

Auswertung von GLONASS-Trägerphasenbeobachtungen

Lambert Wanninger und Stephan Wallstab-Freitag

Zusammenfassung

Im Gegensatz zu GPS treten bei GLONASS aufgrund der satellitenindividuellen Signalaussendefrequenzen unterschiedliche Signalausbreitungsverzögerungen im Empfangsgerät auf. Insbesondere bei Verwendung unterschiedlicher Empfängertypen müssen diese bei der Auswertung der Trägerphasenbeobachtungen berücksichtigt werden. Ihre Frequenzabhängigkeit kann durch einen linearen Modellierungsansatz sehr gut erfasst werden.

Summary

Unlike GPS, GLONASS signals experience different hardware delays in the receiving equipment because each satellite transmits its own carrier frequency. The resulting inter-channel biases may differ between receivers and they must be taken into account in carrier phase processing. A linear model to describe the frequency dependence of these biases performs very well.

1 Einleitung

Relative Positionsbestimmung und die Verwendung der Phasenmessungen sind die entscheidenden Schritte, um cm-genaue Koordinaten mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Satellitennavigationssysteme, dem US-amerikanischen GPS und dem russischen GLONASS, zu erzielen. Für Messungen von kurzer Dauer ist weiterhin die Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten auf ihre wahren ganzzahligen Werte unbedingte Voraussetzung für höchste Genauigkeiten und gleichzeitig die größte Herausforderung bei der Datenauswertung.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen GPS und GLONASS ergibt sich aus den unterschiedlichen Techniken, die zur Identifizierung eines individuellen Satellitensignals Verwendung finden. Während bei GPS jeder Satellit individuelle PRN-Codes (Pseudo Random Noise-Codes) einsetzt (Code Division Multiple Access; CDMA-Verfahren) und somit alle Satelliten auf denselben nominellen Frequenzen senden können, benutzen alle GLONASS-Satelliten dieselben PRN-Codes, unterscheiden sich aber in ihren Sendefrequenzen (Frequency Division Multiple Access; FDMA-Verfahren). Letzteres Verfahren hat den Nachteil, dass frequenzabhängige instrumentelle Laufzeitverzögerungen (engl. *inter-channel biases*) in den Empfangsgeräten auftreten können, also in der Antenne, im Antennenkabel und im Empfänger. Sie müssen bei der Datenauswertung berücksichtigt werden und erschweren auch zum Teil die Phasenauswertung.

Die GLONASS-Aussendefrequenzen ergeben sich für die einzelnen Satelliten aus

$$f_k = f_0 + k \cdot \Delta f \quad (1)$$

mit

f_k – Aussendefrequenz [MHz],

f_0 – Grundfrequenz (für L1: 1602,0000 MHz, für L2: 1246,0000 MHz),

k – Frequenznummer [–],

Δf – Frequenzintervall (für L1: 0,5625 MHz, für L2: 0,4375 MHz).

Während ursprünglich Frequenznummern k aus dem Intervall [1,24] Verwendung fanden, hat man sich ab 1998 auf [1,12] beschränkt, um Störungen mit Frequenzbändern, die in der Radioastronomie genutzt werden, zu minimieren. Dabei verwenden nun antipodisch stehende GLONASS-Satelliten paarweise dieselben Frequenzen. Seit 2005 werden aus demselben Grund nur noch Frequenznummern $k < 6$ vergeben. In wenigen Jahren werden nur noch Frequenznummern k aus dem Intervall [–7,6] eingesetzt werden (ICD 2002).

Für viele Jahre standen nur wenige Fabrikate von GPS/GLONASS-Empfängern zur Verfügung. Erst Anfang 2006 änderte sich diese Situation, als die großen Hersteller geodätischer Instrumente zusätzlich zu ihren GPS-Empfängern auch GPS/GLONASS-Empfänger in ihr Programm aufnahmen. Inzwischen sind viele der verkauften geodätischen Geräte kombinierte GPS/GLONASS-Empfänger.

Mit der Bestimmung der GLONASS-Phasenmehrdeutigkeiten beschäftigte man sich intensiv ab Mitte der 1990er-Jahre. Eine große Anzahl von Forschungsarbeiten behandelte die Erweiterung vorhandener GPS-Auswertelgorithmen auf der Basis von Doppel-Differenz-Phasenbeobachtungen auf GLONASS (Han et al. 1999, Habrich 2000, Rossbach 2000, Wang et al. 2001, Leick 2004). Dieser Ansatz führt aufgrund der verschiedenen GLONASS-Signalwellenlängen zu Problemen, die aber leicht vermeidbar sind, wenn mit undifferenzierten Beobachtungen (oder Einfachdifferenzen zwischen Stationen) gearbeitet wird.

