigation am Institut für Geodäsie der TU Graz vor, die sich unter anderem auch mit der Fixierung von Integer-Ambiguitäten in der PPP-Auswertung beschäftigen. Die Fixierung von Integer-Ambiguitäten würde die Initialisierungsphase der PPP-Auswertung deutlich verkürzen und damit PPP für diverse Anwendungen attraktiver machen.

Schlüsselwörter: GNSS, PPP, Ambiguitätenlösung, Echtzeit

Abstract

Precise Point Positioning (PPP) is a modern Global Navigational Satellite Systems (GNSS) processing technique that enables the estimation of precise three-dimensional coordinates by means of code and phase measurements from a single GNSS receiver. To enhance the position accuracy so-called precise ephemerides are used, that are freely offered by analysis centers. Further, during PPP processing a lot of additional model corrections have to be considered (phase wind-up, tidal effects, instrumental biases, etc.). These would have cancelled in a relative positioning method (e.g. RTK) as a result of building differences between observations of multiple receivers.

Usually, the ephemerides from external sources are globally valid and their transmission in real-time needs lower rates compared to RTK-services. Therefore, PPP offers the possibility of highly precise positioning in areas, where neither a dense reference station network, nor a good mobile data link is available. The resulting positions as well as troposphere or clock parameters are solely referred to the geodetic datum of the ephemerides.

Nevertheless, real-time PPP is only in its starting phase, since the necessary correction data are available only for a short time with an adequate accuracy. It was not until 2011, when the transmission of PPP specific corrections for satellite orbits and clocks was standardized in the RTCM document (version 3.1) for the first time. Applying these so-called SSR (State Space Representation) corrections it is finally possible to process coordinates with an accuracy of only few centimeters in real-time. Nevertheless, for sub-decimeter accuracies an initialization phase of up to 30 minutes is necessary. This convergence time arises from the fact that ambiguities within PPP usually cannot

be fixed to integer values, as their estimates contain not only the real ambiguities, but also instrumental biases that would have cancelled in RTK as a result of differencing observations. The real-valued parts of these phase biases can only be eliminated by phase corrections calculated in a network solution.

This contribution presents the current developments concerning PPP for real-time applications, as well as research projects at the Working Group Navigation of the Institute of Geodesy at the TU Graz, that among others investigate also the fixing of integer ambiguities within PPP processing. The integer ambiguity fixing would shorten the initialization phase of PPP solutions significantly, and make the technique more attractive for many real-time applications.

Keywords: GNSS, PPP, ambiguity resolution, real-time

1. Einleitung

Precise Point Positioning (PPP) ist eine Technik zur präzisen Koordinatenbestimmung mit Hilfe von Beobachtungsdaten von Globalen Satellitennavigationssystemen (GNSS) eines einzelnen Empfängers. Anstelle der Broadcast Ephemeriden, die mit der Navigationsnachricht der Satelliten mitgeliefert werden, werden präzise Ephemeriden verwendet um die Genauigkeit zu steigern. Des Weiteren verwendet PPP Code- und Phasenbeobachtungen sowie eine Vielzahl von Modellkorrekturen, um maximale Genauigkeiten im Bereich weniger Zentimeter zu erreichen.

Geschichte

Das Konzept von PPP wurde erstmals in den 70er Jahren angewendet, wo es von R. J. Anderle in [1] als Einzelpunktbestimmung aus Dopplerbeobachtungen mit präzisen Ephemeriden beschrieben wurde (siehe [2]). Die erste Anwendung von PPP für GPS-Daten wurde 1997 vom Jet Propulsion Laboratory (JPL) veröffentlicht. In [3] wird beschrieben, dass in dieser Untersuchung Genauigkeiten von wenigen Zentimetern mit Hilfe von Zweifrequenz-GPS Messungen im Postprocessing erreicht werden konnten. Seither ist PPP eine vielgenutzte Technik für diverse Anwendungen im Postprocessing, wie beispielsweise die Bestimmung von Troposphärenverzögerungen oder Uhrparametern.

Echtzeitanwendungen

PPP in Echtzeit ist allerdings noch in seiner Anfangsphase, was zum einen daran liegt, dass hochgenaue Ephemeriden erst in den letzten Jahren auch in Echtzeit verfügbar sind. Zum anderen liegt der Grund in den langen Konvergenzzeiten, die benötigt werden, um hochgenaue Positionslösungen zu erhalten. Momentan benötigt man für die Berechnung von Koordinaten mit Dezimeter-Genauigkeit zwischen 15 und 30 Minuten, während Genauigkeiten im Bereich weniger Zentimeter erst nach 30 bis 90 Minuten erreicht werden. Die tatsächliche Konvergenzzeit hängt allerdings von der Qualität der Ephemeridendaten sowie der Satellitengeometrie ab.

Das Komitee der Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM) veröffentlichte 2011 erstmals einen Standard für Echtzeit PPP Korrekturen. In diesem Standard (RTCM 3.1 Amendment 5, siehe [4]) sind sogenannte State Space Representation (SSR) Nachrichten enthalten, die das Verbreiten von GPS und GLO-NASS Orbit-, Uhr-, und Code Bias-Korrekturen als Ergänzung zu den Broadcast Ephemeriden ermöglichen. Diese PPP Korrekturdatenströme sind ein bedeutender Schritt in Richtung Echtzeit-PPP, allerdings lösen sie nicht das Problem der langen Konvergenzzeiten, die mit der PPP Prozessierung einhergehen. Dieses Problem rührt vorwiegend von der Tatsache, dass in undifferenzierten Beobachtungsmodellen keine Integer-Ambiguitäten bestimmt und fixiert werden können, weil diese durch phasenspezifische Biases verfälscht werden. Ohne externe Informationen kann man diese nicht von den wahren ganzzahligen Ambiguitäten trennen, weshalb man sich in der PPP-Prozessierung meist nur auf die Schätzung von reell-wertigen Ambiguitäten beschränkt. Relative Beobachtungsmodelle hingegen benutzen Differenzen zwischen Beobachtungen von zwei Empfängern (Basislinien), wodurch instrumentelle Fehler eliminiert werden. Daher bleibt die ganzzahlige Charakteristik der Phasenambiguitäten erhalten.

