

«Исследования выравнивающего оборудования для высокоточных измерений»

Авторы :Г. Л. Гасснер, Р. Э. Руланд

Перевод с Английского: В.В. Панченко.

SLAC, Стэнфорд, CA 94025, США

В SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) полностью автоматизированный вертикальный компаратор для калибровки цифровых уровней и инвариант штабы были разработаны Департаментом метрологии в сотрудничестве с Институтом инженерной геодезии и измерений. Системы в Технологическом университете Граца. Этот вертикальный компаратор является первым в США.

С помощью вертикального компаратора можно выполнить калибровку системы и измерения CCD-камеры стержней. Калибровка системы использует показания высоты цифрового уровня в разных положениях стержня и сравнивает их с полученными опорными показаниями интерферометром. В случае измерений камеры CCD позиции краев на изображении определяются и снова по сравнению с показаниями интерферометра.

В этом документе дается обзор текущей настройки вертикального компаратора SLAC и экспериментальных результатов критических включая измерения на концевых участках стержня, на критических расстояниях прицела, с нефокусированной оптикой и подсветка цифровыми уровнями, используемыми в SLAC.

1. ВВЕДЕНИЕ

Цифровые уровни стали стандартными для выравнивания из-за их высокоточных и быстрых измерений в автоматизированном процессе измерения. Недостатком является то, что они дают менее точные некоторые обстоятельства, которые не всегда очевидны.

Известно, что несколько источников оказывают систематическое влияние на чтение высоты и, следовательно, должны быть для нашего

цифрового оборудования для выравнивания. Одним из таких источников является масштабный фактор, который должен быть определяемых на регулярной основе. Это также служит средством обеспечения того, чтобы оборудование работало перед проведением долговых кампаний. К масштабному коэффициенту относится тепловое расширение коэффициент стержней. Другими источниками для неточных показаний высоты являются измерения на критических расстояниях а на концевых участках стержня – расфокусированная установка и освещение стержней. Использование различных стержней в одна установка также позволяет определить смещения стержней. С выводами были исследованы эти источники ошибок, установлены правила для нашей полевой работы.

Когда невозможно избежать критической настройки с цифровой системой выравнивания, мы используем аналог Wild N3 уровень. Поэтому аналоговые стержни также должны быть откалиброваны. Калибровка выполняется с помощью ПЗС-камеры который автоматически обнаруживает края изображения и сравнивает их с показаниями интерферометра

2. Вертикальный компаратор SLAC

2.1. Лаборатория

Лаборатория находится в 44-летнем туннеле доступа к линейному ускорителю. Его размер составляет около 35 м × 5 м × 4 м. Стены выполнены из бетона толщиной около 1 м. Вся лаборатория, кроме портал, составляет около 5 м под земной поверхностью, поэтому лаборатория обеспечивает отличную термическую стабильность. Это кондиционируется для достижения постоянной температуры 20 ° С, которая является эталонной температурой для калибровка прибора. Вертикальный компаратор был построен в 2003 году. Калибровочный объект предназначенный для калибровки оборудования с весов длиной 40 см до 3 м. инварные стержни.

2.2. Система калибровки системы

Принцип калибровки системы заключается в использовании, как уровня, так и стержня в процессе калибровки и сравните его с более точной

системой, см. [1]. На нашем объекте уровень поддерживается на постоянной высоте, а стержень установлен вертикально на рельсовой системе, где его можно перемещать вверх и вниз. Выход уровня по сравнению с «истинными значениями». «Истинные значения» приобретаются путем считывания положения стержня с помощью лазера интерферометр (Agilent N1231A, разрешение: 0,6 нм). Метеорологическое сокращение интерферометра расстояния выполняются с использованием формулы показателя преломления Ciddor [2], как рекомендовано IAG [3]. Значение температура вдоль пути лазерного луча вычисляется путем моделирования профиля вертикальной температуры, который равен измеренный шестью датчиками температуры (Sensor Scientific WM222C). Дальнейшие датчики - это давление воздуха датчик (Vaisala PTB 100A) и датчик влажности (Vaisala HMP45A). Значения всех датчиков измеренный, регистратором данных Agilent 34970A и аналого-цифровым преобразователем. Все датчики калибруются один раз в год.

Базовая установка компаратора схематически показана на рисунке 1. Раздел, обозначенный «CCD раздел "будет объяснено в главе 2.3. Концептуальная конструкция системы вертикального компаратора была вдохновленный дизайном TUG [4] и реализованный в сотрудничестве с TUG.

