

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ В РЕЖИМАХ STATIC ОТНОСИТЕЛЬНО ПУНКТОВ IGS И PPP STATIC

**В.Ю. Афанасьев** (НИИ прикладной акустики, Дубна)

В 2017 г. окончил магистратуру геодезического факультета МИИГАиК с присвоением квалификации «магистр» по направлению «геодезия и дистанционное зондирование». С 2015 г. работал в ООО «Топкон Позиционинг Системс», с 2017 г. — в ООО «Мостоотряд-55». С 2019 г. работает в ФГУП «НИИ прикладной акустики», в настоящее время — научный сотрудник.

В работах [1] и [2] были выполнены исследования возможностей программы RTKLib ver.2.4.2 при обработке спутниковых измерений методом точного позиционирования Precise Point Positioning (PPP) и влияния на точность определения пространственных координат этим методом точности параметров эфемерид и поправок часов спутников GPS и ГЛОНАСС, предоставляемых различными ресурсами.

Важной задачей является исследование влияния продолжительности спутниковых измерений и длительности цикла измерений на точность определения координат методом PPP.

Целью данного исследования является определение:

1. Продолжительности спутниковых измерений, при которой точность определения координат в режиме PPP Static будет не хуже, чем в режиме Static, относительно пунктов IGS.

2. Влияния длительности цикла измерений на точность определения координат.

Спутниковые измерения выполнялись многочастотным геодезическим спутниковым приемником GEON G2 [3] на пункте K1 непрерывно в течение 14 дней: с 9:00 27 ноября до 14:00 11 декабря 2020 г. по московскому времени, в режиме «стати-

ка» с регистрацией сигналов GPS и ГЛОНАСС, с длительностью цикла измерений 1 с и маской угла возвышения спутников  $10^\circ$ .

Спутниковый геодезический приемник GEON G2 имеет модуль обработки сигналов спутников Trimble Maxwell 6 Custom Survey GNSS.

Пункт K1 представляет собой металлическую стойку высотой 30 см, закрепленную на магнитном трехопорном основании, установленном вблизи края плоской крыши двухэтажного здания, расположенного в Дмитровогорском сельском поселении, в районе деревни Новое Домкино Конаковского района Тверской области. Условия для спутниковых измерений на пункте можно считать благоприятными. Высота опорной точки антенны (ARP — antenna reference point) была принята за ноль.

Исследование было выполнено в следующей последовательности.

1. Из открытых ресурсов Информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО) АО «ЦНИИмаш» [4], Международной службы ГНСС (International GNSS Service — IGS) [5] и Центра определения орбит постоянными станциями (Scripps Orbit and Permanent Array Centre — SOPAC)

[6] были получены «сырые» данные спутниковых измерений 8 пунктов IGS: MOBN (г. Обнинск, Калужская область, Россия), ARTU (пгт. Арти, Свердловская область, Россия), MDVJ (пгт. Менделеево, Московская область, Россия), ZECK (Зеленчукский район, Карачаево-Черкесская Республика, Россия), POLV (г. Полтава, Украина), RIGA (г. Рига, Латвия), SVTL (п. Светлое, Ленинградская область, Россия), GLSV (г. Киев, Украина). Описание аппаратуры, внешний вид пунктов и другую информацию можно найти на карте сети станций IGS (<https://www.igs.org/network/#station-map-list>). Длительность цикла измерений на пунктах IGS составляет 30 с.

2. Фиксированные координаты станций IGS, заданные с высокой точностью в системе WGS-84, были получены из открытого ресурса SOPAC [6].

3. Из открытого ресурса ИАЦ КВНО [4] были получены Final (финальные) эфемериды и поправки часов спутников.

4. Выполнена обработка в программе RTKLib ver.2.4.2 в режиме Static [7] спутниковых измерений продолжительностью 14 суток и с длительностью цикла измерений 1 с. Определены координаты пункта K1 относительно каждого из 8 пунктов IGS.

При обработке использовались следующие данные:

- файлы с данными наблюдений и файлы навигационных данных для спутников GPS и ГЛОНАСС в формате RINEX;

- файлы точных эфемерид в формате SP3;

- файл в формате ANTEX, содержащий параметры антенн приемников.

Следует отметить, что без файла точных эфемерид программа RTKLib не будет учитывать тип антенны.

Как указано в работе [1], файлы навигационных данных должны быть размещены в одной директории с файлами данных наблюдений, а их имена — совпадать; в файле точных эфемерид спутников в формате SP3 количество спутников (в 3-й строке файла) не должно превышать 99.

