УДК 528.2

А.И. Солодовник, Д.Н. Шурыгин, Т.В. Литовченко, Д.М. Николаева, А.М. Николаева

ВЫСОКОТОЧНОЕ СПУТНИКОВОЕ НИВЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ВЫСОТ КВАЗИГЕОИДА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

В настоящее время точность определения планового положения пунктов (плановых координат) современных GPS-приемников относительно базового пункта по методу базовой станции в режиме статических измерений составляет 3 ± 0,5 мм на один километр длины базовой линии, что говорит о достаточной эффективности применения метода для решения различных инженерно-геодезических задач. В то же время, точность определения высотного положения пунктов (отметок) в два раза ниже плановой точности, т.е. она составляет 6 ± 0,5 мм/км. Данная среднеквадратическая погрешность (СКП) сопоставима с СКП нивелирования III класса m_h = 5 мм на км хода, что говорит о недостаточной точности спутникового нивелирования по сравнению с высокоточным геометрическим нивелированием I и II класса (m_h = 5 мм и m_h = 2 мм соответственно). Поэтому решение задачи по повышению точности спутникового нивелирования является актуальным.

Ключевые слова: спутниковое нивелирование, локальная модель, квазигеоид.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-109-114

Введение

Спутниковое позиционирование на основе глобальных спутниковых навигационных систем широко используется в геодезических съемках [1—4]. В России эта технология активно применяется с конца прошлого века. На основании практического опыта использования спутникового позиционирования было выделены преимущества перед традиционной съемкой (удовлетворительная точность, работа в условиях отсутствия видимости между геодезическими пунктами, независимость от погодных условий). Самым значительным свойством спутниковых технологий является возможность автоматизации определения координат, что существенно повышает оперативность съемки и обеспечивает возможность работы даже в движении. Методы спутникового позиционирования являются экономически выгодными, повышает производительность деятельности геодезиста. Особую значимость имеет высокая эффективность съемочных работ в труднодоступных районах (например, в гористой местности) нашей страны.

В работе [5] В.И. Обиденко и др. рассматривают проблему определения нормальных высот (для условий Новосибирской области). В качестве основы была взята глобальная математическая модель геоида EGM 2008. Для анализа спутниковых измерений было использо-

© А.И. Солодовник, Д.Н. Шурыгин, Т.В. Литовченко, Д.М. Николаева, А.М. Николаева. 2017.

вано специализированное программное обеспечение (Leica Geo Office). Разность высот, определенных по модели, и высотами (по данным геометрического нивелирования и спутниковых измерений) была рассмотрена в качестве систематического сдвига. Глобальная модель геоида была локализована для определенной территории. На основе указанного подхода были получены нормальные высоты спутниковым методом с точностью нивелирования IV класса. Как считают авторы, увеличение точности вычисления нормальных высот достигается повышением однородности и детальности данных (спутниковых технологий и инструментального нивелирования) на контрольных пунктах, расположенных в локальной области.

Н.К. Шендрик в статье [6] предложил несколько локальных моделей геоида EGM 2008-2,5' в системе координат WGS-84. Для моделирования было использовано программное обеспечение Trimble Business Center. Нормальная высота определялась как среднее от значений в точках, расположенных на параллелях. Среднеквадратическая погрешность отклонений составила ±2 мм. К.И. Маркович и М.В. Макарова в работе [7] проанализировали определение нормальных высот по данным спутниковых измерений и гравитационных моделей (для геоидов EGM 2008 и EIGEN-6C4). Модели геоида могут быть использованы при геодезических съемках [8]. В работе [9] П.В. Яковлев и др. осуществили сравнение точности определения высот спутниковым методом с нивелированием при построении сетей. Спутниковое позиционирование позволяет определить гравиметрические данные. А.А. Ларионов и Н.И. Рудницкая в работе [10] достигли следующей точности: 5—10 мм в режиме «Статика», 10—20 мм в режиме RTK. М.В. Гувеннов в статье [11] описано влияние геодезических сетей на вид локальной модели геоида.

Теория вопроса

На основе спутниковых технологий возможна следующая последовательность работ по вычислению высот пунктов:

- выбор нескольких пунктов с известными координатами в какой-либо системе координат;
- вычисление превышения до указанных пунктов в выбранной системе координат;
- определение высот других пунктов по опорным точкам;
- вычисление параметров преобразования высот из одной системы координат в другую.