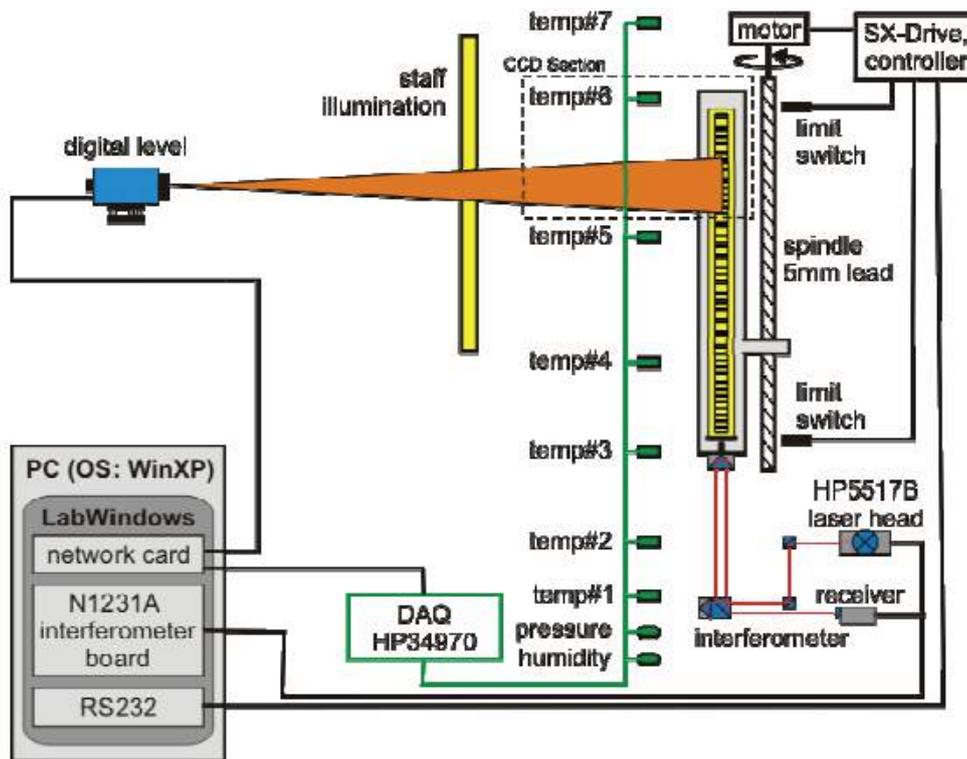


Рисунок 1: Схема вертикального компаратора.

Для управления компаратором мы использовали LabWindows на стандартном ПК с Windows XP в качестве действующего система. Как программное обеспечение компаратора, адаптированная версия Технологического университета Граца программное обеспечение [4].

Уровень установлен на каретке, которая может перемещаться горизонтально по рельсовой системе, которая прикреплена к потолок, см. Рисунок 2. Любое расстояние прицеливания между 1,65 и 30 м (это расстояние, которое не должно быть превышение в случае точного выравнивания). Каретка была изготовлена с использованием инвариантных и алюминий, чтобы сформировать систему с нечувствительной температурой. Следовательно, уровень остается постоянным высота, даже если в лаборатории могут быть небольшие изменения температуры. Важно, чтобы уровень и интерферометр не перемещается относительно друг друга во время калибровки. Продолжительность калибровка в основном зависит от количества повторяющихся измерений на уровне (например, около 2 часов для 3 м).



Рисунок 2: Обзор вертикального компаратора

Интерферометр установлен на дне шахты глубиной 0,7 м и имеет диаметр 0,62 м. Это необходимо было просверлить этот вал в полу, а другой - в потолке, чтобы облегчить калибровку длиной 3 м. Шток установлен на каретке, которая может перемещаться на 3 м и 3 м вниз относительно линию видимости уровня. Точный свинцовый винт (диаметр 32 мм, провод: 5 мм на оборот) используется для выполнить движение в сочетании с устройством шагового двигателя с индексом. Люминесцентная лампа длиной 1,25 м излучающий широкополосный спектр, используется для освещения стержня.

2.3 Узел калибровки стержня

Калибровка стержня означает, что стержень проверен сам по себе, а не в сочетании с уровнем, поэтому это техника не подходит для калибровки цифровых систем нивелирования [5]. Однако для дальнейшего использования аналоговые уровни (например, Wild N3), линейные весы должны быть откалиброваны и проверены.

Чтобы выполнить калибровку стержня на вертикальном компараторе SLAC, необходимы только незначительные модификации. CCD-камера (Sony

XCD SX900) используется в сочетании с телеобъективом ($f = 128$ мм и увеличение 3.3) для обнаружения линий градуировки на стержне. Камера установлена на потолке на расстоянии 420 мм от стержня. На стержне площадь изображения составляет 19,4 мм на 14,6 мм, см. Рисунок 5. Освещение шкалы реализуется мигающим светом, состоящим из белых светодиодов. Он монтируется на расстоянии 160 мм от стержня. На рисунке 3 показана установка, а на рисунке 4 показана схема ее работы.



Рисунок 3: Установка камеры CCD.

