

УДК 520.8

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ КАЛИБРОВОК GPS-АНТЕНН, ТИПОВ КУПОЛОВ, МАСОК ПО УГЛУ ВОЗВЫШЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ GNSS-ИЗМЕРЕНИЙ

Вадим Викторович Ялтыхов

Полоцкий государственный университет, 211440, Беларусь, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной геодезии и фотограмметрии, тел. 375(29)7198881, e-mail: v7155477yandex.by

Кирилл Игоревич Маркович

Полоцкий государственный университет, 211440, Беларусь, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29, магистр технических наук, ассистент кафедры геодезии и кадастров, тел. 375(29)5981760, e-mail: markovich.kirill@mail.ru

В работе представлен анализ основных факторов, ограничивающих точность определения местоположения с помощью GNSS-измерений (в особенности вертикальную составляющую), методы создания корректирующих моделей вариаций фазовых центров GPS-антенн. Выполнена оценка влияния относительных и абсолютных калибровок, типов куполов и масок возвышения на результаты обработки GNSS-измерений путем обработки 10 векторов, полученных по двухдневным измерениям на 13 пунктах европейской сети постоянно действующих станций EUREF, имеющих различную длину, превышение, тип используемого оборудования и геометрию спутникового созвездия. Определены зависимости изменений азимутальных и высотных составляющих вариаций фазовых центров антенн (PCV – Phase Center Variations). Показано, что для достижения миллиметровой точности обязательным условием является использование абсолютных калибровок фазовых центров антенн, указание точного типа антенны, типа купола и маски по углу возвышения.

Ключевые слова: вариации фазовых центров, калибровки, многолучевость, маска по углу возвышения, GPS-антенна, GNSS-измерения, безэховая камера, европейская сеть EUREF.

Как показывает практика применения любых типов GPS-антенн, одним из наиболее существенных факторов, ограничивающих точность определения местоположения, являются вариации фазовых центров антенн (PCV – Phase Center Variations). Фактическое положение фазового центра антенны изменяется в зависимости от входного сигнала GNSS и является функцией от направлений на спутники, от которых антенна принимает сигнал. В силу того, что направления на спутники непрерывно изменяются, фазовый центр антенны будет определен как среднее из всевозможных положений фазового центра в период измерения.

Амплитуда изменения PCV зависит от множества факторов (геометрия спутникового созвездия, возвышение спутников над горизонтом, форма куполов антенн, материал куполов, эффект многолучевости) и может достигать нескольких сантиметров. Использование различных антенн даже на коротких базовых линиях также может приводить к ошибкам сантиметрового уровня. Проанализируем основное содержание данной проблемы.

Корректирующая модель РСС любой GPS-антенны содержит две составляющие (рис. 1): PCO – смещение фазового центра (независимо от положения спутников), PCV – вариации фазового центра (зависят от азимута и угла места спутника над антенной) и может быть представлена выражением [1]:

$$PCC(\alpha, z) = PCO + PCV(\alpha, z). \quad (1)$$

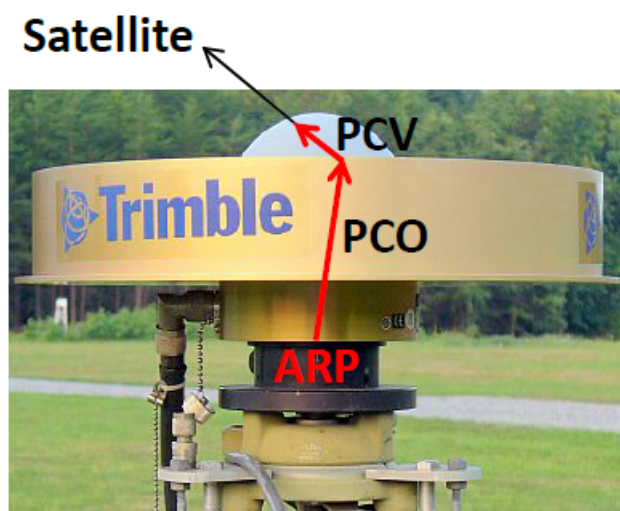


Рис. 1. Фазовый центр GPS антенны:

PCO – смещение фазового центра; PCV – вариации фазового центра; ARP – опорная точка антенны

На сегодняшний день существует три метода создания корректирующей модели вариаций фазовых центров: относительные калибровки, абсолютные калибровки, измерения в безэховой камере.