На основании способа вычисления высот необходимо определить свойства квазигеоида по общим пунктам, а затем выполняются полевые геодезические работы для определения превышений. Также необходимо определить эллипсоидальные высоты определяемых пунктов относительно какого-либо эллипсоида и их ортометрических высот, основываясь на параметрах плоскости квазигеоида.

Данные рекомендации по применению спутниковых методов должны обеспечить повышение точности определения высот с точностью позиционирования. При передаче ортометрических высот на большие расстояния всегда появляется погрешность, вызванная расхождением между реальной поверхностью геоида и плоскостью квазигеоида. В таких ситуациях без привлечения гравиметрических данных достичь высокой точности вычисления высот не удастся.

Следует также иметь в виду, что точность определения эллипсоидальных высот (а затем и точность ортометрических) зависит от непосредственного качества измерений. Поэтому при использовании спутниковых технологий на станции антенны приемников должны быть расположены на открытых участках (в данном месте должны отсутствовать сооружения, деревья и другие препятствия), чтобы был

обеспечен прием сигналов всех возможных спутников, и не было переотраженных сигналов. Также следует учитывать возможное влияние тропосферной задержки сигналов спутников.

На основании вышеизложенного можно сформулировать вывод: точность определения высот будет зависеть от степени точности плоскости квазигеоида на заданной территории, поэтому в дальнейших исследованиях при нивелировании спутниковым методом необходимо применять локальную модель геоида.

Методы анализа

Спутниковое нивелирование позволяет получить ортометрическую высоту по данным GPS-измерений [12, 13]. Традиционный метод определения величин нормальных высот (геометрическое нивелирование) значительно хуже по стоимости и эффективности геодезических работ. При этом спутниковое нивелирование имеет худшую точность, по сравнению с инструментальными методами. Поэтому создание условий для практического применения метода точного (а возможно и высокоточного) спутникового нивелирования является одним из приоритетных направлений современного развития геодезии.

На основе спутниковых наблюдений определяют эллипсоидальные высоты точек. В результате по высотам квазигеоида могут быть вычислены нормальные высоты. Следовательно, производство спутникового нивелирования включает в себе как спутниковые измерения для получения эллипсоидальных высот, так и определение высот квазигеоида на определяемых пунктах.

Высоты квазигеоида не могут быть получены инструментальным способом, а определяются из какой-либо математической модели (комплекс данных и формализованный математический аппарат). Модель используется для определения поля значений высот геоида по области определения модели. Оптимальная модель высот квазигеоида создается для каждого конкретного региона. Такие модели представляют собой массив значений высот геоида в узлах регулярной сетки, которая определяется необходимыми широтами и долготами. Регулярная сетка в некоторой картографической проекции также может задаваться и плоскими координатами.

Для создания модели используются данные гравиметрических измерений и значения высот квазигеоида. Последние могут быть вычислены на сети опорных пунктов (как разность эллипсоидальных и нормальных высот). Данные высот квазигеоида на опорных пунктах связывают модель высот с системой геодезических координат. Гравиметрические данные необходимы для интерполирования высот квазигеоида между опорными пунктами.

Региональные модели характеризуются сантиметровой точностью. Локальные модели наиболее эффективны для территорий, протяженность которых лежит в диапазоне 10—20 км. Такие модели постоянно разрабатываются для производства геодезических изысканий на небольших территориях. Порядок создания локальных моделей аналогичен описанным выше региональным моделям. Высоты квазигеоида определяются так же из измерений на нескольких опорных пунктах, далее вычисляются параметры, определяющие локальную модель квазигеоида. В качестве локальной поверхности квазигеоида принимается плоскость. Погрешность локальной замены поверхности плоскостью составляет сантиметр на километр территории.

В районах с мало изменчивым гравиметрическим полем методическая погрешность аппроксимации поверхности высоты квазигеолида плоскостью практически нулевая. Преимуществом спутни-

кового нивелирования перед геометрическим нивелированием является возможность использования в качестве исходных пунктов не только с известными нормальными высотами, но и пунктов с известными эллипсоидальными высотами.

Обсуждение результатов

Важнейшей и актуальной задачей геодезии является развитие метода спутникового нивелирования, которое не может быть достижимо без улучшения точности определения высот. Важным в определении эллипсоидальных высот точек является непосредственно полевые измерения, с правильным (для требуемой точности работ) выбором метода, режима, величины базовой линии и других факторов, влияющих на точность измерений и, следовательно, определяющих погрешности измерений. Основной задачей здесь является минимизация этих погрешностей, а возможно и исключение некоторых из них.

