

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ КВАДРАТИЧЕСКОЙ ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЯ ПРЕВЫШЕНИЯ НА СТАНЦИИ ЦИФРОВЫМ НИВЕЛИРОМ

Антон Викторович Никонов

ОАО «Сибтехэнерго», 630032, Россия, г. Новосибирск, ул. Планировочная, 18/1, инженер-геодезист, e-mail: sibte@bk.ru

Екатерина Леонидовна Соболева

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)343-29-55

Надежда Михайловна Рябова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)343-29-55

Татьяна Михайловна Медведская

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)343-29-55

В статье приведены результаты лабораторных исследований, в ходе которых была определена средняя квадратическая ошибка измерения превышения на станции цифровым нивелиром DiNi 0.3 для плеч нивелирования 48, 26 и 11 м.

Ключевые слова: цифровой нивелир, средняя квадратическая ошибка, точность.

DETERMINATION OF MSE FOR HEIGHT DIFFERENCE MEASUREMENT BY DIGITAL LEVEL AT THE STATION

Anton V. Nikonov

«Sibtechenergo», 630032, Russia, Novosibirsk, 18/1 Planirovochnaya St., Geodetic engineer, e-mail: sibte@bk.ru

Ekaterina L. Soboleva

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Assoc. Prof. Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, tel. (383)343-29-55

Nadezhda M. Ryabova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., senior lecturer Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, tel. (383)343-29-55, e-mail: ryabovanadezhda@mail.ru

Tatyana M. Medvedskaya

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Senior lecturer Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, tel. (383)343-29-55

The results of laboratory research are presented. In process of work, MSE of height difference measurement by digital level DiNi 0.3 at the station was determined. (for leveling lines 48, 26 and 11 m).

Key words: digital level, mean square level (MSE), accuracy.

В настоящее время для выполнения прецизионного нивелирования широко применяются системы «цифровой нивелир – штрих-кодовые рейки». В работах [1, 2] предложены программы наблюдений на станции при выполнении государственного и инженерного нивелирования с использованием цифровых нивелиров. На данный момент проведено заметное количество исследований, посвященных метрологическому обеспечению системы «цифровой нивелир – штрих-кодовая рейка» как за рубежом [3-5], так и у нас в стране [6-9, 26]. Ряд работ посвящен влиянию освещенности, вибраций и рефракции на точность измерений цифровыми нивелирами [10-12, 23–25].

Основной метрологической характеристикой нивелира является средняя квадратическая ошибка (СКО) на 1 км двойного хода, которая указывается в паспорте прибора и свидетельстве о поверке. Методика определения указанной ошибки изложена в работах [13, 14]. Однако, в инженерно-геодезических работах принято использовать СКО измерения превышения на станции ($m_{ст}$), которая в соответствии с Методикой [14] определяется при первичной поверке инструмента. По величине ошибки $m_{ст}$ можно судить о пригодности нивелира к выполнению работ требуемой точности, а также выбирать оптимальную длину плеч при проектировании схем нивелирных ходов.

Целью наших исследований является определение зависимости СКО измерения превышения на станции от длины плеч. Ошибка $m_{ст}$ определялась для расстояний от нивелира до реек 48, 26 и 11 м. Для проведения исследований в подвальном помещении со стабильным температурным режимом ($t=+18^{\circ}\text{C}$) были закреплены две жесткие точки (дюбели, забитые в бетонный пол на расстоянии 2 м друг от друга). Первоначально, превышение между дюбелями было измерено нивелиром Konі-007 (ГДР) в два горизонта при длине плеч 5 м. Нивелирование производилось по двум шкалам инварной рейки с отсчитыванием до десятой доли деления отсчетного барабана. Каждый штрих дважды совмещался с биссектором. Полученное таким образом превышение составило $h=3,46\pm 0,013$ мм и было принято за эталонное.

