

УДК 528.422.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ СПОСОБОМ ИЗ СЕРЕДИНЫ ПРИ ВИЗИРОВАНИИ НАД РАЗНЫМИ ПОДСТИЛАЮЩИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Антон Викторович Никонов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры инженерной геодезии и информационных систем, e-mail: sibte@bk.ru

В статье приведены результаты исследований нивелирования наклонным лучом в равнинной местности с использованием высокоточного электронного тахеометра для расстояний от 60 до 340 м. Исследования проводились вдоль дороги, с прохождением визирного луча над тремя подстилающими поверхностями: песок, трава и асфальт.

Ключевые слова: тригонометрическое нивелирование, нивелирование тахеометром, высота.

STUDY OF ACCURACY IN TRIGONOMETRIC LEVELING BY METHOD "FROM THE MIDDLE" WHEN SIGHTING OVER DIFFERENT UNDERLYING SURFACES

Anton V. Nikonov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Post-graduate student, Department of Engineering Geodesy and Information Systems, e-mail: sibte@bk.ru

The results of the research are presented as concerns leveling by inclined ray on the plane surface using high-precision total station for 60 to 340 m distances. The investigation was conducted along the road with directional ray transmitted over three underlying surfaces: sand, grass and asphalt.

Key words: trigonometric leveling, total station leveling, height.

Тригонометрическое нивелирование широко используется при проведении различных геодезических работ [1, 2], несмотря на то, что еще отсутствует достаточная нормативная база по его применению. Для более полного изучения достижимой точности геодезического нивелирования мы провели ряд исследований [3, 4, 5].

Считается, что при выполнении тригонометрического нивелирования из середины влияние вертикальной рефракции в большей степени компенсируется [6]. Это допущение приемлемо при достаточной высоте визирного луча над землей, а также при одинаковых условиях прохождения визирного луча на заднюю и переднюю цели. Однако эти условия не всегда могут быть соблюдены на практике. Для определения точности тригонометрического нивелирования при прохождении визирного луча над разными подстилающими поверхностями при взгляде «назад» и «вперед» нами были выполнены полевые эксперименты в течение двух дней (26 и 27 июля 2012 г.).

Для проведения эксперимента на противоположных концах железобетонной трубы, проходящей под асфальтированной дорогой, были выбраны две

точки. Между ними было измерено превышение цифровым высокоточным нивелиром *DiNi12* (5 приемов). На эти точки были установлены вехи с отражателями, имеющие одинаковую в пределах 0,5 мм высоту ~1,7 м. Превышение между точками определялось электронным тахеометром *Leica TS-06* ($m_z = 2''$) путем визирования на отражатели.

Прибор располагался на обочине так, чтобы визирный луч при наведении на заднюю цель проходил в большей мере над асфальтом, а при наведении на переднюю цель – над травой или песком. Местность равнинная (углы наклона в пределах 1°), высота прохождения визирного луча над землей не менее 1,5 м.

Превышение (h) между двумя точками находилось как [7]

$$h = h_{\Pi} - h_3 = D_{\Pi} \cos z_{\Pi} - D_3 \cos z_3, \quad (1)$$

где D – наклонное расстояние; z – зенитное расстояние; h_3 и h_{Π} – превышения между осью вращения зрительной трубы и задней и передней целями соответственно.

Превышения между двумя целями измерялись в основном 15 полными приемами по схеме $33' \Pi \Pi'$, где 3 и Π – измерения при круге лево; $3'$, Π' – при круге право.

Измерения в первый день выполнялись с 16:00 в облачную погоду при $t = 16^\circ \text{C}$.

Были вычислены средние квадратические ошибки измерения превышений отдельно для каждой цели (m_{h_3} , $m_{h_{\Pi}}$) и для общего превышения (m_h). Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

СКО измерения превышений (опыт 1)

D , м	n приемов	m_{h_3} , мм	Подст. поверх. «назад»	$m_{h_{\Pi}}$, мм	Подст. поверх. «вперед»	$m_h = \sqrt{m_{h_3}^2 + m_{h_{\Pi}}^2}$, мм	$m_{h_{\text{ВНУТР}}}$, мм	$m_{h_{\text{ИСТИН}}}$, мм
126	15	0,6	асфальт	0,8	песок	1,0	0,6	0,8
128	16	0,7	асфальт	1,1	трава	1,3	1,0	1,1
248	16	1,3	асфальт	2,4	песок	2,8	2,0	2,0
251	16	1,4	асфальт	1,1	трава	1,8	1,8	1,8
337	16	1,9	асфальт	1,8	песок	2,6	2,0	2,2
79	10	0,4	асфальт	0,3	песок	0,5	0,4	0,6

