



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Umweltwissenschaften

BESTIMMUNG RICHTUNGSABHÄNGIGER CODEVERZÖGERUNGEN VON GNSS- SATELLITENANTENNEN

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Susanne Beer

geboren am 18. Januar 1981 in Strausberg

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. habil. Lambert Wanninger, Technische Universität Dresden

Prof. Dr.-Ing. Martin Horwath, Technische Universität Dresden

Dr. Florian Dilßner, European Space Operations Centre ESOC

Eingereicht am: 24. Mai 2022

Verteidigt am: 6. Oktober 2022

Übereinstimmungserklärung

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Dissertation zum Thema:
„Bestimmung richtungsabhängiger Codeverzögerungen von GNSS-Satellitenantennen“
wird hiermit bestätigt.

Susanne Beer
Dresden, 1. November 2022

Kurzfassung

Globale Navigationssatellitensysteme (*global navigation satellite systems*, GNSS) ermöglichen die Positionsbestimmung, Navigation und Zeitübertragung überall auf der Erde und zu jeder Zeit. Dabei können durch spezielle Auswerteverfahren und die Berücksichtigung von Messabweichungen, denen die Beobachtungen der Satelliten unterliegen, deutlich höhere Genauigkeiten erreicht werden als ursprünglich vorgesehen. Ursachen für Messabweichungen sind neben Phänomenen, die den Signalweg beeinflussen, auch elektronische und elektromagnetische Effekte an den Satelliten und Empfangssystemen. Richtungsabhängige Verzögerungen der Codebeobachtungen (*group delay variations*, GDV) stellen eine solche Art der Messabweichung dar. Sie entstehen durch richtungsabhängige Sende- und Empfangseigenschaften der Satelliten- bzw. Empfangsantennen und sind frequenzabhängig.

Aufgrund steigender Genauigkeitsanforderungen hat sich die Bestimmung und Korrektur von Messabweichungen zu einem wichtigen Forschungsfeld etabliert. Hier leistet die vorliegende Arbeit einen Beitrag. Sie beschäftigt sich mit der Bestimmung von GDV auf der Grundlage von Beobachtungen terrestrischer Referenzstationen, wobei die GDV der GNSS-Satellitenantennen im Vordergrund stehen. Da eine Codebeobachtung sowohl die GDV der Satellitenantenne als auch die der Empfangsantenne enthält, stellt die exakte Trennung beider Anteile eine besondere Herausforderung dar. Sie kann nur gelingen, wenn für eine der Antennen absolute Werte bekannt sind. Absolute GDV von Satelliten- und Empfangsantennen haben den Vorteil, dass sie unabhängig voneinander nutzbar sind. Im Gegensatz dazu beziehen sich relative Satellitenantennen-GDV auf die verwendeten Empfangsantennen und sind nicht unabhängig von ihnen.

Die kumulative Dissertation basiert auf drei wissenschaftlichen Publikationen zur Bestimmung relativer und absoluter GDV. Am Beispiel relativer GDV der GPS-Satellitenantennen wird zunächst deren zeitliche Stabilität untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass von zeitlicher Stabilität über die Dauer von mindestens zwei Jahren ausgegangen werden kann.

Daraufhin erfolgt mit Beobachtungen jeweils nur einer Orbitperiode die Bestimmung relativer GDV für die Satellitenantennen von GLONASS und Galileo. Es stellt sich heraus, dass Orbitperioden von mehreren Tagen die Datenakquise deutlich erleichtern. Zudem ermöglichen die Kriterien hinsichtlich des Equipments der ausgewählten Referenzstationen typspezifische Betrachtungen der Empfangsantennen.

Schließlich können auf der Grundlage absoluter GDV-Korrekturen für GNSS-Empfangsantennen auch absolute GDV für die Satellitenantennen von GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou und QZSS bestimmt werden. Mit diesem Ergebnis steht erstmals ein umfangreiches Set absoluter Multi-GNSS- und Multifrequenz-GDV für einen Großteil der GNSS-Satellitenantennen zur Verfügung. Es gewährt einen systemübergreifenden Überblick und kann zur Korrektur von Codebeobachtungen verwendet werden. Auch wenn sich die Genauigkeit der GDV-Schätzungen noch nicht abschließend beurteilen lässt, birgt die angewendete Methode das Potenzial, GDV mit einer Präzision von wenigen Zentimetern zu bestimmen.

Abstract

Global navigation satellite systems (GNSS) provide positioning, navigation, and timing services anywhere on Earth and at any time. Sophisticated processing methods and the consideration of measurement deviations make it possible to achieve much higher accuracies than originally intended. Measurement deviations originate, aside from phenomena affecting the signal path, from electronic and electromagnetic effects on the satellites and receiving systems. Direction-dependent delays of the code observations, so-called group delay variations (GDV), represent such a type of measurement deviations. They are caused by direction-dependent transmission and reception properties of the satellite and receiver antennas, respectively, and are frequency-dependent.

Due to increasing accuracy requirements, the investigation and correction of GNSS measurement deviations has become an important field of research. This thesis makes a contribution to this field. It deals with the estimation of GDV based on GNSS observations of terrestrial reference stations, with a focus on the GDV occurring at the satellite antennas. Since GNSS code observations contain both the GDV of the satellite and that of the receiver antenna, the exact separation of both parts is a special challenge. It becomes possible only if absolute GDV are available for one of the antennas. Absolute GDV of satellite and receiver antennas have the advantage that they can be used independently of each other. On the contrary, relative satellite antenna GDV refer to the receiver antennas and are not independent from them.

The cumulative dissertation is based on three scientific publications on the determination of relative and absolute GDV. First, the temporal stability of the satellite antenna GDV is investigated using the example of relative GDV for GPS satellite antennas. The results indicate that temporal stability can be assumed over a period of at least two years.

Second, with observations of only one orbit period each, the determination of relative GDV for GLONASS and Galileo satellite antennas is carried out. It turns out that orbit periods of several days significantly facilitate data acquisition. In addition, the criteria regarding the equipment of the selected reference stations reveal type-specific properties of the receiver antennas.

Finally, based on absolute GDV corrections for GNSS receiver antennas, absolute GDV can also be estimated for the satellite antennas of GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, and QZSS. With this result, a comprehensive set of absolute multi-GNSS and multi-frequency GDV is available for the majority of present GNSS satellite antennas for the first time. It provides a cross-system overview and can be used to correct code observations. Even if the accuracy of the GDV estimates cannot yet be conclusively assessed, the applied method has the potential to estimate GDV with a precision of a few centimeters.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 Beschreibung richtungsabhängiger Codeverzögerungen.....	2
1.2 Stand der Forschung.....	3
1.3 Motivation.....	5
2 Bestimmung richtungsabhängiger Codeverzögerungen	7
2.1 Richtungen an Satelliten- und Empfangsantennen.....	7
2.2 Methoden	8
2.3 Code-Minus-Carrier-Methode.....	11
2.3.1 Code-Minus-Carrier-Linearkombination	11
2.3.2 Schätzung richtungsabhängiger Codeverzögerungen	13
2.3.3 Aspekte der untersuchten GNSS	14
2.4 Ergebnisse.....	20
3 Publikationen	23
P1 Die zeitliche Stabilität der Code-Verzögerungen von GPS-Sendeantennen	24
P2 Die Code-Verzögerungen von Galileo und GLONASS	26
P3 Bestimmung absoluter Code-Verzögerungen für GNSS-Satellitenantennen auf der Grundlage absoluter Code-Verzögerungen von Empfangsantennen	28
4 Schlussfolgerungen und Ausblick.....	31
Literaturverzeichnis	35
Anhang	41

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematische Darstellung einer GNSS-Empfangsantenne mit richtungsabhängigen Empfangseigenschaften.....	2
2.1	Winkel an GNSS-Antennen	7
2.2	Überblick über Methoden zur Bestimmung von GDV an Sende- und Empfangsantennen	8
2.3	Einteilung der Kalibrierverfahren für GNSS-Antennen.....	9
2.4	CMC-Linearkombination	13
2.5	Ablaufschema zur Schätzung frequenzspezifischer GDV für eine Satellitenantenne	13
2.6	Zusammenhang zwischen Elevation und Nadirwinkel der untersuchten GNSS.....	17
2.7	Bodenspuren und Orbitperioden von GNSS-Satelliten.....	17
2.8	Skyplot und typische Verteilung der Beobachtungen eines Galileo-Satelliten im gesamten Elevationsbereich einer Empfangsstation bzw. im maximalen Nadirwinkelbereich der Satellitenantenne.....	19
2.9	Relative GDV der Galileo FOC-Satelliten für das Frequenzband E1	20
2.10	Absolute GDV der GNSS-Satellitenantennen.....	21

Tabellenverzeichnis

2.1	Große Halbachsen der GNSS-Satellitenorbits und maximale Nadirwinkel.....	16
2.2	Überblick über ausgewählte Eigenschaften der untersuchten GNSS, die die Bestimmung von GDV für die GNSS-Satellitenantennen beeinflussen.....	19

Abkürzungsverzeichnis

ANTEX	Antenna Exchange Format
CAST	China Academy of Space Technology
CDMA	Code Division Multiple Access
CMC	Code-Minus-Carrier
DCB	Differential Code Bias
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FOC	Full Operational Capability
GDV	Group Delay Variation
GEO	Geostationärer Orbit
GLONASS	Globalnaja nawigazionnaja sputnikowaja sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GRACE	Gravity Recovery And Climate Experiment
GRAPHIC	Group And Phase Ionospheric Calibration
IGS	International GNSS Service
IGSO	Inklinierter Geosynchroner Orbit
IOV	In-Orbit Validation
LEO	Low Earth Orbit
MEO	Mittlerer Erdorbit
MP	Multipath
MW	Melbourne-Wübbena
PPP	Precise Point Positioning
PWU	Phase Wind-Up
PZO	Phasenzentrumsoffset
PZV	Phasenzentrumsvariation
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RMS	Root Mean Square
SECM	Shanghai Engineering Center for Microsatellites
SVN	Space Vehicle Number
TEC	Total Electron Content

1 Einleitung

Heute, knapp 45 Jahre nach dem Start des ersten Satelliten des *Global Positioning System* (GPS) im Jahr 1978, umkreisen weit mehr als einhundert Satelliten von mittlerweile vier globalen Navigationssatellitensystemen (*global navigation satellite systems*, GNSS) die Erde. Dazu gehören neben dem amerikanischen GPS das russische *Globalnaja nawigazionnaja sputnikowaja sistema* (GLONASS), das europäische Galileo und das chinesische BeiDou. Zudem ergänzen regionale Systeme wie beispielsweise das japanische *Quasi-Zenith Satellite System* (QZSS) die globalen Konstellationen. Alle GNSS sind ähnlich aufgebaut und dienen der Positionsbestimmung, Navigation und Zeitübertragung überall auf der Erde und zu jeder Zeit.

Das Grundprinzip der Positionsbestimmung mit GNSS beruht auf der Laufzeitmessung von Mikrowellensignalen, die von den Satelliten ausgesendet und von einem Nutzer empfangen werden. Über die Lichtgeschwindigkeit, die der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Signale entspricht, werden die Signallaufzeiten in Pseudoentfernungen umgerechnet, aus denen sich die Nutzerposition bestimmen lässt. Dabei gilt: Je genauer die Entfernungen zu den Satelliten bestimmt werden, desto genauer ist die Positionsbestimmung möglich.

Als Messgrößen werden standardmäßig die sogenannten Codebeobachtungen verwendet. Diese bezeichnen die auf das Trägersignal aufmodulierten Informationen. Positionsgenauigkeiten basierend auf den Codebeobachtungen einer Frequenz liegen in der Größenordnung von 10 m. Durch die Verwendung von Codebeobachtungen zweier Frequenzen werden Genauigkeiten von wenigen bis einem Meter erreicht. GNSS werden aber auch für geodätische Anwendungen mit Genauigkeitsanforderungen im Zentimeter- und Millimeterbereich genutzt. Diese verwenden nicht nur die Codebeobachtungen, sondern die Phasenbeobachtungen als primäre Beobachtungsgrößen. Als Phasenbeobachtung wird die Phasenlage des Trägersignals selbst bezeichnet. Sie kann deutlich genauer gemessen werden als die Codebeobachtung. Aufgrund der unbekannten Anzahl vollständig durchlaufener Zyklen ist die Phasenmessung aber mehrdeutig und erfordert aufwändigere Auswertelgorithmen.

Die Code- und Phasenbeobachtungen unterliegen verschiedenen Messabweichungen. Diese lassen sich entsprechend ihrem Ursprung dem Satellit, dem Empfangssystem oder dem Signalweg zuordnen und müssen, je nach Genauigkeitsanspruch, durch geeignete Mess- und Auswerteverfahren oder als Korrekturen berücksichtigt werden. Daher trägt die Untersuchung und Bestimmung von Messabweichungen wesentlich dazu bei, die GNSS-Beobachtungen bestmöglich zu verstehen und ihr Genauigkeitspotenzial auszuschöpfen. In diesem Forschungsfeld leistet die vorliegende Dissertation einen Beitrag. Sie befasst sich mit der Bestimmung von Messabweichungen, die sich auf die GNSS-Codebeobachtungen auswirken und durch richtungsabhängige Sende- und Empfangseigenschaften der Satelliten- bzw. Empfangsantennen verursacht werden. Sie werden als richtungsabhängige Codeverzögerungen (*group delay variations*, GDV) bezeichnet und sind frequenzabhängig.

In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf den GDV der GNSS-Satellitenantennen. Durch den Ausbau und die Weiterentwicklung der GNSS ist mittlerweile eine Vielzahl an Satelliten unterschiedlicher GNSS und Generationen verfügbar. Sie senden Signale auf drei und

mehr Frequenzen aus, die sich in ihren GDV zum Teil deutlich unterscheiden. Da die GDV der Satellitenantennen aber nicht ohne weiteres von denen der Empfangsantennen trennbar sind, spielen auch die GDV der Empfangsantennen im Weiteren und in den der Dissertation zugrunde liegenden Publikationen eine Rolle.

Weitere Messabweichungen, die in der vorliegende Arbeit von Bedeutung sind, betreffen sowohl die Code- als auch die Phasenbeobachtungen. Auf ihre Berücksichtigung wird im Methodikteil der Arbeit (Abschnitt 2.3.1) eingegangen. Für eine umfassende Beschreibung der Messabweichungen, die bei GNSS-Messungen auftreten, ihrer Ursachen sowie Möglichkeiten der Korrektur und Reduktion wird auf die GNSS-Fachliteratur wie z.B. Seeber (2008), Teunissen und Montenbruck (2017) und Morton u. a. (2020) verwiesen.

1.1 Beschreibung richtungsabhängiger Codeverzögerungen

Abbildung 1.1 veranschaulicht richtungsabhängige Antenneneigenschaften anhand der Phasenzentrumsvariationen (PZV) einer GNSS-Empfangsantenne. PZV wirken sich auf die Phasenbeobachtungen aus und werden bei genauen und hochgenauen GNSS-Anwendungen standardmäßig korrigiert. Dasselbe Konzept lässt sich auf GDV und Codebeobachtungen übertragen.

Die genaue Bestimmung der Entfernung zwischen Satellit und Empfänger erfordert die exakte Kenntnis der Punkte, an denen das elektronische Signal die Satellitenantenne verlässt und von der Nutzerantenne empfangen wird. Sie werden als Antennenphasenzentren bezeichnet und fallen in der Regel nicht mit mechanischen oder geometrischen Antennenmerkmalen zusammen. Außerdem treten die richtungsabhängigen PZV auf, die als Abweichungen von einer Kugelfläche der idealisierten Wellenfront um das mittlere Phasenzentrum verstanden werden. Der Abstand des mittleren Phasenzentrums vom Antennenreferenzpunkt, einem geometrisch definierten und zugänglichen Punkt an der Empfangsantenne, ist der Phasenzentrumsoffset (PZO).

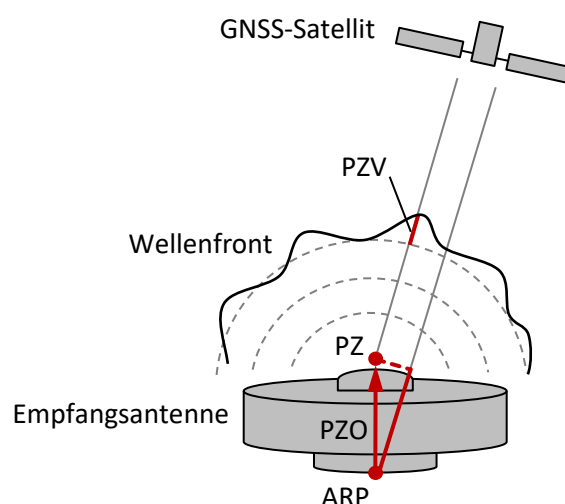


Abbildung 1.1 Schematische Darstellung einer GNSS-Empfangsantenne mit richtungsabhängigen Empfangseigenschaften: Antennenreferenzpunkt (ARP), Phasenzentrum (PZ), Phasenzentrumsoffset (PZO) und Phasenzentrumsvariationen (PZV). Die gestrichelten Linien stellen die idealisierte Wellenfront um das mittlere Phasenzentrum dar, nach Maqsood u. a. (2017).

Zur Beschreibung richtungsabhängiger Sendeeigenschaften von Satellitenantennen werden ebenfalls die Begriffe PZO und PZV verwendet. Die PZO von Satellitenantennen beziehen sich jedoch nicht auf einen Antennenreferenzpunkt, sondern auf das Massenzentrum des Satelliten.

Die Trennung von PZO und PZV hat sich in der Vergangenheit etabliert, auch wenn sie nicht zwingend erforderlich ist. Da jede PZO-Änderung durch eine entsprechende PZV-Änderung kompensiert werden kann, bedarf es einer Festlegung zur eindeutigen Trennung. Gebräuchlich sind mittelwertfreie oder minimale PZV für einen bestimmten Bereich der Antenne oder PZV, die in Nadir- bzw. Zenitrichtung den Wert Null annehmen (Maqsood u.a. 2017). Somit gehören PZO und PZV stets zusammen. Nachfolgend schließt die Verwendung des Begriffs PZV jegliche Offsets mit ein. Für GDV erfolgt im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine getrennte Behandlung von Offsets.

Es wird zwischen absoluten und relativen PZV bzw. GDV unterschieden. Absolute Variationen sind unabhängig von einer Referenzantenne. Damit ist zum einen die Unabhängigkeit der Empfangsantennen-PZV oder -GDV von einer anderen Empfangsantenne gemeint. Diese Unabhängigkeit kann nur mit absoluten Antennenkalibrierungsverfahren erzielt werden. Zum anderen wird damit die Trennung der Anteile von Satelliten- und Empfangsantenne zum Ausdruck gebracht. Da stets beide Anteile in GNSS-Beobachtungen enthalten sind, lassen sich aus Beobachtungen nur dann absolute Werte für eine Antenne bestimmen, wenn für die andere Antenne absolute Korrekturen vorliegen. Absolute Werte haben den Vorteil, dass sie unabhängig voneinander und in allen Kombinationen von Empfangs- und Satellitenantennen verwendbar sind. Relative Werte hingegen sind nicht unabhängig voneinander, da sie immer auch Anteile der Referenzantenne beinhalten.

Weiterhin sollte erwähnt werden, dass GDV von differenziellen Codeverzögerungen (*differential code biases*, DCB) zu unterscheiden sind. DCB sind Laufzeitunterschiede von Codebeobachtungen auf gleichen oder unterschiedlichen Frequenzen. Sie entstehen durch unterschiedliche Signallaufzeiten in den Satelliten und Empfängern und weisen im Gegensatz zu GDV keine Richtungsabhängigkeit auf. Korrekturen für DCB sind in den Navigationsnachrichten enthalten und werden auch als präzise Produkte vom *International GNSS Service* (IGS, Johnston u.a. 2017) veröffentlicht (Montenbruck u.a. 2014; Wang u.a. 2016).

1.2 Stand der Forschung

Die GDV von GNSS-Satelliten- und Empfangsantennen sind unterschiedlich stark ausgeprägt und wurden bereits mit verschiedenen Methoden zu unterschiedlichen Zwecken bestimmt. Darüber geben die nachfolgenden Ausführungen einen Überblick. Die Bezeichnung der GNSS-Frequenzbänder, auf die sich die GDV beziehen, erfolgt zur Konsistenz mit den Publikationen P1–P3 durchgängig gemäß der Version 3.04 des *Receiver Independent Exchange Format* (RINEX, IGS RINEX Working Group and RTCM-SC104 2018).

Einige Satellitenantennen weisen besonders große GDV auf. Der GPS-Satellit SVN 49 (*space vehicle number*, SVN) zeigt Variationen von mehreren Metern in der ionosphärenfreien Linearkombination der Frequenzbänder L1 und L2, wobei der Hauptanteil durch das L1-Signal hervorgerufen wird. Diese außergewöhnlich großen GDV fielen u.a. bei der Analyse von Coderesiduen der präzisen Orbitbestimmung von GPS-Satelliten auf. Sie entstehen durch satelliteninterne Reflektionen der Signale an Komponenten, die erstmalig für die Generierung des L5-Signals auf einem GPS-Satelliten verbaut wurden (Springer und Dilssner 2009; Hauschild u.a. 2012b).

Als weitere Beispiele für besonders große GDV sind die Satellitenantennen der zweiten Generation des chinesischen GNSS BeiDou (BeiDou-2) zu nennen. Sie betragen je nach Frequenz bis zu 1,5 m und entstehen vermutlich ebenfalls durch satelliteninterne Mehrwegeeffekte. Die GDV der BeiDou-2-Satellitenantennen wurden mit terrestrischen Beobachtungen und der *Code-Minus-Carrier* (CMC)-Methode untersucht (Hauschild u.a. 2012a; Montenbruck u.a. 2013; Wanninger und Beer 2015; Yang u.a. 2016; Guo u.a. 2016; Zou u.a. 2017).

Mit der CMC-Methode wurden weitere relative GDV für die Satellitenantennen von GPS (Wanninger u.a. 2017; Beer und Wanninger 2018; Sumaya 2019), GLONASS (Sumaya 2019; Beer u.a. 2020), Galileo (Beer u.a. 2020) und BeiDou-3 (Zhou u.a. 2018) bestimmt. Nach der Veröffentlichung von absoluten Empfangsantennen-GDV (Wübbena u.a. 2019) ließen sich mit diesem Verfahren erstmals auch absolute GDV für die eben genannten und weitere Satellitenantennen schätzen (Beer u.a. 2021). Die frequenzspezifischen GDV der Satellitenantennen liegen überwiegend im Bereich von wenigen Dezimetern und ihre Korrektur führt zur Genauigkeitssteigerung verschiedener codebasierter GNSS-Anwendungen. Drei der aufgeführten Publikationen (Beer und Wanninger 2018; Beer u.a. 2020; Beer u.a. 2021) sind Bestandteil der kumulativen Dissertation und werden in Kapitel 3 zusammengefasst.

Im Rahmen der präzisen Orbitbestimmung von Satelliten in niedrigen Erdorbits (*low Earth orbits*, LEO) bestimmten Haines u.a. (2015) relative GDV für die GPS-Satellitenantennen. Hierfür wurde die ionosphärenfreie Linearkombination der Frequenzbänder L1 und L2 verwendet, sodass sich auch die GDV auf diese Linearkombination beziehen. Sie betragen bis zu 0,8 m und zeigen zum Teil deutliche Unterschiede innerhalb der Konstellation. Die GDV dienten als Korrekturen bei der Realisierung eines GPS-basierten terrestrischen Referenzrahmens mit Beobachtungen von den *Gravity Recovery And Climate Experiment* (GRACE)-Satelliten.

Mit einem anderen Ansatz zur präzisen Orbitbestimmung schätzte Zehentner (2016) mit GPS-Beobachtungen verschiedener LEO-Missionen ebenfalls relative GDV für die GPS-Satellitenantennen. Dieser Ansatz nutzt un kombinierte und undifferenzierte Beobachtungen, sodass die GDV frequenzspezifisch sind. Sie betragen bis zu 20 cm für die Frequenzbänder L1 und L2 und wurden bei der kinematischen Orbitbestimmung der LEO-Satelliten als Korrekturen verwendet, um zeitliche Variationen des Erdschwerefelds zu untersuchen.

Auch durch die Analyse von Residuen der Ionosphärenmodellierung auf der Grundlage der geometriefreien Linearkombination können GDV bestimmt werden (Håkansson 2020). Insbesondere die stark ausgeprägten GDV der BeiDou-2-Satellitenantennen ließen sich mit diesem Verfahren nachweisen. Sie beeinflussen die Schätzung des Elektronengehalts (*total electron content*, TEC) der Ionosphäre, der bei verschiedenen genauen Positionierungsverfahren zu berücksichtigen ist.

Die PZV von GNSS-Empfangsantennen werden heute überwiegend mit absoluten Kalibrierungsverfahren bestimmt. Absolute GDV für Empfangsantennen sind jedoch nur begrenzt verfügbar und umfassen meist nur wenige Antennentypen und Frequenzen. Hierbei zeigen geodätische Empfangsantennen hauptsächlich elevationsabhängige GDV von wenigen bis zu mehreren Dezimetern auf den GPS-Frequenzbändern L1 und L2 (Wübbena u.a. 2008; Kersten u.a. 2012; Kersten und Schön 2017). Bei Rover-Antennen können Azimutabhängigkeiten bis zu mehreren Dezimetern auftreten (Kersten und Schön 2017). Ausgeprägte Azimutabhängigkeiten bis zu zwei Meter wurden nur bei kleinen Patch-Antennen detektiert (Kersten und Schön 2017; Breva u.a. 2019).

Das bisher einzige umfangreichere Set absoluter Multi-GNSS- und Multifrequenz-GDV für geodätische Empfangsantennen entstand als Nebenprodukt bei der Bestimmung von Multi-GNSS- und Multifrequenz-PZV für den neusten Beitrag des IGS zum Internationalen Terrestri-

schen Referenzrahmen (IGS 2019). Hierfür prozessierte die Firma Geo++ archivierte Daten aus Roboterkalibrierungen nach und schätzte PZV und GDV aus Einzelkalibrierungen oder als Typmittel für insgesamt 36 Typen von Referenzstationsantennen und zehn GNSS-Frequenzen (Wübbena u.a. 2019). Insgesamt zeigen sich je nach Frequenz und Antennentyp elevationsabhängige GDV von wenigen Zentimetern bis zu mehreren Dezimetern. Die GDV von vier dieser Antennentypen liegen der Publikation P3 zugrunde und werden dort näher betrachtet.

1.3 Motivation

Die GNSS-Forschungsgruppe am Geodätischen Institut der TU Dresden hat die stark ausgeprägten GDV der BeiDou-2-Satellitenantennen im Detail untersucht (Wanninger und Beer 2015). In diesem Zusammenhang wurden elevationsabhängige, frequenzspezifische GDV-Korrekturen für zwei Typen der BeiDou-2-Satelliten bestimmt. Es konnte gezeigt werden, dass hauptsächlich Elevationsabhängigkeiten bestehen und verschiedene Anwendungen des *precise point positioning* (PPP), die die GNSS-Codebeobachtungen nutzen, von der Korrektur der GDV profitieren:

- Beim PPP mit Code- und Phasenbeobachtungen von zwei Frequenzen wird die Melbourne-Wübbena (MW)-Linearkombination (Hatch 1982, Melbourne 1985, Wübbena 1985) gebildet, um Mehrdeutigkeiten zu bestimmen und auf ganzzahlige Werte festzusetzen. Bleiben die BeiDou-2-GDV unkorrigiert, zeigen die MW-Werte starke systematische zeitliche Variationen mit Amplituden von mehr als einem halben Zyklus. Dadurch wird die exakte Bestimmung und Festsetzung der Mehrdeutigkeiten verhindert. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch Kersten und Schön (2017), Wanninger u.a. (2017) und Beer u.a. (2020).
- Eine weitere PPP-Anwendung basiert auf der *group and phase ionospheric calibration* (GRAPHIC)-Linearkombination (Yunck 1993, Choy 2011). Die GRAPHIC-Linearkombination wird aus der Code- und Phasenbeobachtung einer Frequenz gebildet und kann somit für die Positionsbestimmung mit kostengünstigen Einfrequenz-GNSS-Empfängern verwendet werden. Hier führen die unkorrigierten GDV der BeiDou-2-Satelliten zu einer systematischen Abweichung von ca. 1 m in der Höhenkomponente. Ähnliche Effekte in kleineren Größenordnungen finden später auch Wanninger u.a. (2017), Sumaya (2019), Shao u.a. (2019) und Beer u.a. (2020) bei der Untersuchung der GDV weiterer GNSS.

Andere Anwendungen, auf deren Genauigkeiten sich GDV auswirken können, sind die Bestimmung des TEC der Ionosphäre mit Codebeobachtungen (Wanninger u.a. 2017; Håkansson 2020), die Bestimmung von DCB (Wanninger u.a. 2017) und die Zeit- und Frequenzübertragung mit Codebeobachtungen (Kersten u.a. 2012).

Aufgrund der Erkenntnisse aus den Untersuchungen zu den GDV der BeiDou-2-Satelliten hat sich die GNSS-Forschungsgruppe des Geodätischen Instituts der TU Dresden auch den GDV der anderen GNSS gewidmet. Ziel war die Bestimmung von Multi-GNSS- und Multifrequenz-GDV, um zu einem konsistenteren und verbesserten Verständnis der GNSS-Codebeobachtungen und somit zur Steigerung des Genauigkeitspotentials bei deren Nutzung beizutragen. In diesem Zusammenhang sind weitere Arbeiten veröffentlicht worden, von denen die folgenden drei Publikationen Bestandteil der vorliegenden Dissertation sind:

- P1 Beer, S. und Wanninger, L. (2018) Temporal Stability of GPS Transmitter Group Delay Variations. *Sensors* 18(6):1744. <https://doi.org/10.3390/s18061744>

- P2 Beer, S., Wanninger, L. und Heßelbarth, A. (2020) Galileo and GLONASS group delay variations. GPS Solutions 24(1):23. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0939-7>
- P3 Beer, S., Wanninger, L. und Heßelbarth, A. (2021) Estimation of absolute GNSS satellite antenna group delay variations based on those of absolute receiver antenna group delays. GPS Solutions 25(3):110. <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01137-8>

Während in den Publikationen P1 und P2 relative GDV bestimmt wurden, konnten in der Publikation P3 erstmals absolute GDV für Satellitenantennen auf der Grundlage absoluter Empfangsantennen-GDV bestimmt werden. Im Rahmen der kumulativen Dissertation sollen anhand der Publikationen folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- *Sind die GDV der GNSS-Satellitenantennen zeitlich stabil?*
- *Wie unterscheidet sich die Bestimmung von GDV mit der CMC-Methode und terrestrischen Beobachtungen für GNSS mit unterschiedlichen Orbitperioden?*
- *Sind die absoluten GDV für geodätische Empfangsantennen von Wübbena u. a. (2019) als Korrekturen verwendbar? Welche absoluten GDV zeigen die GNSS-Satellitenantennen?*
- *Mit welcher Genauigkeit können GDV mit der CMC-Methode bestimmt werden?*

Das sich anschließende Kapitel 2 zur Bestimmung richtungsabhängiger Codebeobachtungen behandelt grundlegende Aspekte des Themas, die über den Inhalt der Publikationen hinausgehen. Nach der Beschreibung der relevanten Richtungen an Satelliten- und Empfangsantenne im ersten Unterkapitel gibt das zweite Unterkapitel einen Überblick über die Methoden zur Bestimmung von GDV. Den Schwerpunkt des Kapitels bildet das Unterkapitel 2.3 zur CMC-Methode, die für die Untersuchungen in den Publikationen P1–P3 zur Anwendung kam. Das Unterkapitel 2.4 schließt mit Ergebnissen relativer und absoluter GDV-Schätzungen das Kapitel ab.

Kapitel 3 fasst die der Dissertation zugrunde liegenden englischsprachigen Publikationen in deutscher Sprache zusammen und gibt zu jeder Publikation Informationen zum Eigenanteil der Verfasserin und zur Veröffentlichung der Publikation.

In Kapitel 4 werden schließlich die Ergebnisse der Publikationen herangezogen, um die Forschungsfragen zu beantworten und auch im Hinblick auf zukünftige Fragestellungen zu diskutieren.

Der Anhang enthält die Originalpublikationen als eigenständige Textteile.