В дальнейшем на дюбеля посредством кронштейнов устанавливались две штрих-кодовые рейки, которые в течение всего эксперимента сохраняли неизменно свое вертикальное положение (рис. 1). Превышение между дюбелями измерялось цифровым нивелиром DiNi-03 ($m_{км}=0,3$ мм). При каждом наведении на рейку брался только один отсчёт. Следует отметить, что на производстве, как правило, используется трехкратное взятие отсчетов при наведении на рейку. Однако, это не ведет к существенному повышению точности и используется для исключения сбоев электронной системы нивелира или грубых ошибок, связанных с одномоментными воздействиями внешней среды (порыв ветра, вибрация от проезжающего транспорта и пр.).



Рис. 1. Схема закрепления штрих-кодовых реек

Измерения выполнялись в соответствии с требованиями Методики [14]. Для расстояния 48 м было выполнено десять серий измерений (в каждой по 10 приемов); для расстояний 10 и 25 м – выполнено по 5 серий. Горизонт нивелира менялся на $5 \div 50$ мм перед каждым приемом и переходом к новой серии: подъемными винтами, либо изменением длины ножек штатива. Средние квадратические ошибки подсчитывались отдельно для каждой серии по формуле Гаусса (по отклонениям превышений от эталонного значения). Окончательно СКО определения превышения на станции вычислялась по формуле [14]:

$$m_{\text{ст}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k m_i^2}{k}}, \quad (1)$$

где k – число серий; m_i – СКО превышения для i -ой серии.

Ошибка самой ошибки вычислялась по формуле

$$m_m = \frac{m}{\sqrt{2r}}, \quad (2)$$

где r – число избыточных измерений.

Результаты оценки точности выполненных измерений представлены в табл. 1. На рис. 2 показано как изменялось значение превышения в процессе выполнения 100 приемов. Значения превышения преобразовывались в статистический ряд, и затем по критерию Пирсона проверялась нулевая гипотеза о нормальности генеральной совокупности. Вычисленное эмпирическое значение критерия Пирсона $\chi^2_3 = 3,7$ не выходит за теоретический интервал

$\chi^2 = [0,8; 12,8]$, полученный на уровне значимости $\alpha=0,05$ [15]. Следовательно, нулевая гипотеза не отвергается, то есть ошибки измерения превышения подчинены нормальному закону распределения (рис. 3).

Таблица 1

Результаты оценки точности измерений цифровым нивелиром DiNi 0.3

Расстояние, м	$h_{\text{ср}}$, мм	Число из- мерений n	$m_{\text{ст}}$, мм	m_m , мм	$h_{\text{max}} - h_{\text{min}}$, мм
10	3,465	50	0,018	0,002	0,09
25	3,453	50	0,049	0,005	0,20
48	3,463	100	0,114	0,008	0,59

Из таблицы 1 видно, что при расстоянии до реек менее 25 м СКО измерения превышения в лабораторных условиях не превышает 0,05 мм. При нормальной для I класса длине плеч 50 м ошибка на станции равна 0,11 мм, хотя максимальные отклонения от эталонного значения могут достигать 0,35 мм даже в лабораторных условиях.

Рассмотрим результаты исследований, выполненных другими авторами. В статье [16] проводилось сравнение точности взятия отсчетов по рейке двумя нивелирами: Ni-007 и Trimble DiNi (т.е. такими же приборами, что и в нашем опыте). Принимались следующие расстояния от нивелира до рейки: 4,2 м; 10,1 м; 15,2 м; 21,4 м и 28,7 м. Для каждого расстояния выполнялось 25 отсчетов, а СКО подсчитывались по формуле Бесселя. Измерения, выполненные цифровым нивелиром, оказались на 10–15% точнее, чем оптическим. Средние квадратические ошибки взятия отсчета цифровым нивелиром для упомянутых расстояний оказались равными 0,015 мм; 0,025 мм; 0,030 мм; 0,040 мм и 0,050 мм соответственно. Ошибки измерения превышения на станции ожидаются в $\sqrt{2}$ большими. Например, для расстояний 10 м и 25 м они составят 0,03 мм и 0,06 мм, что вполне согласуется с нашими результатами из табл. 1.

