ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ

УДК 622.1

© Михалев А.В., 2013

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

А.В. Михалев

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

Изложены основные методы нивелирования. Определены проблемы существующих методов нивелирования. Описаны существующие методы тригонометрического нивелирования и их основные элементы. Проведены теоретические исследования этих способов. С учетом выявленных в ходе исследования источников ошибок при использовании данных способов было определено, что более целесообразно применять тригонометрическое нивелирование из середины.

В рамках исследований также были произведены измерения на тестовом полигоне, который состоял из четырех станций. На первом этапе были определены превышения контрольных точек способом геометрического нивелирования. Измерения проводились высокоточным нивелиром DNA 03 (Leica) по методике II класса. Полученные результаты геометрического нивелирования были уравнены, получена характеристика качества измерений и в последующем уравненные превышения принимались как эталонные.

На втором этапе производились измерения высокоточным электронным тахеометром TS 09 (Leica), способом тригонометрического нивелирования из середины с различными высотами отражателя для анализа изменения точности при изменении вертикального угла. По данным тестовых измерений были произведены расчеты, где отражены основные элементы, с помощью которых можно достоверно оценить точность данного метода. В процессе сравнения полученных результатов были выявлены некоторые зависимости, по которым определены основные источники ошибок, значительно влияющих на точность измерений. Выведены формулы, учитывающие величину этих ошибок и компенсирующие их при обработке результатов. Выполнена оценка пригодности этого способа для высокоточных измерений, также определены условия и приведена методика для использования в качестве альтернативы геометрического нивелирования.

Ключевые слова: геометрическое нивелирование, тригонометрическое нивелирование, точность, класс, анализ, средняя квадратическая ошибка, тахеометр, нивелир, отражатель, репер, превышение, невязка, методика.

ASSESSMENT OF THE TRIGONOMETRIC LEVELING USE FOR HIGH-PRECISION MEASUREMENTS

A.V. Mikhalev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

The main methods of leveling are outlined. The problems of the existing leveling methods are identified. Existing methods of trigonometric leveling and its basic elements are described. The theoretical study of these methods are conducted. Taking into account error sources identified by the study when using these methods, it was determined that it is more appropriate to apply trigonometric leveling from the middle.

As part of research measurements on test track were also performed, which consisted of four stations. In the first phase exceeding control points have been identified by the way of geometrical leveling. Measurements were carried out with precision leveling instrument DNA 03 (Leica) by the method of class II. The obtained geometric leveling results were equalized, obtained quality characteristic measurements and equations exceeding taken as reference.

At the second stage measurement precision electronic tachometer TS 09 (Leica), trigonometric leveling method from the middle of the reflector with different heights to analyze the change in lift when the vertical angle. According to the test measurements were calculated, reflecting the key elements that can be used to reliably estimate the accuracy of this method. In the process of comparing the results obtained some dependence were revealed on which the main sources of errors were identified, greatly affecting the accuracy of measurements. The formulas that take into account the magnitude of these errors and compensate them in processing the results were derived. The evaluation of the suitability of this method for high-precision measurements, as defined conditions and describes a method for use as an alternative geometric leveling was performed.

Keywords: geometric leveling, trigonometric leveling, precision, class, analysis, root mean square error, tachometer, level, reflector, frame, elevation, discrepancy, method.

Введение

Роскартографией в 2004 г. введена в действие «Инструкция по нивелированию I, II, III и IV класса» взамен инструкции 1990 г.¹ К сожалению, новая редакция инструкции не отражает существующий уровень развития геодезического приборостроения, отдельные ее приложения принципиального характера противоречат друг другу, что препятствует применению новых приборов и технологий нивелирования. В инструкции ничего не говорится об электронных тахеометрах, хотя их технические характеристики позволяют уверенно обеспечить точность нивелирования III и IV класса тригонометрическим методом. Однако способ тригонометрического нивелирования в инструкции даже не упоминается, хотя его преимущества очевидны. Его с успехом можно применять при больших углах наклона (например, в горной местности), а также при нивелировании через водные препятствия.

