

УДК 528.48

## ВАРИАЦИИ ФАЗОВЫХ ЦЕНТРОВ РАЗЛИЧНЫХ GPS-АНТЕНН АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АБСОЛЮТНЫХ И ОТНОСИТЕЛЬНЫХ КАЛИБРОВОК АНТЕНН

канд. техн. наук, доц. **В.В. ЯЛТЫХОВ**; **К.И. МАРКОВИЧ**  
(Полоцкий государственный университет)

*Представлен анализ пространственного изменения положений фазовых центров различных GPS-антенн в зависимости от направления сигнала от спутника. Определены зависимости изменений азимутальных и высотных составляющих вариаций фазовых центров антенн. Даны рекомендации по использованию соответствующих типов калибровок вариаций фазовых центров.*

Как известно, точка, положение которой может быть определено при спутниковых измерениях, является фазовым центром (PCV – Phase Center Variations) GPS-антенны. Однако реальная антенна не имеет четко определенного фазового центра. Вместо этого положение фазового центра есть функция 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. Это среднее место фазового центра является средневзвешенным всех отдельных фазовых центров по каждому из измерений. При расчете коротких базовых линий эти изменения не имеют значительного влияния и на каждом конце линии практически равны. Однако различные типы антенн все же имеют различные вариации фазы и различную чувствительность к углу отсечки спутников и геометрии спутникового созвездия, что необходимо учитывать.

Практика применения любых типов GPS-антенн показывает необходимость знания вариаций фазовых центров для достижения миллиметровой точности при спутниковых измерениях базовых линий. На сегодняшний день существует два типа калибровок антенн по учету вариаций фазовых центров: абсолютные калибровки и относительные.

Основным недостатком относительных калибровок является то, 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». Существующая процедура NGS калибровки антенн использует полевые измерения для определения относительного фазового центра и PCV по отношению к эталонной антенне. Схема тестового полигона для проведения относительных NGS калибровок представлена на рисунке 1 [1].

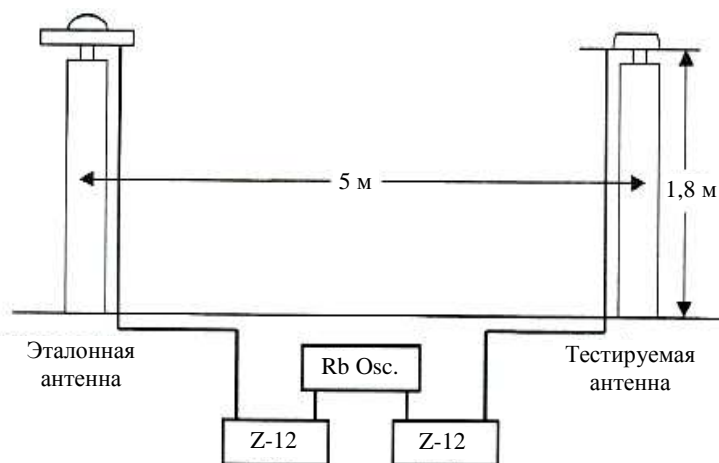


Рисунок 1 – Стенд NGS калибровки антенн, США, штат Virginia

Тестовый полигон состоит из двух фундаментальных пунктов с принудительным центрированием, расположенных вдоль меридиана на расстоянии 5 м. В качестве эталонной антенны используется антенна типа JPL D/M+CRT. Эталонная и тестируемая антенны подключены к ресиверам типа Ashtech Z-12, использующим рубидиевый генератор в качестве внешнего стандарта частоты. Подобный тест дает относительную калибровку тестируемой антенны по отношению к эталонной антенне.

Абсолютные калибровки антенн лишены практически всех недостатков, присущих относительным калибровкам, в том числе и эффекта многолучевости. Подход основан на автоматических калибровках в реальном времени, с использованием робота (рис. 2), способного изменять свое положение путем наклона и азимутального поворота. Калибровка позволяет не только оценить зависимость РСВ-смещения от высоты спутникового созвездия, но и азимутальную зависимость [2; 3].

Идентичные многолучевые условия возникают при прохождении одного и того же спутникового созвездия над одной и той же точкой. Различия между РСВ-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. Калибровка, свободная от эффекта многолучевости, также может быть получена в безэховой камере (рис. 3) аналогичным способом с использованием робота [4]. Отличием является то, что антенна принимает сгенерированный синусоидальный сигнал, а не реальный.



