

Zeitschrift: Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement =
Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire =
Geomatica Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio

Herausgeber: geosuisse : Schweizerischer Verband für Geomatik und
Landmanagement

Band: 117 (2019)

Heft: 10

Artikel: GNSS-Antennenkalibrationen in der Vermessungspraxis = Calibrations
d'antennes GNSS en pratique en mensuration

Autor: Willi, D. / Lutz, S.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-864692>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 26.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

GNSS-Antennenkalibrationen in der Vermessungspraxis

GNSS-Antennenkalibrationen sind relevant für den Vermessungsalltag. Nur wenn die Kalibrationen korrekt berücksichtigt werden, lassen sich Genauigkeiten im Zentimeter- oder Millimeterbereich erzielen. Auch bei der Benutzung des swipos-Dienstes des Bundesamtes für Landestopografie swisstopo sind Antennenkalibrationen zu berücksichtigen. Dieser Artikel versteht sich als Einführung in die Thematik der Antennenkalibration. Daneben werden auch praxisrelevante Aspekte behandelt und das System der ETH Zürich zur Antennenkalibration vorgestellt.

D. Willi, S. Lutz

1. Einleitung

Die Antennen sind ein Schlüsselement bei der Vermessung mit Globalen Navigationssatellitensystemen (GNSS) wie z. B. GPS. Sie bilden die Schnittstelle vom Signal der Satelliten hin zum Empfänger. Wie jeder andere Sensor muss auch eine GNSS-Antenne kalibriert werden, um genaue Messungen zu liefern. Die Verwendung von geodätischen GNSS-Antennen ohne jegliche Korrektur führt zu

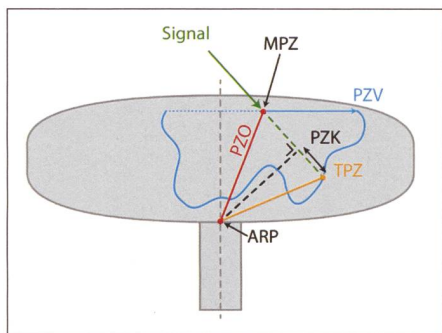


Abb. 1: GNSS-Antenne mit den relevanten Grössen. Die Korrektur, die auf eine Messung angebracht wird, ist die Projektion des Vektors vom ARP zum TPZ auf den Richtungsvektor zum Satelliten.

Fehlern von mehreren Zentimetern, insbesondere in der Höhe. Um dennoch genaue Resultate mittels GNSS zu erhalten, werden Empfangsantennen im Feldverfahren oder in einer echolosen Kammer im Labor kalibriert. Diese Kalibration wird anschliessend direkt im Empfänger, zum Beispiel bei Real-Time-Kinematic (RTK)-Messungen, oder im Postprocessing berücksichtigt. Weil die verschiedenen GNSS-Systeme, wie GPS und Galileo, teilweise auf unterschiedlichen Frequenzen senden, braucht es auch entsprechende Kalibrationen.

2. Mathematisches Modell

Die Koordinate, die mithilfe von GNSS bestimmt wird, bezieht sich immer auf den Antennenreferenzpunkt (ARP). Bei fast allen geodätischen Antennen liegt der ARP im Schnittpunkt der vertikalen Achse der Antenne mit deren Unterseite¹. Das mittlere Phasenzentrum (MPZ) einer Antenne ist ein virtueller Punkt, der Phasenzentrumsoffset (PZO) ein 3D-Vektor, der den Bezug vom ARP zum MPZ herstellt (siehe Abb. 1). Die Phasenzentrumsvariation (PZV) ist abhängig vom Azimut und vom Elevationswinkel des eintreffenden Signals und wird auf das MPZ addiert. Die eigentliche Messung erfolgt im tatsächlichen Phasen-

zentrum (TPZ). Die Projektion des Vektors vom ARP zum TPZ auf den Richtungsvektor zum Satelliten führt zur gesamten Phasenzentrumskorrektur (PZK). Das ist der Wert, der schliesslich einer Messung angerechnet werden muss.

Antennenkalibrationen sind frequenzabhängig. Durch die Modernisierung der Satellitensysteme sind heute eine Vielzahl von verschiedenen Frequenzen verfügbar. GPS, Galileo, GLONASS und BeiDou senden allesamt auf drei oder mehr Frequenzen (siehe Abb. 2). Demensprechend wird für jede einzelne Frequenz eine Kalibration benötigt, wobei gewisse Systeme auf derselben Frequenz senden (z. B. senden GPS, Galileo, SBAS, BeiDou, QZSS und IRNSS allesamt auf 1176 MHz). Die einzelnen Frequenzen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Antennenkalibrationen werden üblicherweise im ANTEX²-Format zur Verfügung gestellt. Ein ANTEX-File enthält einen Eintrag pro Antenne und pro Frequenz. Es enthält unter anderem Informationen zum PZO. Anschliessend folgt eine Tabelle mit Korrekturwerten in einem Azimut- und Elevationsgitter.

