

УДК 528.2:629.78

DOI:10.30533/scidata-2022-13-07



Геодезия

Особенности оценки точности результатов фазовых измерений спутниковыми приемниками

АФФИЛИАЦИИ

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

✉ ivankrv@yandex.ru

ЦИТИРОВАНИЕ

Кравчук И.М. Особенности оценки точности результатов фазовых измерений спутниковыми приемниками // Пространственные данные: наука и технологии. 2022. № 13. С. 95–103.
DOI:10.30533/scidata-2022-13-07.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

спутниковый приёмник, ГЛОНАСС, NAVSTAR GPS, GALILEO, система уравнений, разности координат, длительность сеанса, регистрация фазовых циклов, ошибки эфемерид, тропосфера, ионосфера, скорость распространения радиоволн, изменение фазы, длина волны, шумы электронных блоков, расположение спутников, PDOP, HDOP, VDOP, оценка точности

И.М. Кравчук¹✉

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены основные источники ошибок при выполнении геодезических измерений спутниковыми методами, в том числе: ошибки эфемерид спутников, приводящих к неточному вычислению координат спутников на момент измерений; изменение скорости распространения электромагнитных волн в тропосфере и ионосфере, а также короткопериодические изменения скорости распространения радиоволн (флуктуации); изменение фазы принимаемого сигнала, вызванное приемом волн, отраженных от окружающих предметов; отклонения длин волн несущих частот от номинального значения; шумы электронных блоков приемников. Кроме этого, на точность вычисления определяемых величин влияет количество и расположение спутников на небосводе. Рассмотрены способы уменьшения влияния таких источников ошибок как: ошибки, обусловленные шумами электронных блоков приемников и шумами тропосферы и ионосферы (флуктуациями индекса преломления сред); ошибки влияния отраженных сигналов от окружающих объектов. Показано, что основное внимание необходимо уделить анализу влияния изменения скорости распространения электромагнитных волн в тропосфере и ионосфере, влиянию ошибок эфемерид спутников, а также учету отклонения длин волн несущих частот от номинального значения, что даст возможность разработать строгую оценку точности определяемых величин при выполнении геодезических измерений спутниковыми методами.

1 Введение

Современные спутниковые приемники позволяют одновременно принимать сигналы от нескольких десятков спутников, принадлежащих различным навигационным системам, таких как ГЛОНАСС, NAVSTAR GPS, GALILEO и некоторых других [1–7]. Кроме этого, спутниковые приемники обладают высоким быстродействием и большим объемом памяти. Это позволяет при обработке результатов полевых измерений сформировать систему уравнений, содержащую несколько сотен, а иногда и тысяч уравнений при определении всего четырех неизвестных: три координаты или три разности координат и длительность сеанса измерений. О необходимости введения четвертой неизвестной (длительности сеанса) было доложено на Международной научно-технической онлайн конференции «Пространственные данные в условиях цифровой трансформации»¹ (2020 г.) и опубликована научная статья [8]. Доказано, что величина длительности сеанса измерений необходима для введения в систему уравнений условия одновременности начала и конца регистрации фазовых циклов. В процессе решения системы уравнений четвертая неизвестная (длительность сеанса) исключается за ненадобностью на начальной стадии обработки результатов измерений, однако при составлении системы уравнений она необходима.

Измерение длительности сеанса может служить дополнительным источником информации и позволяет создать новые методы спутниковых измерений [9]. Столь перспективный метод измерений необходимо обеспечить объективной методикой оценки точности, над чем необходимо добросовестно работать. Это позволит разработать более эффективные методики измерений, а также будет способствовать повышению точности и оперативности измерений. Цель данного исследования состоит в рассмотрении основных источников ошибок, методов уменьшения их влияния, равно как и выделения наиболее значимых из них, влияющих на точность определения искомым величин при фазовых измерениях.

Возвращаясь к обработке результатов полевых измерений и сформированной системе уравнений, следует обратить внимание на то, что весь массив измерений направлен на поиск наиболее вероятного значения координат или, при дифференциальном методе измерений, разностей координат. Решение такой задачи возможно при использовании специализированной компьютерной программы и компьютера соответствующей мощности.

¹ Международная научно-техническая онлайн конференция «Пространственные данные в условиях цифровой трансформации» / International scientific and technical online conference «Spatial Data in the Context of Digital Transformation». [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.miiigaik.ru/science/conference/mezhdunarodnaya-nauchno-tekhnicheskaya-onlayn-konferentsiya-prostranstvennye-dannye-v-usloviyakh-tsi/?bitrix_include_areas=Y&ysclid=Ihgfxfw6hc649486300 (дата обращения: 14.06.2022).

