

Санкт-Петербургский государственный университет

ГУМЕРОВ Ринат Адикович

Выпускная квалификационная работа

Исследование способов калибровки наземных трёхмерных сканирующих систем

Уровень образования: магистратура

Направление 05.04.03 «*Картография и геоинформатика*»

Основная образовательная программа ВМ.5523.2020 «*Геоинформационное картографирование*»

Научный руководитель:
доцент, Кафедра картографии
и геоинформатики,
кандидат технических наук,
Войнаровский Александр Евгеньевич

Рецензент: ведущий специалист,
Общество с ограниченной
ответственностью
«Архитектурная фотограмметрия»,
Корж Родион Сергеевич

Санкт-Петербург
2022

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Инструментальные ошибки наземных лазерных сканеров.....	5
1.1. Технология и принципы работы наземных трёхмерных сканирующих систем.....	5
1.2. Фазовый и импульсный методы определения расстояний.....	9
1.3. Лазерные сканирующие системы FARO Focus 3D S120 и X330.....	10
1.4. Теория элементарных ошибок и её применение в геодезических измерениях.....	14
1.5. Теория элементарных ошибок в наземном лазерном сканировании.....	16
1.6. Влияние инструментальных ошибок на измерение дальностей.....	20
1.7. Влияние инструментальных ошибок на измерение вертикального угла.....	20
1.8. Ошибки геометрии сканирования.....	23
1.9. Анализ опыта калибровки НЛС по сканам испытательного полигона.....	26
Глава 2. Способы калибровки наземных лазерных сканеров.....	28
2.1. Процесс калибровки наземных лазерных сканеров фирмами изготовителями.....	28
2.2. Коррекция систематических ошибок в наземных лазерных сканерах.....	30
2.3. Настройка функциональной модели калибровки наземного лазерного сканера.....	34
2.4. Способ системной калибровки панорамных наземных лазерных сканеров с одной станции.....	38
2.5. Способ само-калибровки наземных лазерных сканеров на основе выбора наилучших геометрических параметров.....	44
Глава 3. Калибровка наземных лазерных сканеров FARO Focus 3D по сканам испытательного полигона.....	51
3.1. Организация испытательного полигона для калибровки лазерных сканеров.....	51
3.2. Создание линейно-угловой сети с помощью электронного тахеометра.....	52
3.3. Наземное лазерное сканирование на полигоне.....	54
3.4. Обработка результатов лазерного сканирования в ScanIMAGER 3.7 Pro.....	56
3.5. Выявление первичных невязок на сканах.....	58
3.6. Посткалибровка сканов в утилите ScanCalibr 1.0.1.....	61
3.7. Оценка эффективности калибровок фирмой изготовителем FARO.....	62
3.8. Оценка посткалибровки сканов различного разрешения.....	64
3.9. Коррекция сканов в утилите PTXCorrector 1.0.4.....	66
3.10. Оценка качества посткалибровки НЛС в утилите PointsTransform 2.1.1.....	69
Заключение.....	77
Литература.....	78

Введение

В последние годы использование метода наземного лазерного сканирования в геодезии и архитектурной фотограмметрии приобрело всё больший интерес из-за преимуществ скорости, высокой точности и мгновенной трёхмерной визуализации. Данный метод обеспечивает получение 3D-облаков, состоящих из миллионов точек (точность уровня мм) с очень высокой плотностью за короткое время (до 1 миллиона точек в секунду), что делает его ценной альтернативой или дополнением к классическим геодезическим измерениям, основанным на тахеометрической съёмке или цифровой фотограмметрии. К тому же, наземное лазерное сканирование позволяет производить очень точные измерения даже в тех ситуациях, когда другие геодезические методы трудно или невозможно использовать.

Последние разработки улучшили некоторые аспекты наземных лазерных сканеров, например, скорость сбора данных, точность и дальность действия. Поскольку такие приборы являются относительно новыми и изготовлены производителями, которые не все имеют передового опыта в использовании геодезических приборов, необходимы исследования для оценки качества инструментальных характеристик и полученных данных. Таким образом, производители смогут учесть потребности потребителей и, в свою очередь, позволят исследователям оказывать необходимую поддержку в разработке улучшений.

В настоящей диссертации поднимается вопрос калибровки и исследования наземного лазерного сканера на основании постобработки облаков точек. Объектом исследования является наземный лазерный сканер, а предмет исследования – способ калибровки наземных лазерных сканеров по сканам тест-полигона.

Калибровка наземного лазерного сканера необходима в первую очередь для уменьшения систематических ошибок, возникающие при лазерном сканировании. Остальные систематические ошибки необходимо включать в стохастическую (вероятностную) модель облака точек.

Актуальность исследования: зачастую калибровка трёхмерной сканирующей системы достаточно длительная и затратная услуга, в большинстве случаев связанная с перевозом прибора через государственную границу Российской Федерации, поскольку в нашей стране отсутствуют сервисные центры крупнейших фирм изготовителей наземных трёхмерных сканирующих систем. К тому же, на момент защиты данной работы (июнь 2022 года) перевоз геодезических приборов и, трёхмерных сканеров в частности, через таможенную границу невозможен, а значит и неосуществима калибровка лазерных сканеров в сервисных центрах производителей, поэтому актуальность исследований калибровки лазерных сканеров в «полевых» условиях только повышается.

Проблема исследования: в процессе эксплуатации ряд узлов лазерного сканера испытывает значительные динамические нагрузки, и со временем результаты калибровки уже не полностью компенсируют систематические ошибки прибора, что приводит к ухудшению точности выходного облака точек.

Цель данной работы заключается в исследовании универсального способа калибровки наземных лазерных сканирующих систем. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

Во-первых, рассмотреть вопросы, связанные с технологией наземного лазерного сканирования, устройством сканирующей системы, инструментальными и прочими ошибками, влияющие на выходящее облако точек.

Во-вторых, проанализировать существующие способы калибровки лазерных сканеров, полученные в результате интеграции и корреляции различных методов и математических моделей, позволяющих улучшить точность выходящего облака точек в результате наземного лазерного сканирования.

В-третьих, реализовать способ калибровки наземного лазерного сканера по сканам испытательного полигона. Для того, чтобы провести данное исследование необходимо: обустроить испытательный полигон для калибровки НЛС; создать линейно-угловую сеть; выполнить наземное лазерное сканирование двумя сканерами FARO Focus 3D; обработать результаты сканирования в ПО ScanIMAGER 3.7 Professional; произвести первичную посткалибровку сканов; оценить качество посткалибровки сканов различного разрешения между двумя сканерами и «внутри» конкретного прибора; и, наконец, произвести апробацию результирующих поправок на сканах, полученных на тест-полигоне №2; подвести общие итоги.

Новизна настоящего исследования заключается в следующем: во-первых, для калибровки наземных лазерных сканеров был организован высокоточный тест-полигон, состоящий более чем из 220 марок, выступающих в роли точек опорной сети, измеренных при двух кругах электронного тахеометра в общей сложности с шести точек стояния. Во-вторых, в данной работе исследуется зависимость качества калибровки наземных трёхмерных сканирующих систем сразу у двух приборов разной степени износа при различных разрешениях сканирования. В-третьих, апробация результатов исследования происходила в два этапа: на первом этапе производилась оценка качества калибровки по исходным откорректированным сканам на основании поправок, полученных в результате непосредственно самой калибровки, а на втором этапе был организован дополнительный испытательный полигон, на котором вновь было произведено повторное наземное лазерное сканирование с последующей оценкой результатов калибровки на новых сканах.

Глава 1. Инструментальные ошибки наземных лазерных сканеров

Первая глава выпускной квалификационной работы по теме «Исследование способов калибровки наземных трёхмерных сканирующих систем» носит исключительно теоретический характер, в которой затрагиваются вопросы, связанные с технологией наземного лазерного сканирования, устройством сканирующей системы, инструментальными и прочими ошибками, влияющие на выходящее облако точек.

В целом, первая глава содержит в себе следующую информацию: сведения о технологии и принципах работы наземных трёхмерных сканирующих систем; информацию о методах определения расстояния в зависимости от типа наземного лазерного сканера; обзор конкретных моделей лазерного сканера, на основании которых в дальнейшем и будет происходить исследование; анализ влияния инструментальных ошибок и ошибок геометрии сканирования на результирующее облако точек, а в завершении главы рассматривается опыт калибровки НЛС по сканам испытательного полигона с применением степенных полиномов.

1.1. Технология и принципы работы наземных трёхмерных лазерных сканирующих систем

С момента появления технологии трёхмерного лазерного сканирования, в конце девяностых годов прошлого века, у профессионалов в области геодезии и архитектуры было несколько точек зрения того, что же делает данную технологию прорывной и уникальной в своём роде. Некоторые считали новшеством то, что с помощью трёхмерного лазерного сканера возможно снять сразу около 1 млн. точек за секунду, другие выделяли конкретно 3D-аспекты, а третьи полагали, что единственное техническое отличие, например, от тахеометра – это высокая плотность точек. Именно последний довод и является главным достоинством трёхмерного лазерного сканирования, а остальные особенности этой технологии являются его естественными спутниками (Середович, 2009).

В целом, традиционные геодезические инструменты, такие как, тахеометр, теодолит и GNSS-оборудование также обеспечивают получение пространственных координат объекта. Однако, эти широко используемые методы часто обеспечивают единичные измерения с достаточно медленным по современным меркам процессом сбора данных и часто очень ограничены в диапазоне применений. Так, например, методы ГНСС не могут использоваться при съемках внутри помещений, поскольку требуется чёткая видимость спутников (Jacobs, 2010).

Наземный лазерный сканер (далее – НЛС) обеспечивает создание трёхмерной модели, представленной облаком точек окружающих объектов, определяя положение видимых поверхностей с использованием отражения лазерного света. Существуют несколько типов

лазерных сканеров, каждый из которых имеет свои сильные и слабые стороны в зависимости от области применения. Три большие группы, на которые разделяют современные трёхмерные сканирующие системы в зависимости от способов измерения расстояния: триангуляционные сканеры, импульсные сканеры и фазовые сканеры (Лысыч, 2014).

Пример фазового наземного лазерного сканера приведён на рисунке 1 (слева). Рассматриваемый прибор обычно состоит из двух основных частей: вращающегося двигателя (сервопривод) и вращающегося зеркала. Комбинация двух вращающихся элементов позволяет получать в результате сканирования развёртки сканов с панорамным видом. В случае FARO LS880, как показано на рисунке 1 (слева), двигатель головки вращается на 180° по горизонтали, а двигатель зеркала в свою очередь также вращается на 180° , но уже по вертикали. Результирующее облако точек охватывает почти 360° как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях сферической области (FARO LS880 User's Manual, 2007).

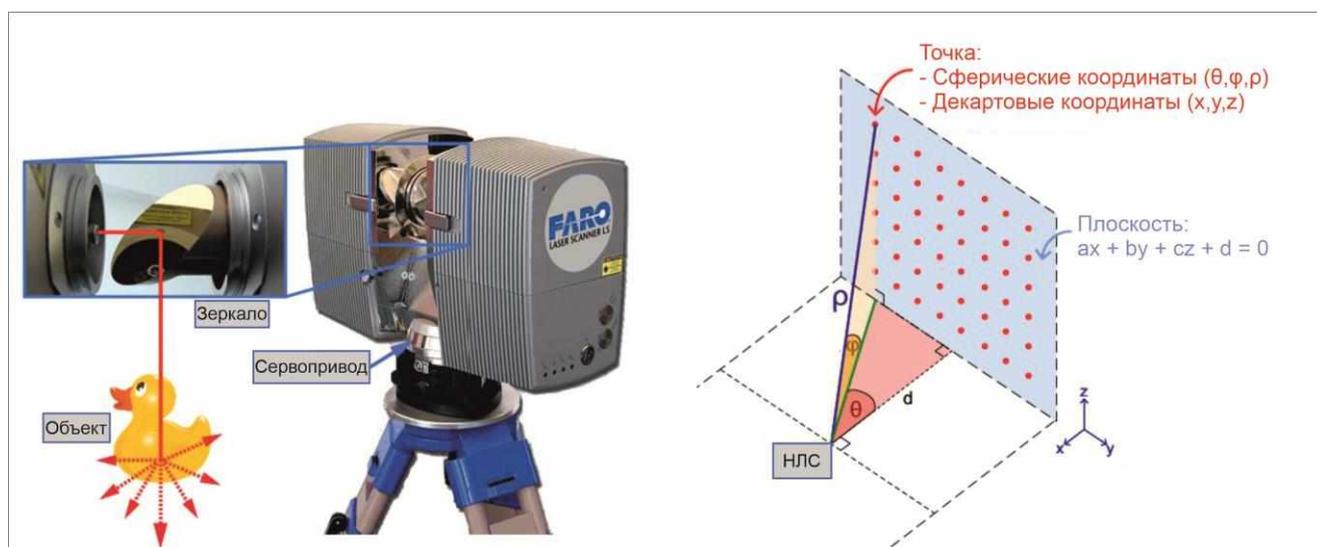


Рисунок. 1. Пример фазового наземного лазерного сканера FARO LS880 (слева) и схематическое представление сбора облака точек (справа) (Soudarissanane, 2016).