2.1 Individuelle Kalibrationen versus «Type-Mean»-Kalibrationen

Bei so genannten «Type-Mean»-Kalibrationen ist eine einzige Kalibration für alle Antennen des gleichen Typs verfügbar. «Type-Mean»-Kalibrationen entstehen aus dem Mittelwert mehrerer individueller Kalibrationen. Sie werden zum Beispiel vom International GNSS Service (IGS) zur Verfügung gestellt; der IGS unterhält ein ANTEX-File mit konsistenten Antennenkalibrationen für alle GNSS-Satelliten sowie für alle GNSS-Antennen innerhalb des IGS-Netzwerks³.

Bei der Individual-Kalibration wird jede Antenne separat kalibriert. Dadurch lassen sich auch kleinste Unterschiede innerhalb einer Baureihe korrigieren. Mehrere Anbieter führen auf Anfrage kommerzielle Antennen-Kalibrationen durch. Marktführer ist die deutsche Firma Geo++[®] GmbH⁴, aber auch das Institut für Erdmessung der Leibniz Universität Hannover⁵ und die Berliner Senatsverwal-

¹ Der International GNSS Service (IGS) unterhält eine Liste mit Skizzen zur Beschreibung des ARP für alle gängigen Antennen. Die Liste ist erhältlich unter <ftp://ftp.igs.org/pub/station/general/antenna.gra>.

² Antenna Exchange Format. Eine genaue Beschreibung des ANTEX-Formats findet sich unter <ftp://igs.org/pub/station/general/antex14.txt>.

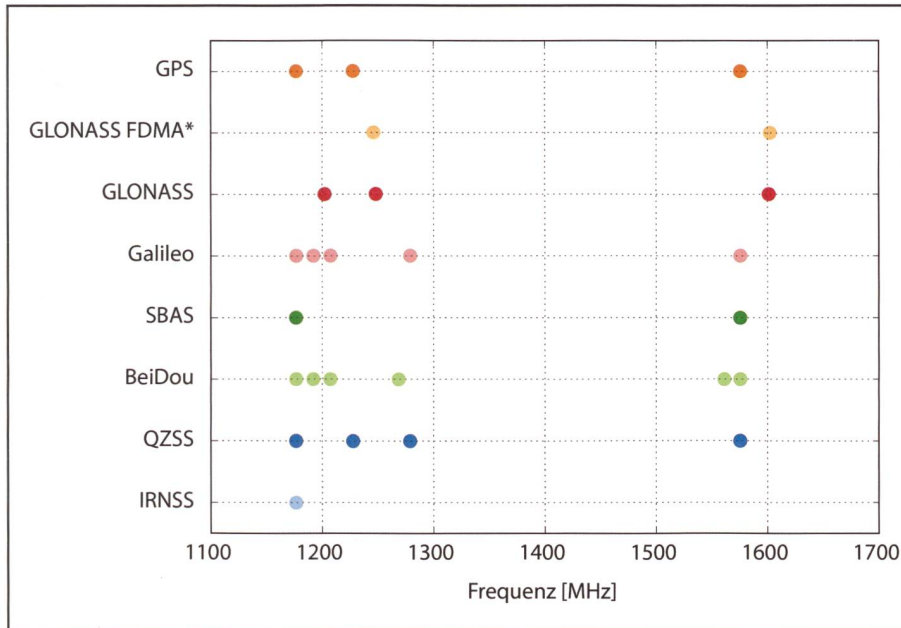


Abb. 2: Heute verfügbare Satelliten-Navigationssysteme und deren Frequenzen. Das indische IRNSS sendet zusätzlich auf einer Frequenz von ca. 2500 MHz (nicht gezeigt). *Die russischen Satelliten alter Baureihe senden ein so genanntes «Frequency Division Multiple Access» (FDMA)-Signal; Die Frequenz der einzelnen Satelliten unterscheidet sich um maximal 8 MHz. Die Grafik zeigt die Zentrumsfrequenz.

tung für Stadtentwicklung und Wohnen⁶ führen solche Feld-Kalibrationen durch. Kalibrationen im Laborverfahren werden von der Universität Bonn⁷ zusammen mit der Bezirksregierung Köln – Abteilung 7⁸ angeboten.

3. Kalibrationsmethoden

3.1 Kalibration in der echolosen Kammer

Bei Kalibrationen in einer echolosen Kammer wird die zu kalibrierende GNSS-Antenne in einem speziellen Labor gegenüber einem Sender aufgestellt. Der Sender generiert ein künstliches Sinus-Signal mit der gewünschten Frequenz. Anschlies-

send wird entweder der Sender bewegt oder die Antenne wird rotiert, um die ganze Antenne abzutasten. Gleichzeitig wird die Phasenverschiebung gemessen, um die Kalibrationsparameter zu bestimmen.

Messungen in echolosen Kammern haben den Vorteil, dass sie unabhängig von Wettereinflüssen und unter Laborbedingungen durchgeführt werden können. Die kurze Distanz zwischen dem Sender und dem Empfänger, verglichen mit der Distanz zwischen einem Satelliten und einem Empfänger auf der Erde, kann jedoch problematisch sein. Zudem ist die benötigte Infrastruktur nicht unerheblich.