Die Probleme der frequenzabhängigen instrumentellen Signalverzögerungen wurden dagegen vielfach in ihrer Bedeutung noch nicht erkannt und so – wenn überhaupt – meistens nur am Rande behandelt. Durch die größere Anzahl unterschiedlicher Empfangsgeräte, die seit Anfang 2006 auf dem Markt sind, haben diese Signalverzögerungen aber eine entscheidende Bedeutung bekommen, da sie sich insbesondere zwischen unterschiedlichen Empfängertypen deutlich unterscheiden können.

Die in diesem Artikel beschriebenen Erkenntnisse beruhen auf der Analyse umfangreicher Messungen mit unterschiedlichen GPS/GLONASS-Empfängertypen. Es wurden im April und Mai 2007 in Zusammenarbeit des Geodätischen Instituts und des Instituts für Planetare Geodäsie der TU Dresden fünf verschiedene Fabrikate auf dem Messdach des Beyer-Baus (TU Dresden) parallel betrieben. Zusätzlich zur Verfügung standen umfangreiche Beobachtungsdatensätze des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) sowie Beobachtungen der Landesvermessung Sachsen und des Landesamtes für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt. Es wurden kurze Basislinien zwischen folgenden Empfängertypen untersucht, wobei aber nicht alle Kombinationen realisiert werden konnten: Ashtech Z-18, JPS Legacy, Leica GRX1200 GGPRO, TPS E_GGD, TPS Net-G3 und Trimble NetR5. Alle Datenauswertungen und Datenanalysen erfolgten mit dem Auswerteprogramm Wa1, das dafür um die Auswertung von GLONASS-Beobachtungen erweitert wurde.

2 Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten

Zur Beschreibung der Besonderheiten bei der Bestimmung und Festsetzung von GLONASS-Phasenmehrdeutigkeiten sollen hier die Beobachtungsgleichungen in der Form einfacher Differenzen zwischen Stationen verwendet werden. Durch diese Differenzbildung werden Satellitenuhrrestabweichungen und instrumentelle Signalverzögerungen in den Satelliten praktisch vollständig eliminiert, so dass die Beobachtungsgleichung für eine Phasendifferenz $\Delta\Phi$ [m] geschrieben werden kann als

$$\Delta\Phi_{a,b}^i = \Delta R_{a,b}^i + c_0 \cdot (\Delta\delta t_{a,b} + \Delta h_{a,b}^{\text{System}}) + \lambda \cdot \Delta N_{a,b}^i + \varepsilon_{\Delta\Phi}, \quad (2)$$

wobei der tiefgestellte Index a, b die beteiligten Empfänger bezeichnet und der hochgestellte Index i den jeweiligen Satelliten. Der Operator Δ beschreibt die Bildung einfacher Differenzen simultaner Beobachtungen der beiden beteiligten Stationen. Weiterhin bedeuten

- ΔR – einfache Differenz der Raumstrecken Satellit-Empfänger [m], die eine Funktion von u. a. den zu bestimmenden Empfängerkoordinaten ist,
- c_0 – Vakuumlichtgeschwindigkeit [m/s],
- $\Delta\delta t$ – Differenz der Empfängeruhren der beiden beteiligten Empfänger [s],
- Δh^{System} – Differenz der instrumentell bedingten Signalverzögerungen in den Empfängern [s], abhängig von der Signalfrequenz und auch den für jedes System unterschiedlichen Signalverarbeitungsschritten,
- λ – Signalwellenlänge [m],
- ΔN – einfache Differenz der Phasenmehrdeutigkeiten [-],

- $\varepsilon_{\Delta\Phi}$ – Summe der nicht vorab korrigierten systematischen und der zufälligen Messabweichungen in der einfachen Differenz der Phasenbeobachtungen [m].

Aufgrund der für alle GPS-Satelliten gleichen Frequenzen sind bei diesem System die instrumentellen Signalverzögerungen im Empfänger für alle Signale identisch. Es kann und muss keine Trennung zwischen Uhr und instrumenteller Signalverzögerung vorgenommen werden. Die Beobachtungsgleichung (2) vereinfacht sich deswegen für GPS zu

$$\Delta\Phi_{a,b}^i = \Delta R_{a,b}^i + c_0 \cdot \Delta\delta t_{a,b}^{\text{GPS}} + \lambda \cdot \Delta N_{a,b}^i + \varepsilon_{\Delta\Phi}, \quad (3)$$

wobei

$$\Delta\delta t_{a,b}^{\text{GPS}} = \Delta\delta t_{a,b} + \Delta h_{a,b}^{\text{GPS}}. \quad (4)$$

Um die Singularität zwischen dem Uhrenterm und den Mehrdeutigkeiten zu beseitigen, muss vorab über ein ΔN verfügt werden. Baut man die Datenauswertung nicht auf einfachen Differenzen, sondern auf undifferenzierten Beobachtungen auf, ist über mehrere N zu verfügen und zwar genau über so viele, dass die Singularität beseitigt wird (Goat 1985). Bei Verwendung doppelter Differenzen wurde der Uhrenterm eliminiert und es bestehen keine Singularitäten.