При обработке использовались следующие настройки:

- Interval (интервал обработки измерений) — 30 с (секунд);

- Frequencies (частоты) — L1+2+5;

- Filter Type (тип фильтра) — Combined (комбинированный);

- Elevation Mask (маска угла возвышения) — 10°;

- SNR Mask (маска отношения сигнал/шум) — только для базовой станции 35 dBHz;

- Ionosphere Correction (ионосферная коррекция) —

Iono-Free LC (линейные комбинации, свободные от влияния ионосферы);

- Troposphere Correction (тропосферная коррекция) — Estimate ZTD+Grad (оценка параметров полной вертикальной задержки и горизонтального градиента);

- Satellite Ephemeris/Clock (спутниковые эфемериды и часы) — Precise (точные);

- RAIM FDE (обнаружение и исключение ошибок при автономном контроле целостности приемника);

- GPS и GLONASS (используемые сигналы спутников навигационных систем);

- Integer Ambiguity Res (целочисленное разрешение многозначности) — OFF (без разрешения многозначности).

Включение функции разрешения многозначности привело к неудовлетворительным результатам фиксированных решений, результаты без этой функции имеют плавающее решение, но обладают маленькой дисперсией. Эта особенность отмечена автором при обработке базовых линий большой длины.

5. В конверторе ToRinex4 прежены с интервалом 30 с «сырые» данные спутниковых измерений, полученные приемником GEON G2 на пункте K1. Таким образом, длительность цикла измерений составила 30 с. Выполнена обработка в

режиме Static спутниковых измерений продолжительностью 14 суток и с длительностью цикла измерений 30 с. Определены координаты пункта K1 относительно каждого из 8 пунктов IGS. При обработке использовались идентичные приведенным выше настройки режима Static программы RTKLib.

6. Из результатов обработки в пунктах 4 и 5 были отобраны решения, обладающие наименьшей дисперсией. В программе MS Excel вычислены средние значения координат пункта K1, отклонения от среднего значения (табл. 1) и по формуле Бесселя средняя квадратическая ошибка (СКО) определения координат относительно 8 пунктов IGS, которая составила 5 мм в плане и 9 мм по высоте. Средние значения координат в дальнейших исследованиях были приняты за истинные.

7. Из-за большой продолжительности вычислительного процесса были выбраны три пункта IGS, для которых выполнена оценка точности определения координат пункта K1 в режиме Static: MOBN, RIGA и ARTU.

Выполнена обработка в режиме Static спутниковых измерений с продолжительностью периода обработки 0,5; 1; 3; 6; 12; 24 ч и с длительностью цикла измерений 1 с и 30 с. Определены координаты пункта K1 относительно каждого из трех

**Отклонения от среднего значения координат пункта K1, полученных из результатов обработки спутниковых измерений продолжительностью 14 суток в режиме Static относительно 8 пунктов IGS**

**Таблица 1**

Наименование базового пункта IGS	Отклонения от среднего значения		Длина базовой линии, м	Длительность цикла измерений на пункте K1, с
	В плане, мм	По высоте, мм		
MDVJ	2	15	79,0	1
MOBN	1	-2	182,6	1
SVTL	4	11	599,3	1
RIGA	5	-2	794,4	1
POLV	3	-4	810,5	30
GLSV	0	-13	831,1	30
ARTU	10	-4	1311,9	1
ZECK	3	-2	1470,2	30

пунктов IGS. При обработке использовались идентичные приведенные выше настройки режима Static программы RTKLib.

Программа RTKLib выполняет обработку с заданной продолжительностью периода обработки, но записывает результат в один файл. По этой причине автором была написана программа на языке Python v3.3.3, которая формирует отдельные файлы заданной продолжительности и вычисляет среднее значение координат.