Существующий метод относительных калибровок NGS дает относительную корректирующую модель для тестируемой антенны по отношению к эталонной и основан на предположении, что эталонная антенна не имеет PCV. Тестовый полигон (рис. 2) состоит из двух фундаментальных пунктов с принудительным центрированием, расположенных вдоль меридиана на расстоянии 5 м. В качестве эталонной антенны используется JPL D/M+CRT. Эталонная и тестируемая антенны подключены к ресиверам типа Ashtech Z-12, использующим рубидиевый генератор в качестве внешнего стандарта частоты [2].

Поскольку опорная антенна является одинаковой для всех тестов, калибровки для нахождения фазовых центров антенн и PCV-смещений для всех тестовых антенн могут выполняться в любой комбинации. Угол отсечки для спутникового созвездия ограничен маской в 10° . Изменение положения фазового центра в зависимости от положения спутникового созвездия определяется отдельно для L1 и L2.



Рис. 2. Стенд NGS калибровки антенн, США, штат Вирджиния

Использование в качестве эталона одной из антенн вызывает определенные сложности, связанные с тем, что поправки зависят от опорной антенны и оценка PCV при низких отметках невозможна из-за появления гораздо большего шума и сильной многолучевости сигнала в данных наблюдений. Кроме того, спутниковое созвездие в месте калибровки не может покрыть равномерно все полушарие антенны, что приводит к появлению «полярной дыры» (рис. 3) [1].

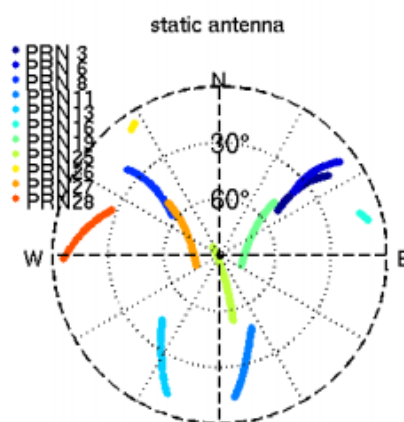


Рис. 3. Полярный график, показывающий азимут и углы возвышения приема сигнала GPS в течение 2 часов для фиксированной антенны

Метод создания абсолютной корректирующей модели основан на автоматических калибровках в реальном времени, с использованием робота (рис. 4), способного изменять свое положение путем наклона и азимутального поворота (GEO++). В случае абсолютной калибровки требуется, чтобы положение антенны было определено с точностью порядка 0,2–0,3 мм, что вызывает необходимость комплексной калибровки самого робота [3–5].



Рис. 4. Робот, выполняющий калибровки антенн (Geo++)

Абсолютная калибровка позволяет оценить зависимость PCV-смещения от высоты спутникового созвездия и азимутальную зависимость. Идентичные многолучевые условия возникают при прохождении одного и того же спутникового созвездия над одной и той же точкой. Различия между PCV-смещениями, выполненными при статических наблюдениях на точке в один день, и наблюдениях с изменением ориентации (повороты и наклоны) в другой день дают возможность определить истинные значения вариаций фазового центра антенны без эффекта многолучевости путем сферического гармонического анализа. Проблема «полярной дыры» при абсолютных калибровках с помощью робота полностью исключается в связи с тем, что спутниковое созвездие в месте калибровки покрывает равномерно все полушарие для движущейся (наклоняемой) антенны (рис. 5) [4, 6].

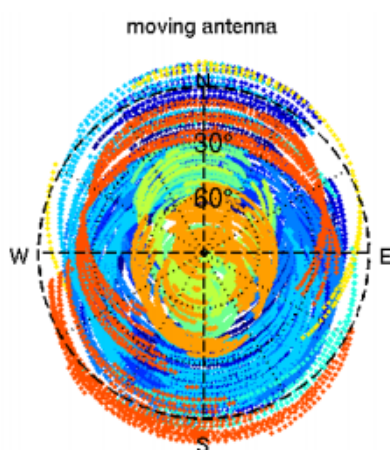


Рис. 5. График приема сигнала GPS в течение 2 часов для движущейся антенны

Калибровка, свободная от эффекта многолучевости, также может быть получена в безэховой камере (рис. 6) аналогичным способом с использованием робота (Uni-Bonn). Отличием является то, что антенна принимает сгенерированный синусоидальный сигнал, а не реальный. В связи с тем, что сгенерированный сигнал, а также условия его приема в процедурах калибровки Geo++ и Uni-Bonn разнятся, возникают отличия и в создаваемых ими корректирующих моделях (L1, L2 на миллиметровом уровне) [7, 8].