Aufgrund des FDMA-Verfahrens unterscheiden sich bei GLONASS die instrumentell bedingten Signalverzögerungen. Eine Vereinfachung der Beobachtungsgleichung (2) wie bei GPS-Messungen ist hier nicht möglich:

$$\Delta\Phi_{a,b}^i = \Delta R_{a,b}^i + c_0 \cdot (\Delta\delta t_{a,b} + \Delta h_{a,b}^{\text{Glonass};i}) + \lambda \cdot \Delta N_{a,b}^i + \varepsilon_{\Delta\Phi}. \quad (5)$$

Es ist zu erwarten, dass bei baugleichen Empfängern die Werte $\Delta h_{a,b}^{\text{Glonass}}$ im Allgemeinen sehr klein sind (Zinoviev 2005). Wird dagegen mit unterschiedlichen Empfängertypen gearbeitet, kann dieser Term die Mehrdeutigkeitsbestimmung beeinträchtigen. Wird er nicht entsprechend berücksichtigt, beeinträchtigt er als systematische Messabweichung die Basislinienkoordinatenbestimmung.

Für eine so genannte »float«-Koordinatenlösung, bei der die Mehrdeutigkeiten als reelle Werte geschätzt, aber nicht auf ganze Zahlen festgesetzt werden, ist eine Trennung von Mehrdeutigkeit und Signalverzögerungsdifferenzen zwischen Empfängern nicht möglich und auch nicht notwendig, solange die Signalverzögerungsdifferenzen zeitlich stabil sind. Unterliegen sie aber Veränderungen, müssen diese bei der Auswertung berücksichtigt werden, um eine Verschlechterung der Koordinatengenauigkeit zu vermeiden.

Für die Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten müssen die Signalverzögerungsdifferenzen über einen einfachen Modellierungsansatz erfassbar sein, andernfalls wird die Mehrdeutigkeitsfestsetzung stark beeinträchtigt oder sogar unmöglich. Glücklicherweise scheint eine ein-

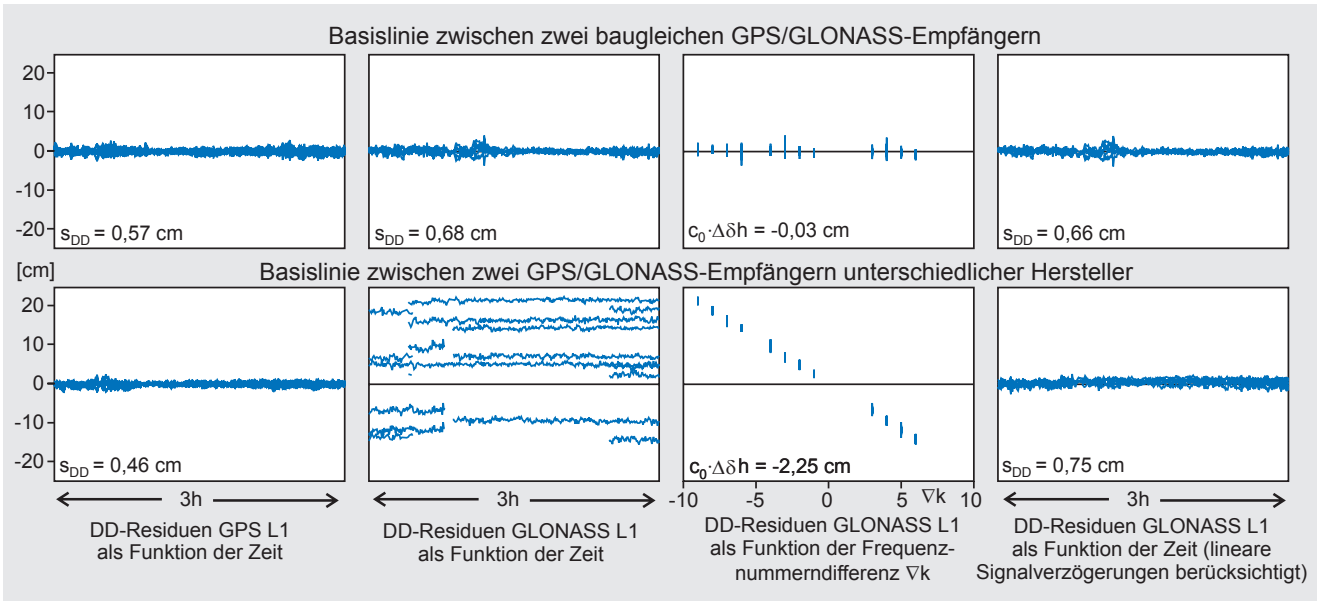


Abb. 1: Doppel-Differenz-Residuen (DD-Residuen) zweier kurzer GPS/GLONASS-Basislinien