³ Das aktuelle ANTEX-File mit allen Antennen des IGS-Netzwerks findet sich unter: <ftp://igs.org/pub/station/general/igs14.atx>

⁴ www.geopp.de

⁵ <https://www.ife.uni-hannover.de/de/dienstleistungen/gnss-antenna-calibration>

⁶ <https://www.stadtentwicklung.berlin.de/geoinformation/landesvermessung/landeskalibriereinrichtung>

⁷ <https://www.gib.uni-bonn.de/research/antennenmesskammer>

⁸ https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis

3.2 Feldkalibrationen

Im Gegensatz zum Laborverfahren wird bei der so genannten Feldkalibration ein tatsächliches GNSS-Signal gemessen. Bei früheren Verfahren wurde die zu kalibrierende Antenne in wenigen Metern Entfernung zu einer Referenzantenne aufgestellt und nach Norden orientiert. Die zu kalibrierende Antenne wird nach 24 h oder mehr manuell um 180° rotiert und somit nach Süden orientiert. Aus der Analyse dieser Daten lässt sich eine so genannte relative Kalibration berechnen. Relativ, weil das Resultat von der gewählten Referenzantenne abhängig ist. Relative Kalibrationen werden grundsätzlich nicht mehr eingesetzt.

Heutzutage nutzen die meisten Verfahren einen Industrieroboter mit fünf oder sechs Achsen. Durch den Industrieroboter können Rotationen in drei Dimensionen ausgeführt werden und nicht nur einzig um die Antennenhochachse. Diese zusätzlichen Rotationen erlauben die Dekorrelation der Kalibration der zu kalibrierenden Antenne von der Kalibration der Referenzantenne. Das Resultat ist eine so genannte absolute Kalibration. Diese absolute Kalibration ist unabhängig von der eingesetzten Referenzantenne. Die Referenzantenne dient nur noch dazu, die Troposphäre, die Ionosphäre, die Satellitenbahnfehler und die Satelliten- und Empfängeruhrfehler bei der Datenanalyse zu korrigieren.

3.3 Antennenkalibration an der ETH Zürich

Seit 2017 wird am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich ein Kalibrationssystem für GNSS-Antennen entwickelt. Dessen Hauptkomponenten sind in Abbildung 3 dargestellt. Das System besteht aus einem 6-Achsen-Industrieroboter, der Steuerelektronik für den Roboter, einem Computer für die Steuerung, einer Referenzstation und zwei Multi-GNSS-Empfängern.

Der Roboter bringt die zu kalibrierende GNSS-Antenne in eine vordefinierte Abfolge von Orientierungen. Das Zentrum der Rotationen befindet sich im MPZ. Das hat den Vorteil, dass sich das MPZ wäh-

System	Land	Signal	Frequenz [MHz]
GPS	USA	L1	1575.42
		L2	1227.6
		L5	1176.45
GLONASS	Russland	G1 *	1602
		G2 *	1246
		G3	1202.025
		G1a	1600.995
		G2a	1248.06
Galileo	Europa**	E1	1575.42
		E5a	1176.45
		E5b	1207.14
		E5 (E5a+E5b)	1191.795
		E6	1278.75
SBAS	Verschiedene***	L1	1575.42
		L5	1176.45
BeiDou	China	B1	1575.42
		B1-2	1561.098
		B2a	1176.45
		B3	1268.52
		B2b	1207.14
QZSS	Japan	B2 (B2a+B2b)	1191.795
		L1	1575.42
		L2	1227.6
		L5	1176.45
IRNSS	Indien	L6	1278.75
		L5	1176.45
		S	2492.028

Tab. 1: Übersicht über die verschiedenen Systeme und Signale. *Diese Signale sind so genannte «Frequency Division Multiple Access» (FDMA)-Signale: Jeder Satellit sendet auf einer geringfügig unterschiedlichen Frequenz. In Zukunft werden diese Signale abgelöst. **Galileo ist ein Projekt der Europäischen Union und der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) mit Beteiligung weiterer Staaten. Die Schweiz ist Mitglied der ESA und auch am Galileo-Projekt beteiligt. ***Verschiedene Staaten unterhalten Satellite Based Augmentation System (SBAS)-Satelliten, unter anderem die USA, und Europa. SBAS-Satelliten senden Korrekturdaten. SBAS-Satelliten können nicht alleine zur Navigation benutzt werden.

rend der ganzen Kalibration nicht bewegt. Die ETH Zürich bietet keine kommerziellen Kalibrationen an. Das System dient der Forschung und der Lehre. Die Kalibration von so genannten «low-cost»-Antennen ist aktuell ein Forschungsschwerpunkt. «low-cost»-Antennen werden zum Beispiel in Fahrzeugen eingesetzt und unterscheiden sich durch ihren niedrigen Preis und ihrer kleinen Masse von geodätischen Antennen. Die PZV von solchen Antennen wurden aber noch kaum untersucht.

Abbildung 4 zeigt ein Resultat einer Kalibration mit dem System der ETH Zürich für eine geodätische Antenne der Marke

JAVAD. Die starke Abhängigkeit vom Elevationswinkel des eintreffenden Signals ist klar erkennbar. Die vier Erhebungen bei tiefen Zenitwinkeln lassen auf eine viereckige Struktur der Antennen-Grundplatte schliessen.