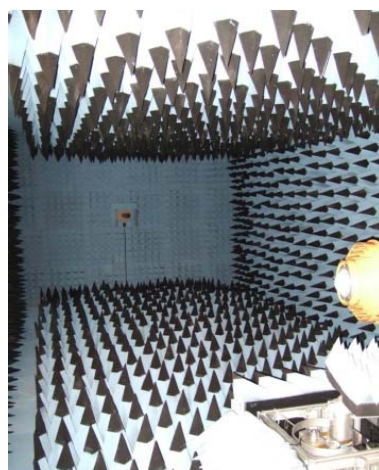


Рис. 6. Калибровка антенны в безэховой камере (Uni-Bonn)

В рамках исследования авторами выполнена оценка влияния использования относительных и абсолютных калибровок путем обработки 10 векторов, имеющих различную длину, возвышение, тип используемого оборудования и геометрию спутникового созвездия (рис. 7). Векторы получены по двухдневным измерениям на 13 пунктах европейской сети постоянно действующих станций EUREF. Файлы наблюдений для данных пунктов были обработаны в программе Trimble Business Center дважды.

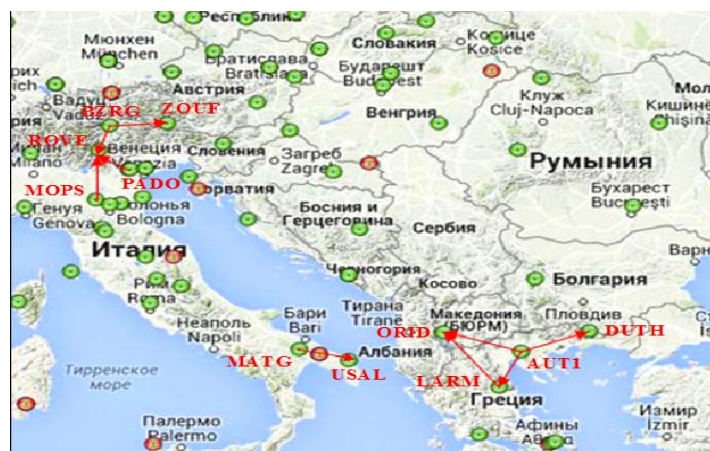


Рис. 7. Схема векторов, используемых для оценки влияния относительных и абсолютных калибровок

Первое сетевое решение использовало значения относительных калибровок IGS из программного обеспечения Trimble Business Center. Второе решение основано на абсолютных калибровках, полученных из файла igs_antennas.atx.

Различия двухдневных решений векторов, полученных на основе абсолютных и относительных калибровок, представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Различия двухдневных решений векторов, полученных на основе абсолютных и относительных калибровок

От точки	До точки	Точность в плане, м	Точность по высоте, м	ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м	Эллиптические расстояния, м
LARM	ORID	0,007	0,012	-0,006	-0,002	0,001	215 763,842
AUT1	LARM	0,005	0,009	0,014	0,004	0,003	118 103,210
AUT1	DUTH	0,008	0,012	0,005	0,004	0,003	173 421,014
AUT1	ORID	0,006	0,009	0,006	0,003	0,004	196 453,647
BZRG	ZOUF	0,006	0,008	0,005	0,006	0,002	125 741,023
BZRG	ROVE	0,003	0,005	0	0,006	0,002	71 046,316
MOPS	ROVE	0,005	0,009	-0,003	0,006	0,004	140 682,970
PADO	ROVE	0,003	0,006	-0,004	0,006	0,003	85 467,444
MATE	USAL	0,008	0,012	0	0,001	0,005	124 281,558
KAD 6	VAE6	0,004	0,008	-0,001	0	-0,003	118 786,574