На каждом шаге горизонтального углового поворота зеркало вращается с регулярным вертикальным угловым шагом и отклоняет лазерные лучи в определенном направлении. Отдача каждого лазерного луча, попадающего на поверхность объекта, измеряется в направлении испускаемого луча, как показано на рисунке 1 (справа). Этот способ измерения положения поверхности объекта обеспечивает получение огромных объемов данных за очень короткий промежуток времени. Например, наземный лазерный сканер FARO LS880 фиксирует около 125000 точек в секунду, а более современная модель, FARO X330, способна отснять 976 000 точек в секунду при выборе самого высокого разрешения сканирования. Результирующее облако

точек обычно задается в неорганизованных, то есть не привязанных к сетке, декартовых координатах. Этот конкретный сканер может быть модернизирован с помощью однообъективной зеркальной камеры (SLR), чтобы обеспечить возможность окрашивания облаков точек. Программный инструмент, предоставляемый производителем, максимально корректирует параллакс и сопоставляет пиксели, полученные с камеры, с отдельными точками в облаке 3D-точек. В настоящее время наземные лазерные сканеры имеют встроенные камеры, расположенные как можно ближе к лазерному излучающему устройству, что делает получение цветных облаков точек очень простым и почти бесшовным (FARO LS880 User's Manual, 2007).

Технология наземного лазерного сканирования всё чаще используется для представления и анализа 3D-объектов в широком спектре геодезических приложений. Одним из основных применений результатов наземного лазерного сканера является визуализация 3D-объектов. Диапазон таких 3D-объектов чрезвычайно широк, начиная от простой трубы на нефтяной вышке и заканчивая моделью целого города. Пример 3D-облака точек показан на рисунке 2. В этом представлении точки (x, y, z) окрашены в соответствии со значениями интенсивности i (от 0 до 1), измеренными НЛС, и отображаются в соответствии с пользовательской цветовой картой RGB для облегчения лучшей визуализации. Лазерный сканер захватывает поверхности в своей прямой видимости, что приводит к закрытым областям (окклюзии), как показано на рисунке ниже (Lindenbergh и др., 2011)

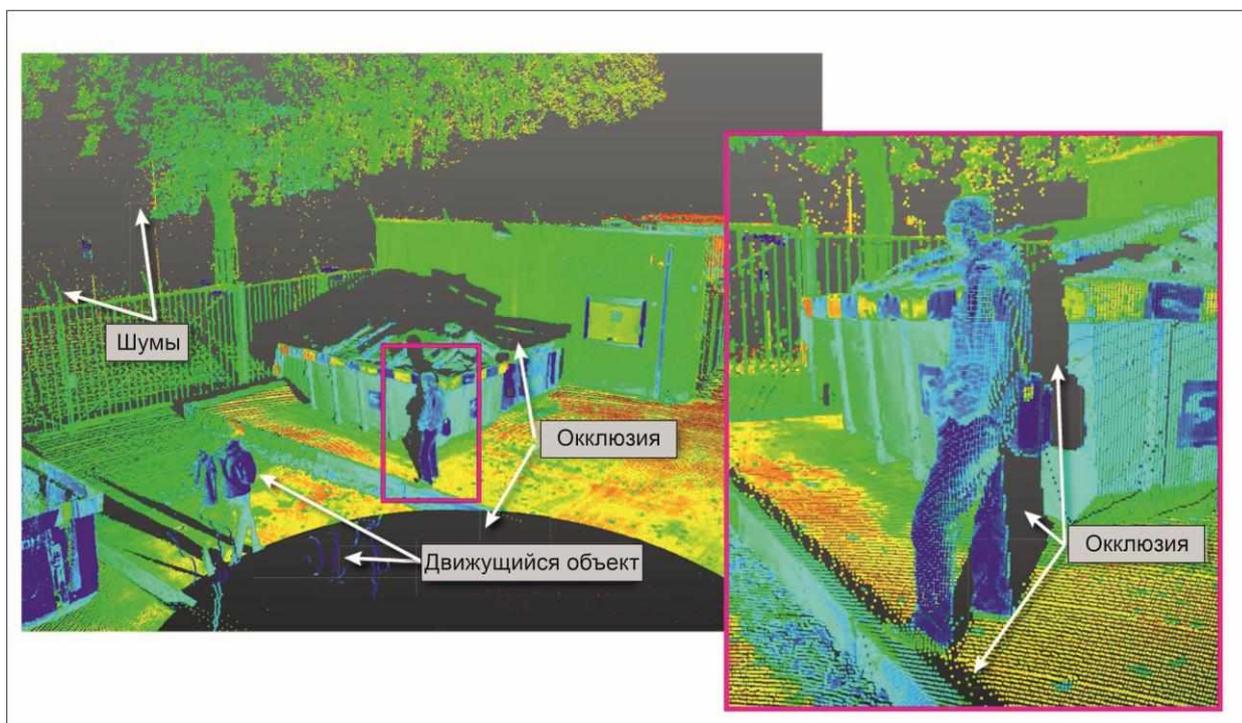


Рисунок 2. Пример 3D-облака точек, полученного с помощью лазерного сканера FARO LS880 (Soudarissanane, 2016).

В данном примере показана постоянная «мёртвая зона» прибора – периметр вокруг станции стояния прибора, или окклюзионный круг. Данное явление вызвано тем, что сканер не может сканировать поверхности прямо под собой, так как сервопривод и штатив всегда мешают обзору поверхностей, расположенных под сканером. В качестве другого примера перекрытия, на рисунке 2, стоящий человек препятствует обзору контейнеров на заднем плане. Поверхности, не находящиеся в прямой видимости НЛС с одной точки обзора, часто могут быть захвачены с другой точки обзора, где они уже становятся видимыми сканера.

Лазерный луч после отклонения проходит в определенном направлении через атмосферу и отражается от поверхностей объектов, которые присутствуют в направлении луча. В дополнение к координатам, для каждой точки в облаке точек предоставляется значение интенсивности. В зависимости от свойств отражения поверхности объекта часть излучаемого сигнала будет рассеиваться обратно на лазерный сканер. Это значение интенсивности представляет количество света, полученного обратно сканером, относительно количества излучаемого света. Многие исследования сосредоточены на коррекции значения интенсивности (Hoefle и др., 2007), чтобы использовать его при дальнейшей калибровке или последующей обработке (Kaasalainen и др., 2005).

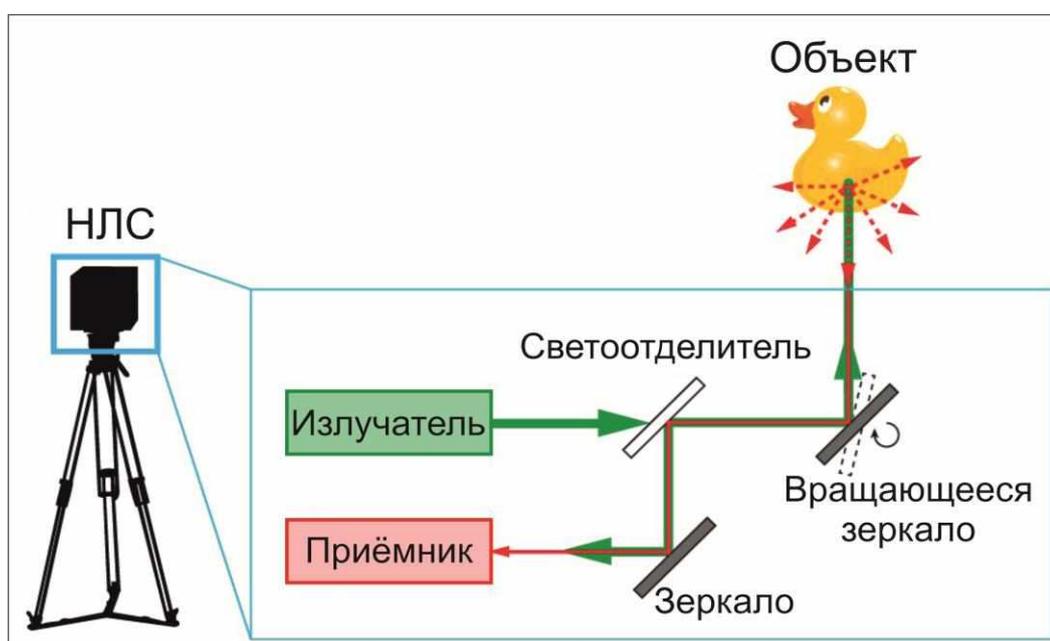


Рисунок 3. Принцип работы наземного лазерного сканера (Soudarissanane, 2016).

В настоящее время доступны два различных метода измерения расстояний в современных наземных лазерных сканерах, которые основываются на времени прохождения импульсов и сдвиге фаз. Далее ниже, в следующей подглаве настоящей диссертации, будет наглядно представлены отличия двух этих методов измерения расстояний.

1.2. Фазовый и импульсный методы определения расстояний

В последние десять лет все чаще используются фазовые лазерные сканеры, принципы измерений которых очень схожи с импульсными. Фазовые сканеры излучают непрерывную амплитудно-модулированную волну, часто модулируемой комбинацией нескольких различных длин волн. Среди прочего, самая короткая длина волны определяет точность, которая может быть достигнута, а самая длинная длина волны определяет неоднозначность измерений. Как показано на рисунке 4, расстояние до объекта определяется путем измерения сдвига фазы между излучаемым и принятым сигналом. Поскольку лазерные сканеры на основе сдвига фаз излучают непрерывную волну, это обеспечивает более высокую скорость измерений, а высокая точность в свою очередь достигается в основном за счет амплитудной модуляции с несколькими длинами волн и более точного определения фазового сдвига (Vosselman, G. и Maas, H. G., 2010).

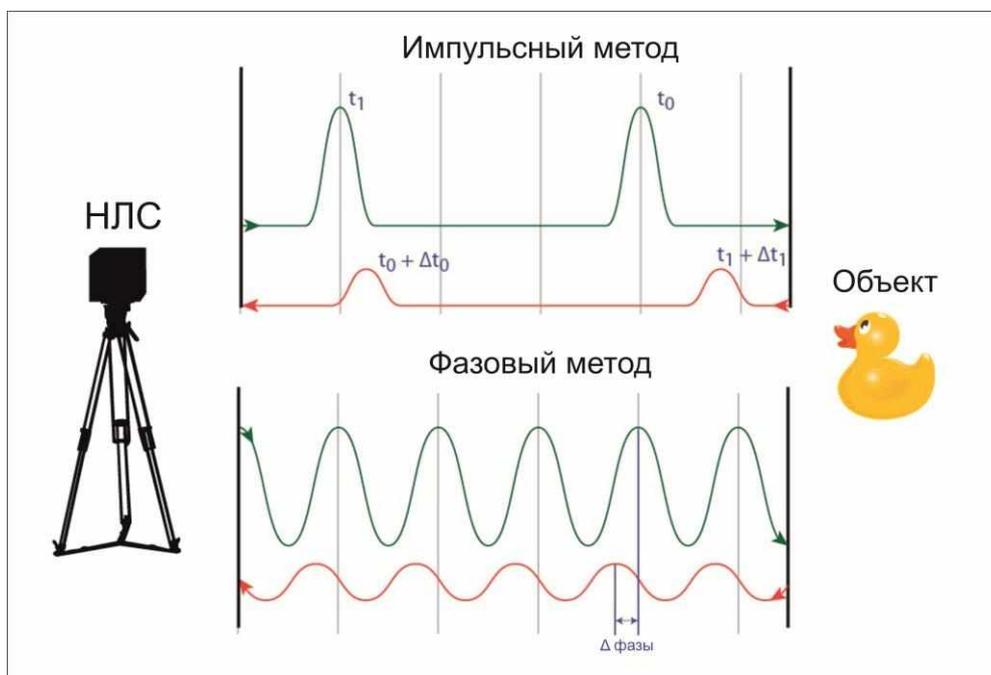


Рисунок. 4. Принцип измерения расстояний в лазерных сканерах по времени импульса (сверху) и по разности фаз (снизу) (Soudarissanane, 2016).