Настоящее исследование призвано решить ряд задач методического и точностного характера в применении электронных тахеометров для передачи высот на различных промышленных площадках, где порой невозможно навестись на рейку горизонтальным лучом или есть перепад высот, на котором невозможно измерить превышение с помощью геометрического нивелирования. Более частной задачей данного исследования является не только априорный, но и практический ответ о возможности достижения данными приборами точности нивелирования III и IV класса способом тригонометрического нивелирования на участках такого типа [1, 2].

Основная часть

Данное исследование выполнялось в три этапа.

Этап первый

Первый этап заключался в анализе двух способов тригонометрического нивелирования – нивелирование вперед (рис. 1) и нивелирование из середины, или нивелирование через точку. Анализировались прежде всего источники ошибок, влияющие на точность измерений, так как для производства высокоточных измерений нужно выбрать наиболее точный способ.

Рис. 1. Тригонометрическое нивелирование вперед: i – высота прибора; V – высота визирования; h – разность высот (превышение) между точками A и B ; S – линия визирования; s – горизонтальная проекция линии визирования; v – угол наклона визирного луча

Для исследования тригонометрического нивелирования вперед была приведена формула средней квадратической ошибки измерения одного превышения [3, 4]:

$$m_{\Delta z}'' = \pm \sqrt{\left(\frac{m_{\delta}''}{\rho''} L \cos v\right)^2 + (m_s \cdot \sin v)^2 + m_i^2 + m_v^2}, \quad (1)$$

где m_{δ} – ошибка измерения угла наклона; $\rho = 206265''$; L – наклонное расстояние; v – вертикальный угол; m_i – ошибка измерения высоты инструмента; m_s – ошибка измерения наклонной длины; m_v – ошибка измерения высоты отражателя.

Из формулы (1), а также дополнительных исследований данного вида нивелирования были выявлены следующие источники ошибок:

¹ Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов ГКИНП (ГИТА)-03-010-02 / ЦНИИГАиК. М., 2004.

- 1) ошибка в измерении угла наклона;
- 2) ошибка в измерении наклонной длины;
- 3) ошибка в измерении высоты инструмента;
- 4) ошибка в измерении высоты отражателя.

Для исследования тригонометрического нивелирования из середины была приведена формула средней квадратической ошибки измерения одного превышения [1, 2]:

$$m''_{\Delta z} = \pm \sqrt{\frac{m''_{\delta} (L_1 \cos \alpha_1 + L_2 \cos \alpha_2)^2}{\rho''} + \sqrt{(m_s (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2))^2}} \quad (2)$$

где m_{δ} – ошибка измерения угла наклона; $\rho = 206265''$ m_s – ошибка измерения наклонной длины; L_1 – наклонное расстояние между прибором и репером № 1; L_2 – наклонное расстояние между прибором и репером № 2; α_1 – вертикальный угол между прибором и репером № 1; α_2 – вертикальный угол между прибором и репером № 2.

Из формулы (2), а также дополнительных исследований были выявлены источники ошибок, влияющие на точность измерений данного вида нивелирования:

- 1) ошибка в измерении угла наклона;
- 2) ошибка в измерении наклонной длины.

Было проведено сравнение двух видов тригонометрического нивелирования, описанных выше, и сделан вывод о том, что тригонометрическое нивели-

Рис. 2. Тригонометрическое нивелирование из середины

рование из середины (рис. 2) точнее, так как исключает из определяемого превышения ошибку измерения высоты инструмента, ошибку непараллельности луча визирования уровенной поверхности, а также уменьшает влияние горизонтальной рефракции. На этом первый этап данной работы был закончен.