fache lineare Abhängigkeit der Signalverzögerungen von der Frequenz zu bestehen. Sie wurde schon von Pratt et al. (1998) für den damaligen Empfänger Ashtech Z-18 nachgewiesen. Nach unseren Erfahrungen scheinen die Nicht-Linearitäten im Allgemeinen so klein zu sein, dass sie auf die meisten Anwendungen keinen negativen Einfluss haben. Der lineare Modellierungsansatz führt dann zu folgender Beobachtungsgleichung:

$$\Delta\Phi_{a,b}^i = \Delta R_{a,b}^i + c_0 \cdot (\Delta\delta t_{a,b}^{Glonass} + k^i \cdot \Delta\delta h_{a,b}^{Glonass}) + \lambda \cdot \Delta N_{a,b}^i + \varepsilon_{\Delta\Phi}, \quad (6)$$

wobei

k – GLONASS-Frequenznummer [–], siehe ICD (2002),

$\Delta\delta h$ – einfache Differenz der instrumentell bedingten Verzögerungsdifferenzen von Signalen benachbarter GLONASS-Frequenzen [s].

An dieser Stelle muss das Problem der Singularitäten neu bedacht werden. Zur Beseitigung von Singularitäten sind wir gezwungen, eine weitere ΔN -Mehrdeutigkeit vorab festzusetzen. Erst danach kann der lineare Term für die Erfassung der Signalverzögerungen verwendet werden. Bei der Festsetzung dieser zweiten ΔN -Mehrdeutigkeit sind wir nicht frei in der Wahl ihres Wertes, sondern dieser muss zum Wert der zuerst festgesetzten ΔN -Mehrdeutigkeit passen, d.h. es muss der wahre Wert der Doppel-Differenz-Mehrdeutigkeit $\nabla\Delta N$ dieser beiden Satellitensignale bestimmt werden. Bei größeren instrumentell bedingten Signalverzögerungsdifferenzen kann dies nur gelingen, wenn die Frequenznummerndifferenz ∇k klein ist.

Bei der Datenauswertung mit Wa1 werden GPS- und GLONASS-Beobachtungen simultan verarbeitet, d.h. die Mehrdeutigkeitslösung erfolgt gemeinsam mit allen zur Verfügung stehenden Beobachtungen. Dies wird dadurch

ermöglicht, dass der Auswertalgorithmus entsprechend der Beobachtungsgleichungen (3) und (6) realisiert wurde und somit getrennte Abweichungen der Empfängeruhr von der jeweiligen Systemzeit δt^{GPS} , $\delta t^{Glonass}$ bestimmt werden.

Die beschriebene Problematik der Signalverzögerungen wird deutlich, wenn man Doppel-Differenz-Residuen von kurzen Basislinien grafisch darstellt (Abb. 1). Beobachtungsresiduen können nur in dieser Form sinnvoll betrachtet und interpretiert werden, da nur hier der Empfängeruhreinfluss eliminiert wird. Weiterhin wurden zur Residuenbildung Sollkoordinaten der Stationen eingeführt, d.h. die geometrische Information vorab beseitigt und auch die Phasenmehrdeutigkeiten bestimmt und herausgerechnet. Korrekturen für die Antennenphasenzentren wurden eingeführt. Für GPS sieht die Beobachtungsgleichung damit wie folgt aus (vgl. erste Spalte der Abb. 1):

$$\nabla\Delta\Phi_{a,b}^{i,j} - \nabla\Delta R_{a,b}^{i,j} - \lambda \cdot \nabla\Delta N_{a,b}^{i,j} = \varepsilon_{\nabla\Delta\Phi}, \quad (7)$$

d.h. die Doppel-Differenz-Residuen enthalten nur noch die Einflüsse von nicht vorab korrigierten systematischen und von zufälligen Messabweichungen. Bei kurzen Basislinien werden sie vielfach von Mehrwegeinflüssen dominiert.

