

Abstract

With the rapid development of the multi-constellation Global Navigation Satellite Systems (GNSS), the real-time precise point positioning (PPP) is undergoing dramatic growth and is recognized as the most promising service. One of the critical issues in such a system is to provide precise and reliable ultra-rapid orbits. Although precise orbit determination (POD) is quite mature for GPS, there is still space for improvement and challenges for newly emerging constellations such as BeiDou System (BDS), Galileo, and Quasi-Zenith Satellite System (QZSS). On the one hand, algorithms of high computational efficiency are required to update the solution as fast as possible in order to shorten the prediction time. On the other hand, observation modeling and satellite force models can be further refined, especially for the new GNSS systems. Hence the major objectives of this study is to improve the precise orbit products for real-time positioning service by increasing modeling accuracy and developing more efficient processing procedures.

Recently, most of International GNSS Service (IGS) analysis centers (ACs) use the latest 24-hour observations of about 100 stations to update the ultra-rapid orbit products every three hours and the products are employed in the real-time positioning service. However, both shortening the update time and involving longer observations of more stations will enhance the solution for better orbits, which is very critical for generating real-time products and supporting reliable integer ambiguity resolution. Therefore, the whole processing procedure is optimized according to available computer resources by utilizing multi-process and parallel computation techniques and a new processing scheme is proposed to realize the hourly update of multi-GNSS ultra-rapid orbits. In particular, a high-performance computing (HPC) parallel algorithm is developed based on a multi-core processor for improving the efficiency of the batch least square (LSQ) procedure in the GNSS network solution.

For the observation modeling, the correction of higher order ionospheric (HOI) delays remaining in the dual-frequency ionosphere-free (IF) observations has been suggested for high-precision GNSS data processing. However, this correction is often ignored in the ultra-rapid POD most likely because a real-time ionospheric model needed for calculating the HOI corrections is hardly available or the HOI impact is believed rather small. In this contribution, the temporal-spatial characteristics of HOI effects on GNSS observables are investigated thoroughly using data collected from a network of globally distributed IGS stations and consequently its impact on the ultra-rapid orbits is also evaluated. The results show that HOI fluctuations could reach up to several centimeters during periods of high ionospheric activity and that owing to the applied HOI corrections, the agreement of overlapping orbits can be improved significantly for all satellites and especially in the radial direction.

Among the GNSS satellite force models, the solar radiation pressure (SRP) force is the most

difficult one to be accurately modeled, as it depends on the structure and material characteristics of satellites and should be optimized accordingly. Although the CODE's (Center for Orbit Determination in Europe) SRP model ECOM is widely used for GPS, it is further adapted for GLONASS and GALILEO satellites, and the box-wing model is also suggested to consider their particular satellite surface structures and material features. We concentrate on the optimization of the SRP modeling for BDS-3 satellites, as there is already a global network with about 200 stations tracking BDS-3 satellites. From the large disagreement of overlapping orbits of adjacent sessions with ECOM1 or ECOM2, we noticed that their parameterization should be improved by carefully selecting proper periodic terms. Based on our numerical analysis and parameter significance tests, it is confirmed that the cosine terms must be excluded and the fourth- and sixth-order sine terms are significant in the Sun direction for the SRP model of BDS-3 satellites. With the newly proposed SRP model, the large fluctuations of overlapping residuals in the radial component are reduced remarkably, especially from 20 cm to below 10 cm over deep eclipse seasons and Satellite Laser Ranging (SLR) residuals are also reduced by a factor of two compared to that of ECOM1 and ECOM2. Furthermore, the RMS of predicted orbits over the eclipse seasons can be reduced from about 7.3, 13.3, and 21.7 cm to about 3.1, 4.6, and 10.6 cm, in the radial, cross, and along directions, respectively. Concerning the box-wing model for BDS satellite, the latest satellite metadata have been published on March, 2020, whereas the coefficients of optical properties are still uncertain at present for each box-wing surface of BDS-3 satellites. Based on the SLR validation, a priori coefficients can be optimized by the comparative experiments to confirm the main type of reflection for the associated surfaces of BDS-3 satellites. With the optimized coefficients of the box-wing model, the orbit accuracy could be further improved from about 5 cm to 3 cm in terms of the RMS of SLR residuals.