Важно, чтобы линия обзора камеры была устойчивой относительно интерферометра во время полной калибровки. Следовательно, для мониторинга используется второй интерферометр и инклинометр (Leica Nivel20) стабильность камеры, см. рисунок 4.

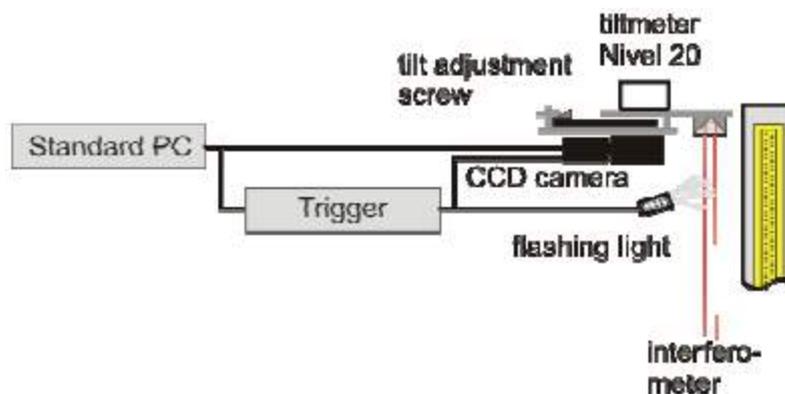


Рисунок 4: Схематический обзор части ПЗС-камеры вертикального компаратора SLAC.

Во время калибровки стержня изображения снимаются с помощью ПЗС-камеры при движении штока. Постоянная скорость стержня установлена равной 1 мм / с. Поэтому камера должна быть установлена на короткое время экспозиции (здесь 1 мс). Отображение движущегося стержня

с этой скоростью все еще вызывает дополнительное размытие в 1 мкм длины (кроме дифракционные эффекты). Из-за короткого времени экспозиции требуется яркая вспышка для освещения, устройство подсветки запускается вместе с камерой, в течение которого светодиоды излучают яркую вспышку. CCD-камера, светодиоды и интерферометр, который контролирует положение стержня, электронным образом запускаются цифровая плата ввода-вывода (National Instruments NI6601), которая генерирует триггерные импульсы с точностью до 1 мкс. Интерферометр запускается в середине экспозиции камеры CCD.

Изображения, сделанные с помощью ПЗС-камеры, немедленно анализируются для обнаружения краев, см. Рис. 5. коммерчески доступная «Библиотека Halcon» для цифровой обработки изображений используется для обнаружения краев выпускные линии. Положения краев в системе координат изображения сохраняются в файле. Поскольку каждый край появляется на нескольких изображениях, они анализируются на этапе последующей обработки вместе. В сочетании с показание интерферометра во время захвата изображений, положение края может быть отнесено к показания интерферометра на шаге настройки. В качестве параметров неудобства используется масштабный коэффициент изображения и вращение изображения оценивается.

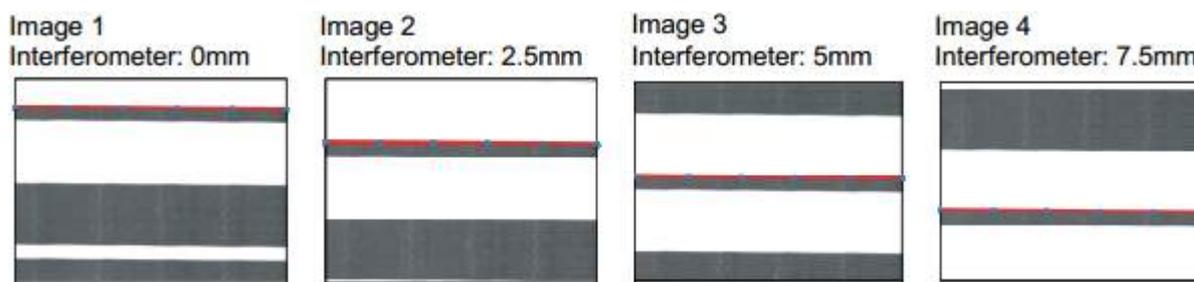


Рисунок 5: ПЗС- последовательность изображений одного края

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1. Определение шкалы

Каждый отдельный стержень в сочетании с уровнем имеет другое значение шкалы. Чтобы достичь наивысшего уровня точность с уровнем в

сочетании со стержнем, необходимо определить масштабный коэффициент. Поскольку масштабное значение может меняться со временем и проверять оборудование, необходимо определить масштаб регулярно. На рисунке 6b приведены результаты определения масштаба. Результаты, полученные с помощью ПЗС-камеры калибровка для того же стержня приведена на рисунке 6a. Разница между этими двумя методами, скорее всего, артефакт процесса измерения уровня и его программного обеспечения.