4. Grössenordnung der Korrekturen und Anwendung in der Praxis

Der PZO beträgt bei gängigen geodätischen Antennen in der Höhe einige Zentimeter, in der Lage weniger als 1 mm. Der

PZO ist abhängig von der Antennenkonstruktion. Er spiegelt hauptsächlich die Lage des mechanischen Referenzpunktes, des ARP, wider.

Die PZV betragen typischerweise weniger als 1 cm. Die PZV sind hauptsächlich abhängig von der Elevation und weisen nur eine geringe azimutale Variation auf.

In der Praxis sind Antennenkalibrationen immer zu berücksichtigen. Die meisten Instrumenten- und Softwarehersteller bringen Antennenkalibrationen bestehend aus PZO und elevationsabhängiger Korrektur automatisch an. Werden die Antennenkalibrationen nicht berücksichtigt, kann der Koordinatenfehler in der Lage mehrere Millimeter betragen. In der Höhe sind Abweichungen von mehreren Zentimetern möglich.

Bei der Benutzung eines Echtzeit-Positionierungsdienstes wie swipos ist darauf zu achten, dass im Empfänger der richtige Antennentyp ausgewählt ist (Rover-Antenne). Antennentypen mit ähnlichen Namen haben zum Teil sehr unterschiedliche PZO, was zu entsprechenden



Abb. 3: KUKA 6-Achsen Industrieroboter auf dem Dach des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich auf dem Höggerberg. Im Hintergrund ist die Referenzantenne zu sehen.

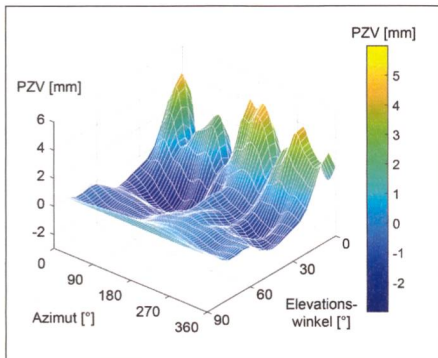


Abb. 4: Resultat einer Kalibration der ETH Zürich für eine GNSS-Antenne der Marke JAVAD.

Fehlern führt, wiederum hauptsächlich in der Höhe. Um die Antennenkalibrationen auf den Permanentstationen muss sich der Anwender nicht kümmern. In den Real-Time-Kinematic-Einstellungen des Rovers muss als Referenzantenne «ADVNULLANTENNA» ausgewählt werden (einige moderne Empfänger unterstützen auch die Einstellung «automatisch erkennen»). Der swipos-Server bringt die Antennenkalibrationen an den Permanentstationen an und berechnet eine virtuelle Referenzstation mit einer Antenne des Typs «ADVNULLANTENNA», wodurch die Konsistenz sichergestellt ist.

Für Hochgenauigkeitsanwendungen sind elevations- und azimutabhängige Antennenkalibrationen zu verwenden.

5. Schlussfolgerungen

Die Antennen spielen bei der Positionierung mit GNSS eine Schlüsselrolle. Um

genaue Messungen zu liefern, müssen Antennen kalibriert werden. Antennenkalibrationen können entweder im Feldverfahren oder im Labor durchgeführt werden.

Die Phasenzentrumsvariationen betragen für geodätische Antennen bis zu 10 mm. Der Phasenzentrumsoffset hängt hauptsächlich von der Bauform der Antenne ab und kann mehrere Zentimeter betragen. Für Standardanwendungen werden üblicherweise so genannte «Type-Mean»-Kalibrationen verwendet. Dabei handelt es sich um einen Mittelwert über mehrere Antennen des gleichen Typs. Für Präzisionsanwendungen werden individuelle Kalibrationen verwendet. In jedem Fall sind die Antennen aber nach Norden auszurichten, damit die Korrekturen richtig angebracht werden und der richtige Antennentyp ist im Empfänger auszuwählen.

Literaturhinweise:

Weiterführende Hinweise zu Antennenkorrekturen finden sich im Merkblatt der Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement:

Berücksichtigung von Antennenkorrekturen bei GNSS-Anwendungen, DVW-Merkblatt 1-2018. https://www.dvw.de/sites/default/files/merkblatt/daten/2019/01_DVW-Merkblatt_Antennenkorrekturen-GNSS_2018_v3.pdf

Eine Einführung in GNSS findet sich in folgenden Werken:

Bauer M (2018) Vermessung und Ortung mit Satelliten. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, Deutschland. ISBN 978-3-87907-634-5.

Piéplu J-M (2006) GPS et Galileo; systèmes de navigation par satellites. Eyrolles, Paris, Frankreich. ISBN 978-2-212-11947-3.