Кроме того, другой не менее важной задачей является получение ортометрических высот через спутниковое нивелирование. Для этого нужно знать высоты геоида для данного участка местности и соответственно эллипсоидальные высоты. Эта задача должна решаться построением локальных моделей высот геоида, с применением гравиметрической информации. Необходимо провести ряд экспериментальных работ по нахождению оптимальной полевой и камеральной математической обработки, связанных с изменением высот приемника, а также их программной обработки с учетом локальных моделей геоида.

Заключение

В работе представлено решение задачи определения влияния на выбор модели высот кавзигеоида параметров спутниковых геодезических сетей и особенностей территории, на которой производится геодезическая съемка.

В зависимости от выбранной модели изменяется оценка точности нормальных высот в пунктах спутниковой сети. Особый интерес представляет создание гибридных моделей высот квазигеоила.

Разработанная методика анализа модели высот квазигеоида необходима для обеспечения решения задач, встречающихся при производстве геодезической съемки.

Среди возможных областей применения методики построения модели квазигеоида можно выделить: выявление исходных пунктов, имеющих большую погрешность определения высотных отметок; оптимизация спутниковой геодезической сети; определение высот новых пунктов сети на основе спутникового нивелирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bentel K., Schmidt M.*, *Gerlach C. D.*ifferent radial basis functions and their applicability for regional gravity field representation on the sphere // GEM — International Journal on Geomathematics. — 2013, Vol. 4 (1), pp. 67—96.

2. *Eshagh M.*, *Zoghi S. L*ocal error calibration of EGM08 geoid using GNSS/levelling data // Journal of Applied Geophysic, 2016, Vol. 130, pp. 209—217.

3. *Hayn M., Panet I., Diament M., Holschneider M., Mandea M.*, *Davaille A. W*avelet-based directional analysis of the gravity field: Evidence for large-scale undulations // Geophysical Journal International, 2012, Vol. 189 (3), pp. 1430—1456.

4. *Jiang T.*, *Wang Y. M.* On the spectral combination of satellite gravity model, terrestrial and airborne gravity data for local gravimetric geoid computation // Journal of Geodesy, 2016, Vol. 90 (12), pp. 1405—1418.

5. *Обиденко В. И.*, *Опритова О. А.*, *Решетов А. П.* Разработка методики получения нормальных высот на территории Новосибирской области с использованием глобальной модели геоида EGM2008 // Вестник СГУГиТ. — 2016. — № 1 (33). — С. 14—25.

6. *Шендрик Н. К.* Формирование локальной цифровой модели высот геоида на территорию Новосибирской области // Вестник СГУГиТ, 2016. — № 4 (36). — С. 66—72.

7. *Маркович К. И.*, *Макарова М. В.* Анализ получения нормальных высот точек земной поверхности с использованием данных спутниковых измерений и моделей геоида // Вестник Полоцкого государственного университета. — 2016. — № 8. — С. 139—142.

8. Инженерные изыскания для строительства: СНБ 1.02.01-96. М-во архитектуры и стр-ва. Введ. 1996.06.01. — Минск, 1996. — С. 14—17.

9. *Яковлев П. В.*, *Тухель Е. А.*, *Веселова О. А.* О совершенствовании методов спутниковых высотных определений // Маркшейдерский вестник. — 2014. — № 5. — С. 45—47.

10. *Ларионов А. А.*, *Рудницкая Н. И.* Создание локальной модели высот квазигеоида геометрическим методом // Земля Беларуси. — 2016. — № 1. — С. 36—41.

11. *Гувеннов М. Б.* Разработка методики научно обоснованного выбора модели высот квазигеоида при постобработке результатов спутникового нивелирования на линейных объектах большой протяженности // Инженерные изыскания. — 2012. — № 2. — С. 46—63.

12. *Шурыгин Д. Н.*, *Солодовник А. И.* О необходимости повышения точности спутникового нивелирования при геодезических и маркшейдерских работах на геодинамических полигонах // Горный информационно-аналитический бюллетень Проблемы маркшейдерско-геодезического обеспечения развития горных работ. Отдельные статьи. — 2015. — № 11 (СВ 47). — С. 21—26.