Основными источниками ошибок, влияющих на точность определения искомых величин при фазовых измерениях, являются:

- ошибки эфемерид спутников приводящих к неточному вычислению координат спутников на момент измерений;
- изменение скорости распространения электромагнитных волн в тропосфере и ионосфере, а также короткопериодические изменения скорости распространения радиоволн (флуктуации);
- изменение фазы принимаемого сигнала, вызванное приемом волн, отраженных от окружающих предметов;
- отклонения длин волн несущих частот от номинального значения;
- шумы электронных блоков приемников.

Кроме этого, на точность вычисления определяемых величин влияет количество и расположение спутников на небосводе. С учетом приема сигналов большого числа спутников разных навигационных систем этот фактор практически достиг оптимального значения и его необходимо учитывать лишь в условиях ограниченной видимости небосвода (например, в городах).

2 Методика исследования

Учитывая сложность строгой оценки точности определяемых величин, разработана методика приближенной оценки точности, позволяющая оперативно прогнозировать ожидаемую точность результатов измерений. С этой целью введено понятие и термин DOP (англ. — «Dilution of Precision» — снижение точности), используемый для параметрического описания геометрического расположения спутников относительно антенны приемника.

Различают следующие варианты характеристики геометрического фактора² [10–15]:

- **PDOP** (англ. — «Position Dilution of Precision») — характеристика точности пространственного положения объекта (ошибка положения пункта в трехмерном пространстве);
- **HDOP** (англ. — «Horizontal Dilution of Precision») — характеристика точности положения объекта на «горизонтальной» плоскости (так как в трехмерном пространстве отсутствует понятие горизонта, имеется в виду точность положения объекта на поверхности Земли – точность определения широты и долготы объекта);
- **VDOP** (англ. — «Vertical Dilution of Precision») — характеристика точности определения геодезической высоты объекта.

Приведенные значения DOP используют как множитель для вычисления других ошибок, но для этого надо знать коэффициент пропорциональности, который

2 Голубев А.Н. Глобальные спутниковые навигационно-геодезические системы. М.: МИИГАиК, 2003. EDN: QKEAPT.

зависит от многих причин, в том числе и от методики полевых измерений.

Величину пространственного положения объекта PDOP рекомендуют вычислять по следующей формуле:

$$1 \quad PDOP = \sqrt{(HDOP)^2 + (VDOP)^2}.$$

Такой прием трудно назвать полезным. Понятие средняя квадратическая ошибка положения пункта использовалась геодезистами в те времена, когда при выполнении вычислительных операций использовались таблицы логарифмов и механические арифмометры.

Это позволяло приближенно, но с малыми затратами времени, разрабатывать проекты построения геодезических сетей и выполнять приблизительную предварительную оценку точности результатов полевых работ. Такие методы оценки точности применяли обычно в эскизных проектах. Среднюю квадратическую ошибку положения пункта вычисляли по следующим формулам:

$$2 \quad m_{xy}^2 = m_x^2 + m_y^2,$$

$$3 \quad m_{xy,h}^2 = m_x^2 + m_y^2 + m_h^2.$$

Чаще использовалась формула (2), а использование формулы (3) предпочитали избегать. Для того, чтобы обосновать строгий вывод формул (2) и (3), необходимо выполнить оценку точности функций:

$$f_{(x,y)} = x + y;$$

$$f_{(x,y,h)} = x + y + h, \text{ где } h \text{ — высота пункта.}$$

Как правило ни на практике, ни в теории геодезии такие функции не встречаются. Область возможного положения оцениваемого пункта, вычисленного по формулам (1), (2) и (3), существенно завышена, и использование этих формул не имеет обоснования, тем более, что координаты могут иметь разную размерность, например, полярные координаты. Если известны такие характеристики предмета как вес и цвет, то бессмысленно искать единую характеристику для описания этого предмета на основе этих двух известных величин.

Каждая координата должна иметь самостоятельную точностную характеристику. Учитывая сложности строгой оценки точности результатов измерений

Таблица 1 Рекомендуемые числовые значения DOP.

Table 1 Recommended DOP Numerical Values.

Значения DOP	Характеристика точности
<=1	идеальная
2–3	отличная
4–6	хорошая
7–8	средняя
9–20	ниже среднего
более 20	плохая

спутниковыми приемниками, сосредоточим внимание на анализе влияния основных источников ошибок на результаты фазовых измерений.

3 Результаты исследования

Ошибки, обусловленные шумами электронных блоков приемников и шумами тропосферы и ионосферы (флуктуациями индекса преломления сред), подчиняются законам случайных чисел, и ослабить их влияние в процессе измерений возможно путем увеличения числа повторных измерений и осреднения значений вычисляемых величин. Уменьшить влияния флуктуаций индекса преломления ионосферы также можно, выполняя ночные измерения. Ночью исключается ионизация верхних слоев атмосферы солнечной радиацией, и плотность электронов уменьшается практически в десять раз, соответственно уменьшается и флуктуация индекса преломления ионосферы.