Импульсные сканеры излучают узкий лазерный луч в известном направлении и измеряют сигнал обратного рассеяния, отраженный поверхностью объекта. Как показано на рисунке 4, определяя время прохождения излучаемого импульса в оба конца, можно определить расстояние до объекта в известном направлении. Этот метод позволяет сканировать объекты на большом диапазоне расстояний, от нескольких метров до километров (Kersten, 2005).

1.3. Лазерные сканирующие системы FARO Focus 3D S120 и X330

Рассматриваемые наземные лазерные сканеры FARO Focus 3D S120 и X330 специально разработаны как для внутренних, так и для наружных измерений в таких отраслях, как архитектура, инженерия, строительство, общественная безопасность, криминалистика или дизайн. Благодаря сенсорному экрану для управления функциями и параметрами сканирования Focus 3D используют лазерную технологию для создания невероятно детализированных трёхмерных изображений окружающих объектов и крупномасштабных планов за относительно короткий промежуток времени. Результирующее изображение представляет собой совокупность миллионов 3D-точек измерения, которые обеспечивают точное цифровое воспроизведение существующих условий (FARO Laser Scanner Focus3D User's Manual, 2015). Внешний облик рассматриваемых приборов приведён на рисунке 5 ниже.



Рисунок 5. Фазовые наземные лазерные сканеры FARO Focus 3D, необходимые для исследования (FARO Laser Scanner Focus3D User's Manual, 2011 и 2015).

Данные приборы обладают следующим набором датчиков, так или иначе повышающих эффективность использования сканера в различных условиях работ:

1) Компас, необходимый для привязки данных о направлении к вашим сканированиям и облегчения процесса автоматической регистрации.

2) Датчик высоты (нивелир). Каждое сканирование теперь включает информацию о высоте, которую можно использовать для съёмки различных уровней пола в здании. Затем эти данные можно использовать для дифференциации полов.

3) Двухосевой компенсатор позволяет при каждом сканировании получать интегрированную информацию о встроенном уровне.

4) GPS. Информация о местоположении сканера, предоставляемая встроенным датчиком GPS, прикрепляется к каждому сканированию и автоматически используется для регистрации сканирования в ПО SCENE, если включено использование датчика GPS.

Как уже было упомянуто ранее, для измерения расстояния сканеры используют технологию сдвига фазы, при которой постоянные волны инфракрасного света различной длины проецируются на объекты находящиеся в поле зрения НЛС. При соприкосновении с объектом они отражаются обратно на сканер, как показано на рисунке 6.

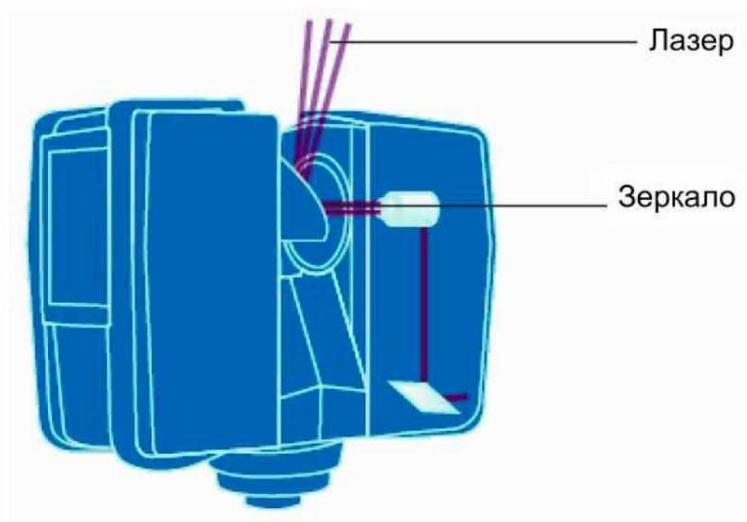


Рисунок. 6. Процесс отражение лазерного луча (FARO Laser Scanner Focus3D User's Manual, 2011).

Расстояние от сканера до объекта точно определяется путем измерения фазовых сдвигов в волнах инфракрасного излучения. Особая технология под названием HYPERMODULATION™ (гиперфазовая модуляция) значительно повышает отношение сигнала к шуму модулированного сигнала с помощью специальной технологии. Координаты x , y , z каждой точки затем вычисляются с помощью угловых датчиков для измерения поворота зеркала и горизонтального поворота Focus 3D. Эти углы кодируются одновременно с измерением расстояния. Расстояние, вертикальный угол и горизонтальный угол составляют полярную координату (δ , α , β), которая затем преобразуется в декартову координату (x , y , z). Сканер S120 охватывает поле зрения 360° на 305° , как видно по рисунку 7, а X330 же имеет поле зрения 360° на 300° (FARO Laser Scanner Focus3D User's Manual, 2011 и 2015).

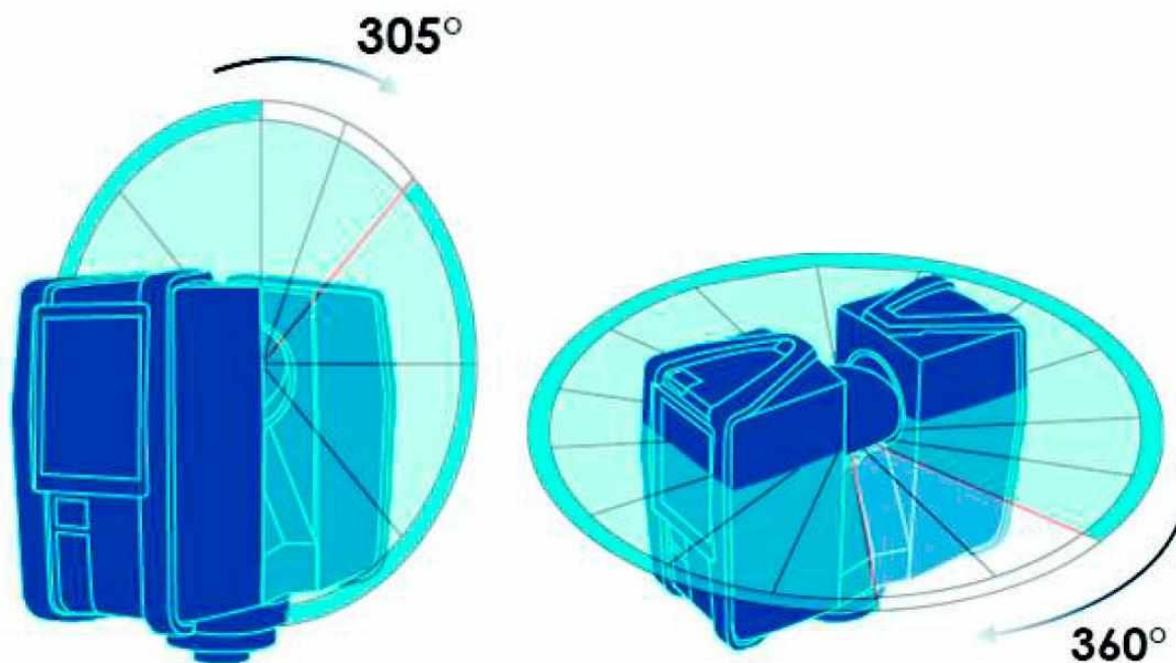


Рисунок. 7. Вертикальное и горизонтальное вращение НЛС (FARO Laser Scanner Focus3D User's Manual, 2011).

В зависимости от выбранного разрешения (точек, полученных за один поворот) каждое облако состоит из миллионов точек сканирования. Далее, в третьей главе выпускной квалификационной работы, будет представлена таблица зависимости количества точек в секунду от выбранного разрешения сканирования, которые применялись в исследовании.

Результаты сканирования записываются на съёмную карту памяти SD, что обеспечивает лёгкую и безопасную передачу в SCENE, программное обеспечение для обработки облаков точек FARO.

Далее ниже будет представлена таблица, в которой приведены все технические характеристики рассматриваемых лазерных сканеров. На первый взгляд особых отличий в технических характеристиках приборов не так много: наиболее значимое превосходство прибора X330 над S120 наблюдается лишь в диапазоне измерений. В более современном приборе оно увеличено с максимальных 120 метров до 330 метров соответственно. Ещё одно существенное преимущество модели X330 в том, что данный сканер может производить сканирование даже при прямом солнечном свете.

Технические характеристики наземных лазерных сканеров Faro Focus 3D S120 и X330 (FARO Laser Scanner Focus3D User's Manual 2011 и 2015).

НЛС Техническая характеристика	S120	X330
Диапазон измерений	0,6 – 120 м	0,6 – 330 м
Точность	±2 мм на 25 м	
Тип сканера	3R	
Разрешение	До 70 мегапикселей	
Скорость сканирования	5,820 об/м или 97 Гц (до 976 000 точек/сек)	
Шаг сканирования	0.009° (40,960 3D пкс на 360°, при верт. и горизонт. шаге)	
Поле зрения	305° (вертикальное) / 360° (горизонтальное)	300° (вертикальное) / 360° (горизонтальное)
Размеры	240 x 200 x 100 мм	
Вес	5 кг	5.2 кг
Рабочая температура	5° – 40°C	
Хранение данных	SD, SDHC, SDXC; 32 Гб карта в комплекте	
Время работы без подзарядки	До 5 часов	
Компенсатор	Двухосевой	
Точность компенсатора	0.015°	
Диапазон компенсатора	±5°	
Батарея	19 V (14.4 V внутренний аккумулятор)	

Транспортировочный кейс рассматриваемых лазерных сканеров FARO Focus 3D включает в себя типичный набор комплектующих, среди которых можно встретить непосредственно сам прибор, блок питания, сменные батареи, кейс для карты памяти, SD-карту, кардридер, CD-диск с ПО SCENE, защитные очки и руководство пользователя ((FARO Laser Scanner Focus3D User's Manual, 2015).

Таким образом, на основании всего вышеперечисленного можно сделать вывод, что FARO Focus 3D предлагает достаточно эффективный метод для создания и интерпретации трёхмерной документации при строительстве зданий, при расчёте объёмов земляных работ, при мониторинге деформаций фасадов и конструкций, обследовании мест преступлений, деталей несчастных случаев, фиксации технологических установок и многого другого. На этом краткий, но ёмкий обзор лазерных сканирующих систем Faro Focus 3D S120 и X330 подходит к концу. Далее, в следующих подглавах, будет произведён анализ инструментальных ошибок наземных лазерных сканеров, влияющих на выходящее облако точек, подкреплённый теорией элементарных ошибок.

1.4. Теория элементарных ошибок и её применение в геодезических измерениях

Общая модель теории элементарных ошибок была одновременно определена Hagen и Bessel ещё в 1837 году. Позже эта модель была усовершенствована Pelzer в 1985 г. и расширена Schwieger в 1999 году. Применение данной модели можно проследить на примерах исследования влияния ошибок в некоторых методах геодезических измерений различными приборами: электронными тахеометрами (Augath, 1985), GNSS-аппаратурой (Schwieger, 1999) и наземными лазерными сканерами (Kauker, 2017).