Für wissenschaftlich interessierte Leserinnen und Leser bietet sich das «Springer Handbook of GNSS» an. Es ist sehr umfangreich und gilt als Referenzwerk in Sachen GNSS:

Teunissen PJG, Montenbruck O (2017) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Berlin, Deutschland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1>

Zum Thema Antennenkalibration ist an der ETH Zürich eine Doktorarbeit entstanden:

Willi D (2019) GNSS receiver synchronisation and antenna calibration. Doktorarbeit, ETH Zürich, Schweiz. <https://doi.org/20.500.11850/308750>

Dr. Daniel Willi

Leiter Geodätische Landesvermessung

Dr. Simon Lutz

Entwicklungsingenieur/Geodät

Geodäsie und Eidgenössische

Vermessungsdirektion

Bundesamt für Landestopografie

swisstopo

Seftigenstrasse 264

3084 Wabern

daniel.willi@swisstopo.ch

simon.lutz@swisstopo.ch

Calibrations d'antennes GNSS en pratique en mensuration

Les calibrations d'antennes GNSS ont leur importance dans les travaux de mensuration réalisés au quotidien. Il n'est possible d'atteindre des précisions de niveau centimétrique ou millimétrique que si elles sont correctement prises en compte. Et il faut également en tenir compte en cas d'utilisation du service swipos de l'Office fédéral de topographie. Cet article entend constituer une introduction à la calibration d'antennes. Des aspects d'importance pratique sont par ailleurs abordés et le système de calibration d'antenne de l'ETH Zurich est présenté.

La calibrazione delle antenne GNSS è essenziale nella quotidianità delle misurazioni. Solo una calibrazione perfetta consente di ottenere una precisione centimetrica o millimetrica. Inoltre, la calibrazione delle antenne è un elemento fondamentale anche per l'utilizzo dei servizi swipos dell'Ufficio federale di topografia swisstopo. L'articolo seguente introduce al tema della calibrazione delle antenne, fornisce un approfondimento pratico e presenta il sistema sviluppato dal Politecnico di Zurigo per la calibrazione delle antenne.

D. Willi, S. Lutz

1. Introduction

Les antennes constituent un élément clé de la mensuration par GNSS. Elles assurent la réception des signaux émis par les satellites. Comme tout capteur, une antenne GNSS doit être calibrée pour fournir des mesures précises. Utiliser des antennes GNSS géodésiques sans appliquer la moindre correction provoque des erreurs pouvant atteindre plusieurs centimètres, en particulier en altitude. C'est donc pour obtenir des résultats précis via GNSS que les antennes réceptrices sont calibrées sur le terrain, via une procédure spécifique, ou en laboratoire, dans une chambre ané-

choïque. Ensuite, cette calibration est soit directement prise en compte dans le récepteur, par exemple lors de mesures RTK (cinématique en temps réel) soit appliquée en post-traitement. Et parce que les différents systèmes GNSS, comme le GPS ou Galileo, émettent sur des fréquences en partie différentes, une calibration particulière est requise pour chacune d'entre elles.

2. Modèle mathématique

Les coordonnées déterminées par GNSS se rapportent toujours au point de référence de l'antenne (PRA). Le PRA de la quasi-totalité des antennes géodésiques se trouve à l'intersection de l'axe vertical de l'antenne et de sa face inférieure¹. Le centre de phase moyen (CPM) d'une antenne est un point

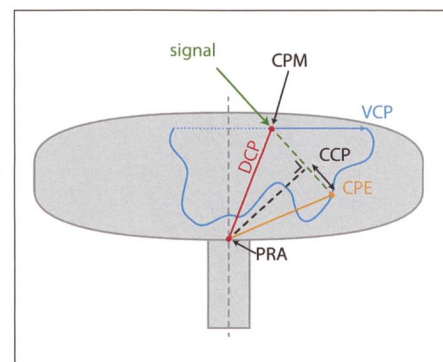


Fig. 1: Antenne GNSS avec l'ensemble des grandeurs d'importance. La correction apportée à une mesure est la projection du vecteur reliant le PRA au CPE sur le vecteur provenant du satellite.

virtuel et le décalage du centre de phase (DCP) est un vecteur en 3D reliant le PRA au CPM (cf. figure 1). La variation du centre de phase (VCP) dépend de l'azimut et de l'angle d'élévation du signal arrivant. Elle est comptée à partir du CPM. La mesure est ainsi réalisée au centre de phase effectif (CPE). La projection du vecteur reliant le PRA au CPE sur le vecteur provenant du satellite conduit alors à la correction du centre de phase (CCP) globale. Il s'agit de la valeur finalement ajoutée ou retranchée à une mesure.

Les calibrations d'antennes dépendent des fréquences. De nombreuses fréquences différentes sont aujourd'hui disponibles, du fait de la modernisation des systèmes de satellites. GPS, Galileo, GLONASS et BeiDou émettent tous sur au moins trois fréquences (cf. figure 2). Une calibration doit donc être réalisée pour chacune d'entre elles, certains systèmes ayant toutefois des fréquences communes (ainsi GPS, Galileo, SBAS, BeiDou, QZSS et IRNSS émettent tous sur 1176 MHz). Le tableau 1 récapitule les différentes fréquences d'émission.

D'ordinaire, les calibrations d'antennes sont mises à disposition au format ANTEX². Un fichier ANTEX comprend une entrée par antenne et par fréquence. Il contient notamment des informations sur le DCP, suivies d'un tableau fournissant des valeurs de correction sous forme de grille, en fonction de l'azimut et de l'élévation.

¹ Le service GNSS international (IGS) gère une liste intégrant des croquis décrivant le PRA de toutes les antennes usuelles. Cette liste est disponible sous: <ftp://ftp.igs.org/pub/station/general/antenna.gra>.

² Antenna Exchange Format. Une description précise de ce format est disponible sous: <ftp://igs.org/pub/station/general/antex14.txt>.

