

РОЛЬ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИИ СО СВЕРХДЛИННОЙ БАЗОЙ В ЗАДАНИИ И ПОДДЕРЖАНИИ СИСТЕМЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ВЫСОТ

Г.А. Шануров (МИИГАиК)

В 1971 г. окончил геодезический факультет МИИГАиК по специальности «астрономогеодезия». После окончания института работал в отделе инженерных изысканий в/ч 33859. С 1975 г. работает в МИИГАиК, в настоящее время — профессор кафедры высшей геодезии. Доктор технических наук. Член Международной ассоциации геодезии (IAG).

А.В. Щуров («ГеоПроТехнология»)

В 2010 г. окончил геодезический факультет МИИГАиК по специальности «астрономо-геодезия». После окончания университета работал в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта. В настоящее время — инженер ООО «ГеоПроТехнология».

В журнале «Геопрофи» № 3-2013 были опубликованы три статьи, посвященные в тех или иных аспектах проблеме определения высот пунктов геодезических сетей [1–3]. Из содержания редакционной статьи этого номера можно сделать вывод о том, что редакция журнала заинтересована в публикации материалов по данной тематике. Действительно, эта тематика является актуальной [4]. Например, на кафедру высшей геодезии МИИГАиК обращаются специалисты, являющиеся студентами заочного факультета, с просьбой о консультации по следующей проблеме. Необходимо вычислить нормальную высоту пункта, на котором по результатам спутниковых наблюдений получена геодезическая высота. При этом в техническом задании на выполнение работ указана допустимая погрешность определения нормальной высоты, соответствующая геометрическому нивелированию IV класса, т. е. имеющая величину в нес-

колько сантиметров в зависимости от расстояния до исходных реперов. Такого рода задача возникает, например, на труднопроходимых территориях месторождений, на уровнемерных станциях и постах, расположенных на островах. Решение сводится к определению аномалии высоты на этом пункте. Трудность же состоит в том, что аномалия высоты, полученная по модели геоида (квазигеоида), содержит погрешность не менее 10 см. Успешная попытка уточнения аномалии высоты описана в статье [1].

Нормальная высота H^g пункта и геодезическая высота H этого же пункта связаны выражением [5]:

$$H = H^g + \zeta. \quad (1)$$

В этой формуле ζ — аномалия высоты. Отсчетной поверхностью является квазигеоид. Ортометрическая высота H^g пункта связана с геодезической высотой этого же пункта аналогичным выражением, где аномалию высоты обозначают тем же символом ζ . Однако

числовые значения аномалии высоты на одном и том же пункте в системе нормальных высот и в системе ортометрических высот разные. Другими словами, геоид, являющийся отсчетной поверхностью в системе ортометрических высот, не совпадает с квазигеоидом.

В учебнике [6] написано буквально следующее: «Понятие высоты, несмотря на кажущуюся очевидность, является одним из наиболее сложных и тонких понятий геодезии. Это связано с двойственным смыслом высоты: с одной стороны, это расстояние между точками в пространстве, т. е. чисто геометрическое понятие; с другой стороны, в физическом понимании, это величина, определяющая энергетический уровень той или иной точки в поле силы тяжести». Такая двойственность в явном виде подчеркнута и в упомянутой редакционной статье.

Для определенности необходимо напомнить известное обстоятельство. Степень этих

«сложностей и тонкостей» зависит от требуемой точности, т. е. от допустимой погрешности определения нормальной высоты. Погрешность определения геодезической высоты, полученной по результатам спутниковых наблюдений, не вносит существенного вклада в погрешность определения нормальной высоты с использованием формулы (1), поскольку редко превышает 1 см. Основным вкладом вносит погрешность определения аномалии высоты. В статье [1] описана методика обработки результатов спутниковых наблюдений, позволяющая уменьшить погрешность определения аномалии высоты с 10 см до 6,5 см. Это — успех, но точность следует повышать и далее. Разработанный подход необходимо совершенствовать. Вернемся, однако, к «сложностям и тонкостям», степень которых зависит от требуемой точности. Если допустимая погрешность составляет, грубо говоря, «полтора лаптя», то тут никаких сложностей нет вообще. Проблемы возникают, когда ее величина приближается к нескольким сантиметрам и, тем более, к нескольким миллиметрам. И пока эти проблемы не разрешены.

Описанный подход получения нормальных высот или, точнее, разностей нормальных высот принято называть спутниковым нивелированием. Будем использовать этот термин, оставив без критических комментариев его корректность. Привлекательность спутникового нивелирования в сравнении с геометрическим нивелированием состоит в том, что процедура его выполнения несравненно более проста и быстра. Нет необходимости прокладывать нивелирный ход по местности, порой труднопроходимой. Не говоря уже о

том, что невозможно применить геометрическое нивелирование для определения высот реперов, расположенных на удаленных от материка островах.