2 Bestimmung richtungsabhängiger Codeverzögerungen

2.1 Richtungen an Satelliten- und Empfangsantennen

Für die Beschreibung der Richtungen an Satelliten- und Empfangsantenne werden unterschiedliche Winkel verwendet, siehe Abbildung 2.1. An der Empfangsantenne ergibt sich die Elevation e vertikal zwischen dem Antennenhorizont und der Richtung zum beobachteten Satellit. Am Satellit befindet sich der vertikale Nadirwinkel η (auch *boresight angle* oder *off-nadir angle*) zwischen der Richtung zum Geozentrum, zu dem die Satellitenantenne ausgerichtet ist, und der Richtung zur Empfangsantenne. Beide Winkel sind über folgende Gleichung verknüpft (Rothacher 2001):

$$\sin \eta = \frac{R}{A} \cos e, \quad (2.1)$$

wobei R den Erdradius und A die Distanz des Satelliten zum Geozentrum bezeichnet. Letztere entspricht der großen Halbachse des Satellitenorbits und bestimmt den maximalen Nadirwinkel, unter dem ein Satellitensignal auf der Erde empfangen werden kann. Je höher ein Satellit fliegt, desto kleiner ist der maximale Nadirwinkel.

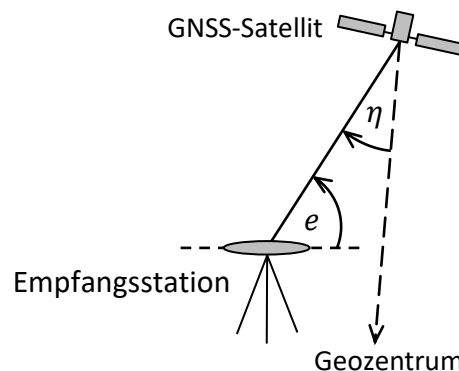


Abbildung 2.1 Winkel an GNSS-Antennen: Elevation e an der Empfangsantenne und Nadirwinkel η an der Satellitenantenne (Prinzipiskizze).

Um horizontale Richtungen einer Antenne anzugeben, wird das Azimut verwendet. Insbesondere die PZV geodätischer Empfangsantennen werden in der Regel azimut- und elevationsabhängig kalibriert. Im Gegensatz zu Empfangsantennen bestehen die GNSS-Satellitenantennen aus mehreren Antennenelementen. Neben satelliteninternen Mehrwegeeffekten, wie beim GPS-Satellit SVN 49 oder den BeiDou-2-Satelliten, kann auch die nicht perfekte Ausbalancierung der einzelnen Elemente Ursache von richtungsabhängigen Sendeeigenschaften sein. Da die Antennenelemente kreisförmig angeordnet sind, geht man von hauptsächlich

nadirwinkelabhängigen Sendeeigenschaften aus und die meisten Satellitenantennen-PZV wurden rein nadirwinkelabhängig bestimmt (Schmid u. a. 2016; IGS Antenna Working Group 2022). Auch wenn Zehentner (2016) für einige GPS-Satelliten auf dem Frequenzband L2 azimutabhängige GDV-Unterschiede im Bereich von 10–20 cm zeigt, werden im Rahmen dieser Arbeit keine Azimutabhängigkeiten berücksichtigt. Hierfür wären Beobachtungen im gesamten Azimut- und Nadirwinkelbereich der Satellitenantennen erforderlich, was mit terrestrischen Beobachtungen zum Teil schwer zu erreichen ist. Somit ergibt sich nachfolgend der gesamte GDV-Einfluss auf eine Codebeobachtung aus den elevationsabhängigen GDV der Empfangsantenne GDV_r und den nadirwinkelabhängigen GDV der Satellitenantenne GDV^s :

$$GDV = GDV_r(e) - GDV^s(\eta). \quad (2.2)$$

Aufgrund der Verknüpfung von e und η in Gleichung (2.1) sind die Anteile von Sende- und Empfangsantenne nicht ohne weiteres trennbar und es wird zwischen absoluten und relativen GDV unterschieden.

2.2 Methoden

Wie in Unterkapitel 1.2 beschrieben, sind GDV von GNSS-Sende- und Empfangsantennen für verschiedene Anwendungen relevant. Daraus haben sich unterschiedliche Methoden für ihre Bestimmung ergeben, die Abbildung 2.2 im Überblick darstellt.

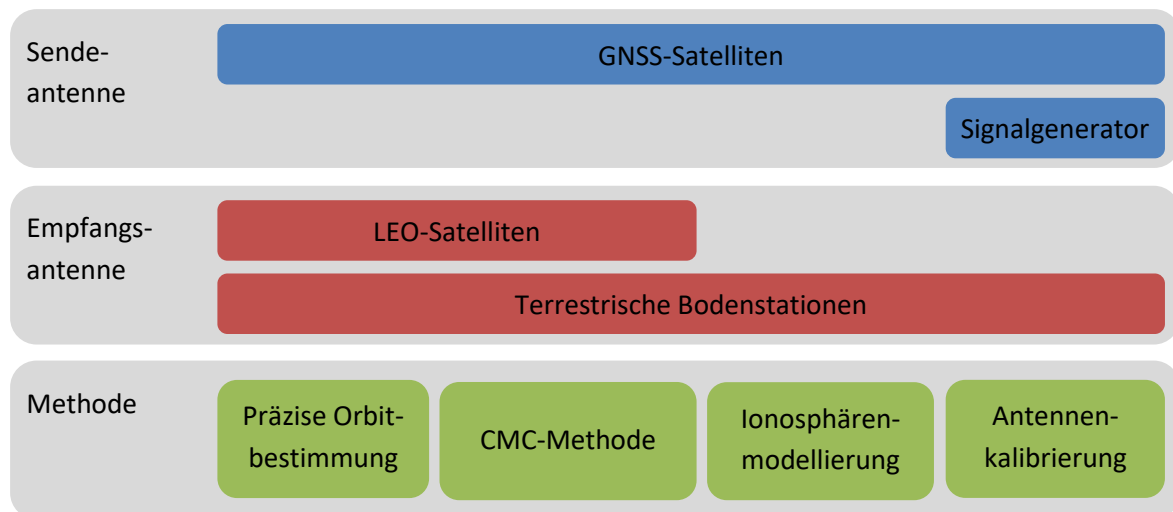


Abbildung 2.2 Überblick über Methoden zur Bestimmung von GDV an Sende- und Empfangsantennen.

Bei der Antennenkalibrierung und der CMC-Methode steht die Untersuchung der Antenneneigenschaften im Vordergrund. Im Gegensatz dazu werden GDV bei der präzisen Orbitbestimmung und der Ionosphärenmodellierung als Nebenprodukte der eigentlichen Zielparаметer mitgeschätzt oder durch die Analyse der Residuen bestimmt. Die für die verschiedenen Methoden verwendeten Beobachtungen stammen nicht ausschließlich von terrestrischen Stationen, sondern auch von Empfangsantennen auf LEO-Satelliten. Auch die CMC-Methode ist nicht auf terrestrische Beobachtungen beschränkt, wenngleich sie bisher nur auf terrestrische Beobachtungen angewendet wurde. Die Sendeantennen sind in der Regel die Sendeantennen der GNSS-Satelliten selbst. Nur ein spezielles Verfahren der Antennenkalibrierung arbeitet mit künstlichen GNSS-Signalen, die von einem Signalgenerator erzeugt werden.

Nachfolgend wird ein Überblick über drei der vier genannten Methoden gegeben. Die CMC-Methode wird separat im Unterkapitel 2.3 behandelt, da sie die Grundlage für die der Dissertation zugrunde liegenden Publikationen bildet.

Antennenkalibrierung

GDV können prinzipiell mit denselben Methoden kalibriert werden wie PZV. Dazu nutzt man spezielle Kalibriereinrichtungen, um andere Messabweichungen zu eliminieren und nur die richtungsabhängigen PZV zu ermitteln. Die Kalibrierverfahren lassen sich grundlegend in Labor- und Feldverfahren unterteilen, siehe Abbildung 2.3. Während man mit dem Laborverfahren absolute PZV bestimmt, führen verschiedene Varianten des Feldverfahrens zu relativen, teils relativen/teils absoluten oder absoluten Kalibrierwerten.

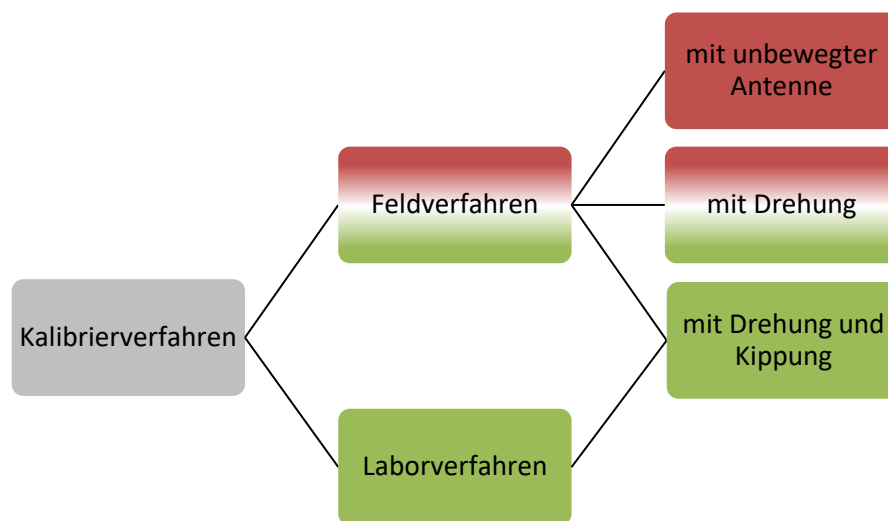


Abbildung 2.3 Einteilung der Kalibrierverfahren für GNSS-Antennen: Die Kalibrierergebnisse können relativ (rot), absolut (grün) oder teils relativ, teils absolut (rot-grün) sein, nach Görres u.a. (2018).

Das Laborverfahren wird auch als Kammerkalibrierung bezeichnet, da sich die zu kalibrierende Antenne in einer isolierten, absorbierenden Kammer befindet und dort künstlich erzeugte GNSS-Signale von einem Signalgenerator empfängt. Durch Drehen und Kippen der Antenne werden Azimut und Elevation des Signals variiert. Da keine Referenzantenne benötigt wird, sind die PZV absolut (Görres u.a. 2006; Zeimetz und Kuhlmann 2008; Görres 2010; Zeimetz 2010).

Die Feldverfahren nutzen echte GNSS-Signale und die zu testende Antenne bildet mit einer lokalen Referenzstation eine kurze Basislinie. Bleibt die zu testende Antenne unbewegt, ergeben sich relative Korrekturen, die sich auf die Referenzantenne beziehen (Mader 1999). Um daraus absolute Korrekturen abzuleiten, müssen absolute Korrekturen der Referenzantenne verfügbar sein. Durch schnelles Drehen der Testantenne lassen sich die horizontalen Komponenten des PZO absolut bestimmen (Frevert u.a. 2003). Wird die Testantenne zusätzlich zur Drehung gekippt, erhält man PZO und PZV vollständig absolut, d.h. unabhängig von der Referenzantenne (Wübbena u.a. 1997; Wübbena u.a. 2000; Bilich und Mader 2010). Da ein Roboterarm die Antenne dreht und kippt, wird dieses Verfahren als Roboterkalibrierung bezeichnet. Ein wesentlicher Aspekt bei der Datenauswertung ist hier die starke Reduktion bzw. Beseitigung der Mehrwegeeinflüsse der Stationsumgebung durch zeitliche Differenzierung der Beobachtungen.

Aufgrund verschiedener Limitierungen relativer PZV haben absolute Antennenkorrekturen an Bedeutung gewonnen (Schmid u.a. 2016; IGS 2019). Mit der Erneuerung und dem Ausbau der GNSS entsteht außerdem der Bedarf an Antennenkalibrierungen auf allen verfügbaren Sendefrequenzen. Unter diesem Aspekt hat das Laborverfahren den Vorteil, dass künstliche Signale und absolute Kalibrierwerte auf beliebigen Frequenzen erzeugt werden können. In der Praxis sind zunehmend Roboterkalibrierungen zur Bestimmung von absoluten Multifrequenz- und Multi-GNSS-PZV realisiert oder geplant (Hu u.a. 2015; Bilich u.a. 2018; Wübbena u.a. 2019; Willi u.a. 2020; Kröger u.a. 2021).

Auch die PZV der Satellitenantennen können durch Kalibrierung vor dem Start der Satelliten bestimmt werden. Frequenzspezifische, azimut- und nadirwinkelabhängige PZV aus Kammerkalibrierungen wurden für die Galileo-Satelliten (European GNSS Agency 2022a) und die neueren QZSS-Satelliten (QZSS-2) veröffentlicht (Cabinet Office, Government of Japan 2022a). Da im Gegensatz zur Kalibrierung das Antennenumfeld auf dem Satellit die Signale beeinflusst, kann es vorteilhaft sein, Satellitenantennenkorrekturen anhand von GNSS-Beobachtungen zu bestimmen.

Insgesamt liegt der Schwerpunkt bei der Antennenkalibrierung auf den Phasendaten. Im Vergleich zu PZV sind bis jetzt deutlich weniger GDV von Empfangsantennen kalibriert worden (Wübbena u.a. 2008; Kersten u.a. 2012; Kersten und Schön 2017; Brevi u.a. 2019; Wübbena u.a. 2019), siehe dazu Unterkapitel 1.2.

Präzise Orbitbestimmung

Zur präzisen Orbitbestimmung der GNSS-Satelliten werden Beobachtungen aus globalen Referenzstationsnetzen verwendet. Zusammen mit den Satelliten- und Stationskoordinaten sowie weiteren geodätischen Parametern wurden dabei die PZV von Satellitenantennen geschätzt, siehe z.B. Schmid und Rothacher (2003), Dilssner u.a. (2010) und Villiger u.a. (2020). Auch eine derartige Bestimmung der GDV von Satellitenantennen ist denkbar. Wird zur präzisen Orbitbestimmung die ionosphärenfreie Linearkombination genutzt, beziehen sich die mitgeschätzten Größen ebenfalls auf diese Linearkombination.

GNSS-Empfänger befinden sich nicht nur auf der Erde, sondern auch auf LEO-Satelliten, um deren präzise Orbitbestimmung zu ermöglichen. Somit können auch mit Beobachtungen von LEO-Satelliten GDV bestimmt werden. Bisher kamen auf LEO-Satelliten reine Zweifrequenz-GPS-Empfänger zum Einsatz, sodass sich die GDV-Schätzungen mit LEO-Beobachtungen auf die GPS-Frequenzbänder L1 und L2 (Zehentner 2016) oder auf deren ionosphärenfreie Linearkombination beziehen (Haines u.a. 2015). Satellitenantennen-GDV für weitere Frequenzen und andere GNSS-Satelliten können bisher nur mit terrestrischen Beobachtungen bestimmt werden. Im Vergleich zu terrestrischen Stationen können mit LEO-Satelliten aufgrund ihrer schnellen Erdumläufe aber leichter Beobachtungen aus dem gesamten Nadirwinkel- und Azimutbereich der GNSS-Antennen erhalten werden. Zudem ist durch die Flughöhe der LEO-Satelliten der maximale Nadirwinkel der empfangenen Signale etwas größer.

Ionosphärenmodellierung

Die Ionosphäre ist für Mikrowellen ein dispersives Medium, in dem die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Strahlung von der Wellenlänge abhängt. Damit sind GNSS-Beobachtungen auf zwei unterschiedlichen Frequenzen dazu geeignet, den TEC der Ionosphäre zu ermitteln (Hobiger und Jakowski 2017). Als Messgrößen können Phasen- und/oder Codebeobachtungen verwendet werden. Immer wenn Codebeobachtungen an der

Ionosphärenmodellierung beteiligt sind, sind unkorrigierte GDV in den Residuen enthalten. So wies Håkansson (2020) die besonders stark ausgeprägten GDV der BeiDou-2-Satelliten auch in den Residuen der geometriefreien Ionosphärenlinearkombination nach. Aufgrund der begrenzten Genauigkeit dieses Ansatzes konnten aber weniger stark ausgeprägte GDV wie die von GPS oder Galileo nicht verifiziert werden.

2.3 Code-Minus-Carrier-Methode

Die *Code-Minus-Carrier* (CMC)-Methode ist auf die Bestimmung frequenzspezifischer GDV ausgerichtet. Dabei ist das Schätzen weiterer geodätischer Parameter nicht erforderlich und es können frei verfügbare Beobachtungen von Stationen globaler Referenzstationsnetze verwendet werden. Die Stationsauswahl sollte jedoch mit Sorgfalt erfolgen. Insbesondere wenn keine absoluten Empfangsantennen-GDV verfügbar sind und relative GDV bestimmt werden, ist es sinnvoll, Gruppen von Stationen mit identischen Empfangsantennentypen zu verwenden, um später Aussagen über die GDV-Anteile von Satelliten- und Empfangsantennen treffen zu können.

Der CMC-Methode liegt die CMC-Linearkombination zugrunde. Linearkombinationen entstehen durch die Kombination von zwei oder mehr Beobachtungen, wobei verschiedene Beobachtungstypen (Code/Phase) oder die Beobachtungen mehrerer Frequenzen kombiniert werden können. Die Wahl der Linearfaktoren richtet sich nach der Zielstellung und erzeugt unterschiedliche Eigenschaften der jeweiligen Linearkombination.

Die nachfolgenden Abschnitte erläutern die CMC-Linearkombination und die Schätzung von GDV durch Ausgleichung der CMC-Werte. Anschließend erfolgt die Beschreibung der GNSS, deren GDV in den Publikationen P1–P3 untersucht wurden. Dabei stehen die Eigenschaften der GNSS im Vordergrund, die die GDV-Bestimmung und die Auswahl der Datengrundlage beeinflusst haben.

2.3.1 Code-Minus-Carrier-Linearkombination

Die CMC-Linearkombination ist im Wesentlichen die Differenz zwischen Code- und Phasenbeobachtung auf derselben Frequenz. Sie wurde ursprünglich als Mehrwege (*multipath*, MP)-Linearkombination bezeichnet (Rocken und Meertens 1992; Simsky 2006), da durch den Vergleich der Codebeobachtungen mit den deutlich genaueren Phasenbeobachtungen u.a. der Mehrwegeeinfluss auf die Codebeobachtungen einer Frequenz untersucht werden kann.

Die Beobachtungsgleichungen für die GNSS-Codebeobachtung C und die Phasenbeobachtung Φ in Metern lassen sich wie folgt formulieren:

$$C = R + c(dt_r - dt^s) + T + I + GDV + di_c + MP_C + \epsilon_c, \quad (2.3)$$

$$\Phi = R + c(dt_r - dt^s) + T - I + PCV + di_\phi + MP_\phi + \lambda N + \epsilon_\phi. \quad (2.4)$$

Hierin bezeichnet R die wahre geometrische Distanz zwischen Satellit und Empfänger. Die Größen dt_r und dt^s sind die Abweichungen der Empfängeruhr bzw. der Satellitenuhr von der GNSS-Systemzeit in Zeiteinheiten, c ist die Lichtgeschwindigkeit. T und I bezeichnen die troposphärische und die ionosphärische Laufzeitverzögerung. Da die Phasenbeobachtung mehrdeutig ist, enthält sie den Term λN mit der ganzzahligen Anzahl an Zyklen N und der Wellenlänge λ der Frequenz. Alle anderen Größen sind Messabweichungen, die sich betragsmäßig unterschiedlich auf Code- und die Phasenbeobachtung auswirken. Bezüglich der Codebeobachtung gehören dazu die GDV von Satelliten- und Empfangsantenne, instrumentelle

Verzögerungen der Codebeobachtung di_c am Satellit und am Empfänger sowie Mehrwegeinflüsse MP_c und Messrauschen ϵ_c der Codebeobachtung. Messabweichungen der Phasenbeobachtung sind die PCV von Satelliten- und Empfangsantenne, instrumentelle Verzögerungen der Phasenbeobachtung di_ϕ am Satellit und am Empfänger sowie Mehrwegeinflüsse MP_ϕ und Messrauschen ϵ_ϕ der Phasenbeobachtung. Da die Messabweichungen der Phasenbeobachtung im Vergleich zu denen der Codebeobachtung in der Regel zwei Größenordnungen kleiner sind, werden sie im Folgenden vernachlässigt.

Die CMC-Linear kombination ergibt sich wie folgt aus der Differenz der Gleichungen (2.3) und (2.4):

$$C - \Phi = 2I - \lambda N + GDV + di_c + MP_c + \epsilon_c. \quad (2.5)$$

Alle Terme, die sich mit gleichem Betrag und Vorzeichen auf Code- und Phasenbeobachtung auswirken, fallen durch die Differenzbildung heraus. Der Einfluss der Ionosphäre hingegen wird verdoppelt, da er mit unterschiedlichem Vorzeichen in die Beobachtungen eingeht (Codeverzögerung vs. Phasenbeschleunigung bzw. Divergenz von Code und Phase).

Da der Einfluss der Ionosphäre frequenzabhängig ist, kann er durch die Ionosphärenlinearkombination der Phasenbeobachtungen zweier Frequenzen i und j bestimmt werden, siehe z. B. Hauschild (2017):

$$I = \lambda_i^2 \frac{\Phi_i - \Phi_j}{\lambda_j^2 - \lambda_i^2}. \quad (2.6)$$

Hierbei handelt es sich um den ionosphärischen Effekt erster Ordnung, wenn der integrierte Elektronengehalt entlang des Signalweges in einer Reihe entwickelt wird. Wird Gleichung (2.5) um Gleichung (2.6) korrigiert, so ergibt sich die geometriefreie, ionosphärenfreie und troposphärenfreie CMC-Linear kombination für eine Frequenz i :

$$CMC_i = C_i - \Phi_i + 2\lambda_i^2 \frac{\Phi_j - \Phi_i}{\lambda_j^2 - \lambda_i^2} - B_i = GDV + MP_c + \epsilon_c. \quad (2.7)$$

Die Wahl der Frequenzen für die ionosphärische Zweifrequenzkorrektur ist beliebig, erfolgt aber meist wie in Gleichung (2.7) angegeben: eine Phasenbeobachtung Φ_i ist dieselbe, die für die Code-Phasen-Differenz $C_i - \Phi_i$ verwendet wird. Für die zweite Phasenbeobachtung wird eine Frequenz j ausgewählt, die einen möglichst großen Abstand zur ersten Frequenz aufweist, um den Einfluss der Ionosphäre bestmöglich zu korrigieren.

Der Mehrdeutigkeitsterm λN ist konstant bei kontinuierlicher Phasenmessung und ändert sich nur beim Aufgang eines Satelliten und bei Signalunterbrechungen (*cycle slips*). Er kann allerdings nicht von anderen konstanten Signalanteilen, wie instrumentellen Verzögerungen, unterschieden werden. Diese werden mit λN in B_i zusammengefasst und durch Abzug des Mittelwertes über alle CMC-Werte einer kontinuierlichen Phasenmessung eliminiert. Folglich ist kein absolutes Niveau der CMC-Werte bestimmbar, sondern nur die Variationen (*peak-to-peak*) innerhalb der Blöcke kontinuierlicher Phasenmessungen.

Aufgrund der Verwendung von Zweifrequenz-Phasenbeobachtungen zur Ionosphärenkorrektur wurden vor der Berechnung der CMC-Werte im Rahmen der Publikationen P1–P3 folgende frequenzabhängige Korrekturen an die Phasenbeobachtungen angebracht: Damit sich die Phasenbeobachtungen auf ein einheitliches Antennenphasenzentrum beziehen, wurden die PZV für die Sende- und Empfangsantennen berücksichtigt. Diese beziehen die Phasenbeobachtungen, und somit auch die CMC-Werte, auf das Massenzentrum des Satelliten und den Antennenreferenzpunkt der Empfangsstation (Rothacher und Schmid 2010). Außerdem wurden die Phasenbeobachtungen um den Effekt der Phasenverdrehung (*phase wind-up*,

PWU) wegen der Rotation des Satelliten (Wu u. a. 1993) korrigiert. Dieser beträgt sonst in der CMC-Linearkombination wenige Zentimeter (Hauschild 2017).

Nach dem Anbringen der genannten Korrekturen und der Mittelwertreduktion in kontinuierlichen Beobachtungssequenzen enthalten die CMC-Werte die GDV sowie die Mehrwegeeinflüsse und das Messrauschen der Codebeobachtungen. Abbildung 2.4 zeigt die CMC-Zeitreihe für einen vollständigen Durchgang eines BeiDou-2-Satelliten. BeiDou-2-Satellitenantennen weisen besonders große GDV von bis zu 1,5 m auf, siehe z. B. Wanninger und Beer (2015). Diese sind in der Zeitreihe deutlich erkennbar und klar elevations- bzw. nadirwinkelabhängig. Aufgrund des Messrauschens und der Mehrwegeeinflüsse auf die Codebeobachtung streuen die CMC-Werte besonders in niedrigen Elevationen, d. h. beim Auf- und Untergang der Satelliten. Die Streuung ist abhängig vom untersuchten Signal, den Mehrwegeeinflüssen in der Stationsumgebung und den Eigenschaften von Antenne und Empfänger, insbesondere der Mehrwegeempfindlichkeit der Antenne und der Mehrwegeunterdrückung im Empfänger.

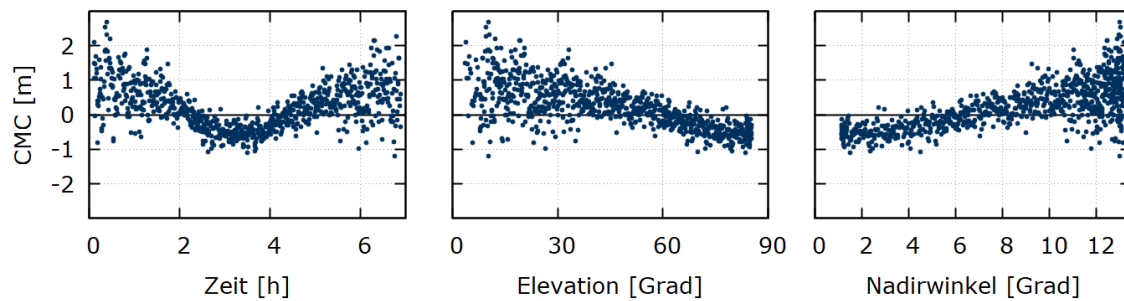


Abbildung 2.4 CMC-Linearkombination: Typische CMC-Werte für Beobachtungen eines vollständigen Satellitendurchgangs eines BeiDou-2-Satelliten (SVN 13) für das Frequenzband B1-2. Die drei Teilabbildungen zeigen die gleichen Werte abhängig von der Zeit, der Elevation und des Nadirwinkels. Die verwendeten Beobachtungen wurden von der polnischen Referenzstation Jozefoslaw (JOZ2) im Februar 2020 aufgezeichnet.

2.3.2 Schätzung richtungsabhängiger Codeverzögerungen

Abbildung 2.5 zeigt schematisch den Ablauf der Bestimmung frequenzspezifischer GDV für eine Satellitenantenne wie er in den Publikationen P1–P3 zur Anwendung kam. Zuerst wurden die Beobachtungen der ausgewählten Referenzstationen auf undetektierbare Phasensprünge untersucht. Anschließend erfolgte die Korrektur der Phasenbeobachtungen um PZV und den PWU-Effekt. Für die Untersuchungen der Publikation P3 wurden an dieser Stelle auch absolute Empfangsantennen-GDV als Korrekturen angebracht. Anschließend erfolgte die Berechnung der CMC-Linearkombination. Nach der Mittelwertreduktion der CMC-Werte kontinuierlicher Beobachtungssequenzen wurden dann durch Ausgleichung die GDV geschätzt. Nachfolgend wird die Ausgleichung der CMC-Werte nach der Methode der kleinsten Quadrate beschrieben. Alle Ausführungen hierzu beziehen sich auf Niemeier (2008).

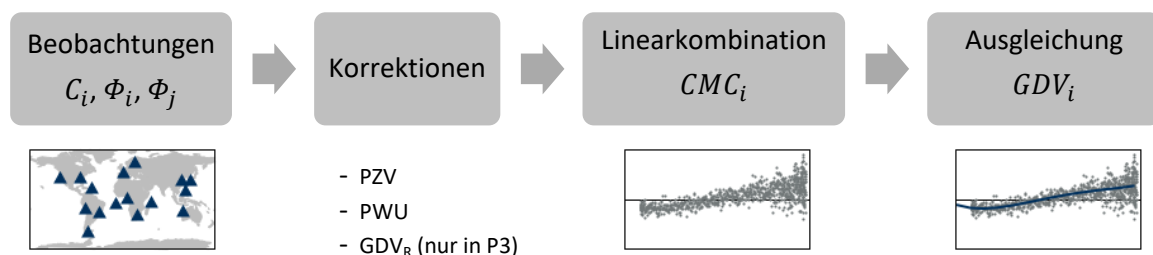


Abbildung 2.5 Ablaufschema zur Schätzung frequenzspezifischer GDV für eine Satellitenantenne.

Zur Repräsentation der nadirwinkelabhängigen GDV wurden stückweise lineare Funktionen oder Polynome vierten Grades gewählt. Diese sind bezüglich ihrer zu schätzenden Parameter linear, sodass es sich um ein lineares Ausgleichungsproblem handelt. Es gilt das funktionale Modell

$$\mathbf{L} + \mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{X}} \quad (2.8)$$

mit dem Beobachtungsvektor $\mathbf{L}$, dem Vektor der Verbesserungen $\mathbf{v}$, dem Vektor der unbekannten Parameter $\hat{\mathbf{X}}$ und der Koeffizientenmatrix $\mathbf{A}$. Im konkreten Fall enthält $\mathbf{L}$ die CMC-Werte gemäß Gleichung (2.7) und $\hat{\mathbf{X}}$ die unbekannten Polynomkoeffizienten bzw. die Parameter der stückweise linearen Funktion.

Die CMC-Werte, die die Beobachtungen darstellen, sind nicht gleichgenau. Daher erfolgt die Ausgleichung nach dem Prinzip der Parameterschätzung für Beobachtungen mit Kovarianzinformationen, das als Gauß-Markov-Modell bekannt ist. Es enthält neben dem funktionalen auch das stochastische Modell in Form der Kovarianzmatrix der Beobachtungen Σ_{LL} . Diese lässt sich in einen a-priori-Varianzfaktor σ_0^2 und die Kofaktormatrix der Beobachtungen $\mathbf{Q}_{LL}$ zerlegen:

$$\Sigma_{LL} = \sigma_0^2 \cdot \mathbf{Q}_{LL} . \quad (2.9)$$

Aus $\mathbf{Q}_{LL}$ folgt durch Inversion die Gewichtsmatrix $\mathbf{P}$:

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q}_{LL}^{-1} . \quad (2.10)$$

Im stochastischen Modell werden die CMC-Werte als unkorrelierte Beobachtungen behandelt und elevationsabhängig mit $p = \sin^2 e$ gewichtet. Dadurch ergibt sich für $\mathbf{P}$ eine Diagonalmatrix mit kleinen Gewichten für Beobachtungen in niedrigen Elevationen und größeren Gewichten für Beobachtungen in hohen Elevationen. Diese Gewichtung ist für GNSS-Beobachtungen mit geodätischem Equipment gebräuchlich und trägt den größeren Messabweichungen aufgrund von Mehrwegeeffekten und Messrauschen in niedrigeren Elevationen Rechnung (Euler und Goad 1991, Dach u.a. 2015), siehe auch Abbildung 2.4.

Die Methode der kleinsten Quadrate fordert, dass die Summe der Verbesserungsquadrate $\mathbf{v}^T \mathbf{v}$ minimal wird. Unter Berücksichtigung des stochastischen Modells bezieht sich diese Forderung auf die gewichtete Verbesserungsquadratsumme:

$$\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} \rightarrow \min . \quad (2.11)$$

Damit ergibt sich aus Gleichung (2.8) der Lösungsvektor durch Nullsetzen der 1. Ableitung:

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} . \quad (2.12)$$

Für die ausführliche Herleitung dieser Formel sowie der Formeln für die Kovarianzmatrizen des Parametervektors und Funktionen der Parameter sei nochmals auf Niemeier (2008) verwiesen. Da die Methode der kleinsten Quadrate nicht robust gegenüber Ausreißern ist, wurde bei allen GDV-Schätzungen eine Ausreißersuche mittels normierter Verbesserungen integriert.