³ Le fichier ANTEX regroupant toutes les antennes du réseau IGS est disponible sous: <ftp://igs.org/pub/station/general/igs14.atx>

⁴ www.geopp.de

⁵ <https://www.ife.uni-hannover.de/de/dienstleistungen/gnss-antenna-calibration/>

⁶ <https://www.stadtentwicklung.berlin.de/geoinformation/landesvermessung/landeskalibriereinrichtung/index.shtml>

⁷ <https://www.gib.uni-bonn.de/research/antennenmesskammer>

⁸ https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/index.html

2.1 Calibrations individuelles et «type-mean»

Une seule calibration est disponible pour toutes les antennes d'un même type dans le cas d'une calibration dite «type-mean» qui résulte en fait de la moyenne de calibrations individuelles. Des calibrations «type-mean» sont par exemple mises à disposition par le service GNSS international (IGS) qui gère un fichier ANTEX avec des calibrations d'antennes cohérentes pour tous les satellites GNSS et toutes les antennes GNSS au sein de son réseau³. Chaque antenne est calibrée séparément dans le cas d'une calibration individuelle, ce qui permet aussi de corriger des différences très fines au sein d'une même série. Plusieurs entreprises réalisent des calibrations d'antennes sur demande. Si le marché est dominé par la société allemande Geo++ ® GmbH⁴, un institut de l'Université Leibniz de Hanovre (Institut für Erdmessung)⁵ et une administration berlinoise (Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen)⁶ effectuent aussi de telles calibrations sur le terrain. Des calibrations en laboratoire sont proposées par l'Université de Bonn⁷ en collaboration avec les autorités du district de Cologne (Bezirksregierung Köln – Abteilung 7)⁸.

3. Méthodes de calibration

3.1 Calibration en chambre anéchoïque

L'antenne GNSS à calibrer est ici mise en place dans un laboratoire spécial à faible distance d'un émetteur. Ce dernier génère un signal sinusoïdal artificiel à la fréquence souhaitée. Au bout d'un certain temps, on déplace l'émetteur ou on pivote l'antenne pour la tester intégralement. Le déphasage est simultanément mesuré pour déterminer les paramètres de calibration.

Les mesures en chambre anéchoïque ont pour avantage d'être réalisées dans des conditions de laboratoire, indépendamment de toute influence météorologique. La courte distance entre l'émetteur et le récepteur peut toutefois se révéler problématique, en comparaison de la distance séparant un satellite d'un récepteur

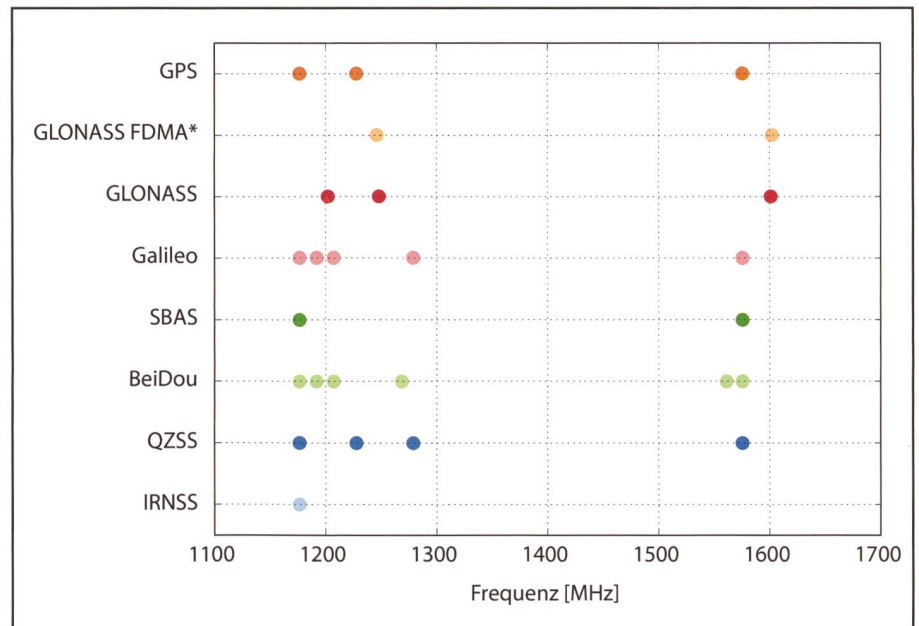


Fig. 2: Systèmes de navigation par satellites actuellement disponibles et fréquences associées. L'IRNSS indien émet en outre sur une fréquence d'environ 2500 MHz (non présentée). *Les satellites russes d'ancienne génération émettent un signal d'accès multiple par répartition en fréquence (AMRF), la fréquence des différents satellites s'écarte de 8 MHz au plus de la fréquence centrale présentée ici.

sur la Terre. En outre, l'infrastructure requise est très conséquente.

