

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ СМАРТФОНОМ ХИАОМИ МІ 8 С ДВУХЧАСТОТНЫМ ГНСС-МОДУЛЕМ В РЕЖИМЕ 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 Поозиционинг Системс», с 2017 г. — в ООО «Мостоотряд-55». С 2019 г. работает в ФГУП «НИИ прикладной акустики», в настоящее время — научный сотрудник.

В ходе производственной деятельности автор выполняет геодезические измерения для определения координат пунктов локальных геодезических сетей и точек местности. Иногда требуемая точность определения координат некоторых точек местности находится в пределах нескольких дециметров в плане и по высоте. Данная точность значительно выше точности определения координат в автономном режиме геодезическими и навигационными спутниковыми приемниками, которая характеризуется уровнем от десятков до одного метра, но при этом значительно ниже точности, получаемой в относительных режимах, таких как Static, Kinematic, RTK (кинематика в режиме реального времени), которые характеризуются уровнем от нескольких сантиметров до нескольких миллиметров при благоприятных условиях для спутниковых измерений.

В мае 2016 г. компания Google объявила, что «сырые» данные спутниковых измерений доступны через операционную систему Android Nougat. В 2018 г. компания Xiaomi (Китай) выпустила первый в мире смартфон с двухчастотным

ГНСС-модулем — Xiaomi Mi 8 на основе чипсета Broadcom BCM47755 [1]. Таким образом, стала возможна запись и обработка «сырых» данных ГНСС-измерений с помощью смартфона Xiaomi Mi 8 на частотах:

- L1 и L5 (GPS);
- L1 (ГЛОНАСС);
- B1 (Beidou);
- E1 и E5a (Galileo);
- L1 и L5 (QZSS).

Целями данного исследования являлись:

— оценка точности определения координат с помощью смартфона Xiaomi Mi 8 в режиме Static;

— определение наименьшей продолжительности спутниковых измерений смартфоном Xiaomi Mi 8 относительно многочастотного спутникового геодезического приемника и второго такого же смартфона для определения координат с дециметровой точностью.

Для решения задач использовались:

— два многочастотных спутниковых геодезических приемника GEON G2 [2];

— два смартфона Xiaomi Mi 8;

— программа сбора «сырых» данных спутниковых измерений Geo++ RINEX Logger версии 2.1.6 для Android;

— программа постобработки спутниковых измерений MAGNET Tools версии 5.1.1.0;

— программа постобработки спутниковых измерений RTKLib ver. 2.4.3.

Спутниковые измерения выполнялись периодами различной продолжительности с 12.10.2021 г. по 16.02.2022 г. на трех пунктах K1, K2 и GR5 локальной геодезической сети, расположенной в Дмитровогорском с/п в районе деревни Новое Домкино Конаковского района Тверской области.

Геодезические координаты пункта K1 были определены с высокой точностью относительно трех пунктов Международной службы ГНСС (IGS) по непрерывным спутниковым измерениям, выполненным в период с 26 ноября по 13 декабря 2021 г. и обработанным в программе RTKLib в режиме Static с использованием точных эфемерид.

Координаты пунктов K2 и GR5 были определены с высокой точностью относительно пункта K1 по многочасовым спутниковым измерениям, выполненным в разные периоды времени с 26 ноября по 13 декабря 2021 г., обработанным в режиме Static и уравненным в программе MAGNET Tools.

Пункты K1 и K2 имели одинаковую конструкцию. Она представляла собой металлическую стойку высотой 30 см из комплекта спутникового приемника, закрепленную на металлической площадке с тремя опорными магнитами, которая позволяла установить пункты вблизи края плоской крыши двухэтажного здания. Поверхность площадки была приведена в горизонтальное положение с помощью цилиндрического уровня. В верхней части стойки, ось которой являлась центром пункта, имелось резьбовое соединение для принудительного центрирования спутникового приемника или стального диска для установки с помощью стяжек смартфона. Расстояние между пунктами K1 и K2 составляло 24,8 м.