2.3.3 Aspekte der untersuchten GNSS

In den der Dissertation zugrunde liegenden Publikationen wurden GDV für einen Großteil der Satellitenantennen von GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou und QZSS bestimmt. Neben den grundlegenden Gemeinsamkeiten weisen die einzelnen Konstellationen Unterschiede auf, die die Bestimmung der GDV beeinflussen. Diese werden nachfolgend näher erläutert und am Ende dieses Abschnitts in Tabelle 2.2 zusammengefasst.

Anzahl der Satelliten und Sendefrequenzen

Die Ausführungen in diesem Abschnitt beziehen sich auf März 2020 und damit auf den Ausbauzustand der GNSS zum Zeitpunkt der Datenakquise für die Publikation P3.

Die Untersuchungen der Publikationen P1–P3 umfassen verschiedene Zeiträume in den Jahren 2015–2020. In dieser Zeit sind die Satellitensegmente des amerikanischen GPS und des russischen GLONASS bereits vollständig ausgebaut. Es befinden sich 32 GPS-Satelliten im Orbit und es werden kontinuierlich ältere Satelliten durch Satelliten neuerer Generationen ersetzt (National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing 2021). Im März 2020 besteht das GPS-Satellitensegment aus 11 BlockIIR-, 7 BlockIIR-M-, 12 BlockIIF- und 2 BlockIIIA-Satelliten. Während BlockIIR- und BlockIIR-M-Satelliten Signale auf zwei Frequenzen aussenden, senden BlockIIF- und IIIA-Satelliten Signale auf drei Frequenzen aus.

Das russische GLONASS besteht aus 24 Satelliten, die überwiegend Signale auf zwei Frequenzen aussenden (Karutin u.a. 2020). Zur Unterscheidung der Satelliten nutzt GLONASS das Frequenzmultiplexverfahren (*frequency division multiple access*, FDMA). Damit sendet jeder Satellit denselben Code auf unterschiedlichen Frequenzen, die zur jeweiligen zentralen Sendefrequenz leicht versetzt sind. GLONASS ist das einzige GNSS, das FDMA verwendet. Alle anderen GNSS nutzen zur Unterscheidung der Satelliten das Codemultiplexverfahren (*code division multiple access*, CDMA), bei dem alle Satelliten ihren individuellen Code auf denselben Frequenzen aussenden. Im Zuge der GLONASS-Modernisierung, die auch der Verbesserung der Interoperabilität mit den anderen GNSS dient, senden die neueren GLONASS-Satelliten der Generation M, nachfolgend mit „M+“ bezeichnet, und die Satelliten der Generation K1 auch CDMA-Signale auf einer dritten Frequenz aus. Mit Stand vom März 2020 gibt es insgesamt 17 GLONASSM-, 5 GLONASSM+ und 2 GLONASSK1-Satelliten. Einer der GLONASSM-Satelliten sendet nur auf einer Frequenz und konnte daher nicht in die GDV-Bestimmung mit der CMC-Methode einbezogen werden. Die in den Publikationen P2 und P3 bestimmten Satellitenantennen-GDV für die ersten beiden GLONASS-Frequenzen beziehen sich auf die jeweiligen zentralen Sendefrequenzen.

Das Satellitensegment des noch im Aufbau befindlichen europäischen GNSS Galileo besteht im März 2020 aus 25 von 30 geplanten Satelliten. Davon gehören 4 Satelliten der älteren Generation *In-Orbit Validation* (IOV) und 21 der neueren Generation *Full Operational Capability* (FOC) an (European GNSS Agency 2022b). Die Galileo FOC-Satelliten haben die gleichen Fähigkeiten wie die IOV-Satelliten, jedoch mit verbesserten Eigenschaften, wie beispielsweise einer höheren Sendeleistung. Mit Ausnahme eines IOV-Satelliten, der nur Signale auf einer Frequenz aussendet, senden alle anderen Galileo-Satelliten Signale auf fünf Frequenzen aus. Zwei FOC-Satelliten befinden sich aufgrund von Problemen beim Satellitenstart in exzentrischen statt zirkularen Orbits mit Orbitperioden von 20 statt 10 Tagen (European Space Agency 2014).

Fast abgeschlossen ist der Aufbau des chinesischen GNSS BeiDou-3. Im Gegensatz zu GPS, GLONASS und Galileo, die ausschließlich Satelliten in mittleren Erdborbits (MEO) verwenden, besteht die BeiDou-3-Konstellation neben MEO-Satelliten auch aus Satelliten in geostationären (GEO) und inklinierten geosynchronen Orbits (IGSO). Während die MEO-Satelliten die gesamte Erde umfliegen, befinden sich die GEO- und IGSO-Satelliten permanent über dem asiatisch-pazifischen Raum, um insbesondere für China höhere Verfügbarkeiten zu schaffen. Mit Stand vom März 2020 waren 26 MEO-, 5 IGSO- und 3 GEO-Satelliten im All, je 2 MEO- und IGSO-Satelliten jedoch mit experimentellem Status und 1 GEO-Satellit noch in der Testphase (CSNO TARC 2022). Je nach Hersteller wird bei den BeiDou-3-Satelliten zwischen *China*

Academy of Space Technology (CAST)- und *Shanghai Engineering Center for Microsatellites* (SECM)-Satelliten unterschieden. Zusätzlich zu den BeiDou-3-Satelliten sind auch die 15 Satelliten der Vorgängergeneration BeiDou-2 verfügbar, die zunächst mit 5 GEO-, 7 IGSO- und 3 MEO-Satelliten eine regionale Konstellation darstellten. Die BeiDou-2- und BeiDou-3-Satelliten senden Signale auf drei bzw. fünf Frequenzen aus.

QZSS ist eine japanische Ergänzung zu GPS, um für Japan besonders in städtischen Straßenschluchten und Gebirgen eine bessere Satellitenverfügbarkeit zu erreichen. Im März 2020 besteht QZSS aus einem GEO- und drei IGSO-Satelliten, die auf vier Frequenzen Signale ausenden (Cabinet Office, Government of Japan 2022b). Drei Frequenzen und drei der ausgesendeten Navigationssignale sind identisch zu GPS, um größtmögliche Interoperabilität zu gewährleisten. Die vierte Frequenz wird für ein Zusatzsignal genutzt. Bis auf einen Satelliten der älteren Generation QZSS gehören alle Satelliten der Generation QZSS-2 an.

Für weitere Informationen zur Entwicklung der einzelnen GNSS-Konstellationen sei auf die entsprechenden Kapitel in Teunissen und Montenbruck (2017) und Morton u. a. (2020) sowie die Webseiten der GNSS-Betreiber verwiesen.

Große Halbachse und maximaler Nadirwinkel

Die große Halbachse eines Satellitenorbits gibt den Abstand des Satelliten vom Geozentrum an. Sie bestimmt den maximalen Nadirwinkel, mit dem ein Satellitensignal auf der Erde empfangen werden kann, und begrenzt damit den Ausschnitt der Satellitenantenne, für den mit terrestrischen Beobachtungen GDV bestimmt werden können.

Die großen Halbachsen der untersuchten GNSS und die sich nach Gleichung (2.1) ergebenden maximalen Nadirwinkel sind in Tabelle 2.1 zusammengestellt. Allgemein gilt: Je tiefer ein Satellit fliegt, desto größer ist der maximale Nadirwinkel. Für MEO-Satelliten, die sich in etwa 19 000–23 000 km Höhe um die Erde bewegen, betragen die maximalen Nadirwinkel 12,4°–14,5°. Dazu zählen die GPS-, GLONASS-, Galileo- und der überwiegende Teil der BeiDou-Satelliten. Die IGSO-Satelliten von BeiDou und QZSS fliegen etwa 15 000 km höher und erreichen damit nur maximale Nadirwinkel von 8,7°. Die GEO-Satelliten von BeiDou und QZSS befinden sich in derselben Orbithöhe wie die IGSO-Satelliten. Da ihre Bahn jedoch nicht geneigt ist (Inklination von 0° bezogen auf den Äquator), befinden sie sich immer über demselben Punkt auf der Erde und erscheinen auf einer Beobachtungsstation stets mit annähernd der gleichen Elevation. Damit ist die CMC-Methode nicht geeignet, um mit terrestrischen Beobachtungen GDV für GEO-Satelliten zu bestimmen. GEO-Satelliten werden daher nicht weiter betrachtet.

Tabelle 2.1 Große Halbachsen der GNSS-Satellitenorbits und maximale Nadirwinkel: Die maximalen Nadirwinkel, unter denen GNSS-Satelliten auf Erde beobachtet werden können, ergeben sich nach Gleichung (2.1) mit den großen Halbachsen ihrer Satellitenorbits (Russian Space Systems, JSC 2016; US Department of Defense 2020; China Satellite Navigation Office 2020; Cabinet Office, Government of Japan 2021; European GNSS Agency 2022c) und einem mittleren Erdradius von 6 371 km.

GNSS	Große Halbachse A [km]	Max. Nadirwinkel [°]
GPS	26 560	13,9
GLONASS	25 508	14,5
Galileo	29 600	12,4
BeiDou MEO	27 906	13,2
BeiDou IGSO	42 162	8,7
QZSS IGSO	42 164	8,7

Abbildung 2.6 stellt die Gleichung (2.1) für die verschiedenen GNSS dar. Niedrige Elevationen entsprechen großen Nadirwinkeln und umgekehrt. Steht ein Satellit über einer Empfangsstation im Zenit, empfängt sie dessen Signale mit einem Nadirwinkel von 0° . Der abgeflachte Verlauf der Kurven in niedrigen Elevationen führt zu mehr Beobachtungen in großen Nadirwinkelbereichen.

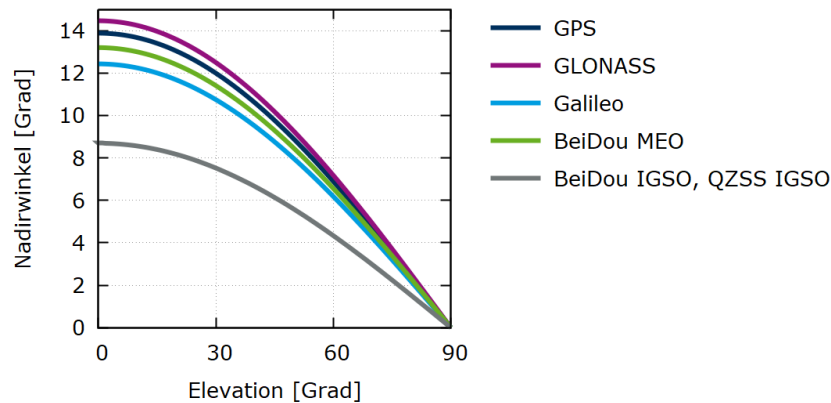


Abbildung 2.6 Zusammenhang zwischen Elevation und Nadirwinkel der untersuchten GNSS: Die Nadirwinkel wurden mit Gleichung (2.1), den großen Halbachsen aus Tabelle 2.1 und einem mittleren Erdradius von 6371 km berechnet.

Bodenspur und Orbitperiode

Zur Bestimmung der GDV einer GNSS-Satellitenantenne bis zu deren maximalem Nadirwinkel benötigt man Beobachtungen des Satelliten im gesamten Elevationsbereich. Schon wegen des Zusammenhangs von Elevation und Nadirwinkel (Abbildung 2.6) kommt es bei einem Satellitendurchgang zu mehr Beobachtungen im Bereich großer Nadirwinkel. Hinzu kommt, dass Nadirwinkel um 0° nur dann erreicht werden, wenn der Satellit eine Station im Zenit oder zenitnah überfliegt. Dies ist nicht bei jedem Satellitendurchgang der Fall, sondern nur, wenn die Bodenspur des Satelliten auf oder nahe der Stationsposition verläuft.

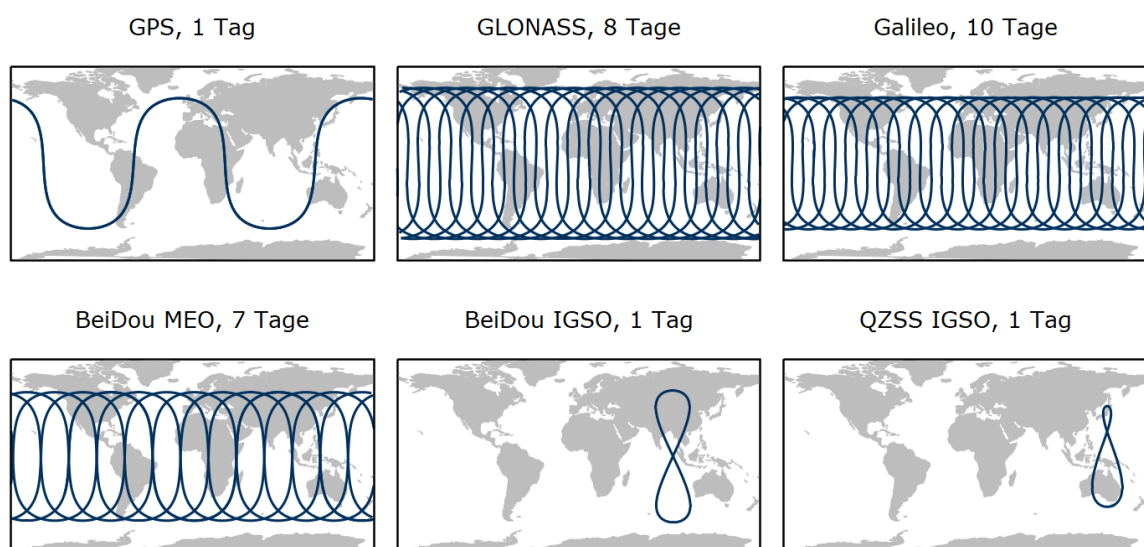


Abbildung 2.7 Bodenspuren und Orbitperioden von GNSS-Satelliten: Beispiele eines Satelliten je GNSS für die Dauer einer vollständigen Orbitperiode im erdfesten Koordinatensystem, Angabe der Orbitperioden in siderischen Tagen.

Abbildung 2.7 zeigt die typischen Bodenspuren der verschiedenen GNSS und gibt deren Orbitperioden im erdfesten Koordinatensystem, d.h. die Zeitdauer bis sich die Bodenspur eines Satelliten auf der Erde wiederholt (auch *ground track repeat cycle*), in siderischen Tagen an. Der geringe Unterschied von ca. vier Minuten zwischen siderischem und Sonnentag ist für die vorliegende Arbeit unbedeutend und wird nachfolgend vernachlässigt. Durch Orbitperioden von mehreren Tagen bei GLONASS, Galileo und den BeiDou-MEO-Satelliten verschiebt sich deren Bodenspur von Tag zu Tag und es ergibt sich eine mehr oder weniger dichte Abdeckung der Erdoberfläche. Dadurch können viele Stationen auf der Erde Signale in hohen Elevationen von diesen Satelliten empfangen. Im Gegensatz dazu produzieren die GPS- und IGSO-Satelliten mit einer Orbitperiode von einem Tag immer dieselbe Bodenspur. Somit gibt es auf der Erde Gebiete, in denen diese Satelliten nicht oder nur unter begrenzten Elevationen sichtbar sind.

Datenauswahl

In den Publikationen P1–P3 wurden frei verfügbare Beobachtungen aus globalen Referenzstationsnetzen genutzt, um nadirwinkelabhängige GDV für Satellitenantennen zu schätzen. Nachfolgend werden die Kriterien für die Auswahl von Stationen und Daten erläutert.

Im Hinblick auf die Trennung der GDV von Satelliten- und Empfangsantennen war das wichtigste Kriterium für die Stationsauswahl der Empfängsantennentyp. Im Idealfall wurden Stationen verwendet, für deren Empfängsantennentyp absolute GDV zur Korrektur vorlagen (Publikation P3). Andernfalls wurden Gruppen von Stationen mit identischem Empfängsantennentyp verwendet (Publikationen P1 und P2), damit relative Satellitenantennen-GDV stets dieselben GDV-Anteile der Empfangsantennen beinhalten.

Zur Bestimmung von Multi-GNSS- und Multifrequenz-GDV wurden Stationen ausgewählt, die Signale von möglichst vielen GNSS und Frequenzen aufzeichnen. Um die Anzahl der infrage kommenden Stationen nicht zu weit einzuschränken, erfolgte in den Publikationen P1–P3 keine Unterscheidung verschiedener Trackingverfahren. Diese bezeichnen unterschiedliche Kanäle oder Kodierungen der Signale, die der Empfänger zur Aufzeichnung der Beobachtungen auf einer Frequenz nutzt. Mit welchen Trackingverfahren der jeweilige Empfänger arbeitet, hängt von dessen Eigenschaften und Einstellungen ab.

Wie bereits ausgeführt, werden zur Charakterisierung des maximalen Nadirwinkelbereichs einer Satellitenantenne Beobachtungen im gesamten Elevationsbereich benötigt. Um dies für die GPS-Satelliten mit ihren sich nicht verändernden Bodenspuren zu erreichen, wurden global verteilte Stationen ausgewählt. Im Hinblick auf die QZSS- und BeiDou-IGSO-Satelliten müssen Stationen im asiatisch-pazifischen Raum verwendet werden. Für die GLONASS-, Galileo- und BeiDou-MEO-Satelliten spielt die Verteilung der Stationen keine besondere Rolle, die Stationen sollten lediglich nicht zu nah an den Polen liegen. Letzteres gilt für alle GNSS, da die Satelliten in den Polgebieten nur unter begrenzten Elevationswinkeln beobachtet werden können, siehe auch Abbildung 2.7. Übersichtskarten mit den gewählten Referenzstationen finden sich jeweils in den Publikationen P1–P3.

Neben dem Messrauschen führen Mehrwegeeffekte in der Stationsumgebung zu Messabweichungen in den CMC-Werten. Daher wurden möglichst viele Stationen in die Auswertungen einbezogen, sodass sich stationsspezifische Mehrwegeeffekte herausmitteln. Außerdem wurden Stationen mit besonders starkem Messrauschen der Codebeobachtungen ausgeschlossen. Als Kriterium diente das quadratische Mittel (*root mean square*, RMS) der CMC-Werte im gesamten Elevationsbereich ab 10°, das einen empirisch festgelegten Grenzwert von 0,5 m nicht überschreiten sollte.

Da sich mit jeder Orbitperiode auch die Geometrie zwischen Satellit und Empfangsantenne wiederholt, entsteht durch Beobachtungszeiträume von mehr als einer Orbitperiode kein Informationsgewinn. Daher wurden die Beobachtungszeiträume entsprechend der Orbitperioden der GNSS-Satelliten festgelegt.

Bei niedrigen Satellitendurchgängen oder aufgrund von Phasensprüngen treten kurze Beobachtungssequenzen auf. Sie liefern nur begrenzt Informationen zu den GDV, da sie nur einen entsprechend kleinen Teil der gesamten Variationen enthalten. Aus diesem Grund wurden Beobachtungssequenzen, die weniger als 60° des gesamten Elevationsbereichs umfassen, eliminiert.

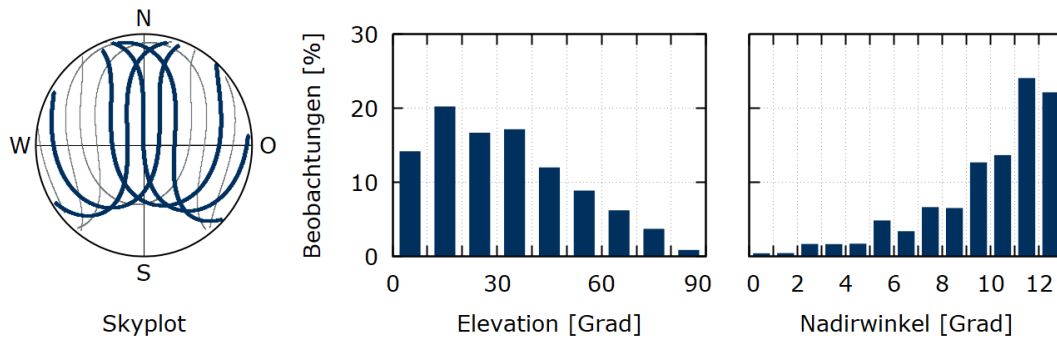


Abbildung 2.8 Skyplot und typische Verteilung der Beobachtungen eines Galileo-Satelliten im gesamten Elevationsbereich einer Empfangsstation bzw. im maximalen Nadirwinkelbereich der Satellitenantenne: Die Beobachtungsdauer beträgt 10 Tage entsprechend der Dauer einer Orbitperiode. Beobachtungssequenzen, die weniger als 60° Elevationsbereich umfassen, sind im Skyplot grau dargestellt und wurden eliminiert. Die Beobachtungen des Galileo-Satelliten SVN 207 stammen von der australischen GNSS-Station Kununurra (KUNU), Februar 2020.

Tabelle 2.2 Überblick über ausgewählte Eigenschaften der untersuchten GNSS, die die Bestimmung von GDV für die GNSS-Satellitenantennen beeinflussen: Die Angaben zur Anzahl der Satelliten entsprechen dem Ausbauzustand der GNSS im März 2020 und enthalten keine GEO-Satelliten.

GNSS, Generation/Block	Anzahl Satelliten	Anzahl Frequenzen	Orbit- typ	Maximaler Nadirwinkel [°]	Orbitperiode [Tage]
GPS	32		MEO	13,9	1
IIR-A, IIR-B	11	2			
IIR-M	7	2			
IIF	12	3			
IIIA	2	3			
GLONASS	24		MEO	14,5	8
M	17	2			
M+	5	3			
K1	2	3			
Galileo	25	5	MEO	12,4	10
IOV	4				
FOC	21				
BeiDou-2	10	3			
2I	7		IGSO	8,7	1
2M	3		MEO	13,2	7
BeiDou-3	31	5		13,2	
3I	5		IGSO		1
3MCAST	16		MEO		7
3MSECM	10		MEO		7
QZSS	3	3	IGSO	8,7	1
QZSS	1				
QZSS-2	2				

Abbildung 2.8 zeigt die typische Verteilung der Beobachtungen eines Satelliten für die Dauer einer mehrtägigen Orbitperiode. Trotz Eliminierung der Beobachtungssequenzen, die weniger als 60° Elevationsbereich umfassen (graue Linien im Skyplot), überwiegen die Anteile an Beobachtungen in niedrigen bis mittleren Elevationen bzw. in hohen Nadirwinkelbereichen deutlich. Das ist darauf zurückzuführen, dass nur wenige Satellitendurchgänge nahe des bzw. durch den Zenit einer Station verlaufen.

Tabelle 2.2 fasst die wesentlichen Informationen dieses Abschnitts zu ausgewählten Merkmalen der GNSS zusammen. In den Publikationen P1–P3 wurden die GDV der aufgeführten Typen von Satellitenantennen und Frequenzen untersucht. Für einige GNSS-Satelliten konnten jedoch aus folgenden Gründen keine GDV bestimmt werden: Die zwei Galileo FOC-Satelliten in exzentrischen Umlaufbahnen haben doppelt so lange Orbitperioden wie die Satelliten in zirkularen Orbits. Daher wäre eine erweiterte Datengrundlage erforderlich gewesen. Im Fall der experimentellen und der BeiDou-3-IGSO-Satelliten war die Anzahl an Beobachtungen nicht ausreichend. Für die Satelliten des indischen NavIC sind überwiegend nur Beobachtungen auf einer Frequenz verfügbar. Für die Bestimmung der GDV von GEO-Satellitenantennen ist die CMC-Methode in Kombination mit terrestrischen Beobachtungen ungeeignet.

2.4 Ergebnisse

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden mit der CMC-Methode relative und absolute GDV für GNSS-Satellitenantennen bestimmt. In den Publikationen P1 und P2 handelt es sich um relative GDV, da zu diesen Zeitpunkten noch keine absoluten Empfangsantennen-GDV verfügbar waren. Aus diesem Grund wurden Gruppen von Stationen mit einheitlichen Empfangsantennentypen verwendet. Abbildung 2.9 zeigt exemplarisch die relativen GDV, die mit drei verschiedenen Empfangsantennentypen für die Galileo FOC-Satelliten für das Frequenzband E1 bestimmt wurden. Die GDV-Anteile von Sende- und Empfangsantennen lassen sich nicht trennen. Die GDV-Kurven der einzelnen Satelliten sind aber innerhalb der Gruppen identischer Empfangsantennentypen sehr homogen, sodass davon ausgegangen werden kann, dass alle Galileo FOC-Satelliten sehr ähnliche GDV aufweisen. Deutliche Unterschiede sind dagegen zwischen den drei verwendeten Empfangsantennentypen erkennbar. So zeigt der Antennentyp LEIAR25.R3 im Vergleich zu den beiden anderen Antennentypen um ca. 15–20 cm größere Variationen.

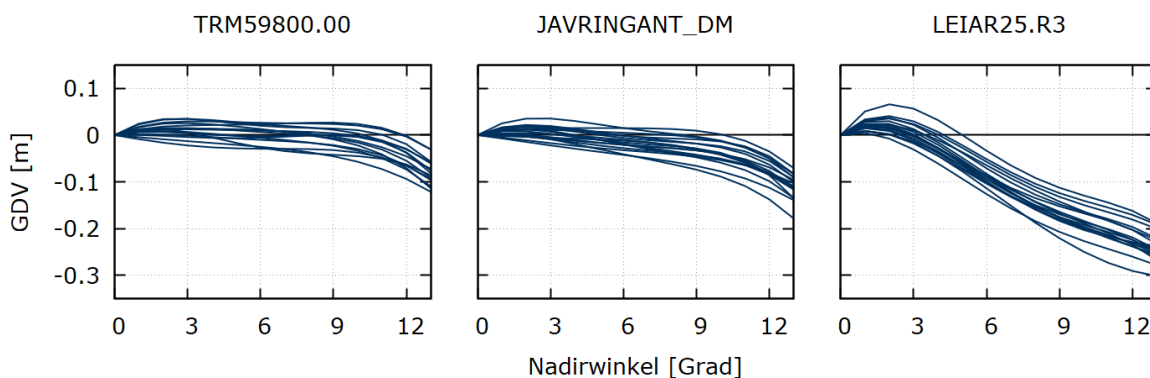


Abbildung 2.9 Relative GDV der Galileo FOC-Satelliten für das Frequenzband E1: Die relativen GDV wurden mit Beobachtungen von drei verschiedenen Empfangsantennentypen bestimmt. Jede Kurve entspricht den GDV eines Satelliten.

In der Publikation P3 wurden erstmals absolute GDV für GNSS-Satellitenantennen bestimmt, da die GDV der Empfangsantennen vorab korrigiert werden konnten, siehe Abbildung 2.10. Die absoluten Satellitenantennen-GDV liegen überwiegend im Bereich von 1–2 dm und ähneln sich meist für Satelliten desselben Typs bzw. derselben Generation. Die größten Unterschiede zwischen individuellen Satelliten derselben Konstellation zeigen die GPS IIR- und IIR-Satelliten auf den Frequenzbändern L1 und L5. Wie bereits in früheren Studien (Haines u. a. 2015; Zehentner 2016; Wanninger u. a. 2017) zeigt der GPS-Satellit SVN 55 unter den GPS IIR-M-Satelliten die größten Variationen. Sie erreichen fast 30 cm auf dem Frequenzband L1. Die GDV-Kurven der neusten GPS IIIA-Satelliten passen zu denen der Vorgängergeneration GPS IIR.

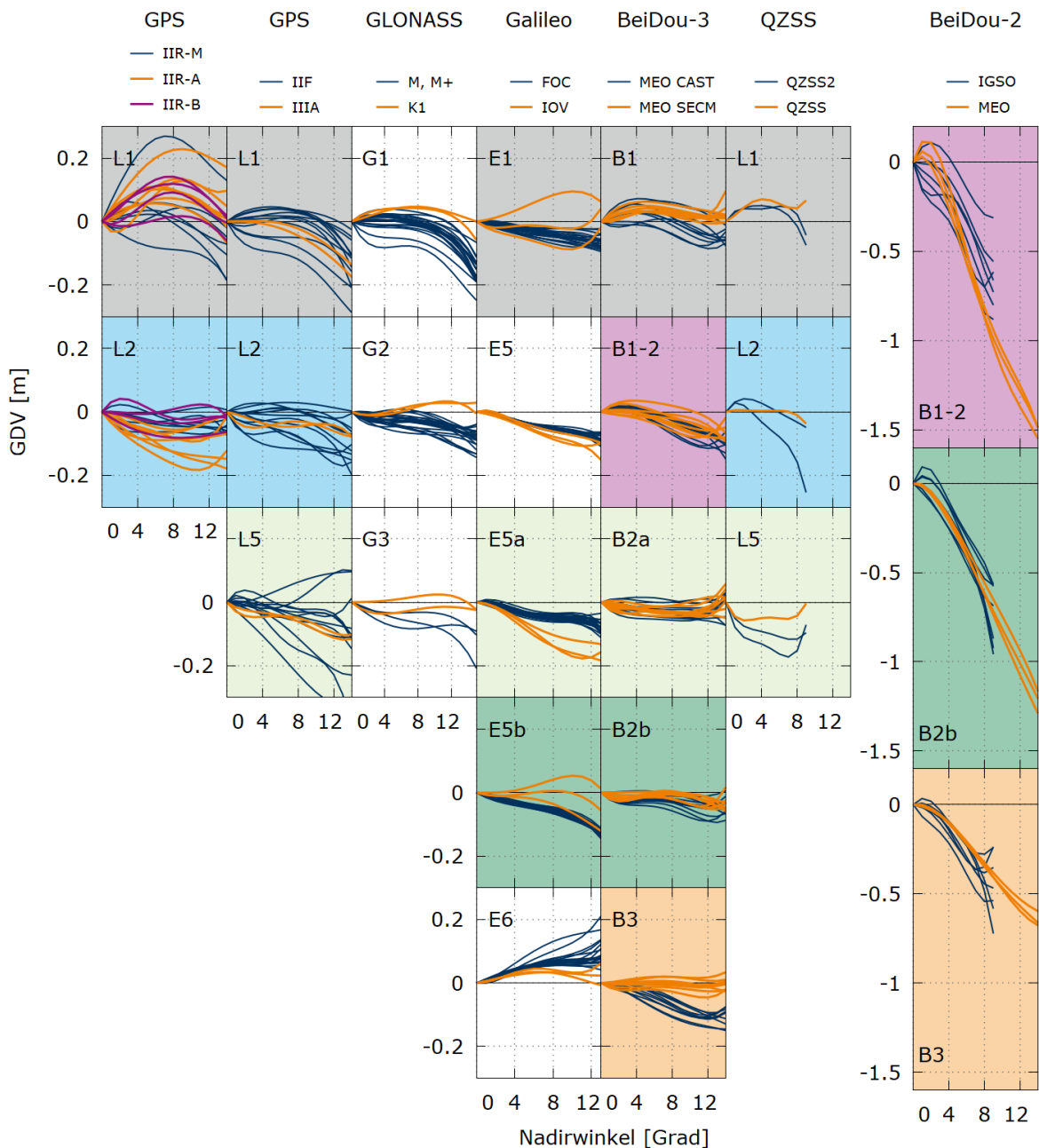


Abbildung 2.10 Absolute GDV der GNSS-Satellitenantennen: Jede Kurve repräsentiert die GDV eines Satelliten. Die GDV verschiedener Satellitentypen innerhalb einer Konstellation sind in verschiedenen Farben dargestellt. Farbige Hintergründe markieren identische Frequenzen. Aufgrund des deutlich größeren Ausmaßes der GDV der BeiDou-2-Satelliten sind diese separat mit angepasstem Maßstab abgebildet, farblich abgeänderte Darstellung aus Beer u. a. (2021).

Die GDV der neueren GLONASS K1-Satelliten passen insbesondere auf den Frequenzbändern G1 und G2 untereinander sehr gut zusammen. Sie unterscheiden sich aber von denen der Generationen GLONASS M und GLONASS M+ um bis zu 20 cm. Auf dem Frequenzband G3 zeigen alle GLONASS-Satelliten inhomogene Kurven. Eine mögliche Ursache hierfür kann die geringere Anzahl an Beobachtungen sein, da nur 31 % aller verwendeten Referenzstationen GLONASS-G3-Beobachtungen aufzeichnen.

