

Interpolation von GNSS-Satellitenuhrkorrekturen für Kinematisches Precise Point Positioning (PPP)

Zielstellung

Die Unabhängigkeit von der Verfügbarkeit von Referenzstationen sowie der Kommunikation mit selbigen ist der große organisatorische Vorteil von Precise Point Positioning (PPP) gegenüber differenziellen Positionierungsmethoden (DGPS) – im Gegenzug erfordert das Verfahren Modelle zur Korrektur von Einflüssen der Atmosphäre, der Erdrotation und der Erdzeiten auf die Messung. Überdies benötigt werden zeitnahe und präzise

Informationen über die Satellitenorbits (Ephemeriden) und Satellitenuhren, letztere in Form von Satellitenuhrkorrekturen, welche den individuellen Abweichungen der verwendeten Cäsium- und Rubidiumuhren zur GPS-Zeit entgegenwirken. Diese Korrekturen werden in 30-Sekunden-, 5-Minuten- und 15-Minuten-Intervallen vom International GNSS Service (IGS) im Internet veröffentlicht, was für statische Messungen vollkom-

men ausreichend ist. Für kinematische Messungen jedoch müssen diese Ausgangsdaten vom IGS zu Datensätzen mit niedrigeren Intervallen (bis zu 1 Hz) interpoliert werden. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde überprüft, ob die physikalischen Eigenschaften von Cäsium- und Rubidiumuhren eine mathematische Interpolation zulassen und welche Interpolationsmethode die günstigsten Ergebnisse liefert.

Untersuchung der Satellitenuhren bezüglich ihrer Kurzzeitstabilität

In beiden untersuchten GNSS, dem amerikanischen GPS und dem russischen GLONASS, werden unterschiedliche Generationen von Atomuhren nach Cäsium- beziehungsweise Rubidium-Standard eingesetzt, der letztere bisher exklusiv bei GPS. Die Untersuchungen im Rahmen der Arbeit haben dabei gezeigt, dass diese verschiedenen Generationen ebenso verschiedene Charakteristika bezüglich der Kurzzeitstabilität aufweisen. Mit Hilfe der sogenannten Modifizierten Allan-Varianz (siehe gelber Kasten) und 1-Sekunden-Daten vom Geodätischen Institut war eine qualitative Aussage über die Kurzzeitstabilität möglich.

Abb. 1 illustriert die unterschiedlichen Verläufe der modifizierten Allan-Varianz exemplarisch für jede Satelliten- und Uhrgeneration. Der Kurvenverlauf gibt zudem Aufschluss über die Rauscharten, welche die Uhreninstabilität auf physikalischer Ebene hervorrufen und Satellitenuhrkorrekturen erst notwendig machen. Ein absteigender Verlauf der Allan-Varianz kennzeichnet dabei sogenanntes Weißes Rauschen der Frequenz (Abb. 2), während ein horizontaler Verlauf für Funkelrauschen der Frequenz (Abb. 3) charakteristisch ist.

Die Untersuchungen zeigten, dass der physikalische Aufbau der entscheidende Faktor für die Stabilität von Atomuhren ist und dass zukünftige Technologiegenerationen mit verbesserten Konstruktionen das grundlegende Potenzial besitzen, im Kurzzeitbereich die jetzigen Uhren zu übertreffen. Problematisch ist in diesem Zusammenhang lediglich die Fokussierung der Forschung auf eine Verbesserung der Langzeitstabilität, der sich während der Untersuchung dadurch offenbarte, dass die neuere Rubidiumgeneration GPS-Block IIR/IIR-M im Kurzzeitbereich

Modifizierte Allan-Varianz: Für inkrementierende Zeitintervalle ($\tau = 1s, 2s, \dots$) wird ein Datensatz von Uhrkorrekturen in Tripel unterteilt (x_n, x_{n+1}, x_{n+2}), die anschließend systematisch aufsummiert und durch die Anzahl der untersuchten Elemente ($N-2$) sowie das Zeitintervall geteilt werden. Das Ergebnis ist die dimensionslose Modifizierte Allan-Varianz (benannt nach dem Physiker David W. Allan), welche die Stabilität und das Rauschverhalten von Uhren beschreibt. Je kleiner das Ergebnis, desto stabiler ist die Uhr für ein gegebenes Intervall. Mathematische Formel:

$$\text{Mod.}\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2)} \sum_{n=1}^{N-2} \left(\frac{x_n - 2x_{n+1} + x_{n+2}}{\tau} \right)^2$$