Исключить или уменьшить влияния отраженных сигналов от окружающих объектов можно выбором удачного места расположения спутникового приемника или применив спутниковую антенну специальной конструкции, которая подавляет посторонние излучения.

4 Выводы

Таким образом, основное внимание необходимо уделить анализу влияния изменения скорости распространения электромагнитных волн в тропосфере и ионосфере, влиянию ошибок эфемерид спутников, а также учету отклонения длин волн несущих частот от номинального значения, что даст возможность разработать строгую оценку точности определяемых величин.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: в 2 т. Т. 1. М.: Картгеоцентр, 2005. 333 с.
2. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: в 2 т. Т. 2. М.: Картгеоцентр, 2006. 359 с.
3. Генике А.А., Побединский Г.Г. Глобальные спутниковые системы определения местоположения GPS и их применение в геодезии. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Картгеоцентр, 2004. 355 с.
4. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС. Под ред. В.Н. Харисова и др. М.: ИПРЖР, 1998. 399 с.

5. Лысенко А.А. Глобальная навигационная спутниковая система Галилео // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2019. Т. 1. № 1. 90 с. EDN: QHFONM.
6. Шукеева А.Н. Точное позиционирование с современными глобальными навигационными спутниковыми системами: GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou // Молодой ученый. 2019. № 3(241). С. 64–66. EDN: VIZTWF.
7. Grewal M.S., Andrews A.P., Barton C.G. Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration, 4th Edition. Wiley: 2020. 608 p.
8. Ключин Е.Б., Кравчук И.М. Повышение обусловленности системы уравнений при обработке результатов фазовых измерений спутниковыми приемниками // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2020. Т. 64. No 3. С. 269–276. DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-3-269-276.
9. Ключин Е.Б., Кравчук И.М. Теоретические аспекты метода фазового зонда // Геодезия и картография. 2022. № 5. С.11–18. DOI:10.22389/0016-7126-2022-983-5-11-18.
10. Гордеев В.А., Раева О.С. Влияние геометрического фактора на точность спутникового позиционирования // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2018. № 3. С. 26–31. DOI:10.21440/0536-1028-2018-3-26-31.
11. Сальников Д.В., Журавлев Д.А., Прасько Г.А., Мешков И.С. Исследование геометрического фактора глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС, GPS и GALILEO // Альманах современной науки и образования. 2015. № 11(101). С. 94–100. EDN: UZHMHX.
12. Шануров Г.А., Остроумов В.З. Влияние геометрии спутниковых наблюдений на точность определения геодезических высот уровенных постов // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2004. № 1. С. 3–12. EDN: VGANWH.
13. Leick A. GPS Satellite Surveying. 3rd ed. New York: Wiley & Sons, Inc, 2004. 399 p.
14. Seeber G. Satellite Geodesy. 2nd completely revised and extended ed. Berlin — New York: Walter de Gruyter, 2003. 612 p.
15. Teunissen P.J.G., Kleusberg A. GPS for geodesy. Berlin: Springer, 1998. 655 p.

АВТОР

Иван Михайлович Кравчук

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»

(МИИГАиК), Москва, Россия

кафедра геодезии, геодезический факультет

канд. техн. наук

 0000-0002-8842-8700

Поступила 01.02.2022. Принята к публикации 10.12.2022. Опубликовано 25.12.2022.

UDC 528

DOI:10.30533/scidata-2022-13-07

Features of evaluating the accuracy for the results of phase measurements by means of satellite receivers

Ivan M. Kravchuk¹✉

AFFILIATIONS

¹ Moscow State University Geodesy and Cartography, Russia, Moscow

✉ ivankrv@yandex.ru

CITATION

Kravchuk IM. Features of evaluating the accuracy for the results of phase measurements by means of satellite receivers. *Spatial Data: science, research and technology*. 2022;13: 95–103. DOI:10.30533/scidata-2022-13-07.