Außer auf dem Frequenzband E6 passen die GDV der Galileo FOC-Satelliten sehr gut zusammen. Die GDV-Kurven der einzelnen Satelliten weichen weniger als 10 cm voneinander ab. Die GDV der Galileo IOV-Satelliten zeigen größere Unterschiede untereinander und auch im Vergleich zu den FOC-Satelliten. Möglicherweise beeinträchtigen die geringere Sendeleistung und ein niedrigeres Signal-Rausch-Verhältnis der IOV-Satelliten die Qualität der Beobachtungen und damit die GDV-Bestimmung.

Mit Variationen von bis zu 1,5 m haben die BeiDou-2-Satelliten nach wie vor die weitaus größten GDV. Die GDV der BeiDou-3-Satelliten hingegen liegen mit wenigen Dezimetern in der Größenordnung der anderen GNSS. Die GDV der individuellen BeiDou-3 CAST- und SECM-Satelliten passen auf allen Frequenzen untereinander sehr gut zusammen. Außerdem sind die Größenordnungen der GDV auf den Frequenzbändern B1 und B2a ähnlich zu denen der Galileo-Satelliten auf den identischen Frequenzbändern E1 und E5a.

3 Publikationen

Die folgenden Publikationen liegen der kumulativ verfassten Dissertation zugrunde:

- P1 Beer, S. und Wanninger, L. (2018) Temporal Stability of GPS Transmitter Group Delay Variations. *Sensors* 18(6):1744. <https://doi.org/10.3390/s18061744>
- P2 Beer, S., Wanninger, L. und Heßelbarth, A. (2020) Galileo and GLONASS group delay variations. *GPS Solutions* 24(1):23. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0939-7>
- P3 Beer, S., Wanninger, L. und Heßelbarth, A. (2021) Estimation of absolute GNSS satellite antenna group delay variations based on those of absolute receiver antenna group delays. *GPS Solutions* 25(3):110. <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01137-8>

Die Publikationen entstanden während der Arbeit der Verfasserin am Geodätischen Institut der TU Dresden. Alle drei Publikationen wurden fachlich begutachtet (*peer-reviewed*) und sind zum Zeitpunkt der Einreichung dieser Arbeit in internationalen Fachjournals veröffentlicht. Nachfolgend finden sich zu jeder Publikation eine deutschsprachige Zusammenfassung, eine Erklärung zum Eigenanteil der Verfasserin und Angaben zur Veröffentlichung einschließlich Verweis auf die im Internet verfügbare Originalversion.

P1 Die zeitliche Stabilität der Code-Verzögerungen von GPS-Sendeantennen

Zusammenfassung der Publikation

Ausgangspunkt für die Publikation P1 sind zwei zuvor veröffentlichte Artikel zu den GDV der Satellitenantennen von BeiDou-2 und GPS (Wanninger und Beer 2015; Wanninger u. a. 2017). In diesen Artikeln wird gezeigt, dass die mittels der CMC-Methode bestimmten GDV als Korrekturen an Beobachtungen angebracht werden können und zur Steigerung der Genauigkeit verschiedener Anwendungen der Codesignale führen. Auch weitere Forschungsgruppen haben im Rahmen anderer Anwendungen GDV bestimmt und als Korrekturen verwendet. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob die GDV der Satellitenantennen, wie bisher angenommen, zeitlich stabil und damit auch langfristig als Korrekturen verwendbar sind. Des Weiteren ist von Interesse, ob kurzzeitige Änderungen auftreten können, die bei der einmaligen Auswertung von Beobachtungen einer längeren Zeitspanne bisher nicht detektiert wurden.

Für die Untersuchung wurden die terrestrischen Beobachtungen von GPS-Satelliten über mehr als zwei Jahre ausgewertet. Da sich die GPS-Konstellation täglich wiederholt und dieselben Bodenspuren produziert, können mit denselben Bodenstationen täglich vergleichbare GDV bestimmt werden. Voraussetzung hierfür sind Beobachtungen der GPS-Satelliten im maximalen Nadirwinkelbereich, was ein global verteiltes Netz mit einer ausreichenden Anzahl an geeigneten Beobachtungsstationen erfordert, siehe Abschnitt 2.3.3. Da zum Zeitpunkt der Untersuchung keine absoluten Empfangsantennen-GDV verfügbar waren, ließen sich die GDV-Anteile der Satellitenantennen nicht von denen der Empfangsantennen trennen. Um Änderungen dieser relativen GDV dennoch den Satellitenantennen zuordnen zu können, wurden nur Stationen mit weitestgehend identischem Equipment der Empfangsstationen verwendet.

Die Untersuchungen zur zeitlichen Stabilität basieren auf der Berechnung von täglichen GDV für jeden verfügbaren GPS IIR- und IIF-Satelliten auf zwei GPS-Frequenzen mittels der CMC-Methode. Die täglichen GDV eines jeden Satelliten werden mit dessen Gesamtmittel verglichen und tägliche RMS dieser Unterschiede dienen als Maß für die zeitliche Stabilität. Im Ergebnis zeigt sich, dass die frequenzspezifischen GDV der GPS-Satelliten über den untersuchten Zeitraum von etwas mehr als zwei Jahren auf dem Niveau von 2 cm RMS stabil sind. Übertragen auf die ionosphärenfreie Linearkombination der Frequenzbänder L1 und L2 ergibt sich eine zeitliche Stabilität von 5 cm RMS.

Die Gesamtmittel der täglichen GDV der GPS-Satellitenantennen wurden zusätzlich mit den Ergebnissen früherer Untersuchungen (Haines u. a. 2015; Zehentner 2016; Wanninger u. a. 2017) verglichen. Erwartungsgemäß ist die Übereinstimmung am größten, wenn ebenfalls die CMC-Methode und terrestrische Beobachtungen verwendet wurden. Die GDV-Unterschiede betragen in diesem Fall durchschnittlich 5 cm für die ionosphärenfreie Linearkombination der Frequenzbänder L1 und L2. Beim Vergleich mit GDV, die im Zusammenhang mit präzisen Orbits und mit Beobachtungen von LEO-Satelliten bestimmt wurden, erreichen die Unterschiede für einzelne GPS-Satelliten durchschnittlich bis zu 10 cm für die ionosphärenfreie Linearkombination. Berücksichtigt man, dass es sich bei allen Vergleichen um relative Satellitenantennen-GDV handelt, so sind die Differenzen, neben den methodischen Unter-

schieden, eher durch die unterschiedlichen GDV der verwendeten Empfangsantennen als durch zeitliche Variationen zu erklären.

Als ungeklärtes Phänomen treten beim Vergleich mit den Ergebnissen früherer Studien beim GPS-Satellit SVN55 extreme Abweichungen von 20 cm auf. Es wurde gezeigt, dass diese ebenfalls keine zeitliche Variation darstellen, sondern nur im Zusammenhang mit einem bestimmten Empfängertyp (TRIMBLE NETR9) vorkommen.

Der Mehrwert der Publikation gegenüber früheren Studien, die sich mit den GDV von GPS beschäftigt haben, besteht darin, dass erstmalig deren zeitliche Stabilität auf der Basis täglicher Ergebnisse über einen Zeitraum von mehr als zwei Jahren untersucht wurde. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse auf andere GNSS übertragbar sind.

Erklärung zum Eigenanteil der Verfasserin

Die Konzeption der Untersuchung, die Auswahl geeigneter globaler Referenzstationen, die Prozessierung der Beobachtungsdaten, die Berechnung der GDV sowie die Erstellung und Aufbereitung der Berechnungsergebnisse erfolgten durch die Verfasserin allein. Für die Vorprozessierung der Daten und zur Berechnung der CMC-Werte wurden Softwaremodule des Koautors verwendet. Die Schätzung von GDV aus den CMC-Werten erfolgte mit eigens durch die Verfasserin programmierter Software. Die Konzeption und das Abfassen des Manuskripts wurden durch die Verfasserin vorgenommen. Der Koautor hat durch die gemeinsame Diskussion der Zwischen- und Endergebnisse sowie mit seinen Anmerkungen und Hinweisen zum Manuskript zur Fertigstellung der Publikation beigetragen.

Online-Veröffentlichung

Die Publikation ist 2018 unter dem Titel „Temporal Stability of GPS Transmitter Group Delay Variations“ im Journal *Sensors* des MDPI-Verlags (<https://www.mdpi.com/>) erschienen und abrufbar unter <https://doi.org/10.3390/s18061744>.

P2 Die Code-Verzögerungen von Galileo und GLONASS

Zusammenfassung der Publikation

Die Publikation P2 ist hauptsächlich motiviert durch den zunehmenden Ausbau der Galileo-Konstellation zum damaligen Zeitpunkt. Sowohl für Galileo als auch für GLONASS waren bis dahin noch keine wissenschaftlichen GDV-Untersuchungen veröffentlicht worden.

Erneut wurde die CMC-Methode angewendet, um für die verfügbaren Galileo- und GLONASS-Satelliten die GDV der Sendeantennen auf den verschiedenen Frequenzen zu untersuchen. Da die Orbitperioden beider GNSS mehrere Tage betragen, verschieben sich die Bodenspuren täglich und nahezu jede terrestrische Station kann die Galileo- und GLONASS-Satelliten im gesamten Elevations- bzw. Nadirwinkelbereich beobachten, siehe Unterkapitel 2.3.3. Damit war kein globales Stationsnetz erforderlich, was die Datenakquise im Vergleich zur GPS-bezogenen Publikation P1 deutlich vereinfachte.

Zum Zeitpunkt der Untersuchungen waren keine Empfangsantennen-GDV verfügbar. Somit wurden relative GDV für Galileo und GLONASS bestimmt. Auch wenn diese nicht frei von den GDV der Empfangsantennen sind, lassen sich die GDV der einzelnen Satelliten und Satellitentypen vergleichen. Zu diesem Zweck wurden insgesamt 28 Referenzstationen mit identischem Empfängertyp und drei verschiedenen Typen von Empfangsantennen ausgewählt. Unter der Annahme, dass die Ergebnisse der vorangegangenen Publikation P1 zur zeitlichen Stabilität der GPS-GDV auf Galileo und GLONASS übertragbar sind, bildeten Beobachtungen von jeweils einer Orbitperiode die Datengrundlage. Dies entspricht bei Galileo zehn und bei GLONASS acht Tagen.

In einem ersten Schritt wurden innerhalb der drei Gruppen von Empfangsantennentypen nadirwinkelabhängige GDV für die Galileo- und GLONASS-Satellitenantennen bestimmt. Bei Galileo handelte es sich überwiegend um FOC-Satelliten mit Signalen auf fünf Frequenzen, bei GLONASS waren zum Großteil GLONASSM-Satelliten mit zwei Sendefrequenzen verfügbar. Je nach Frequenz weisen die relativen GDV dieser Satelliten Variationen von wenigen bis ca. 20 cm im maximalen Nadirwinkelbereich auf. In allen drei Gruppen von Empfangsantennentypen zeigen sich für individuelle Satelliten desselben Typs ähnliche GDV-Kurven, die meist nicht mehr als 10 cm voneinander abweichen, siehe z.B. Abbildung 2.9. Daher wurden nachfolgend die GDV der Galileo FOC- und GLONASSM-Satelliten als typspezifisch betrachtet, d.h. es wurde davon ausgegangen, dass die GDV der einzelnen Satelliten eines Typs annähernd gleich sind.

Unter der Annahme typspezifischer GDV der Satellitenantennen können die GDV der drei Empfangsantennentypen verglichen werden. Dazu wurden in einem zweiten Schritt mit denselben Daten die GDV für jeden Empfangsantennentyp elevationsabhängig neu geschätzt. Hierbei zeigen zwei Antennentypen auf fast allen Frequenzen ähnliche GDV. Die GDV des dritten Antennentyps (LEIAR25.R3) weichen sowohl im Kurvenverlauf als auch im Ausmaß der Variationen deutlich ab, was die Ergebnisse früherer Studien bestätigt.

Die Ergebnisse weiterer Untersuchungen lassen darauf schließen, dass die GDV der Galileo FOC-Satelliten und der GPS IIF-Satelliten auf den identischen Frequenzbändern E1 und L1 ähnlich sind. Außerdem wurden die Ergebnisse früherer Studien bezüglich der Auswirkung von GDV auf ausgewählte Linearkombinationen bestätigt, d.h. insbesondere stark ausgeprägte GDV beeinträchtigen die Mehrdeutigkeitsbestimmung mit der MW-Linearkombination und

führen bei Einfrequenz-PPP mit der GRAPHIC-Linearkombination zu systematischen Abweichungen der Höhenkomponente um mehr als 10 cm.

Mit der Publikation P2 wurden erstmalig relative GDV von Galileo und GLONASS bestimmt. Aufgrund der Orbiteigenschaften von Galileo und GLONASS werden zur Anwendung der CMC-Methode die Beobachtungsdaten jeweils nur einer Orbitperiode benötigt und eine globale Verteilung der ausgewählten Referenzstationen ist nicht erforderlich.

Erklärung zum Eigenanteil der Verfasserin

Die Publikation wurde vollständig durch die Verfasserin erarbeitet. Dies umfasste die Konzeption, das Beschaffen, Prozessieren und Auswerten der Daten globaler Referenzstationsnetze sowie die Aufbereitung der Ergebnisse. Für die Vorprozessierung der Daten und die Berechnung der CMC-Werte wurde auf Softwaremodule des Zweitautors zurückgegriffen. Für die Bestimmung der GDV wurde durch die Verfasserin programmierte Software erweitert. Der Koautor und die Koautorin haben durch die Diskussion der Ergebnisse, ihre Kommentare während des Reviewprozesses und ihre Anmerkungen zum Manuskript zur erfolgreichen Veröffentlichung beigetragen.

Online-Veröffentlichung

Die Publikation ist 2020 unter dem Titel „Galileo and GLONASS group delay variations“ im Journal *GPS Solutions* des Springer-Verlags (<https://www.springer.com/>) erschienen und abrufbar unter <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0939-7>.

P3 Bestimmung absoluter Code-Verzögerungen für GNSS-Satellitenantennen auf der Grundlage absoluter Code-Verzögerungen von Empfangsantennen

Zusammenfassung der Publikation

Alle Untersuchungen zu GDV von Satellitenantennen im Vorfeld dieser Publikation basieren auf relativen GDV. Mit der Veröffentlichung eines umfangreichen Sets absoluter Empfangsantennen-GDV durch Wübbena u.a. (2019) bietet sich erstmals die Möglichkeit, absolute GDV für Satellitenantennen zu bestimmen. Die elevationsabhängigen GDV für insgesamt 36 geodätische Empfangsantennentypen stammen von Roboterkalibrierungen und umfassen nahezu alle GNSS-Sendefrequenzen. Auf der Grundlage der GDV von vier dieser Antennentypen wurden mit der CMC-Methode Multi-GNSS- und Multifrequenz-GDV für den Großteil der derzeit verfügbaren Satelliten bestimmt.

Die Beobachtungsdaten von fast 90 global verteilten Referenzstationen bilden die Datengrundlage für diese Untersuchung. Alle Stationen sind mit einem der vier ausgewählten Empfangsantennentypen ausgestattet. Die Bestimmung der GDV der GPS-Satelliten erforderte eine globale Verteilung der Stationen. Des Weiteren wurden Stationen im asiatisch-pazifischen Raum benötigt, um auch die IGSO-Satelliten von BeiDou-2 und QZSS in die Studie einbeziehen zu können. Die Beobachtungsdauer richtet sich nach den jeweiligen GNSS-Orbitperioden.

Die GDV der vier ausgewählten Empfangsantennentypen wurden zunächst digitalisiert, analysiert und, soweit möglich, validiert. Sie liegen je nach Frequenz und Antennentyp im Bereich weniger Zentimeter bis 0,3 m und zeigen eine deutliche Frequenzabhängigkeit, d.h. je niedriger die Frequenz, desto größer die GDV. Ohne existierende Vergleichswerte konnte lediglich eine Plausibilitätsprüfung der Empfangsantennen-GDV erfolgen. Dies geschah unter der Annahme, dass sich aus den Beobachtungen verschiedener Empfangsantennentypen jeweils dieselben Satellitenantennen-GDV ergeben müssen, wenn die Beobachtungen vorab um die GDV der Empfangsantennen korrigiert wurden.

Nach der erfolgreichen Validierung der Empfangsantennen-GDV erfolgte die Bestimmung der GDV für die Satellitenantennen unter Verwendung der Beobachtungen aller Stationen. Im Ergebnis liegen für die individuellen Satelliten von GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou-2 (MEO, IGSO), BeiDou-3 (MEO) und QZSS (IGSO) absolute nadirwinkelabhängige GDV für alle verfügbaren Frequenzen vor. Die grafische Aufbereitung liefert einen Gesamtüberblick mit Kennzeichnung der verschiedenen Satellitentypen und Frequenzen. Die absoluten Satellitenantennen-GDV liegen überwiegend im Bereich von 1–2 dm und ähneln sich für gleiche Satellitentypen. Die stärksten Variationen innerhalb einer Konstellation zeigen die GPS-Satelliten. Die BeiDou-2-Satelliten haben mit bis zu 1,5 m nach wie vor die mit Abstand größten GDV. Hier spielen die um eine Größenordnung kleineren GDV der Empfangsantennen eine untergeordnete Rolle. Die GDV der Satelliten verschiedener GNSS auf gleichen Frequenzen liegen meist in ähnlichen Größenordnungen.

Die Publikation P3 zeigt erstmals absolute GDV für die Satellitenantennen von fünf GNSS und liefert damit einen Überblick über die GDV eines Großteils der verfügbaren GNSS-Satelliten und -Frequenzen. Da die GDV-Anteile der Empfangsantennen korrigiert wurden, können

erstmalig auch die GDV-Unterschiede auf verschiedenen Frequenzen sicher den Satellitenantennen zugeordnet werden.

Erklärung zum Eigenanteil der Verfasserin

Mit Kenntnis über die Veröffentlichung absoluter Empfangsantennen-GDV wurde die vorliegende Publikation vom Zweitautor angeregt. Die Bearbeitung erfolgte ausschließlich durch die Verfasserin. Dies umfasste die Konzeption der Untersuchungen, die Digitalisierung und Validierung ausgewählter Empfangsantennen-GDV, die Auswahl geeigneter Stationen globaler Referenzstationsnetze sowie die Berechnung der Satellitenantennen-GDV. Für die Vorprozessierung der Daten wurden Softwaremodule des Zweitautors verwendet. Für die Bestimmung der GDV kam eigens durch die Verfasserin programmierte und erweiterte Software zum Einsatz. Die Aufbereitung der Ergebnisse und das Verfassen des Manuskripts wurden durch die Verfasserin allein vorgenommen. Beide Koautoren haben durch die Diskussion der Ergebnisse und ihre Anmerkungen zum Manuskript zur Veröffentlichung beigetragen.

Online-Veröffentlichung

Die Publikation ist 2021 unter dem Titel „Estimation of absolute GNSS satellite antenna group delay variations based on those of absolute receiver antenna group delays“ im Journal *GPS Solutions* des Springer-Verlags (<https://www.springer.com/>) erschienen und unter <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01137-8> abrufbar.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

GDV sind richtungsabhängige und frequenzabhängige Verzögerungen der GNSS-Codebeobachtungen, die sowohl an der Sendeantenne des Satelliten als auch an der Empfangsantenne des Nutzers auftreten. GDV stellen damit eine Messabweichung dar, deren Kenntnis und Korrektur zur Genauigkeitssteigerung codebasierter Anwendungen beitragen kann. Vor diesem Hintergrund entstanden die der Dissertation zugrunde liegenden Publikationen P1–P3, die sich mit den GDV der Satellitenantennen der verschiedenen GNSS beschäftigen. Nachfolgend werden die eingangs formulierten Forschungsfragen anhand der Erkenntnisse aus den Publikationen beantwortet:

- *Sind die GDV der GNSS-Satellitenantennen zeitlich stabil?*

Um GDV als Korrekturen zu verwenden, ist deren zeitliche Stabilität von Interesse. Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurden in der Publikation P1 die GDV der GPS-Satellitenantennen analysiert. GPS ist hierfür besonders geeignet, da sich aufgrund der Orbitperiode täglich dieselbe Satellitengeometrie ergibt und somit täglich vergleichbare GDV bestimmt werden können. Auch wenn diese relativ sind, lassen sich etwaige Änderungen durch geeignete Stationsauswahl, d.h. Stationen mit identischem Empfangsequipment, eindeutig den Satellitenantennen zuordnen.

Über den Zeitraum von etwas mehr als zwei Jahren sind die frequenzspezifischen GDV der GPS-Satellitenantennen konstant. Tägliche RMS der Abweichungen zum Gesamtmittel des Untersuchungszeitraums betragen durchschnittlich 2 cm und liegen damit deutlich unter den relativen GDV mit Größenordnungen von 1–2 dm. Im Untersuchungszeitraum wurden keine nennenswerten Sprünge oder Trends beobachtet. Es kann davon ausgegangen werden, dass die zeitliche Stabilität auch über diesen Zeitraum hinaus gegeben und dieses Ergebnis auch auf die Satellitenantennen der anderen GNSS übertragbar ist.

- *Wie unterscheidet sich die Bestimmung von GDV mit der CMC-Methode und terrestrischen Beobachtungen für GNSS mit unterschiedlichen Orbitperioden?*

Um mit der CMC-Methode die GDV von Satellitenantennen bis zu deren maximalem, von der Erde aus beobachtbaren Nadirwinkel (Tabelle 2.1) bestimmen zu können, werden gemäß Gleichung (2.1) Beobachtungen im gesamten Elevationsbereich vom Horizont bis zum Zenit benötigt. Ein Satellit überfliegt eine Beobachtungsstation jedoch nur dann im Zenit, wenn die Station auf dessen Bodenspur liegt, siehe Abbildung 2.7. Die Chance, dass Stationsposition und Bodenspur aufeinandertreffen, ist am größten, wenn sich die Bodenspur innerhalb einer Orbitperiode von Tag zu Tag verschiebt. Dies ist der Fall bei GNSS-Satelliten mit Orbitperioden von mehreren Tagen. Dazu gehören die GLONASS-, Galileo- und BeiDou-MEO-Satelliten mit Orbitperioden von acht, zehn bzw. sieben Tagen. Im Gegensatz dazu verschieben sich die Bodenspur von GNSS-Satelliten mit eintägigen Orbitperioden nicht. Dies trifft auf GPS sowie

die IGSO- und GEO-Satelliten zu. GEO-Satelliten wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet, da Beobachtungen von terrestrischen Stationen für die Bestimmung der GDV von GEO-Satelliten ungeeignet sind.

Publikation P2 zeigt anhand der Untersuchung der GDV der Galileo- und GLONASS-Satelliten, dass die Beobachtungen einer Orbitperiode für die Anwendung der CMC-Methode ausreichend sind. Dabei spielt für GNSS mit Orbitperioden von mehreren Tagen die globale Verteilung der Stationen keine Rolle, solange sie innerhalb der nördlichen und südlichen Ausdehnung der Bodenspuren liegen. Im Gegensatz dazu wurden im Rahmen der Publikationen P1 und P3 Stationen mit einer möglichst gleichmäßigen Verteilung über die Erdoberfläche benötigt, um für die GPS-Satelliten, deren Orbitperioden einen Tag betragen, Beobachtungen im gesamten Elevations- bzw. Nadirwinkelbereich zu erhalten. Zur Bestimmung der GDV von IGSO-Satelliten, deren Orbitperiode ebenfalls einen Tag beträgt und die nur über dem asiatisch-pazifischen Raum sichtbar sind, bedarf es Stationen in dieser Region.

Zur Reduzierung stationsspezifischer Mehrwegeeinflüsse sollten immer Beobachtungen von mehreren Empfangsstationen verwendet werden. In der Publikation P2 wurden mindestens zehn Stationen pro verwendetem Empfangsantennentyp angestrebt, in den Publikationen P1 und P3 bildeten die Beobachtungen von 17 bzw. 88 Referenzstationen die Datengrundlage.

- *Sind die absoluten GDV für geodätische Empfangsantennen von Wübbena u. a. (2019) als Korrekturen verwendbar? Welche absoluten GDV zeigen die GNSS-Satellitenantennen?*

Mit der ersten Veröffentlichung absoluter Multi-GNSS- und Multifrequenz-GDV für verschiedene geodätische Empfangsantennentypen ergibt sich erstmals die Möglichkeit zur Bestimmung absoluter GDV für die GNSS-Satellitenantennen. Die Publikation P3 basiert auf den absoluten GDV von vier der insgesamt 36 Empfangsantennentypen in Wübbena u. a. (2019). Da es für die veröffentlichten GDV keine Vergleichswerte gibt, wurden sie zunächst einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. Die Überprüfung zeigt zum einen, dass die GDV der vier ausgewählten Empfangsantennentypen klare erwartbare Frequenzabhängigkeiten aufweisen. Zum anderen wurden mit Beobachtungen der vier einzelnen Empfangsantennentypen separat GDV für identische Satellitenantennen geschätzt. Diese zeigen ohne Korrektur der Empfangsantennen-GDV die GDV-Unterschiede der einzelnen Empfangsantennentypen. Nach der Korrektur der Empfangsantennen-GDV passen die getrennt geschätzten Satellitenantennen-GDV in den meisten Fällen deutlich besser zusammen. Daher wird davon ausgegangen, dass die GDV der vier ausgewählten Empfangsantennentypen plausibel und damit als Korrekturen verwendbar sind.

Im Rahmen der Publikation P3 wurden nach der Korrektur der Empfangsantennen-GDV absolute GDV für die Satellitenantennen von GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou-2 (MEO, IGSO), BeiDou-3 (MEO) und QZSS (IGSO) bestimmt. Diese sind nadirwinkelabhängig und umfassen drei bis fünf Frequenzen pro GNSS. Ihre wesentlichen Eigenschaften lassen sich wie folgt zusammenfassen: Die GDV der Satellitenantennen liegen meist im Bereich von 1–2 dm und sind innerhalb von Gruppen gleicher Satellitentypen oder -generationen ähnlich. Die BeiDou-2-Satelliten haben mit bis zu 1,5 m nach wie vor die mit Abstand größten GDV. Die GDV verschiedener GNSS auf gleichen Frequenzen liegen meist in ähnlichen Größenordnungen. Die stärksten Variationen innerhalb einer Konstellation zeigen die GPS-Satelliten.

- *Mit welcher Genauigkeit können GDV mit der CMC-Methode bestimmt werden?*

Die Genauigkeit der GDV, die mit der CMC-Methode und Beobachtungen terrestrischer Referenzstationen erreichbar ist, lässt sich teilweise anhand der Publikation P1 beurteilen. Die Unterschiede der täglich unter gleichen Bedingungen bestimmten frequenzspezifischen GDV der GPS-Satellitenantennen betragen im Bereich von 2° bis 13° Nadirwinkel wenige Zentimeter und stellen die innere Genauigkeit, d.h. die Präzision, des Verfahrens dar. Sowohl im Bereich sehr kleiner als auch maximaler Nadirwinkel ist die innere Genauigkeit geringer. Als Ursachen sind die deutlich geringere Anzahl an Beobachtungen im Zenitbereich sowie stärkere Mehrwegeeffekte und Messrauschen in Horizontnähe zu nennen. Wegen der vorteilhafteren Orbitperioden kann davon ausgegangen werden, dass eine innere Genauigkeit von mindestens derselben Größenordnung auch für die mit der CMC-Methode bestimmten GDV anderer GNSS-Satelliten gilt.

Zur Beurteilung der äußeren Genauigkeit, d.h. der Abweichungen zu den wahren Werten, gibt es sowohl für die relativen als auch die absoluten GDV keine idealen Vergleichswerte. Die bisherigen Schätzungen relativer GDV enthalten die GDV-Anteile unterschiedlicher Empfangsantennen. Die größten Übereinstimmungen ergeben sich für relative GDV, zu deren Bestimmung dieselbe Methode und dieselbe Art von Beobachtungen verwendet wurden. So zeigen die GDV der GPS-Satellitenantennen aus der Publikation P1 im Vergleich zu Wanninger u.a. (2017) die kleinsten Unterschiede. Sie betragen ca. 5 cm für die ionosphärenfreie Linearkombination der Frequenzbänder L1 und L2. Beide Studien basieren auf der CMC-Methode und terrestrischen Beobachtungen. Dagegen wurden die GPS-GDV von Haines u.a. (2015) und Zehentner (2016) im Zusammenhang mit präzisen Orbits und LEO-Beobachtungen bestimmt. Hier ergeben sich im Vergleich zur Publikation P1 mit 10 cm etwa doppelt so große Abweichungen.

Die absoluten GDV, die im Rahmen der Publikation P3 für die GNSS-Satellitenantennen bestimmt wurden, hängen direkt von den von Wübbena u.a. (2019) veröffentlichten Empfangsantennen-GDV ab. Da zu deren Genauigkeit keine Aussagen getroffen werden, erfolgte die bereits im Zusammenhang mit der vorangegangenen Frage beschriebene Plausibilitätsprüfung. Diese stellt jedoch keine durchgreifende Kontrolle dar, da sich mögliche identische GDV-Abweichungen der verwendeten Empfangsantennentypen auf diese Art nicht aufdecken lassen.

Elevations- bzw. nadirwinkelabhängige GDV erzeugen beim PPP mittels der GRAPHIC-Linearkombination eine systematische Höhenabweichung. Daher eignet sich auch der Vergleich mit Sollkoordinaten zur Verifizierung geschätzter GDV. Kann die systematische Höhenabweichung durch Korrektur der Beobachtungen beseitigt werden, lässt sich daraus schließen, dass die geschätzten GDV in ihrer Gesamtheit in der richtigen Größenordnung liegen. Publikation P2 zeigt aber, dass aufgrund der erzielbaren Genauigkeit bei der Bestimmung der Höhenkomponente ein solcher Korrektureffekt hauptsächlich bei stark ausgeprägten GDV nachweisbar ist.

Mit der vorliegenden Arbeit wurden neue Erkenntnisse zu den GDV von GNSS-Satellitenantennen gewonnen. Insbesondere der Gesamtüberblick über die frequenzspezifischen absoluten GDV eines Großteils der derzeit verfügbaren GNSS-Satelliten stellt ein Novum dar.

Weiterer Forschungsbedarf besteht im Hinblick auf mögliche Azimutabhängigkeiten der Satellitenantennen-GDV. Die CMC-Methode erweist sich zwar als geeignet, um rein nadirwin-

kelabhängige GDV mit terrestrischen Beobachtungen zu bestimmen, sollen aber auch Azimutabhängigkeiten untersucht werden, sind Beobachtungen von LEO-Satelliten, die mehr Beobachtungen im gesamten Azimutbereich der Sendeantennen liefern, zu bevorzugen.

Im Hinblick auf eine ausreichend große Datengrundlage wurden in den Publikationen P1–P3 sämtliche Beobachtungen ungeachtet des Trackingverfahrens gemeinsam ausgewertet. Daher stellt sich die Frage, ob und inwieweit verschiedene Trackingverfahren die GDV-Bestimmung beeinflussen. Zur Untersuchung dieser Fragestellung stehen möglicherweise in Zukunft mit dem weiteren Ausbau der GNSS-Referenzstationsnetze und deren Ausstattung mit unterschiedlichen Empfängertypen ausreichend frei zugängliche Beobachtungsdaten zur Verfügung.

Wie auch absolute PZV haben absolute GDV gegenüber relativen Werten den Vorteil, dass sie unabhängig voneinander und in verschiedenen Kombinationen von Sende- und Empfangsantennen verwendet werden können. Jedoch stellen die absoluten GDV von Wübbena u. a. (2019) bis jetzt das einzige umfangreichere Set absoluter GDV für Empfangsantennen dar. Weitere Datensätze aus absoluten Kalibrierverfahren würden eine Vergleichbarkeit und damit auch die Überprüfung der absoluten GDV der Satellitenantennen ermöglichen.

GDV sind für verschiedene codebasierte GNSS-Anwendungen von Bedeutung. Daher wäre auch die fortlaufende GDV-Bestimmung der Sendeantennen neuer GNSS-Satelliten anstrebenswert. Um die GDV einem größeren Nutzerkreis als Korrekturen zur Verfügung zu stellen, bedarf es außerdem eines standardisierten Datenformats. Eine entsprechende Erweiterung des *Antenna Exchange Format* (ANTEX, Rothacher und Schmid 2010), das zum Speichern und Austauschen der PZV verwendet wird, würde eine solche Möglichkeit bieten.