Overall, in this study, we have improved the multi-GNSS POD by shortening the orbit prediction time with a computational efficient processing strategy, and refining the observation i.e., HOI corrections, and adapting the ECOM SRP model and optimizing the optical coefficients of the corresponding box-wing model for BDS-3 satellites as well. All the improvements are implemented in the processing software package and validated with a large set of real observations.

Kurzinhalt

Mit der derzeitigen rapiden Entwicklung verschiedener Globaler Satellitennavigationssysteme (GNSS) wird die Echtzeitpositionierung als vielversprechender Dienst erkannt und erfährt eine rasche Ausbreitung. Ein entscheidender Punkt hierbei ist die Bereitstellung von genauen und zuverlässigen Ultra-Rapid Satellitenbahnen. Während die Bestimmung hochgenauer Satellitenbahnen (POD) für GPS ziemlich ausgereift ist, gibt es für die neu entstandenen und entstehenden Konstellationen wie das BeiDou System (BDS), Galileo und das Quasi-Zenith-Satelliten-System (QZSS) Raum zur Verbesserung und es bestehen offene Probleme. Zum einen sind Algorithmen mit hoher Berechnungseffizienz notwendig, um eine Lösung möglichst schnell bereitzustellen und die Prädiktionszeit zu verkürzen. Zum anderen können die Modellierung der Beobachtungen und die Modelle der auf die Satelliten wirkenden Kräfte insbesondere für neue Systeme weiter verbessert werden. Das Hauptziel dieser Arbeit ist daher die Verbesserung der hochgenauen Satellitenbahnbestimmung durch eine verbesserte Modellierung und die Entwicklung von effizienteren Prozessierungsverfahren als bisher.

Derzeit bestimmen die meisten Analysezentren (AC) des Internationalen GNSS Service (IGS) ihre Ultra-Rapid Satellitenbahnen auf der Basis von 24-stündigen Beobachtungsdaten von etwa 100 Stationen und aktualisieren ihre Produkte alle drei Stunden. Diese werden dann zur Echtzeitpositionierung verwendet. Eine Verkürzung der Aktualisierungszeit sowie die Verwendung längerer Beobachtungszeiträume mit einer größeren Anzahl von Stationen führt zu besseren Satellitenbahnen und ist daher maßgeblich für die Berechnung von Echtzeitprodukten und die Ermöglichung einer zuverlässigen Mehrdeutigkeitsauflösung. Die gesamte Prozessierungsstrategie wird durch die Ausnutzung von multi-Vektorbearbeitung und parallelen Berechnungstechniken für die verfügbare Rechnerausstattung optimiert. Eine neue Berechnungsmethode ermöglicht eine stündliche Aktualisierung der multi-GNSS Ultra-Rapid Produkte. Es wird insbesondere ein parallelisierter High Performance Computing (HPC) Algorithmus für Multi-Core Prozessoren entwickelt um die Effizienz von Least-Squares Ausgleichungen (LSQ) für GNSS Netzlösungen zu verbessern.

Für die Beobachtungsmodellierung wurde die Korrektur von ionosphärischen Signalverzögerungen höherer Ordnung (HOI) mit ionosphärenfreien Kombinationen von Zweifrequenzbeobachtungen für hochgenaue GNSS Datenprozessierung empfohlen. Diese Korrektur wird allerdings für die Ultra-Rapid Satellitenbahnbestimmung meist vernachlässigt, da ein dafür benötigtes Ionosphärenmodell in Echtzeit kaum verfügbar ist und der Einfluss der HOI als relativ gering eingeschätzt wird. In dieser Arbeit wird der Einfluss der HOI Signalverzögerungen auf die GNSS Beobachtungen räumlich und zeitlich anhand von Daten eines globalen Netzwerkes von IGS Bodenstationen eingehend untersucht und die Auswirkungen auf die Ultra-Rapid Satellitenbahnen ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen Schwankungen der HOI Signalverzögerungen

von mehreren Zentimetern in Phasen hoher ionosphärischer Aktivität. Durch die Anwendung von HOI Korrekturen können die Differenzen überlappender Satellitenbahnen für alle Satelliten insbesondere in radialer Richtung signifikant verringert werden.