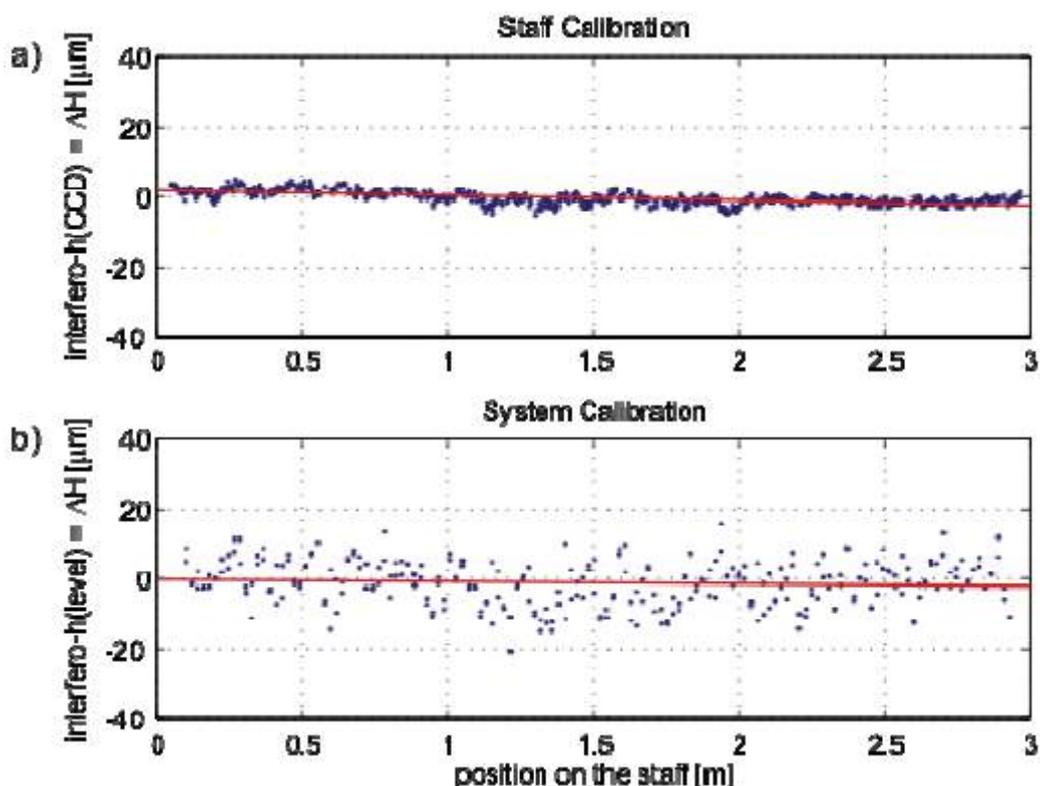


Рисунок 6: Результаты калибровки для стержня Leica 9960, определенные (a) калибровкой стержня, и (b) путем калибровки системы в сочетании с Leica DNA03.

3.2. Изменения температуры

Другим важным фактором является коэффициент теплового расширения. Исследование нескольких тысяч стержней на Технический университет Мюнхен в течение 14 лет показал, что коэффициент теплового расширения может составлять от 0,4 до 1,0 ppm / K со средним значением 0,66 ppm / K, [6]. В SLAC мы находимся в процессе создавая климатическую камеру для проверки коэффициента теплового расширения для наших стержней.

3.3. Критические расстояния

В сообществе метрологии хорошо известно, что цифровые уровни дают неточные результаты на определенных расстояниях. Например, Leica NA3000 имеет критическое расстояние около 15 м, где отклонения до 0,7 мм могут [7]. Вошиц [8] подробно исследовал этот эффект для Zeiss / Trimble DiNi 12 и Leica NA3003 и обнаружил, что это происходит, когда размер кодовых строк, проецируемых на матрицу CCD, имеют ровно размер одного пикселя. Если кратность строк кода отображается на целое число пикселей, также происходит отклонение. Принимая эти результаты, мы проверили наши приборы на своих критических расстояниях.

Для DNA03 один элемент кода размером 2,025 мм проецируется на матрицу ПЗС размером 1 пиксель на расстоянии 26,7 м. Нас интересуют только прицельные расстояния до 15 м из-за жесткой туннельные установки. Итак, мы провели эксперименты вокруг дальности наблюдения 13,35 м, где один код элемент проецируется на два пикселя и около 8,9 м, где один элемент кода проецируется на три пиксели. Результаты для расстояния 8,9 м приведены в качестве примера на рисунке 7. Синусоидальный рисунок распознаваемых в результатах, но его величина довольно мала с диапазоном менее 50 мкм.

Аналогичная ситуация наблюдается с DiNi 12, где элементы кода имеют ширину 20 мм. Для Например, на расстоянии 10,98 м один элемент кода проецируется на матрицу ПЗС с тем же размером, что и 38 пикселей [8], результаты этого эксперимента приведены на рисунке 8.