Literaturverzeichnis

- Beer, S. und Wanninger, L. (2018) Temporal Stability of GPS Transmitter Group Delay Variations. *Sensors* 18(6):1744. <https://doi.org/10.3390/s18061744>
- Beer, S., Wanninger, L. und Heßelbarth, A. (2020) Galileo and GLONASS group delay variations. *GPS Solut* 24(1):23. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0939-7>
- Beer, S., Wanninger, L. und Heßelbarth, A. (2021) Estimation of absolute GNSS satellite antenna group delay variations based on those of absolute receiver antenna group delays. *GPS Solut* 25(3):110. <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01137-8>
- Bilich, A., Erickson, B. und Geoghegan, C. (2018) 6-axis robot for absolute antenna calibration at the US National Geodetic Survey (Poster). IGS Workshop 2018, Wuhan, China
- Bilich, A. und Mader, G.L. (2010) GNSS Absolute Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. In: *Proc. ION 23rd International Technical Meeting*. Portland, USA, S. 1369–1377
- Breva, Y., Kröger, J., Kersten, T. und Schön, S. (2019) Estimation and Validation of Receiver Antenna Codephase Variations for Multi-GNSS (Poster). 7th International Colloquium on Scientific and Fundamental Aspects of GNSS, Zürich, Schweiz
- Cabinet Office, Government of Japan (2022a) Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) – QZSS Satellite Information. <https://qzss.go.jp/en/technical/qzssinfo/index.html>. Zugriff am 11.05.2022
- Cabinet Office, Government of Japan (2022b) Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) – Constellation Information. <https://sys.qzss.go.jp/dod/en/constellation.html>. Zugriff am 11.05.2022
- Cabinet Office, Government of Japan (2021) Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification – Satellite Positioning, Navigation and Timing Service (IS-QZSS-PNT-004)
- China Satellite Navigation Office (2020) BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document, Open Service Signal B2b (Version 1.0)
- Choy, S. (2011) High accuracy precise point positioning using a single frequency GPS receiver. *J Appl Geod* 5(2):59–69. <https://doi.org/10.1515/jag.2011.008>
- CSNO TARC (2022) Test and Assessment Research Center of China Satellite Navigation Office – Constellation Status. <http://www.csno-tarc.cn/en/system/constellation>. Zugriff am 11.05.2022
- Dach R., Andritsch F., Arnold D., Bertone S., Fridez P., Jäggi A., Jean Y., Maier A., Mervart L., Meyer U., Orliac E., Geist E., Prange L., Scaramuzza S., Schaer S., Sidorov D., Susnik A., Villiger A., Walser P. und Thaller D. (2015) Bernese GNSS Software Version 5.2

- Dilssner, F., Springer, T., Flohrer, C. und Dow, J. (2010) Estimation of phase center corrections for GLONASS-M satellite antennas. *J Geod* 84(8):467–480.
<https://doi.org/10.1007/s00190-010-0381-7>
- Euler H.-J. und Goad C. C. (1991) On optimal filtering of GPS dual frequency observations without using orbit information. *Bulletin Géodésique* 65(2):130–143.
<https://doi.org/10.1007/BF00806368>
- European GNSS Agency (2022a) European GNSS Service Centre – Galileo Satellite Metadata. <https://www.gsc-europa.eu/support-to-developers/galileo-satellite-metadata>.
Zugriff am 11.05.2022
- European GNSS Agency (2022b) European GNSS Service Centre – Constellation Information. <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information>. Zugriff am 11.05.2022
- European GNSS Agency (2022c) European GNSS Service Centre – Orbital and Technical Parameters. <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/orbital-and-technical-parameters>. Zugriff am 11.05.2022
- European Space Agency (2014) Galileo satellite set for new orbit. https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo_satellite_set_for_new_orbit.
Zugriff am 11.05.2022
- Frevert, V., Stöcker, D. und Nuckelt, A. (2003) Beschleunigte Feldkalibrierung von GPS-Antennen. In: Schriftenreihe des Geodätisches Instituts, Heft 3, S. 331–344, 2003. DGON Symposium POSNAV 2003, Dresden
- Görres, B. (2010) Ist das GNSS-Antennenproblem gelöst? *Zeitschrift für Vermessungswesen (zfv)* 135(4):256–267
- Görres, B., Campbell, J., Becker, M. und Siemes, M. (2006) Absolute calibration of GPS antennas: laboratory results and comparison with field and robot techniques. *GPS Solut* 10(2):136–145. <https://doi.org/10.1007/s10291-005-0015-3>
- Görres, B., Kersten, T., Schön, S., Zimmermann, F. und Wanninger, L. (2018) Berücksichtigung von Antennenkorrekturen bei GNSS-Anwendungen (Überarbeitung/Aktualisierung). DVW-Merkblatt 1–2018
- Guo, F., Li, X. und Liu, W. (2016) Mitigating BeiDou Satellite-Induced Code Bias: Taking into Account the Stochastic Model of Corrections. *Sensors* 16(6):909.
<https://doi.org/10.3390/s16060909>
- Haines, B. J., Bar-Sever, Y. E., Bertiger, W. I., Desai, S. D., Harvey, N., Sibois, A. E. und Weiss, J. P. (2015) Realizing a terrestrial reference frame using the Global Positioning System. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 120(8):5911–5939.
<https://doi.org/10.1002/2015JB012225>
- Håkansson, M. (2020) Nadir-Dependent GNSS Code Biases and Their Effect on 2D and 3D Ionosphere Modeling. *Remote Sensing* 12(6):995.
<https://doi.org/10.3390/rs12060995>
- Hatch, R. (1982) The synergism of GPS code and carrier measurements. In: Proc. 3rd International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning. Las Cruces, USA, S. 1213–1231

- Hauschild, A. (2017) Combinations of Observations. In: Teunissen, P.J.G. und Montenbruck, O. (Hrsg.) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer International Publishing, Cham, S. 583–604
- Hauschild, A., Montenbruck, O., Sleewaegen, J.-M., Huisman, L. und Teunissen, P.J.G. (2012a) Characterization of Compass M-1 signals. *GPS Solut* 16(1):117–126. <https://doi.org/10.1007/s10291-011-0210-3>
- Hauschild, A., Montenbruck, O., Thoelet, S., Erker, S., Meurer, M. und Ashjaee, J. (2012b) A multi-technique approach for characterizing the SVN49 signal anomaly, part 1: receiver tracking and IQ constellation. *GPS Solut* 16(1):19–28. <https://doi.org/10.1007/s10291-011-0203-2>
- Hobiger, T. und Jakowski, N. (2017) Atmospheric Signal Propagation. In: Teunissen, P.J.G. und Montenbruck, O. (Hrsg.) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer International Publishing, Cham, S. 165–193
- Hu, Z., Zhao, Q., Chen, G., Wang, G., Dai, Z. und Li, T. (2015) First Results of Field Absolute Calibration of the GPS Receiver Antenna at Wuhan University. *Sensors* 15(11):28717–28731. <https://doi.org/10.3390/s151128717>
- IGS (2019) International GNSS Service – Conventions and Modelling for Repro3. <http://acc.igs.org/repro3/repro3.html>. Zugriff am 11.05.2022
- IGS Antenna Working Group (2022) International GNSS Service – Antenna Files – ANTEX (igs14.atx). <https://igs.org/wg/antenna/#files>. Zugriff am 11.05.2022
- IGS RINEX Working Group and RTCM-SC104 (2018) RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 3.04
- Johnston, G., Riddell, A. und Hausler, G. (2017) The International GNSS Service. In: Teunissen, P.J.G. und Montenbruck, O. (Hrsg.) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer International Publishing, Cham, S. 967–982
- Karutin, S., Testodov, N., Tyulin, A. und Bolkunov, A. (2020) GLONASS. In: Morton, Y.T.J., Diggelen, F., Spilker, J.J., Parkinson, B.W., Lo, S. und Gao, G. (Hrsg.) Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century, 1st edn. Wiley, S. 87–103
- Kersten, T. und Schön, S. (2017) GPS code phase variations (CPV) for GNSS receiver antennas and their effect on geodetic parameters and ambiguity resolution. *J Geod* 91(6):579–596. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0984-8>
- Kersten, T., Schön, S. und Weinbach, U. (2012) On the impact of Group Delay Variations on GNSS time and frequency transfer. In: 2012 European Frequency and Time Forum. IEEE, S. 514–521
- Kröger, J., Kersten, T., Breva, Y. und Schön, S. (2021) Multi-frequency multi-GNSS receiver antenna calibration at IfE: Concept – calibration results – validation. *Adv. Space Res.* 68(12):4932–4947. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.029>
- Mader, G.L. (1999) GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. *GPS Solut* 3(1):50–58. <https://doi.org/10.1007/PL00012780>
- Maqsood, M., Gao, S. und Montenbruck, O. (2017) Antennas. In: Teunissen, P.J.G. und Montenbruck, O. (Hrsg.) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer International Publishing, Cham, S. 505–534

- Melbourne, W.G. (1985) The case for ranging in GPS based geodetic systems. In: Proc. 1st International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System. Rockville, USA, S. 373–386
- Montenbruck, O., Hauschild, A. und Steigenberger, P. (2014) Differential Code Bias Estimation using Multi-GNSS Observations and Global Ionosphere Maps. *J Inst Navig* 61:191–201. <https://doi.org/10.1002/navi.64>
- Montenbruck, O., Rizos, C., Weber, R., Weber, G., Neilan, R. und Hugentobler, U. (2013) Getting a Grip on Multi-GNSS – The International GNSS Service MGEX campaign. *GPS World* 24(7):44–49
- Morton, Y.T.J., Diggelen, F., Spilker, J.J., Parkinson, B.W., Lo, S. und Gao, G. (Hrsg.) (2020) Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications, 1st edn. Wiley
- National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing (2021) GPS.gov – Space Segment. <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>. Zugriff am 11.05.2022
- Niemeier, W. (2008) Ausgleichungsrechnung – Statistische Auswertemethoden. 2., überarb. und erw. Aufl. Walter de Gruyter, Berlin, New York
- Rocken, C. und Meertens, C. (1992) UNAVCO receiver tests – UNAVCO Memo
- Rothacher, M. (2001) Comparison of Absolute and Relative Antenna Phase Center Variations. *GPS Solut* 4(4):55–60. <https://doi.org/10.1007/PL00012867>
- Rothacher, M. und Schmid, R. (2010) ANTEX: The Antenna Exchange Format, Version 1.4. <https://files.igs.org/pub/data/format/antex14.txt>. Zugriff am 11.05.2022
- Russian Space Systems, JSC (2016) Global Navigation Satellite System GLONASS Interface Control Document, Edition 1.0
- Schmid, R., Dach, R., Collilieux, X., Jäggi, A., Schmitz, M. und Dilssner, F. (2016) Absolute IGS antenna phase center model igs08.atx: status and potential improvements. *J Geod* 90(4):343–364. <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0876-3>
- Schmid, R. und Rothacher, M. (2003) Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations of GPS satellites. *J Geod* 77(7):440–446. <https://doi.org/10.1007/s00190-003-0339-0>
- Seeber, G. (2008) Satellite Geodesy. Walter de Gruyter, Berlin, New York
- Shao, K., Gu, D., Chang, X., Yi, B. und Wang, Z. (2019) Impact of GPS receiver antenna GRAPHIC residual variations on single-frequency orbit determination of LEO satellites. *Adv. Space Res.* 64(5):1166–1176. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.06.014>
- Simsky, A. (2006) Three’s the charm – Triple-Frequency Combinations in Future GNSS. *Inside GNSS* 1(5):38–41
- Springer, T. und Dilssner, F. (2009) SVN49 and other GPS Anomalies. *Inside GNSS* 4(4):32–36
- Sumaya, H. (2019) GNSS-Precise Point Positioning (PPP) mittels ionosphären-freier Auswertung von Einfrequenz-Messungen. Dissertation, Technische Universität Dresden

- Teunissen, P.J.G. und Montenbruck, O. (Hrsg.) (2017) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer International Publishing, Cham
- US Department of Defense (2020) Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard. 5th Edition
- Villiger, A., Dach, R., Schaer, S., Prange, L., Zimmermann, F., Kuhlmann, H., Wübbena, G., Schmitz, M., Beutler, G. und Jäggi, A. (2020) GNSS scale determination using calibrated receiver and Galileo satellite antenna patterns. *J Geod* 94(9):93. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01417-0>
- Wang, N., Yuan, Y., Li, Z., Montenbruck, O. und Tan, B. (2016) Determination of differential code biases with multi-GNSS observations. *J Geod* 90(3):209–228. <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0867-4>
- Wanninger, L. und Beer, S. (2015) BeiDou satellite-induced code pseudorange variations: diagnosis and therapy. *GPS Solut* 19(4):639–648. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0423-3>
- Wanninger, L., Sumaya, H. und Beer, S. (2017) Group delay variations of GPS transmitting and receiving antennas. *J Geod* 91(9):1099–1116. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1012-3>
- Willi, D., Lutz, S., Brockmann, E. und Rothacher, M. (2020) Absolute field calibration for multi-GNSS receiver antennas at ETH Zurich. *GPS Solut* 24(1):28. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0941-0>
- Wu, J.T., Wu, S.C., Hajj, G.A., Bertiger, W.I. und Lichten, S.M. (1993) Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. *Manuscr Geod* 18(2):91–98
- Wübbena, G. (1985) Software developments for geodetic positioning with GPS using TI 4100 code and carrier measurements. In: *Proc. 1st International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System*. Rockville, USA, S. 403–412
- Wübbena, G., Schmitz, M., Menge, F., Böder, V. und Seeber, G. (2000) Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real-Time. In: *Proc. 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2000)*. Salt Lake City, USA, S. 2512–2522
- Wübbena, G., Schmitz, M., Menge, F., Seeber, G. und Völksen, C. (1997) A New Approach for Field Calibration of Absolute GPS Antenna Phase Center Variations. *Navigation* 44(2):247–255. <https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.1997.tb02346.x>
- Wübbena, G., Schmitz, M. und Propp, M. (2008) Antenna Group Delay Calibration with the Geo++ Robot (Poster). *IGS Analysis Workshop*, Miami Beach, USA
- Wübbena, G., Schmitz, M. und Warneke, A. (2019) Geo++ Absolute Multi-Frequency GNSS Antenna Calibration (Präsentation). *EUREF Analysis Center Workshop*, Warschau, Polen
- Yang, W., Tong, H., Pan, L., Xu, D., Guo, W. und Yang, J. (2016) Analysis and Correction of BDS Code Multipath Bias. In: Sun, J., Liu, J., Fan, S. und Wang, F. (Hrsg.) *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2016 Proceedings: Volume III*. Springer Singapore, Singapore, S. 503–513

- Yunck, T. P. (1993) Coping with the Atmosphere and Ionosphere in Precise Satellite and Ground Positioning. In: Jones, A. V. (Hrsg.) Environmental Effects on Spacecraft Positioning and Trajectories, AGU Geophysical Monograph Series, vol. 73, S. 1–16.
<https://doi.org/10.1029/GM073p0001>
- Zehentner, N. (2016) Kinematic orbit positioning applying the raw observation approach to observe time variable gravity. Dissertation, Technische Universität Graz, Österreich
- Zeimetz, P. (2010) Zur Entwicklung und Bewertung der absoluten GNSS-Antennenkalibrierung im HF-Labor. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
- Zeimetz, P. und Kuhlmann, H. (2008) On the Accuracy of Absolute GNSS Antenna Calibration and the Conception of a New Anechoic Chamber. In: Proc. FIG working week 2008. Stockholm, Schweden
- Zhou, R., Hu, Z., Zhao, Q., Li, P., Wang, W., He, C., Cai, C. und Pan, Z. (2018) Elevation-dependent pseudorange variation characteristics analysis for the new-generation BeiDou satellite navigation system. GPS Solut 22(3):60.
<https://doi.org/10.1007/s10291-018-0726-x>
- Zou, X., Li, Z., Li, M., Tang, W., Deng, C., Chen, L., Wang, C. und Shi, C. (2017) Modeling BDS pseudorange variations and models assessment. GPS Solut 21(4):1661–1668.
<https://doi.org/10.1007/s10291-017-0645-2>

Anhang

Publikation P1

Article

Temporal Stability of GPS Transmitter Group Delay Variations

Susanne Beer * and Lambert Wanninger 

Geodätisches Institut, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden, Germany;
lambert.wanninger@tu-dresden.de

* Correspondence: susanne.beer@tu-dresden.de; Tel.: +49-351-463-33022

Received: 24 April 2018; Accepted: 23 May 2018; Published: 29 May 2018



Abstract: The code observable of global navigation satellite systems (GNSS) is influenced by group delay variations (GDV) of transmitter and receiver antennas. For the Global Positioning System (GPS), the variations can sum up to 1 m in the ionosphere-free linear combination and thus can significantly affect precise code applications. The contribution of the GPS transmitters can amount to 0.8 m peak-to-peak over the entire nadir angle range. To verify the assumption of their time-invariance, we determined daily individual satellite GDV for GPS transmitter antennas over a period of more than two years. Dual-frequency observations of globally distributed reference stations and their multipath combination form the basis for our analysis. The resulting GPS GDV are stable on the level of a few centimeters for C1, P2, and for the ionosphere-free linear combination. Our study reveals that the inconsistencies of the GDV of space vehicle number (SVN) 55 with respect to earlier studies are not caused by temporal instabilities, but are rather related to receiver properties.

Keywords: GPS satellite antennas; code pseudorange; group delay variations; multipath combination; SVN55

1. Introduction

Global navigation satellite system (GNSS) transmitter and receiver antennas cause group delay variations (GDV) which affect the pseudorange observable. GDV are frequency-dependent and vary with nadir angle of the transmitted signal and with the elevation of the received signal. In the case of GPS (Global Positioning System) transmitters, space vehicle number (SVN) 49 exhibits the most pronounced GDV with a peak-to-peak difference of several meters in the ionosphere-free linear combination (IF). The main contribution to the GDV comes from the L1 signal. The exceptionally high GDV of SVN49 stems from internal signal reflections of L1 and L2 at the auxiliary L5 port, resulting in a multipath signal superimposed on the primary signal [1–3]. Springer and Dilssner [4] took a detailed look at this phenomenon by analyzing pseudorange residuals of IGS (International GNSS Service) stations on Earth from the precise orbit determination (POD) of May 2009. They identified further GPS Block IIR and IIR-M satellites with similar anomalies as SVN49 but much smaller in size, i.e., up to 1 m peak-to-peak in the IF. As stated in Reference [4], these satellites carry a classified payload connected to the same auxiliary port as the L5 signal on SVN49, but include a component to negate or dampen the secondary-path signal.

Haines et al. [5–7] determined GDV for GPS based on post-fit POD residuals from more than five years of observations of one of the two low earth orbiting (LEO) GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) satellites. Their findings agree with Springer and Dilssner [4]. The largest and most differing GDV occur for GPS Block IIR and IIR-M antennas while the GDV of the Block IIA transmitters are uniform and smaller, i.e., 10 cm peak-to-peak in the IF of L1 and L2.

For kinematic POD based on raw GPS observations, Zehentner [8] combined data from more than ten LEO satellites, covering a timespan of 13 years, and estimated azimuth and elevation-dependent GDV for P1 and P2 for individual satellites. Their peak-to-peak differences reach up to around 20 cm for P1 and 10 cm for P2. Aside from internal multipath signals as in the case of SVN49, GPS transmitter GDV are also attributed to an imperfect balancing of the individual antenna elements. Since the antenna elements are arranged in circles, the GDV are supposed to only be nadir-dependent [9]. However, the P2 patterns of Zehentner [8] show some azimuth-dependencies for Block IIR-A, IIR-B, and IIF satellites.

Wanninger et al. [10] calibrated C1 and P2 GDV for GPS transmitter and receiver antennas with respect to dual-frequency carrier phase observations during one week in May 2015. Their GPS satellite GDV refer to a set of four receiving antenna types of 43 globally distributed reference stations. Despite different approaches, these results differ by less than 10 cm root mean square (RMS) from the findings of Haines et al. [7] and Zehentner [8] for the IF. The differences from Zehentner [8] for C1/P1 and P2 are around 3 cm RMS. Combined satellite and receiver antenna GDV reach some decimeters in C1 and P2 and 1 m in the IF. Their correction improves the height component by several centimeters in single-frequency precise point positioning (PPP) based on the ionosphere-free code phase combination, enhances ambiguity fixing with the Melbourne–Wübbena (MW) linear combination, and improves the TEC (total electron content) determination based on code observables.

Induced by physical or electronic properties of the satellites, the GPS transmitter GDV are considered to be time-invariant and as far as we know, all of the aforementioned studies estimated GDV models for the complete timespans of their respective studies, as illustrated in Figure 1 by the full blue bars. Since GDV can be used as corrections for code pseudorange observations, we focus on their long-term validity. The aim of this work is to get detailed insight in the temporal behavior of the GPS GDV. Therefore, we estimate daily individual satellite GDV based on the approach of References [10,11]. We measure temporal variations using daily RMS with respect to an overall mean GDV model.

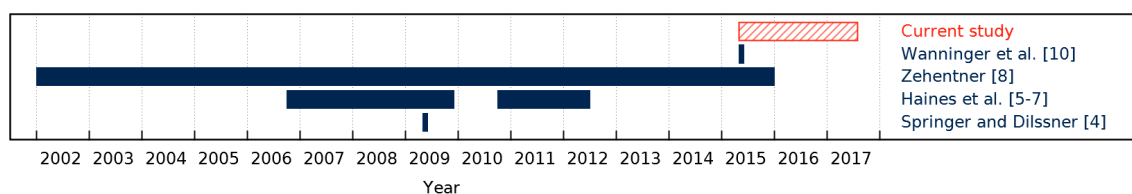


Figure 1. Timespans over which GPS transmitter group delay variations have been estimated. Full blue bars indicate time-independent estimations (Wanninger et al. [10], Zehentner [8], Haines et al. [5–7], Springer and Dilssner [4]). The striped red bar marks the temporal extent of the current study.

The paper is organized as follows. In Section 2, we describe the applied methods and underlying data. Section 3 presents our results, compares them to earlier studies, and gives a detailed examination of the inconsistencies of the GDV for SVN55, with respect to earlier studies. Finally, Section 4 summarizes our main conclusions.

Throughout the paper we denote C/A code observables on L1 as C1, and P or Y code observables on L2 as P2, following the Receiver Independent Exchange Format (RINEX) 2 conventions [12]. Since we focus on the GDV of the GPS transmitters, we refer GDV to the nadir angle at the GPS satellite antenna. The term nadir angle is used synonymously with boresight angle.

2. Methods and Data

2.1. Multipath Combination and Piecewise Linear Modelling

Information on the group delays of GNSS signals can be retrieved from the so called multipath (MP) combination (Rocken and Meertens [13]), which is the difference between code and carrier phase, corrected for ionospheric delays:

$$MP_i = C_i - \Phi_i + 2\lambda_i^2 \frac{\Phi_j - \Phi_i}{\lambda_j^2 - \lambda_i^2} - B_i. \quad (1)$$

The characteristics of Equation (1) are well described by Simsky [14]. C and Φ denote the code and carrier phase measurements, respectively, in units of meters, i and j are the involved frequency bands, and λ_i and λ_j are their respective wavelengths in units of meters. MP_i is free from geometric, ionospheric, and tropospheric contributions, but contains an arbitrary offset, B_i , due to phase ambiguities and hardware and software-induced delays. These biases cannot be separated from each other, but they are considered to be constant in continuous ambiguity sequences. Thus, MP_i only provides relative variations within those sequences, but no absolute values. Since we combine many MP sequences, we take the various biases, B_i , into account and apply an overall zero-mean condition.

High-frequency code multipath and tracking noise dominate the GDV time series. However, we are interested in the low-frequency variations. To extract them, we estimate a piecewise linear model as a function of the nadir angle in steps of 1° . Nadir angle, η , of the transmitted signal at the satellite can be calculated from elevation, e , of the received signal on Earth by:

$$\sin \eta = \frac{R}{A} \cos e \quad (2)$$

(Schmid and Rothacher [15]). In Equation (2), R is the Earth's radius and A is the distance between the geocenter and the satellite, which is identical to the semi-major axis of the quasi-circular GPS orbit. For GPS and stations on the Earth's surface, nadir angles range from 0° to nearly 14° corresponding to elevations between 90° and 0° . Due to a higher noise level of the MP values at low elevations, an elevation-dependent weighting scheme is applied. Figure 2 shows a typical example of MP values and the estimated piecewise linear model for a single GPS satellite, tracked by the reference stations shown in Figure 3. We obtain most observations and MP values at high nadir angles corresponding to low elevations. For nadir angles close to 0° there are comparatively few observations, since they can only be obtained when the satellite passes a station in zenith; when the station is located on the satellite's ground track. Therefore, in our individual satellite analysis, there are always several stations which provide observations at low elevations/high nadir angles and only a few stations which provide observations at high elevations/low nadir angles.

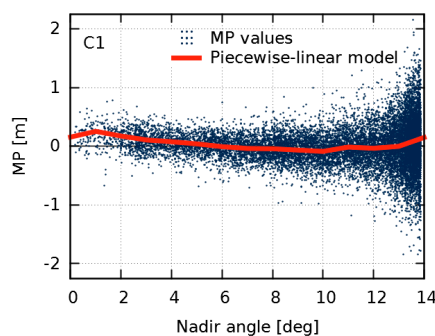


Figure 2. Multipath (MP) combination for GPS space vehicle number 43 for C1 (observation data of 3 May 2015 from 17 globally distributed reference stations, see Figure 3). Blue dots indicate single MP values. The red line shows the estimated piecewise linear model in steps of 1° .

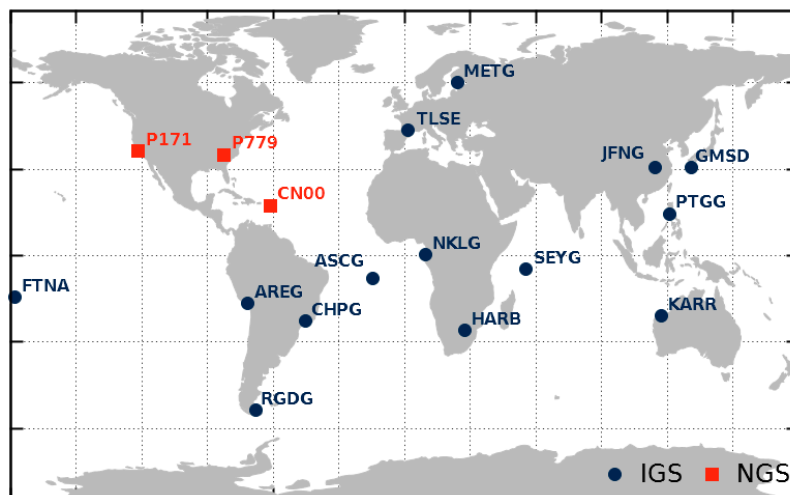


Figure 3. Set of 17 reference stations of the International GNSS Service (IGS, blue dots) and National Geodetic Survey (NGS, red squares). All stations are equipped with a TRM59800.00 antenna and a TRIMBLE NETR9 receiver.

2.2. Data Basis

Since the ground tracks of the GPS constellation do not usually change, we aimed for a numerous set of globally distributed reference stations to get observations in the entire nadir angle range for each satellite, which also reduced site-specific multipath by averaging. We performed a daily analysis of observation data for the 17 stations shown in Figure 3 over a period of 26 month (May 2015–July 2017).

Because transmitter and receiver GDV cannot be separated, we chose stations with identical antenna and receiver types (TRM59800.00 antennas and TRIMBLE NETR9 receivers). Thus, the influence of receiver antenna and receiver type is considered to be identical for each satellite during the entire period of investigation. This makes the individual satellite GDV comparable and changes can be more easily attributed to the transmitters. However, we had to use mixed receiver firmware versions, as well as station antennas with and without domes. Further requirements for the stations were that the elevation mask must be 5° or lower, and that the site-specific multipath level must be less than 0.5 m RMS for C1 and P2 between 10° and 90° elevation.

In order to obtain GDV with centimeter accuracy, we applied absolute International GNSS Service (IGS) antenna corrections for the carrier phase observations at the receiving antenna (Dow et al. [16]) and corrections for phase wind-up effects due to satellite rotations (Wu et al. [17]). Additionally, the frequency-specific carrier phase z-offset corrections of Wanninger et al. [10] were applied for GPS satellites, since the IF values published by the IGS [16] are not suitable for our GDV determination for C1 and P2. The observation data were checked for cycle slips. Sequences spanning less than 10° of elevation angle were eliminated (approximately 10% of the observation data).

On the basis of the corrected MP values, we estimated daily satellite-specific GDV as piecewise linear functions of the nadir angle and mean GDV over the entire timespan for C1, P2, and their IF. Days with missing observations on more than five stations or with no observations below 2° nadir angle were ignored.

3. Results and Discussion

3.1. Temporal Analysis

Daily estimates of nadir-dependent GDV were produced for every GPS satellite. Figure 4 shows daily and mean GDV models over the entire timespan for SVN43, a representative example of all the studied satellites. Due to few observations below 2° and a high noise level of observations above 13° ,

the daily models show a broader scatter in these peripheral nadir angle ranges. Since this scatter does not reflect temporal variations, the GDV model values of 0° , 1° , and 14° were excluded from our calculation of the daily RMS with respect to the mean. The daily RMS are used as a measure for temporal stability (Figure 5).

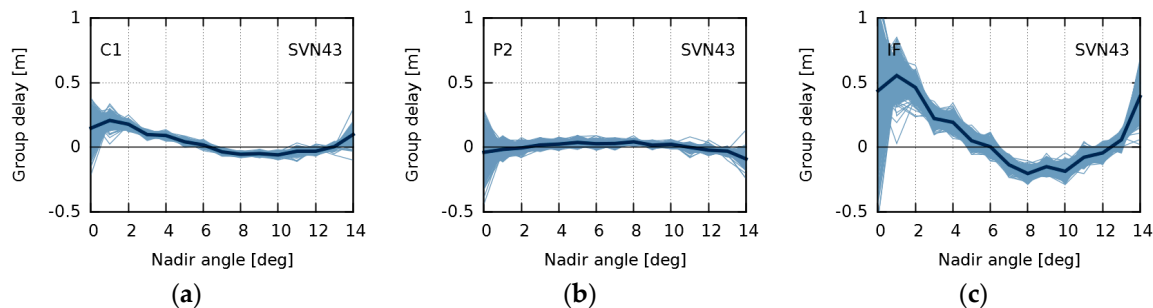


Figure 4. Group delay variations for space vehicle number (SVN) 43 for C1 (a); P2 (b); and the ionosphere-free (IF) linear combination (c). Thin light blue lines indicate daily estimations (May 2015–July 2017). The thick dark blue line indicates the mean over the entire timespan.

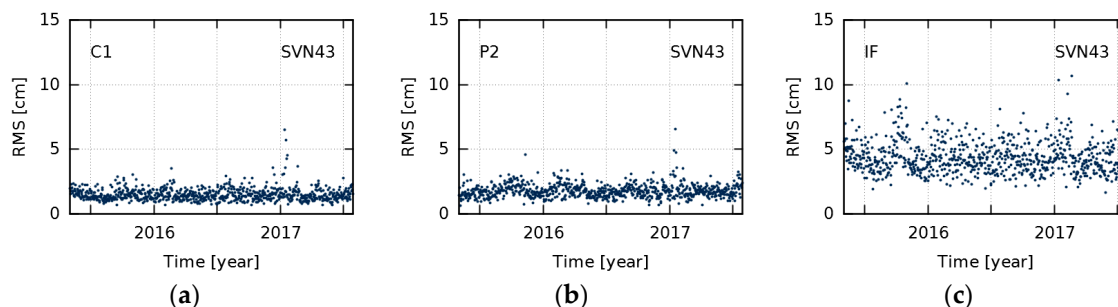


Figure 5. Root mean square (RMS) of differences between daily group delay variations and the overall mean for space vehicle number (SVN) 43 for C1 (a); P2 (b); and the ionosphere-free (IF) linear combination (c).

Figure 6 shows mean GDV for all GPS satellites. The peak-to-peak variations amount to 25 cm, 14 cm, and 70 cm for C1, P2, and IF, respectively. These numbers agree well with References [8,10]. Furthermore, as already shown in References [7,10], GPS GDV are more pronounced for Block IIR satellites than for Block IIF satellites.