Согласно теории элементарных ошибок (далее – ТЭО), каждое измерение случайной величины отличается от её ожидаемого значения случайным отклонением ε . Известно, что ε состоит из суммы бесчисленных мелких элементарных ошибок и, предполагается, что их абсолютные значения приблизительно равны, как и вероятность положительного и отрицательного знака (Hagen, 1839). Предположение о стандартном нормальном распределении этих ошибок подтверждается бесконечным числом элементарных ошибок с бесконечно малыми абсолютными значениями. Их влияние на наблюдения можно смоделировать с помощью векторов ошибок и матриц влияния. Эти матрицы напоминают эффект ковариационной матрицы наблюдений. С помощью них рассматривают три типа воздействий: некоррелирующие векторы ошибок δ_k , функциональный коррелирующий вектор ошибок ξ и случайные (вероятностные) коррелирующие векторы ошибок γ_h (Schwieger, 1999). Для каждого типа ошибок соответствующие матрицы влияния определяются следующим образом: p матриц D_k для некоррелирующих ошибок, одна матрица F для функциональных коррелирующих ошибок и q матриц G_h для вероятностных коррелирующих ошибок. Следовательно, вектор случайного отклонения ε является суммой всех элементарных ошибок:

$$\varepsilon = \sum_{k=1}^p D_k \cdot \delta_k + F \cdot \xi + \sum_{h=1}^q G_h \cdot \gamma_h.$$

Вышеприведённые матрицы влияния имеют различную структуру в зависимости от влияния элементарных ошибок на наблюдения. Таким образом, матрицы D_k и G_h являются симметричными диагональными матрицами, поскольку каждая элементарная ошибка некоррелирующей и вероятностной коррелирующей группы функционально влияет ровно на одну измеряемую величину. Матрица F заполнена полностью, поскольку одна функциональная ошибка корреляции может повлиять на несколько измеряемых величин (Schwieger, 1999). Определение функциональных взаимосвязей между наблюдениями $l_1 \dots l_n$ и элементарными ошибками δ , ξ и γ позволяет вычислять частные производные, которые заполняют матрицы для учёта влияния ошибок следующим образом:

$$D_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial l_1}{\partial \delta_{1k}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\partial l_2}{\partial \delta_{2k}} & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \frac{\partial l_n}{\partial \delta_{nk}} \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \frac{\partial l_1}{\partial \xi_1} & \frac{\partial l_1}{\partial \xi_2} & \dots & \frac{\partial l_1}{\partial \xi_m} \\ \frac{\partial l_2}{\partial \xi_1} & \frac{\partial l_2}{\partial \xi_2} & \dots & \frac{\partial l_2}{\partial \xi_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial l_n}{\partial \xi_1} & \frac{\partial l_n}{\partial \xi_2} & \dots & \frac{\partial l_n}{\partial \xi_m} \end{bmatrix}, \quad G_h = \begin{bmatrix} \frac{\partial l_1}{\partial \gamma_{1h}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\partial l_2}{\partial \gamma_{2h}} & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \frac{\partial l_n}{\partial \gamma_{nh}} \end{bmatrix}$$

Применение закона распространения дисперсии к уравнению для ε даёт так называемую «синтетическую ковариационную матрицу» Σ_{ll} , которая по определению имеет следующий вид (Schwieger, 2007):

$$\Sigma_{ll} = \sum_{k=1}^p D_k \cdot \Sigma_{\delta\delta,k} \cdot D_k^T + F \cdot \Sigma_{\xi\xi} \cdot F^T + \sum_{h=1}^q G_h \cdot \Sigma_{\gamma\gamma,h} \cdot G_h^T$$

Ковариационные матрицы для некоррелирующих ошибок $\Sigma_{\delta\delta,k}$ и функциональных коррелирующих ошибок $\Sigma_{\xi\xi}$ представляют собой диагональные матрицы, имеющие отклонения элементарной ошибки по главной диагонали. В результате возможных ковариаций ошибок вероятностной корреляции соответствующая матрица $\Sigma_{\gamma\gamma,h}$ может быть полностью заполнена.

Для вышеприведённого уравнения Σ_{ll} каждая ковариационная матрица элементарных ошибок определена и структурирована следующим образом:

$$\Sigma_{\delta\delta,k} = \begin{bmatrix} \sigma_{1k}^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{2k}^2 & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \sigma_{nk}^2 \end{bmatrix}, \quad \Sigma_{\xi\xi} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \sigma_m^2 \end{bmatrix}, \quad \Sigma_{\gamma\gamma,h} = \begin{bmatrix} \sigma_{1h}^2 & \sigma_{12h} & \dots & \sigma_{1nh} \\ \sigma_{12h} & \sigma_{2h}^2 & \dots & \sigma_{2nh} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{1nh} & \dots & \dots & \sigma_{nh}^2 \end{bmatrix}$$

Важнейшая часть ТЭО заключается в определении отклонений для всех групп ошибок и коррелирующих ошибок. Предполагается, что корреляции между элементарными ошибками равны нулю. Однако, отклонения могут быть получены как из технических документов производителей приборов, так и из эмпирических значений или оценок, основанных на максимальном воздействии ошибок. Для последнего случая доказано, что если известно распределение вероятностей, то стандартное отклонение элементарной ошибки может быть оценено с учётом её максимальной ошибки. Следовательно, если переменная подвергается прямоугольному распределению, стандартное отклонение вычисляется путём умножения максимальной ошибки на 0,6. В случае треугольного распределения умножение производится на 0,4, а для нормальных распределений – на 0,3 (Pelzer, 1985). Что касается вероятностной коррелирующей группы, то их значения для корреляций должны быть подтверждены на основании эмпирических значений или техническими документами. Эти значения представляют собой вероятностные соотношения для многомерных нормально-распределённых наблюдений (Kauker, 2017). Если суммировать члены уравнения для Σ_{ll} , то можно проследить, что в соответствии со структурами матриц для D_k и $\sum_{\delta\delta,k}$ однородные члены упомянутого уравнения выглядят следующим образом: для некоррелирующих ошибок – матрица диагональная, для функциональных и вероятностных коррелирующих ошибок – матрицы полностью заполненные.

Таким образом, синтетическая дисперсионно-ковариационная матрица Σ_{ll} также полностью заполнена и отражает существующие дисперсии и ковариации наблюдений, а также определяет их косвенную корреляцию.

1.5. Теория элементарных ошибок в наземном лазерном сканировании

Существует множество параметров, влияющих на качество результирующей модели, созданной с использованием облаков точек трёхмерного лазерного сканирования. В целом, процессе калибровки сканеров следует учитывать четыре важнейших элемента:

- инструментальные несовершенства;
- атмосферные эффекты;
- геометрия сканирования или конфигурация измерения;
- свойства объекта или связанные с поверхностью эффекты.

К недостаткам прибора, то есть лазерного сканера, относятся отклонения в его механической конструкции, приводящие к погрешностям при отклонении полярного луча, и систематические ошибки при электрооптическом измерении расстояний. Примером первой группы является, например, ошибка наклона зеркала, а второй группы – некомпенсированное смещение. Хотя некоторые из этих ошибок похожи на ошибки тахеометра, существуют также

существенные различия (Ch. Holst, H. Neuner, A. Wieser, Th. Wunderlich, H. Kuhlmann, 2016). Следующий тип ошибок связан с измеряемыми свойствами объекта, такими как материал поверхности, её неровность и цвет. Эти свойства играют важную роль при измерении расстояния и сильно зависят от используемой длины волны. По мнению других авторов, (Jutzi, 2007), геометрия сканирования также считается источником ошибок, и она также будет рассмотрена в следующей подглаве данной выпускной квалификационной работы.

Для лучшего понимания того, как сканер преобразует расстояния и углы в координаты (рис. 8), необходимо привести систему уравнений, в которой наблюдаются соотношения между дальностью (R), горизонтальным углом (λ), вертикальным углом (θ) а также декартовыми координатами (X , Y , Z). Вышеупомянутая система уравнений в общем виде выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} X &= R \cdot \sin(\lambda) \cdot \cos(\theta), & R &= \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \\ Y &= R \cdot \sin(\lambda) \cdot \sin(\theta), & \lambda &= \operatorname{atan}\left(\frac{X}{Y}\right), \\ Z &= R \cdot \cos(\theta), & \theta &= \operatorname{acos}\left(\frac{Z}{R}\right). \end{aligned}$$

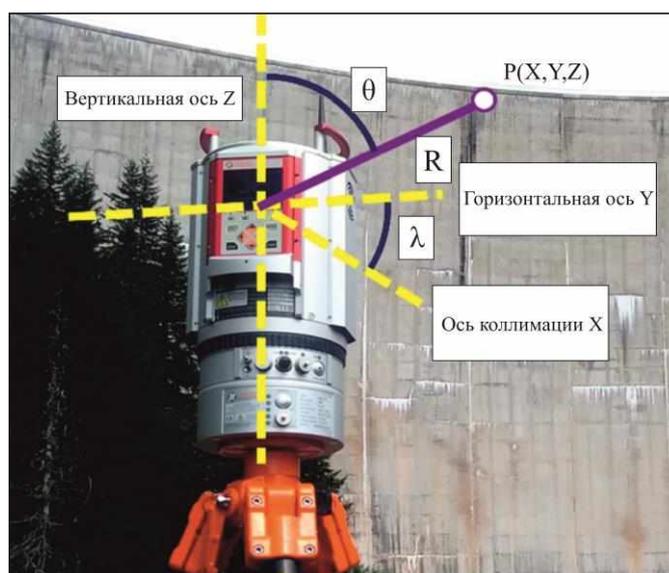


Рисунок 8. Главные оси наземного лазерного сканера на примере Riegl VZ-200 (Riegl VZ-200 User's Manual, 2012).

Далее необходимо привести классификацию инструментальных ошибок лазерных сканеров. Структура изложения материала в данной части диссертации следующая: сначала приводится объяснение того, как учитываются ошибки, а затем даются числовые значения этих ошибок.

Во-первых, стоит рассмотреть некоррелирующие элементарные ошибки наземных лазерных сканеров. К ним относят шумы при измерении углов и дальности, которые непосредственно не указаны производителем. При измерении дальности для наземного лазерного сканера существует понятие точности. Согласно Riegl Laser Measurement Systems

GmbH, точность – это степень, при которой повторные (или воспроизводимые) измерения при неизменных условиях показывают одни и те же результаты. Если рассматривать определение стандартного отклонения, то оно определяет, насколько широко распределена случайная величина относительно среднего значения выборки. Следовательно, заданное значение точности будет использоваться в качестве индикатора шума дальности сканирования при всех диапазонах измерений (табл. 2). Для измерения угла в техническом паспорте сканирующей системы указано только угловая точность, без дополнительной информации. В свою очередь угловая точность может быть интерпретирована как точность измерения (σ), поэтому используется то же определение, что и в таблице 2. Условия представлены в уравнении ниже, а их значения приведены в таблице 2. Следуя условиям, первый член ковариационной матрицы D_k и первый член уравнения $\sum \delta_{\delta,k}$ теперь определяются следующим образом:

$$\Sigma_{\delta\delta,k} = \begin{bmatrix} \sigma_{\lambda}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\theta}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_R^2 \end{bmatrix}, D = I.$$

Таблица 2

Классификация инструментальных ошибок и их величина (Kerekes, 2020).

Тип ошибки	Параметр	Стандартное отклонение
Некоррелирующие ошибки	Шум дальности	$\sigma_R = 5$ мм
	Угловой шум (λ, θ)	$\sigma_{\lambda} = 0,55$ мгон
		$\sigma_{\theta} = 1,66$ мгон
Функциональные коррелирующие ошибки	a_0	$\sigma = 0,34$ мм
	a_1	$\sigma = 40$ мд ¹
	b_4	$\sigma = 3,18$ мгон
	b_6	$\sigma = 1,91$ мгон
	c_0	$\sigma = 1,08$ мгон
	c_1	$\sigma = 1,85$ мгон
	c_4	$\sigma = 0,64$ мгон

¹ Миллионная доля, аналог английской аббревиатуры ppm

Влияющая матрица D является единичной матрицей, поскольку в данный момент не требуется никакого преобразования из координатного пространства в пространство наблюдения. Только после вычисления полных синтетических матриц дисперсий-ковариаций выполняется преобразование, основанное на системе уравнений для XYZ, из пространства наблюдения в координатное пространство.