KEY WORDS

satellite receiver, GLONASS, NAVSTAR GPS, Galileo, system of equations, coordinate difference, registration of phase cycles, ephemeride errors, troposphere, ionosphere, phase change, electronic blocks, location of satellites, PDOP, HDOP, VDOP, accuracy assessment

ABSTRACT

The article considers the main sources of errors when performing geodetic measurements by satellite methods, including: satellite ephemeris errors leading to inaccurate calculation of satellite coordinates at the time of measurements; change in the speed of propagation of electromagnetic waves in the troposphere and ionosphere, as well as short-term changes in the speed of propagation of radio waves (fluctuations); a change in the phase of the received signal caused by the reception of waves reflected from surrounding objects; deviations of wavelengths of carrier frequencies from the nominal value; noise of electronic units of receivers. In addition, the accuracy of calculating the determined quantities is affected by the number and location of satellites in the sky. The ways of reducing the influence of such sources of errors as: errors caused by the noise of the electronic units of the receivers and the noise of the troposphere and ionosphere (fluctuations of the refractive index of media);

errors of the influence of reflected signals from surrounding objects. It is shown that the main attention should be paid to the analysis of the influence of changes in the propagation velocity of electromagnetic waves in the troposphere and ionosphere, the influence of satellite ephemeris errors, as well as taking into account the deviation of carrier frequency wavelengths from the nominal value, which will make it possible to develop a rigorous assessment of the accuracy of the determined quantities when performing geodetic measurements by satellite methods.

REFERENCES

1. Antonovich KM. *Ispol'zovanie sputnikovyykh radionavigatsionnykh sistem v geodezii* [The use of satellite radio navigation systems in geodesy]. Vol. 1. Moscow: Kartgeotsentr, 2005. 333 p.
2. Antonovich KM. *Ispol'zovanie sputnikovyykh radionavigatsionnykh sistem v geodezii* [The use of satellite radio navigation systems in geodesy]. Vol. 2. Moscow: Kartgeotsentr, 2006. 359 p.
3. Genike AA, Pobedinsky GG. *Global'nye sputnikovye sistemy opredeleniya me-stopolozheniya GPS i ikh primeneniye v geodezii* [Global satellite positioning systems GPS and their application in geodesy] 2nd ed. Moscow: Kartgeotsentr, 2004. 355 p.
4. *Global'naya sputnikovaya radionavigatsionnaya sistema GLONASS* [Global satellite radio navigation system GLONASS]. Ed. Kharisova VN, et al. Moscow: IPRZhR, 1998. 399 p.
5. Lysenko AA. Global'naya navigatsionnaya sputnikovaya sistema Galileo [Global navigation satellite system Galileo]. *Proceedings of Science Week of St. Petersburg State Maritime Technical University*. 2019;1(1). 90 p.
6. Shukeeva AN. Tochnoe pozitsionirovaniye s sovremennymi global'nymi navigatsionnymi sputnikovymi sistemami: GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou [Accurate positioning with modern global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou]. *Molodoi uchenyi*. 2019;3(241): 64–66.
7. Grewal MS, Andrews AP, Barton C.G. *Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration*. 4th Edition. Wiley, 2020. 608 p.
8. Klyushin EB, Kravchuk IM. Increasing the conditionality of the system of equations when processing the results of phase measurements by satellite receivers. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2020;64(3): 269–276. DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-3-269-276.
9. Klyushin EB, Kravchuk IM. Theoretical aspects of the phase probe method. *Geodesy and Cartography*. 2022;5:11–18. DOI:10.22389/0016-7126-2022-983-5-11-18.
10. Gordeev VA, Raeva OS. Vliyanie geometricheskogo faktora na tochnost' sputnikovogo pozitsionirovaniya [The influence of the geometric factor on the accuracy of satellite positioning]. *Minerals and Mining Engineering*. 2018;3: 26–31. DOI:10.21440/0536-1028-2018-3-26-31.
11. Salnikov DV, Zhuravlev DA, Prasko GA, Meshkov IS. Issledovanie geometricheskogo faktora global'nykh navigatsionnykh sputnikovyykh sistem GLONASS, GPS i GALILEO

- [Study of the geometric factor of the global navigation satellite systems GLONASS, GPS and GALILEO]. *Al'manakh sovremennoi nauki i obrazovaniya*. 2015;11(101): 94–100.
12. Shanurov GA, Ostroumov VZ. Vliyanie geometrii sputnikovykh nablyudenii na tochnost' opredeleniya geodezicheskikh vysot urovennykh postov [Influence of the geometry of satellite observations on the accuracy of determining geodetic heights of level posts]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2004;1: 3–12.
 13. Leick A. *GPS Satellite Surveying*. 3rd ed. New York: Wiley & Sons, Inc, 2004. 399 p.
 14. Seeber G. *Satellite Geodesy*. 2nd completely revised and extended ed. Berlin — New York: Walter de Gruyter, 2003. 612 p.
 15. Teunissen PJG., Kleusberg A. *GPS for geodesy*. Berlin: Springer, 1998. 655 p.

AUTOR

Ivan M. Kravchuk

Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Moscow, Russia

Department of Geodesy, Faculty of Geodesy

Ph.D. in Engineering

 0000-0002-8842-8700

Submitted: February 01, 2022. Accepted: December 10, 2022. Published: December 25, 2022.