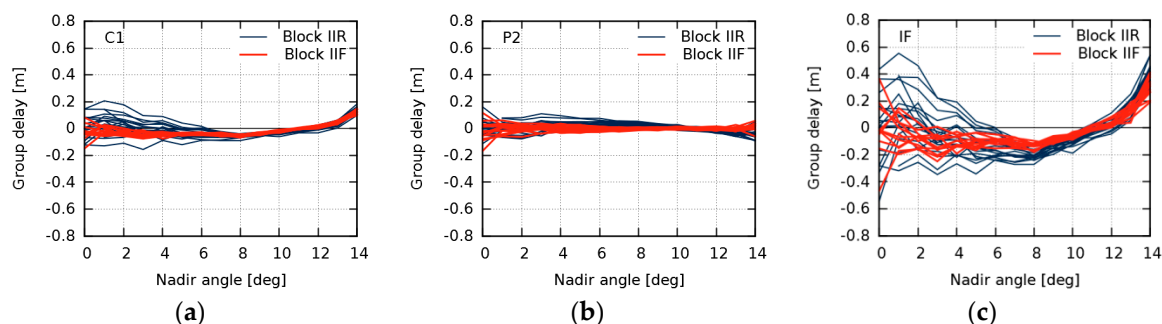


Figure 6. Mean group delay variations of GPS Block IIR (blue lines) and Block IIF satellites (red lines) for C1 (a); P2 (b); and the ionosphere-free (IF) linear combination (c).

Figure 7 illustrates our main results concerning the long-term behavior of GPS GDV. The RMS of differences between daily and mean GDV (as shown in Figure 5) are averaged and represent the level

of temporal stability for each satellite. During the 26 months analyzed, the GPS GDV are stable on the level of approximately 2 cm for C1 and P2, and about 5 cm for the IF. At the same time, this seems to be the GDV accuracy level our approach is able to achieve. The slightly higher RMS values for few satellites, for example SVN67, may be caused by a smaller number of observations at low nadir angles, due to the uneven distribution of the reference stations.

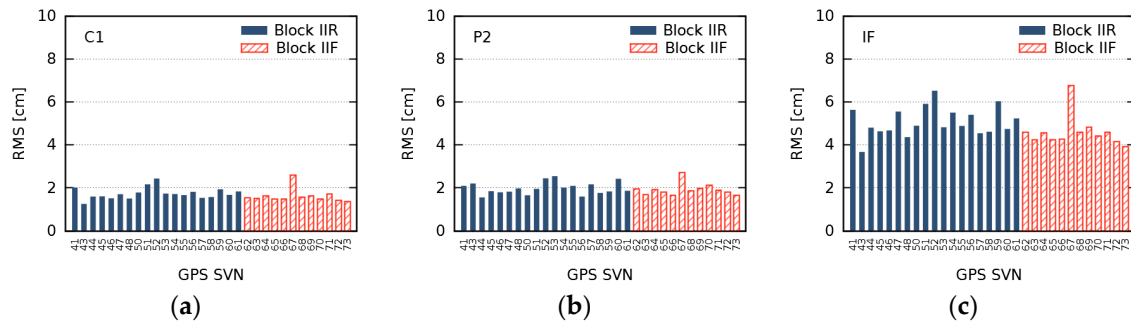


Figure 7. Averaged root mean square (RMS) of differences between daily and mean group delay variations for C1 (a); P2 (b); and the ionosphere-free (IF) linear combination (c) in the nadir angle range 2–13°. Full blue bars indicate GPS Block IIR satellites. Striped red bars indicate GPS Block IIF satellites.

3.2. Comparison to Earlier Studies and SVN55

In this subsection, we compare our mean GDV for the IF to earlier studies. Differences can indicate temporal GDV variations between the different time periods studied (cf. Figure 1). Since the GDV estimation of Wanninger et al. [10] refers to the start date of the current study and is also based on MP values of globally distributed terrestrial reference stations, we expected the smallest differences here. This is confirmed by differences of just around 5 cm RMS (Figure 8a). Differences to GDV of Zehentner [8] and Haines et al. [7] are larger and amount to approximately 10 cm RMS (Figure 8b,c), which can be explained by their completely different approach to determine GDV.

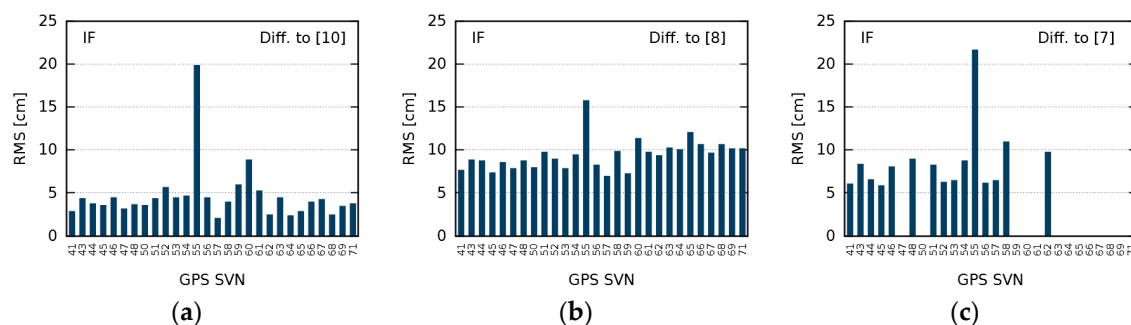


Figure 8. Root mean square (RMS) of differences between the group delay variations of this study and (a) Wanninger et al. [10]; (b) Zehentner [8]; and (c) Haines et al. [7].

There is one satellite whose GDV exhibit larger differences: SVN55. Its GDV deviate by up to 20 cm RMS compared to the other studies, which even partly overlap in time with this study. Since there was no temporal variation or discontinuity detectable in the 26-month time series of this study, we conclude that the reason for the inconsistency of SVN55 must be found elsewhere. The influence of site-specific multipath, different mathematical functions in GDV modeling, the total number of observations, and the distribution of the observations in the nadir angle bins were excluded by tests.

Hauschild et al. [2] and Hauschild and Montenbruck [18,19] describe pseudorange variations and biases depending on receiver-individual multipath mitigation techniques based on correlator spacing.

According to References [18–20], the TRIMBLE NETR9 receiver can be operated with multipath signal rejection. Although one would expect that multiple satellites would be affected by the receiver settings, we checked if the receiver model could be the reason for the GDV differences of SVN55. While we used 17 reference stations equipped with a TRIMBLE NETR9 receiver in the current study, Wanninger et al. [10] used a mixed set of 43 reference stations with only three TRIMBLE NETR9 receivers. The receiver types onboard the LEO satellites used in Zehentner [8] and Haines et al. [7] are also different.

Using selected stations of several additional networks (Geoscience Australia, EUREF Permanent GNSS Network (EPN), IGN Réseau GNSS Permanent, University NAVSTAR Consortium (UNAVCO), African Geodetic Reference Frame (AFREF), and the TrigNet continuously operating GNSS network), we identified four more sets of reference stations with identical antenna and receiver equipment, providing observations for GPS SVN55 in the entire nadir angle range. Their GDV for SVN55 are shown in Figure 9 together with the results of the current and the earlier studies colored according to the receiver types. The results of the earlier studies and those based on observations of TRIMBLE NETR5 receivers show similar curves and their differences do not exceed 10 cm RMS in the IF. However, all results based on observations of TRIMBLE NETR9 receivers show a common different behavior with differences around 20 cm RMS when compared to TRIMBLE NETR5 and earlier results. These IF differences are mainly caused by C1 and do not depend on the receiving antenna type.

The GDV of SVN55 are those with the largest peak-to-peak variations in the earlier studies based on different receiver types. We speculate that on the stations used in the current study, the multipath rejection technique of the TRIMBLE NETR9 receivers affects satellite-induced GDV, which cannot be distinguished from site-specific multipath. However, we have no idea why this seems to affect only SVN55 and none of the other satellites with large GDV.

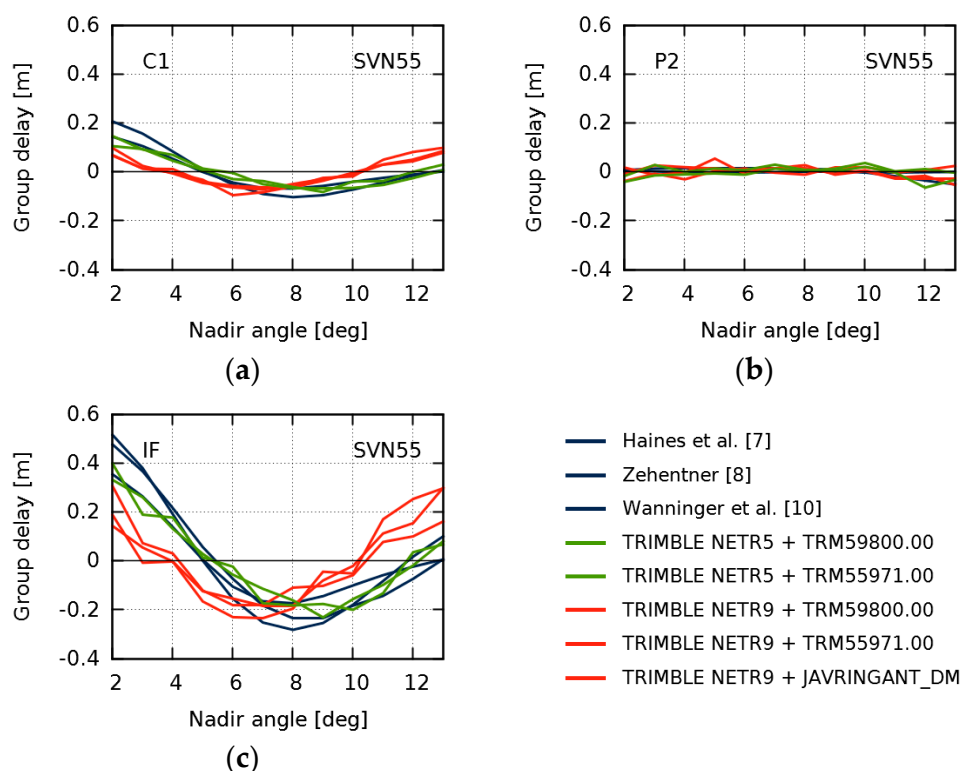


Figure 9. Group delay variations for GPS space vehicle number (SVN) 55 for C1 (a); P2 (b); and the ionosphere-free (IF) linear combination (c). Blue lines indicate results from earlier studies. Red and green lines indicate current results obtained by observations of TRIMBLE NETR9 and TRIMBLE NETR5 receivers, respectively.

4. Conclusions

For a period of more than two years, we estimated daily GDV for 31 GPS Block IIR and Block IIF transmitter antennas based on dual-frequency observations of globally distributed reference stations. The individual satellite GDV are stable on the level of 2 cm RMS for C1 and P2, and 5 cm RMS in their IF. In comparison to some earlier studies, RMS values of the GDV differences are larger by a factor of two, which can be attributed to the very different determination method used here, but this does not indicate any temporal instabilities.

We obtained exceptional results for SVN55 whose GDV differences with respect to the other studies significantly exceed those of the other satellites. The analysis of further data sets revealed a receiver-dependency. All stations used in the current study are equipped with TRIMBLE NETR9 receivers which seem to introduce a receiver-dependent bias.

Author Contributions: S.B. and L.W. conceived and designed the experiments. S.B. gathered the data, performed the data analysis, and drafted the paper. L.W. revised the paper.

Funding: This publication of our research results was funded by the German Research Foundation and the Open Access Publication Funds of the SLUB/TU Dresden.

Acknowledgments: All observation data used in this study were made available free of charge by the International GNSS Service (IGS) [16], National Geodetic Survey (NGS), Geoscience Australia, EUREF Permanent GNSS Network, IGN Réseau GNSS Permanent, UNAVCO, AFREF Operational Data Centre, and TrigNet continuously operating GNSS network. The authors are grateful to these institutions and the station operators for their valuable services.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Lake, J.; Stansell, T. SVN-49 Signal Anomaly. In Proceedings of the 49th Meeting of the Civil GPS Service Interface Committee (CGSIC), Savannah, GA, USA, 21–22 September 2009.
2. Hauschild, A.; Montenbruck, O.; Thoelet, S.; Erker, S.; Meurer, M.; Ashjaee, J. A multi-technique approach for characterizing the SVN49 signal anomaly, part 1: Receiver tracking and IQ constellation. *GPS Solut.* **2012**, *16*, 19–28. [[CrossRef](#)]
3. Thoelet, S.; Meurer, M.; Erker, S.; Montenbruck, O.; Hauschild, A.; Fenton, P. A multi-technique approach for characterizing the SVN49 signal anomaly, Part 2: Chip shape analysis. *GPS Solut.* **2012**, *16*, 29–39. [[CrossRef](#)]
4. Springer, T.; Dilssner, F. SVN49 and other GPS Anomalies. *Inside GNSS* **2009**, *4*, 32–36.
5. Haines, B.J.; Bar-Sever, Y.E.; Bertiger, W.I.; Desai, S.D.; Weiss, J.P. New GRACE-Based Estimates of the GPS Satellite Antenna Phase- and Group-Delay Variations. In Proceedings of the 2010 IGS Workshop, Newcastle Upon Tyne, UK, 28 June–02 July 2010.
6. Haines, B.J.; Bertiger, W.I.; Desai, S.D.; Harvey, N.; Sibois, A.E.; Weiss, J.P. Characterizing the GPS Satellite Antenna Phase- and Group-Delay Variations Using Data from Low-Earth Orbiters: Latest Results. In Proceedings of the 2012 IGS Workshop, Olsztyn, Poland, 23–27 July 2012.
7. Haines, B.J.; Bar-Sever, Y.E.; Bertiger, W.I.; Desai, S.D.; Harvey, N.; Sibois, A.E.; Weiss, J.P. Realizing a terrestrial reference frame using the Global Positioning System. *J. Geophys. Res. Solid Earth* **2015**, *120*, 5911–5939. [[CrossRef](#)]
8. Zehentner, N. Kinematic Orbit Positioning Applying the Raw Observation Approach to Observe Time Variable Gravity. Ph.D. Thesis, Graz University of Technology, Graz, Austria, 2016.
9. Okerson, G.; Ross, J.; Tetewsky, A.; Soltz, A.; Anzperger, J.; Smith, S.R., Jr. Inter-Signal Correction Sensitivity Analysis: Aperture-Dependent Delays Induced by Antenna Anisotropy in Modernized GPS Dual-Frequency Navigation. *Inside GNSS* **2016**, *11*, 44–53.
10. Wanninger, L.; Sumaya, H.; Beer, S. Group delay variations of GPS transmitting and receiving antennas. *J. Geod.* **2017**, *91*, 1099–1116. [[CrossRef](#)]
11. Wanninger, L.; Beer, S. BeiDou satellite-induced code pseudorange variations: Diagnosis and therapy. *GPS Solut.* **2015**, *19*, 639–648. [[CrossRef](#)]
12. Gurtner, W.; Estey, L. *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11*; Astronomical Institute, University of Bern: Bern, Switzerland, 2007.

13. Rocken, C.; Meertens, C. *UNAVCO Receiver Tests*; UNAVCO Memo 8; UNAVCO: Boulder, CO, USA, 1992.
14. Simsky, A. Three's the charm—Triple-Frequency Combinations in Future GNSS. *Inside GNSS* **2006**, *1*, 38–41.
15. Schmid, R.; Rothacher, M. Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations of GPS satellites. *J. Geod.* **2003**, *77*, 440–446. [[CrossRef](#)]
16. Dow, J.M.; Neilan, R.E.; Rizos, C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *J. Geod.* **2009**, *83*, 191–198. [[CrossRef](#)]
17. Wu, J.T.; Wu, S.C.; Hajj, G.A.; Bertiger, W.I.; Lichten, S.M. Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. *Manuscr. Geod.* **1993**, *18*, 91–98.
18. Hauschild, A.; Montenbruck, O. The effect of correlator and front-end design on gnss pseudorange biases for geodetic receivers. In Proceedings of the 28th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute, Tampa, FA, USA, 14–18 September 2015; pp. 2835–2844.
19. Hauschild, A.; Montenbruck, O. A study on the dependency of GNSS pseudorange biases on correlator spacing. *GPS Solut.* **2016**, *20*, 159–171. [[CrossRef](#)]
20. Datasheet NetR9 GNSS Reference Receiver Series. Available online: http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-689228/022506-128J_NetR9_DS_USL_0517_LR.pdf (accessed on 4 April 2018).



© 2018 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Publikation P2



Galileo and GLONASS group delay variations

Susanne Beer¹ · Lambert Wanninger¹ · Anja Heßelbarth¹

Received: 2 September 2019 / Accepted: 27 November 2019 / Published online: 7 December 2019
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2019

Abstract

Similar to the antenna phase center corrections for phase measurements, group delay variations (GDV) of satellite and receiving GNSS antennas affect code pseudorange measurements. They are frequency-dependent and vary with the direction of signal transmission and reception. We present the first GDV estimates for all five Galileo and three GLONASS frequency bands based on terrestrial observations. As compared to GPS, the orbit properties of Galileo and GLONASS simplify this approach, because a single reference station can observe each Galileo and GLONASS satellite in its entire elevation angle range during one orbit repeat period. The homogenous results of three receiver antenna models for identical satellite types and a comparison to GPS Block IIF indicate mainly receiver antenna-specific GDV. They amount to 35 and 28 cm peak-to-peak for Galileo and GLONASS frequency bands E1 and G1, respectively, depending on the receiver antenna type. We show their effect on linear combinations where the code observable is used for precise applications and validate our GDV estimations by improving the height component in single-frequency precise point positioning.

Keywords Galileo · GLONASS · Group delay variations · Code-minus-carrier combination · Multipath combination

Introduction

The code observables of global navigation satellite systems (GNSS) are affected by signal- and frequency-dependent delays. Delays caused by the nonsimultaneous transmission and/or reception of signals result in interfrequency and intersignal biases. They can be corrected by timing group delays and intersignal corrections broadcast in the navigation messages, see, for example, IS-GPS-200 (2018), or by differential code biases estimated by the International GNSS Service (IGS; Montenbruck et al. 2014). Aside from these biases, the code observables show group delay variations (GDV), which vary with the directions of signal transmission at the satellite antenna and signal reception at the receiving antenna.

GDV estimates can be obtained by different methods: Haines et al. (2015) analyzed post-fit residuals from the precise orbit determination (POD) of the two Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellites, Zehentner (2016) estimated GDV for the POD of several low earth orbiting (LEO) satellites based on the raw observation

approach, and Wanninger et al. (2017) analyzed the so-called code-minus-carrier linear combination (CMC) of terrestrial observations to determine satellite and receiver antenna corrections.

For GPS, the combined satellite and receiver antenna GDV reach some decimeters in the frequency bands L1 and L2 and 1 m in their ionospheric-free linear combination (IF) depending on satellite block and receiver antenna type (Haines et al. 2015; Zehentner 2016; Wanninger et al. 2017). The published values agree on the level of 10 cm RMS for IF (Beer and Wanninger 2018). They improve precise applications of the code observable, like single-frequency precise point positioning (PPP), ambiguity-fixing with the Hatch–Melbourne–Wübbena linear combination, and the determination of total electron content.

In the case of the Chinese GNSS BeiDou, the BeiDou-2 satellite antennas exhibit GDV much larger than those of GPS (Hauschild et al. 2012a). They are more pronounced for medium earth orbit (MEO) satellites than for inclined geosynchronous orbit (IGSO) satellites and reach up to 1.5 m for frequency band B1. The satellite-induced BeiDou-2 GDV have been studied based on the CMC approach by several groups and can be estimated and corrected (Wanninger and Beer 2015; Yang et al. 2016; Guo et al. 2016; Zou et al. 2017). By analyzing the observations of the first

✉ Susanne Beer
susanne.beer@tu-dresden.de

¹ Geodätisches Institut, Technische Universität Dresden,
01062 Dresden, Germany

experimental BeiDou-3 satellites, Zhou et al. (2018) showed that GDV of this BeiDou satellite generation are much smaller. They are comparable in size to those of GPS Block IIR-M or IIF satellites.

Since individual satellite antenna elements are arranged in circles, their GDV are expected to be mainly nadir-dependent (Okerson et al. 2016). This could be confirmed for GPS by Zehentner (2016) where variations with azimuth occur for only a few satellites and are below 10 cm for single frequencies. Kersten and Schön (2017) determined absolute GDV, which they call code phase variations, for receiver antennas with their robotic device. Significant azimuth dependencies were found for three simple single-frequency antennas but not for the three geodetic-grade antennas they tested.

Whereas GDV of GPS and BeiDou have already been studied (e.g., Wanninger and Beer 2015; Wanninger et al. 2017), GDV of Galileo and GLONASS have not been published until now. Again, we use the CMC approach applied to terrestrial observations to estimate them, because current LEO missions do not provide Galileo and GLONASS observations. No POD is required, but only observation data in the entire elevation range from horizon to zenith for every satellite. For a single satellite, terrestrial stations provide observations in the entire elevation range only if they are located on the satellite's ground track. While GPS ground tracks repeat every (sidereal) day and do not change, the ones of Galileo and GLONASS satellites repeat only after several days and are different in between, see Fig. 1. Thus, their ground tracks produce much denser coverages of the earth's surface than those of GPS. Therefore, a single terrestrial station can observe only a subset of the GPS satellites in their entire elevation range and a set of globally distributed stations is necessary to collect the required observations. In the case of Galileo and GLONASS, however, every single terrestrial station observes all Galileo and GLONASS satellites in their entire elevation range. Because of the advantageous orbit properties, we expect that Galileo and GLONASS GDV can be estimated with the CMC approach at least on the same level of accuracy as in the case of GPS, i.e., 10 cm RMS for IF.

The following section describes the method of estimating GDV with CMC data processing. After presenting the selected data sets, we show the results for Galileo and

GLONASS GDV and discuss them in comparison to GPS. Furthermore, the impact of the obtained GDV on linear combinations and the validation of our results are shown. Finally, we summarize the major findings.

Note that the term nadir angle is used synonymously with boresight angle. The satellites are identified by their space vehicle numbers.

Method

GDV are estimated as a function of the nadir angle η at the satellite antenna or the elevation angle e at the receiver antenna. These angles are related by

$$\sin \eta = \frac{R}{A} \cdot \cos e \quad (1)$$

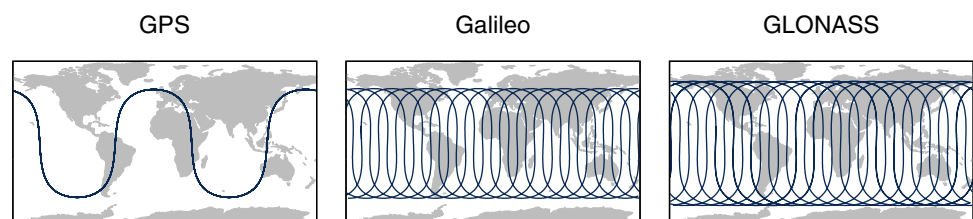
where R is the earth's radius and A the geocentric distance of the satellite (Rothacher 2001). For the circular orbits of Galileo and GLONASS, the term R/A is a constellation-specific constant. Maximum nadir angles for observations on the earth's surface are 12.4° and 14.5° for Galileo and GLONASS, respectively.

The combined GDV of satellite and receiver antenna is contained in the code-minus-carrier observable (CMC) which is also known as the multipath combination (MP):

$$\text{CMC}_i = C_i - \phi_i + 2\lambda_i^2 \frac{\Phi_j - \Phi_i}{\lambda_j^2 - \lambda_i^2} - B_i \quad (2)$$

with code pseudorange C , carrier phase Φ , and wavelength λ at frequencies i and j in units of meters (Rocken and Meertens 1992; Hauschild 2017). The contributions of transmitting and receiving antenna cannot be separated since no absolute values are known for either of them. CMC is geometry-, ionospheric-, and tropospheric-free. CMC contains phase ambiguities and biases between the observables caused by hardware and software-induced delays. These biases are lumped together in B_i which is considered constant in continuous ambiguity sequences. Since we process many CMC sequences, we take the various offsets B_i into account and apply an overall zero-mean condition. Therefore, no absolute group delay values can be obtained but only group delay variations.

Fig. 1 Ground tracks of single GPS, Galileo, and GLONASS satellites. The tracks repeat after 1, 10, and 8 days, respectively, producing differently dense coverages of the earth's surface



To estimate GDV on centimeter-level, we correct all carrier phase observations for the phase wind-up effect due to satellite rotations (Wu et al. 1993) and apply antenna phase center corrections published by the IGS (Dow et al. 2009). For the receiving antennas, frequency-specific values exist for GPS L1, L2 and GLONASS G1, G2 which we also use for the adjacent Galileo frequencies and GLONASS G3. Concerning the satellite antennas, frequency-specific phase center corrections are available for all five Galileo frequencies. But only ionospheric-free antenna phase center corrections exist for the GLONASS satellites. Even though these values are not intended for individual GLONASS frequencies, we still decided to apply them. We used the geometric distances given by the International Laser Ranging Service (ILRS 2014) between the satellite's center of mass and the GLONASS navigation antenna as a rough clue for the position of the real antenna phase center for single-frequency observations. The geometric distances mostly do not differ from the ionospheric-free values by more than 0.5 m, and thus, their impact on our estimated GDV is small enough (Wanninger et al. 2017).

Figure 2 shows that CMC is dominated by high-frequency code multipath and noise, which is most pronounced for low elevations corresponding to high nadir angles. After applying all corrections, we estimate polynomials of degree four to extract the low-frequency GDV. An elevation-dependent weighting scheme is applied, and the resulting curves are fixed to zero either at zero degrees nadir angle or at a 90° elevation angle. By applying phase center corrections to the phase observables, all estimated GDV refer to the satellite's center of mass and the receiver antenna's reference point. We do not extract code phase center offsets from the nadir or elevation-dependent GDV.

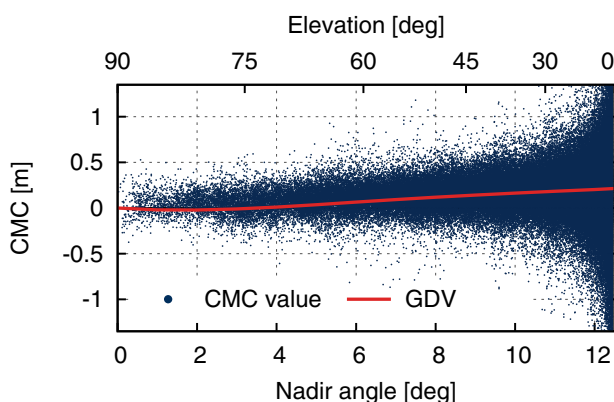


Fig. 2 High-frequency CMC values of twelve terrestrial reference stations and 10 days of observation data for Galileo satellite E211. The low-frequency GDV are estimated by a polynomial of degree four

Data

Figure 3 shows the three sets of terrestrial reference stations we chose for our analysis. As outlined above, no globally distributed stations are necessary. Since receiver multipath mitigation techniques can affect pseudorange variations and biases (Hauschild et al. 2012b; Hauschild and Montenbruck 2015, 2016), we selected terrestrial reference stations which use one specific receiver model (SEPT POLARX5). Three subsets with different geodetic-grade antenna models (JAVRINGANT_DM, LEIAR25.R3, and TRM59800.00) allow receiver antenna-specific investigations. Even if a single terrestrial reference station can observe each Galileo and GLONASS satellite in the entire elevation angle range, we aimed for at least ten stations in each subset to reduce site-specific multipath. Therefore, we had to allow mixed receiver firmware versions and station antennas with and without domes. However, in the case of the JAVRINGANT_DM antenna, we could only manage to find four reference stations fulfilling the following requirements: data availability of at least 99%, elevation mask set to 5 degrees or below, and site-specific multipath below 0.5 m RMS for Galileo E1 between 10° and 90°.

Induced by the physical construction of an antenna, the GDV are considered time-invariant, which was confirmed for GPS during a period of more than 2 years by Beer and Wanninger (2018). Therefore, we used observation data of just one orbit repetition period of 10 days (Galileo) and 8 days (GLONASS) from the beginning of 2019. Although each station provides observations in the entire elevation range, the typical distribution shows the most observations in high nadir angles and few observations in nadir direction.

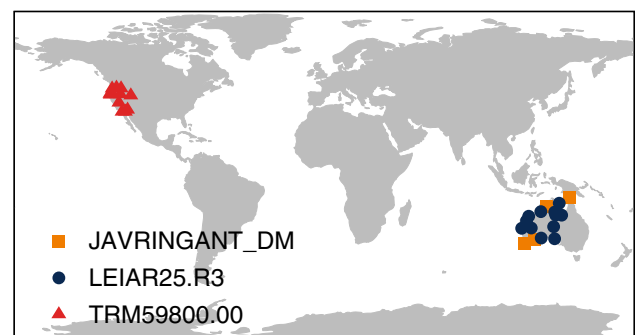


Fig. 3 Three sets of terrestrial reference stations from the networks of UNAVCO and Geoscience Australia, all of them equipped with a SEPT POLARX5 receiver. Yellow squares, blue dots, and red triangles indicate 4, 12, and again 12 stations with JAVRINGANT_DM, LEIAR25.R3, and TRM59800.00 antennas, respectively

GDV for Galileo and GLONASS

In a first step, we estimated nadir angle-dependent GDV for each satellite in order to detect satellite-individual characteristics. The results for Galileo comprise 17 full operational capability satellites (FOCs) and three in-orbit validation satellites (IOVs). The two Galileo satellites in eccentric orbits are not included. For GLONASS, we obtained results for 19 GLONASS-M and one GLONASS-K1 satellites. Four GLONASS satellites are not included because of an insufficient number of dual-frequency observations.

Figure 4 exemplarily shows the results obtained from the stations equipped with TRM59800.00 antennas. For all three antenna types, Galileo FOCs show homogenous curves with standard deviations smaller 5 cm, while the GDV of IOVs show larger variations. This can be explained by the smaller

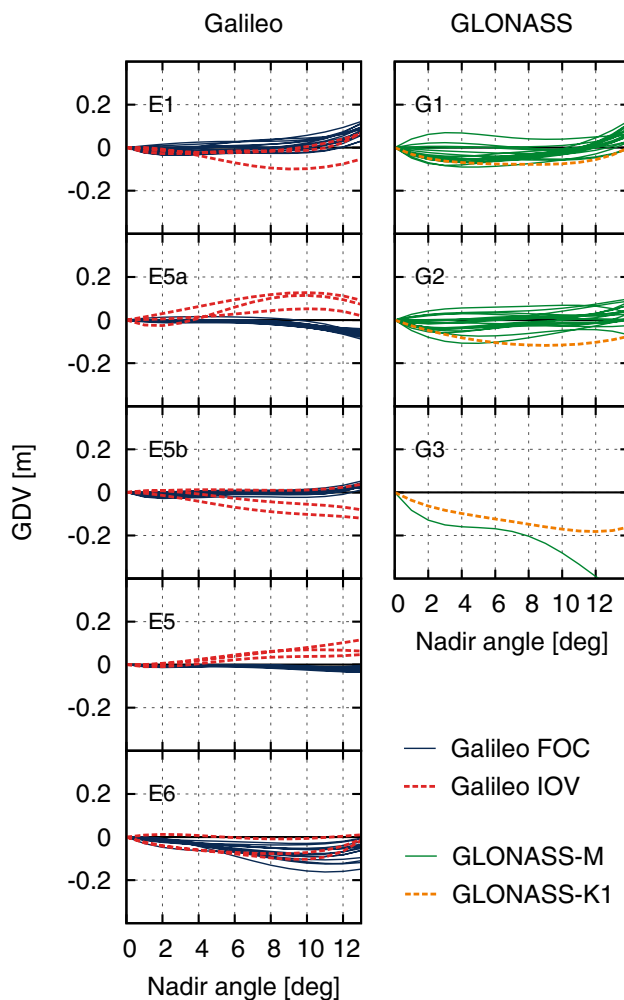


Fig. 4 GDV for each Galileo and GLONASS satellite using the example of stations equipped with a TRM59800.00 antenna. Different colors indicate different satellite types, i.e., Galileo FOC and IOV satellites, and GLONASS-M and GLONASS-K1 satellites

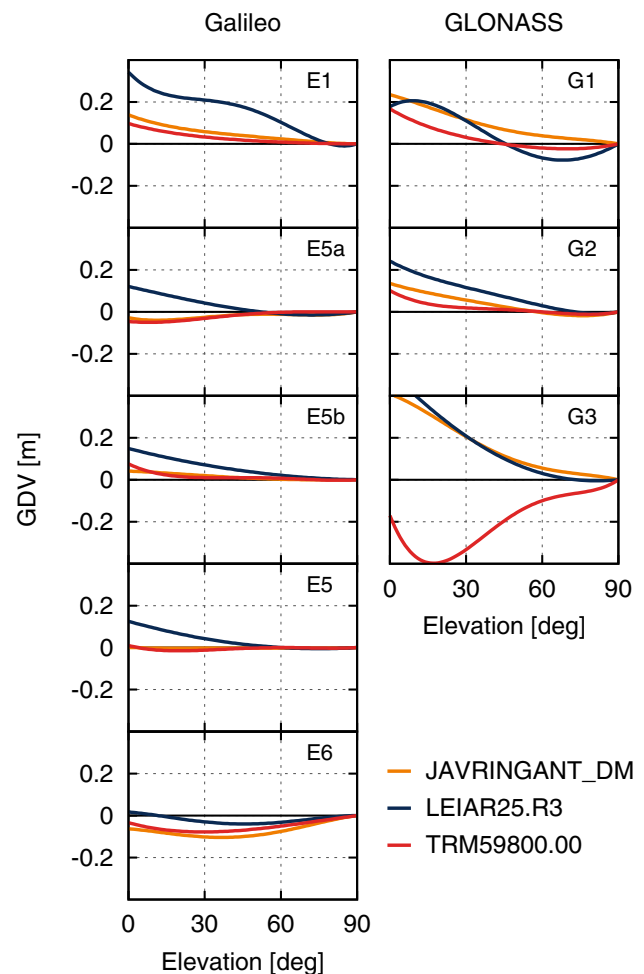


Fig. 5 Receiver antenna-specific GDV for the entire Galileo FOC and GLONASS-M constellations for three receiver antenna types as a function of elevation angle

transmit power of the IOVs leading to a smaller carrier-to-noise ratio (Tian et al. 2019) and affecting the accuracy of GDV estimation. All three receiver antenna types show homogenous GDV for GLONASS-M satellites with standard deviations below 8 cm. The one GLONASS-K1 satellite R802 matches the GLONASS-M satellites in the case of frequency band G1, but differs from the GLONASS-M satellites in the case of G2. Observations in frequency band G3 were available from the GLONASS-K1 satellite R802 and the GLONASS-M satellite R855. The G3 GDV differ from each other and are up to 10 cm peak-to-peak larger than those of G1 and G2.