Schneider в 2009 году применил упрощённую функциональную модель (Lichti 2007 и 2010) на сканере Riegl LMS-420i и смог успешно улучшить результаты выходящего облака точек. Упрощение в основном оправдано на том факте, что не все параметры калибровки значительно влияют на конечный результат. Более того, если они сильно коррелируют, это только снижает достоверность модели. Некоторые из них незначительны, другие не поддаются определению или разделению, и поэтому используемая модель ограничена минимальным числом параметров калибровки, идентифицированных как значимые (Chow, J.C.K.; Lichti, 2013). Параметры калибровки для каждого наблюдения могут быть определены следующим образом (Schneider, 2009):

$$\begin{aligned}\Delta R &= a_0 + a_1 R + a_2 R^2, \\ \Delta \lambda &= b_1 \sec(\theta) + b_2 \tan(\theta) + b_3 \sin(\lambda) + b_4 \cos(\lambda) + \arcsin\left(\frac{b_5}{R}\right) + b_6 \sin(2\lambda) + b_7 \cos(2\lambda) + b_8 \cos(3\lambda), \\ \Delta \theta &= c_0 + c_1 \sin(\theta) + c_2 \cos(\theta) + \arcsin(c_3/R) + c_4 \cos(3\lambda),\end{aligned}$$

В вышеприведённых уравнениях использованы следующие переменные: a_0 – ошибка нулевой точки, a_1 – ошибка масштаба, a_2 – ошибка квадратического масштаба, b_1 – ошибка оси коллимации, b_2 – ошибка горизонтальной оси, b_3 и b_4 – эксцентриситеты первой и второй горизонтальных кругов, b_5 – эксцентриситет оси коллимации относительно вертикальной оси, неортогональность плоскости b_6 и b_7 содержащий датчик горизонтального угла и вертикальную ось, эмпирический параметр b_8 для компенсации оставшихся систематических ошибок, c_0 – ошибка индекса вертикального круга, эксцентриситет c_1 и c_2 первого и второго вертикальных кругов, эксцентриситет c_3 оси коллимации относительно оси цапфы, эмпирический параметр c_4 для моделирования синусоидальной функции ошибок горизонтального направления с периодом 120° (косинусный член). Из всех параметров калибровки только некоторые из них имеют числовые значения. Именно они и были определены как значимые (Schneider, 2009). На основании теории элементарных ошибок отклонения параметров калибровки вводятся в средний член уравнения $\sum \delta \delta_{k}$, а матрица F содержит частные производные для уравнения параметров калибровки (ΔR , $\Delta \lambda$, $\Delta \theta$), выведенных Schneider. Стоит отметить, что значения стандартных отклонений представлены в таблице 2 с учётом принятых величин конкретно для сканера Riegl VZ-2000.

1.6. Влияние инструментальных ошибок на измерение дальностей

Подобно дальномеру тахеометра, измерения расстояний в НЛС зависят от температуры и давления воздуха, в частности на больших расстояниях. Большинство сканеров используют диапазон ближнего инфракрасного света для измерения расстояний. Как известно, скорость света, проходящего через различные слои атмосферы, уменьшается по сравнению со скоростью света в вакууме. Атмосферная поправка увеличивается пропорционально измеренному расстоянию (Rüeger, 1990). В случае измерения расстояний до 200 метров этими поправками можно пренебречь, но ими нельзя пренебрегать для сканеров дальнего действия (например, Riegl VZ-2000), которые измеряют до 2050 м. Согласно спецификациям производителя, сканер Riegl имеет модель коррекции атмосферы, реализованную в приборе, что означает, что расстояния корректируются на основе введенных параметров температуры, давления и относительной влажности (Riegl Laser Measurement Systems GmbH, 2015). Авторы руководства по эксплуатации воздерживаются от объяснения всего процесса получения влияющих коэффициентов для измерения расстояния и непосредственно приводят формулу, реализованную для теории элементарных ошибок:

$$\Delta n \cdot 10^{-6} = -0.93 \cdot \Delta t + 0.27 \cdot \Delta p, \Delta R = -R \cdot \Delta n,$$

где Δn – изменение группового показателя преломления света, Δt – изменение температуры ($^{\circ}\text{C}$), а Δp – изменение давления (ГПа). Также в формуле приводится изменение дальности ΔR . Стоит отметить, что эти параметры рассчитаны для средних атмосферных значений при температуре в 17°C , давлении 1000 ГПа и длины волны $\lambda = 1550$ нм. Интерпретируя уравнение в единицах миллионных долей (мд = ppm) в зависимости от двух атмосферных параметров в стандартных условиях, изменение t на 1°C влияет на расстояние и показатель преломления на 0,93 мд, изменение давления воздуха на 10 ГПа дает поправку -2,7 мд на расстояние.

1.7. Влияние инструментальных ошибок на измерение вертикальных углов

Помимо атмосферных факторов на измерения вертикальных углов электронным оптическим прибором немаловажную роль оказывает рефракция. Этот эффект вызывает «мерцание» изображения, наиболее случающееся, когда температурные градиенты вблизи земли высоки (например, в пустыне или на шоссе в жаркие летние дни). Это в основном влияет на измерения углов в геодезии и также важно, где уделяется большое внимание передаче высот с помощью тригонометрического нивелирования. Тем не менее, этот эффект также наблюдается при измерениях лазерным сканером и был эмпирически изучен (Friedli и др., 2019). Читателю

рекомендуется ознакомиться с этой работой, чтобы понять, как можно определить углы преломления с помощью эталонных значений, полученных из измерений тахеометра.

На рисунке 9 показаны эффекты атмосферной рефракции, из которых дополнительный интерес представляет коррекция угла преломления $\delta/2$. Этот угол задается между ожидаемой траекторией волны и видимой линией визирования, также называемой касательной к траектории преломленной волны. Существуют различные способы выражения коррекции угла преломления, но только один был выбран на основе его простоты и реализован на основании ТЭО. Скорректированный вертикальный угол можно вычислить следующим образом (Joeckel, 2008):

$$\theta = \theta' + \frac{\delta}{2} = \frac{R}{2 \cdot E_R} \cdot k \cdot \rho,$$

где θ – скорректированный вертикальный угол, θ' - измеренный вертикальный угол, R – диапазон измерения, E_R – средний радиус Земли (6381 км), k – коэффициент преломления и константа преобразования между единицами измерения угла (градусами или градусами) и радианами. Коэффициент преломления k обычно необходим для учета искривленного пути света из одной точки в другую. Он определяется как отношение между радиусом Земли и радиусом прямой видимости, которая в основном выпуклая (Kahmen, 2006). Очень часто Гауссово значение $k = +0,13$ используется по умолчанию в качестве параметра для измерений тахеометра, надеясь, что оно справедливо для большинства приложений (Brunner, 1984). Тем не менее, k сильно меняется в течение дня и напрямую зависит от температурного градиента $\partial T/\partial Z$ (К/м). Если интерес представляет коэффициент преломления конкретной точки, локальный коэффициент преломления k_{loc} задается как функция, зависящая от температуры, давления и локального температурного градиента:

$$k_{loc} = 503 \cdot \frac{p}{T^2} \cdot \left(0.0343 + \frac{\partial T}{\partial Z} \right),$$

где p – давление (ГПа), T – температура в (К), и $\partial T/\partial Z$ (К/м) – температурный градиент в определенной точке. Термин k_{loc} используется вместо среднего значения k в предыдущем уравнении для θ определенной точки.

Как отмечено в уравнении для локального коэффициента преломления, градиент температуры сильно определяет величину локального коэффициента преломления, следовательно, будет обсуждаться его изменение от уровня земли до 100 м над землей, что имеет отношение к приведенным далее примерам. Это определяется в метеорологии или климатических исследованиях под названием микроклимат или локальный климат (Geiger, 2003).

Hirt и др. используют термины «более высокая, средняя и нижняя атмосфера» для определения изменения вертикального градиента температуры (ВГТ) в пределах заданного диапазона.

В более высоких слоях атмосферы (слои от 100 м и выше над поверхностью Земли) вертикальный градиент температуры имеет значения около $-0,006$ К/м и практически не зависит от температуры поверхности Земли (Hirt, 2010). Следующий слой – промежуточная атмосфера между 20-30 м и 100 м, слабо зависит от температуры грунта и имеет среднее значение для ВГТ $-0,01$ К/м.

Именно здесь коэффициент преломления имеет среднее значение $+0,15$, и это также слой, для которого значение Гаусса является наиболее подходящим. Опускаясь на уровень ниже, первый слой, считающийся нижними слоями атмосферы, находится там, где температура грунта достигает своего максимального влияния на вертикальный градиент температуры. Несколько исследований показали вариации коэффициента преломления между $-3,5$ и $3,5$. Заслуживают внимания результаты исследований Hennes (2006), в которых локальный коэффициент преломления достигает значений $-2,9$ (при ВГТ $-0,5$ К/м), что приводит к вогнутой кривизне светового пути, что противоречит распространенному мнению о том, что хорда выпуклая почти во всех случаях. Тем не менее, в приведённом примере используется менее резкое значение $-0,2$ К/м, являющиеся средним значением для этого слоя.

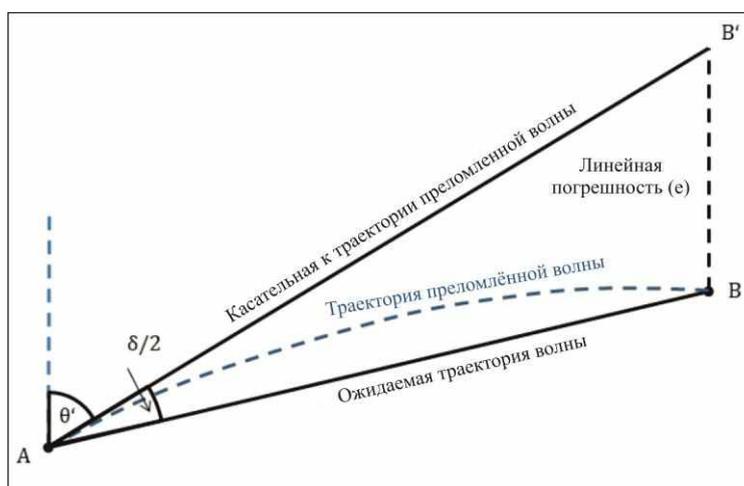


Рисунок 9. Эффект атмосферной рефракции (Kerekes, 2020).

Как и в разделе 1.6 настоящей выпускной квалификационной работы, влияющие коэффициенты определяются после вычисления частных производных уравнений для θ и k_{loc} , следовательно, числовые значения были примерно вычислены при тех же условиях, что и указано ранее ($t = 17$ °С, $p = 1000$ ГПа, ВГТ = $-0,01$ К/м) на расстоянии 1000 м. Таким образом, изменение измеренного вертикального угла (в радианах) определяется по формуле:

$$\Delta\theta \cdot 10^{-6} = -0.08 \cdot \Delta t + 0.01 \cdot \Delta p + 468.17 \cdot \Delta VGT,$$

где $\Delta\theta$ – изменение измеренного вертикального угла, Δt – изменение температуры ($^{\circ}\text{C}$), Δp – изменение давления (ГПа), а ΔVGT (ВГТ) – изменение вертикального градиента температуры. Другими словами, изменение температуры на 10°C приводит к изменению вертикального угла на $-0,8$ рад ($-50,93$ гон), изменение давления воздуха на 10 ГПа приводит к изменению вертикального угла на $0,1$ рад ($+ 6,36$ гон) и наиболее значимый фактор, изменение ВГТ на 1 К/м приводит к изменению угла на $468,17$ рад ($29,8$ мгон). Это не следует путать с систематическим эффектом коррекции угла преломления $\delta/2$. Для понимания, для вышеуказанных условий и на 1000 м $\delta/2$ имеет значение $0,7$ мгон, что приводит к значению линейной погрешности $\epsilon = 11,4$ мм. Цель состоит не в том, чтобы исправить эти систематические ошибки, а в том, чтобы показать, как изменение температуры и давления влияет на ошибку определения местоположения.

В целом, давление воздуха не часто учитывается при измерениях, но оно также имеет градиент. Градиент давления менее изменчив, чем ВГТ, но при этом он во всех слоях атмосферы составляет $\partial p/\partial z = - 0,125$ ГПа. Все вышеупомянутые определения уровней и заданные значения приняты далее в разделе 3.4 для получения необходимых отклонений и ковариаций, необходимых для теории элементарных ошибок.

1.8. Ошибки геометрии сканирования

Как известно, наземный лазерный сканер измеряет расстояние до поверхности объекта с точностью порядка миллиметров. Качество отдельных точек в облаке напрямую влияет на стандартные этапы обработки, такие как регистрация и сегментация облака точек, и оно до сих пор недостаточно изучено. Помимо инструментальных ошибок необходимо также оценить влияние геометрии сканирования на точность отдельных точек или локальный шум измерения. Локальная геометрия сканирования зависит от расстояния и ориентации сканируемой поверхности относительно положения сканера. Геометрия локального сканирования определяется двумя основными параметрами: дальностью, т.е. расстоянием от объекта до сканера, и углом падения, т.е. углом между входящим лазерным лучом и локальной нормалью к поверхности (Bottino и др., 2007).

