

**А. А. Жалило, А. А. Желанов, Д. А. Шелковенков, В. М. Шокало**

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

# Оценка точности калибровки положения и вариаций фазовых центров приемных GPS/GNSS-антенн

*Надійшла до редакції 13.12.07*

Запропоновано простий у реалізації метод верифікації фазових характеристик GPS/GNSS-антен у конкретних умовах експлуатації. Метод допускає використання однієї близько розташованої еталонної базової станції з точними координатами середнього фазового центра (СФЦ) приймальної антени й точних фазових калібрувань. Він дозволяє без використання дорогої спеціалізованого устаткування провести оцінку фазових характеристик антен та їхній вплив на точність визначення. Представлено результати верифікації використовуваних фазових калібрувань антен GPS-600LB, GPS-702 (NovAtel Inc., Канада) для антенного поста станції SURE (ХНУРЕ). Отримано задовільний збіг (на рівні 1–1.5 мм) оцінок зсувів СФЦ зі значеннями, які отримані фірмою Geo++ GmbH (Німеччина) із застосуванням спеціалізованих роботів. Проведена серія експериментальних досліджень із використанням GPS/GNSS-антен геодезичного класу дозволила оцінити якість використовуваних фазових корекцій і їхній вплив на точність планових і вертикальних координат, а також підвищити точність визначення координат антени станції SURE (ХНУРЕ). Викладено методичні рекомендації з установки антенних постів, контролю й верифікації фазових калібрувань прийомних антен GPS/GNSS-станцій для виконання координатних визначень із міліметровою точністю.

## ВВЕДЕНИЕ

Для определения местоположения с использованием сигналов GPS/GNSS на сантиметровом и миллиметровом уровне точности используют точные фазовые наблюдения. Областями применения столь точных технологий являются геодезическая и кадастровая съемка, мониторинг движек грунта, деформаций зданий, плотин, мониторинг оползней и др. Для решения таких задач возникает задача точного учета положения фазового центра и фазовых характеристик приемных антенн [3, 5–18, 20].

Фазовая характеристика — это зависимость фазовой задержки сигнала от углового положения (по азимуту и по углу места) источников навигационных сигналов. Обычно для описания и расчетов используются следующие параметры. В качестве референцной точки антенны используется точка пересечения плоскости нижнего

реза конструкции антенны и вертикальной оси ее вращения. Поскольку GPS/GNSS-антенны предназначены для приема сигналов практически из всей верхней полусфера, то из-за неоднородностей фазовой диаграммы направленности определяют положение так называемого среднего фазового центра (СФЦ) и отклонения фазовой диаграммы (вариации фазового центра, ВФЦ или РСВ) относительно СФЦ. Величина вариаций фазового центра обычно охватывает диапазон от миллиметров до нескольких сантиметров [3, 5–8, 20–24].

Важно также отметить, что для каждой из несущих частот L1, L2 GPS, а также для комбинированной частоты L0 («безионосферная» комбинация фазовых наблюдений на L1 и L2) и значения СФЦ, и значения ВФЦ различаются, хотя для современных антенн эти различия невелики [14, 15, 18]. Вариации положения фазового центра обычно охватывают диапазон

от миллиметров до нескольких сантиметров.

Задача оценки и учета фазовых характеристик GNSS-антенн известна давно, и остается актуальной по сей день, несмотря на непрерывные усовершенствования техники приема и обработки навигационных сигналов и измерительной информации глобальных навигационных спутниковых систем GPS/GNSS.

Разработано достаточно много методов и способов калибровки и верификации (проверки) фазовых характеристик GPS/GNSS-антенн. О сложности учета и определения фазовых коррекций антенн говорят постоянные поиски новых методов производства антенн с улучшенными фазовыми характеристиками, а также эффективных методов поверки и калибровки, позволяющих наилучшим образом учесть неравномерности фазовых диаграмм антенн. Калибровка антенн с широкой диаграммой направленности, охватывающей почти всю верхнюю полусферу, так же как и задача верификации фазовых коррекций, являются ключевыми задачами на пути получения наивысшей точности координатно-временных определений.

В Харьковском национальном университете радиоэлектроники (ХНУРЭ) в лаборатории спутниковых технологий точного позиционирования кафедры OPT развернута и введена в действие базовая GPS/EGNOS-станция SURE геодезического класса. При решении задачи пространственного определения координат станции возникла проблема проверки в условиях эксплуатации станции соответствия положения СФЦ и калибровок фазовой диаграммы приемной антенны заявленным производителем значениям. Это нужно для итоговой «привязки» СФЦ к физической реперной точке (ARP) с точностью не хуже нескольких миллиметров.

Таким образом, актуальна задача оценки (верификации) точности использования априорных фазовых характеристик приемных антенн и их калибровок в конкретных условиях эксплуатации для прецизионного определения положения антенн базовых станций и выполнения координатных определений с наивысшей точностью.

Ниже мы предлагаем простой и практичный вариант верификации фазовых коррекций GPS/GNSS-антенн в конкретных условиях эксплуатации, включающий в себя функции верификации фазовых калибровок.

## СУЩНОСТЬ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК GPS/GNSS-АНТЕНН

Методика верификации фазовых калибровок предполагает использование одной близко расположенной базовой станции с точными координатами приемной антенны и известными фазовыми характеристиками. Измерительная база при этом не должна превышать 1—1.5 км, что позволяет при обработке линейных комбинаций фазовых наблюдений обеих несущих частот GPS/ГЛОНАСС практически исключить (или компенсировать с помощью моделей) медленно изменяющиеся эфемеридные, тропосферные и ионосферные погрешности наблюдений. Для станции ХНУРЭ оптимальным является использование станции KHAS (GPS-приемник Trimble 400SSI с эталонированной антенной типа Dorne/Margolin\_T CHOKER RING), входящей в состав сети IGS (International GNSS Service). Эта станция расположена на территории ННЦ «Институт метрологии» на расстоянии 1.3 км от GPS-станции ХНУРЭ (SURE).

Рассматриваемая методика использует свойство системы GPS, согласно которому по прошествии суток спутниковая конфигурация GPS практически повторяется со сдвигом на 4 мин. Поэтому можно считать, что каждые новые сутки условия измерений идентичны условиям в предыдущие сутки. Это полезное свойство системы GPS позволяет реализовать дискретное вращение антennы с суточным интервалом наблюдений для фиксированного угла поворота и с повторением спутниковой конфигурации для каждой фиксации. Обработка наблюдений после серии вращений (до полного оборота) тестируемой антennы вокруг своей оси относительно неподвижной эталонной антенн базовой станции позволяет выявить наличие изменения положения СФЦ относительно оси вращения.

Методика предполагает выполнение следующих действий.

1. Тестируемая приемная антenna устанавливается в месте, где будет производиться ее штатная эксплуатация. Антenna изначально должна быть ориентирована в направлении на север (производители антенн геодезического класса указывают ориентир на антенне), поскольку все калибровки фазовых характеристик

антенн привязаны к этому направлению. При таком положении антенны проводятся суточные наблюдения с синхронными наблюдениями на базовой станции с эталонной антенной.