Пункт GR5 представлял собой дюбель-гвоздь, вбитый в асфальтовое покрытие дороги на глубину 4 см. Установка спутниковых приемников над этим пунктом выполнялась с помощью геодезического штатива с трегером, оснащенный оптическим центриром и цилиндрическим уровнем. Расстояние между пунктами K1 и GR5 составляло 357,1 м, между пунктами K2 и GR5 — 337,9 м. Превышение между пунктами K1 — GR5 и K2 — GR5 составляло +8,7 м.

Условия для спутниковых измерений на всех пунктах можно считать благоприятными.

Первоначально для сбора «сырых» спутниковых измерений смартфонами использовалась программа rпex ON версии 1.3 для Android, но при анализе записанных данных обнаружались ошибки, из-за которых были получены некорректные результаты обработки «сырых» измерений. Поэтому в дальнейшем для сбора «сырых» спутниковых измерений смартфонами использовалась программа Geo++ RINEX Logger.

По фотографиям без задней крышки, описаниям смартфона Xiaomi Mi 8 и пробным экспериментам по записи и обработке спутниковых измерений было определено приблизительное расположение спутниковой антенны внутри смартфона. Точность центрирования и определения высоты смартфонов Xiaomi Mi 8 над пунктами можно охарактеризовать погрешностью 20 мм в плане и 5 мм по высоте. Для уменьшения влияния многолучевости в качестве экранирующей плоскости (groundplane) для первого и второго смартфонов использовались два стальных диска: диаметром 374 мм и толщиной 1,5 мм, диаметром 500 мм и толщиной 2,0 мм.

Программа Geo++ RINEX Logger позволяет создавать файлы с данными наблюдений (observation data) в формате RINEX, но не выполняет запись навигационных данных (navigation data). Поэтому при постоб-

работке использовались навигационные данные GPS и ГЛОНАСС в формате RINEX, записанные приемником GEON G2 или скачанные из открытого ресурса Международной службы ГНСС (IGS) [3].

Спутниковые измерения приемниками GEON G2 выполнялись в режиме Static с регистрацией сигналов навигационных спутников GPS и ГЛОНАСС с длительностью цикла измерений 1 с и маской угла возвышения спутников 10°.

Спутниковые измерения смартфонами Xiaomi Mi 8 выполнялись в режиме Static с регистрацией сигналов всех доступных ГНСС с длительностью цикла измерений 1 с и без ограничения маски угла возвышения спутников.

Разделение спутниковых измерений на периоды разной продолжительности и постобработка в режиме Static были выполнены в программе MAGNET Tools.