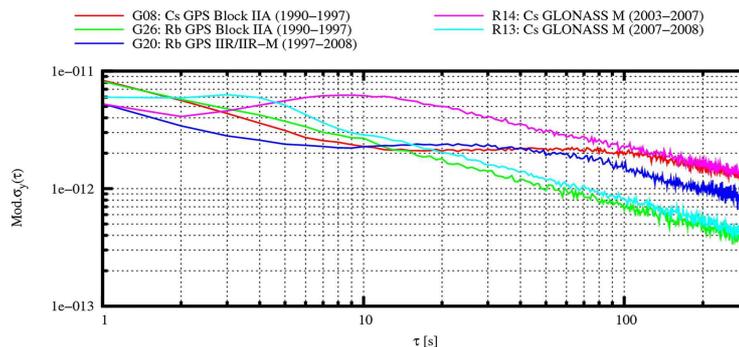


Abb. 1: Modifizierte Allan-Varianzen exemplarischer GPS- und GLONASS-Satelliten (Jahresangabe in Klammern bezieht sich auf Startjahre der jeweiligen Uhren- beziehungsweise Satellitengeneration)

einen ungünstigeren Verlauf aufweist als die ältere Generation Block IIA. Ungeachtet dessen zeigte die Untersuchung in Bezug auf die Zielsetzung, dass alle derzeit aktiven Satellitenuhren im Kurzzeitbereich relativ instabil sind. Die Anwendbarkeit von mathematischen Interpolationsalgorithmen zur Verdichtung von Daten muss vor dem Hintergrund dieser Tatsache in Frage gestellt werden.



Abb. 2: Weißes Rauschen der Frequenz



Abb. 3: Funkelrauschen der Frequenz

Vergleich der mathematischen Interpolationsalgorithmen

Trotz der grundlegenden Untauglichkeit von mathematischen Interpolationsmethoden konnte a priori keine qualitative Aussage darüber getroffen werden, welche Methode die besten, d.h. den realen Werten am nächsten kommenden, Ergebnisse liefern würde. Daher wurde ein vom Geodätischen Institut mittels Phasenbeobachtungen erstellter 1-Sekunden-Intervall-Datensatz bis auf 5-Minuten-Intervalle ausgedünnt und anschließend mit drei verschiedenen Algorithmen (linear mit 2 Stützpunkten, stückweise quadratisch mit 3 Stützpunkten, stückweise kubisch mit 4 Stützpunkten) erneut interpoliert. Die interpolierten Datensätze wurden danach mit dem Soll-Datensatz verglichen sowie Standardabweichungen berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 4

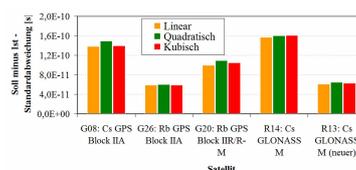


Abb. 4: Qualitativer Vergleich mathematischer Interpolationsalgorithmen

illustriert. Sie zeigen, dass es trotz Unterschieden zwischen den einzelnen Satelliten(-generationen) keinen signifikanten qualitativen Unterschied zwischen den einzelnen Interpolationsmethoden gibt.

Fazit

Die Untersuchungsergebnisse sind ebenso eindeutig wie unzufriedenstellend für nicht-kommerzielle Anwender von kinematischem Precise Point Positioning, die auf präzise Satellitenuhrkorrekturen angewiesen sind. Solange vom IGS oder einer anderen Organisation keine Korrekturen mit dichteren Intervallen veröffentlicht werden, müssen diese Anwender in Kauf nehmen, dass mathematische Interpolationsalgorithmen die Lücke zwischen zwei bekannten Korrekturen nur unzureichend schließen können. Als Wermutstropfen kann lediglich angesehen werden, dass die einfache lineare Interpolation gegenüber den aufwändigeren quadratischen beziehungsweise kubischen Methoden qualitativ nicht abfällt.