Этап второй (практическая часть)

Второй этап непосредственно заключался в производстве геометрического нивелирования II класса и тригонометрического нивелирования из середины. Для данного вида работ был построен тестовый полигон, состоявший из четырех реперов (рис. 3). Реперами являлись дюпели, забитые в асфальтовое покрытие. Расстояния между реперами были сделаны небольшими, так как на промышленных площадках редко встречаются длинные лучи визирования.

Сначала было выполнено геометрическое нивелирование согласно методике II класса с помощью высокоточного нивелира DNA03 фирмы Leica (рис. 4), тех-

Рис. 3. Тестовый полигон

Рис. 4. Нивелир DNA03

нические характеристики которого представлены ниже².

Технические характеристики DNA03

- 1) измерение расстояний: СКО = 5 мм на 10 м;
- 2) зрительная труба:
 - увеличение: $\times 24$;
 - апертура объектива: 36 мм;
 - угол обзора: 2° ;
 - поле зрения: 3,5 м на 100 м;
 - минимальное расстояние до рейки: 0,6 м;
 - коэффициент дальномера: 100.
- 3) чувствительность круглого уровня: $8''/2$ мм;
- 4) погрешность компенсации: $3''$.

Отчеты по рейкам брались в следующем порядке:

1) на нечетной станции: отчет по задней рейке – отчет по передней рейке – отчет по передней рейке – отчет по задней рейке (ЗППЗ);

2) на четной станции: отчет по передней рейке – отчет по задней рейке – отчет по задней рейке – отчет по передней рейке (ПЗЗП).

Полученные измерения были уравнены в программе Credo-Nivelir. По завершении обработки результатов была

получена ведомость оценки качества нивелирования (табл. 1).

Из рис. 5 видно, что нивелирование II класса на данном полигоне проделано качественно, так как допустимая СКО на 1 км хода не должна превышать 2 мм, в данном случае она не превышает 0,4 мм [4–6].

Вторым шагом на втором этапе было производство тригонометрического нивелирования из середины на тестовом полигоне. Оно проводилось с помощью мини-призмы GMP-111 и высокоточного тахеометра TS09 фирмы Leica (рис. 5), технические характеристики которого представлены ниже³ [6].

Технические характеристики TS09

- 1) угловая точность: $1''$;
- 2) точность измерения расстояний: 1 мм;
- 3) увеличение зрительной трубы: $\times 30$;
- 4) пределы фокусировки: от 1,7 м до ∞ ;
- 5) точность компенсатора: $0,5''$;
- 6) разрешение электронного уровня: $2''$.

Тригонометрическое нивелирование из середины выполнялось при трех высотах отражателя: 0,7; 1,0; 1,3 м – для того чтобы проанализировать, как влияет изменение вертикального угла на точность измерений. Еще одной особенностью было трехкратное наведе-

Таблица 1

Характеристика качества нивелирования II класса

Название линии и участка, номер секции	Длина, км	Количество штативов	Расстояние между знаками, км		Расхождение (невязка) превышений прямого и обратного ходов, мм		Число повторных измерений прямо/обратно		СКО на 1 км хода
			Наибольшее	Среднее	Полученное	Допустимое	Штативы	Протяженность км	
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ST1- ST3 (1–1)	0,064	2	0,1	0,1	0,20	1,26			0,40
ST1- ST3 (1–1)	0,064	2	0,1	0,1	0,09	1,26			0,18
ST1- 513 (1–1)	0,064	2	0,1	0,1	–0,14	1,26			0,28
ST1- ST3 (1–1)	0,064	2	0,1	0,1	–0,19	1,26			0,38

² Leica DNA03/DNA10. Operating instruction // Leica Geosystems. P. 129–130.

³ Leica FlexLineTS02/TS06/TS09. Operating instruction // Leica Geosystems. P. 303–305.

Рис. 5. Тахеометр TS09

ние на отражатель, для того чтобы можно было вычислить ошибку навешивания. Измерения выполнялись одним полным приемом.