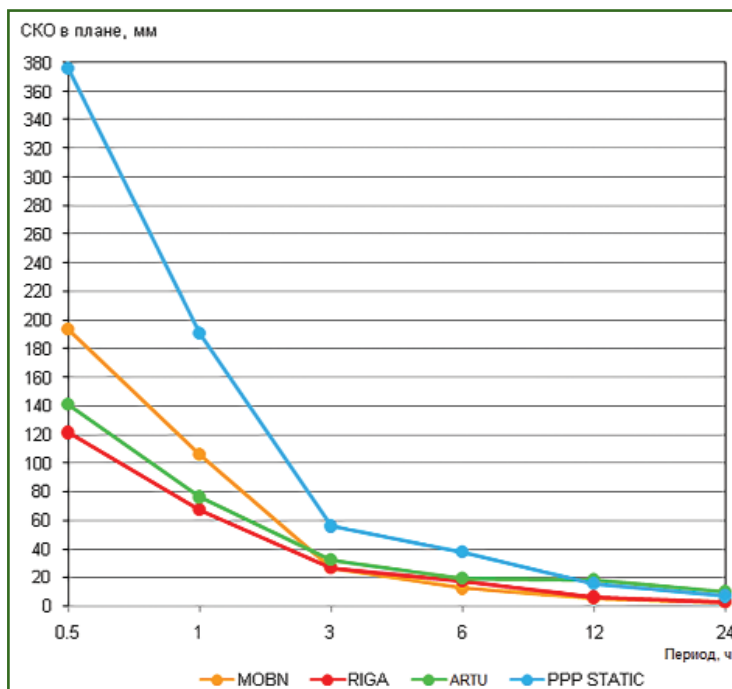
В программе MS Excel вычислены отклонения координат пункта K1 от принятых за истинные и по формуле Гаусса СКО определения координат относительно каждого из трех пунктов IGS (табл. 2).

8. Выполнена обработка в программе RTKLib в режиме PPP Static [7] спутниковых измерений продолжительностью 14 суток целиком и с периодом обработки 0,5; 1; 3; 6; 12; 24 ч и с длительностью цикла измерений 1 с и 30 с. Использованные данные, настройки режима PPP

Static, за исключением типа антенны, аналогичны приведенным в работе [1]. В программе MS Excel вычислены отклонения координат пункта K1 от приня-

тых за истинные и по формуле Гаусса СКО определения координат (табл. 2).

Отклонения координат пункта K1 от принятых за истинные для



**Рис. 1**  
СКО в плане при длительности цикла измерений 1 с в режимах Static относительно трех пунктов IGS и PPP Static

**СКО определения координат пункта K1, полученных из результатов обработки спутниковых измерений при разной продолжительности и длительности цикла измерений в режимах Static относительно трех пунктов IGS и PPP Static**

**Таблица 2**

Продолжительность измерений, ч	MOBN		STATIC RIGA		ARTU		PPP STATIC	
	в плане, мм	по высоте, мм	в плане, мм	по высоте, мм	в плане, мм	по высоте, мм	в плане, мм	по высоте, мм
<i>Длительность цикла измерений 1 с</i>								
0,5	194	129	121	93	141	115	376	177
1	106	63	67	43	76	62	191	81
3	27	14	27	22	32	33	56	29
6	12	9	18	15	19	22	38	16
12	6	6	6	13	18	13	16	12
24	3	5	2	7	10	4	7	6
<i>Длительность цикла измерений 30 с</i>								
0,5	203	162	151	171	175	232	353	260
1	113	95	77	81	130	168	172	110
3	27	22	33	36	41	72	52	40
6	12	15	23	25	28	54	36	25
12	8	12	13	21	24	33	22	20
24	6	10	9	10	14	23	14	15

измерений продолжительностью 14 суток, обработанных в режиме PPP Static, составили при длительности цикла измерений:

— 1 с — 9 мм в плане и –2 мм по высоте;

— 30 с — 14 мм в плане и +8 мм по высоте.

При продолжительности спутниковых измерений 12 ч и длительности цикла измерений 1 с СКО определения планового положения пункта K1 в режиме PPP Static составила 16 мм, что меньше, чем СКО в режиме Static относительно пункта ARTU (рис. 1).

При продолжительности спутниковых измерений 6 ч и длительности цикла измерений 1 с СКО определения высоты пункта K1 в режиме PPP Static составила 16 мм, что меньше, чем СКО в режиме Static относительно пункта ARTU (рис. 2).

При длительности цикла измерений 30 с в сравнении с циклом 1 с: в режиме Static относительно пунктов IGS СКО больше в среднем на 49% в плане и на 110% по высоте; в режиме PPP Static СКО по высоте больше в среднем на 63%, при продолжительности измерений менее 6 ч СКО в плане меньше в среднем на 7% (рис. 3 и 4).