2. Тестируемая антenna на каждом последующем суточном цикле наблюдений перед началом цикла поворачивается вокруг своей оси на фиксированный угол, например  $\Delta\varphi = 45^\circ$  или  $\Delta\varphi = 90^\circ$ . Таким образом проводится полный цикл наблюдений до достижения полного оборота антенны. Важно повторить измерения в положении  $360^\circ$  (исходное положение) для оценки повторяемости результатов.

3. После завершения полного цикла наблюдений и их регистрации осуществляется посуточная совместная обработка наблюдений обоих приемников с использованием специализированных программных пакетов (в нашем случае OCTAVA-РРА (ГАО НАН Украины) и GrafNav/GrafNet (NovAtel/WPC)), которые позволяют определить вектор измерительной базы относительно референцного приемника с миллиметровой точностью. В ходе обработки каждой суточной сессии важно протестировать зависимость координат СФЦ антенны от угла маскирования  $\alpha$  (как правило,  $\alpha = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ ). Поэтому для каждой суточной сессии можно образовать три набора оценок координат.

4. Наличие и значение эксцентриситета плановых координат СФЦ относительно оси вращения антенны определяются в результате оценки среднего значения координат по суткам (для каждого значения угла маскирования) и оценки отклонений каждой выборки координат от среднего значения, близкого к оси вращения антенны.

Расчеты проводятся по следующим формулам: среднее значение для широты —

$$B_{\text{cp}} = \sum_{i=1}^k B_i / k,$$

отклонение по широте на  $i$ -е сутки —

$$\Delta B_i = B_i - B_{\text{cp}}^{(15)},$$

где  $B_{\text{cp}}^{(15)}$  — среднее значение при угле маскирования  $\alpha = 15^\circ$ ,  $B_i$  — значение по широте на  $i$ -е сутки,  $k$  — количество суток наблюдений (в нашем случае  $k = 5$ ,  $\Delta\varphi = 90^\circ$ ). Аналогичным образом производятся расчеты для долготы  $L_{\text{cp}}$ .

Переход от угловых геодезических координат  $B$  и  $L$  к метрическим осуществляется путем

умножения отклонений на коэффициенты  $\delta B$  по широте и на  $\delta L$  по долготе. Коэффициенты пересчета угловых отклонений в метрические значения приняты равными:

$$\delta B = 10 \text{ мксд} \Leftrightarrow 0.31 \text{ мм},$$

$$\delta L = 10 \text{ мксд} \Leftrightarrow 0.31 \cdot \cos B \text{ мм.}$$

Для широты  $B \approx 50^\circ$  получаем  $\delta L \approx 0.2$  мм.

Можно также выполнить пересчет путем перехода из геоцентрической системы координат  $(X, Y, Z)$  в местную топоцентрическую систему координат с началом  $B_{\text{cp}}, L_{\text{cp}}$ .

5. Производится оценка высоты среднего фазового центра. Как известно, изменение высоты СФЦ зависит от точности калибровки вариаций фазового центра [14, 15, 18], и индикатором точности знания ВФЦ является величина изменения оценок высоты при изменении угла маскирования. Сравнивая между собой оценки высоты СФЦ для разных значений угла маскирования, можно оценить точность используемых калибровок ВФЦ. Для антенн геодезического класса допустимый уровень вариаций высоты при указанном выше диапазоне углов маскирования обычно должен составлять 3—5 мм. Возможен другой тест на качество калибровок ВФЦ. Изменяют высоту антенны на точно известное значение (1—5 см и более) и сравнивают это априори известное изменение с оценками изменения высоты по результатам обработки наблюдений. По величине разности также можно судить о качестве калибровки ВФЦ антенны.

6. Производится графическое отображение результатов обработки данных наблюдений для всех принятых сценариев.

7. По полученным результатам выполняется анализ и делается заключение о качестве используемых фазовых калибровок тестируемой антенны для определения горизонтальных (плановых координат) и вертикальных координат СФЦ относительно референцной точки антенны, наличия и величины смещения СФЦ относительно оси антенны, величины вариаций высоты референцной точки антенны.

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

**Оборудование для проведения наблюдений.** Как упомянуто выше, в ХНУРЭ сотрудниками



Рис. 1. Антенный пост станции SURE

кафедры Основ радиотехники (OPT) развернута базовая GPS/EGNOS станция геодезического класса. Антенный пост станции установлен на крыше корпуса «И» ХНУРЭ (рис. 1).

В состав аппаратно-программного комплекса лаборатории входят:

- двухчастотный универсальный приемник PROPAK-LB-L1L2 Plus, NovAtel Inc.(Канада) с двухчастотными антеннами GPS-600LB, GPS-702 v.4;
- лицензионное программное обеспечение обработки GPS/GNSS-наблюдений GrafNav/GrafNet, NovAtel/WPC (Канада).

Программное обеспечение GrafNav/GrafNet представляет собой пакет программ под операционной системой Windows. Он предназначен для определения высокоточных взаимных координат разнесенных стационарных и движущихся GPS/GNSS-приемников по фазовым наблюдениям GPS/ГЛОНАСС-приемников с сантиметровой и миллиметровой точностью. При обработке наблюдений ПО GrafNav/GrafNet использует относительные фазовые калибровки антенн, зависящие от угла места.

На базе представленного аппаратно-программного комплекса была проведена экспериментальная отработка предложенной методики оценки точности априорных антенных калибровок и пространственного положения референцной точ-

ки используемых GPS-антенн и уточнения положения их СФЦ по отношению к ARP. Практическая важность методики заключается в возможности оценки зоны неопределенности положения СФЦ относительно ARP при наличии всего одного GPS/GNSS-приемника с антенной с известными фазовыми характеристиками.

**Наблюдения 2006 г.** В мае 2006 г. была проведена серия наблюдений (5 сут) с использованием тестируемой антенны GPS-600LB и перманентной станции Khar с эталонированной антенной типа Dorne/Margolin\_T CHOKE RING (фазовые калибровки для данной антенны представлены на рис. 2), расположенной на крыше одного из зданий ННЦ «Институт метрологии». Станция Khar входит в состав станций сети IGS/EPN. Расстояние от нее до SURE около 1300 м.

Из-за отсутствия в базе данных ПО GrafNav/GrafNet калибровок на antennу GPS-600LB первоначально при обработке наблюдений использовалась калибровка для двухчастотной антенны GPS-600. После запроса производителя были получены относительные фазовые IGS калибровки по углу места и для тестируемой антенны GPS-600LB. На рис. 3 представлены относительные фазовые калибровки antenn GPS-600LB и GPS-600 (на частотах GPS L1 (*a*) и L2 (*b*)).