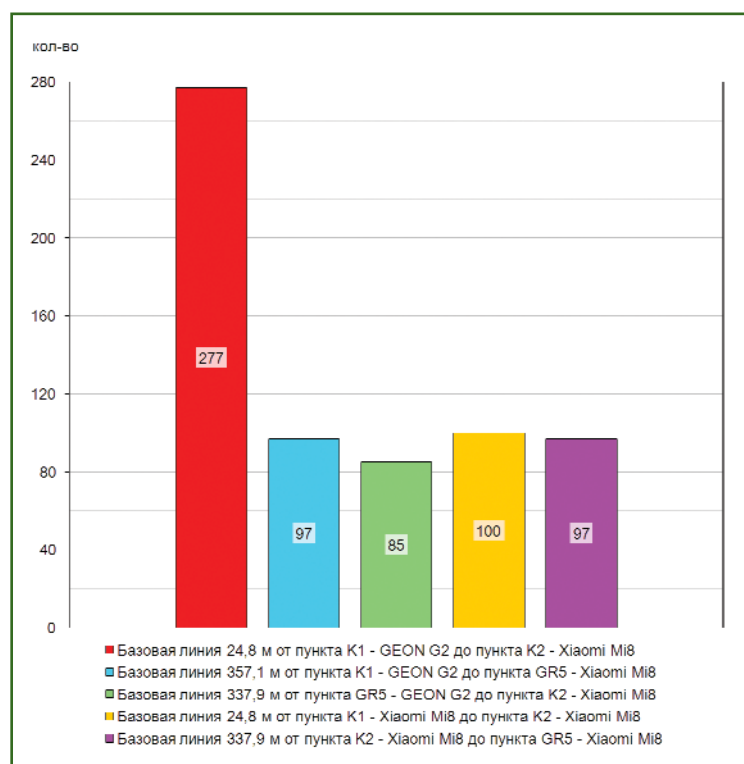


Рис. 1
Количество обработанных одночасовых интервалов для базовых линий

Количество фиксированных решений

Таблица 1

Продолжительность измерений, ч	Количество фиксированных решений, %				
	K1 — K2	K1 — GR5	GR5 — K2	K1 — K2	K2 — GR5
Базовая линия	K1 — K2	K1 — GR5	GR5 — K2	K1 — K2	K2 — GR5
Длина базовой линии, м	24,8	357,1	337,9	24,8	337,9
Средства измерений	GEON G2 — Xiaomi Mi 8	GEON G2 — Xiaomi Mi 8	GEON G2 — Xiaomi Mi 8	Xiaomi Mi 8 — Xiaomi Mi 8	Xiaomi Mi 8 — Xiaomi Mi 8
0,25	98,9	97,9	98,8	99,0	98,7
0,5	100,0	99,5	100,0	99,5	99,5
1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
12	100,0	—	—	—	—

При постобработке использовались:

— сигналы спутников GPS на частотах L1 и L5;

— сигналы спутников ГЛО-НАСС на частоте L1;

— маска угла возвышения спутников — 10°;

— бортовые эфемериды;

— режим процесса постобработки «Авто», при котором MAGNET Tools автоматически выбирает обрабатываемые частоты сигналов спутников, а также определяет необходимость использовать в обработке кодо-

вых измерений и измерений фазы несущей.

Количество обработанных однократных интервалов для базовых линий показано на рис. 1.

Постобработка спутниковых измерений в режиме Static была выполнена с продолжительностью периода обработки 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 6 ч для всех базовых линий и дополнительно с продолжительностью периода обработки 12 ч для базовой линии K1 — K2 длиной 24,8 м. Длительность одного цикла измерений составляла 1 с.

В результате постобработки были выявлены векторы, имеющие нефиксированное решение, где многозначность результатов спутниковых измерений не разрешена, которые были исключены из дальнейшей статистической обработки.

Количество фиксированных решений, где многозначность разрешена, от общего количества решений для различных базовых линий при разной продолжительности спутниковых измерений показано в табл. 1.

Количество отбракованных по двум итерациям решений, невязки которых превышают 3 СКО в плане или по высоте

Таблица 2

Продолжительность измерений, ч	Количество отбракованных решений, %				
	K1 — K2	K1 — GR5	GR5 — K2	K1 — K2	K2 — GR5
Базовая линия	K1 — K2	K1 — GR5	GR5 — K2	K1 — K2	K2 — GR5
Длина базовой линии, м	24,8	357,1	337,9	24,8	337,9
Средства измерений	GEON G2 — Xiaomi Mi 8	GEON G2 — Xiaomi Mi 8	GEON G2 — Xiaomi Mi 8	Xiaomi Mi 8 — Xiaomi Mi 8	Xiaomi Mi 8 — Xiaomi Mi 8
0,25	3,4	3,1	1,5	3,5	3,6
0,5	6,7	7,8	8,2	3,0	4,1
1	7,6	11,3	8,2	2,0	6,2
2	3,6	0,0	4,9	4,1	6,3
3	2,2	6,7	7,4	0,0	6,7
6	0,0	0,0	0,0	6,3	6,7
12	0,0	—	—	—	—

В программе MS Excel по формуле Гаусса вычислялись средние квадратические отклонения (СКО) полученных координат пунктов от принятых за истинные.