Влияние геометрии на облако точек будет представлено на наглядном примере сканирования испытательной комнаты. В этом исследовании анализируются две стены и пол комнаты. Пол в этой комнате покрыт светлым линолеумом, а стены выкрашены в белый цвет и имеют очень гладкую поверхность. Этот эксперимент проводится с использованием сканера LS880 HE TLS от FARO. На рисунке ниже представлена настройка измерения стандартного помещения с использованием расположения двух точек обзора (станций).

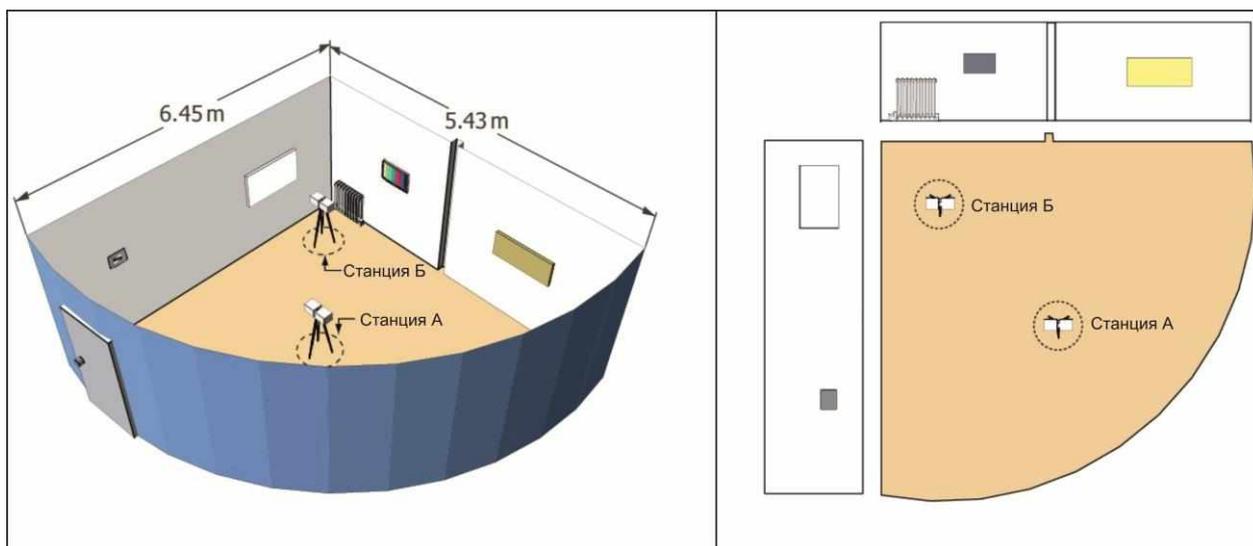


Рисунок 10. 3D-представление комнаты (слева) со станциями, 2D-сетевое представление комнаты с двумя стенами и полом и двумя станциями (справа) (Soudarissanane, 2016).

Как видно на рисунке выше, станция А находится в центре комнаты, а станция Б расположена в углу. На самом же рисунке слева можно наблюдать 3D-представление комнаты с двумя точками обзора, а справа же 2D-представление комнаты с двумя стенами, полом и точками обзора (станциями).

После производства наземного лазерного сканирования с двух точек стояния необходимо определить на каком из сканов наблюдаются сильные шумы. Собственно, на рисунке ниже показаны остаточные значения уровня шума ($\hat{\epsilon}_p$) в направлении лазерного луча для каждой точки в каждом сегменте. Точки, окрашенные в красный цвет, представляют собой остатки выше 1 см.

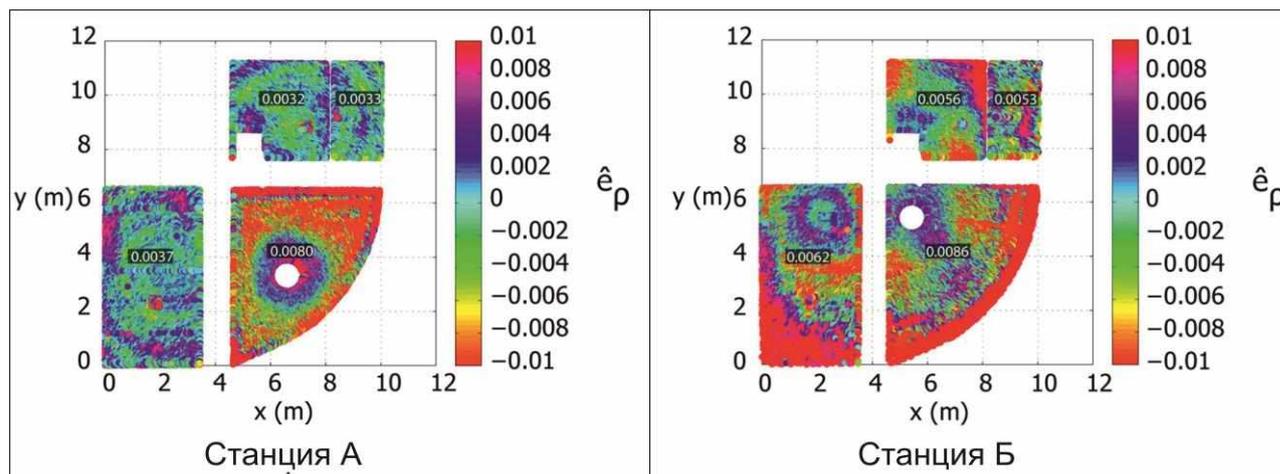


Рисунок 11. Чистый вид стандартной комнаты, окрашенный уровнем шума $\hat{\epsilon}_p$ в направлении лазерного луча. Остатки выше 1 см окрашены в красный цвет. Скан, выполненный со станции А, в центре комнаты, (слева) и скан, выполненный со станции Б, в углу комнаты (справа) (Soudarissanane, 2016).

Точки на полу, расположенные в областях с высоким углом падения, создают высокие остаточные значения. Перемещая сканер с точки обзора в углу на точку обзора в центре, можно избежать больших углов падения в правом нижнем углу пола. В результатах угловой точки зрения (станция Б) в сегменте 2 можно наблюдать круговую картину с более высокими уровнями шума, соответствующую поверхности, которая ориентирована почти перпендикулярно лазерному лучу. Возможное объяснение этого эффекта можно найти в насыщении блока обнаружения из-за перегрузки датчика интенсивности лазерного луча. Все точки, измеренные вскоре после насыщения, подвержены влиянию более высокого остаточного значения.

Влияние геометрии сканирования оценивается количественно и тестируется на эталонной тестовом полигоне и двухточечной выборке облаков в стандартном закрытом помещении. Практическая оценка, представленная в данной части работы, показывает, что геометрия сканирования влияет на качество облака точек при больших углах падения и больших расстояниях от сканера.

Исследование влияния углов падения позволило показать, что для реального облака точек небольшой комнаты вклад углов падения в общий уровень шума уменьшается примерно на 20% на точку, когда сканер перемещается с одной точки обзора, расположенной в середине комнаты, на другую точку обзора с в среднем более благоприятные углы падения. Этот результат достигается в небольшом помещении, где эффект дальности действия не играет важной роли. Соответственно, показано, что можно уменьшить общую погрешность измерений, поместив сканер в другое положение. В данном конкретном случае показано, что позиция в углу небольшой комнаты обеспечивает глобальное облако точек лучшего качества, чем то, которое получено из середины комнаты (Vottino и др., 2007).

Кроме того, основное внимание в данном эксперименте уделяется именно влиянию геометрии сканирования на качество облака точек, а свойства поверхности не учитывалось. Однако тесты, выполненные для этого исследования, в идеале должны быть повторены с использованием эталонных поверхностей с известным поведением коэффициента отражения, таких как мишени со спектральной диффузной отражательной способностью (*spectralon diffuse reflectance*) (Labsphere, 2014). Из предварительных исследований, проведенных Soudarissanane в 2007 году, но не показанных в этом примере, следует, что свойства поверхности также играют определенную роль в качестве получения. Все другие эффекты, такие как свойства поверхности, не представлены в настоящей диссертации. Благодаря возможности изолировать компонент шума из-за геометрии сканирования, также будет легче исследовать другие виды шумов. Правильный учёт влияющих факторов, таких как свойств поверхности, атмосферных условий и, конечно же, калибровка самого прибора позволит выходящему облаку точек стать максимально эффективным и точным.

1.9. Анализ опыта калибровки наземного лазерного сканера по сканам испытательного полигона

В заключительной части первой, теоретической главы выпускной квалификационной работы было решено рассмотреть опыт калибровки наземного лазерного сканера по сканам испытательного полигона с применением степенных полиномов. Вышеупомянутый опыт в рамках научной статьи проводили специалисты ООО «НПП «Фотограмметрия»: кандидат технических наук, доцент СПбГУ А.Е. Войнаровский и преподаватель Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I С.Г. Тихонов в 2019 году. Целью их опыта являлась разработка и реализация универсального способа калибровки наземных лазерных сканирующих систем на примере FARO Focus 3D S120. Методология рассматриваемого исследования заключалась в выявлении несоответствия координат марок сканов по отношению к координатам марок, измеренных электронным тахеометром. В работе приводится подробное описание процесса производства работ: от организации тест-полигона до результатов посткалибровки. Данный вид калибровки называется посткалибровкой, так как калибруются именно вторичные данные, а не первичные («сырые»). В качестве тест-полигона послужило офисное помещение с равномерно нанесёнными марками типа «песочные часы» в количестве 99 штук. После организации полигона специалисты приступили к созданию линейно-угловой сети с помощью электронного тахеометра Leica TCR405 Power, представленный на рисунке ниже.



Рисунок 12. Электронный тахеометр Leica TCR405 Power (Руководство пользователя Leica TC(R)403/405/407/410).

Угловая точность вышеприведённого прибора составляет 5", что в 6 раз выше, чем у калибруемого лазерного сканера FARO Focus 3D S120. После уравнивания результатов измерения был получен каталог точек, который в дальнейшем станет опорным, эталонным каталогом, необходимым для посткалибровки НЛС. Затем приступили непосредственно к самому наземному лазерному сканированию с помощью фазового лазерного сканера FARO Focus 3D S120, внешний вид и технические характеристики которого были представлены в третьей части настоящей главы выпускной квалификационной работы. Обработка материалов сканирования производилась в программном обеспечении ScanIMAGER, разработанной в ООО «НПП «Фотограмметрия:». Данная программа имеет обширный функционал и максимально эффективна для обработки материалов наземного лазерного сканирования. К тому же, в ScanIMAGER встроен специальный алгоритм, который вычисляет центры марок с достаточно высокой точностью.



Рисунок 13. Развертка скана 360° на 180° тест-полигона с нанесёнными марками типа «песочные часы» (Войнаровский А.Е. и Тихонов С.Г., калибровка НЛС по сканам испытательного полигона, 2019).

После вычисления координат всех марок на развертке скана и обработки каталогов координат марок сканирования, специалисты ООО «НПП «Фотограмметрия» приступили к вычислению значений невязок и поправок в утилите ScanCalibr, подбирая оптимальные значения коэффициентов полиномов, для достижения минимальных остаточных невязок. Таким образом, результат посткалибровки позволил уменьшить невязки сканирования в три раза по сравнению с первоначальными.

Глава 2. Способы калибровки наземных лазерных сканеров

Во второй главе выпускной квалификационной работы представлены существующие способы калибровки лазерных сканеров, полученные в результате интеграции и корреляции различных методов и математических моделей, позволяющих улучшить точность выходящего облака точек в результате наземного лазерного сканирования.

В целом, калибровка наземного лазерного сканера преследует две цели: во-первых, калибровка помогает уменьшить влияние систематических ошибок, возникающих при лазерном сканировании. Остальные систематические ошибки необходимо включить в стохастическую (вероятностную) модель облака точек. Эта стохастическая модель необходима, например, при выполнении сложного анализа деформаций. Следовательно, при этом необходимо учитывать все источники ошибок в НЛС, перечисленные в разделе 5 главы 1.

Во-вторых, калибровка лазерных сканеров мотивирована необходимостью доступа пользователей к актуальной информации о качестве, возможно, независимо от информации, предоставленной производителем, или в дополнение к ней. В идеале пользователям предоставляются стратегии для тестирования или проверки, соответственно, и для калибровки своих лазерных сканеров.