Таблица 2

Разности абсолютных и относительных калибровок векторов на плоскости в проекции Гаусса – Крюгера

Векторы	Разности абсолютных и относительных калибровок		
	x , м	y , м	H , м
AUT1-LARM	0,005	0	-0,004
LARM-ORID	-0,008	-0,001	0,013
AUT1-DUTH	-0,002	0,002	0,006
AUT1-ORID	-0,002	0,001	0,007
BZRG-ZOUF	-0,003	0,005	0,006
BZRG-ROVE	0	0,006	0,003
MOPS-ROVE	0,003	0,007	0,002
PADO-ROVE	0,004	0,007	0
MATE-USAL	0,003	0,001	0,003
KAD6-VAE6	0	0,001	-0,003

Для исключения (ослабления) эффекта многолучевости, обусловленной отражениями радиосигналов от тех или иных отражающих поверхностей, для уменьшения атмосферных погрешностей и др., во всех программных продуктах

для обработки GNSS-измерений используется понятие маски по углу возвышения – угол, отсчитываемый от горизонта, ниже которого спутники не используются. Использование минимального угла отсечки позволяет оценить и в большей степени исключить тропосферные и ионосферные задержки, однако для работ на участках, имеющих местные препятствия, для исключения многолучевости сигнала приходится увеличивать значение маски возвышения.

Оценка влияния использования различных масок по углу возвышения выполнена для ранее используемых векторов сети EUREF путем обработки каждого вектора с различной маской по углу возвышения в 5, 10, 15 и 20° в программе Trimble Business Center. Разности использования исходного значения маски в 5° и других значений маски для векторов приведены в табл. 3, 4.

Таблица 3

Пространственные разности использования исходного значения маски в 5° и других значений маски для векторов сети EUREF

Векторы	Разности								
	5–10°			5–15°			5–20°		
	ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м	ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м	ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м
AUT1-LARM	0,005	0,002	0,005	0,007	0,005	0,007	0,007	0,006	0,006
LARM-ORID	0,008	0,003	0,006	0,011	0,006	0,005	0,011	0,005	0,005
AUT1-DUTH	0	0	-0,001	-0,003	0	-0,001	-0,006	-0,005	-0,006
AUT1-ORID	-0,001	-0,001	0	0,001	0,003	0,003	0,003	0,007	0,005
BZRG-ZOUF	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,002	-0,003	-0,004
BZRG-ROVE	0,001	-0,001	0,003	0,006	0	0,008	0,012	0,001	0,013
MOPS-ROVE	0,008	0,001	0,005	0,011	0	0,009	0,021	0	0,019
PADO-ROVE	0,005	-0,001	0,004	0,01	-0,001	0,01	-0,003	0	-0,009
MATE-USAL	-0,001	0,003	0,002	-0,001	0,005	-0,002	-0,001	0,008	0,002
KAD6-VAE6	0,001	0,001	0,004	-0,001	0,001	0,001	-0,002	0,001	0

Таблица 4

Разности исходного значения маски в 5° и других значений маски для векторов на плоскости в проекции Гаусса – Крюгера

Векторы	Разности, м								
	5–10°			5–15°			5–20°		
	Север	Восток	Высота	Север	Восток	Высота	Север	Восток	Высота
AUT1-LARM	0	0	0,007	0	0,002	0,011	-0,001	0,003	0,010
LARM-ORID	-0,001	-0,001	0,011	-0,004	0,001	0,013	-0,004	0	0,013
AUT1-DUTH	-0,001	0	-0,001	0,001	0,001	-0,003	0	-0,002	-0,010
AUT1-ORID	0	0	-0,001	0,001	0,003	0,003	0	0,006	0,007
BZRG-ZOUF	0	-0,001	-0,001	0	-0,001	-0,001	-0,001	-0,003	-0,004
BZRG-ROVE	0,001	-0,001	0,003	0,001	-0,001	0,010	0	-0,001	0,018

Векторы	Разности, м								
	5–10°			5–15°			5–20°		
	Север	Восток	Высота	Север	Восток	Высота	Север	Восток	Высота
MOPS-ROVE	-0,002	0	0,009	-0,001	-0,002	0,014	-0,001	-0,004	0,028
PADO-ROVE	0	-0,002	0,006	0,001	-0,003	0,014	-0,004	0	-0,008
MATE-USAL	0,001	0,003	1	-0,002	0,005	-0,001	0	0,008	0,002
KAD6-VAE6	0,001	0,001	0,004	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	-0,001

Наличие купола у антенны также является фактором, влияющим на прием сигнала. В общем случае антенна с куполом должна рассматриваться как другой тип антенны со своими собственными характеристиками и особенностями.