As described by Arenas et al. (2011), the Galileo IOV satellites exhibited GDV of just 4–12 cm in the individual frequency bands over their entire antenna coverage during tests. It was intended to improve even the GDV performance of the FOC satellites. Since all three antennas show very homogenous results for the FOCs, any differences between

receiver antenna types are attributed to them. Figure 5 shows a comparison of the three receiver antenna models with re-estimated elevation-dependent GDV models for the entire Galileo FOC and GLONASS-M constellation. Concerning Galileo, JAVRINGANT_DM and TRM59800.00 antennas show consistent results. Here, the GDV are most pronounced for frequency bands E1 and E6, but stay below 15 cm peak-to-peak. The LEIAR25.R3 antenna shows larger GDV confirming earlier findings (Wanninger et al. 2017). They sometimes differ in their slope from the other two antennas, especially for frequency band E5a, and reach up to 35 cm peak-to-peak for frequency band E1. In the case of GLONASS and frequency band G1, the GDV amount to 23, 28, and 19 cm peak-to-peak for the JAVRINGANT_DM, LEIAR25.R3, and TRM59800.00 antennas, respectively. Corresponding values for G2 are slightly smaller. Only one GLONASS-M satellite contributes to the results for frequency band G3. Again, the LEIAR25.R3 antenna type shows the largest variations, i.e., 50 cm peak-to-peak, and the GDV of the other two antenna types are slightly smaller, i.e., 40 cm peak-to-peak. However, in contrast to the other results, the curves of the JAVRINGANT_DM and TRM59800.00 antenna types are not similar here.

Galileo has two frequencies in common with GPS: E1 (L1) and E5a (L5). Satellite-individual GDV for GPS L1 were determined by Wanninger et al. (2017) together with several receiver antenna type GDV, among them two of the antenna types investigated here. In Fig. 6, we treat all GDV obtained from GPS Block IIF satellites as purely

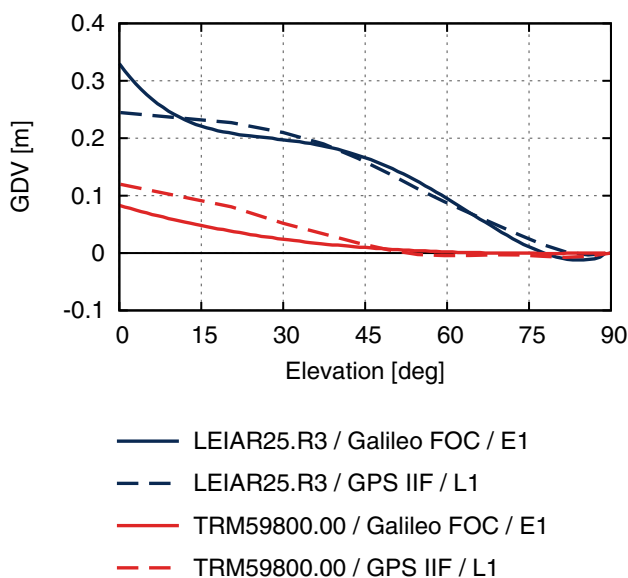


Fig. 6 Comparison of GDV obtained from observations of GPS Block IIF (Wanninger et al. 2017) and Galileo FOC satellites for the frequency band L1/E1 (from upper left panel of Fig. 5) and two different receiver antenna types

receiver antenna-specific by summing up the satellite and the receiver antenna GDV contributions as given in Wanninger et al. (2017) and compare them to the ones obtained from Galileo FOC observations. The good agreement on the level of some centimeters for both antenna types proves that GPS L1 and Galileo E1 GDV are very similar.

Impact of GDV on linear combinations

The impact of GDV can increase in linear combinations. The following linear combinations are described, for example, by Hauschild (2017). The ionospheric-free linear combination (IF) of two code observables C is formed by

$$\text{IF} = \frac{f_i^2}{f_i^2 - f_j^2} C_i - \frac{f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} C_j \quad (3)$$

with f denoting frequencies i and j . Figure 7 shows IF GDV obtained by the combination of Galileo frequencies E1, E5, and GLONASS G1, G2. In the case of Galileo, IF GDV are most pronounced for the LEIAR25.R3 antenna with 0.6 m peak-to-peak while barely half of that for the other two antennas. In the case of GLONASS, the peak-to-peak variations are around 0.4 m for all three antennas. However, the curve shape of the LEIAR25.R3 antenna differs significantly from the other two.

In precise point positioning (PPP), the Hatch–Melbourne–Wübbena linear combination (HMW; Hatch 1982; Melbourne 1985; Wübbena 1985) is used to fix widelane ambiguities. The HMW is the difference of widelane carrier phase observations Φ_{WL} and narrowlane pseudorange observations C_{NL} :

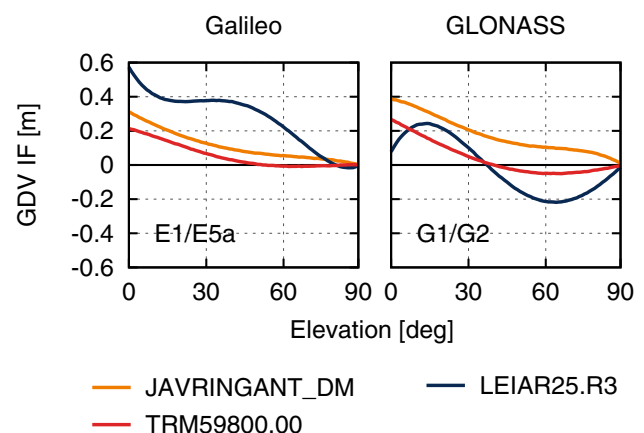


Fig. 7 Impact of GDV on the ionospheric-free linear combination (IF) of Galileo frequencies E1, E5a and GLONASS frequencies G1, G2 for three receiver antenna models

$$\text{HMW} = \Phi_{\text{WL}} - C_{\text{NL}} \quad (4)$$

with

$$\Phi_{\text{WL}} = \frac{f_i}{f_i - f_j} \Phi_i - \frac{f_j}{f_i - f_j} \Phi_j \quad (5)$$

$$C_{\text{NL}} = \frac{f_i}{f_i + f_j} C_i + \frac{f_j}{f_i + f_j} C_j \quad (6)$$

where C_i and C_j are the code observables and Φ_i and Φ_j are the phase observables at frequencies f_i and f_j . C_{NL} (6) can be used to demonstrate the effect of GDV on HMW, see Fig. 8. For Galileo E1/E5a, GDV result in less than 0.1 WL cycles peak-to-peak for the JAVRINGANT_DM and the TRM59800.00 antennas, but amount to more than 0.3 WL cycles for LEIAR25.R3. In the case of GLONASS G1/G2, GDV cause variations of around 0.2 WL cycles for the JAVRINGANT_DM and TRM59800.00 antennas and slightly more for the LEIAR25.R3.

For single-frequency PPP, the GRAPHIC (group and phase ionospheric-free calibration) linear combination is used to eliminate first-order ionospheric effects. It averages code observable C_i and phase observable Φ_i on the same frequency i and thereby reduces the impact of GDV by half:

$$\text{GRAPHIC}_i = \frac{C_i + \Phi_i}{2}. \quad (7)$$

In Fig. 9, we compare PPP results obtained from the uncorrected and GDV-corrected GRAPHIC linear combination for Galileo frequency E1 and GLONASS frequency G1. A multi-GNSS dual-frequency phase solution serves as a reference. One day of observations from IGS, UNAVCO and Geoscience Australia stations equipped with one of the

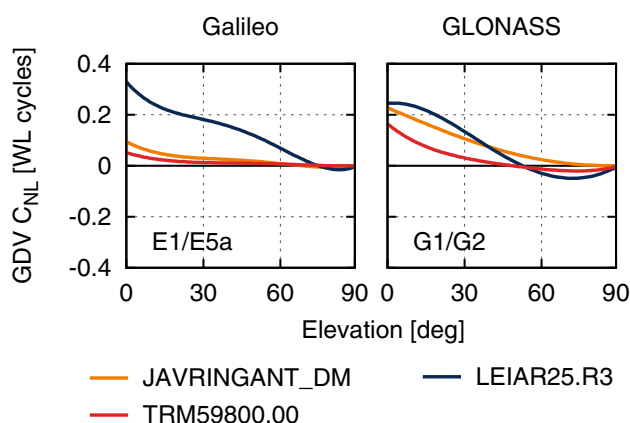


Fig. 8 Impact of GDV on code narrowlane (C_{NL}) in widelane (WL) cycles, and thus, on the Hatch–Melbourne–Wübbena linear combination, for Galileo and GLONASS and three receiver antenna types

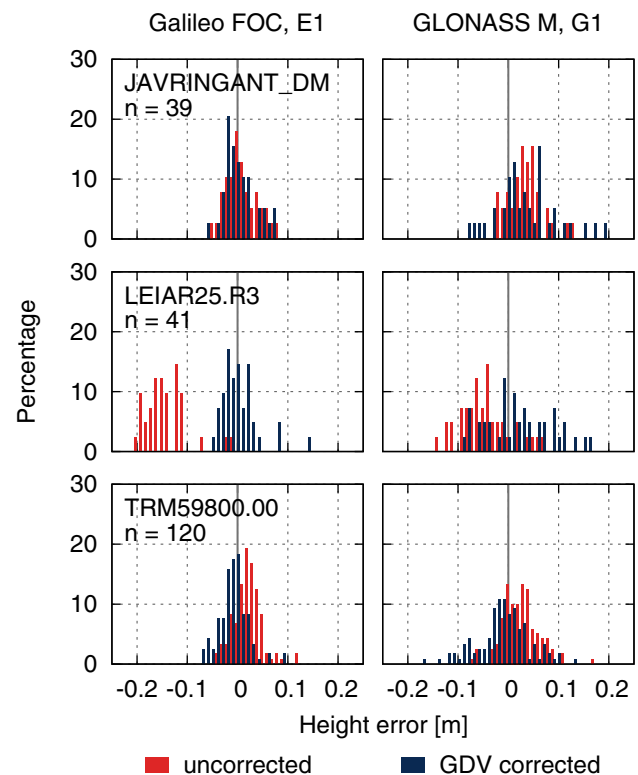


Fig. 9 Distributions of height errors obtained from single-frequency PPP with the GRAPHIC linear combination. For the corrected solution, GDV from Fig. 5 were applied to Galileo FOC (E1) and GLONASS-M (G1) observations. For the three antenna types (JAVRINGANT_DM, LEIAR25.R3, and TRM59800.00), one day of observations (DOY 005, 2019) of 39, 41, and 120 reference stations were processed

three receiver antenna types of this study were processed. Since elevation-dependent corrections mainly affect the height component, horizontal coordinate errors are not shown here. In the case of the LEIAR25.R3 antenna, the strong elevation-dependent GDV cause systematic height errors of around 12 and 5 cm for Galileo E1 and GLONASS G1, respectively. They are significantly reduced by correcting GDV. In the case of the other two antennas, the GDV cause only small systematic height errors, but still, the corrections improve the height results.

Summary and conclusion

We determined the first group delay variation (GDV) estimates for Galileo and GLONASS based on terrestrial observations and the code-minus-carrier (CMC) linear combination. Because of orbit repeat periods of several days, a single terrestrial reference station can provide Galileo and GLONASS observations from the horizon up to zenith, and no globally distributed network is necessary

for the determination of GDV as it is in the case of GPS. However, in order to reduce site-specific multipath, we estimated GDV for three sets of four to twelve reference stations equipped with JAVRINGANT_DM, LEIAR25.R3, and TRM59800.00 antennas.

Individual satellites of the same type show similar GDV. They agree on the level of 5 and 8 cm standard deviation for Galileo FOC and GLONASS-M satellites, respectively. Furthermore, we show that Galileo FOC and GPS Block IIF satellites exhibit very similar GDV.

Receiver antenna-specific GDV are most pronounced for the LEIAR25.R3 antenna type. The GDV of the LEIAR25.R3 antennas amount to 35 cm peak-to-peak for Galileo frequency band E1. Corresponding values for the other two antenna types are around 10 cm. The smallest Galileo GDV of only a few centimeters were determined for frequency band E5 and JAVRINGANT_DM and TRM59800.00 antennas. GLONASS GDV for frequency band G1 amount to 28 cm peak-to-peak for the LEIAR25.R3 antennas and to approximately 20 cm for the other two antenna types. Corresponding G2 GDV are slightly smaller.

The effect of GDV can increase in linear combinations. Ionospheric-free GDV reach up to 0.6 m peak-to-peak, and the contribution of GDV to the Hatch–Melbourne–Wübbena linear combination amounts to 0.3 widelane cycles, each in the case of the most affected LEIAR25.R3 antenna.

Since no Galileo and GLONASS GDV have been published yet, we validate our estimates by applying GDV corrections to single-frequency precise point positioning. Systematic height errors are reduced significantly by up to 12 cm depending on receiver antenna type and frequency band.

GDV estimations for GPS based on the CMC approach using terrestrial observations agreed with the results of other estimation techniques on the level of 10 cm for the ionospheric-free linear combination. Due to the advantageous orbit properties of Galileo and GLONASS, we expect that our GDV estimates reach at least this level of accuracy.

Acknowledgements This research has been supported by the German Research Foundation (DFG) under grant WA 868/8-1. All observation data used in this study were made available free of charge by UNAVCO, Geoscience Australia, and the International GNSS Service (IGS). The authors are grateful to these institutions and the station operators for their valuable services.

References

Arenas S, Monjas F, Montesano A, Montesano C, Manganot C, Salghetti L (2011) Performances of GALILEO system navigation antenna for global positioning. In: Proceedings of 5th European conference on antennas propagation, EUCAP. pp 1018–1022

- Beer S, Wanninger L (2018) Temporal stability of GPS transmitter group delay variations. *Sensors* 18:1744. <https://doi.org/10.3390/s18061744>
- Dow JM, Neilan RE, Rizos C (2009) The international GNSS service in a changing landscape of global navigation satellite systems. *J Geod* 83(3–4):191–198. <https://doi.org/10.1007/s00190-008-0300-3>
- Guo F, Li X, Liu W (2016) Mitigating BeiDou satellite-induced code bias: taking into account the stochastic model of corrections. *Sensors* 16:909. <https://doi.org/10.3390/s16060909>
- Haines BJ, Bar-Sever YE, Bertiger WI, Desai SD, Harvey N, Sibois AE, Weiss JP (2015) Realizing a terrestrial reference frame using the global positioning system. *J Geophys Res Solid Earth* 120(8):5911–5939. <https://doi.org/10.1002/2015JB012225>
- Hatch R (1982) The synergism of GPS code and carrier measurements. In: Proceedings of 3rd international geodetic symposium on satellite doppler positioning. Las Cruces, pp 1213–1231
- Hauschild A (2017) Combinations of observations. In: Teunissen PJG, Montenbruck O (eds) Springer handbook of global navigation satellite systems. Springer, New York, pp 583–604
- Hauschild A, Montenbruck O (2015) The effect of correlator and front-end design on GNSS Pseudorange biases for geodetic receivers. In: Proceedings of ION GNSS+2015, Institute of Navigation, Tampa, pp 2835–2844
- Hauschild A, Montenbruck O (2016) A study on the dependency of GNSS pseudorange biases on correlator spacing. *GPS Solut* 20(2):159–171. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0426-0>
- Hauschild A, Montenbruck O, Sleewaegen J-M, Huisman L, Teunissen PJG (2012a) Characterization of compass M-1 signals. *GPS Solut* 16(1):117–126. <https://doi.org/10.1007/s10291-011-0210-3>
- Hauschild A, Montenbruck O, Thoeleert S, Erker S, Meurer M, Ashjaee J (2012b) A multi-technique approach for characterizing the SVN49 signal anomaly, part 1: receiver tracking and IQ constellation. *GPS Solut* 16(1):19–28. <https://doi.org/10.1007/s10291-011-0203-2>
- ILRS (2014) SLR Center-of-Mass (CoM) measurement correction information. https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/missions/spacecraft_parameters/center_of_mass.html. Accessed 15 Aug 2019
- IS-GPS-200 (2018) Global positioning systems directorate, systems engineering and integration, interface specification IS-GPS-200, Revision Journal
- Kersten T, Schön S (2017) GPS code phase variations (CPV) for GNSS receiver antennas and their effect on geodetic parameters and ambiguity resolution. *J Geod* 91:579–596. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0984-8>
- Melbourne WG (1985) The case for ranging in GPS based geodetic systems. In: Proceedings of 1st international symposium on precise positioning with the global positioning system. Rockville, pp 373–386
- Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P (2014) Differential code bias estimation using multi-GNSS observations and global ionosphere maps. *Navigation* 61:191–201. <https://doi.org/10.1002/navi.64>
- Okerson G, Ross J, Tetewsky A, Soltz A, Anzperger J, Smith SR Jr (2016) Inter-signal correction sensitivity analysis: aperture-dependent delays induced by antenna anisotropy in modernized GPS dual-frequency navigation. *Inside GNSS* 11(3):44–53
- Rocken C, Meertens C (1992) UNAVCO receiver tests. UNAVCO Memo 8
- Rothacher M (2001) Comparison of absolute and relative antenna phase center variations. *GPS Solut* 4(4):55–60. <https://doi.org/10.1007/PL00012867>
- Tian Y, Sui L, Xiao G, Zhao D, Tian Y (2019) Analysis of Galileo/BDS/GPS signals and RTK performance. *GPS Solut*. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0831-5>

- Wanninger L, Beer S (2015) BeiDou satellite-induced code pseudorange variations: diagnosis and therapy. *GPS Solut* 19(4):639–648. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0423-3>
- Wanninger L, Sumaya H, Beer S (2017) Group delay variations of GPS transmitting and receiving antennas. *J Geod* 91(9):1099–1116. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1012-3>
- Wu JT, Wu SC, Hajj GA, Bertiger WI, Lichten SM (1993) Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. *Manuscr Geod* 18(2):91–98
- Wübbena G (1985) Software developments for geodetic positioning with GPS using TI 4100 code and carrier measurements. In: *Proceedings of 1st international symposium on precise positioning with the global positioning system*. Rockville, pp 403–412
- Yang W, Tong H, Pan L, Xu D, Guo W, Yang J (2016) Analysis and correction of BDS code multipath bias. In: Sun J, Liu J, Fan S, Wang F (eds) *China satellite navigation conference (CSNC) 2016 proceedings*, vol III. Springer, Singapore, pp 503–513
- Zehentner N (2016) Kinematic orbit positioning applying the raw observation approach to observe time variable gravity. Dissertation, Graz University of Technology
- Zhou R, Hu Z, Zhao Q, Li P, Wang W, He C, Cai C, Pan Z (2018) Elevation-dependent pseudorange variation characteristics analysis for the new-generation BeiDou satellite navigation system. *GPS Solut* 22:60. <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0726-x>
- Zou X, Li Z, Li M, Tang W, Deng C, Chen L, Wang C, Shi C (2017) Modeling BDS pseudorange variations and models assessment. *GPS Solut* 21:1661–1668. <https://doi.org/10.1007/s10291-017-0645-2>

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Susanne Beer is a member of the GNSS research group at the Geodetic Institute of the Technische Universität Dresden (TU Dresden). She received her Dipl.-Ing. degree in geodesy from TU Dresden in 2011. Her research focuses on group delay variations (GDV).

Lambert Wanninger is a professor of geodesy at TU Dresden. He has been involved in research on precise GNSS positioning since 1990. He holds a Dr.-Ing. degree in geodesy from the University of Hannover, Germany, and a habilitation degree in geodesy from TU Dresden.

Anja Heßelbarth is a research associate at TU Dresden. She has been involved in research on precise GNSS positioning since 2005 and holds a Dr.-Ing. degree in geodesy from TU Dresden.

Publikation P3



Estimation of absolute GNSS satellite antenna group delay variations based on those of absolute receiver antenna group delays

Susanne Beer¹ · Lambert Wanninger¹ · Anja Heßelbarth¹

Received: 9 October 2020 / Accepted: 19 April 2021 / Published online: 9 June 2021
© The Author(s) 2021

Abstract

GNSS satellite and receiving antennas exhibit group delay variations (GDV), which affect code pseudorange measurements. Like antenna phase center variations, which affect phase measurements, they are frequency-dependent and vary with the direction of the transmitted and received signal. GNSS code observations contain the combined contributions of satellite and receiver antennas. If absolute GDV are available for the receiver antennas, absolute satellite GDV can be determined. In 2019, an extensive set of absolute receiver antenna GDV was published and, thus, it became feasible to estimate absolute satellite antenna GDV based on terrestrial observations. We used the absolute GDV of four selected receiver antenna types and observation data of globally distributed reference stations that employ these antenna types to determine absolute GDV for the GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, and QZSS satellite antennas. Besides BeiDou-2 satellites whose GDV are known to reach up to 1.5 m peak-to-peak, the GPS satellites show the largest GDV at frequencies L1 and L5 with up to 0.3 and 0.4 m peak-to-peak, respectively. They also show the largest satellite-to-satellite variations within a constellation. The GDV of GLONASS-M satellites reach up to 25 cm at frequency G1; Galileo satellites exhibit the largest GDV at frequency E6 with up to 20 cm; BeiDou-3 satellites show the largest GDV of around 15 cm at frequencies B1-2 and B3. Frequencies L2 of GPS IIIA, E1 of Galileo FOC, and B2a/B2b of BeiDou-3 satellites are the least affected. Their variations are below 10 cm.

Keywords Absolute group delay variations · Code-minus-carrier combination · GPS · GLONASS · Galileo · BeiDou · QZSS

Introduction

Most of the precise positioning applications of global navigation satellite systems (GNSS) are based on phase observations and, among other things, on the knowledge of the exact positions of the antenna phase centers (APC) of the transmitting and receiving antenna for all frequencies used. Therefore, geodetic-grade receiver antennas are calibrated to determine APC corrections, which can be separated into a mean phase center offset (PCO) and direction-dependent phase center variations (PCV; Rothacher et al. 1995; Wübbena et al. 2000; Zeimetz and Kuhlmann 2008). Based on terrestrial GNSS observations and absolute receiver APC corrections, the GNSS satellite APC can also be determined as it is done by the International GNSS Service (IGS 2019;

Johnston et al. 2017; Schmid et al. 2016). As a result, APC corrections of receiver and satellite antennas can be used independently from each other and in any combinations.

Concerning the GNSS code observables, the counterparts to APC corrections are group delay variations (GDV). GDV depend on antenna type and signal frequency. They vary with nadir angle and elevation angle of the transmitted and received signal, respectively. If not corrected, they degrade the quality of precise applications of the code observable. Only a few absolute GDV calibrations of receiver antennas were published in the past (Wübbena et al. 2008; Kersten and Schön 2017; Breva et al. 2019). Whenever satellite antenna GDV were estimated, observations of one or a set of terrestrial or space-borne receiver antennas provided the reference and, thus, the contributions of satellite and receiver antenna GDV could not be separated properly. Only recently, in the preparation of the third reprocessing campaign (Repro3) for IGS's contribution to the latest International Terrestrial Reference Frame (ITRF; Rebischung 2019; IGS 2019; Villiger et al. 2020), the German company

✉ Susanne Beer
susanne.beer@tu-dresden.de

¹ Geodätisches Institut, Technische Universität Dresden,
01062 Dresden, Germany

Geo++ published multi-GNSS and multi-frequency APC corrections for a subset of receiver antenna types which are used in Repro3 (Wübbena et al. 2019). In this context, corresponding GDV were published, too. Based on these absolute receiver antenna GDV we are now able to estimate absolute multi-frequency GNSS satellite antenna GDV for GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, and QZSS. Since no such receiver antenna GDV corrections were available in earlier studies (Wanninger et al. 2017; Beer et al. 2020), the results for satellite antenna GDV differ from earlier estimations, especially at frequencies with large receiver antenna GDV.

We first summarize previous work on GDV. Then we take a close look at the absolute GDV patterns of four selected receiver antenna types that are the basis for this study. Another section describes our method to estimate satellite antenna GDV based on terrestrial observations of reference stations equipped with these four receiver antennas. It includes subsections dedicated to the data sets used, the required corrections, and a validation of the absolute receiver antenna GDV. The results for the different GNSS are presented and discussed.

Previous work on GDV

Previous work on GDV is based on different methods and serves various purposes. In the context of precise orbit determination (POD), receiver and satellite antenna GDV were estimated by analyzing either terrestrial or spaceborne observation residuals. Haines et al. (2015) determined nadir-dependent GDV for the entire GPS constellation of 2002–2004. They reach up to 1 m for the ionospheric-free linear combination (IF) of the frequencies L1 and L2 and show block-specific differences and satellite-to-satellite variations in Blocks IIR-A and IIR-B/M. These nadir-dependent GDV were used as corrections for the realization of a terrestrial reference frame with GPS. Zehentner (2016) determined frequency-specific GDV for the entire GPS constellation and corrected raw observations of low earth orbiting (LEO) satellites to estimate precise orbits for the observation of the earth's time-variable gravity field. His patterns are also azimuth-dependent, but the GDV show mainly nadir-dependent variations that reach up to around 20 cm for L1 and 10 cm for L2.

Kovach and Powell (2010) and Hauschild et al. (2012b) analyzed the exceptionally large GDV of GPS space vehicle number (SVN) 49 that stem from satellite-internal multipath and reach up to a few meters. They used pseudorange residuals and the so-called code-minus-carrier combination (CMC), also known as linear multipath combination, respectively.

The CMC approach was also used by several groups to study the large GDV of the BeiDou-2 satellites (Hauschild et al. 2012a; Wanninger and Beer 2015; Yang et al. 2016; Guo et al. 2016; Zou et al. 2017). For frequency B1-2, they amount to 1.5 m in the case of the medium earth orbit (MEO) satellites and 0.8 m in the case of the inclined geosynchronous orbit (IGSO) satellites. The more recent BeiDou-3 satellites are not affected by large GDV. They are comparable to those of GPS Block IIR-M or IIF (Zhou et al. 2018).

Wanninger et al. (2017) analyzed the CMC of terrestrial observations and obtained frequency-specific relative satellite and receiver antenna GDV for GPS. Their results are consistent with those mentioned above on the level of 10 cm root mean square (RMS) for the IF. It was shown that their correction significantly improves single-frequency precise point positioning (PPP), ambiguity-fixing with the Hatch–Melbourne–Wübbena linear combination, and the determination of ionospheric total electron content.

The CMC approach was also applied to observations of reference stations to estimate Galileo and GLONASS GDV (Beer et al. 2020). Homogenous results for antennas of the same satellite type indicate mainly receiver antenna specific GDV. Maximum values reach up to 35 cm and 30 cm peak-to-peak for Galileo and GLONASS frequencies E1 and G1, respectively.

In principle, absolute receiver antenna GDV can be calibrated with the same methods as used for the calibration of absolute APC, but as far as we know, only two groups estimated absolute receiver antenna GDV based on robot calibrations thus far. Wübbena et al. (2008) published elevation-dependent receiver antenna GDV for six geodetic-grade antennas for GPS frequencies L1 and L2, which reach up to approximately 0.5 m peak-to-peak in the case of L1. The group at Leibniz University Hannover, Germany, estimated absolute GDV mainly for non-geodetic-grade antennas (Kersten and Schön 2017). The three geodetic-grade antennas they tested show variations of 30–40 cm, but no significant azimuth-dependencies. Now, with the published receiver antenna calibrations in Wübbena et al. (2019), we aim to get clearer insights into the frequency-specific satellite antenna GDV of the different GNSS.

Absolute receiver antenna GDV

The German company Geo++, which calibrates receiver antennas with their robot device (Wübbena et al. 1997, 2000), presented multi-GNSS and multi-frequency GDV corrections for 36 receiver antenna types. They comprise ten GPS, GLONASS, Galileo, and BeiDou frequencies. Since no digital data sets were made available, we had to digitize the GDV corrections from Wübbena et al. (2019).

We are using GDV corrections of four receiver antenna types that are widely used in global reference station networks, namely JAVRINGANT_DM|NONE, TRM59500.00|NONE, TRM59800.00|SCIS, and LEIAR25.R4|LEIT, see Fig. 1. Table 1 lists the GNSS frequency bands according to the nominal frequencies. The digitized GDV corrections exhibit a frequency dependency. In general, the smallest variations occur for the highest frequencies. The least affected frequencies with variations of only a few centimeters are L6/E6 of the two TRM59800.00 and the LEIAR25.R4 antennas. For all four antenna types, frequency L5/E5a/B2a is the most affected one with variations of almost 30 cm for TRM59800.00|NONE.

The receiver antenna GDV are absolute, i.e., independent from any reference antenna, and type means of individual antenna calibrations. As stated in Wübbena et al. (2019), the published GDV are corrections and they are related to a nominal PCO. We assume that it is the PCO of GPS frequency L1. Thus, the published values show the remaining GDV after applying the L1 PCO to the code observables of all frequencies. On the one hand, that means that PCO differences between L1 and other frequencies are included in the variations. On the other hand, the L1 PCO has to be applied to the code observations of all frequencies to obtain the overall correction.

Method

Our estimation of absolute multi-frequency and multi-GNSS satellite antenna GDV is based on terrestrial observations of globally distributed reference stations and the code-minus-carrier (CMC) linear combination, which is also known as the linear multipath combination. For detailed descriptions of

Table 1 GNSS frequency bands for which absolute receiver antenna GDV have been published or for which we estimate satellite GDV

Frequency [MHz]	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou	QZSS
1176.450	L5		E5a	B2a	L5
1191.795			E5	B2	
1202.025		G3			
1207.140			E5b	B2b	
1227.600	L2				L2
1246.000		G2			
1268.520				B3	
1278.750			E6		L6
1561.098				B1-2	
1575.420	L1		E1	B1	L1
1602.000		G1			

GLONASS frequencies G1 and G2 refer to slot number $k=0$

estimating GDV with the CMC approach, please refer to Wanning and Beer (2015), Wanning et al. (2017), and Beer et al. (2020).

Since we corrected the observations for the receiver antenna GDV from Wübbena et al. (2019), only the satellite antenna GDV remained in the CMC linear combination. We modeled them as polynomials of degree four, but did not extract GDV offsets, i.e., GDV offsets were fixed to zero.