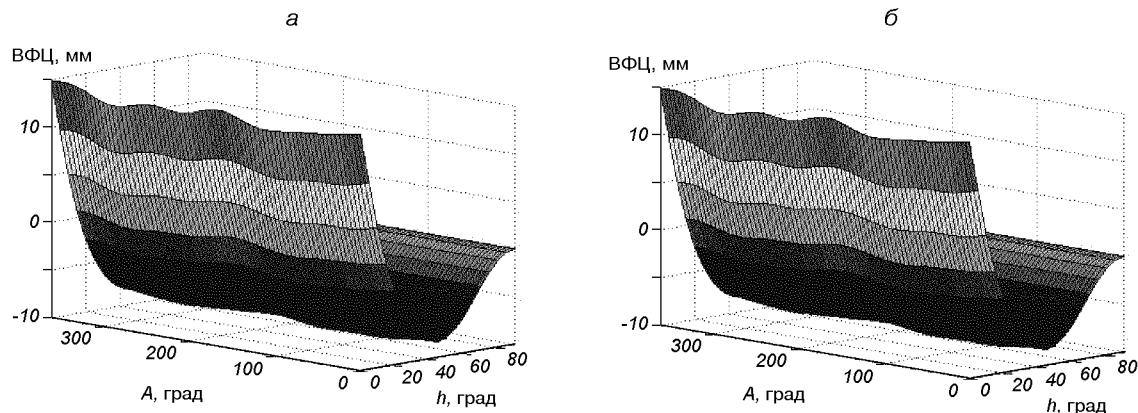


Рис. 2. Абсолютные фазовые калибровки антенны типа Dorne/Margolin\_T CHOKE RING для GPS-частот: *а* — L1, *б* — L2

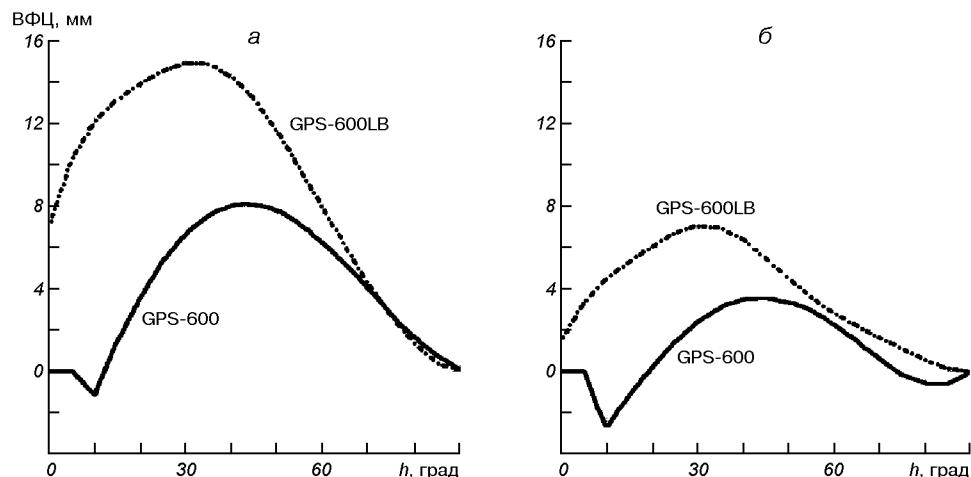


Рис. 3. Относительные фазовые калибровки, зависящие от угла места  $h$  антенн типа GPS-600LB и GPS-600 для GPS-частот: *а* — L1, *б* — L2

Согласно данным фирмы Geo++ GmbH, являющейся одним из мировых лидеров в области аттестации и калибровки GPS/GNSS-антенн, известно, что антenna GPS-600LB имеет смещенный фазовый центр. Абсолютные ВФЦ для GPS-600LB по углу места и азимуту представлены на рис. 4. Видно, что данная антenna имеет фазовую диаграмму, зависимую как от угла места (угла возвышения), так и от азимута, и имеет значительные вариации фазовой задержки по сравнению с антеннами такого же класса NovAtel Inc., например по сравнению с антенной GPS-702 ([www.novatel.com](http://www.novatel.com)).

Измерения, их обработка и анализ проводились согласно вышеизложенной методике с дискретностью поворота антенны вокруг оси  $90^\circ$

(интервал полного оборота антенны вокруг оси — 5 сут).

Обработка проводилась при использовании фазовых калибровок для антенн типа GPS-600 и GPS-600LB. Использование калибровок для двух антенн одной серии позволило оценить влияние точности используемых фазовых коррекций на конечное решение.

При графическом построении результатов обработки, полученных с помощью ПО GrafNav/GrafNet, в качестве относительной «нулевой» точки при графическом построении было взято среднее значение за весь период при значении угла маскирования  $\alpha = 15^\circ$ . Изменения высоты представлены относительно условной «нулевой» высоты — 183.74 м. На рис. 7, 8 представлены

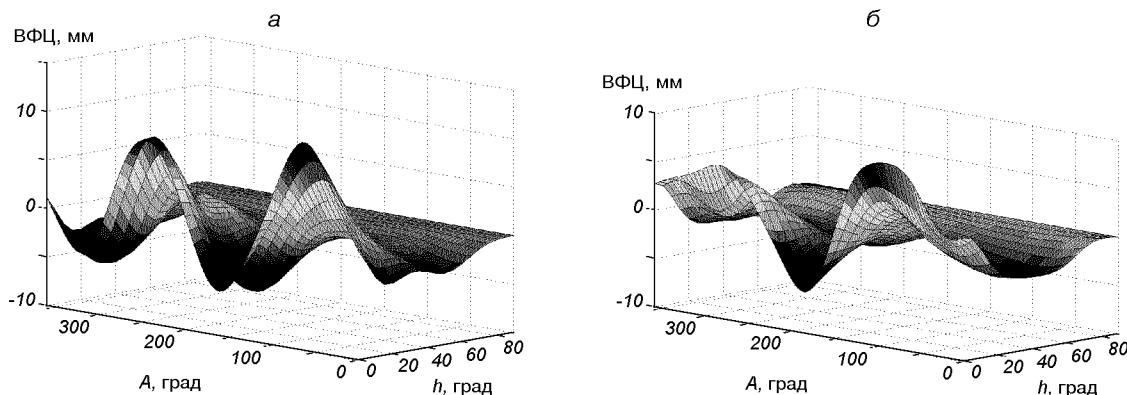


Рис. 4. Абсолютные фазовые калибровки антенны GPS-600LB для GPS-частот: *а* — L1, *б* — L2

JPL D/M+crt	DORNE MARGOLIN T	NGS ( 0 ) 97/10/27
0.0	0.0	
0.0 0.0	0.0 0.0	110.0
0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
0.0 0.0	0.0 0.0	128.0
0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0

Рис. 5. IGS-файл фазовых калибровок для антенны DORNE MARGOLIN T. Выделены значения положения СФЦ по высоте на частотах L1, L2

ADAD/H_T	NONE	START OF ANTENNA
ROBOT	Geo++ GmbH	TYPE / SERIAL NO
5.0		METH / BY / # / DATE
0.0 90.0 5.0		DAZI
2		ZEN1 / ZEN2 / DZEN
IGS05_1398		# OF FREQUENCIES
G01		SINEX CODE
0.60 -0.46 91.24		START OF FREQUENCY
NOAAZI 0.00 -0.24 -0.92		NORTH / EAST / UP
-8.30 -8.14 -7.46 -6.27		-6.05 -7.19 -7.97
G02		4.79 9.56 14.88
-0.10 -0.62 128.06		START OF FREQUENCY
NOAAZI 0.00 -0.13 -0.52		NORTH / EAST / UP
-5.23 -5.25 -4.83 -3.98		-3.43 -4.21 -4.85

Рис. 6. Файл калибровок Geo++ GmbH для антенны DORNE MARGOLIN. Выделены значения положения СФЦ по высоте относительно ARP на частотах L1, L2

результаты обработки данных при применении калибровок GPS-600, GPS-600LB. Изменения координат СФЦ при применении фазовых калибровок GPS-600 представлены на рис. 7, *а*, *в*, при калибровках для GPS-600LB — на рис. 7, *б*, *г*. Изменения высот при использовании фазовых калибровок антенны GPS-600 представлены на рис. 8, *а*, *в*, при калибровках для GPS-600LB — на рис. 8, *б*, *г*.