Значительные различия в фазовых вариациях антенн играют как форма купола антенны, так и конструкция купола с точки зрения материалов и расположения купола относительно самой антенны [9].

Наиболее используемыми куполами можно назвать купола SCIS (SCIT) и LEIS (LEIT). SCIS купол фиксируется стальными винтами и является более надежным, изготовлен из жесткого пластика. Антенна полностью находится под куполом, так как диаметр купола превышает на 3 см диаметр антенны. LEIS купол ввинчивается непосредственно в кольцо корпуса антенны пластмассовыми винтами, образуя полусферическую крышку с вертикальными стенками (рис. 8).



Рис. 8. Внешний вид куполов Leica LEIS и SCIS для антенны LEIAT504

Оценка влияния использования различных куполов при обработке используемых ранее векторов сети EUREF представлена в табл. 5, 6.

Таблица 5

Влияние использования различных куполов
при обработке векторов сети EUREF

Векторы (типы куполов)	Без куполов			С куполом			Разности		
	ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м	ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м	ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м
AUT1-LARM (LEIS-LEIT)	83 113,661	-22 163,639	-80 929,115	...,661	...,639	...,115	0	0	0
AUT1-LARM (OLGA-LEIM)	83 113,661	-22 163,639	-80 929,115	...,688	...,628	...,092	-0,027	-0,011	-0,023
BZRG-ZOUF (LEIT-SCIT)	-29 947,446	122 024,79	5 625,362	...,450	...,78	...,354	0,004	0,003	0,008
BZRG-ZOUF (SCIT-SCIS)	-29 947,446	122 024,79	5 625,362	...,420	...,800	...,393	-0,029	-0,009	-0,031
PADO-ROVE (LEIS-LEIS)	-24 201,437	-72 830,624	37 616,197	...,440	...,618	...,200	-0,001	-0,006	-0,003
MATE-USAL (LEIS-LEIS)	-14 407,636	120 495,55	-26 839,203	...,640	...,550	...,200	0	0	-0,003
KAD6-VAE6 (LEIT-LEIT)	88 642,312	-66 396,969	-42 947,138	...,312	...,970	...,138	0	0,001	0
KAD6-VAE6 (SCIS-SCIS)	88 642,312	-66 396,969	-42 947,138	...,311	...,970	...,139	0,001	0,001	0,001
KAD6-VAE6 (SCIT-SCIT)	88 642,312	-66 396,969	-42 947,138	...,311	...,970	...,138	0,001	0,001	0

Таблица 6

Разности приращений координат векторов на плоскости
в проекции Гаусса – Крюгера при использовании различных куполов

Векторы	Тип купола	Разности абсолютных и относительных калибровок		
		X , м	Y , м	H , м
AUT1-LARM	(LEIS-LEIT)	0	0	0
AUT1-LARM	(OLGA-LEIM)	0,001	0	-0,038
BZRG-ZOUF	(LEIT-SCIT)	0	0,009	0,010
BZRG-ZOUF	(SCIT-SCIS)	-0,002	-0,003	-0,042
PADO-ROVE	(LEIS-LEIS)	-0,003	-0,007	0
MATE-USAL	(LEIS-LEIS)	-0,005	-0,001	0,001
KAD6-VAE6	(LEIT-LEIT)	0	0,001	0
KAD6-VAE6	(SCIS-SCIS)	-0,001	0,001	0,002
KAD6-VAE6	(SCIT-SCIT)	-0,001	0	0,001

Как видно выше, факторов, влияющих на изменение PCV, много (геометрия спутникового созвездия, возвышение спутников над горизонтом, форма ку-