Beobachtungsgleichungen

Da es sich bei PPP im Wesentlichen um eine Einzelpunktbestimmung handelt, kann von den undifferenzierten Beobachtungsgleichungen für Code- und Phasentfernungungen P_i und $\lambda_i \Phi_i$ auf dem Träger i ausgegangen werden:

$$P_i = \rho - c dt_r + \Delta_{trp} + \Delta_{ion} + \Delta_{other} \quad (1)$$

$$\lambda_i \Phi_i = \rho - c dt_r + \Delta_{trp} - \Delta_{ion} + \lambda_i b_i + \lambda_i w + \Delta_{other} \quad (2)$$

Dabei bezeichnet ρ die geometrische Distanz zwischen Satellit und Empfänger, in der die dreidimensionalen Koordinaten des Empfängers enthalten sind. Die Lichtgeschwindigkeit wird mit c bezeichnet, dt_r ist der Empfängeruhrfehler und

Δ_{trop} ist die troposphärische Laufzeitverzögerung. Die ionosphärische Laufzeitverzögerung Δ_{ion} hat eine gegenläufige Auswirkung auf Code- und Phasemessungen, weshalb sie in den beiden Gleichungen mit unterschiedlichen Vorzeichen angeführt ist. w bezeichnet den Windup-Effekt, der nur bei Phasemessungen auftritt. In Δ_{other} sind sämtliche übrigen Fehlerterme, wie Gezeiteneffekte, Phasenzentrumskorrekturen, und Rauschen enthalten. Mit λ_i wird die Wellenlänge der jeweiligen Trägerphase bezeichnet, während b_i die Phasemehrdeutigkeit enthält. Zu beachten ist hier, dass der Satellitenuhrenfehler bereits durch den Einsatz präziser Uhrkorrekturen weitgehend entfernt worden ist.

Generell geht man im PPP Modell davon aus, dass die Ephemeridendaten fehlerfrei sind, daher ist die erreichbare Genauigkeit der geschätzten Parameter direkt von der Qualität der Ephemeriden abhängig. Die geschätzten Parameter bestehen aus den Koordinaten im Earth Centered Earth Fixed (ECEF) System, einem oder mehreren Empfängeruhrfehlern, je nach Anzahl der verwendeten GNSS Systeme, den reellwertigen Phasenambiguitäten und einem optionalen Troposphärenparameter. Dieser beschreibt üblicherweise den feuchten Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung für Satelliten im Zenit (ZWD = Zenith Wet Delay), der aufgrund unvorhersehbarer lokaler Wetterbedingungen nur schlecht modelliert werden kann. Der hydrostatische Anteil (ZHD = Zenith Hydrostatic Delay) dagegen, kann mit Modellen ausreichend genau beschrieben werden. Der Einfluss der Ionosphäre kann, im Gegensatz zur Troposphäre, durch den Einsatz der ionosphärenfreien Linearkombination der Beobachtungen weitgehend eliminiert werden, solange Beobachtungen auf mindestens zwei Frequenzen gemessen wurden. Ist das nicht der Fall, so muss der Einfluss der Ionosphäre mit geeigneten Modellen vermindert werden.

Die ionosphärenfreien Linearkombinationen für Code- und Phasentfernungen P_{IF} und L_{IF} lauten

$$P_{IF} = \frac{f_1^2}{(f_1^2 - f_2^2)} P_1 - \frac{f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)} P_2 = \quad (3)$$

$$= \rho - cdt_r + \Delta_{trop} + \Delta_{other}$$

und

$$L_{IF} = \lambda \Phi_{IF} = \frac{f_1^2}{(f_1^2 - f_2^2)} \lambda_1 \Phi_1 - \frac{f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)} \lambda_2 \Phi_2 = \quad (4)$$

$$= \rho - cdt_r + \Delta_{trop} + \lambda_{IF} b_{IF} + \Delta_{other}$$

Durch diese Kombination werden die Terme erster Ordnung der ionosphärischen Laufzeitverzögerung eliminiert. Dies entspricht in etwa 99.9% des gesamten Einflusses der Ionosphäre auf die GNSS Signale. Für PPP wird diese Kombination häufig für hochgenaue Auswertungen verwendet, obwohl sie durchaus Nachteile mit sich bringt. Ein Nachteil ist, dass das Rauschen der kombinierten Beobachtung ungefähr dreimal so hoch ist, wie jenes der einzelnen Beobachtungen. Des Weiteren sind die Schätzungen für die Ambiguitäten b_{IF} aufgrund der aus den Frequenzen entstandenen Koeffizienten, nicht mehr von Natur aus ganzzahlig.