В работе [1] продолжительность спутниковых измерений составила 5 суток, длительность цикла измерений — 30 с, использовались Final (финальные) эфемериды и поправки часов спутников из открытого ресурса ИАЦ КВНО [4]. Среднее по четырем пунктам геодинамического полигона «Ледово» абсолютное отклонение координат, полученных из обработки 5-суточных измерений в режиме PPP Static, составило 16 мм в плане и 9 мм по высоте. Средняя по четырем пунктам СКО координат, полученных из обработки 12-часовых измерений, составила 21 мм в плане и 18 мм по высоте. Результаты в работе [1] очень хорошо согласуются с результатами, полученными в настоящей работе, а именно, при

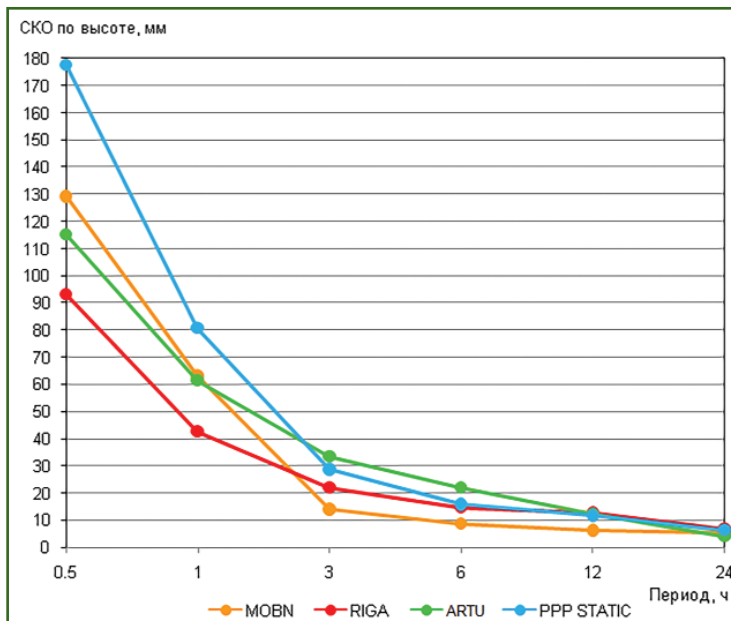


Рис. 2

*СКО по высоте при длительности цикла измерений 1 с в режимах Static относительно трех пунктов IGS и PPP Static*

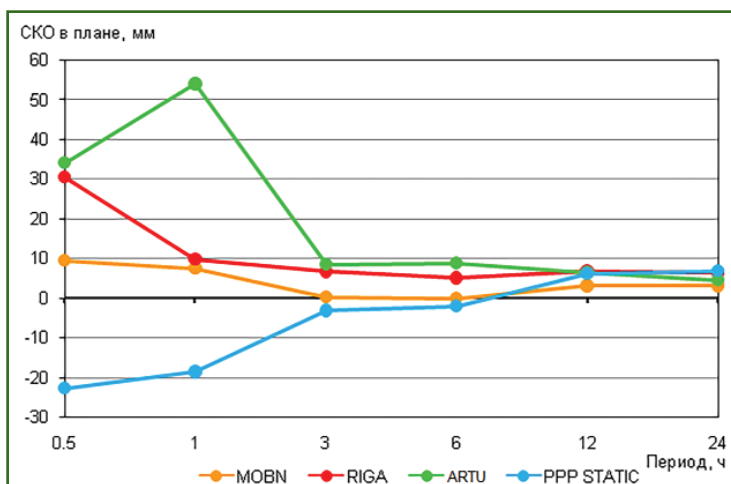


Рис. 3

*Разности между СКО в плане при длительности цикла измерений 30 с и 1 с в режимах Static относительно трех пунктов IGS и PPP Static*

продолжительности спутниковых измерений 12 ч и длительности цикла измерений 30 с СКО определения координат пункта K1 в режиме PPP Static составила 22 мм в плане и 20 мм по высоте; отклонения координат пункта K1 от принятых за истинные для измерений продолжительностью 14 суток и длительности цикла измерений 30 с составили 14 мм в плане и +8 мм по высоте.