полов антенн, материал куполов, эффект многолучевости и др.) и их природа еще не до конца изучена. Представленные результаты использования относительных и абсолютных корректирующих моделей согласуются с другими исследованиями подобного рода [7, 10–13]. Согласно расчетам, можно с уверенностью утверждать, что для достижения миллиметровой точности обязательным условием является использование калибровок фазовых центров антенн, указание точного типа антенны, типа купола и маски по углу возвышения. Обработка значительных по масштабу сетей требует абсолютных калибровок, позволяющих оценить зависимость РСВ-смещения от высоты спутникового созвездия и азимутальную зависимость и полностью устранить проблему «полярной дыры». Нерешенными остаются проблемы, связанные с ошибками, возникающими из-за эффекта многолучевости, а также из-за тропосферных эффектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Differences between GPS receiver antenna calibration models and influence on geodetic positioning / Q. Baire, W. Aerts, C. Bruyninx, E. Pottiaux, J. Legrand // AGU Fall Meeting. – San Francisco, December 2012
2. Gerald L. Mader. GPS antenna calibration at the National Geodetic Survey // National Geodetic Survey N/NG56, 1315 East-West Highway, Silver Spring, MD 20810.
3. Martin Schmitz, Gerhard Wübbena, Gerald Boettcher. Absolute Receiver Antenna Calibrations with a Robot // IGS Workshop «Towards Real-Time» (Ottawa, April 8–11, 2002). – Canada, 2012.
4. Martin Schmitz, Gerhard Wübbena, Gerald Boettcher. Absolute Receiver Antenna Calibrations with a Robot // IGS Workshop «Towards Real-Time» (Ottawa, April 8–11, 2002). – Canada, 2012.
5. Aristidis Fotiou, Christos Pikridas, Miltiadis Chatzinikos. GPS antenna: from relative to absolute // Coordinates. – March 28-30, 2008.
6. Schmitz M. Special Tests of Phase Center Variations of Various GPS Antennas and Some Results / M. Schmitz Ed. Spezielle Untersuchungen und Ergebnisse zum PCV von GPS-Antennen, Wissenschaftliche Arbeiten Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Festschrift Prof. G. Seeber zum 60. Geburtstag, Nr. 239, Hannover, 2001, pp. 101–112.
7. Volksen Ch. The importance of correct antenna calibration models for the EUREF Permanent Network // National report the federal republic of Germany on the geodetic activities in the years 1999–2003. – München 2003.
8. Zeimetz P., Kuhlman H. On the Accuracy of Absolute GNSS Antenna Calibration and the Conception of a New Anechoic Chamber // FIG Working Week 2008 (Stockholm, 14-19 June, 2008). – Sweden, 2008.
9. Dawidowicz Karol Antenna calibration models in height determinations in ASG-EUPOS' POZGEO-D service – a case study // Artificial satellites. – 2012. – Vol. 47, No. 4.
10. Schmid Ralf, Mader Gerry, Herring Tom From Relative to Absolute Antenna Phase Center Corrections // IGS. Session 10: Antenna effects. – 2010. – P. 209–219.
11. Results of Absolute Field Calibration of GPS Antenna PCV. ION GPS-98 / M. Falko, G. Seeber, Ch. Volksen, G. Wübbena, M. Schmitz // Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (Nashville, TN, 15-18 Sept. 2008). – United States, 2008. – P. 31–38.
12. Rothacher M. Comparison of Absolute and Relative Antenna Phase Center Variations // GPS Solutions. – 2001. – Vol. 4. – P. 55–60.

13. Absolute phase center corrections of satellite and receiver antennas. Impact on GPS solutions and estimation of azimuthal phase center variations of the satellite antenna / R. Schmid, M. Rothacher, D. Thaller, P. Steigenberger // GPS Solutions. – 2005. – Vol. 9 (4). – 283–293.
Получено 08.09.2016

© В. В. Ялтыхов, К. И. Маркович, 2016

TO THE QUESTION OF USING OF VARIOUS MODELS OF CALIBRATIONS GPS-ANTENNAS, TYPES OF DOMES, MASKS ON THE ANGLE OF ELEVATION AT PROCESSING GNSS-MEASUREMENTS

Vadym V. Yaltykhov

Polotsk State University, 211440, Belarus, Novopolotsk, 29 Blochin St., Ph. D., Associate Professor, Department of Geodesy and Fotogrammetry, tel. 375(29)7198881, e-mail: v7155477yandex.by