Двумя итерациями были отбракованы «грубые» решения, невязки которых превышали значение в 3 СКО в плане или по высоте.

Их количество от общего количества решений за исключением нефиксированных решений для базовых линий при разной продолжи-

тельности спутниковых измерений показано в табл. 2.

После двухитерационной отбраковки по критерию превышения 3 СКО в плане или по высоте по формуле Гаусса были вычислены 2 СКО определения координат в плане и по высоте смартфоном Xiaomi Mi 8 относительно приемника GEON G2 и второго смартфона (табл. 3).

Количество решений, невязки которых не превышают 2 СКО в плане и по высоте после отбраковки, от общего количества решений за исключением

нефиксированных и отбракованных решений для базовых линий при разной продолжительности спутниковых измерений приведено в табл. 4.

Решения для базовой линии K2 — GR5 длиной 337,9 м с установленными над пунктами смартфонами Xiaomi Mi 8 имеют меньшую СКО относительно решений для базовой линии K1 — K2 длиной 24,8 м с установленными над пунктами смартфонами Xiaomi Mi 8. Это можно объяснить тем, что решения для базовой линии K2 — GR5 имели

2 СКО определения координат в плане и по высоте смартфоном Xiaomi Mi 8 относительно приемника GEON G2 и второго смартфона

Таблица 3

Продолжительность измерений, ч	В плане / по высоте, мм	В плане / по высоте, мм	В плане / по высоте, мм	В плане / по высоте, мм	В плане / по высоте, мм
Базовая линия	K1 — K2	K1 — GR5	GR5 — K2	K1 — K2	K2 — GR5
Длина базовой линии, м	24,8	357,1	337,9	24,8	337,9
Средства измерений	GEON G2 — Xiaomi Mi 8	GEON G2 — Xiaomi Mi 8	GEON G2 — Xiaomi Mi 8	Xiaomi Mi 8 — Xiaomi Mi 8	Xiaomi Mi 8 — Xiaomi Mi 8
0,25	660 / 390	796 / 404	740 / 442	1046 / 650	986 / 509
0,5	268 / 196	410 / 225	364 / 218	801 / 444	697 / 331
1	84 / 98	141 / 105	157 / 115	580 / 288	396 / 172
2	50 / 80	101 / 71	67 / 81	372 / 259	235 / 186
3	46 / 80	46 / 71	58 / 73	312 / 217	162 / 92
6	48 / 88	53 / 61	39 / 84	163 / 93	38 / 43
12	46 / 78	—	—	—	—

Количество решений, невязки которых не превышают 2 СКО в плане и по высоте после отбраковки

Таблица 4

Продолжительность измерений, ч	В плане / по высоте, %	В плане / по высоте, %	В плане / по высоте, %	В плане / по высоте, %	В плане / по высоте, %
Базовая линия	K1 — K2	K1 — GR5	GR5 — K2	K1 — K2	K2 — GR5
Длина базовой линии, м	24,8	357,1	337,9	24,8	337,9
Средства измерений	GEON G2 — Xiaomi Mi 8	GEON G2 — Xiaomi Mi 8	GEON G2 — Xiaomi Mi 8	Xiaomi Mi 8 — Xiaomi Mi 8	Xiaomi Mi 8 — Xiaomi Mi 8
0,25	94,4 / 93,0	93,0 / 92,4	95,2 / 92,8	94,3 / 94,8	93,8 / 93,0
0,5	90,9 / 91,3	90,4 / 90,4	91,7 / 92,3	92,7 / 94,8	93,0 / 92,4
1	94,1 / 97,7	94,2 / 95,3	94,9 / 94,9	94,9 / 90,8	92,3 / 93,4
2	97,7 / 99,2	87,5 / 95,8	92,3 / 97,4	95,7 / 93,6	93,3 / 91,1
3	97,8 / 100,0	92,9 / 100,0	92,6 / 100,0	97,0 / 97,0	92,9 / 89,3
6	100,0 / 100,0	93,3 / 100,0	100,0 / 100,0	93,3 / 93,3	100,0 / 100,0
12	100,0 / 100,0	—	—	—	—