Vor- und Nachteile gegenüber RTK

PPP weist gegenüber den altbekannten relativen Positionierungstechniken wie zum Beispiel RTK einige Unterschiede auf:

Als Vorteil kann genannt werden, dass PPP nicht auf simultane Messungen zu anderen GNSS Empfängern angewiesen ist, da keine Differenzen zwischen Beobachtungen gebildet werden. Das macht PPP wesentlich unabhängiger von örtlichen Gegebenheiten als RTK. Es werden zwar durchaus zumindest Ephemeridendaten von Stationsnetzwerken benötigt, diese können aber auch aus global verstreuten GNSS Stationen berechnet werden und sind vom International GNSS Service (IGS) frei erhältlich und global gültig. Wenn es um die Echtzeitübertragung der Ephemeriden geht, benötigen diese eine geringere Bandbreite sowie auch eine niedrigere Updaterate als beispielsweise RTK Daten. Die Echtzeitströme des IGS werden beispielsweise alle 5 Sekunden upgedatet, wobei das vor allem für die Uhrkorrekturen notwendig ist, die Bahnkorrekturen hingegen sind zeitstabiler und können wesentlich seltener z.B. nur alle 60 s ausgesendet werden. Genaue Angaben zu den Echtzeitströmen des IGS finden sich auf der IGS Homepage [5]. Aufgrund der genannten Eigenschaften kann PPP im Gegensatz zu RTK auch in Regionen ohne GNSS Infrastruktur verwendet werden, bzw. auch dort wo mobile Datenübertragung nur eingeschränkt verfügbar ist. Beispielsweise wird PPP für Frühwarnsysteme vor Tsunamis oder Erdbeben verwendet.

PPP Lösungen beziehen sich auf das geodätische Datum der Ephemeriden. Für die Produkte des IGS ist das immer die aktuelle Version des International Terrestrial Reference Frame (ITRF) zur Beobachtungsepoche (siehe [6]). Daher bekommt man mittels PPP Prozessierung eigen-

ständige Lösungen, die frei von Netzwerkeffekten sind.

PPP Projekte am Institut

Im Laufe der vergangenen 6 Jahre wurden mehrere Projekte zum Thema PPP in der Arbeitsgruppe Navigation des Instituts für Geodäsie (vormals Institut für Navigation) durchgeführt. Dazu gehören die Projekte RA-PPP & RT-PPP, die sich mit Verbesserungen der Konvergenzzeit für PPP und damit verbundenen Korrekturdaten beschäftigt haben. In beiden Projekten wurde von der Schätzung von reell-wertigen Ambiguitäten ausgegangen. Im Projekt PPPserve erfolgte der Übergang von reell-wertigen Ambiguitäten auf Integer-Ambiguitäten im Rahmen eines entwickelten PPP Services. Diese drei Projekte konzentrierten sich auf PPP mit geodätischen GNSS Empfängern für Genauigkeiten im Dezimeter- bis Zentimeter-Bereich.

Das aktuellste Projekt beschäftigt sich mit low-cost PPP in Kombination mit einem Partikelfilter und einer navigierbaren Karte als Positionierungseinheit für ein Blindennavigationssystem.

Alle genannten Projekte sind nationale Forschungsprojekte, die im Rahmen des Österreichischen Weltraumprogramms ASAP der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie gefördert wurden.

In diesem Beitrag wird das Projekt PPPserve näher vorgestellt, da es sich mit den neuesten Forschungsentwicklungen auf dem Gebiet PPP beschäftigt.

2. Projekt PPPserve

PPPserve steht für „Network based GNSS Phase Biases to enhance PPP Applications – A new Service Level of GNSS Reference Station Provider“ und beschäftigt sich im Wesentlichen mit der Berechnung und Anwendung von phasenspezifischen Biases, mit deren Hilfe PPP mit Integer-Ambiguitätenlösung ermöglicht werden kann.

In einem Projektkonsortium bestehend aus dem Department für Geodäsie und Geoinformation der TU Wien, dem Institut für Geodäsie der TU Graz und der Firma Wiener Netze GmbH, einem Mitbetreiber des Österreichischen Referenzstationsnetzwerkes EPOSA, wurde an dem Projektziel der Entwicklung geeigneter Algorithmen für eine schnelle Positionierung mittels PPP im Bereich weniger Zentimeter gearbeitet. Ein deklariertes Ziel des Projektes war es ein voll-

ständiges System aufzubauen, das es ermöglicht Phasenkorrekturen zur Wiederherstellung von Integer-Ambiguitäten in einer Netzwerklösung zu rechnen, an den Nutzer zu übertragen und mithilfe eines modifizierten PPP-Clients zu nützen um PPP mit Ambiguitätenfixierung durchzuführen.

In einer anfänglichen Design- und Evaluierungsphase wurden zwei in der Literatur existierende unterschiedliche Techniken zur Gewinnung von Phasenbiases (UPDs) untersucht: zum einen das sogenannte „Decoupled Clock Modell“, das unter anderen in [7] und [8] untersucht wurde und zum anderen das Modell „Phase recovery from fractional parts“, das am GeoForschungs-Zentrum in Potsdam entwickelt wurde (siehe [9]). In beiden Modellen werden Wide-Lane (WL) und Narrow-Lane (NL) satellitenspezifische Phasenbiases aus einem Stationsnetzwerk gerechnet, im „Decoupled Clock Modell“ allerdings aus undifferenzierten Beobachtungsmodellen, in denen rigoros zwischen hardwarespezifischen Biases auf unterschiedlichen Beobachtungstypen unterschieden wird. Beim Modell „Phase recovery from fractional parts“ dagegen, werden ausschließlich Phasenbiases aus Differenzen zwischen zwei Satelliten erzeugt.