Этап третий (анализ)

Полученные измерения были обработаны в программе Excel. Превышения из тригонометрического нивелирования были сравнены с геометрическим нивелированием II класса, построен график разности их превышений в зависимости от вертикального угла (рис. 6).

Рис. 6. График разности превышений между геометрическим и тригонометрическим нивелированием в зависимости от вертикального угла

Анализ графика позволил сделать вывод о том, что разность превышений между двумя видами нивелирования увеличивается с возрастанием вертикального угла. Связано это прежде всего с ошибкой визирования, которая вычисляется по формуле⁴ [3, 4].

$$m_{\text{виз}}^2 = m_{\text{виз}}'^2 + m_{\text{виз}}''^2, \quad (3)$$

где $m_{\text{виз}}^2$ – общая ошибка визирования; $m_{\text{виз}}'^2$ – инструментальная ошибка визирования; $m_{\text{виз}}''^2$ – ошибка визирования из за характерной конструкции призмы.

Из формулы (3) видно, что ошибка визирования состоит из двух ошибок – инструментальная ошибка визирования и ошибка визирования, вызванная характерной конструкцией призмы. Далее было решено построить график зависимости ошибки визирования от расстояния [7] (рис. 7).

Из графика видно, что при изменении расстояния ошибка визирования не изменяется. По аналитическим расчетам была построена диаграмма влияния компонентов, составляющих формулу (3), на общую ошибку визирования (рис. 8).

Из диаграммы видно, что основную долю ошибки – 74 % – составляет ошибка, связанная с характерной конструкцией призмы, и всего лишь 26 % оказывает влияние инструментальная ошибка. Следующим ходом данной работы было исследование конструкции призмы GMP-111 (рис. 8, а),

Рис. 7. График зависимости ошибки визирования от расстояния

⁴ Инструкция по вычислению нивелировок / ГУГК. М.: Недра, 1971. 108 с.

Рис. 8. Призма GMP-111: а – конструкция призмы; б – ход лучей визирования

с помощью которой выполнялось тригонометрическое нивелирование из середины [8].

Из рис. 8 видно, что плоскость визирования (левая осевая линия) и непосредственно ось призмы (правая осевая линия) находятся не на одной линии. Обозначим это расстояние за некий коэффициент K , в данном случае он равен 8 мм. Черной линией обозначен фактический луч визирования, который направлен на плоскость визирования. Если его продолжить до оси призмы, то будет наглядно видно, что он попадает не в центр призмы, а ниже него. Синей линией на рис. 8 обозначен истинный луч визирования, который проходит через центр призмы, но не через плоскость визирования; δ – угол между этими лучами. Выявлено, что разница между фактическим и истинным лучами визирования на пересечении с осью данной призмы и есть поправка, которая должна вводиться в каждое превышение. Обозначим эту поправку за X . В дальнейшем была выведена формула (4), с помощью которой можно вычислить данную поправку. Также был построен универсальный график (рис. 9), позволяющий визуально определить эту поправку.

Рис. 9. График определения поправки

$$X = \tan \beta \cdot k, \quad (4)$$

где X – величина поправки, мм; β – вертикальный угол, град; k – коэффициент, учитывающий характерную конструкцию призмы, мм.

Из графика на рис. 9 видно, что величина поправки возрастает с увеличением вертикального угла; прослеживается та же тенденция, что и на рис. 6. По результатам исследования была составлена итоговая таблица превышений (табл. 2) [9].