В работе [17] приведен график зависимостей СКО измерений превышений на одну станцию от длины плеч. Данные получены в лабораторных условиях для оптических нивелиров, предназначенных для нивелирования I класса. Ошибки для расстояний 10 м, 25 м и 50 м составили соответственно 0,10 мм, 0,16 мм и 0,31 мм.

Из сопоставления точности измерений оптическими и цифровыми нивелирами в лабораторных условиях, приходим к выводу, что применение систем «цифровой нивелир – штрих-кодовые рейки» позволяет повысить точность результатов примерно в три раза. Очевидно, это связано с тем, что при электронной фиксации отсчетов по рейке исключаются субъективные ошибки наблюдателя [18]. Однако, не следует забывать, что влияние на точность взятия отсчета некоторых неблагоприятных факторов [10-12], которые имеют место в реальных производственных условиях, может быть разным для оптических и электронных систем.

В табл. 2 приведем данные исследований нескольких оптических нивелиров, выполненные на полигоне НИИГАиК [19]. В табл. 3 поместим средние квадратические ошибки измерения превышений цифровым нивелиром DiNi в полевых условиях. Данные табл. 3 получены, как СКО отсчетов по рейке из работы [16], умноженные на $\sqrt{2}$.

Таблица 2

Результаты определения СКО измерения превышения на станции [19]

Нивелир	Средние квадратические ошибки $m_{ст}$ (мм) в зависимости от d (м)					
	5	10	20	30	40	50
НА-1	0,08	0,12	0,18	0,22	0,24	0,28
Н1	0,03	0,04	0,06	0,08	0,12	0,18
Koni-007	0,02	0,03	0,07	0,14	0,20	0,23
Ni-B5	0,04	0,06	0,12	0,23	0,29	0,35

Таблица 3

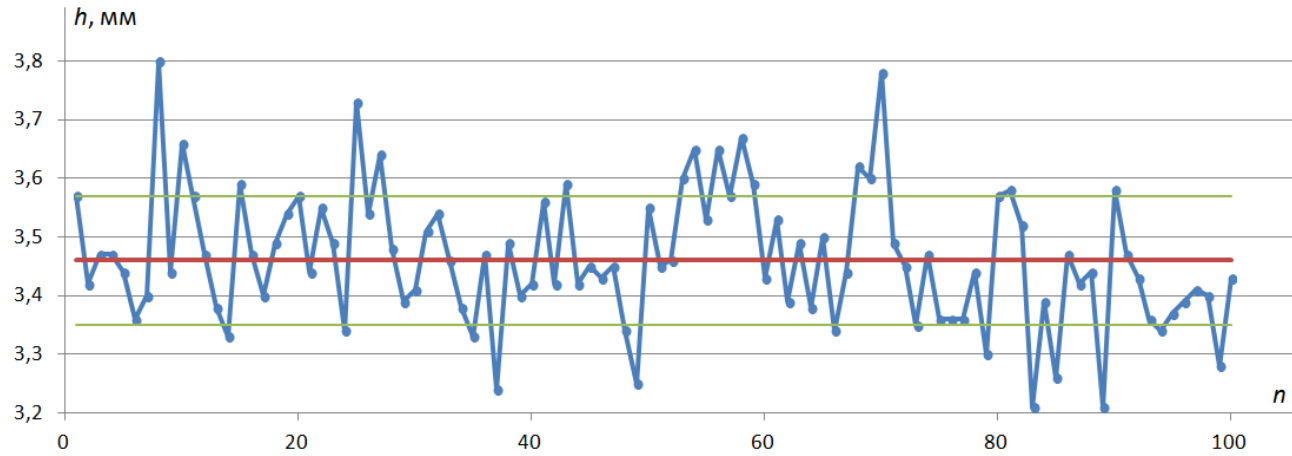
Результаты определения СКО измерения превышения нивелиром DiNi [16]

Положение Солнца	Средние квадратические ошибки $m_{ст}$ (мм) в зависимости от d (м)					
	5	10	15	20	25	30
лицом к Солнцу	0,11	0,13	0,19	0,21	0,28	0,32
спиной к Солнцу	0,05	0,09	0,11	0,18	0,23	0,30