Schlussendlich entschied sich das Projektteam für die Erzeugung von UPD Korrekturen aus Satellitendifferenzen, da mit dieser Methode die empfängerspezifischen Fehleranteile durch die Differenzbildung von Beobachtungen zwischen zwei Satelliten herausfallen und daher weder in der serverseitigen noch in der nutzerseitigen Software berücksichtigt werden müssen. Das Gesamtdesign des Systems, das in PPPserve entwickelt wurde, ist in Abbildung 1 dargestellt.

Serverseite

Die Software für die Berechnung der satellitenspezifischen UPDs wurde an der TU Wien entwickelt. Die Korrekturen werden auf der Serverseite berechnet und in einem Abstand von 30 Sekunden an den Nutzer übermittelt. Dabei ist zu beachten, dass die WL-UPDs theoretisch sogar über mehrere Tage hinweg stabil bleiben würden, und die NL-UPDs immer noch zumindest über eine Beobachtungsperiode hinweg, die bis zu mehreren Stunden dauern kann (siehe [10]). In Hinblick auf ein Echtzeitservice, kann allerdings nicht vom Nutzer erwartet werden länger als 30 Sekunden auf die Phasenkorrekturen zu warten. Des Weiteren können auch Orbit- und Uhrkorrekturen auf der Serverseite berechnet werden und zusammen mit den UPDs in Form

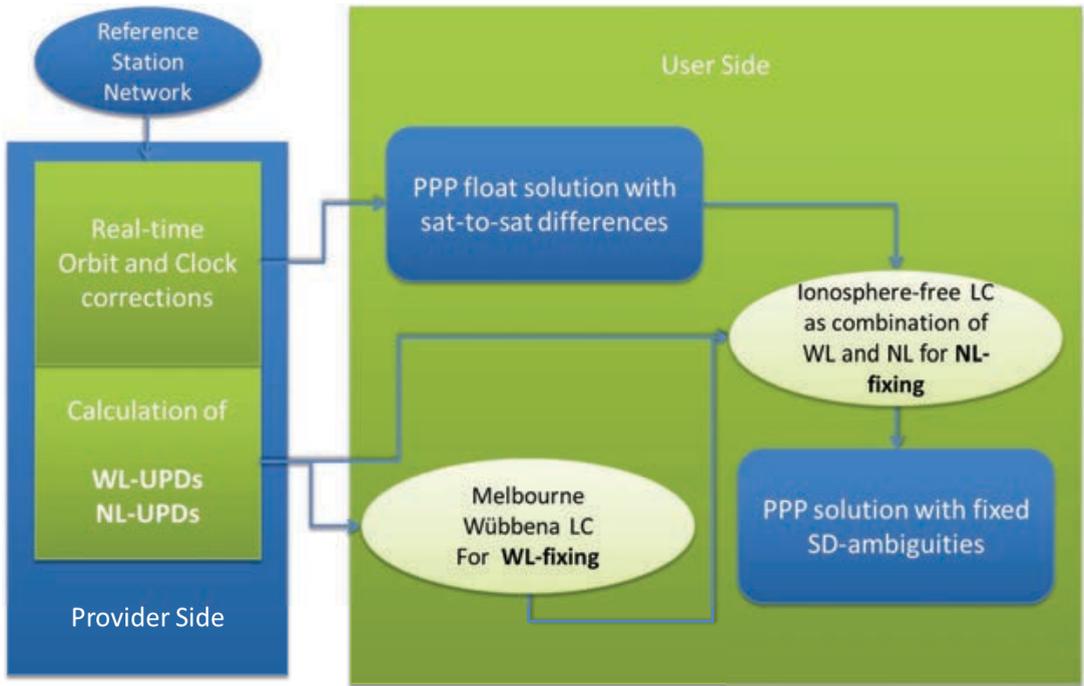


Abb. 1: PPPserve Systemdesign

von SSR-Korrekturen an den Nutzer versandt werden.

Nutzerseite

Auf der Nutzerseite werden die Korrekturdaten z.B. mithilfe eines RTCM-Clients empfangen und in einer modifizierten PPP-Software, an die entsprechenden WL- und NL-Beobachtungen angebracht. Eine solche PPP-Client Software wurde an der TU Graz entwickelt und nennt sich PPPsoft.

Durch die Applikation der UPDs wird eine PPP-Lösung mit fixierten Ambiguitäten ermöglicht, die ab der Fixierung von 3–4 Ambiguitäten eine hochgenaue Position im Bereich weniger cm liefert. Dabei spielt die Satellitengeometrie für die Geschwindigkeit und Qualität der Ambiguitätenlösung eine wichtige Rolle.

Genauere Details zum Projekt PPPserve können dem Endbericht des Projektes (siehe [11]) entnommen werden.

3. Ambiguitäten in der PPP Lösung

Nachfolgend werden die theoretischen Hintergründe der Ambiguitätenlösung für PPP, wie sie auch im Projekt PPPserve verwendet wurden, erklärt:

Geht man von der ionospärenfreie Linearkombination für Phasenmessungen in Gleichung (4) aus, lautet der zugehörige Ambiguitätenterm B_{IF} , wie er auch in der PPP Lösung geschätzt wird,

$$B_{IF} = \lambda_{IF} b_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_1 b_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_2 b_2. \quad (5)$$

Diese Kombination enthält nun die beiden unbekannt Ambiguitätenterme der einzelnen Phasen b_1 und b_2 , die in dieser Form nicht mehr getrennt bestimmt werden können. Hinzu kommt, dass die einzelnen Ambiguitäten b_i nicht nur als die eigentliche Integer-Ambiguität, sondern vielmehr als Summe der Integer-Ambiguität n_i plus satelliten- und empfängerbezogene reell-wertige Biases $\Delta\Phi_i^s$ und $\Delta\Phi_{i,r}$ betrachtet werden müssen:

$$b_i = n_i + \Delta\Phi_i^s + \Delta\Phi_{i,r} \quad (6)$$

Dabei können nur die Phasenreststücke der Biases von den Integer-Ambiguitäten getrennt werden.