Величины m_{h_3} , $m_{h_{\Pi}}$, $m_{h_{\text{ВНУТР}}}$ и $m_{h_{\text{ИСТИН}}}$ вычислялись по формуле Бесселя. При нахождении $m_{h_{\text{ВНУТР}}}$ определялись отклонения от среднего значения (оценка по внутренней сходимости), а для $m_{h_{\text{ИСТИН}}}$ определялись отклонения от значения превышения, полученного из геометрического нивелирования. Как видно из табл. 1, эти значения согласуются между собой. Из табл. 1 также следует, что СКО превышений при взгляде «назад» и «вперед» в основном отличаются на

величину до 0,5 мм. Средняя квадратическая ошибка общего превышения не отличается от аналогичных значений из работы [4] и даже для расстояний более 200 м не выходит за пределы $\sqrt{2}m_z (\pm 2,8'')$. По полученным в ходе эксперимента данным, также как и в [4, 5], были вычислены разности максимальных и минимальных по серии превышений для h_3 , h_{II} и результирующего превышения h между двумя точками (табл. 2).

Таблица 2

Разности (Δ) между h_{\max} и h_{\min} для превышений h_3 , h_{II} , h (опыт 1)

D , м	Δ задняя h_3 , мм	Δ передняя h_{II} , мм	Сред., мм	Для h между задней и передней, мм	$\Delta^{\text{доп}} = 2(2m_z)$ $\Delta^{\text{доп}} = 8''$, мм
1	2	3	4	5	6
126	1,9	2,9	2,4	2,5	4,9
128	2,5	4,4	3,4	3,4	5,0
248	4,9	7,6	6,2	5,9	9,6
251	4,9	4,1	4,5	6,6	9,7
337	7,2	5,6	6,4	7,7	13,0
79	1,2	0,9	1,0	1,3	3,1

Полученные в табл. 2 величины (столбцы 2, 3, 4, 5) не превышают аналогичных значений для опыта [5] с одинаковой подстилающей поверхностью.

Допустимая величина $\Delta^{\text{доп}}$ для разностей из столбца 5 (см. табл. 2) принималась из соображения, что в худшем случае истинные ошибки при визировании на обе цели будут максимальны (равны $2m$) и с противоположными знаками.

Разницы средних по серии превышений из тригонометрического нивелирования $\overline{h_{\text{ТРИГ}}}$ и превышений из геометрического нивелирования $h_{\text{ГЕОМ}}$ представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение значений превышений из тригонометрического и геометрического нивелирования (опыт 1)

D , м	$\overline{h_{\text{ТРИГ}}}$, мм	$h_{\text{ГЕОМ}}$, мм	$\Delta = h_{\text{ГЕОМ}} - \overline{h_{\text{ТРИГ}}}$ мм
1	2	3	4
126	-164,0	-164,5	-0,5
128	-165,0		+0,5
248	-164,3		-0,2
251	-164,0		-0,5
337	-163,7		-0,8
79	-164,9		+0,4

Во второй день (27.07.2012 г.) был проведен аналогичный опыт для расстояний 60, 111, 200 м. Измерения выполнялись при $t = +22\text{ }^{\circ}\text{C}$ и переменной облачности. Визирный луч при наведении на заднюю цель проходил над асфальтом, при наведении на переднюю цель – над песком (обочина дороги). Для данного опыта были произведены аналогичные вычисления (табл. 4).

Таблица 4

СКО измерения превышений (опыт 2)

D , м	m_{h_3} , мм	$m_{h_{\Pi}}$, мм	$m_h = \sqrt{m_{h_3}^2 + m_{h_{\Pi}}^2}$, мм	$m_{h_{\text{ВНУТР}}}$, мм	$m_{h_{\text{ИСТИН}}}$, мм
60	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6
111	0,6	0,9	1,1	1,1	1,2
200	1,1	1,1	1,6	1,4	1,4

Из табл. 4 видно, что СКО превышений между осью вращения зрительной трубы и задней (m_{h_3}) и передней ($m_{h_{\Pi}}$) целями практически не отличаются друг от друга и находятся в соответствующих доверительных интервалах из [4].

Разности максимальных и минимальных превышений для второго опыта представлены в табл. 5.

Таблица 5

Разности (Δ) между h_{max} и h_{min} для превышений h_3 , h_{Π} , h (опыт 2)

D , м	n приемов	Δ задняя h_3 , мм	Δ передняя h_{Π} , мм	Сред., мм	Для h между задней и передней, мм	$\Delta^{\text{доп}} = 2(2m_z)$ $\Delta^{\text{доп}} = 8''$, мм
60	15	0,9	1,1	1,0	1,3	2,3
111	16	2,2	3,3	2,8	4,0	4,3
200	16	3,9	3,8	3,8	5,2	7,8

Из табл. 5 видно, что полученные разности не превосходят допустимых пределов. В табл. 6 измеренные тахеометром превышения сравниваются со значением, принятым за истинное.