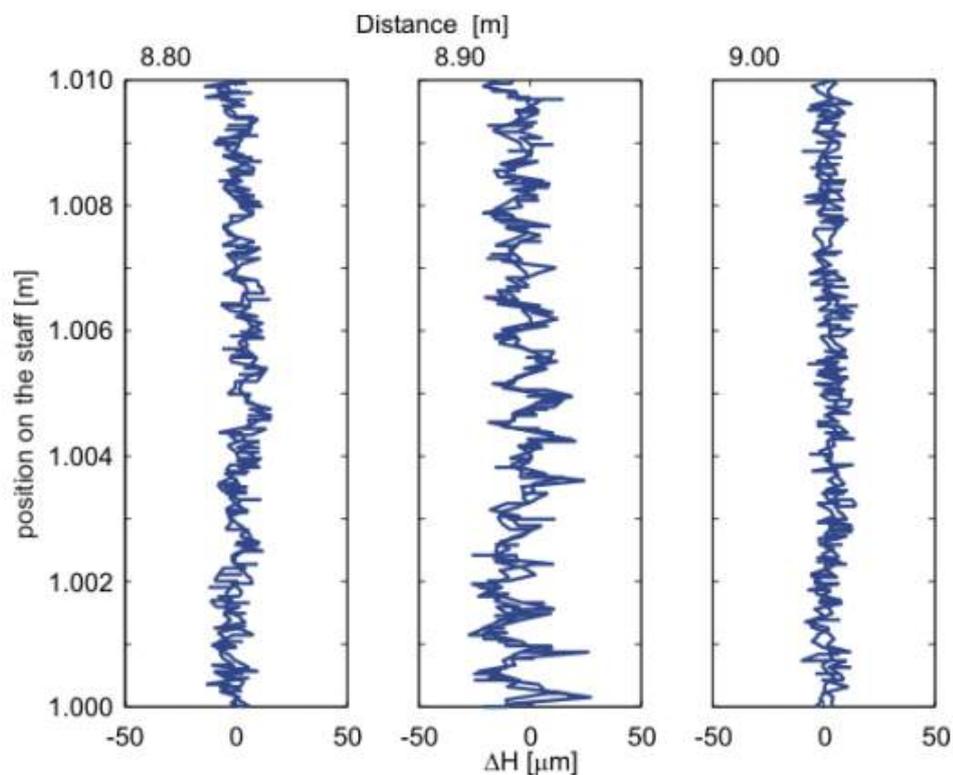


Рисунок 7: Измерения на критических расстояниях 8,9 м и вокруг критического расстояния с ДНК03.

3.4. Расфокусированные измерения

С использованием новых инструментов (Leica DNA03 и Trimble DiNi 12) критические расстояния не вызывают как большие отклонения, как это произошло со старой Leica Series. Однако, если есть дополнительный источник ошибок, например, слегка расфокусированная установка этих отклонений может перестать быть незначительной [8]. Мы измерили критическое расстояние 10,98 м с DiNi 12, однажды сфокусированным и один раз с слегка расфокусированным (сфокусированным 0,25 м за шкалой). Это небольшое размытие визуально мало узнаваемо, но в нашем эксперименте в два раза большее отклонение на этом критическом расстоянии с диапазоном больше 0,1 мм, см. рисунок 8.

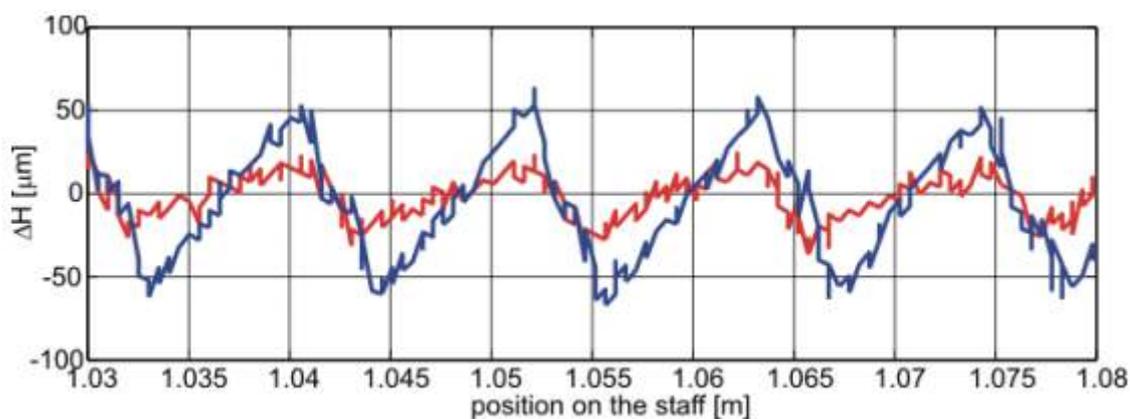


Рисунок 8: Измерения на критическом расстоянии 10,98 м с DiNi 12. Красная линия показывает сфокусированный случай, синяя линия слегка нефокусированный корпус (250 мм позади шкалы).