Erst durch die alternative Darstellung der ionospärenfreien Linearkombination können die genannten Probleme vereinfacht werden. Betrachtet man die ionospärenfreien Ambiguitäten

$$\lambda_{IF} b_{IF}^{ij} = \lambda_1 b_c^{ij} = \frac{f_1^2}{(f_1^2 - f_2^2)} \lambda_1 b_1^{ij} - \frac{f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)} \lambda_2 b_2^{ij}, \quad (7)$$

so können diese mittels einer Umformung auch in der folgenden Gleichung dargestellt werden:

$$\begin{aligned} b_c^{ij} &= \frac{f_1}{f_1 + f_2} b_n^{ij} + \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} b_w^{ij} = \\ &= \frac{f_1}{f_1 + f_2} (n_n^{ij} + \Delta\Phi_n^{ij}) + \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} (n_w^{ij} + \Delta\Phi_w^{ij}) \end{aligned} \quad (8)$$

In dieser Form ist man nun nicht mehr mit den Ambiguitäten der einzelnen Phasen konfrontiert, sondern man erhält nun einen Wide-Lane (WL) und einen Narrow-Lane (NL) Anteil $b_w^{ij} = (n_w^{ij} + \Delta\Phi_w^{ij})$ und $b_n^{ij} = (n_n^{ij} + \Delta\Phi_n^{ij})$, die beide aus der jeweiligen Integer-Ambiguität n^{ij} und dem zugehörigen satellitenspezifischen UPD $\Delta\Phi^{ij}$ bestehen. Die Indizes i und j stehen für die beiden Satelliten, zwischen denen eine Differenz gebildet wurde, um empfängerspezifische Fehler zu eliminieren.

WL-Fixierung

Mit der alternativen Darstellung der ionosphärenfreien Ambiguitäten hat man nun erreicht, dass man die WL-Ambiguität, die über eine große Wellenlänge von $\lambda_{WL} = 86$ cm verfügt, schon in der Vorprozessierung mit Hilfe der Melbourne-Wübbena Linearkombination (siehe [12] und [13]) lösen kann. Diese wird aus Code- und Phasenmessungen beider Frequenzen gebildet und eliminiert den Einfluss der Ionosphäre und der Geometrie, sodass nur noch WL Ambiguitäten und die entsprechenden UPDs in der Gleichung verbleiben. Sind die WL-UPDs bekannt, können die Integer WL Ambiguitäten einfach durch Mittelbildung über die Beobachtungen bestimmt werden.

NL-Fixierung

Nach der Fixierung der WL-Ambiguität enthält Gleichung (8) nur mehr einen unbekanntem Ambiguitätsterm: die NL-Ambiguität, deren Bestimmung allerdings auf Grund der verhältnismäßig kürzeren Wellenlänge von 10.7 cm etwas komplizierter ist. Sie wird im Zuge der eigentlichen Prozessierung mithilfe der geschätzten Float-Ambiguität \hat{B}_{IF}^{ij} , der fixierten WL-Ambiguität und dem NL-UPD fixiert. Dazu wird Gleichung (8) umgeformt, sodass man die NL-Ambiguität erhält:

$$\begin{aligned} b_n^{ij} &= n_n^{ij} + \Delta\Phi_n^{ij} = \\ &= \frac{f_1 + f_2}{f_1} \hat{B}_{IF}^{ij} - \frac{f_1}{f_1 - f_2} (n_w^{ij} + \Delta\Phi_w^{ij}) \end{aligned} \quad (9)$$

Da die Float-Lösung einige Zeit benötigt um zu konvergieren, ist die korrekte Fixierung der Ambiguitäten am Beginn der Prozessierung relativ schwierig. Aus diesem Grund wird in PP-Soft eine partielle Ambiguitätenlösung mithilfe der LAMBDA Methode (siehe [14]) angewendet. Dazu werden zunächst nur die Ambiguitäten mit der kleinsten Varianz aus der Float-Lösung für die Fixierung verwendet. Erst wenn diese erfolgreich ist folgen die Ambiguitäten der restlichen Satelliten. Da die Schätzungen der ionosphärenfreien Ambiguitäten während der Konvergenz noch deutlich schwanken können, wird die Ambiguitätenlösung jede Epoche neu gerechnet und gegebenenfalls verändert.

Sobald man mindestens 3–4 Ambiguitätenpaare (WL und NL) fixiert hat, kann man die entsprechenden ionosphärenfreien Ambiguitäten mittels Gleichung (8) rekonstruieren und wieder in das Gleichungssystem einführen. Im Falle von PPPserve werden die daraus erhaltenen ionosphärenfreien Satellitendifferenzen der Ambiguitäten als PseudoBeobachtungen mit hohem Gewicht eingeführt. Mit diesen Zusatzinformationen kann nun ein 2ter Ausgleich erfolgen, der diesmal von kinematischen, daher von Epoche zu Epoche unabhängigen, Parametern ausgeht. Dies bewirkt, dass sich die Koordinatenlösung nach der korrekten Ambiguitätenfixierung sprunghaft verbessert.

4. Ergebnisse der PPP Lösungen

Nachfolgend werden exemplarisch einige Ergebnisse aus der PPP Client-Software PPPsoft dargestellt, die die Funktionalität der PPP-Lösung am Institut für Geodäsie im Float-Modus, sowie mit Ambiguitätenfixierung aufzeigen sollen.