В табл. 2 представлены разницы превышений (не уравненных) между геометрическим нивелированием второго класса и тригонометрическим нивелированием из середины до внесения поправок и после их внесения. В колонке 3 приведены превышения из геометриче-

Таблица 2

Итоговая таблица превышений

Высота отражателя, м	Станции	Превышения				Разница
		Геометрическое, мм	Тригонометрическое, мм	Разница	Тригонометрическое с поправкой, мм	
0,7	ст1–ст3	–28,3	–22,8	–5,5	–26,1	–2,2
0,7	ст3–ст1	28,3	18,9	9,4	22,4	5,9
1	ст1–ст3	–28,3	–25,3	–3,0	–27,8	–0,4
1	ст3–ст1	28,3	25,0	3,2	27,9	0,4
1,3	ст1–ст3	–28,3	–27,8	–0,5	–29,6	1,3
1,3	ст3–ст1	28,3	28,6	–0,3	30,8	–2,5

ского нивелирования II класса. В колонке 4 представлены превышения из тригонометрического нивелирования до внесения поправок, а в колонке – 6 с внесением поправок. Из табл. 2 видно, что средняя разница превышений до внесения поправок значительно больше, чем после внесения поправок. Это говорит о том, что формула (4) эффективна при расчете превышений.

Следующим этапом было составление таблицы СКО до внесения поправок и после внесения [4, 9] (табл. 3).

Таблица 3

Таблица СКО

Показатель СКО	Ошибки, мм	
	до внесения поправок	после внесения поправок
СКО по невязкам на станции	2,3	1,9
СКО при двух приемах	1,6	1,4
СКО по невязкам на км хода	6,1	4,5
СКО при двух приемах	4,3	3,2
Допустимые СКО, мм		
	на станции	на км хода
II класс	0,8	2
III класс	1,9	5
IV класс	5,5	10

В табл. 3 представлены СКО на станции и СКО на 1 км хода до и после внесения поправок; а также допустимые СКО нивелирования II, III, IV классов⁵. Из табл. 3 видно, что после внесения

поправок результат значительно улучшился, благодаря чему данная методика нивелирования достигла точности III класса. Для получения еще более надежных значений целесообразно на каждой станции выполнять избыточные измерения. В связи с этим разработана методика тригонометрического нивелирования из середины, основные требования которой представлены в табл. 4⁵.

Таблица 4

Основные требования, предъявляемые к тригонометрическому нивелированию из середины, используемому для высокоточных измерений

Класс нивелирования	Минимальная длина плеча	Максимальная длина плеча, м	Максимальная разность плеч, м	Минимальное количество приемов
II	определяется	25	1	2
III	пределом	75	2	(для Leica TS09, GMP-111)
IV	фокусировки прибора	150	5	

Также была разработана универсальная формула (5) расчета превышений для тригонометрического нивелирования из середины:

$$\begin{aligned} \Delta H m_1 - m_2 = \\ = 0,5 \cdot (L_1 \cdot \sin 2\beta_1 \pm L_2 \cdot \sin 2\beta_2) \pm \\ \pm k \cdot (\tan \beta_1 + \tan \beta_2), \end{aligned} \quad (5)$$

⁵ Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов ГКИНП (ГИТА)-03-010-02 / ЦНИИГАиК. М., 2004.

⁶ Там же.

где $\Delta H_{m_1-m_2}$ – превышения между реперами; L_1 – наклонное расстояние между прибором и репером № 1; L_2 – наклонное расстояние между прибором и репером № 2; β_1 – вертикальный угол между прибором и репером № 1; β_2 – вертикальный угол между прибором и репером № 2; k – коэффициент, учитывающий конструкцию призмы.

Анализируя формулу (5), можно заметить, что первым слагаемым в ней является существующая формула тригонометрического нивелирования из середины, вторым слагаемым – выведенная формула

вычисления поправки, вводимой в превышения. Таким образом, используя эту формулу, мы вводим поправку в превышения за счет характерной конструкции призмы, благодаря чему вычисляем истинные значения превышений.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод о том, что тригонометрическое нивелирование возможно использовать для высокоточных измерений, но только в том случае, если использовать описанную методику и формулы для расчета превышений.