3.5. Конец раздела персонала

Практически нижний конец персонала исключается из-за эффекта преломления. Кроме того, если используются цифровые уровни, верхнюю концевую секцию следует избегать. Интенсивные исследования, проведенные Вошицем [8], показали, что высота на концах стержней могут возникать отклонения до нескольких миллиметров. Причина – асимметричная пиксель, поэтому уровень должен обнаруживать и устранять фоновые текстуры и имеет только части области видимый для определения высоты. Следствием этого являются неточные измерения, см. Рис. 9.

В DiNi 12 используется максимальная часть штатива 300 мм ([9], [10]) для определения показания высоты (при близкие дальности наблюдения до 3,5 м, используется меньшая часть персонала, потому что у оптики есть отверстие угол 5 °). Шток 2 м имеет видимую секцию кода от 0,039 м до 1,940 м. Использование только измерений когда видны 300 мм шкалы, полезная секция на 2-метровой штанге колеблется от 0,189 до 1,790 м.

Leica DNA03 не использует фиксированный диапазон для персонала для окончательного считывания высоты, но раздел, видимый на угол открытия 1 °. При измерении в конце рабочего стола это окно смещается в секцию видимого кода, [11]. При измерениях на концах стержня на нескольких дальностях прицеливания до 15 м была приведена следующая

формула: чтобы избежать столкновений стержней на персонале, где могут произойти поврежденные измерения [12].

Для нижней части персонала:

$H_{\text{нижний конец}} [\text{мм}] = \text{начало видимого кода на персонале} + 20 + 7 \times \text{дальность прицеливания} [\text{м}]$

Для верхней части персонала:

$H_{\text{верхний конец}} [\text{мм}] = \text{конец видимого кода на персонале} - 20 - 7 \times \text{дальность прицеливания} [\text{м}]$

Используя 2-метровый стержень с ДНК03 на расстоянии 3 м, это приводит к использованию полезной секции кода от 0,078 до 1,899 м.

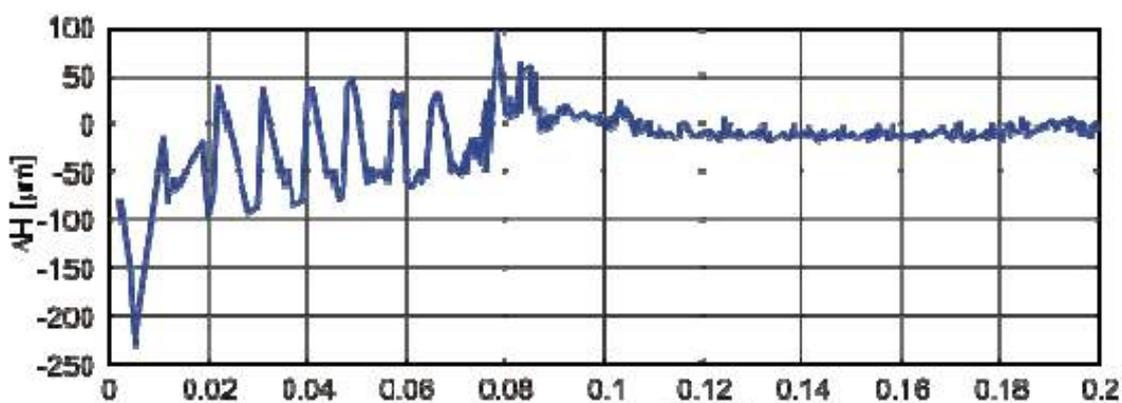


Рисунок 9: Результаты показаний высоты на концевых участках персонала с ДНК03 на расстоянии наблюдения 7,5 м.

3.6. Освещение

Выравнивающие инструменты представляют собой пассивные измерительные системы, которые используют окружающий свет для считывания стержней. В туннелях, мы используем фонари для освещения стержней и измерения. Поэтому тесты с нашими инструментами чтобы выяснить, имеет ли эффект неоднородное освещение фонарей. Коммерческие изделия из Trimble или Leica не исследовались здесь.

Принимая более 100 измерений на дальности прицеливания 3 м, освещая персонал фонариком (Black & Decker Snake Light) перед стержнем и под углом около 45° , либо без измерений были сделаны или измерения были правильными.

Но, принимая измерения с освещением с очень крутым углом (около 5° , см. Рис. 10а), отклонения может быть активировано до 0,1 мм. Это можно объяснить эффектом затенения элементов кода. В течение в процессе производства весь масштаб сначала покрывается черным слоем, а затем желтым слоем. Верхний желтый слой удаляется лазером высокой энергии, чтобы сделать черный цвет видимым. Благодаря этому процессу элементы кода имеют определенную толщину в несколько микрометров [13].