Gegenüberstellung Float-Lösung mit Final Orbits und mit Echtzeitkorrekturen

In Abbildung 2 sieht man die Nord-, Ost- und Höhendifferenzen (dN, dE, dU) in Bezug auf die Referenzkoordinaten einer PPP Float-Lösung der IGS Station Graz Lustbühel. Diese wurden mithilfe von Echtzeitströmen mit SSR-Korrekturen für Satellitenbahnen und Uhren des Centre National d'Études Spatiales, Toulouse (CNES) gerechnet. In Abbildung 3 sieht man eine zweite Koordinatenlösung derselben Station. Diesmal wurden jedoch die sogenannten Final Orbits des IGS verwendet, die erst im Postprocessing einige

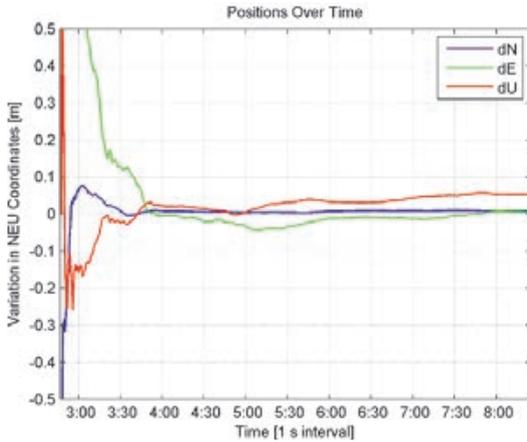


Abb. 2: Nord, Ost und Höhendifferenzen einer PPP Float-Lösung: Beobachtungsdaten Graz Lustbühel DOY 88 in 2013 mit Echtzeitkorrekturen für Ephemeriden von CNES

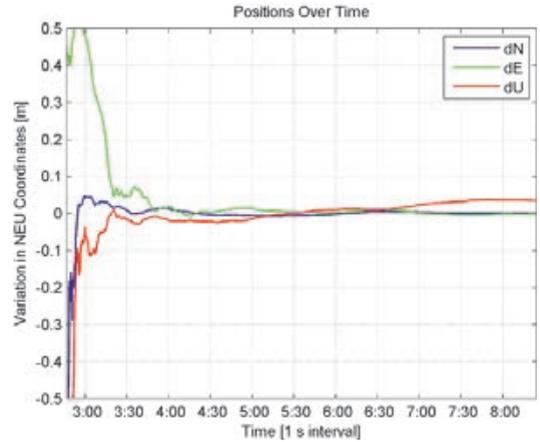


Abb. 3: Nord, Ost und Höhendifferenzen einer PPP Float-Lösung: Beobachtungsdaten Graz Lustbühel DOY 88 in 2013 mit IGS Final Orbits und Uhren

Tage nach der Beobachtung erhältlich sind. In der X-Achse beider Plots ist die Beobachtungszeit aufgetragen. Die Beobachtungen fanden im Zeitraum von 2:46 – 8:20 statt und wurden im Sekundentakt berechnet.

zeit verfügbaren Daten mittlerweile schon fast die Qualität der Postprocessing-Ephemeriden erreicht haben und daher auch in Echtzeit Positionslösungen im Bereich weniger cm ermöglicht werden.

In beiden Graphiken sieht man, dass mit Hilfe von PPP Koordinaten mit einer Genauigkeit von wenigen cm bestimmt werden können. Dies dauert allerdings in beiden Fällen eine gewisse Zeit: Für eine Genauigkeit im dm-Bereich werden 20–30 Minuten benötigt, während die optimale Genauigkeit erst nach 1–2 Stunden erreicht ist. Dies sind typische Konvergenzzeiten für PPP Lösungen. Auffällig ist auch, dass die in Echt-

Gegenüberstellung Float-Lösung und fixierte Lösung

Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen einen Vergleich der Koordinaten aus einer Float-Lösung mit denen aus einer Lösung mit fixierten Integer-Ambiguitäten. In beiden Fällen sind die Abweichungen von Koordinatenlösungen der EPOSA Station BADE in Nord- und Ostrichtung sowie

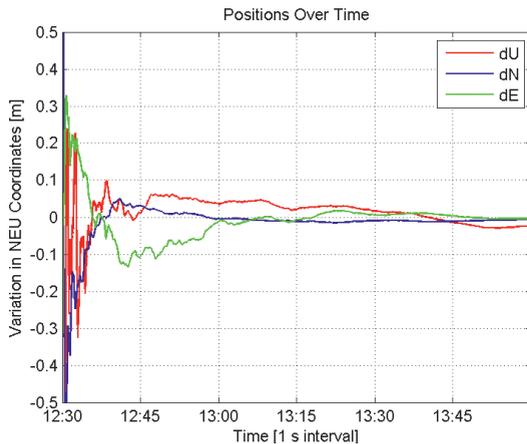


Abb. 4: Nord, Ost und Höhendifferenzen einer PPP Float-Lösung: Beobachtungsdaten EPOSA Station BADE DOY 87 in 2013 mit IGS Final Ephemeriden und UPDs von TU Wien

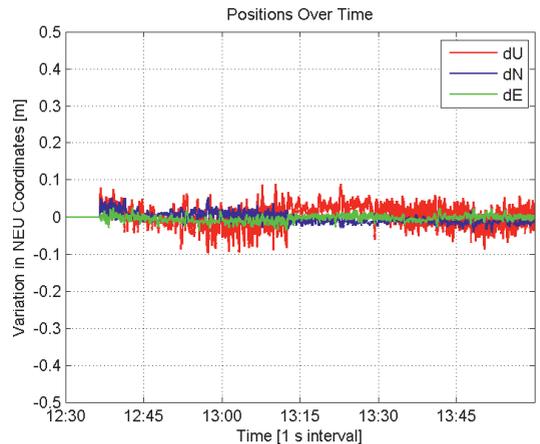


Abb. 5: Nord, Ost und Höhendifferenzen einer PPP Lösung mit Ambiguitätenfixierung: Beobachtungsdaten EPOSA Station BADE DOY 87 in 2013 mit IGS Final Ephemeriden und UPDs von TU Wien

der Höhe dargestellt. Die Beobachtungszeit (X-Achse) war in beiden Fällen 12:30 bis 14:00 am Tag 87 in 2013.