Из сопоставления данных табл. 2 и 3, можно сделать вывод, что в полевых условиях система «цифровой нивелир – штрих-кодовая рейка» дает худшие результаты, в сравнении с классическими нивелирами. Хотя переход от ошибки взгляда к ошибке измерения превышения на станции с использованием коэффициента $\sqrt{2}$, мог несколько занизить точность измерения цифровым нивелиром. В статье [20] приведены результаты исследований электронной измерительной системы (DiNi 12) и уровенного нивелира (Wild N3). После проложения опытных высотных ходов одновременно двумя нивелирами авторы [20] пришли к выводу, что использование DiNi 12 дает более точные результаты, чем Wild N3 ($\pm 0,26$ мм/км против $\pm 0,39$ мм/км).

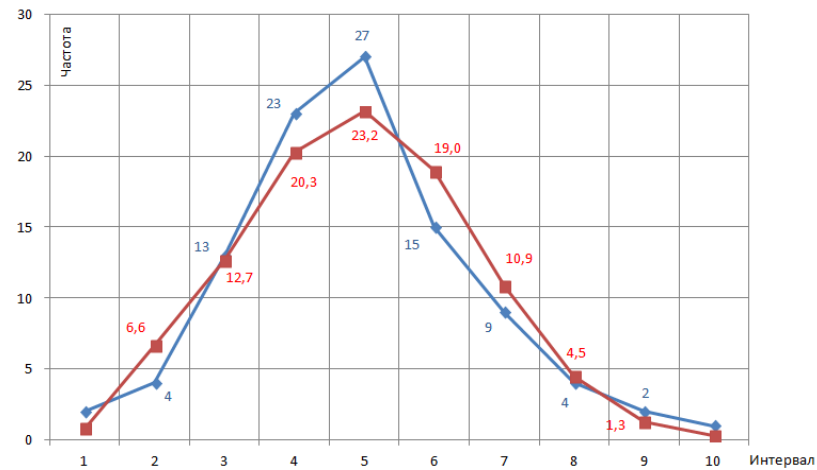
Для того чтобы сделать более объективные выводы о точности измерительной системы «цифровой нивелир – штрих-кодовая рейка» необходимо произвести дополнительные исследования в полевых условиях.

Особый интерес представляет точность измерения превышения на станции цифровым нивелиром при длине плеч порядка 50 м, так как именно это расстояние принято считать оптимальным при выполнении государственного нивелирования I класса [21, 22].



зеленым – показан интервал $\pm\sigma$; красным – среднее значение превышения (3,46 мм)

Рис. 2. График изменения значений превышения для $S=48$ м



синим – эмпирический многоугольник распределения частот; красным – нормальная кривая

Рис. 3. Результат исследования статистического ряда ($n=100$) на нормальность распределения