Рисунок 2 – Робот DSNDGU\_002\_UHF\*, выполняющий абсолютные калибровки антенн

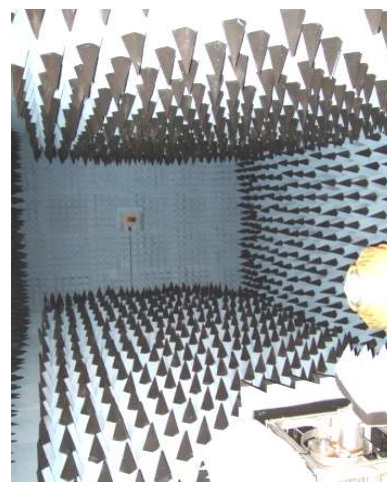


Рисунок 3 – Абсолютная калибровка в безэховой камере

Существует ещё один фактор, который влияет на приём сигнала. Этим фактором является наличие купола у антенны. В общем случае антенна с куполом должна рассматриваться как другой тип антенны со своими собственными характеристиками и особенностями.

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. 4).



Рисунок 4 – Схема векторов, используемых для оценки влияния использования относительных и абсолютных калибровок

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. В первом сетевом решении использовались значения относительных калибровок IGS из программного обеспечения Trimble Business Center; во втором – абсолютные калибровки, полученные из файла *igs\_antennas.atx*.

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

**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)	$\Delta X$ (м)	$\Delta Y$ (м)	$\Delta Z$ (м)	Эллипсоидальное расстояние (м)
LARM	ORID	0,007	0,012	-0,006	-0,002	0,001	215763,842
AUT1	LARM	0,005	0,009	0,014	0,004	0,003	118103,210
AUT1	DUTH	0,008	0,012	0,005	0,004	0,003	173421,014
AUT1	ORID	0,006	0,009	0,006	0,003	0,004	196453,647
BZRG	ZOUF	0,006	0,008	0,005	0,006	0,002	125741,023
BZRG	ROVE	0,003	0,005	0	0,006	0,002	71046,316
MOPS	ROVE	0,005	0,009	-0,003	0,006	0,004	140682,970
PADO	ROVE	0,003	0,006	-0,004	0,006	0,003	85467,444
MATE	USAL	0,008	0,012	0	0,001	0,005	124281,558
KAD 6	VAE6	0,004	0,008	-0,001	0	-0,003	118786,574

Для наглядности пространственные разности абсолютных и относительных калибровок векторов представлены на плоскости в проекции Гаусса – Крюгера (табл. 2).

**Таблица 2 – Разности абсолютных и относительных калибровок векторов на плоскости в проекции Гаусса – Крюгера**

Векторы	Разности абсолютных и относительных калибровок		
	$\Delta x$ , м	$\Delta y$ , м	$\Delta H$ , 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

Использование различных калибровок – один из нескольких факторов, влияющих на результаты спутниковых измерений. Большое значение имеет влияние внешней среды на результаты спутниковых измерений, проявляющееся как через изменения времени прохождения радиосигналов от спутника до приемника, так и через возникновение многолучевости, обусловленной отражениями радиосигналов от тех или иных отражающих поверхностей. В некоторых случаях используется понятие «маска по углу возвышения» – это угол, отсчитываемый от горизонта, ниже которого спутники не используются. Применение 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 в программе Trimble Business Center с различной маской по углу возвышения: 5°, 10°, 15 и 20°.

Пространственные разности использования исходного значения маски в 5° и других значений маски для векторов приведены в таблице 3. Разности исходного значения маски в 5° и других значений маски для векторов на плоскости в проекции Гаусса – Крюгера представлены в таблице 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°		
	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , 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								
	5...10°			5...15°			5...20°		
	$\Delta x$ , м	$\Delta y$ , м	$\Delta H$ , м	$\Delta x$ , м	$\Delta y$ , м	$\Delta H$ , м	$\Delta x$ , м	$\Delta y$ , м	$\Delta H$ , м
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
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

Также фактором, влияющим на прием сигнала, является наличие купола у антенны. В общем случае антенна с куполом должна рассматриваться как другой тип антенны со своими собственными характеристиками и особенностями. Значительное влияние на вариации фазовых центров антенн оказывают как форма купола антенны, так и его конструкция с точки зрения материалов и расположения купола относительно самой антенны.

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. 5).