13. *Демьянов Г. В.*, *Майоров А. Н.* К вопросу об установлении единой общеземной системы нормальных высот / Научно-технический сборник по геодезии, аэрокосмическим съемкам и картографии. Физическая геодезия. — М.: ЦНИИГАиК, 2004. — С. 12—16. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Солодовник Александр Игоревич[1] — аспирант,
Шурыгин Дмитрий Николаевич[1] — кандидат технических наук, доцент, e-mail: shurygind@mail.ru,
Литовченко Татьяна Викторовна[1] — кандидат технических наук, доцент,
Николаева Дарья Михайловна[1] — студент,
Николаева Александра Михайловна[1] — студент,
[1] Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 12, pp. 109–114.

UDC 528.2

A.I. Solodovnik, D.N. Shurygin, T.V. Litovchenko, D.M. Nikolaeva, A.M. Nikolaeva

HIGH-PRECISION SATELLITE LEVELING AND ANALYSIS OF LOCAL MODEL OF QUASI-GEOIDAL RISE IN THE TERRITORY OF RUSSIA

Currently, the accuracy of determining the planned position of the points (planned coordinates) of modern GPS receivers relative to the base station by the base station method in the static measurement mode is 3 ± 0.5 mm per one kilometer of the baseline length, which indicates sufficient effectiveness of the method to solve various engineering and geodetic tasks.

At the same time, the accuracy of determining the altitude of points (marks) is half the planned accuracy, i.e. it is 6 ± 0.5 mm/km. This root-mean-square error (SPC) is comparable to the UPC of

level III leveling m_h = 5 mm per km, which indicates the insufficient accuracy of satellite leveling in comparison with the high-precision geometric leveling of I and II classes (m_h = 5 mm and m_h = 2 mm, respectively). Therefore, the solution of the problem of increasing the accuracy of satellite leveling is relevant.

Key words: satellite leveling, local model, quasi-geoid.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-109-114

AUTHORS

Solodovnik A.I.[1], Graduate Student,
Shurygin D.N.[1], Candidate of Technical Sciences,
Assistant Professor, e-mail: shurygind@mail.ru,
Litovchenko T.V.[1], Candidate of Technical Sciences,
Assistant Professor,
Nikolaeva D.M.[1], Student,
Nikolaeva A.M.[1], Student,
[1] M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
346428, Novocherkassk, Russia.

REFERENCES

1. Bentel K., Schmidt M., Gerlach C. D.ifferent radial basis functions and their applicability for regional gravity field representation on the sphere. GEM. *International Journal on Geomathematics*. 2013, Vol. 4 (1), pp. 67—96.

2. Eshagh M., Zoghi S. Local error calibration of EGM08 geoid using GNSS/levelling data. *Journal of Applied Geophysic*, 2016, Vol. 130, pp. 209—217.

3. Hayn M., Panet I., Diament M., Holschneider M., Mandea M., Davaille A. Wavelet-based directional analysis of the gravity field: Evidence for large-scale undulations. *Geophysical Journal International*, 2012, Vol. 189 (3), pp. 1430—1456.

4. Jiang T., Wang Y. M. On the spectral combination of satellite gravity model, terrestrial and airborne gravity data for local gravimetric geoid computation. *Journal of Geodesy*, 2016, Vol. 90 (12), pp. 1405—1418.

5. Obidenko V. I., Opritova O. A., Reshetov A. P. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologiy*. 2016, no 1 (33), pp. 14—25.

6. Shendrik N. K. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologiy*, 2016, no 4 (36), pp. 66—72.

7. Markovich K. I., Makarova M. V. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016, no 8, pp. 139—142.

8. *SNB 1.02.01-96. Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva*. Ministerstvo arkhitektury i stroitel'stva. Vvedeny 1996.06.01 (Construction Norms of Republic Belarus 1.02.01-96. Engineering surveys for construction. The Ministry of architecture and construction. Introduced 1996.06.01), Minsk, 1996, pp. 14—17.

9. Yakovlev P. V., Tukhel' E. A., Veselova O. A. *Marksheyderskiy vestnik*. 2014, no 5, pp. 45—47.

10. Larionov A. A., Rudnitskaya N. I. *Zemlya Belarusi*. 2016, no 1, pp. 36—41.

11. Guvennov M. B. *Inzhenernye izyskaniya*. 2012, no 2, pp. 46—63.

12. Shurygin D. N., Solodovnik A. I. G*ornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 11, Special edition 47, pp. 21—26.

13. Dem'yanov G. V., Mayorov A. N. *Nauchno-tekhnicheskiy sbornik po geodezii, aerokosmicheskim s"emkam i kartografii. Fizicheskaya geodeziya* (Scientific and technical collection on a geodesy, space shootings and cartography. Physical geodesy), Moscow, TsNIIGAiK, 2004, pp. 12—16.