Анализ полученных результатов показывает,

что формы кривых (рис. 7), описывающих изменение положения фазового центра (ФЦ) от номера суток, отличаются. Для «безионосферной» комбинации фазовых наблюдений L1/L2 формы кривых значимо не изменились, а для комбинации L1 произошли заметные изменения, особенно для низких углов визирования спутников. В значительной степени это может объясняться различием применяемых фазовых калибровок GPS-600 и GPS-600LB на низких углах (особен-

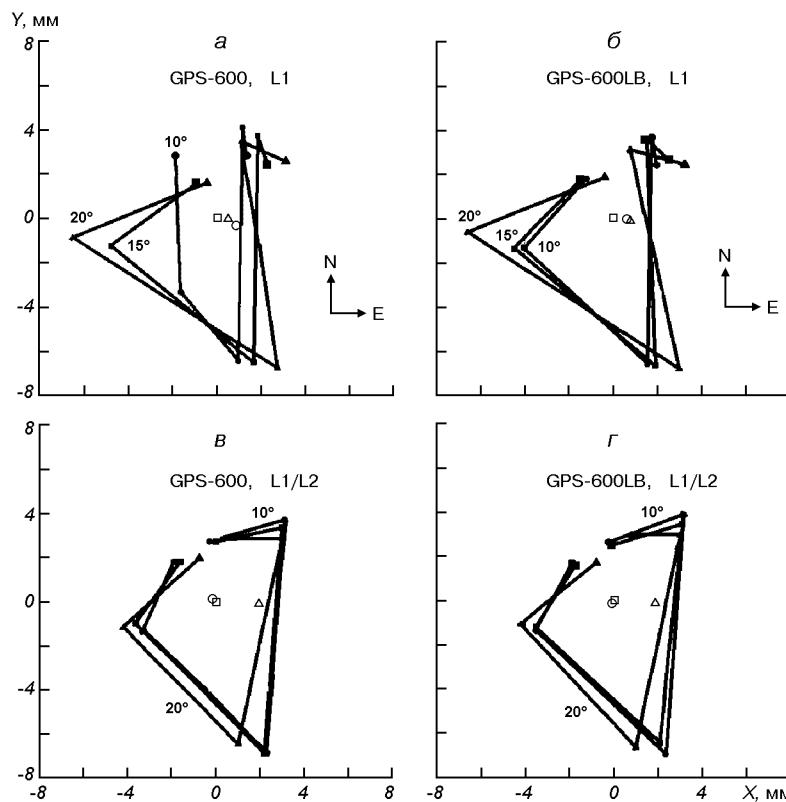


Рис. 7. Изменение положения СФЦ по результатам обработки суточных наблюдений в мае 2006 г. для антенн типа GPS-600LB и GPS-600 для разных углов маскирования

но при  $10^\circ$  и ниже). На рис. 7, *в*, *г* видно, что при значении угла маскирования  $\alpha = 20^\circ$ , среднее значение ФЦ смешается относительно значений при углах маскирования  $\alpha = 10^\circ$  и  $15^\circ$ .

На рис. 7 видно регулярное изменение положения СФЦ по суткам от среднего значения за весь период наблюдений. Это свидетельствует о наличии эксцентрикитета СФЦ исследуемой антенны. Величина эксцентрикитета составляет примерно 4–7 мм. Смещение СФЦ также может быть объяснено тем, что фазовая диаграмма антенны GPS-600LB имеет ярко выраженный азимутально-зависимый характер (см. рис. 4). Поэтому для более точного определения положения СФЦ желательно использовать в обработке абсолютные фазовые калибровки, зависящие как от угла места, так и от азимута.

Изменения высоты СФЦ при изменении угла места и от суток к суткам (рис. 8) может быть связано с влиянием остаточных тропосферной и ионосферной погрешностей GPS-наблюдений.

Для устранения этих эффектов желательно, чтобы базовая станция располагалась на расстоянии 10–100 м, а перепад высот установки антенн был минимальным.

После проведения обработки наблюдений, при использовании калибровок антенны GPS-600LB (см. рис. 8, *б*, *г*), высота антенны изменилась примерно на 20 мм по сравнению со значениями при использовании калибровки антенны GPS-600, исчезли резкие перепады высоты на низких углах. Исчезновение перепадов связано с тем, что «собственные» калибровки антенны GPS-600LB более точны, чем калибровки другой антенны, хотя в данном случае не использована более точная азимутально-зависимая абсолютная калибровка ВФЦ. Изменение высоты связано с тем, что калибровки антенн, которые имеются в базе ПО GrafNav/ GrafNet, получены IGS в 1997 г. относительно антенны DORNE MARGOLIN T со следующими характеристиками положения фазовых центров (рис. 5). На

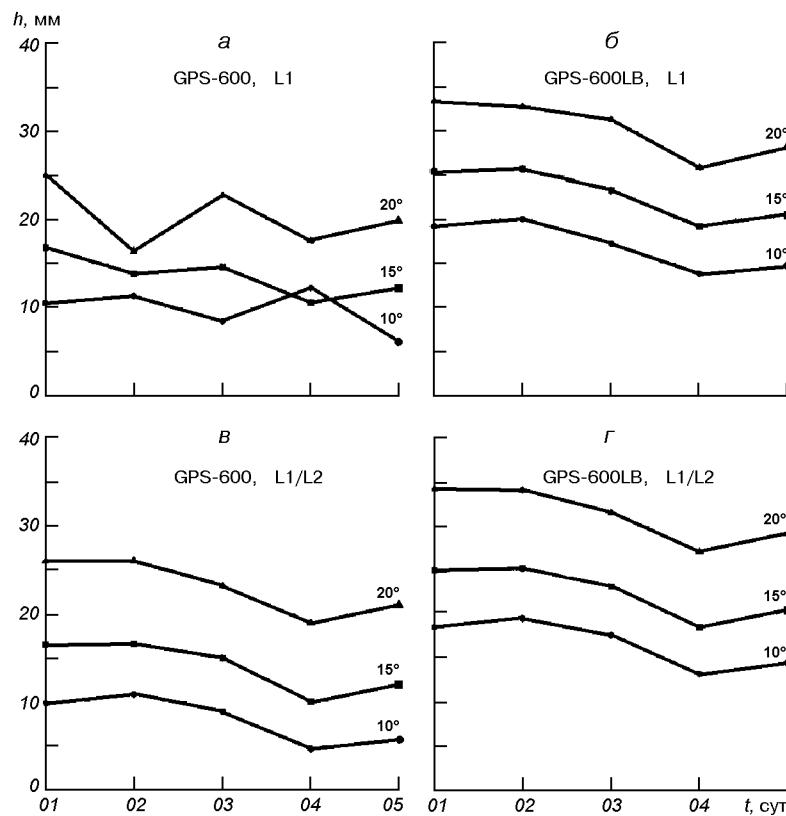


Рис. 8. Изменение высоты СФЦ по результатам обработки суточных наблюдений в мае 2006 г. для антенн типа GPS-600LB и GPS-600 для разных углов маскирования

рис. 5 выделены значения положения СФЦ относительно референцной точки антенны (ARP) по высоте на частотах L1 (выше) и L2 (ниже).