Другим решением проблемы освещения может быть самоподсветляющийся стержень, созданный NEDO GmbH, строитель наиболее точных инвариантных стержней. Прототип состоял из электролюминесцентной фольги с инвариантной маской представляющий код. Масштаб вставляется в слегка модифицированный алюминиевый корпус NEDO. Самостоятельность осветительный стержень основан на работе, проделанной Технологическим университетом Граца [14].

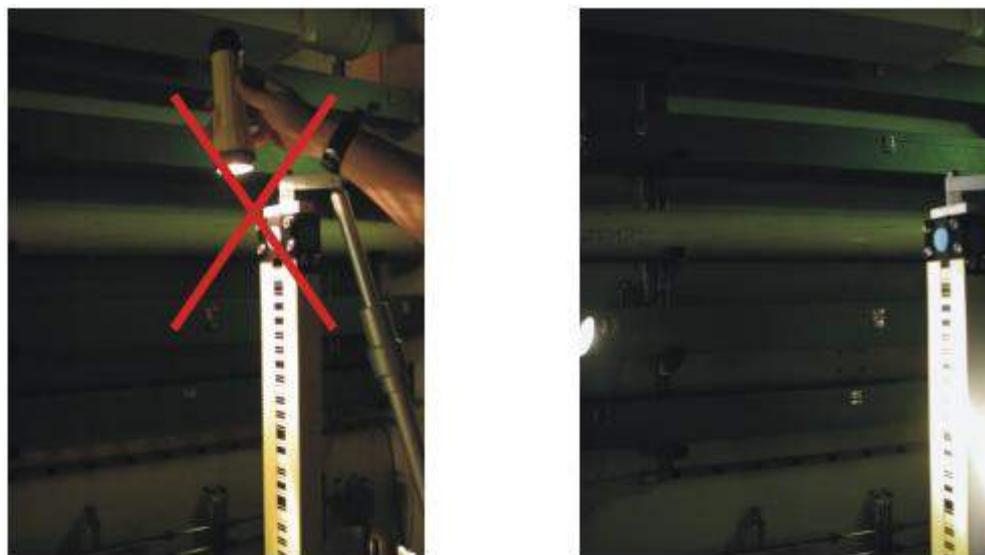


Рисунок 10: Освещение стержня. С углом освещения, как показано на рисунке слева, будут достигнуты неправильные показания. С подсветкой, как на правом рисунке, освещение не вызывало неправильных показаний.

3.7. офсет

В SLAC в одной измерительной кампании должны использоваться стержни разной длины. Чтобы связать всю высоту должны быть определены сдвиги шкалы между стержнями. Это можно выполнить с помощью

вертикальный компаратор. Сначала мы определяем смещение для наших коротких стержней, измеряя на нескольких позициях все над стержнем в нормальном положении и вверх дном, см. рисунок 11. Во время измерений положение каретка контролируется интерферометром. Смещение вычисляется путем сравнения расстояния, перемещенного с интерферометр с показаниями высоты цифрового уровня. Разницы в высоте, измеренные с помощью цифровой уровень содержит в два раза смещение между нормальным и перевернутым вниз положением.

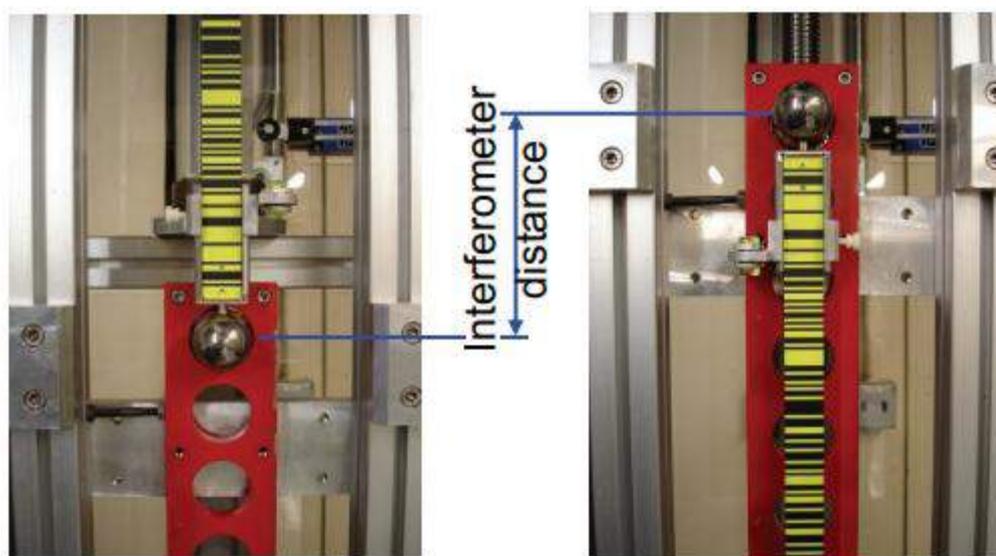


Рисунок 11: Определение смещения для короткого стержня.