Bei GLONASS verbleiben jedoch zusätzlich zu den Messabweichungen auch die instrumentellen Signalverzögerungen (vgl. zweite Spalte der Abb. 1):

$$\nabla\Delta\Phi_{a,b}^{i,j} - \nabla\Delta R_{a,b}^{i,j} - \lambda \cdot \nabla\Delta N_{a,b}^{i,j} = c_0 \cdot \nabla\Delta h_{a,b}^{Glonass; i,j} + \varepsilon_{\nabla\Delta\Phi}. \quad (8)$$

Erst wenn diese durch den linearen Modellierungsansatz erfasst und beseitigt werden,

$$\nabla\Delta\Phi_{a,b}^{i,j} - \nabla\Delta R_{a,b}^{i,j} - \lambda \cdot \nabla\Delta N_{a,b}^{i,j} - c_0 \cdot \nabla k^{i,j} \cdot \Delta\delta h_{a,b}^{Glonass} = \varepsilon_{\nabla\Delta\Phi}, \quad (9)$$

ergeben sich Doppel-Differenz-Phasenresiduen, die nur noch von den verbliebenen Messabweichungen beeinflusst werden, wobei hier jetzt auch eventuelle Nicht-Linearitäten der Signalverzögerungen wirken (vgl. vierte Spalte der Abb. 1).

In Abb. 1 werden die Doppeldifferenzphasenresiduen L1 von zwei kurzen (wenige Meter langen) Basislinien dargestellt. Im ersten Fall handelt es sich um baugleiche Empfänger. Es sind keine frequenzabhängigen Signalverzögerungsdifferenzen zwischen beiden Empfängern feststellbar. Sicherlich liegen bei beiden Empfängern frequenzabhängige Signalverzögerungen vor, aber da sie anscheinend identisch sind, fallen sie in der Differenz der Basislinie heraus. Anders bei der zweiten Basislinie, die von zwei Empfängern gebildet wird, die von unterschiedlichen Herstellern stammen. Hier erreichen die frequenzabhängigen Signalverzögerungsdifferenzen $c_0 \cdot \Delta\delta h$ mehr als 2 cm, d. h. für einen augenblicklich maximalen Abstand ∇k_{\max} von 12 weit mehr als eine ganze Wellenlänge. Im Allgemeinen wird eine schnelle und zuverlässige Mehrdeutigkeitslösung in dieser gemischten Basislinie ohne ein gewisses Vorwissen über die Größe des $\Delta\delta h$ nicht möglich sein. Es ist also von großer Wichtigkeit, Informationen über frequenzabhängige Signalverzögerungsdifferenzen zwischen unterschiedlichen Empfängern zur Verfügung zu stellen und die Stabilität dieser Instrumenteneigenschaft zu untersuchen.

3 Untersuchungen zu frequenzabhängigen instrumentellen Signalverzögerungen

Zur Untersuchung der zeitlichen Stabilität der instrumentellen Verzögerungen bedarf es langzeitiger Beobachtungen mindestens zweier GLONASS-Empfänger mit möglichst geringem Antennenabstand. Ein geeigneter Datensatz liegt von der Fundamentalstation Wettzell vor, wo im Zeitraum von Ende 2001 bis Anfang 2003 mit zwei GPS/GLONASS-Empfängern unterschiedlicher Hersteller (Ashtech Z-18 auf Station WTZZ und JPS Legacy auf Station WTZJ) simultane Beobachtungen bei einem Antennenabstand von 2,5 m aufgezeichnet und archiviert wurden. Wir haben die verfügbaren Daten mit Wa1 ausgewertet und Tagesmittelwerte der GLONASS-Signalverzögerungsdifferenzen bestimmt (Abb. 2).

Die instrumentell bedingten Signalverzögerungsdifferenzen zwischen den hier verwendeten Gerätetypen sind mit wenigen Millimetern recht gering. Sie weisen eine große zeitliche Stabilität auf. Nur eine Veränderung am verwendeten Instrumentarium, hier ein Antennenwechsel beim JPS Legacy-Empfänger von »TRM29659.00 NONE« nach »JPSREGANT_SD_E NONE« führt zu einem deutlichen Sprung in der Zeitreihe. Jahreszeitliche Einflüsse, z. B. aufgrund von Temperaturabhängigkeiten, sind nicht ersichtlich. Bei einem Teil der Daten sind Oszillationen mit einer Periode von 8,0 Tagen erkennbar, siehe iono-