Калибровки антенны DORNE MARGOLIN Т были уточнены фирмой Geo++ GmbH (рис. 6). Для GPS-600 использовались калибровки IGS, а для GPS-600LB использовались калибровки полученные от Geo++ GmbH, что и привело к изменениям по высоте порядка 20 мм на L1 и L1/L2.

**Проведение наблюдений в 2007 г. и анализ их результатов.** В 2007 г. были проведены повторные измерения с вращением антенны вокруг своей оси с дискретностью 90°. При этом в ходе эксперимента были использованы две антенны: GPS-600LB и GPS-702.

На рис. 9 приведены абсолютные фазовые характеристики антенны GPS-702. Как видно, изменения вариаций СФЦ антенны типа GPS-702 гораздо меньше, чем для антенны GPS-

600LB: максимальные отклонения не превышают 5 мм.

При обработке наблюдений для тестируемых типов антенн использовались фазовые коррекции, полученные фирмой Geo++ GmbH. При графическом построении результатов обработки в качестве базиса приняты средние координаты за 5 сут на частоте L1 для антенны GPS-702 v.4 при угле маскирования  $\alpha = 15^\circ$ .

Ниже в табл. 1 и 2 и на рис. 10, 11 представлены результаты обработки наблюдений для антенн типа GPS-600LB и GP-S702.

В результате анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы.

Формы кривых, описывающих изменение положения точки СФЦ от номера суток для антенн типа GPS-600LB, практически не отличаются. Для «безионосферной» комбинации фазовых наблюдений L1/L2 формы кривых на низких углах отличаются, на  $10^\circ$  на двухчастотных

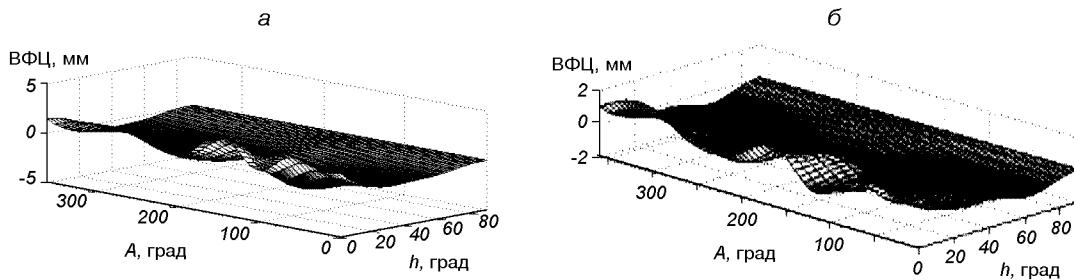
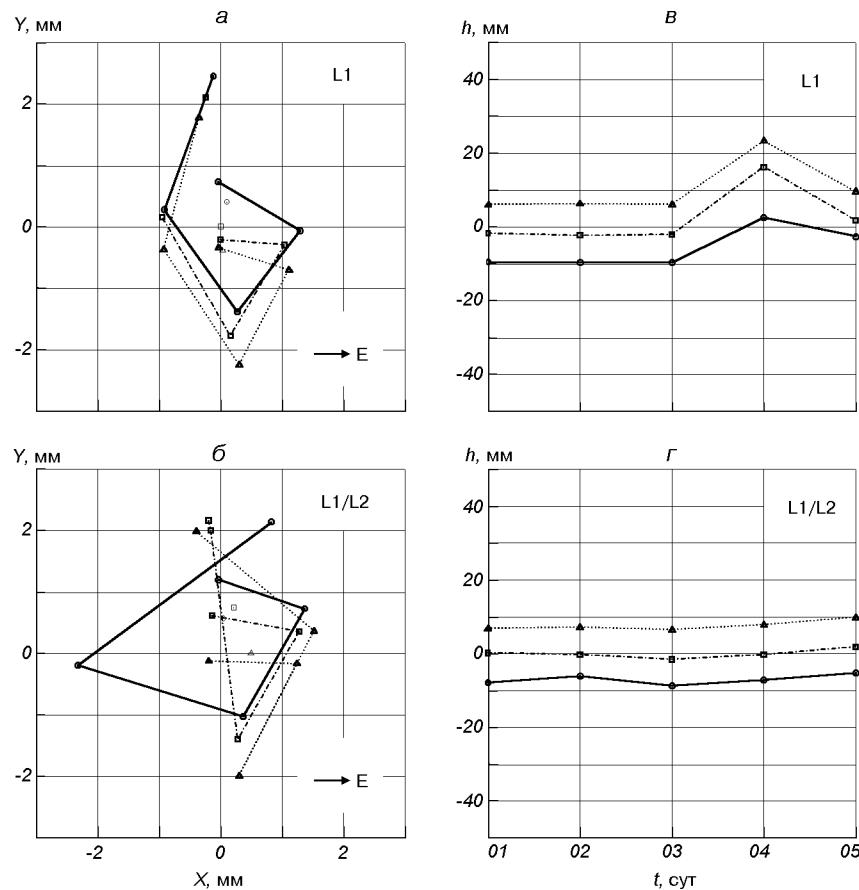
Рис. 9. Абсолютные фазовые калибровки антенны GPS-702: *а* — для частот L1, *б* — для частот L2

Рис. 10. Изменение положения и высоты СФЦ по результатам обработки суточных наблюдений в январе — феврале 2007 г. для GPS-702 для разных углов маскирования

наблюдениях на четвертые сутки произошел сильный «выброс» точки на 7 мм от среднего значения. Виден сильный разброс значений по суткам от среднего значения за весь период наблюдений. Это свидетельствует о наличии эксцентриситета СФЦ исследуемой антенны ти-

па GPS-600LB. Величина эксцентриситета колеблется в пределах 4—7 мм. Разброс величины смещения СФЦ может быть объяснен ярко выраженным азимутально-зависимым характером фазовой диаграммы данного типа антенны (см. рис. 4).

Таблица 1. Разброс плановых координат ( $\Delta B$  и  $\Delta L$ ) центров вращения для антенн типа GPS-702 v.4 и GPS-600LB

Тип антенны	Период года	$\alpha$ , град	$\Delta B$ , мм	$\Delta L$ , мм	$\Delta B$ , мм	$\Delta L$ , мм
			обработка на L1	обработка на L1/L2	обработка на L1	обработка на L1/L2
GPS-600LB	май 2006 г.	10	1.59	-6.74	2.36	-6.91
		15	1.82	-6.48	1.58	-6.74
		20	1.63	-6.95	1.49	-6.93
	январь — февраль 2007 г.	10	0.25	1.66	0.69	1.99
		15	0.7	0.063	0.24	1.25
		20	0.7	0.14	0.24	1.06
GPS-702 v.4	январь — февраль 2007 г.	10	0.095	0.41	0.035	0.58
		15	0	0	0.21	0.75
		20	0.022	-0.37	0.49	0.018

Таблица 2. Отклонения  $\Delta B$ ,  $\Delta L$ ,  $\Delta h$ , плановых координат и высоты центра вращения по суткам для антенн типа GPS-702 v.4 и GPS-600LB для частоты L1 и комбинации частот L1 и L2

$\alpha$ , град	$\Delta B$ , мм	$\Delta L$ , мм	$\Delta h$ , мм	$\Delta B$ , мм	$\Delta L$ , мм	$\Delta h$ , мм	$\Delta B$ , мм	$\Delta L$ , мм	$\Delta h$ , мм	$\Delta B$ , мм	$\Delta L$ , мм	$\Delta h$ , мм	$\Delta B$ , мм	$\Delta L$ , мм	$\Delta h$ , мм
	$\Delta\varphi = 0^\circ$	$\Delta\varphi = 90^\circ$	$\Delta\varphi = 180^\circ$	$\Delta\varphi = 270^\circ$	$\Delta\varphi = 360^\circ$										

Январь — февраль 2007 г.