Таблица 6

Сравнение значений превышений из тригонометрического и геометрического нивелирования (опыт 2)

D , м	Количество приемов	$\overline{h_{\text{ТРИГ}}}$, мм	$h_{\text{ГЕОМ}}$, мм	$\Delta = h_{\text{ГЕОМ}} - \overline{h_{\text{ТРИГ}}}$, мм
60	15	-164,9	-164,5	+0,4
111	16	-164,6		+0,1
200	16	-164,3		-0,2

Из табл. 3 и 6 следует, что среднее из 15 приемов превышения, полученное из тригонометрического нивелирования, не отличается от его значения из геометрического нивелирования более чем на 1 мм.

В работе [8] проводились аналогичные исследования тригонометрического нивелирования. Измерения выполнялись в течение нескольких дней, в разных погодных условиях. Высота применяемых целей 2,13 и 3,5 м, а высота прибора около 2,3 м. Углы наклона составили до $2,5^\circ$, а длины плеч 200 м. Углы наклона измерялись четырьмя приемами. В качестве подстилающей поверхности были выбраны трава, гравий и асфальт. Полученные превышения также сравнивались со значениями из геометрического нивелирования. Разности по абсолютной величине в большинстве случаев находятся в пределах 2 мм, и лишь в наихудшем случае разность составила 4 мм. Следует также отметить, что данные разности не постоянны и изменяются в зависимости от погоды и времени суток (в основном в пределах 3 мм). В работе [8] пришли к выводу, что разная подстилающая поверхность при взгляде «назад» и «вперед» приводит к систематической ошибке в превышении.

Из наших исследований и работы [8] следует, что в равнинной местности, при высоте целей и прибора не менее 1,7 м, разная подстилающая поверхность при выполнении тригонометрического нивелирования не вносит существенных (более 2 мм) ошибок в измеряемое превышение и лишь в исключительных случаях ошибка может достигать величины 4 мм. Даже если на станции данная ошибка имеет систематический характер, то при проложении хода маловероятно ее накопление.

Наибольшее систематическое искажение значения превышения ожидается в солнечную, жаркую погоду. Так, основной источник ошибок тригонометрического нивелирования – вертикальная рефракция, главным образом зависит от величины вертикального температурного градиента, который, в свою очередь, определяется характером теплообмена между подстилающей поверхностью и окружающей средой. Процесс теплообмена во многом зависит от структуры подстилающей поверхности и интенсивности солнечного излучения. Из работы [9] следует, что летом, в солнечную погоду коэффициент рефракции на высоте 1,8 м (над травой) в течение дня изменяется от -4 до +16, а в пасмурную погоду от -2 до +5. Поэтому наибольшее различие в искривлении визирного луча при взгляде «назад» и «вперед» будет наблюдаться в солнечную погоду, при небольшой высоте визирного луча над землей и при прохождении луча над разными подстилающими поверхностями.

Из вышесказанного можно сделать следующие практические рекомендации по проложению ходов тригонометрического нивелирования:

- по возможности избегать разной подстилающей поверхности при взгляде «назад» и «вперед»;
- не допускать прохождения визирного луча ниже 1,5 м над землей;
- ограничивать длину визирного луча в пасмурную погоду – 300 м, в солнечную – 100–200 м (в зависимости от качества изображения).

Выполнение указанных рекомендаций особенно важно в солнечную погоду.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кошелев В. А., Карлин К. С., Чахлова А. П. Особенности развития геодезической разбивочной основы в условиях горной местности // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 87–92.
2. Беспалов Ю. И., Дьяконов Ю. П., Терещенко Т. Ю. Наблюдение за осадками зданий и сооружений способом тригонометрического нивелирования // Геодезия и картография. – 2010. – № 8. – С. 8–10.
3. Никонов А. В., Бабасов С. А. Исследование тригонометрического нивелирования в полевых условиях // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 71–78.
4. Никонов А. В., Рахымбердина М. Е. Исследование точности измерения превышений электронным тахеометром высокой точности в полевых условиях // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 1 (21). – С. 16–26.
5. Никонов А. В. Исследование точности тригонометрического нивелирования способом из середины с применением электронных тахеометров // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 2 (22). – С. 26–35.
6. Дрок М. К. Исследование точности определения превышений в ходах геодезического нивелирования на короткие расстояния в равнинной местности // Научные записки ЛПИ. – 1961. – № 6. – С. 183–199.
7. Пискунов М. Е. Методика геодезических наблюдений за деформациями сооружений. – М.: Недра, 1980. – 248 с.
8. Chrzanowski A. Implementation of trigonometric height traversing in geodetic levelling of high precision. Technical report №142. University of New Brunswick. Canada. 1989.
9. Hirt C., Guillaume S., Wisbar A., Bürki B. and Sternberg, H. Monitoring of the refraction coefficient of the lower atmosphere using a controlled set-up of simultaneous reciprocal vertical angle measurements // Journal of Geophysical Research (JGR). – 2010. – 115, D21102.

Получено 13.09.2013

© А. В. Никонов, 2013