Kiryll I. Markovich

Polotsk State University, 211440, Belarus, Novopolotsk, 29 Blochin St., Master of Technical Sciences, an Assistant, Department of Geodesy and Cadastre, tel. 375(29)5981760, e-mail: markovich.kirill@mail.ru

The paper presents an analysis of the main factors limiting the accuracy of positioning using GNSS-measurements (especially vertical component), methods of creating models corrective phase variations centers GPS-antenna. Assessing the impact of the relative and absolute calibrations, types of domes and the elevation masks of processing GNSS-measurements performed. The study included 10 treatment vector obtained by a two-day measurements at 13 points of a European network of permanent stations EUREF. Vectors have different lengths, elevation, type of equipment used and the geometry of the satellite constellation. Dependence of changes of azimuth and altitude variations of the components of the phase center of the antenna defined (PCV - Phase Center Variations). The paper shows that to achieve millimeter accuracy prerequisite is the use of absolute calibration of phase centers of the antennas, specify the exact type of antenna, such as the dome and the mask in elevation.

Key words: variations of the phase centers, calibrations, multipath, mask on the angle of elevation, GPS antenna, GNSS-measurement, anechoic chamber, european network EUREF.

REFERENCES

1. Baire, Q., Aerts, W., Bruyninx, C., Pottiaux, E., & Legrand, J. (December, 2012). Differences between GPS receiver antenna calibration models and influence on geodetic positioning. *AGU Fall Meeting*. San Francisco
2. Gerald L. Mader. GPS antenna calibration at the National Geodetic Survey // National Geodetic Survey N/NG56, 1315 East-West Highway, Silver Spring, MD 20810.
3. Martin Schmitz, Gerhard Wübbena, & Gerald Boettcher. (April 8–11, 2012). Absolute Receiver Antenna Calibrations with a Robot. *IGS Workshop «Towards Real-Time»*. Ottawa, Canada.
4. Martin Schmitz, Gerhard Wübbena, & Gerald Boettcher. (April 8–11, 2012). Absolute Receiver Antenna Calibrations with a Robot. *IGS Workshop «Towards Real-Time»*. Ottawa, Canada.
5. Aristidis Fotiou, Christos Pikridas, & Miltiadis Chatzinikos. (March 28-30, 2008). GPS antenna: from relative to absolute. *Coordinates*.
6. Schmitz, M. (2001). Special Tests of Phase Center Variations of Various GPS Antennas and Some Results. M. Schmitz (Ed.). *Spezielle Untersuchungen und Ergebnisse zum PCV von*

GPS-Antennen, Wissenschaftliche Arbeiten Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Festschrift Prof. G. Seeber zum 60, Geburtstag, Nr. 239, Hannover, pp. 101–112.

7. Ch. Volksen. (2003). The importance of correct antenna calibration models for the EUREF Permanent Network. *National report the federal republic of Germany on the geodetic activities in the years 1999–2003*. München.

8. Zeimetz, P., & Kuhlman, H. (14-19 June, 2008). On the Accuracy of Absolute GNSS Antenna Calibration and the Conception of a New Anechoic Chamber. *FIG Working Week 2008 Stockholm, Sweden*.

9. Karol Dawidowicz. (2012). Antenna calibration models in height determinations in ASG-EUPOS' POZGEO-D service – a case study. *Artificial satellites*, 47(4).

10. Ralf Schmid, Gerry Mader, & Tom Herring. (2010). From Relative to Absolute Antenna Phase Center Corrections. *IGS. Session 10: Antenna effects* (pp. 209–219).

11. Falko, M., Seeberm G., Völksenm Ch., Wübbenam G., & Schmitzm M. (15-18 Sept., 2008). Results of Absolute Field Calibration of GPS Antenna PCV. ION GPS-98. *Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation* (pp. 31–38). Nashville, TN, United States.

12. Rothacher M. (2001). Comparison of Absolute and Relative Antenna Phase Center Variations. *GPS Solutions*, 4, 55–60.

13. Schmid, R., Rothacher, M., Thaller, D., & Steigenberger, P. (2005). Absolute phase center corrections of satellite and receiver antennas. Impact on GPS solutions and estimation of azimuthal phase center variations of the satellite antenna. *GPS Solutions*, 9(4), 283–293.

Received 08.09.2016

© V. V. Yaltykhov, K. I. Markovich, 2016