## Антenna GPS-702 v.4

10	-0.0463	0.747	-7.8048	1.29	-0.0605	-6.0833	0.265	-1.37	-8.6326	-0.916	0.288	-7.0289	-0.121	2.465	-5.0697
15	0	-0.208	0.1748	1.03	-0.288	-0.28051	0.16	-1.77	-1.511	-0.947	0.163	-0.267	-0.248	2.109	1.885
20	-0.313	-0.333	6.936	1.113	-0.691	7.236	0.302	-2.244	6.581	-0.923	-0.363	8.005	-0.348	1.777	9.8637

## L1/L2

10	-0.0415	1.21	-9.368	1.361	0.736	-9.492	0.356	-1.021	-9.453	-2.322	-0.184	2.764	0.82	2.143	-2.45
15	-0.1415	0.621	-1.696	1.27	0.358	-2.128	0.272	-1.398	-2.089	-0.164	2.006	16.32	-0.189	2.171	1.833
20	-0.198	-0.117	6.232	1.245	-0.166	6.273	0.296	-1.99	6.106	1.521	0.373	23.44	-0.391	1.991	9.684

## Антenna GPS-600LB

10	-3.389	2.99	-2.768	4.231	7.456	-5.731	3.8	-5.34	-2.96	-1.652	0.0258	-3.937	-1.728	3.169	-2.397
15	-3.091	1.068	5.8907	3.921	7.04	7.5127	3.782	-6.82	6.634	-1.737	0.302	1.312	0.658	-1.273	32.26
20	-2.895	1.173	13.76	4.117	5.849	9.97	3.326	-6.099	13.729	-1.595	0.284	9.94	0.551	-0.492	34.99

## L1/L2

10	-3.363	2.383	-5.391	6.207	10.79	11.696	4.01	-5.438	-4.575	-2.0615	-0.199	-5.444	-1.309	2.448	-3.358
15	-3.313	2.469	1.71	4.0292	6.376	1.047	3.581	-5.206	2.93	-1.855	0.179	1.416	-1.221	2.446	3.299
20	-3.348	2.458	1.073	3.913	5.768	9.26	3.428	-5.34	12.049	-1.675	0.1369	9.673	-1.132	2.304	12.682

Май 2006 г.

## Антenna GPS-600LB

10	-1.464	-4.334	-10.85	6.814	-2.176	-8.484	4.048	-13.506	-11.64	0.0358	-8.124	-12.5	-1.444	-5.586	-15.02
15	-1.043	-4.448	-2.403	7.413	-2.362	-0.498	3.808	-13.277	-2.961	0.0317	-7.443	-6.678	-1.103	-4.884	-5.692
20	-1.078	-4.459	6.61	6.727	-3.041	6.2	3.477	-14.305	5.469	-0.0424	-7.507	-0.621	-0.961	-5.48	2.24

## L1/L2

10	2.265	-5.107	6.371	6.964	-2.143	-9.817	-4.263	-13.345	-12.17	-0.276	-8.505	-14.66	-1.406	-5.482	-15.24
15	-1.269	-4.486	-3.28	6.896	-2.438	-2.91	3.787	-13.87	-3.893	-0.258	-7.609	-8.365	-1.248	-5.288	-6.919
20	-1.1	-4.608	6.214	6.619	-2.955	5.219	3.434	-14.08	5.29	-0.289	-7.542	-1.37	-1.165	-5.432	1.684

Для антенны типа GPS-702 видно, что формы кривых, описывающих изменение положения точки СФЦ от номера суток, отличаются на углах маскирования более  $10^\circ$ . Однако изменения положения точки СФЦ не превышают 3 мм (рис. 10, 11).

При сопоставлении координат положения антеннного поста 2006 г. и 2007 г. видно, что координаты положения антеннного поста 2007 г. смешены на север от координат 2006 г. (период 9 мес) на 7 мм (рис. 12). Возможной причиной данного изменения может быть подвижка здания корпуса. Для более точного изучения необходимо выполнить мониторинг подвижек здания в течение года через определенные промежутки времени (раз в неделю или каждые сутки).

Из данных табл. 2 видно, что при изменении угла маскирования значение высоты изменяется. Это объясняется, во-первых, неточностью ис-

пользуемых фазовых характеристик, во-вторых, на базе 1–2 км проявляется влияние остаточных тропосферных и ионосферных погрешностей. Для более точных измерений высоты необходимо использовать абсолютные фазовые характеристики, а с целью точного определения высоты целесообразно разместить опорный антенный пост на базе не более 100 м от тестируемой антенны.

Отклонения по высоте для GPS-600LB составили для частоты L1 относительно угла маскирования  $\alpha = 15^\circ$ :

- для угла маскирования  $10^\circ$  — 6 мм;
- для угла маскирования  $20^\circ$  — 8 мм.

Отклонения по высоте для «безионосферной» комбинации частот L1/L2 относительно угла маскирования  $15^\circ$ :

- для угла маскирования  $10^\circ$  — 7 мм;
- для угла маскирования  $20^\circ$  — 9 мм.