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Уставич Г. А., Шаульский В. Ф., Винокурова О. И. Разработка и совершенствование технологии государственного нивелирования I, II, III и IV классов // *Геодезия и картография*. – 2003. – № 8. – С. 5–11.
2. Разработка и совершенствование технологии инженерно-геодезического нивелирования / Г. А. Уставич, С. В. Демин, Е. Л. Шалыгина, Я. Г. Пошивайло // *Геодезия и картография*. – 2004. – № 7. – С. 6–13.
3. Takalo M., Rouhiainen P. Developmant of a system calibration comporator for digital levels in Finland // *Nordic Journal of Surveying and Real Estate Research*. – 2004. – vol. 1. – PP. 119–130.
4. Scale determination of digital leveling systems using a vertical comparator / Н. Woschitz, F.K. Brunner, Н. Heister. FIG XXII Congress Washington, D.C. USA, April 2002.
5. Investigations of digital levels at the slac vertical comparator / G. Gassner, R. Ruland, B. Dix. IWAA 2004, CERN, Geneva, 4-7 October 2004.
6. Голыгин Н. Х., Лазуткин А. М., Пегливанян Г.Г. Исследование погрешности измерений цифровых нивелиров DINI-03 и DINI-12 с инварными штрих-кодowymi рейками // *Приборы*. – 2009. – № 4. – С. 52–56.
7. Установки для определения погрешности измерительной системы «цифровой нивелир – кодовая рейка» / А. В. Куликов, В. Т. Новоевский, А. А. Ильин, А. Н. Носов, К. В. Тукмачёв // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.)*. – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 2. – С. 242–245.
8. Определение средней длины метровых интервалов у штрих-кодовых реек на интерференционном компараторе СГГА / А.В. Куликов, А.А. Ильин, В.Т. Новоевский // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.)*. – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 2. – С. 246–249.
9. Черепанов П. А. Поверка и калибровка измерительных систем «цифровой нивелир + две штрих-кодовые рейки» // *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. – 2012. – № 3. – С. 119–122.
10. Новоселов Д. Б., Новоселов Б. А. Исследование работы высокоточного цифрового нивелира в условиях недостаточной освещенности // *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. 117–121.
11. Кузьмич А. И., Богданов С. С. Исследования влияния вибраций на современные цифровые нивелиры // *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. – 2014. – № 1. – С. 18–21.
12. Исследование влияния рефракции на результаты нивелирования цифровыми нивелирами / Г. А. Уставич, Е. Л. Соболева, Н. М. Рябова, В. Г. Сальников // *Геодезия и картография*. – 2011. – № 5. – С. 3–9.
13. Хасенов К. Б., Рахымбердина М. Е. Методика определения средней квадратической погрешности измерения превышения на 1 км хода на полевом компараторе в стесненных условиях // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.)*. – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 128–132.
14. МИ БГЕИ 07-90 «Нивелиры. Методика поверки»: Методика института . – М.: ЦНИИГАиК, 1990. – 52 с.
15. Падве В. А. Элементы теории вероятностей и математической статистики: учеб. пособ. – Новосибирск: СГГА, 2013. – 209 с.

16. Investigating the accuracy of digital levels and reflectorless total stations for purposes of geodetic engineering / Ashraf A.A. Beshr, Islam M. Abo Elnaga // Alexandria Engineering Journal. – 2011. – 50. – PP. 399–405.
17. Жуков Б. Н., Жуков Н. Б. Предложения о создании единой инструкции по нивелированию для инженерно-геодезических работ // Геодезия и картография. – 1998. – № 8. – С. 22–26.
18. Энгельс И. Л. Влияние психологического фактора на точность геодезических измерений // Геодезия и картография. – 1985. – № 2. – С. 30–33.
19. Зеленский А. М. Использование насадки ДНТ при исследовании нивелиров // Геодезия и картография. – 1972. – № 4. – С. 35–38.
20. On calibration of Zeiss DiNi12 [Электронный ресурс] / M. Takalo, P. Rouhiainen, P. Lehmuskoski, V. Saaranen. Режим доступа: http://www.fig.net/pub/proceedings/korea/fullpapers/pdf/ws_com5_1/takalo-rouhiainen-lehmuskoski-saaranen.pdf
21. Нивелирование I и II классов (практическое руководство) / Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР. – М.: Недра, 1982. – 264 с.
22. Лысов Г. Ф. Об оптимальных расстояниях от нивелира до реек // Геодезия и картография. – 1975. – № 10. – С. 23–25.
23. Рябова Н. М., Чешева И. Н., Лифашина Г. В. Исследование величины изменения угла i цифрового нивелира в зависимости от изменения температуры // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 4 (24). – С. 19–24.
24. Никонов А. В. Особенности применения современных геодезических приборов при наблюдении за осадками и деформациями зданий и сооружений объектов энергетики // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 4 (24). – С. 12–18.
25. Овчинников С. С. Влияние электромагнитных полей на точность показаний электронных геодезических приборов // Вестник СГГА. – 2010. – Вып. 2 (13). – С. 18–23.
26. Исследование штрих-кодовых реек цифровых нивелиров / Г.А. Уставич и др. // Вестник СГГА. – 2010. – Вып. 2 (13). – С. 3–8.

© А. В. Никонов, Е. Л. Соболева, Н. М. Рябова, Т. М. Медведская, 2015