2.1 Процесс калибровки наземных лазерных сканеров фирмами изготовителями

Обычно лазерные сканеры калибруются производителями непосредственно после производства. После поставки лазерного сканера заказчику может быть произведена калибровка системы на основе калибровочного полигона. Кроме того, производители предлагают калибровку также в качестве услуги. Процесс заводской калибровки считается важным вопросом для большинства производителей, и поэтому объем раскрываемой информации значительно отличается, в зависимости от конкретного изготовителя.

Так, например, перед калибровкой каждый сканер Leica серии P или S доводится до так называемого нейтрального состояния сборки, подвергая его воздействию диапазон температур в течение нескольких дней в специальных камерах (Walsh, 2016). Кроме того, в течение этого периода каждый сканер работает в пределах рабочего диапазона. Этот шаг предназначен для снятия напряжений, накопленных во время сборки инструмента. Поскольку компоненты сканера изготовлены из различных материалов с различными коэффициентами теплового расширения, температурные колебания приводят к небольшим изменениям абсолютного и относительного положения компонентов, направляющих лазерный луч. Таким образом, угловая калибровка выполняется по всему диапазону условий окружающей среды в соответствии со спецификациями

сканера. Это достигается путем установки сканера в специальной камере с окнами в определенных местах. Leica использует пары коллимированных телескопов, направленных друг на друга и размещенных вне камеры, чтобы обнаружить лазерный луч. Эти телескопы могут наблюдать друг за другом, когда сканер не помещен между ними так, чтобы относительная ориентация осей этих телескопов была известна с высокой точностью. Для калибровки лазерный сканер помещается на коллимированную ось телескопической пары. Зная номинальное относительное положение коллимированных телескопов и лазерного сканера, фактическое угловое положение лазерного луча, направленного в один из телескопов, могут быть получены путем обработки изображений с помощью датчика, размещенного в фокальной плоскости телескопов. Измерение углового положения лазерного луча в двух гранях сканера по крайней мере для четырех направлений позволяет оценить угловые калибровочные параметры в модифицированном пучке регулировки. Параметры включают: смещение по азимуту, смещение по высоте, смещение зеркала и смещение лазера. Эти параметры и их зависимость от температуры хранятся в памяти прибора. Чтобы применить поправки, фактическая температура прибора измеряется во время сканирования в различных местах по всей внутренней части прибора. Действительность параметров ограничена во времени, и калибровку необходимо повторять через определенные производителем промежутки времени.

Коррекция наклона неразрывно связана с угловыми измерениями. Поэтому калибровка соответствующих датчиков также актуальна. Опять же, её необходимо проводить в экологической камере, чтобы смоделировать зависимость от условий окружающей среды. Камера включает в себя наклонный стол и эталонный датчик наклона для этой цели. Кроме того, для этого используется отдельный калибровочный стенд, а сама калибровка происходит при комнатной температуре. На этом стенде лазерный луч сканера направлен на эталонный блок, оснащенный камерой, способной воспринимать лазерный луч. Наклонный стол, на котором установлен сканер, может выполнять различные движения. Связывая выходной сигнал датчика наклона сканера с выходным сигналом опорного датчика, можно получить параметры регулировки наклона, такие как смещение и масштаб (Walsh, 2016).

Калибровка блока измерения расстояния направлена на определение аддитивной постоянной и масштабного коэффициента. Как правило, эти поправки определяются из измерения, охватывающие всю область измеримых расстояний. Однако такие классические процедуры вряд ли можно автоматизировать. Поэтому Leica использует другой калибровочный процесс. Как и в случае угловой калибровки, пары устройств расположены вокруг сканера таким образом, что устройства направлены друг на друга, а сканер расположен посередине. Устройства, используемые для калибровки единицы измерения расстояния, представляют собой оптоволоконные сети. Они позволяют реализовать оптические пути различной длины, требуя при

этом очень небольшое пространство. Во избежание температурного воздействия на оптические волокна их размещают вне камеры окружающей среды. Для калибровки сканером выполняются измерения расстояния в двух гранях от обеих волоконных сетей. На основе этих измерений, выполненных при различных температурах, определяются зависящие от температуры калибровочные параметры и сохраняются в сканере для последующей коррекции исходных измерений.

Некоторые компоненты лазерных сканеров Z+F калибруются индивидуально, другие определяются интегрально с помощью сканирования в пределах калибровочного испытательного поля. Температурное поведение блока измерения расстояния исследуется с помощью специальной камеры. Если внутреннее опорное измерение расстояния не выполняется в сканере, то измеренные расстояния математически корректируются по обнаруженным сдвигам. Отклонения от линейности и шума определяются по калибровочной базовой линии измерения расстояния относительно интерферометра. Ссылка осуществляется с помощью трех мишеней различной отражательной способности. Обнаруженные отклонения от линейности компенсируются математически. Кроме того, значение интенсивности калибруется таким образом, чтобы получить одно и то же значение интенсивности для объекта независимо от его местоположения в области измерений расстояния (Z+F imager 5016 User's Manual, 2010).

Перед угловой калибровкой проверяется и обеспечивается механическая устойчивость сканера. Для угловой калибровки используются эталонные мишени, расположенные с высокой точностью. Расхождения между целевыми центрами, извлеченными из лазерного сканирования, и их опорные координаты используются в калибровочной модели для оценки корректирующих параметров блока отклонения. Расчетные параметры соответствуют всем уровням разрешения. Наконец, перед выдачей сертификата калибровки точность 3D-точки оценивается по отношению к целям эталонного поля.

2.2. Коррекция систематических ошибок в наземных лазерных сканерах

Для того чтобы улучшить качество результатов измерений и приблизиться к результатам, полученным с помощью механических сенсоров при контакте, необходимо оценить погрешности, связанные с процессом измерения и исправить систематические ошибки (Schwenke, 2002). Погрешности, связанные со сканером, могут быть либо внутренними, либо внешними. Внутренние погрешности определяются и корректируются на этапе калибровки сканера (процедура, первоначально выполняемая изготовителем). В течение нескольких лет различные исследователи интересовались определением предела оптических активных датчиков (Linares, 2002). Некоторые показали, что погрешности и ошибки положения центра тяжести

пятна зависит от угла раскрытия лазерного луча. Это означает, что пространственное разрешение не может быть уменьшено без увеличения шума измерения. Дифракционные пределы накладывают ограничение на разрешающую способность вдоль осей X и Y, перпендикулярных лазерному лучу, но интерференционные эффекты ограничивают разрешающую способность датчика положения вдоль оси диапазона (Z) (Dorsh, 1994). Некоторые авторы указывают, что это так называемые «эффекты пятна» ограничивают чувствительность положения примерно до 2-5 мм. Таким образом, уменьшение погрешностей, связанных с сканером, физически ограничено. Внешние погрешности состоят, по существу, из позиционирования и ориентации датчика относительно сканируемой поверхности и, с другой стороны, других ошибок (связанных с перемещениями контрольно-измерительной машины (КИМ), природой материала сканируемой детали, шероховатостью поверхности или обработкой данных компьютером). Погрешности, связанные с системой позиционирования, определяются во время периодической калибровки КИМ. В контексте данного способа калибровки с помощью контактной пробы, лазерным сканером получают сканы, как с использованием КИМ, так и без учета этих погрешностей контрольно-измерительной машины. Ошибки, связанные с обработкой данных, а также с природой или состоянием сканируемого материала, в данной работе не рассматриваются. Данный способ калибровки НЛС сосредоточен на влиянии относительного положения (d) и углов падения (α, β) сенсора (рис. 14) на точность измерений:

- d представляет собой расстояние вдоль средней оси лазерной плоскости, которое отделяет датчик от поверхности детали.;
- α – угол падения (в плоскости сканирования) между осью лазерной плоскости и нормальной осью измеряемой поверхности;
- β – угол ортогонального падения (в плоскости, ортогональной плоскости сканирования) между осью лазерной плоскости и нормальной осью измеряемой поверхности.

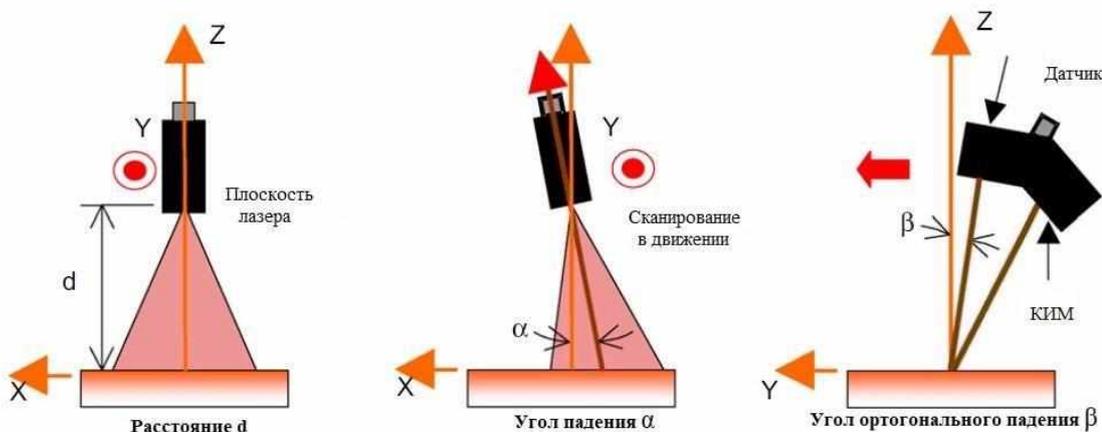


Рисунок 14. Параметры позиционирования и ориентации сканера (A. Isheil, J.-P. Gonnet, D. Joannic, J.-F. Fontaine, 2011).

Вариации этих трёх параметров оказывают большое влияние на погрешности измерений. Учет и исправление этих вызванных погрешностей можно рассматривать двумя способами: либо путем разработки теоретической модели, позволяющей учитывать их на этапе калибровки, либо путем разработки экспериментальной модели коррекции систематических погрешностей после измерения. Фаза калибровки, как правило, реализованная, позволяет определить необходимые глобальные геометрические параметры для расчета лазерной триангуляции. Обычно используемая модель является линейной и основана на модели камеры, которая состоит из одиннадцати неизвестных параметров, которые должны быть идентифицированы (Beraldin, 2005). Эта модель является ограничительной и не учитывает ни сборочные дефекты оптики (которые вызывают искажения на ПЗС-датчике), ни дефекты лазерной плоскости (которые обычно представляют собой кривую). Разработка теоретической модели, позволяющей справиться с этими недостатками, довольно сложна. Тем труднее определить его параметры путем калибровки. Кроме того, модели параметрической коррекции не учитывают автоматически локальные дефекты. Поэтому для решения этой задачи был выбран подход коррекции после измерения по экспериментальной модели.

Для осуществления проектирования модели была использована экспериментальная установка, включающая влияние угла α (Gonnet, 2007). Установка состоит из керамической пластины (калибровочного блока), а также эталонной сферы, также выполненной из керамики. Цель состоит в том, чтобы сравнить расстояние D_i , измеренное лазерным сканером, с опорным расстоянием D_0 , измеренное контактным пробой традиционной контрольно-измерительной машиной КИМ. Измеряется расстояние D_i между верхней гранью керамической пластины и центром сферы отсчета. Это означает, что всякий раз, когда изучается один из трех параметров, керамическая пластина и эталонная сфера одновременно оцифровываются.

Отсканированные облака точек, соответствующие сфере и керамической пластине, численно разделены. Метод наименьших квадратов применяется для определения связанных с ним теоретических объектов, связанных с верхней плоскостью керамической пластины и с эталонной сферой. Точка считается абберрантной, если ее расстояние до соответствующей плоскости больше, чем в два раза стандартного отклонения всех расстояний. Затем вычисляется расстояние, D_i . Отклонение e_i , определяемое разностью между эталонным расстоянием D_0 и измеренным расстоянием D_i . Затем строится корректирующая функция, которая позволяет оценить коррекцию точки, измеренной перпендикулярно измеряемой поверхности, независимо от положения измерения. Эта функция коррекции может быть использована для уменьшения систематических погрешностей измерения механических деталей (Xie J, 2005):

$$F_c(d, \alpha, \beta) = M + [E_d][d] + [E_\alpha][\alpha] + [E_\beta][\beta] + [d]^T [E_{d\alpha}][\alpha] + [d]^T [E_{d\beta}][\beta] + [\alpha]^T [E_{\alpha\beta}][\beta], \quad (2)$$

где:

- M представляет собой среднее значение всех отклонений e ;
- $[d]$, $[\alpha]$ и $[\beta]$ представляют собой три вектора столбцов $[7 \times 1]$ факторов влияния;
- $[E_d]$, $[E_\alpha]$ и $[E_\beta]$ представляют собой три линейных вектора $[1 \times 7]$ влияния каждого фактора по сравнению со средним M ;
- $[E_{d\alpha}]$, $[E_{d\beta}]$ и $[E_{\alpha\beta}]$ представляют собой три матрицы $[7 \times 7]$ эффекта взаимодействий между каждым фактором по сравнению со средним M .