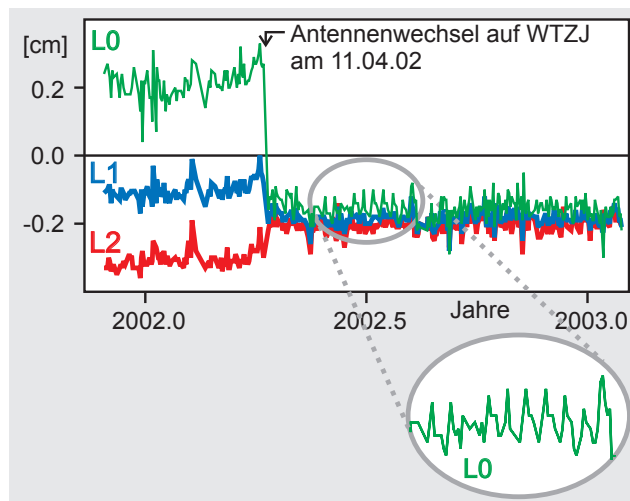


Abb. 2: Tagesmittelwerte der GLONASS-Signalverzögerungsdifferenzen $c_0 \cdot \Delta\delta h$ für eine kurze Basislinie zweier nicht-baugleicher GPS/GLONASS-Empfänger über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr

sphären-freie Linearkombination L0 zur Jahresmitte 2002, Amplitude 0,2 mm. Da diese Periode der Wiederholung der GLONASS-Satellitenkonstellation entspricht, kommen als Ursache sowohl Nicht-Linearitäten in der Frequenzabhängigkeit der Signalverzögerungsdifferenzen in Frage, als auch Mehrwegeinflüsse.

Von besonderem Interesse ist die Temperaturstabilität der instrumentellen Verzögerungen. Dodson et al. (1999) haben Untersuchungen durchgeführt, bei denen künstlich Temperaturunterschiede zwischen zwei Ashtech GG24-Empfängern erzeugt wurden. Variationen in den bestimmten Basislinienkoordinaten wurden als Veränderung der Signalverzögerungsdifferenzen, die bei der Koordinatenbestimmung nicht berücksichtigt worden waren, interpretiert.

Wir haben in verschiedenen Experimenten versucht, Ähnliches für aktuelle Empfängertypen, insbesondere den Leica GRX 1200 GG PRO, nachzuweisen. Dies ist uns aber nicht gelungen. Die Ergebnisse eines dieser Versuche sind in Abb. 3 dargestellt und sollen im Detail interpretiert werden.

Die dargestellten Ergebnisse der Auswertung mit dem Programm Wa1 beziehen sich auf insgesamt neun Tage Beobachtungen. In den ersten und letzten Tagen wurden ein Leica GRX 1200 GG PRO und ein JPS Legacy mit jeweils eigenen Antennen betrieben, die wenige Meter voneinander entfernt montiert waren. Um Mehrwegeinflüsse zu vermindern, wurden für einige Tage beide Empfänger mit einer Antenne verbunden (Null-Basislinie), d. h. es fand für den Leica-Empfänger ein Antennen- und Antennenkabelwechsel statt und es wurde ein Signalsplitter eingesetzt. Dieser Wechsel in Teilen des Instrumentariums führte zu geringen, aber deutlich erkennbaren Veränderungen in den Signalverzögerungsdifferenzen $c_0 \cdot \Delta\delta h$ von: -0,3 mm in L1, 0,5 mm in L2 und somit -1,4 mm in der ionosphären-freien Linearkombination L0.