большее количество «грубых» решений (невязки которых превышали 3 СКО в плане или по высоте), которые были исключены из дальнейшей статистической обработки, что видно в табл. 2.

При продолжительности спутниковых измерений 6 часов точность определения координат смартфоном Xiaomi Mi 8 относительно такого же смартфона характеризуется 2 СКО не хуже 20 см в плане и 10 см по высоте.

На рис. 2 и 3 видно, что точность определения координат смартфоном Xiaomi Mi 8 относительно приемника GEON G2 для всех базовых линий перестает увеличиваться, а среднее значение для 2 СКО составляет:

— 48 мм в плане при продолжительности спутниковых измерений 3 часа и более, при этом более 92,6% решений не превышают 2 СКО в плане;

— 77 мм по высоте при продолжительности спутниковых измерений 2 часа и более, при этом более 95,8% решений не превышают 2 СКО по высоте.

Для всех базовых линий при определении координат смартфоном Xiaomi Mi 8 относительно приемника GEON G2 или такого же смартфона при продолжительности спутниковых измерений 15 минут и более количество решений, являющихся фиксированными (многозначность результатов спутниковых измерений разрешена), составляет более 97,9%, а при продолжительности 1 час и более — 100%.

Количество «грубых» решений, невязки которых превышают 3 СКО в плане или по высоте, от общего количества решений за исключением нефиксированных решений для всех базовых линий не превышает 11,3% и составляет в среднем 4,4%.

После двухитерационной отбраковки по критерию превы-

шения 3 СКО в плане или по высоте для всех базовых линий количество решений, невязки которых не превышают:

— 2 СКО в плане, более 87,5% и составляет в среднем 94,4%;

— 2 СКО по высоте, более 89,3% и составляет в среднем 95,4%.

Порядок величин невязок определения координат в плане и по высоте при постобработке спутниковых измерений в программе RTKLib ver. 2.4.3 в режиме Static согласуется с результатами, полученными в программе постобработки MAGNET Tools версии 5.1.1.0, но настройки постобработки при этом различны. При постобработке таких измерений с использованием программы RTKLib для получения корректных результатов

(с наименьшими невязками) настройки программы должны быть следующими:

— Interval (интервал обработки измерений) — 1 s (секунда);

— Frequencies (частоты) — L1+2+3+4+5;

— Filter Type (тип фильтра) — Combined;

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

— Ionosphere Correction (ионосферная коррекция) — OFF;

— Troposphere Correction (тропосферная коррекция) — Saastamoinen;

— Satellite Ephemeris/Clock (спутниковые эфемериды и часы) — Broadcast;