На время прерывая ход рассуждений, обратимся к тригонометрическому нивелированию. Этот метод применим «для решения прикладных (инженерных) задач», как написано в редакционной статье, когда расстояния между пунктами не превышают нескольких сотен метров. В опорных геодезических сетях, где расстояния между соседними пунктами исчисляются десятками километров, погрешность определения превышений из-за влияния вертикальной рефракции велика и приближается к нескольким дециметрам. Хуже того, превышения, полученные из тригонометрического нивелирования, не принадлежат ни к системе геодезических высот, ни к системе нормальных высот, ни к какой-либо иной из разработанных к настоящему времени систем высот. Поэтому тригонометрическое нивелирование используют именно в областях прикладной (инженерной) геодезии и топографии.

Вернемся к сравнению методов спутникового и геометрического нивелирования. На расстояниях в сотни и тысячи километров, характерных для территории Российской Федерации, разности геодезических высот пунктов, полученные методами космической геодезии, имеют существенно меньшую погрешность, чем разности нормальных высот пунктов, полученные из геометрического нивелирования в сочетании с результатами измерения силы тяжести. Соответствующий вопрос об обоснованности определения превышений между уровнями постами разных морей, расположенными на

больших расстояниях друг от друга, методом геометрического нивелирования поставлен в редакционной статье. Напрашивается утверждение о целесообразности использования для этой цели методов космической геодезии. Тем более, что связать геометрическим нивелированием континенты невозможно. Взамен термина «спутниковая геодезия» намеренно использован термин «космическая геодезия», поскольку спутниковые методы являются частным случаем космических методов. В космической геодезии наблюдают не только спутники, но и другие космические объекты, в частности квазары.

Еще одной проблемой, но уже не практического, а теоретического характера, связанной с системой нормальных высот, является то обстоятельство, что теория систем высот сложна для понимания. Возьмем для примера формулу (7.15) для вычисления нормальной высоты H^r , приведенную в учебнике [6]:

$$H^r = \frac{W_0 - W}{\gamma_m} = \frac{1}{\gamma_m} \int_0^P g dh.$$

Не так уж просто геодезисту, занимающемуся решением конкретных задач, понять, а тем более объяснить физический смысл величин, входящих в эту формулу. А такого рода формулами изобилует и этот учебник, и ранее опубликованные работы по теоретической геодезии таких выдающихся ученых, как М.С. Молоденский, М.И. Юркина, В.Ф. Еремеев, Л.П. Пеллинен [5]. Разумеется, написанное здесь отнюдь не в укор специалистам, работающим на производстве, каковыми являются и сами авторы данной статьи.

Координаты пунктов задают в геодезической прямоугольной (декартовой) системе ко-

ординат X, Y, Z и/или в геодезической эллипсоидальной системе координат B, L, H [4]. В земной (общеземной) системе координат геодезическая высота H является одной из координат пункта; ее отсчитывают от поверхности земного эллипсоида по нормали к этой поверхности. Под земной системой координат понимают Международную земную систему координат (International Terrestrial Reference System — ITRS) [7, 8]. Практической реализацией ITRS является Международная земная система отсчета (International Terrestrial Reference Frame — ITRF). Ответственной за поддержание ITRS, также как и за поддержание Международной небесной системы координат (International Celestial Reference System — ICRS) и Всемирного координированного времени (Universal Time Coordinated — UTC) является Международная служба вращения Земли (International Earth Rotation Service — IERS). Основным методом наблюдений служит радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой (РСДБ). Этот метод сочетают с лазерной локацией искусственных спутников Земли специально предназначенных для этих целей.

Координаты пунктов ITRF определяют с погрешностью порядка миллиметра. Координаты пунктов ITRF с течением времени изменяются в этом же диапазоне, вследствие чего Землю рассматривают как деформирующееся тело. РСДБ является основным методом, который позволяет задавать, поддерживать, обновлять, уточнять и совершенствовать глобальную (международную) геодезическую систему координат, вообще, и систему геодезических высот, в частности. Для того, чтобы оценить какие изме-

нения происходят в системе геодезических высот с течением времени, использовались данные изменения прямоугольных координат за 1996–2000 гг., опубликованные на сайте IERS. С их помощью были вычислены вариации геодезических высот пунктов Westford (США) и Wettzell (Германия). Оказалось, что геодезическая высота пункта Westford за 4 года изменилась на 13 мм, а геодезическая высота пункта Wettzell — на 20 мм. Такие изменения высот пунктов на порядок превышают погрешность результатов, полученных методом РСДБ, и подтверждают необходимость непрерывного уточнения (мониторинга, поддержания) системы геодезических высот, в частности, и глобальной геодезической системы координат, в целом.

Методом РСДБ с предельной погрешностью в несколько миллиметров определяют разности координат пунктов ITRF как пунктов глобальной геодезической сети высшего порядка, а также на уровне точности в несколько миллисекунд параметры вращения Земли. Напомним, что параметры вращения Земли, в частности, позволяют связать ITRS и ICRS. Результаты наблюдений, выполненных методом лазерной локации искусственных спутников Земли типа ЭТАЛОН и LAGEOS, используют для отнесения начала координат к центру масс Земли и для независимого контроля результатов, полученных методом РСДБ. По состоянию на 2007 г. [7] сеть ITRF состояла из 338 пунктов, на которых расположены радиотелескопы, технически реализующие метод РСДБ. На 52 из этих пунктов расположены также спутниковые лазерные дальнометры, технически реализующие метод лазерной локации искусственных спутников Земли.