Unter allen Kräften, die auf die Satelliten wirken, kann die Sonnenstrahlungsdruckkraft (SRP) am schwierigsten modelliert werden, da diese von der räumlichen Struktur und den Materialeigenschaften der Satelliten abhängt und ein Modell dahingehend optimiert werden muss. Das vom Center for Orbit Determination in Europe (CODE) bereitgestellte SRP Modell ECOM ist für GPS weit verbreitet. Für GLONASS und Galileo Satelliten sind allerdings Anpassungen notwendig und es wird ein Box-Wing Modell empfohlen, das die spezifischen Oberflächenstrukturen und Materialeigenschaften der Satelliten berücksichtigt. In dieser Arbeit beschäftigen wir uns mit der Optimierung des SRP Modells für BDS-3 Satelliten, die bereits von etwa 200 global verteilten Bodenstationen beobachtet werden. Große Differenzen in den Überlappungen zeitlich benachbarter Bahnbögen mit ECOM1 oder ECOM2 zeigen, dass deren Parametrisierung durch eine geeignete Auswahl der periodischen Terme verbessert werden sollte. Numerische Analysen und Signifikanztests der Parameter bestätigen, dass die Kosinusterme entfernt werden müssen und die Sinusterme vierter und sechster Ordnung in Richtung der Sonne für die SRP Modellierung von BDS-3 Satelliten signifikant sind. Mit diesem neuen SRP Modell können die großen Fluktuationen der Differenzen überlappender Bahnbögen für die radiale Komponente deutlich reduziert werden, etwa von 20 cm auf unter 10 cm während der Erdschattendurchgänge. Die SLR Residuen sind im Vergleich zu ECOM1 und ECOM2 halbiert. Die RMS Werte der Satellitenbahnprädiktionen können während Erdschattendurchgängen von ca. 7.3, 13.3 und 21.7 cm für die radial, crosstrack und alongtrack Komponenten auf ca. 3.1, 4.6 und 10.6 cm verbessert werden. Hinsichtlich des Box-Wing Modells der BDS Satelliten wurde zwar im März 2020 eine aktualisierte Version der Satellitenmetadaten veröffentlicht, allerdings sind die Koeffizienten der optischen Eigenschaften für sämtliche Oberflächen des Box-Wing Modells der BDS-3 Satelliten gegenwärtig noch unbekannt. Basierend auf einer SLR Validierung können die a priori Koeffizienten durch Vergleichsexperimente angepasst werden und die Hauptreflektionsart der Oberflächen der BDS-3 Satelliten können bestätigt werden. Mit den optimierten Koeffizienten des Box-Wing Modells kann die Genauigkeit der Satellitenbahnen gemessen an den SLR Residuen etwa von 5 cm auf 3 cm weiter verbessert werden.

Zusammenfassend wurde in dieser Arbeit die hochgenaue multi-GNSS Satellitenbahnbestimmung durch eine Verkürzung der Prädiktionszeit der Satellitenbahnen, durch eine Verfeinerung der Beobachtungs und Satellitenkraftmodelle, d.h. insbesondere der HOI Korrekturen, des ECOM SRP Modells und einer Optimierung der optischen Koeffizienten des zugehörigen Box-Wing Modells für BDS-3 Satelliten verbessert, und da durch eine Steigerung der Effizienz der GNSS Netzwerklösung erreicht. Alle Verbesserungen wurden in der Prozessierungssoftware implementiert und mit einer großen Zahl von Beobachtungen validiert.