**Рисунок 5 – Внешний вид куполов Leica LEIS и SCIS  
для антенны LEIAT504**

Выполненная оценка влияния использования различных куполов при обработке используемых ранее векторов сети EUREF представлена в таблице 5.

**Таблица 5 – Влияние использования различных куполов при обработке векторов сети EUREF**

Вектор (Тип купола)	Без куполов			С куполом			Разности		
	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м
AUT1-LARM (LEIS-LEIT)	83113,661	-22163,639	-80929,115	...,661	...,639	...,115	0	0	0
AUT1-LARM (OLGA-LEIM)	83113,661	-22163,639	-80929,115	...,688	...,628	...,092	-0,027	-0,011	-0,023
BZRG-ZOUF (LEIT-SCIT)	-29947,446	122024,79	5625,362	...,450	...,78	...,354	0,004	0,003	0,008
BZRG-ZOUF (SCIT-SCIS)	-29947,446	122024,79	5625,362	...,420	...,800	...,393	-0,029	-0,009	-0,031
PADO-ROVE (LEIS-LEIS)	-24201,437	-72830,624	37616,197	...,440	...,618	...,200	-0,001	-0,006	-0,003
MATE-USAL (LEIS-LEIS)	-14407,636	120495,55	-26839,203	...,640	...,550	...,200	0	0	-0,003
KAD6-VAE6 (LEIT-LEIT)	88642,312	-66396,969	-42947,138	...,312	...,970	...,138	0	0,001	0
KAD6-VAE6 (SCIS-SCIS)	88642,312	-66396,969	-42947,138	...,311	...,970	...,139	0,001	0,001	0,001
KAD6-VAE6 (SCIT-SCIT)	88642,312	-66396,969	-42947,138	...,311	...,970	...,138	0,001	0,001	0

Разности приращений координат векторов на плоскости в проекции Гаусса – Крюгера, полученные при использовании различных куполов, представлены в таблице 6.

**Таблица 6 – Разности приращений координат векторов на плоскости в проекции Гаусса – Крюгера при использовании различных куполов**

Векторы	Типы купола	Разности абсолютных и относительных калибровок		
		$\Delta x$ , м	$\Delta y$ , м	$\Delta H$ , 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

**Заключение.** Результаты проведенного исследования свидетельствуют, что для достижения высокой точности при работе с любыми типами антенн необходимо использовать калибровки. Из представленных выше примеров видно, что вариации фазовых центров для любой антенны могут быть определены только на основании детальных исследований высокой точности. Факторами, влияющими на изменение фазового центра GPS-антенны, являются: геометрия спутникового созвездия, возвышение спутников над горизонтом, форма куполов антенн, материал куполов, эффект многолучевости. Однако их природа еще не до конца изучена. Относительные калибровки неплохо зарекомендовали себя при малых сетях с короткими базовыми линиями. Обработка значительных по масштабу сетей требует абсолютных калибровок, а также учета ряда факторов. Активное использование абсолютных калибровок PCV открывает новые перспективы для будущих исследований. Обязательным является точное изучение ошибок, возникающих из-за эффекта многолучевости, а также из-за тропосферных эффектов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Mader, Gerald L. GPS antenna calibration at the National Geodetic Survey / L. Gerald Mader // National Geodetic Survey N/NG56, 1315 East-West Highway, Silver Spring, MD 20810.
2. 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, P. 101–112.
3. Schmitz, M. Absolute Receiver Antenna Calibrations with a Robot / Martin Schmitz, Gerhard Wübbena, Gerald Boettcher // IGS Workshop "Towards Real-Time", April 8–11, 2002, Ottawa, Canada.
4. Volksen, Ch. The importance of correct antenna calibration models for the EUREF Permanent Network / Ch. Volksen // National Report of the Federal Republic of Germany on the Geodetic Activities in the Years 1999–2003. – München, 2003.

Поступила 02.12.2015

#### VARIATIONS OF THE PHASE CENTERS OF VARIOUS GPS ANTENNAS ANALYSIS OF THE USE OF ABSOLUTE AND RELATIVE CALIBRATIONS OF ANTENNAS

**V. YALTYHOV, K. MARKOVICH**

*The article is devoted to the analysis of the spatial variation of phase center of various GPS-antennas depending on the direction of the signal from the satellite. Dependence of change azimuthal and the high-rise making variations of the phase centers of antennas are defined. Recommendations about use of the corresponding types of calibrations of variations of the phase centers are made.*