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

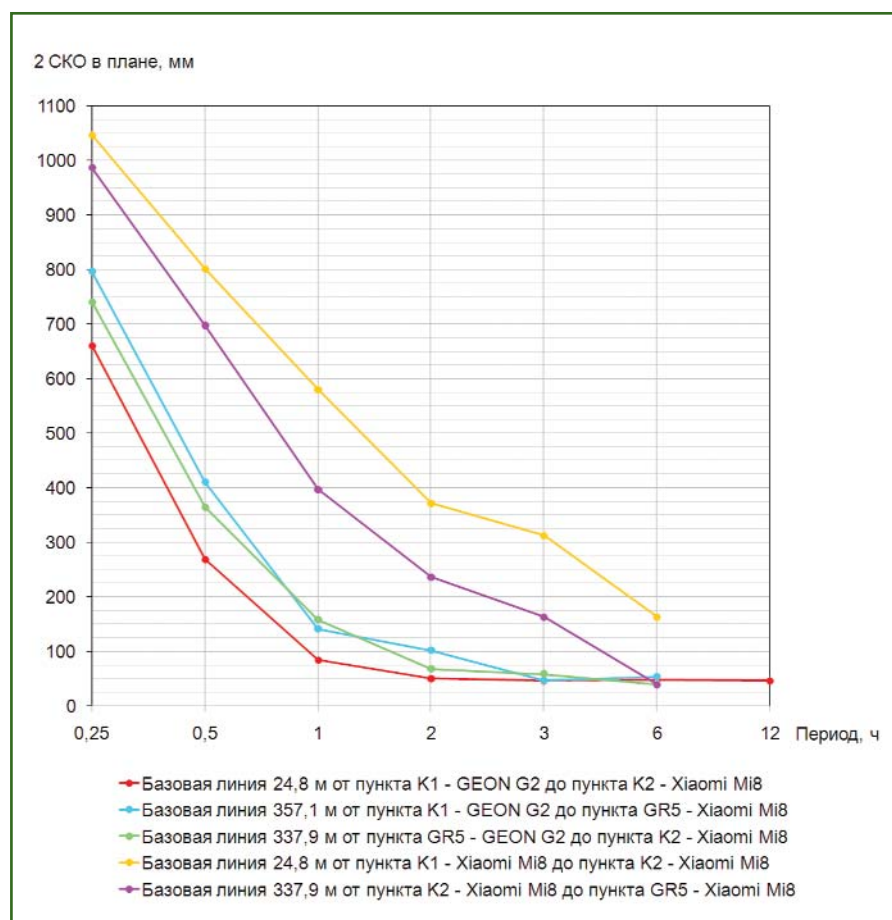


Рис. 2
Зависимость 2 СКО определения плановых координат смартфоном Xiaomi Mi 8 относительно приемника GEON G2 и второго смартфона от продолжительности ГНСС-измерений