Die Float-Lösung in Abbildung 4 wurde mit Hilfe eines Kalman-Filters gerechnet, in dem die Koordinaten sowie auch die geschätzten Ambiguitäten als konstant angenommen wurden. Durch diese Filterung sieht die Koordinatenlösung sehr viel glatter aus, als die der fixierten Lösung in Abbildung 5, die ohne Filterung in einem epochenweisen Ausgleich nach kleinsten Quadraten berechnet wurde. Auch abgesehen vom Rauschen, zeigt die fixierte Lösung ein deutlich anderes Verhalten im Vergleich zur Float-Lösung: Ab Epoche 400 (nach weniger als 7 Minuten) kann eine Koordinatenlösung mit fixierten Ambiguitäten berechnet werden, die sofort die maximale Genauigkeit von wenigen Zentimetern erreicht. Die Float-Lösung dagegen benötigt dafür über 30 Minuten. Nach der korrekten Ambiguitätenfixierung bleibt die Lösung konstant bei derselben Genauigkeit, wobei die Ostkomponente und die Nordkomponente gleichwertig sind.

Statistische Auswertung von Ergebnissen aus Float- und Fixierter Lösung

In Abbildung 6 und Abbildung 7 sieht man die statistische Auswertung einer Testserie der EPOSA Station Graz am Tag 87 des Jahres 2013. Berechnet wurden Float-Lösungen und Lösungen mit Ambiguitätenfixierung, wobei die Startzeit bei jeder Lösung um 30 Minuten versetzt wurde. Ausgewertet wurde lediglich eine Stunde pro Lösung, da besonders die Konvergenz der

Koordinaten in diesem Zeitraum interessant war. Die Abbildungen zeigen den Median der Abweichungen der Nord, Ost und Höhenkomponente (dN, dE, dU) von den Referenzkoordinaten zu den Zeitpunkten 15, 30, 45 und 60 Minuten nach Start der Berechnung ermittelt aus allen Lösungen des Tages.

Auch die Testserie der Float-Lösungen in Abbildung 6 und der fixierten Lösungen in Abbildung 7 zeigen, dass die volle Koordinatenkonvergenz mithilfe der fixierten Ambiguitäten wesentlich schneller erreicht werden kann; die meisten Ambiguitäten wurden nach 15 bis 30 Minuten fixiert. Danach ist die Koordinatenlösung vor allem in der Ost-, und Höhenkomponente eindeutig besser, als in der Float-Lösung.

Leider ist die korrekte Fixierung in der Anfangsphase der Prozessierung vor der Konvergenz der Float-Ambiguitäten schwierig, weshalb gerade in dieser Zeit noch häufig falsche Integerwerte fixiert werden. Auch wenn diese nur um ± 1 Cycle daneben liegen, kann die resultierende Koordinatenlösung stark verfälscht werden, was sich in sprunghaften Koordinatenoffsets äußert. Eine Vielzahl an Tests zum Thema der Verkürzung der Zeit zur Fixierung der Ambiguitäten, sowie der Detektion von falschen Fixierungen wurde in [15] dokumentiert.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend wurde in diesem Beitrag gezeigt, welche Resultate heutige PPP-Lösungen mit geodätischen Empfängern leisten können, sowie welchen Gewinn man aus der Integer-Ambiguitätenlösung in einem PPP-Client erhalten

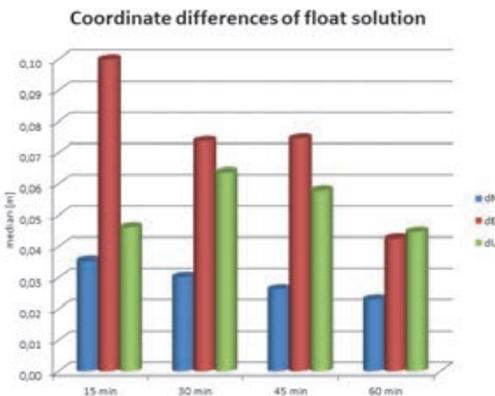


Abb. 6: Median der Nord, Ost und Höhendifferenzen einer Serie von PPP Float-Lösungen: Beobachtungsdaten EPOSA Station GRAZ DOY 87 in 2013 mit Echtzeitkorrekturen für Ephemeriden und UPDs von CNES