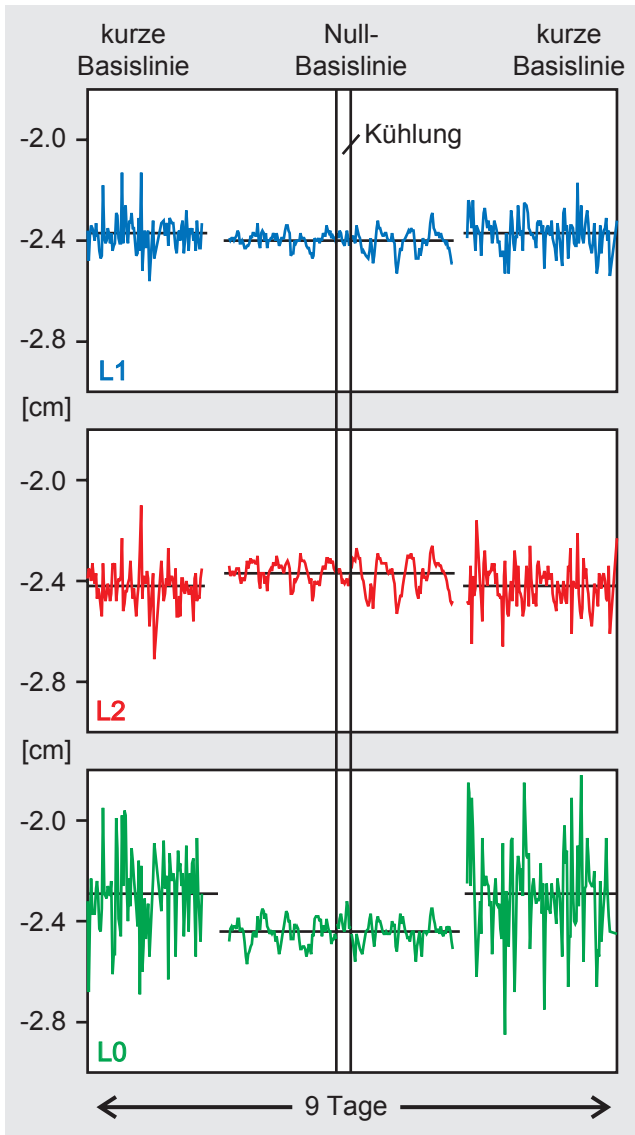


Abb. 3: Halbstundenmittelwerte der GLONASS-Signalverzögerungsdifferenzen $c_0 \cdot \Delta\delta h$ für eine kurze Basislinie zweier nicht-baugleicher GPS/GLONASS-Empfänger vor, während und nach einem Kühlungsexperiment

Die Kühlung des Leica-Empfängers dauerte mehrere Stunden. Dabei konnte an der Außenseite des Empfängergehäuses die Temperatur um mehr als 20 Grad gesenkt werden. Inwieweit dies Auswirkungen auf die Temperatur

der für die Signalverarbeitung entscheidenden Bauteile im Inneren des Empfängers hatte, war von uns nicht feststellbar. Die Umgebungstemperatur des JPS Legacy-Empfängers wurde nicht verändert. Eine Auswirkung dieser Kühlung auf die instrumentellen Signalverzögerungsdifferenzen ist nicht erkennbar.

Oszillationen der Signalverzögerungsdifferenzen sind in den Daten der Nullbasislinie besonders auf L2 deutlich zu erkennen. Ihre Periode beträgt 11,1 Stunden und liegt damit sehr nahe an der GLONASS-Satellitenumlaufzeit von 11,26 Stunden, so dass vermutet werden kann, dass sie durch Nicht-Linearitäten der instrumentellen Signalverzögerungsdifferenzen verursacht werden, wobei – trotz Nullbasislinie – auch als Ursache Mehrwegeinflüsse aufgrund von Empfängerunterschieden nicht vollständig ausgeschlossen werden können.

Für die Mehrdeutigkeitsfestsetzung der GLONASS-Trägerphasenmessungen ist es von großem Vorteil, wenn a priori-Werte für die frequenzabhängigen instrumentellen Signalverzögerungsdifferenzen vorliegen. Gerade bei hohen Anforderungen an die Mehrdeutigkeitsfestsetzung, wie z.B. bei Anwendungen von Real-Time Kinematic (RTK), sind entsprechende Werte unverzichtbar, um in gemischten Basislinien überhaupt Mehrdeutigkeiten zuverlässig bestimmen zu können. Wir haben aus unseren Erfahrungen mit gemischten Basislinien entsprechende Werte bestimmt und in Tab. 1 zusammengefasst. Sie haben eine Genauigkeit von wenigen Millimetern. Wie unsere Untersuchungen zeigen, sind genauere Angaben zwar möglich aber nicht unbedingt sinnvoll, weil dann auch der verwendete Antennentyp und gegebenenfalls auch die Art und Länge des Antennenkabels etc. zu berücksichtigen sind. Verwendet man Angaben mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern, ist eine Unterscheidung nach L1- und L2-Frequenzen nicht notwendig.

Bei der Anwendung der Korrektionswerte aus Tab. 1 ist weiter zu beachten, dass sie nur für die augenblicklich (Anfang 2007) aktuellen Firmware-Versionen der Empfänger gültig sind. Die größten Veränderungen dieser Werte sind zu erwarten, wenn ein Hersteller die von der empfängerinternen Software verwendeten Vorab-Korrekturen verändern sollte.

Tab. 1: A priori-Werte für frequenzabhängige instrumentelle Signalverzögerungsdifferenzen $c_0 \cdot \Delta\delta h$ in Zentimetern für verschiedene Empfängerkombinationen

	Ashtech Z-18	JPS Legacy, TPS E_GGD, TPS Net-G3	Leica GRX 1200 GG PRO	Trimble NetR5
Ashtech Z-18	0,0	0,0	2,4	-0,7
JPS Legacy, TPS E_GGD, TPS Net-G3	0,0	0,0	2,4	-0,7
Leica GRX 1200 GG PRO	-2,4	-2,4	0,0	-3,1
Trimble NetR5	0,7	0,7	3,1	0,0

4 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die GLONASS-Phasenbeobachtungen haben das gleiche Genauigkeitspotential wie die GPS-Phasenbeobachtungen. Aufgrund der bei GLONASS von Satellit zu Satellit unterschiedlichen Aussendesignalfrequenzen ist es nicht zu empfehlen, die Mehrdeutigkeitsfestsetzung auf der Basis von Doppel-Differenzbeobachtungen durchzuführen. Einfachere Algorithmen ergeben sich bei einer Mehrdeutigkeitsfestsetzung auf der Basis von undifferenzierten oder von Einfach-Differenzen-Beobachtungen, wie sie im Auswerteprogramm Wa1 verwirklicht wurden.