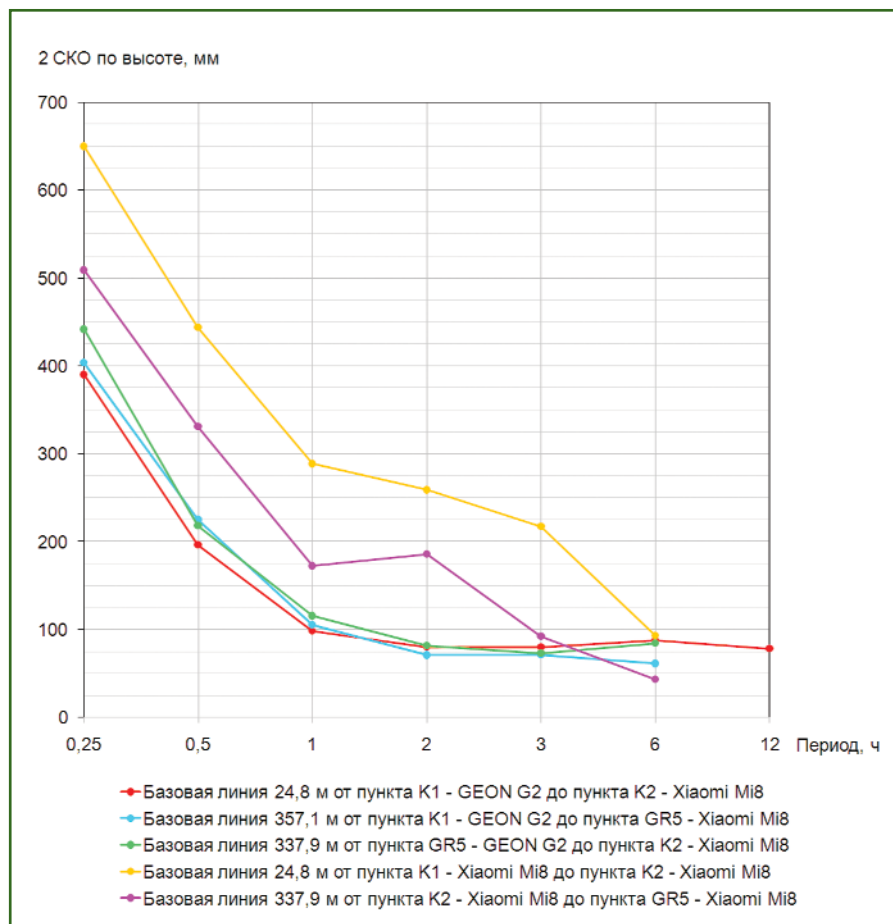


Рис. 3

Зависимость 2 СКО определения высоты смартфоном Xiaomi Mi 8 относительно приемника GEON G2 и второго смартфона от продолжительности GNSS-измерений

— GPS (используются сигналы спутников только навигационной системы GPS);

— Integer Ambiguity Res (целочисленное разрешение неоднозначности) — OFF (без разрешения неоднозначности, результаты имеют плавающее решение).

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Дециметровый уровень точности определения координат смартфоном Xiaomi Mi 8 с двухчастотным GNSS-модулем в плане и по высоте при благоприятных условиях для спутниковых измерений с регистрацией сигналов спутников GPS и ГЛОНАСС, длительностью цикла измерений 1 с и маской угла возвышения спутников 10° по

сле постобработки в режиме Static может быть достигнут в случае продолжительности спутниковых измерений:

— 2 часа и более при определении координат относительно многочастотного спутникового геодезического приемника GEON G2;

— 6 часов и более при определении координат относительно второго смартфона Xiaomi Mi 8.

2. Интервала GNSS-измерений в 15 минут может быть достаточно для субметрового уровня точности определения координат смартфонами Xiaomi Mi 8 с двухчастотным GNSS-модулем в плане и по высоте.

Автор рекомендует выполнять несколько спутниковых измерений с 15-минутными интервалами с целью исключения

нефиксированных решений, когда неоднозначность результатов спутниковых измерений не разрешена, и «грубых» решений, когда невязки в плане или по высоте превышают 3 СКО. Например, выполнить спутниковые измерения в течение 1 часа, далее провести постобработку (целиком, двух 30-минутных интервалов и четырех 15-минутных интервалов), исключить нефиксированные решения при их наличии и выполнить статистическую обработку полученных результатов.

При выполнении исследования автор осознал, насколько важно иметь в качестве научного руководителя компетентного специалиста, которому можно без опасений довериться, поскольку ориентироваться и принимать правильные решения в научной среде самостоятельно сложно.

Автор часто вспоминает слова профессора Геннадия Анатольевича Шанурова (1949–2017), своего научного руководителя магистерской диссертации: «Проблемы в образовании и научной деятельности молодых специалистов можно сформулировать двумя задаваемыми ими вопросами: «Зачем это делать так, если можно сделать по-другому? Зачем это делать, если можно не делать?». То есть проблемы происходят от отсутствия послушания и терпения.

▼ Список литературы

1. Guo L.; Wang F.; Sang J.; Lin X.; Gong, X.; Zhang, W. Characteristics Analysis of Raw Multi-GNSS Measurement from Xiaomi Mi 8 and Positioning Performance Improvement with L5/E5 Frequency in an Urban Environment. Remote Sens. 2020, 12, 744. — <https://doi.org/10.3390/rs12040744>.

2. GNSS-приемники спутниковые геодезические многочастотные GEON G2. — <https://all-pribors.ru/opisanie/62985-16-geon-g2-73080#info>.

3. International GNSS Service. — <ftp://igs.ign.fr/pub/igs/data>.