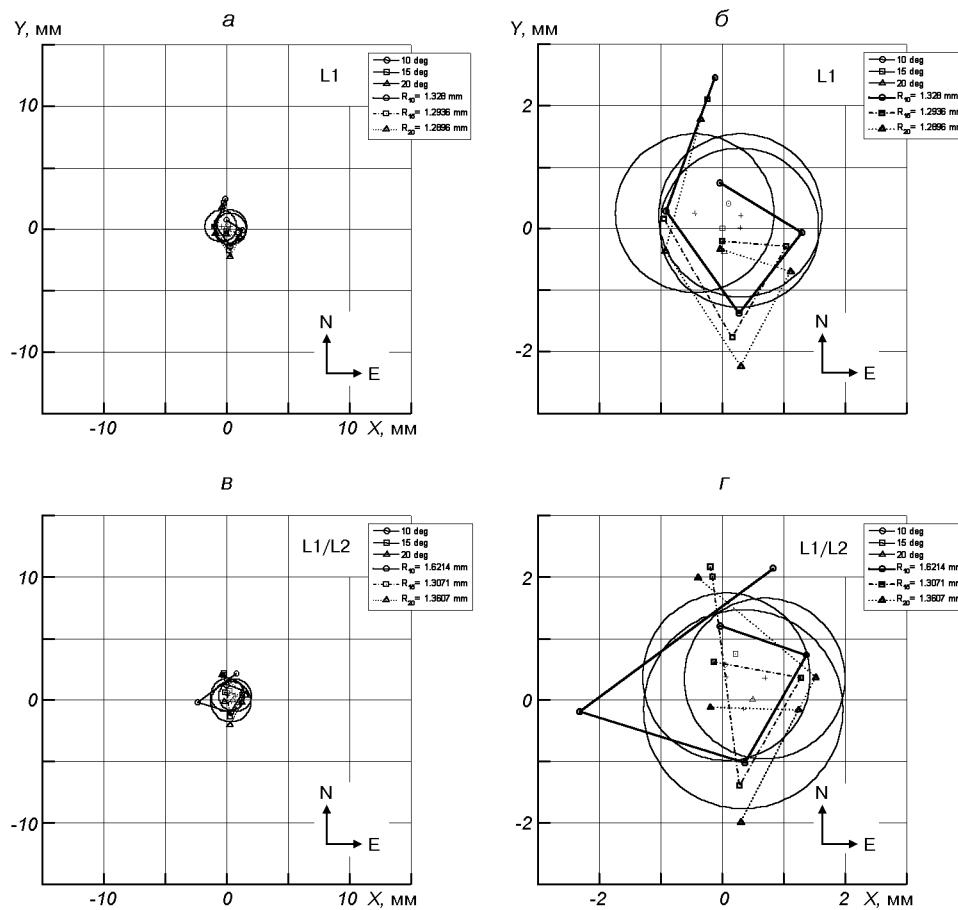


Рис. 11. Изменение положения СФЦ по результатам обработки суточных наблюдений для GPS-702 с построением радиусов

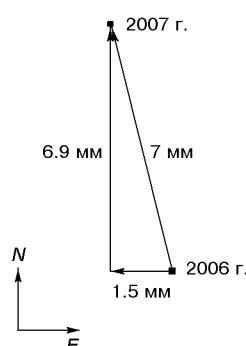


Рис. 12. Изменение координатного положения антеннного поста станции SURE (май 2006 г. — февраль 2007 г.)

Отклонения по высоте для GPS-702 составили на L1 относительно угла маскирования  $15^\circ$ :

- для угла маскирования  $10^\circ$  — 6 мм;
- для угла маскирования  $20^\circ$  — 6 мм.

Отклонения по высоте для «безионосферной» комбинации частот L1/L2 относительно угла маскирования  $15^\circ$ :

- для угла маскирования  $10^\circ$  — 7 мм;
- для угла маскирования  $20^\circ$  — 7 мм.

При анализе результатов обработки измерений видно, что произошли перепады значений высот. Для GPS-600LB на 5-е сутки (на L1 при углах маскирования  $\alpha = 15^\circ, 20^\circ$ ), на 2-е сутки (на «безионосферной» комбинации частот L1/L2 при угле маскирования  $10^\circ$ ) и для антенны GPS-702 — 4-е сутки наблюдений. Эти отклонения по высоте связаны с изменением климатических условий. Во время наблюдений с антенной GPS-702 на 4-е сутки выпал снег, который покрыл антенну. При повороте антенны на 5-е сутки покров снега был снят, и значение высоты вернулось на прежний уровень. Это свидетельствует о том, что относительные калибровки не позволяют полностью учесть все изменения фазовой диаграммы антенны. Для детального изучения поведения фазовых диаграмм при изменениях климатических условий необходимо проводить посезонные наблюдения.

Как видно из данных табл. 1, 2, величина эксцентриситета СФЦ для антенны GPS-600LB находится в диапазоне 4.4—5.2 мм. По данным {Geo++ GmbH} величина смещения составляет 4.69 мм на L1. Для антенны GPS-702 диапазон изменений СФЦ составляет 1.2—1.36 мм для частоты L1. Полученные значения совпадают со

значениями смещений, которые приводит Geo++ GmbH. Это также подтверждает работоспособность предложенной относительно простой методики контроля фазовых характеристик GPS/GNSS-антенн. Полученные результаты также свидетельствуют о том, что для получения наивысшей точности местоопределения предпочтительнее использовать антенны типа GPS-702.

Полученные результаты обработки подтверждают целесообразность и необходимость проверять точность калибровок антенн непосредственно на месте ее эксплуатации.

В результате проведенных работ координатное положение приемной антенны станции SURE было определено с миллиметровым уровнем точности.

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УСТАНОВКЕ АНТЕННЫ, ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЯ И ВЕРИФИКАЦИИ КАЧЕСТВА КАЛИБРОВОК GPS/GNSS-АНТЕНН

Исходя из изложенного, можно сформулировать перечень практических рекомендаций, необходимых для верификации используемых калибровок GPS/GNSS-антенн в реальных условиях их установки.

1. Перед установкой антенны на опору с целью обеспечения вращения вокруг своей оси рекомендуется изготовить крепежно-поворотное устройство, такое как изготовлено для антеннного поста ХНУРЭ (рис. 13). Данное устройство позволяет поворачивать антенну на фиксированный угол вокруг своей оси.

2. С целью уменьшения уровня многолучевости рекомендуется вокруг антенной опоры соорудить «колодец», например, как представлено на рис. 1. Возможно также заполнение полости колодца радиопоглощающим материалом. Оценка уровня многолучевости, с использованием программных комплексов OCTAVA\_PPA и PEGASUS v.4.11, показала, что подобная конструкция обеспечивает характеристики, близкие к антеннам типа «Choke Ring».

3. Необходимое условие проведения наблюдений: наличие близко расположенной базовой станции с точными координатами приемной антенны. Измерительная база не должна превышать 1—1.5 км. Если это выполняется, можно

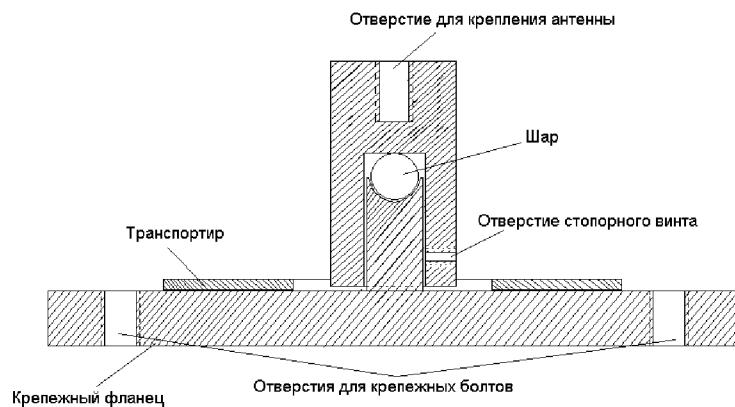


Рис. 13. Эскиз крепежно-поворотного устройства для установки антенны, разработанного в научно-учебном центре кафедры «Основы радиотехники»

производить суточные наблюдения с одновременными синхронными наблюдениями на базовой станции.

Лучше размещать опорный антенный пост (GPS-приемник + антенна) на базе порядка 10—20 м от тестируемой антенны. Это позволит более точно определить высоту СФЦ, так как при этом полностью исключаются остаточные тропосферные и ионосферные погрешности.

4. Для оценки фазовых характеристик GPS/GNSS-антенн на каждом последующем суточном цикле производится поворот тестируемой антенны на фиксированный угол вокруг своей оси. Таким образом, проводится полный цикл наблюдений для достижения полного обката антенны вокруг оси. Важным является повторное измерение при положении  $360^\circ$  (исходное положение) для оценки повторяемости результатов.

5. После окончания наблюдений и их регистрации производится посуточная обработка фазовых наблюдений тестируемой и базовой станций с использованием специализированных программных пакетов.