Im Gegensatz zu GPS treten bei der Auswertung von GLONASS-Beobachtungen von Signal zu Signal unterschiedliche Signalverzögerungen in den Empfangsgeräten (Antenne, Antennenkabel, Empfänger) auf. Für baugleiche Geräte sind diese sehr ähnlich und fallen somit bei der Basislinienlösung weitgehend heraus. Bei der Kombination von nicht-baugleichen Empfangsgeräten können sie dagegen bis zu einige Zentimeter systematische Messabweichungen zwischen benachbarten GLONASS-Frequenzen verursachen. Ihre Frequenzabhängigkeit kann durch einen linearen Modellierungsansatz erfasst werden.

Alle unsere Untersuchungen zeigen, dass bei baugleichen Empfangsgeräten die Signalverzögerungsdifferenzen tatsächlich sehr gering sind. Weiterhin weisen die Signalverzögerungsdifferenzen eine große zeitliche Konstanz auf. Temperaturabhängigkeiten sind zwar zu erwarten, es gelang uns aber nicht, sie nachzuweisen. Ein Ergebnis unserer Untersuchungen sind Signalverzögerungsdifferenzen zwischen unterschiedlichen Empfängertypen. Sie sollten als a priori-Korrekturen für den Mehrdeutigkeitssuchprozess verwendet werden, um seine Zuverlässigkeit und Erfolgsquote zu steigern.

Es wäre wünschenswert, wenn sich die unterschiedlichen Hersteller von geodätischen GPS/GLONASS-Empfängern auf ein gemeinsames Niveau der frequenzabhängigen Signalverzögerungen einigen und dieses durch die Verwendung empfängerinterner Korrekturen realisieren würden. Dann gäbe es auch in gemischten Basislinien keine besonderen Probleme bei der GLONASS-Phasenmehrdeutigkeitsfestsetzung.

Dank

Folgende Institutionen stellten Beobachtungsdaten zur Verfügung, ohne die unsere Untersuchungen nicht hätten durchgeführt werden können: Institut für Planetare Geodäsie der TU Dresden, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), Landesvermessung Sachsen und das Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt. Besonders danken wir den beiden Reviewern für ihre Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge.

Literatur

- Dodson, A.H., Moore, T., Baker, D.F., Swann, J.W.: Hybrid GPS + GLONASS. *GPS Solutions*, Vol. 3, 32–41, 1999.
- Goad, C.C.: Precise Relative Position Determination Using GPS Carrier Phase Measurements in a Nondifference Mode. Proc. 1st Int. Symp. on Precise Positioning with GPS, Rockville, 347–356, 1985.
- Habrigh, H.: Geodetic Applications of the Global Navigation Satellite System (GLONASS) and of GLONASS/GPS Combinations. *Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie*, Nr. 15, 2000.
- Han, S., Dai, L., Rizos, Ch.: A New Data Processing Strategy for Combined GPS/GLONASS Carrier Phase-Based Positioning. Proc. ION GPS-99, 1619–1627, 1999.
- ICD: GLONASS Interface Control Document, Version 5.0, Coordination Scientific Information Center, Moskau, 2002.
- Leick, A.: *GPS Satellite Surveying*. 3. Auflage, John Wiley & Sons, 2004.
- Pratt, M., Burke, B., Misra, P.: Single-Epoch Integer Ambiguity Resolution with GPS-GLONASS L1-L2 Data. Proc. ION GPS-98, 389–398, 1998.
- Rosbach, U.: GLONASS Double Difference Ambiguity Resolution in Real-Time. Proc. ION GPS 2000, 163–171, 2000.
- Wang, J., Rizos, Ch., Stewart, M.P., Leick, A.: GPS and GLONASS Integration: Modeling and Ambiguity Resolution Issues. *GPS Solutions*, Vol. 5, S. 55–64, 2001.
- Zinoviev, A.E.: Using GLONASS in Combined GNSS Receivers: Current Status. Proc. ION GNSS 2005, 1046–1057, 2005.

Anschrift der Autoren

Prof. Dr.-Ing. L. Wanninger | Dipl.-Ing. Stephan Wallstab-Freitag
Geodätisches Institut, TU Dresden
01062 Dresden
lambert.wanninger@tu-dresden.de