Список литературы

1. Мусихин В.В., Лысков И.А. Применение радарной интерферометрии для определения деформаций трубопроводных систем в условиях тундры // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2012. – № 4. – С. 103–110.
2. Шустов Д.В., Ермашов А.О. Прогноз сдвижений и деформаций горного массива Тишинского месторождения методами конечных и дискретных элементов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2012. – № 5. – С. 89–98.
3. Загибалов А.В., Охотин А.Л. Маркшейдерия. Математический анализ точности маркшейдерских работ. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. техн. ун-та, 2005. – С. 19–30.
4. Большаков В.Д., Левчук Г.П. Справочник геодезиста. – 3-е изд. – М.: Недра, 1985. – С. 48–50.
5. Мещерский И.Н. Анализ результатов нивелирования I и II классов // Тр. ЦНИИГАиК. – 1972. – Вып. 169. – С. 3–26.
6. Сигалов В.М. К вопросу точности нивелирования I и II классов // Геодезия и картография. – 1980. – № 1. – С. 13–19.
7. Русак В.М., Чадович Д.В., Лышко М.В. Анализ точности ходов тригонометрического нивелирования при создании съемочного обоснования / ООО «СмоленскТрансИзыскания». – Смоленск, 2010. – С. 1–5.
8. Официальный сайт компании Leica Geosystems [Электронный ресурс]. – URL: <http://leica-geosystems.com>.
9. Энтин И.И. Анализ результатов нивелирования I и II классов // Тр. ЦНИИГАиК. – 1960. – Вып. 135. – 52 с.

References

1. Musikhin V.V., Lyskov I.A. Primenenie radarnoi interferometrii dlia opredeleniia deformatsii truboprovodnykh sistem v usloviakh tundry [Application of the radar interferometer for detection of the pipe range straining systems in the fenland conditions]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2012, no. 4, pp. 103–110.
2. Shustov D.V., Ermashov A.O. Prognoz sdvizenii i deformatsii gornogo massiva Tishinskogo mestorozhdeniia metodami konechnykh i diskretnykh elementov [Forecast of displacement and deformations of rock mass at Tishinskiy deposit by final and discrete elements]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2012, no. 5, pp. 89–98.

3. Zagibalov A.V., Okhotin A.L. Marksheideriia. Matematicheskii analiz tochnosti marksheiderskikh rabot [Mine Surveying. Mathematical analysis precision surveying works]. Irkutsk: Izdatel'stvo Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2005. 183 p.

4. Bol'shakov V.D., Levchuk G.P. Spravochnik geodezista [Directory surveyor]. Moscow: Nedra, 1985. 455 p.

5. Meshcherskii I.N. Analiz rezul'tatov nivelirovaniia I i II klassov [Analysis of the results of leveling classes I and II]. *Trudy Tsentral'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta geodezii, aeros"emki i kartografii*, 1972, vol. 169, pp. 3–26.

6. Sigalov V.M. K voprosu tochnosti nivelirovaniia I i II klassov [On the question of the accuracy of leveling classes I and II]. *Geodeziia i kartografiia*, 1980, no. 1, pp. 13–19.

7. Rusak V.M., Chadovich D.V., Lyshko M.V. Analiz tochnosti khodov trigonometricheskogo nivelirovaniia pri sozdanii s"emochnogo obosnovaniia [Analysis of the accuracy of trigonometric leveling moves to create justify the shooting]. Smolensk: SmolenskTransIzyskaniia, 2010, pp. 1–5.

8. Ofitsial'nyi sait kompanii "Leica Geosystems" [Offician Website of the company "Leica Geosystems"], available at: <http://www.leica-geosystems.ru> (accessed 20 November 2012).

9. Entin I.I. Analiz rezul'tatov nivelirovaniia I i II klassov [Analysis of the results of leveling classes I and II]. *Trudy Tsentral'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta geodezii, aeros"emki i kartografii*, 1960, vol. 135. 52 p.

Об авторе

Михалев Анатолий Вячеславович (Пермь, Россия) – Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: snauper.ru@bk.ru).

About the author

Anatolii V. Mikhalev (Perm, Russian Federation) – Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29; e-mail: snauper.ru@bk.ru).

Получено 28.08.2013