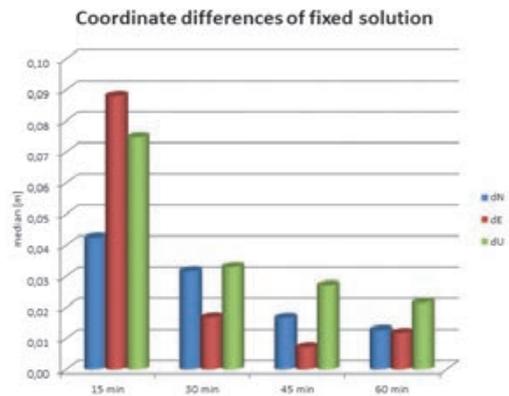


Abb. 7: Median der Nord, Ost und Höhendifferenzen einer Serie von PPP Lösungen mit Ambiguitätenfixierung: Beobachtungsdaten EPOSA Station GRAZ DOY 87 in 2013 mit Echtzeitkorrekturen für Ephemeriden und UPDs von CNES

kann. Heutzutage ist es möglich mit Hilfe externer Daten Ambiguitäten auch für die Einzelpunktbestimmung zu fixieren, was die Genauigkeit der Lösung sprunghaft konvergieren lässt. Die Ambiguitätenlösung benötigt in den meisten Fällen immer noch zwischen 10 und 30 Minuten. Danach erhält man allerdings Positionen im Bereich von wenigen Zentimetern. In einer Float-Lösung liegt die Konvergenzzeit bis zum Erhalt einer Zentimeterlösung bei mindestens 30 Minuten, kann aber auch deutlich über eine Stunde dauern. Außerdem wird die Konvergenz und Endgenauigkeit von Koordinaten in Ostrichtung durch die Fixierung von Ambiguitäten deutlich verbessert.

Trotz dieser ersten Erfolge gibt es noch einige Punkte, die in Bezug auf PPP für Echtzeitanwendungen zu erforschen sind. Dazu gehören Tests im Bereich kinematischer Anwendungen, aber auch die Entwicklung besserer Methoden zur Detektion von falschen Fixierungen der Ambiguitäten in der Anfangsphase der PPP-Lösung.

Danksagung

PPPserve und alle andere genannten Projekte sind nationale Forschungsprojekte, die im Rahmen des Österreichischen Weltraumprogramms (ASAP) der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie gefördert wurden.

Das PPPserve Konsortium bestand aus dem Department für Geodäsie und Geoinformation der TU Wien, dem Institut für Geodäsie, Arbeitsgruppe Navigation der TU Graz und der Wiener Netze GmbH, einem Mitbetreiber des Österreichischen Referenzstationsnetzwerkes EPOSA.

Referenzen

- [1] Anderle, R. J. (1977). Point positioning concept using precise ephemeris. In: Satellite Doppler positioning. Ed. by G. Veis and O. W. Williams, pp. 47-75.
- [2] Kouba, J. and P. Héroux (2001). Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. In: GPS Solutions 5.2, pp. 12-28.
- [3] Zumbege, J. F., M. B. Heflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins, and F. H. Webb (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. In: Journal of Geophysical Research: Solid Earth 102.B3, pp. 5005-5017.
- [4] Radio Technical Commission for Maritime Services (2011). Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services -Version 3. RTCM 10403.1 RTCM Paper 142. 2011/SC104-STD with Amendment 5. Version 3.
- [5] Homepage des IGS Real-time Services. <http://igs.org/rt/products>. Besucht am 20.02.2015.
- [6] Homepage des International Terrestrial Reference Frame (ITRF). http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008. Besucht am 20.02.2015.
- [7] Collins, P., S. Bisnath, F. Lahaye, and P. Héroux (2010). Undifferenced GPS Ambiguity Resolution Using the Decoupled Clock Model and Ambiguity Datum Fixing. In: Journal of the Institute of Navigation Vol. 57, No. 2.
- [8] Laurichesse, D., F. Mercier, J. P. Berthias, P. Broca, and L. Cerri (2009). Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination. In: Journal of the Institute of Navigation Vol. 56, No. 2.
- [9] Ge, M., G. Gendt, M. Rothacher, C. Shi, and J. Liu (2008). Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations. In: Journal of Geodesy 82.7, pp. 389-399.
- [10] Hinterberger, F., R. Weber, K. Huber, R. Lesjak (2015). Ambiguity fixing in real-time PPP – Determination of uncalibrated phase delays using a regional network. In: Austrian Contributions to the 26th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), Prague, Czech Republic. Wird veröffentlicht im Juni 2015.
- [11] Weber, R., F. Hinterberger, K. Huber, R. Lesjak, C. Klug, and G. Thaler (2013). Final Report of project PPPserve: Network based GNSS Phase Biases to enhance PPP Applications – A new Service Level of GNSS Reference Station Provider
- [12] Melbourne, W. G. (1985). The case for ranging in GPS-based geodetic systems". In: Proc. 1st Int. Symp. on Precise Positioning with GPS, Rockville, Maryland (1985), pp. 373-386.
- [13] Wübbena, G. (1985). Software developments for geodetic positioning with GPS using TI-4100 code and carrier measurements. In: Proceedings of the First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System. Vol. 19.
- [14] De Jonge, P. and C. Tiberius (1996). The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects. In: Delft Geodetic Computing Centre LGR Series 12.
- [15] Huber, K. (2015). Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution for real-time applications. Dissertation an der TU Graz.

Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Katrin Huber, Institut für Geodäsie – Arbeitsgruppe Navigation, Technische Universität Graz, Steyrergasse 30, A-8010 Graz.

E-mail: katrin.huber@tugraz.at

Dipl.-Ing. Roman Lesjak, Institut für Geodäsie – Arbeitsgruppe Navigation, Technische Universität Graz, Steyrergasse 30, A-8010 Graz.

E-mail: roman.lesjak@tugraz.at

Dipl.-Ing. Fabian Hinterberger, Department für Geodäsie und Geoinformation, Arbeitsgruppe Advanced Geodesy, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 25-29, 1040 Wien.

E-mail: fabian.hinterberger@tuwien.ac.at