

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

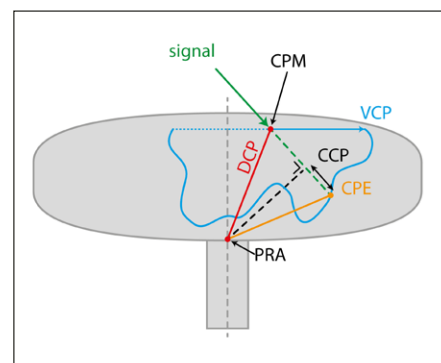


Fig. 1: Antenne GNSS avec l'ensemble des grandeurs d'importance. La correction apportée à une mesure est la projection du vecteur reliant le PRA au CPE sur le vecteur provenant du satellite.

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/landeskabliereinrichtung/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

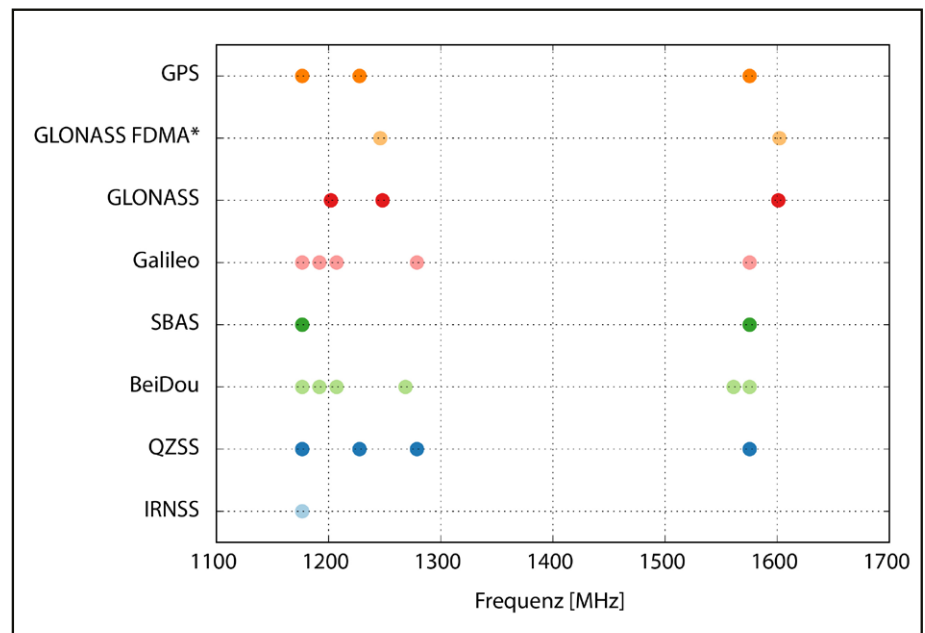


Fig. 2: Systèmes de navigation par satellites actuellement disponibles et fréquences associées. L'IRNSS indien émet en outre sur une fréquence d'environ 2500 MHz (non présentée). *Les satellites russes d'ancienne génération émettent un signal d'accès multiple par répartition en fréquence (AMRF), la fréquence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

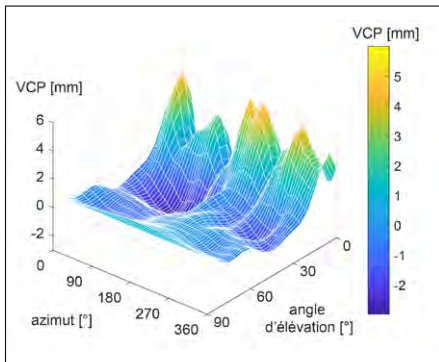


Fig. 4: Résultat d'une calibration de l'ETH Zurich pour une antenne GNSS de la marque JAVAD.

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