3.2 Calibrations sur le terrain

Contrairement à la méthode en laboratoire, un signal GNSS effectif est mesuré dans la calibration réalisée sur le terrain. Les méthodes antérieures prévoyaient la mise en place d'une antenne de référence à quelques mètres à peine de l'antenne à calibrer, orientée vers le nord. Elle était pivotée manuellement de 180° au bout de 24 heures ou plus pour l'orienter vers le sud. Une calibration dite relative résultait de l'exploitation de ces données. Elle était dite relative parce qu'elle était liée à l'antenne de référence sélectionnée. On ne réalise plus de calibrations relatives aujourd'hui. La plupart des méthodes recourent désormais à un robot industriel comportant cinq ou six axes, permettant d'effectuer des rotations dans les trois dimensions et pas uniquement autour de l'axe vertical de l'antenne. Ces rotations supplémentaires permettent de décorréler la calibration de l'antenne à calibrer de celle de l'antenne de référence. Le résultat est une calibration dite absolue, donc indépen-

dante de l'antenne de référence mise en œuvre. Cette dernière ne sert plus à présent qu'à corriger diverses influences (troposphère, ionosphère, erreurs d'orbites des satellites et erreurs d'horloge des satellites et des récepteurs) lors de l'exploitation des données.

3.3 Calibration d'antenne à l'ETH Zurich

Un système de calibration d'antenne GNSS est développé à l'Institut de géodésie et de photogrammétrie de l'ETH Zurich depuis 2017. Ses éléments principaux sont visibles sur la figure 3. Le système se compose d'un robot industriel à six axes, de son électronique de commande, d'un ordinateur pour la commande, d'une station de référence et de deux récepteurs multi-GNSS.

Le robot fait successivement passer l'antenne GNSS à calibrer par une série prédéfinie d'orientations. Le centre des rotations est au CPM. L'avantage en est que le CPM reste fixe durant toute la procédure de calibration.

L'ETH Zurich ne réalise pas de calibrations dans un cadre commercial. Le système sert à la recherche et à l'enseignement.

Système	Pays/zone	Signal	Fréquence [MHz]
GPS	Etats-Unis	L1	1575,42
		L2	1227,6
		L5	1176,45
GLONASS	Russie	G1 *	1602
		G2 *	1246
		G3	1202,025
		G1a	1600,995
		G2a	1248,06
Galileo	Europe**	E1	1575,42
		E5a	1176,45
		E5b	1207,14
		E5 (E5a+E5b)	1191,795
		E6	1278,75
SBAS	Divers***	L1	1575,42
		L5	1176,45
BeiDou	Chine	B1	1575,42
		B1-2	1561,098
		B2a	1176,45
		B3	1268,52
		B2b	1207,14
QZSS	Japon	B2 (B2a+B2b)	1191,795
		L1	1575,42
		L2	1227,6
		L5	1176,45
IRNSS	Inde	L6	1278,75
		L5	1176,45
		S	2492,028

Tab. 1: Vue d'ensemble des différents systèmes et signaux. *Il s'agit de signaux AMRF: chaque satellite émet sur une fréquence légèrement différente. Ces signaux seront prochainement remplacés. **Galileo est un projet de l'Union européenne et de l'Agence spatiale européenne (ESA) auquel participent d'autres Etats. La Suisse est membre de l'ESA et participe aussi au projet Galileo. ***Des satellites de systèmes d'augmentation SBAS couvrent notamment l'Amérique du Nord et l'Europe. Ces satellites envoient des données de correction. Les satellites SBAS ne peuvent pas servir à la navigation à eux seuls.

La calibration d'antennes bon marché («low-cost») est actuellement un axe de recherche majeur. Ces antennes peu onéreuses et peu encombrantes équipent par exemple des véhicules. Cependant, leurs VCP ont été très peu étudiées jusqu'à présent.

La figure 4 présente le résultat d'une calibration avec le système de l'ETH Zurich pour une antenne géodésique de la marque JAVAD. On reconnaît clairement le lien de dépendance très fort avec l'angle d'élévation du signal arrivant. Les quatre pics aux élévations les plus basses permettent de conclure à une structure quadrangulaire de la plaque de base de l'antenne.

4. Ordre de grandeur des corrections et utilisation en pratique

De l'ordre de quelques centimètres en altitude, le DCP est inférieur au millimètre en planimétrie pour les antennes géodésiques courantes et dépend de la construction de l'antenne. Il reflète pour l'essentiel la position du point de référence mécanique, le PRA.

Généralement inférieures à un centimètre, les VCP dépendent surtout de l'élévation et sont faibles en azimut. Il faut toujours tenir compte des calibrations d'antennes en pratique. La plupart des fabricants d'instruments et des producteurs

de logiciels apportent automatiquement les calibrations d'antennes composées du DCP et d'une correction liée à l'élévation. Si les calibrations d'antennes ne sont pas prises en compte, l'erreur sur les coordonnées planimétriques peut atteindre plusieurs millimètres. En altitude, les écarts peuvent être de plusieurs centimètres. Lors de l'utilisation d'un service de positionnement en temps réel tel que swipos, il faut veiller à ce que le bon type d'antenne soit sélectionné sur le récepteur (antenne mobile / rover). Des types d'antennes aux noms semblables ont parfois des DCP très différents, ce dont résultent des erreurs correspondantes, principalement en altitude à nouveau. L'utilisateur n'a pas à se préoccuper des calibrations d'antennes sur les stations permanentes. Il suffit de sélectionner «ADVNULLANTENNA» comme antenne de référence dans les paramètres RTK du mobile (respectivement «reconnaître automatiquement» pour certains récepteurs modernes). Le serveur swipos applique les calibrations d'antennes aux stations permanentes et calcule une station de référence virtuelle avec une antenne de