Еще раз подчеркнем, что глобальную систему геодезических высот, как и глобальную геодезическую систему координат, задают и поддерживают сочетанием метода радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой и метода лазерной локации искусственных спутников Земли. Спутниковые системы ГЛОНАСС и GPS (Navstar) в задании и поддержании глобальной системы высот играют роль вспомогательную, хотя и исключительно важную. Эти спутниковые системы позволяют практически реализовать геодезическую систему высот в тех пунктах, где выполнены наблюдения с использованием спутниковых приемников. Спутниковым методом осуществляют наблюдения на станциях сети IGS (International GNSS Service). Станции этой сети служат, помимо прочего, связующим звеном между сетью ITRF и пользователями систем глобальной спутниковой навигации.

Вернемся к поставленному в редакционной статье вопросу об обоснованности определения превышений между уровнями постами разных морей, расположенными на больших расстояниях друг от друга, методом геометрического нивелирования. Надеемся, что авторы редакционной статьи не сочтут за дерзость, если мы переформулируем этот вопрос и представим его в следующем виде. Не является ли целесообразным для определения разностей нормальных высот пунктов, разделенных расстоянием в сотни и тысячи километров, помимо геометрического нивелирования использовать методы космической геодезии: РСДБ и спутниковые методы? Думается, что при этом нет особой разницы в том, что представляют собой эти пункты: уровнемерные посты или

какие-либо иные пункты. На самом деле, космические технологии уже применяют для решения такого рода задач. Решением Международной ассоциации геодезии (International Association of Geodesy — IAG) в 1984 г. начаты работы по мониторингу глобального изменения уровня Мирового океана. При этом значения высот уровневых станций в общеземной геодезической системе координат (высот) определяют сочетанием РСДБ и спутниковых методов. В США эти работы ведутся под эгидой NASA [9]. Подчеркнем, что речь идет не о вытеснении геометрического нивелирования и гравиметрических методов, без которых невозможен переход от системы геодезических высот к системе нормальных высот, а о целесообразном сочетании наземных геодезических методов и методов космической геодезии.

▼ Список литературы

1. Остроумов Л.В., Остроумов В.З. Определение высот уровневых постов по данным ГНСС и модели квазигеоида в Азово-Черноморском регионе // Геопрофи. — 2013. — № 3. — С. 20–23.
2. Андреев В.К., Джанпейсов М.Э., Карабалаев Н.Ж., Новиков Е.В., Сагындык М.Ж., Самратов У.Д., Филатов В.Н., Хасенов К.Б., Хвостов В.В. О модернизации государственной нивелирной сети республики Казахстан // Геопрофи. — 2013. — № 3. — С. 25–29.
3. Хинкис Г.Л., Зайченко В.Л. К 140-летию государственной нивелирной сети России // Геопрофи. — 2013. — № 3. — С. 60–65.
4. Шануров Г.А., Остроумов В.З., Остроумов Л.В., Щуров А.В. Геодезические измерения вблизи Кронштадского футштока. // Геодезия и картография. — 2012. — № 8. — С. 56–59.
5. Пеллинен Л.П. Высшая геодезия (теоретическая геодезия). — М.: Недра, 1978. — 264 с.
6. Огородова Л.В. Высшая геодезия. Часть III. Теоретическая гео-

дезия. — М.: Геозедкартиздат, 2006. — 381 с.

7. Altamini Z., Collilieux X., Legrand J., Garayt B. and Boucher C. ITRF2005: A new release of the International Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. Journal of geophysical research, Vo. 112, B09401, doi: 10.1029/2007/2007JB004949, 2007.

8. McCarthy D. D. and Petit G., IERS conventions (2003), IERS Technical note 32, 2004.

9. Carter W.E. et. al. The application of geodetic radio interferometric surveying to the monitoring of sea level. Journal of geophysical research. astr. Soc., 87, 1986, 3–13.

RESUME

VLBI as combined with SLR enables the global geodetic coordinates and heights system to be fixed and monitored. These space methods in combination with the geometric leveling and gravimetry can be effectively used to heightening gauge stations situated on seas and oceans.

Навигационно-Геодезический центр

Официальный дистрибьютор компании Leica Geosystems в Украине

Компания НГЦ предоставляет широкий спектр современного оборудования

- геодезическое оборудование
- GPS базовые станции и сети
- наземные лазерные сканеры
- строительное оборудование
- системы структурного мониторинга

Единственный авторизованный сервисный центр в Украине



Представляет журнал «Геопрофи» в Украине



Сайт: www.ngc.com.ua
Почта: ngc@ngc.com.ua
Тел./факс: +38 057 345-12-37



- when it has to be right

Leica
Geosystems