При обработке каждой суточной сессии рекомендуется протестировать зависимость координат ФЦ от изменения угла маскирования ( $\alpha = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ ).

По полученным результатам выполняется анализ и делается заключение о качестве используемых фазовых калибровок тестируемой антенны для определения плановых и вертикальных координат СФЦ относительно рефе-

ренцной точки антенны.

Подобные эксперименты рекомендуется проводить посезонно с целью определения влияния сезонного изменения климатических условий на точность определения координат.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и апробирован с использованием реальных данных метод проведения контроля качества фазовых характеристик GPS/GNSS-антенн. Метод позволяет без дополнительных материальных затрат и дорогостоящего специализированного оборудования провести оценку используемых фазовых калибровок антенн для конкретных условий эксплуатации и уточнить отклонение положения среднего фазового центра антенны относительно референцной точки антенны.

Даны методические рекомендации по установке антенных постов, контролю и верификации фазовых калибровок GPS/GNSS-антенн.

Проведенная серия экспериментальных исследований с использованием GPS/GNSS-антенн геодезического класса позволила оценить качество используемые фазовые коррекций, а также повысить точность определения координат приемной точки антенны. Также результатом проведенной работы является привязка и периодическое уточнение положения АР приемной антенны станции SURE с миллиметровым уровнем точности.

1. Дьяконов В. П. Matlab 6.5 SP1/7+ Simulink 5/6. Основы применения // Библиотека профессионала. — М.: СОЛОН -Пресс, 2005.—800 с.
2. Дьяконов В. П. Matlab 6.5 SP1/7+ Simulink 5/6 в математике и моделировании // Библиотека профессионала. — М.: СОЛОН-Пресс, 2005.—576 с.
3. Жалило А. А., Желанов А. А., Шелковенков Д. А., Шокало В. М. Разработка методики оценки качества фазовых калибровок GPS-антенн геодезического класса. Предварительные результаты исследований // Радиотехника.—2007.—148.—С. 186—198.
4. Жданюк Б. Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. — М.: Сов. радио, 1978.—384 с.
5. Желанов А. А., Шелковенков Д. А. Оценка качества фазовых калибровок GPS-антенн геодезического класса // PT-2007: Сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 2007. — Севастополь: СевНТУ, 2007.—С. 134.
6. Кафтан А. В. Влияние изменений положения фазового центра GPS-антенн на точность измерений // Институт физики Земли им. Г. А. Гамбурцева, РАН, 2002.—<http://www.segis.ru>.
7. Banyai L. Investigation of GPS antenna mean phase centre offsets using a full roving observation strategy // Geodetic and Geophysical Research Institute Hungarian Academy of Sciences. Journal of Geodesy, Springer Berlin/ Heidelberg, 2005.—<http://www.ggki.hu>.
8. Braun. J, Ruud. O., Meertens C. Trimble choke ring antenna mean phase center calibration // University NAVSTAR Consortium, Bourder, CO, August 1996.—<http://www.unavco.org>.
9. Cisak J., Sekowski M., Zanimonskiy Y., Zak L. Badanie roznych typow anten stosowanych w pomiarach jako element atestacji GPS // Instytut Geodezji i Kartografii, 2003.—<http://www.igik.edu.pl>.
10. Cisak J., Zanimonskiy Y. M. Results of the investigations of the GNSS antennae in framework of scargiant project «In-situ GNSS antenna tests and validation of phase center calibration data» // Instytut Geodezji i Kartografii, Warsaw, Poland, Institute of Radio Astronomy National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine. 2003.—<http://www.igik.edu.pl>.
11. Kaniuth K., Huber S. An assessment of radome effects on height estimates in the EUREF Network // Eurefsymposium 2002.—P. 97—102.
12. Kenneth J. Hurst, Yoaz Bar Sever In- situ GPS antenna phase center calibration // Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California. 1998.—<http://hdl.handle.net/2014/20513>.
13. Kunysz W. High performance GPS pinwheel antenna // ION NTM 2000, September 2000.—<http://www.navatels.com/Documents/Papers>.
14. Kunysz W. A novel GPS survey antenna // Technical session of ION, Anaheim, CA, January 2000. — <http://www.navatels.com/Documents/Papers>.
15. Mader G., Czopek F. Calibrating antenna phase centers // GPS World.—May 2002.—P. 40—46.
16. Mader G., Spring S. GPS antenna calibration at the National Geodetic Survey.2002.—<http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL>.
17. Menge F., Seeber G., Volksen C., et al. Results of Absolute Field Calibration of GPS Antenna PCV. 1998. — <http://www.geopp.de/download>.
18. Menge F., Seeber G., Volksen C., et al. Developments in Absolute Field Calibration of GPS Antennas and Absolute Site Dependent Multipath. 1998.— <http://www.geopp.de>
19. Menge F., Schmidz M. AOAD/M\_T Choke ring GPS antenna. Absolute phase center variations. Result of field calibrations at IFE and Geo++. 2000. [http://www.geopp.de/media/docs/AOA\\_D/M\\_T](http://www.geopp.de/media/docs/AOA_D/M_T).
20. Santerre R., Akrou B. A. Geiger calibrating antenna phase centers // GPS World.—February 2005.—P. 49—53.
21. Schmid R., Mader G., Herring T. From relative to absolute antenna phase center corrections // Institut für austromische und physikalische Geodäsie, tu Munchen, US Department of Commerce, NOAA, Geoscience Research Division Massachusetts Institute of Technology, Draft of February 2, 2004.—<http://igsrb.jpl.nasa.gov>.
22. Wubbena G., Schmitz M., Menge F., Boder V., Seeber G. Automated absolute field calibration of GPS antennas in real-time // ION GPS 2000, Salt Lake Sity, UT, September 2000.—P. 2512—2522.
23. L-band antenna performance improvements // NovAtel Inc. —<http://www.navatels.com>.
24. The Block IIA Satellite Calibrating Antenna Phase Centers // NGS, The Boeing Company, GPS World, May, 2002. —P. 40—46.

---

#### THE ACCURACY ESTIMATION OF GPS/GNSS ANTENNAS CALIBRATION OF PHASE CENTRE AND ITS VARIATIONS

*A. A. Жалило, А. А. Желанов, Д. А. Шелковенков, В. М. Шокало*

A relatively simple method for verification of GPS/GNSS antenna phase characteristics in concrete environment of operation is proposed. The method assumes the use of one closely located reference base station with precision coordinates of antenna mean phase centre (MPC) and accurate phase centre variations (PCV) calibration. The method allows us to carry out a quality estimation of antenna phase characteristics and their influence on the accuracy of positioning without use of the expensive specialized equipment. We present the results of verification of the used phase calibrations of antennas GPS-600LB, GPS-702 (NovAtel Inc., Canada) for the station SURE (KhNURE) antenna site. It is obtained an acceptable fit (at a level of 1 to 1.5 mm) of the estimations of MPC displacement with the values of Geo++ GmbH company (Germany) which were obtained using specialized robots. The series of experimental researches which was carried out with the use of GPS/GNSS antennas of a geodetic grade allowed one to estimate the quality of used phase corrections and their influence on the accuracy of horizontal and vertical coordinates, and also to increase the accuracy of the SURE station antenna position. Some methodical recommendations on installation of antenna sites, the monitoring and verification of phase calibrations of GPS/GNSS station antennas for positioning at millimetre accuracy level are given.