В работе [8] приведены средние СКО координат, полученных из обработки спутниковых измерений за 4 дня 2007 г. на 5 пунктах IGS в программе GrafNav 8.10. «Сырые» данные и фиксированные координаты пунктов IGS были получены из открытого ресурса SOPAC, длительность цикла измерений для таких данных составляет 30 с. Файлы финальных точных эфемерид и поправок часов спутников были

СКО определения координат, полученных из результатов обработки программами GrafNav 8.10 и RTKLib ver.2.4.2 спутниковых измерений при разной продолжительности и длительности цикла измерений в режиме PPP Static

Таблица 3

Длительность цикла измерений, с Продолжительность измерений, ч	30 GrafNav 8.10		30 RTKLib ver.2.4.2		1 RTKLib ver.2.4.2	
	в плане, мм	по высоте, мм	в плане, мм	по высоте, мм	в плане, мм	по высоте, мм
1	65	63	172	110	191	81
3	22	29	52	40	56	29
6	13	24	36	25	38	16
12	9	20	22	20	16	12
24	7	16	14	15	7	6

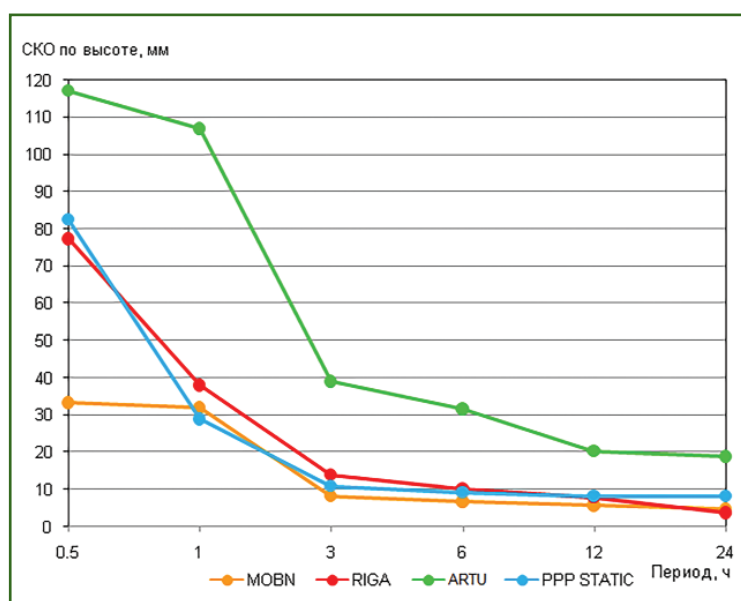


Рис. 4

Разности между СКО по высоте при длительности цикла измерений 30 с и 1 с в режимах Static относительно трех пунктов IGS и PPP Static

скачаны через интерфейс программы GrafNav с ресурса <ftp://cddis.nasa.gov>. В табл. 3 приведено сравнение СКО координат, полученных из обработки спутниковых измерений разной продолжительности при длительности цикла измерений 30 с и 1 с в режиме PPP Static программы GrafNav 8.10 и RTKLib ver.2.4.2.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. При благоприятных условиях для спутниковых измерений с использованием многочастотного геодезического спутникового приемника продолжи-

тельность спутниковых измерений, при которой точность определения координат в режиме PPP Static будет не хуже, чем в режиме Static, относительно пунктов IGS, составляет 12 часов.

2. В сравнении с циклом спутниковых измерений 30 с при использовании измерений длительностью цикла 1 с: увеличивается точность определения координат в режиме Static относительно пунктов IGS; в режиме PPP Static увеличивается точность по высоте, в плане точность увеличивается при продолжительности измерений 12 и более часов. Стоит отметить, что

интервал обработки измерений в настройках программы RTKLib в обоих случаях составляет 30 с.

3. В сравнении с программой GrafNav 8.10 результаты обработки в режиме PPP Static при длительности цикла измерений 30 с в программе RTKLib ver.2.4.2 обладают меньшей точностью, но точность по высоте при продолжительности измерений 6 часов и более приблизительно равна.

#### ▼ Список литературы

- Афанасьев В.Ю. Оценка точности решения в режиме PPP Static в программе RTKLib // Геопрофи. — 2020. — № 2. — С. 44–47.
- Афанасьев В.Ю. Обработка измерений в режиме PPP Static при разных эфемеридах и поправках часов спутников GPS и ГЛОНАСС // Геопрофи. — 2020. — № 6. — С. 53–56.
- ГНСС-приемники спутниковые геодезические многочастотные GEON G2. — <https://all-pribors.ru/opisanie/62985-16-geon-g2-73080#info>.
- Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения АО «ЦНИИмаш». — <ftp://ftp.glonass-iac.ru>.
- International GNSS Service. — <ftp://igs.ign.fr/pub/igs/data>.
- Scripps Orbit and Permanent Array Centre. — <http://sopac-src.ucsd.edu>.
- T. Takasu. RTKLIB ver. 2.4.2 Manual, 2013.
- Static Precise Point Positioning Accuracy in GrafNav 8.10 / Waypoint Products Group, NovAtel Inc. January 2008.