Смещение стандартных стержней определяется путем сравнения их с короткими стержнями, см. Рисунок 12. результаты с использованием стержней NEDO, используемых в SLAC, варьируются в пределах 40 мкм. Это смещение не корректируется, но оно принимается учет всех вычислений.

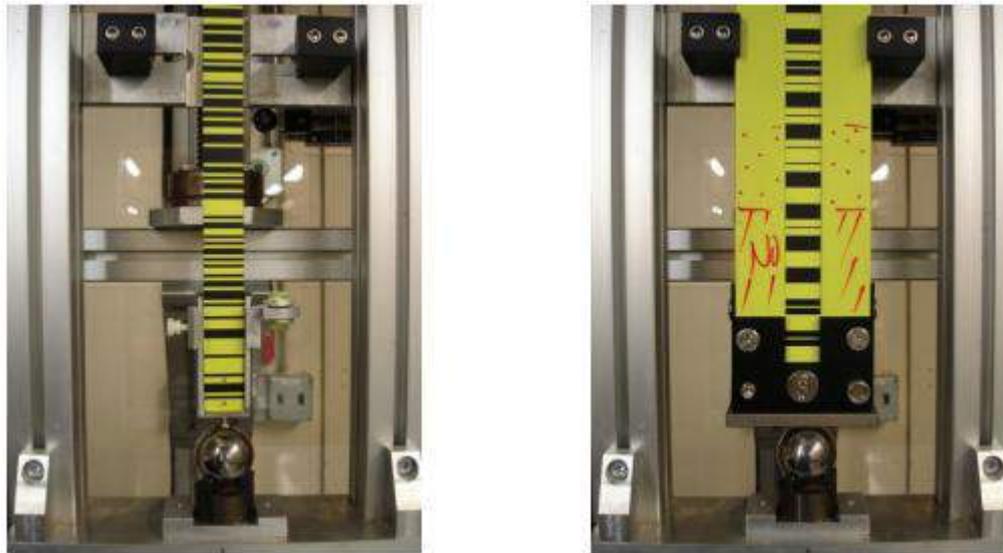


Рисунок 12: Передача смещений из небольших стержней в стандартные прецизионные стержни.

Подтверждения

Мы хотели бы поблагодарить наших коллег из отдела метрологии SLAC за создание компаратора и поддержки тестов. Работа, поддерживаемая контрактом Департамента энергетики DE-AC03-76SF00515.

Рекомендации

- [1] H. Woschitz, “Systemkalibrierung: Effekte von digitalen Nivelliersystemen”, Allg. Vermessungs Nachrichten 112: 239-244, 2005.
- [2] P.E. Ciddor, “Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared”, Applied Optics 35: 1566-1573, 1996.
- [3] IUGG, “XXII General Assembly”, Birmingham, UK, 19-30 July 1999.
- [4] H. Woschitz, F.K. Brunner, “Development of a Vertical Comparator for System Calibration of Digital Levels”, Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation 91: 68-76, 2003.
- [5] H. Heister, H. Woschitz, F.K. Brunner, “Präzisionsnivellierlatten, Komponenten- oder Systemkalibrierung?”, Allg. Vermessungs-Nachrichten 112: 233-238, 2005.
- [6] K. Foppe, P. Wasmeier, Th. Wunderlich: “Erfahrungen aus nahezu 25 Jahren Nivellierlattenprüfung an der TUM” Allg. Verm. Nachr. 6/2005: 213-220, 2005,

- [7] W. Schauerte, "Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit des Digitalnivelliers WILD NA 2000". Vermessung und Raumordnung 53: 45-55, 1991.
- [8] H. Woschitz, "System Calibration of Digital Levels: Calibration Facility, Procedures and Results", Shaker Verlag, 210 pages, 2003.
- [9] Trimble, "DiNi 12, 12T, 22 Bedienungshandbuch. Instrument manual", ZSP Geodätische Systeme GmbH, Jena, 2001.
- [10] W. Feist, K. Gürtler, T. Marold, H. Rosenkranz, "Die neuen Digitalnivelliere DiNi 10 und DiNi 20", Vermessung und Raumordnung 57: 65-78, 1995.
- [11] F. Schneider, D. Dixon, "The new Leica Digital Levels DNA03 and DNA10", Proc. FIG XXII Congress Washington, D.C. USA, April 2002.
- [12] G. Gassner, R. Ruland, B. Dix, "Investigations of Digital Levels at the SLAC Vertical Comparator", IWAA2004, CERN, Geneva, 4-7 October 2004.
- [13] T. Fischer, W. Fischer, "Manufacturing of High Precision Leveling Rods", In Lilje M (ed.): The importance of heights. FIG, Gävle, Sweden: 223-228, 1999.
- [14] F. K. Brunner, H. Woschitz, "Die selbstleuchtende Nivellierlatte", Allg. Verm. Nachr. 111: 104 – 109, 2004.