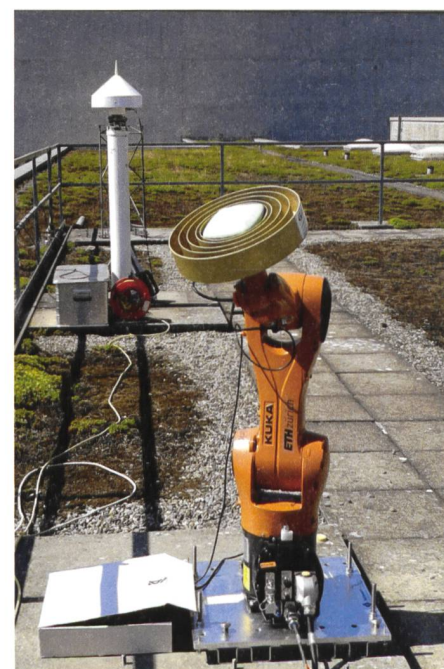


Fig.3: Robot industriel KUKA à six axes sur le toit de l'Institut de géodésie et de photogrammétrie de l'ETH Zurich au Höggerberg. L'antenne de référence est visible à l'arrière-plan.

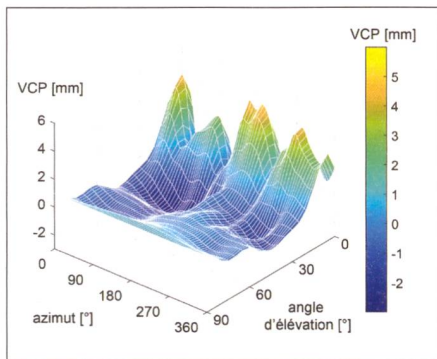


Fig. 4: Résultat d'une calibration de l'ETH Zurich pour une antenne GNSS de la marque JAVAD.

type «ADVNULLANTENNA», garantissant ainsi la cohérence du processus. Des calibrations d'antennes en fonction de l'élévation et de l'azimut doivent être utilisées pour des applications de haute précision.

5. Conclusions

Les antennes jouent un rôle clé en matière de positionnement par GNSS. Elles doivent être calibrées pour livrer des mesures précises. Leurs calibrations peuvent être réalisées sur le terrain ou en laboratoire.

Les variations de centre de phase peuvent atteindre 10 mm pour les antennes géodésiques. Le décalage de centre de phase

dépend pour l'essentiel de la forme de l'antenne et peut s'élever à plusieurs centimètres.

On utilise généralement des calibrations «type-mean» pour les applications standard. Il s'agit là d'une valeur moyennée sur plusieurs antennes du même type. Des calibrations individuelles sont utilisées pour les applications de précision. Les antennes doivent toujours être orientées vers le nord, afin que les corrections soient apportées comme il se doit et le type d'antenne correct doit être sélectionné sur le récepteur.

Références bibliographiques:

Des informations complémentaires concernant les corrections d'antennes peuvent être trouvées dans la fiche technique de la société allemande de géodésie, de géoinformation et de gestion du territoire:

Berücksichtigung von Antennenkorrekturen bei GNSS-Anwendungen, DVW-Merkblatt 1-2018. https://www.dvw.de/sites/default/files/merkblatt/daten/2019/01_DVW-Merkblatt_Antennenkorrekturen-GNSS_2018_v3.pdf

Les ouvrages suivants constituent une bonne introduction au GNSS:

Bauer M (2018) Vermessung und Ortung mit Satelliten. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, Allemagne. ISBN 978-3-87907-634-5.

Piéplu J-M (2006) GPS et Galileo; systèmes de navigation par satellites. Eyrolles, Paris, France. ISBN 978-2-212-11947-3.

Les passionné(e)s de science pourront se reporter au «Springer Handbook of GNSS». Ce guide très complet est considéré comme un ouvrage de référence en matière de GNSS: Teunissen PJG, Montenbruck O (2017) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Berlin, Allemagne. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1>

Une thèse de doctorat, soutenue à l'ETH Zurich, a été consacrée à la calibration d'antennes: Willi D (2019) GNSS receiver synchronisation and antenna calibration. Thèse de doctorat, ETH Zurich, Suisse. <https://doi.org/20.500.11850/308750>

Dr Daniel Willi

Responsable du processus mensuration géodésique nationale

Dr Simon Lutz

Ingénieur développeur/géodésien
Géodésie et Direction fédérale des
Mensurations cadastrales

Office fédéral de topographie swisstopo
Seftigenstrasse 264

3084 Wabern

daniel.willi@swisstopo.ch

simon.lutz@swisstopo.ch



Vom Zirkel zum elektronischen Theodoliten

Kern - Geschichten

von Franz Haas

172 Jahre Aarauer Industriegeschichte –
Sammlung Kern – Zeittafeln – Kern-Geschichten, auf 132 Seiten
mit ca. 90 Bildern – Fr. 42.– + Porto und Verpackung

Herausgeber: Heinz Aeschlimann, Kurt Egger | Bestellungen: SIGImediaAG, Postfach, 5246 Scherz | info@sigimedia.ch