While GDV of receiver antennas are given as a function of the elevation angle e , satellite antenna GDV were estimated as a function of the nadir angle η , fixed to zero at zero degrees nadir angle. Both angles are related by

$$\sin \eta = \frac{R}{A} \cdot \cos e \quad (1)$$

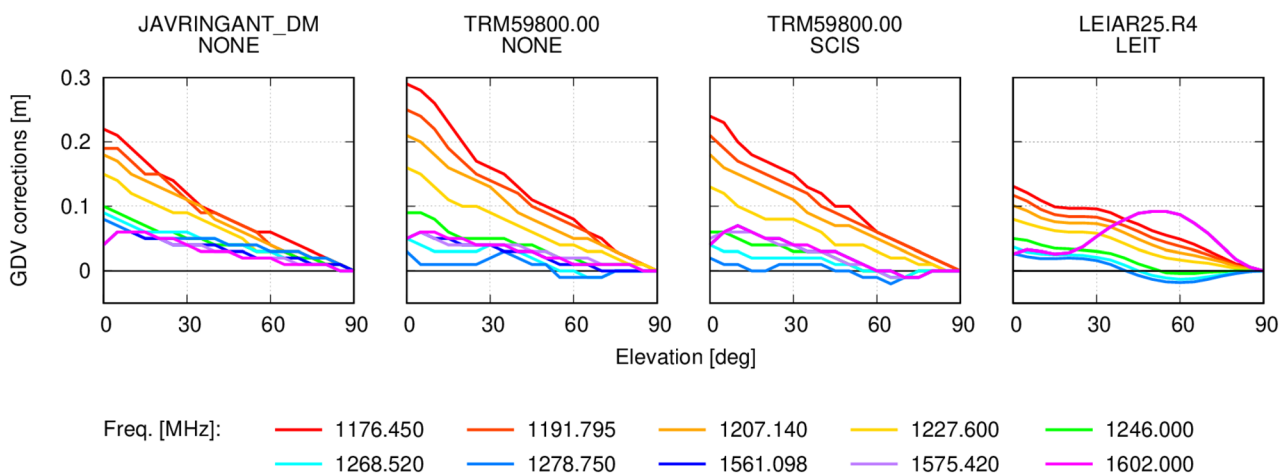


Fig. 1 Absolute GDV corrections of four types of receiver antennas for ten frequencies, digitized from Wübbena et al. (2019) with a resolution of 5° in elevation. The GNSS frequency bands are listed in Table 1 according to their nominal frequencies in MHz

where R is the earth's radius and A the geocentric distance of the satellite (Rothacher et al. 1995). The term R/A is a constellation-specific constant. Maximum nadir angles for observations of MEO satellites on the earth's surface reach 13.2° to 14.5° . The maximum nadir angle for IGSO orbits is 8.7° .

We estimated satellite antenna GDV for all frequencies for which absolute receiver antenna GDV were published by Wübbena et al. (2019) if a sufficient number of observation data was available. For GLONASS G3, for which no GDV corrections were published, we applied the GDV corrections of the very similar frequency E5b/B2b.

Since instrumental delays could not be separated from the involved phase ambiguities, the absolute GDV level remains unknown, and only variations could be retrieved. Note that what we refer to as “absolute” in this paper is the independence of the satellite antenna GDV from the receiver antenna GDV.

Data

As shown in Fig. 2, we selected stations from IGS network, Geoscience Australia, EUREF Permanent GNSS Network, and UNAVCO equipped with one of the four antenna types and which provide observations of as many GNSS and frequencies as possible. However, not all stations provide Galileo E6 or GLONASS G3 observations. BeiDou B1 and B2a observations are available only from stations with the TRM59800.00 antenna, B2b observations of BeiDou-3 MEO satellites are provided only by the stations equipped with a LEIAR25.R4 antenna, and only the Asia-Pacific stations contribute to the GDV estimation of the IGSO satellites.

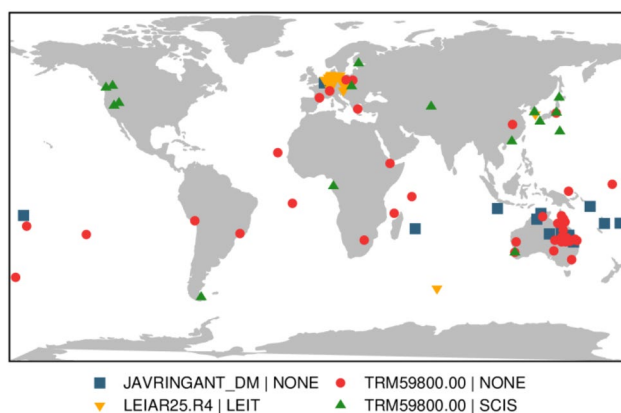


Fig. 2 Thirteen, 41, 17, and 17 reference stations equipped with JAVRINGANT_DM|NONE (blue square), TRM59800.00|NONE (red circle), TRM59800.00|SCIS (green triangle), and LEIAR25.R4|NONE (orange inverted triangle) antennas, respectively, for which absolute receiver antenna GDV are available

For the estimation of nadir-dependent satellite antenna GDV, we needed observations covering the entire elevation range. Because of the daily orbit repeat cycle of GPS, a globally distributed set of reference stations was necessary for this system. For the other MEO constellations, it was important to use data of a whole orbit repeat cycle but there was no need for globally distributed stations (Beer et al. 2020). In the case of the IGSO satellites, reference stations in the Asia-Pacific region were needed. Since temporal stability is assumed of GDV (Beer and Wanninger 2018), we used observations of ten, eight, and seven days for Galileo, GLONASS, and BeiDou MEO satellites, respectively, corresponding to one orbit cycle each. For GPS, QZSS, and BeiDou IGSO satellites, we used three days of observations corresponding to three orbit cycles. All observation data are of February and March 2020.

Observations of a large number of stations should be included to reduce site-specific multipath. Therefore, we accepted mixed tracking modes and mixed receiver models but excluded stations with multipath exceeding 0.5 m RMS between 10° and 90° elevation. Because of the large number of stations and observations, we processed only those arcs spanning an elevation range of at least 60° .

Antenna phase center corrections

We applied the phase center corrections of ANTEX-file `igsR3_2077.atx` (IGS 2019). Also, Geo++'s absolute receiver antenna GDV refer to these corrections. Table 2 gives an overview of its content and our assumptions. By applying phase center corrections to the phase observables, our estimated GDV refer to the satellites' center of mass.

The PCO and PCV of GPS and GLONASS satellites are IF values and, thus, identical values are used on the first and second frequency. We applied them also to the third frequency of GPS and GLONASS satellites because no other values are available. These IF PCO values are not the geometric distances of the phase centers at the individual frequencies. However, as long as they do not differ from their real values by more than 0.5 m, their impact on estimated GDV stays below a few centimeters (Wanninger et al. 2017). Concerning GPS, we used the phase center corrections of the first Block IIIA satellite also for the second Block IIIA satellite. For the G3 phase centers of GLONASS-M+ and GLONASS-K1 satellites, we made changes according to Montenbruck et al. (2015).

For Galileo in-orbit validation (IOV) and full operational capability (FOC) satellites, `igsR3_2077.atx` contains frequency-specific APC corrections (GSA 2020). They are results of ground calibrations and were used for the estimation of new satellite antenna z-offsets for GPS and GLONASS in preparation of IGS's Repro3 (Reischung 2019).

Table 2 Overview of the antenna phase center model igsR3_2077.atx (IGS 2019)

Antenna	PCO	PCV	
GPS IIR	L1 = L2 (IF)	L1 = L2 (IF)	nad
GPS IIF	L1 = L2 (IF) = L5	L1 = L2 (IF) = L5	nad
GPS IIIA	L1, L2, L5	L1 = L2 = L5	nad
	G075 = G074	G075 = G074	nad
GLONASS-M	G1 = G2 (IF)	G1 = G2 (IF)	nad
GLONASS-M+	G1 = G2 (IF)	G1 = G2 (IF)	nad
	$G3_X = IF_X - 0.5 \text{ m}$, $G3_{Y,Z} = IF_{Y,Z}$	G3 = IF	nad
GLONASS-K1-1	R859 = R858	R859 = R858	
	G1 = G2 (IF)		
GLONASS-K1-2	$G3_{X,Y} = IF_{X,Y} - 0.35 \text{ m}$, $G3_Z = IF_Z$		
	G1 = G2 (IF) = G3		
Galileo IOV, FOC	E1, E5, E5a, E5b, E6	E1, E5, E5a, E5b, E6	nad + azi
BeiDou-2I, 2M	B1 = B1-2 = B2b, B3		
BeiDou-3M-CAST	B1 = B1-2, B2a = B2b, B3		
BeiDou-3M-SECM	B1 = B1-2, B2a = B2b = B3		
QZSS	L1, L2, L5		
QZSS-2I	L1, L2, L5	L1, L2, L5	nad + azi
JAVRINGANT_DM NONE,	L1 = E1 = B1	L1 = E1 = B1	zen + azi
TRM59800.00 NONE,	L2	L2	zen + azi
TRM59800.00 SCIS,	L5 = E5a = B2a	L5 = E5a = B2a	zen + azi
LEIAR25.R4 LEIT	G1	G1	zen + azi
	G2	G2	zen + azi
	E5b = B2b = G3	E5b = B2b = G3	zen + azi
	E5 = B2	E5 = B2	zen + azi
	E6	E6	zen + azi
	B1-2	B1-2	zen + azi
	B3	B3	zen + azi

The first column lists the satellite and receiver antenna types. The second and third columns list the frequencies for which phase center offsets (PCO) and phase center variations (PCV) exist. If the values are ionospheric-free (IF), they are identical for the first and second frequency. The PCV of satellite antennas can either be nadir-dependent only (nad) or nadir and azimuth-dependent (nad + azi). The receiver antenna PCV depend on zenith angle and azimuth (zen + azi). The table contains the regular content of igsR3_2077.atx and our assumptions. Assumptions are explained in the text of this subsection. Individual satellites are identified by their space vehicle numbers

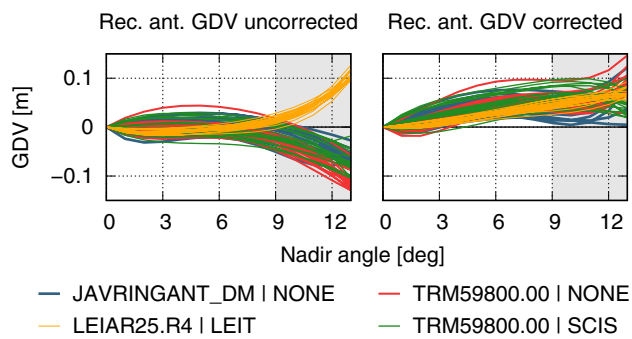


Fig. 3 Receiver antenna type-specific GDV estimations for the Galileo FOC satellite antennas at frequency E5a. Each curve represents the GDV of one satellite; the colors represent the results obtained from the different receiver antennas. The left/right panel is based on uncorrected/corrected receiver antenna GDV, respectively

Table 3 RMS of differences between all possible pairs of four individual satellite GDV estimations based on receiver antenna GDV uncorrected and corrected observations

Satellite antenna	Frequency	RMS [cm] Receiver antenna GDV	
		uncorrected	corrected
Galileo FOC	E1	5.3	4.0
	E5	5.2	2.3
	E5a	7.4	2.5
	E5b	5.5	2.9
	E6	4.2	5.1
GLONASS-M	G1	8.8	11.5
	G2	5.0	5.1
BeiDou-3 M	B1-2	7.3	7.0
	B3	5.0	4.3

The antenna phase center model for Repro3 does not include satellite phase center corrections for BeiDou and QZSS. Therefore, we had to apply the values of the standard IGS correction set igs14.atx (Reischung et al. 2016a, b) and copied values of neighboring frequencies.

Concerning the receiver antenna types, multi-frequency and multi-GNSS phase center calibrations are stored in igsR3_2077.atx. PCO and PCV are frequency-specific, and the PCV are functions of azimuth and zenith angle. We applied the APC values of E5b/B2b also to frequency G3.

Validation of receiver antenna GDV

The correctness of our satellite antenna GDV estimation strongly depends on the correctness of the applied receiver antenna GDV and their digitization. For their validation,

we used the individual sets of observations of the four types of receiver antennas and estimated each satellite GDV without and with receiver antenna GDV applied. Especially, when the GDV of receiver antennas differ, their correction should produce satellite antenna GDV, which agree much better. Figure 3 shows these GDV estimations for the Galileo FOC satellites at frequency E5a, as an example. Corresponding satellite antenna GDV estimations were conducted for all satellite types comprising at least 15 individual satellites if the number of observations in all four receiver antenna groups was sufficiently large.

Table 3 summarizes the RMS of differences between all possible pairs of the four individual estimations. Since the curves are fit to zero at zero degrees nadir angle, the RMS was calculated for the highest 5° nadir angle, marked gray in Fig. 3. The frequencies E1, G1, and B1-2, which are close together, show the least improvements by applying the digitized receiver antenna GDV corrections, in the case of G1 even deterioration. However, at most of the other frequencies, a significant improvement is achieved. According to the validation results, we conclude that the receiver antenna GDV are accurate on the level of a few centimeters for most frequencies.

Absolute satellite antenna GDV

Figure 4 shows the final results of our absolute satellite antenna GDV estimation, where we used the observations of all four receiver antenna types. These GDV are corrections that should be applied with a positive sign to the left-hand side of an observation equation. Table 4 lists the largest peak-to-peak variations.

The results comprise all satellites for which observations were available in the data sets we used. They cover different satellite types within five GNSS. See color-coded curves in Fig. 4. Due to the requirements of the CMC approach, see Sect. “Method”, we could not estimate satellite GDV for the Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS) NavIC (only single-frequency observations are available), as well as for geostationary satellites (almost constant elevation at a single receiving station). Concerning BeiDou-3 IGSO satellites and BeiDou-3S satellites, the number of observations was not sufficient.

Most satellite antennas of the same satellite block or generation are affected by similar GDV. The most pronounced satellite-to-satellite differences are exhibited among GPS IIF and IIR satellites at frequencies L5 and L1, respectively, which also show the largest GDV. Pronounced satellite-to-satellite differences among GPS satellites were also found in earlier studies (Haines et al. 2015; Wanninger et al. 2017). As in previous studies, among the GPS IIR-M satellites, SVN G055 shows the largest variations. They amount to

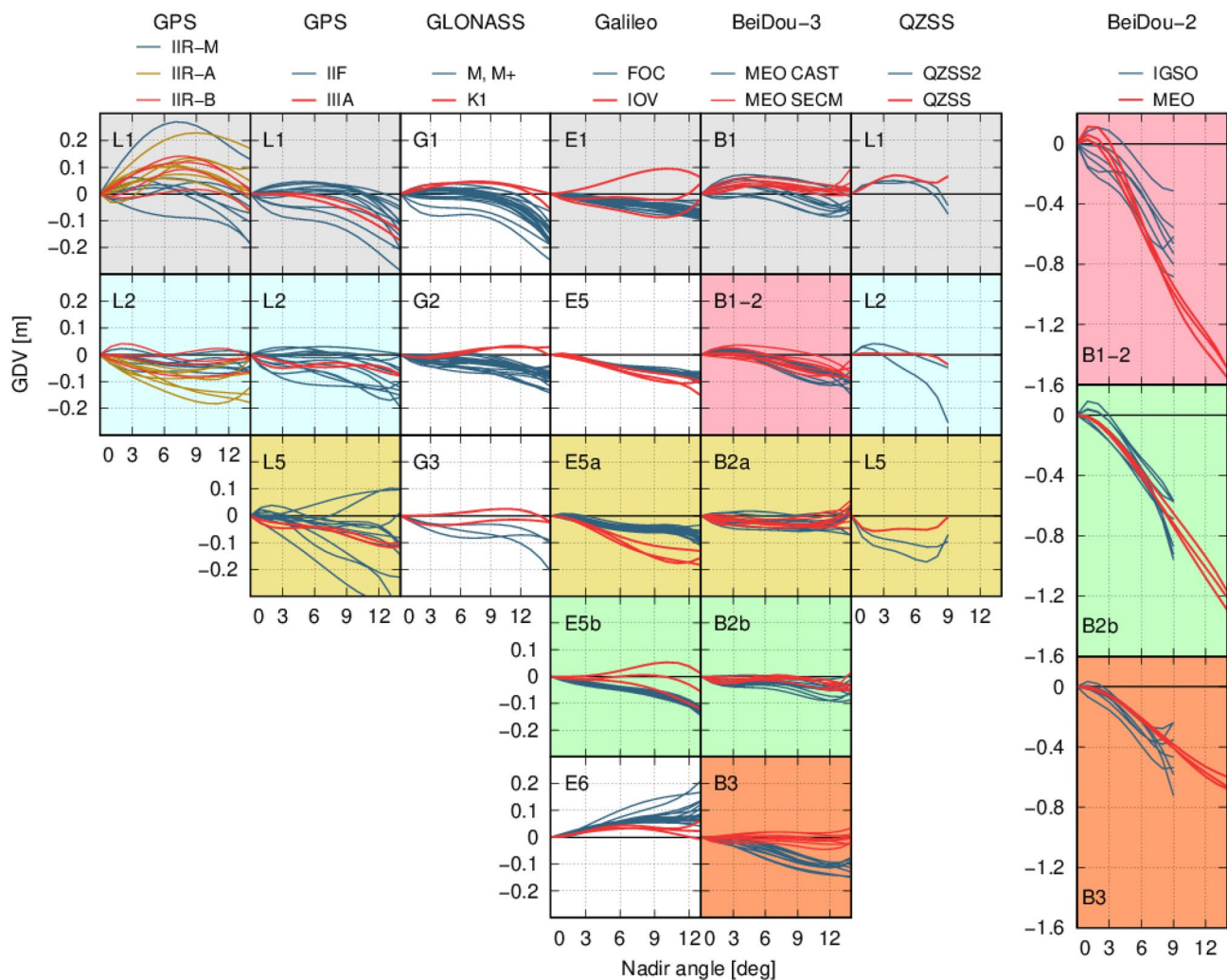


Fig. 4 Absolute GDV corrections for the satellite antennas. Each curve represents the GDV corrections of one satellite. GDV corrections of different satellite types within the same GNSS are drawn in

blue, brown, and red. Colored backgrounds indicate identical frequencies. Due to much larger variations, the BeiDou-2 GDV corrections are printed separately in a different scale

almost 30 cm peak-to-peak at frequency L1. GPS IIR-A satellite SVN G041 shows similar GDV. The curves of the two latest Block IIIA satellites fit to the curves of the Block IIF satellites at all frequencies.

In the case of GLONASS and the frequencies G1 and G2, the GDV of the newer GLONASS-K1 satellites fit together well, but differ from the older GLONASS-M and GLONASS-M+ satellites up to 20 cm. At frequency G3, all GLONASS satellites show inhomogeneous GDV curves, especially for high nadir angles. The reason may be found in fewer observations due to a smaller number of satellites transmitting signals at G3.

Except for frequency E6, all GDV of Galileo FOC satellites fit together well. Differences between individual satellites are below 10 cm. The differences between Galileo IOV and FOC satellites and the satellite-to-satellite variations of the IOV satellites might be caused by their lower transmit

power and lower carrier-to-noise density ratio (Zaminpardaz and Teunissen 2017).

The GDV curves of individual BeiDou-3 MEO CAST and SECM satellites are in good agreement at all frequencies. The GDV at frequencies B1 and B2a have similar orders of magnitude as the Galileo GDV at identical frequencies E1 and E5a. Compared to the exceptionally large satellite antenna GDV of the BeiDou-2 satellites with peak-to-peak differences of up to 1.5 m, the introduced receiver antenna GDV of around 20 cm are small. Thus, the results for the BeiDou-2 satellite antenna GDV are very similar to those of earlier studies where no receiver antenna GDV were introduced.

GDV effects may increase in linear combinations as demonstrated for the IF in Fig. 5. The satellite antenna GDV of Galileo FOC satellites amount to approximately 0.1 m when forming the IF of frequencies E1 and E5a.

Table 4 Maximum variations (peak-to-peak values) of the satellite antenna GDV

GNSS/frequency	Satellite type/maximum variation [cm]		
GPS	IIR	IIF	IIIA
L1	27	29	18
L2	18	20	8
L5		41	12
GLONASS	M	M+	K1
G1	25	19	10
G2	14	10	4
G3		21	5
Galileo	IOV	FOC	
E1	9	9	
E5	16	11	
E5a	18	11	
E5b	12	15	
E6	6	21	
BeiDou-2	IGSO	MEO	
B1-2	88	166	
B2b	96	129	
B3	72	68	
BeiDou-3	MEO CAST	MEO SECM	
B1	11	10	
B1-2	16	11	
B2a	9	8	
B2b	9	6	
B3	15	5	
QZSS	QZSS	QZSS2	
L1	7	12	
L2	4	28	
L5	6	17	

Together with the GDV of the TRM59800.00|NONE receiver antenna, they reach 0.35 m in total. A similar effect is seen for the IF of frequencies L1 and L5 for most GPS IIF satellites.

Summary

Recently, an extensive correction set of absolute receiver antenna group delay variations (GDV) was published (Wübena et al. 2019). By applying these corrections to observations of four types of receiver antennas, we were able to estimate a set of absolute satellite antenna GDV for five GNSS with the code-minus-carrier (CMC) approach. It is the first time that absolute receiver antenna GDV are taken into account in such an estimation process.

The four sets of receiver antenna GDV corrections show a clear frequency dependency. The frequency L5/E5a/B2a at 1176.45 MHz used by GPS, QZSS, Galileo, and BeiDou exhibits the largest variations of up to 30 cm. The frequencies Galileo E6 and GLONASS G1 show the smallest variations of only a few centimeters. No accuracy level was given for the receiver antenna GDV. We validated them by estimating the same satellite antenna GDV four times based on observations separated into the four types of receiver antennas. The results agree on the level of a few centimeters root mean square (RMS) at most frequencies.

The GNSS satellite antennas exhibit GDV that range from very few centimeters up to 1.5 m. The frequencies B2a/B2b, E1, L2, and G2/G3 of BeiDou-3 MEO, Galileo FOC, GPS IIIA, and GLONASS-K1 satellites, respectively, are the least affected. Besides the exceptionally large GDV of the BeiDou-2 satellites, frequencies GPS L1 and L5 are the most affected. GDV amount to approximately 0.3 m on these frequencies and show the largest satellite-to-satellite variations.

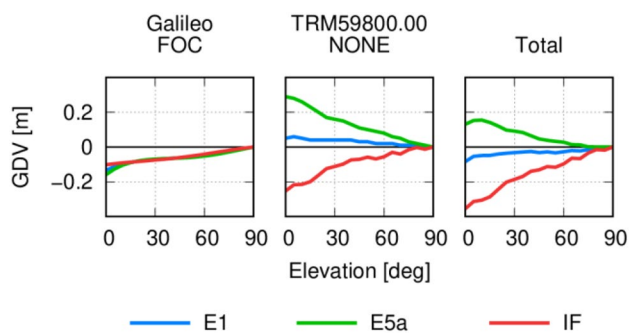


Fig. 5 GDV corrections of the Galileo FOC satellites, one receiver antenna type, and the sum of both at two frequencies and their ionospheric-free linear combination (IF). The satellite antenna GDV were transformed from nadir angle to elevation angle dependence assuming a receiving station on the earth's surface

Acknowledgments A part of this research has been supported by the German Research Foundation (DFG) under grant WA 868/8-1. All observation data used in this study were made available free of charge by the International GNSS Service (IGS), Geoscience Australia, EUREF Permanent Network (EPN), and UNAVCO. The authors are grateful to these institutions and the station operators for their valuable services.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Availability of data and materials The absolute GDV corrections of the four receiver antenna types and the satellite antennas of five GNSS are available in a modified ANTEX format from the corresponding author on request.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing,

adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

References

- Beer S, Wanninger L (2018) Temporal stability of GPS transmitter group delay variations. *Sensors* 18(6):1744. <https://doi.org/10.3390/s18061744>
- Beer S, Wanninger L, Heßelbarth A (2020) Galileo and GLONASS group delay variations. *GPS Solut* 24(1):23. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0939-7>
- Breva Y, Kröger J, Kersten T, Schön S (2019) Estimation and validation of receiver antenna codephase variations for multi GNSS. 7th international colloquium on scientific and fundamental aspects of GNSS. Zürich, Switzerland. ftp://gssc.esa.int/esa/colloquium/2019-Proceedings_Galileo-colloquium.zip
- GSA (2020) Galileo satellite metadata. <https://www.gsc-europa.eu/support-to-developers/galileo-satellite-metadata>
- Guo F, Li X, Liu W (2016) Mitigating BeiDou satellite-induced code bias: taking into account the stochastic model of corrections. *Sensors* 16(6):909. <https://doi.org/10.3390/s16060909>
- Haines BJ, Bar-Sever YE, Bertiger WI, Desai SD, Harvey N, Sibois AE, Weiss JP (2015) Realizing a terrestrial reference frame using the Global Positioning System. *J Geophys Res Solid Earth* 120(8):5911–5939. <https://doi.org/10.1002/2015JB012225>
- Hauschild A, Montenbruck O, Sleewaegen J-M, Huisman L, Teunissen PJG (2012a) Characterization of compass M-1 signals. *GPS Solut* 16(1):117–126. <https://doi.org/10.1007/s10291-011-0210-3>
- Hauschild A, Montenbruck O, Thöelert S, Erker S, Meurer M, Ashjaee J (2012b) A multi-technique approach for characterizing the SVN49 signal anomaly, part 1: receiver tracking and IQ constellation. *GPS Solut* 16(1):19–28. <https://doi.org/10.1007/s10291-011-0203-2>
- IGS (2019) Conventions and modelling for Repro3. <http://acc.igs.org/repro3/repro3.html>
- Johnston G, Riddell A, Hausler G (2017) The International GNSS Service. In: Teunissen PJG, Montenbruck O (eds) Springer handbook of global navigation satellite systems, 1st edn. Springer, Cham, pp 967–982. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1>
- Kersten T, Schön S (2017) GPS code phase variations (CPV) for GNSS receiver antennas and their effect on geodetic parameters and ambiguity resolution. *J Geod* 91:579–596. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0984-8>
- Kovach K, Powell T (2010) The interesting Navstar satellite SVN-49. In: Proceedings of the 2010 international technical meeting of the institute of navigation, San Diego, CA, January 2010, pp 952–962
- Montenbruck O, Schmid R, Mercier F, Steigenberger P, Noll C, Fatkuln R, Kogure S, Ganeshan AS (2015) GNSS satellite geometry and attitude models. *Adv Space Res* 56(6):1015–1029. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.06.019>
- Rebischung P (2019) IGS reference frame working group technical report 2019. In: Villiger A, Dach R (eds) International GNSS service technical report 2019, pp 237–246
- Rebischung P, Altamimi Z, Ray J, Garayt B (2016a) The IGS contribution to ITRF2014. *J Geod* 90(7):611–630. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0897-6>
- Rebischung P, Garayt B, Altamimi Z (2016b) IGS reference frame working group technical report 2016. In: Villiger A, Dach R (eds) International GNSS service technical report 2016, pp 171–178
- Rothacher M, Schaer S, Mervart L, Beutler G (1995) Determination of antenna phase center variations using GPS observations. In: Proceedings of the 1995 IGS workshop, Potsdam, Germany, pp 205–220
- Schmid R, Dach R, Collilieux X, Jäggi A, Schmitz M, Dilssner F (2016) Absolute IGS antenna phase center model igs08.atx: status and potential improvements. *J Geod* 90(4):343–364. <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0876-3>
- Villiger A, Dach R, Schaer S, Prange L, Zimmermann F, Kuhlmann H, Wübbena G, Schmitz M, Beutler G, Jäggi A (2020) GNSS scale determination using calibrated receiver and Galileo satellite antenna patterns. *J Geod* 94(9):93. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01417-0>
- Wanninger L, Beer S (2015) BeiDou satellite-induced code pseudorange variations: diagnosis and therapy. *GPS Solut* 19(4):639–648. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0423-3>
- Wanninger L, Sumaya H, Beer S (2017) Group delay variations of GPS transmitting and receiving antennas. *J Geod* 91(9):1099–1116. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1012-3>
- Wübbena G, Schmitz M, Menge F, Seeber G, Völksen C (1997) A new approach for field calibration of absolute GPS antenna phase center variations. *Navigation* 44(2):247–255. <https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.1997.tb02346.x>
- Wübbena G, Schmitz M, Menge F, Böder V, Seeber G (2000) Automated absolute field calibration of GPS antennas in real-time. In: Proceedings of ION GPS 2000. Institute of navigation, Salt Lake City, UT, pp 2512–2522
- Wübbena G, Schmitz M, Propp M (2008) Antenna group delay calibration with the Geo++ robot. Poster presentation. IGS Analysis workshop. Miami Beach, FL. http://www.geopp.com/pdf/igs08_gppgdc_calibration_f.pdf
- Wübbena G, Schmitz M, Warneke A (2019) Geo++ absolute multi-frequency GNSS antenna calibration. EUREF AC workshop, Warsaw, Poland. http://www.geopp.com/pdf/gpp_cal125_euref19_p.pdf
- Yang W, Tong H, Pan L, Xu D, Guo W, Yang J (2016) Analysis and correction of BDS code multipath bias. In: China satellite navigation conference (CSNC) 2016 Proceedings, vol III. Springer, Singapore, pp 503–513
- Zaminpardaz S, Teunissen P (2017) Analysis of Galileo IOV + FOC signals and E5 RTK performance. *GPS Solut* 21(4):1855–1870
- Zehentner N (2016) Kinematic orbit positioning applying the raw observation approach to observe time variable gravity. Dissertation, Graz University of Technology
- Zeimet P, Kuhlmann H (2008) On the accuracy of absolute GNSS antenna calibration and the conception of a new anechoic chamber. In: Proceedings of the FIG working week. Stockholm, Sweden, pp 14–19
- Zhou R, Hu Z, Zhao Q, Li P, Wang W, He C, Cai C, Pan Z (2018) Elevation-dependent pseudorange variation characteristics analysis for the new-generation BeiDou satellite navigation system. *GPS Solut* 22(3):60. <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0726-x>
- Zou X, Li Z, Li M, Tang W, Deng C, Chen L, Wang C, Shi C (2017) Modeling BDS pseudorange variations and models assessment. *GPS Solut* 21(4):1661–1668. <https://doi.org/10.1007/s10291-017-0645-2>

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Susanne Beer is a member of the GNSS research group at the Geodetic Institute of the Technische Universität Dresden (TU Dresden). She received her Dipl.-Ing. degree in geodesy from TU Dresden in 2011. Her research focuses on group delay variations (GDV).

Lambert Wanninger is a professor of geodesy at TU Dresden. He has been involved in research on precise GNSS positioning since 1990. He holds a Dr.-Ing. degree in geodesy from the University of Hannover, Germany, and a habilitation degree in geodesy from TU Dresden.

Anja Heßelbarth is a research associate at TU Dresden. She has been involved in research on precise GNSS positioning since 2005 and holds a Dr.-Ing. degree in geodesy from TU Dresden.

Dank

Die vorliegende Dissertation und die ihr zugrunde liegenden Publikationen entstanden während meiner Tätigkeit am Geodätischen Institut der Technischen Universität Dresden. Mein besonderer Dank gilt daher Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Lambert Wanninger für die Betreuung der Promotion, die fachliche Unterstützung und die vielen konstruktiven Diskussionen bei der Erarbeitung der Publikationen.

Außerdem bedanke ich mich herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Horwath und Herrn Dr. Florian Dilßner für die Anfertigung der weiteren Gutachten.

Weiterhin möchte ich allen Kolleginnen und Kollegen am Geodätischen Institut für die angenehme Arbeitsatmosphäre und den vielfältigen fachlichen Austausch danken.

Wie bereits in den Publikationen ausgewiesen, bin ich vielen GNSS-Stationsbetreibern sowie den angeschlossenen Datenzentren sehr dankbar, da ohne globale, frei verfügbare GNSS-Beobachtungsdaten die durchgeführten Untersuchungen nicht möglich gewesen wären.

Ein großes Dankeschön geht schließlich an meine Familie und Freunde, die meinen Weg ermöglicht, begleitet und unterstützt haben, und mir besonders in der Endphase der Promotion den Rücken freigehalten und gestärkt haben.