Результаты разности между лазерным сканером и контактной пробой (средние значения и стандартное отклонение) представлены на рис. 15 (а) и (б) без коррекции и с глобальной и локальной коррекциями. Необходимо отметить, что применение локальной модели позволяет уменьшить погрешности без увеличения разброса результатов. Стандартное отклонение имеет тот же порядок величины, что и результаты, полученные без коррекции.

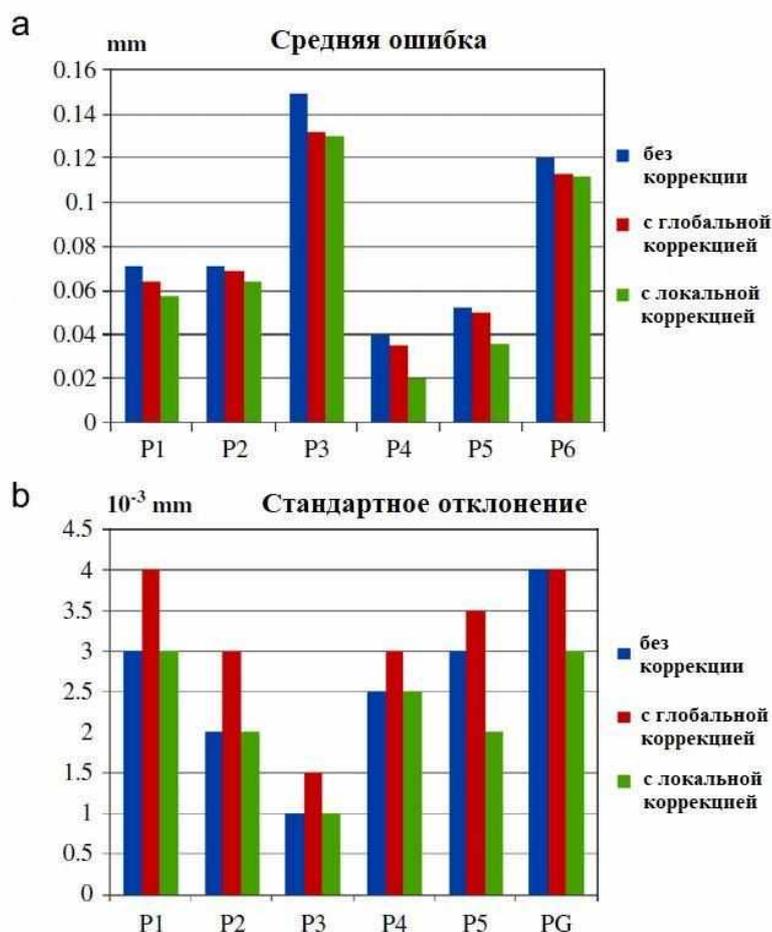


Рисунок 15. а) Сравнение средних значений разности между контактной пробой и сканирующим измерением. (б) Сравнение стандартного отклонения разности между контактной пробой и сканирующим измерением (A. Isheil, J.-P. Gonnet, D. Joannic, J.-F. Fontaine, 2011).

Таким образом, в данном способе калибровки НЛС представлена экспериментальная оценка параметров, влияющих на измерения при лазерном сканировании. Исследовано влияние трёх геометрических параметров позиционирования сканера относительно измеряемой детали: расстояния d , угла падения α и проекционного угла β . На основе экспериментальной оценки влияния этих трех параметров была создана модель глобальной коррекции точки измерения. Эта процедура коррекции была протестирована на усеченной пирамиде и на эталонной сфере. Поправка, примененная к измерению, в некоторой степени всё же зависит от условий измерения. Для каждого измерения результат после коррекции всегда ближе к эталонному значению. Однако стандартное отклонение всё же было больше при применении модели коррекции. Это увеличивает погрешность, очевидно, нежелательную в метрологическом использовании. Это явление связано с изменением интенсивности света вдоль сканируемой линии. В этом смысле для улучшения метода необходимо внести дополнительную поправку в зависимости от положения измеряемой точки в поле зрения. Поправка, полученная после применения локальной модели в зависимости от параметра расстояния d , улучшает результаты. Эта модель может быть расширена до горизонтальных и вертикальных углов.

2.3. Настройка функциональной модели калибровки наземного лазерного сканера

Чтобы смягчить последствия несовершенства сканера, погрешности должны быть параметризованы, а их влияние на координаты, выводимые сканером, должно быть смоделировано детерминистически. Из-за полярного принципа измерения прибора эту модель целесообразнее формулировать в полярных координатах (r), а не декартовых. Одна из таких моделей (Lichti, 2007):

$$\delta r_i^j = a_0 + a_1 r_i^j + a_2 \sin \theta_i^j + a_3 \sin \frac{4\pi r_i^j}{U_1} + a_4 \cos \frac{4\pi r_i^j}{U_1} + a_5 \sin \frac{4\pi r_i^j}{U_2} + a_6 \cos \frac{4\pi r_i^j}{U_2} + a_7 \sin \varphi_i^j + a_8 \cos \varphi_i^j, \quad (1)$$

$$\delta \varphi_i^j = b_1 \sec \theta_i^j + b_2 \tan \theta_i^j + b_3 \sin 2\varphi_i^j + b_4 \cos 2\varphi_i^j + b_5 \varphi_i^j + b_6 \cos 3\theta_i^j + b_7 \sin \theta_i^j, \quad (2)$$

$$\delta \theta_i^j = c_0 + c_1 \theta_i^j + c_2 \sin 2\theta_i^j + c_3 \sin 3\theta_i^j + c_4 \cos 3\varphi_i^j, \quad (3)$$

где $r_i^j := [r_i^j, \varphi_i^j, \theta_i^j]$ i -я точка в пределах j -го сканирования, r_i^j – расстояние, φ_i^j – угол вокруг вторичной оси вращения (то есть горизонтальный угол, если эта ось вертикальна), а θ_i^j – угол вокруг первичной оси вращения (то есть вертикальный угол в приведённом выше случае). Величины a_0, a_1, \dots, c_4 являются параметрами этой модели и их относят к дополнительным параметрам (ДП). Наконец, U_1 и U_2 – это самые короткие длины волн модуляции в случае фазового принципа измерения.

Некоторые из членов в этих уравнениях следуют непосредственно из прямого моделирования физических и геометрических свойств прибора, предполагающего аналогию с тахеометром, другие эмпирически были найдены для представления систематических отклонений, идентифицированных с помощью специальных приборов. В зависимости от используемого сканера некоторые термины могут быть опущены сразу (например, циклические отклонения расстояния).

Уравнения (1) – (3) являются достаточно общими для широкого круга практических случаев и поэтому успешно используются. Цель калибровки сканера состоит в том, чтобы оценить соответствующие значения дополнительных параметров (ДП) таким образом, чтобы систематические отклонения полярных элементов r_i^j , производимые сканером, впоследствии могли быть смягчены (уравнение (4)) (Lichti, 2007):

$$(\mathbf{r}_i^j)^c := \mathbf{r}_i^j - [\delta\hat{r}_i^j, \delta\hat{\varphi}_i^j, \delta\hat{\theta}_i^j]^T,$$

где второй вектор справа является результатом вычисления оценки (1) – (3) r_i^j с оценочными значениями требуемых ДП. В этом контексте очень выгодно, чтобы приведенная выше модель была линейной в ДП, так как наблюдаемые полярные элементы находятся в правой части уравнений (1) – (3) и могут быть введены в качестве фиксированных параметров в регуляризацию без существенного изменения скорректированных значений. Это означает, что данная модель может быть использована поверх модели, реализованной производителем и уже применённой к необработанным измерениям сканера, прежде чем сделать их доступными, как r_i^j . Во-вторых, это также означает, что наблюдаемость ДП (то есть точность, с которой они могут быть оценены) и их разделимость (то есть степень корреляции) не зависят от значения ДП и поэтому могут быть предсказаны до проведения калибровки.

Для того чтобы калибровка была эффективной, скорректированные полярные элементы по состоянию на уравнение (4) должны быть более точными, чем нескорректированные полярные элементы, и смещение, вносимое в корректируемые элементы отклонениями расчетных ДП от их истинных значений, должно быть пренебрежимо малым по сравнению со стандартным отклонением полярных элементов. Это особенно важно в связи с мониторингом деформаций с использованием НЛС и ввиду потенциальной пространственной фильтрации облаков точек, которая уменьшает случайный шум, но может привести к тому, что явные смещения станут доминирующим источником ошибок. Для практических целей используется верхний предел среднеквадратического отклонения оценок ДП и верхний предел корреляции между различными параметрами подходит для оценки целесообразности ДП.

Существует несколько возможностей для проведения калибровки, в частности калибровка компонентов и калибровка системы. Первый состоит из отдельной калибровки компонентов прибора, используя специальное оборудование и процедуры, а затем составляя индивидуальные результаты. Калибровка системы НЛС означает интегральную оценку параметров по данным облака точек. Её потенциальные преимущества включают: (I) что точное знание компонентов и их взаимодействие не требуется, (II) что она не требует специального оборудования или услуг, и (III) что она может осуществляться даже как само-калибровка и, следовательно, на рабочем месте, уступает точным и актуальным параметрам калибровки (Holst и Kuhlmann, 2014).

Калибровка системы НЛС может быть выполнена с использованием сигнализированных точек или геометрических объектов (например, линейность или плоскостность). Точечный подход требует, чтобы отдельные объектные точки (ОТ) идентифицировались в облаках точек. Если установленное точечное поле (многократно) используется для этой цели, ОТ может быть реализована с использованием марок, которые могут быть легко и точно расположены в облаке точек – в идеале с точностью, лучшей, чем плотность точек. Если проводится само-калибровка, то ОТ могут быть специальными марками, но они также могут быть характерными естественными точками (точечными признаками), которые могут быть обнаружены и идентифицированы при нескольких сканированиях; в этом случае ОТ будут квазислучайным образом распределены в результате характеристик сканируемой сцены. Предварительное планирование калибровки в этом случае вряд ли осуществимо. Использование геометрических объектов в отсканированной сцене вместо ОТ – это еще один вариант. Авторы провели обширное численное моделирование для случая калибровки системы на основе точечного поля со специально установленными марками в помещении, чтобы получить требования к конфигурации, помогающие планировать или оценивать, как калибровочное точечное поле, так и процесс калибровки (количество сканирований, расположение сканеров и ориентация). Они обнаружили, что даже в идеальном случае точечного поля с известными координатами объектных точек (ОТ) (например, ранее измеренными с точностью до 1 мм с помощью триангуляции) с известным местоположением сканера (например, установка на стойку) и известными углами ориентации сканера, требуется очень большое количество измерений объектных точек (порядка 37 или выше) для оценки ДП с достаточной точностью и разделяемостью, так что их смещение пренебрежимо мало по сравнению со стандартным отклонением измерений. В качестве примера на рис. 3 показана конфигурация, позволяющая оценить конкретное подмножество из 4 точек доступа (a_0 , b_1 , b_2 , c_0) с однократным сканированием минимального количества ОТ (86 в данном случае, 26 на потолке, 2,5 м над сканером под углом возвышения 80° и 60 на полу под углом возвышения -70°). Если местоположение и ориентация сканера неизвестны, поиск конфигураций, которые дают

достаточно декоррелированные ДП, особенно труден и вряд ли достижим без использования данных от датчика наклона внутри сканера в качестве прямых наблюдений наклона сканера. Численный анализ показывает, что в таких случаях может потребоваться несколько сканирований и гораздо больше 100 операций. С квазислучайным распределением ДП и неизвестным местоположением сканера, как результатом само-калибровки, скорее всего, вообще невозможно оценить разумные подмножества ДП с достаточной точностью и разделяемостью. Кроме того, некоторые параметры, например, масштабный коэффициент расстояния, не могут быть эффективно оценены из внутреннего точечного поля. Таким образом, наряду с анализом необходимо тщательно спланировать и создать специальное точечное поле для калибровки сканера наблюдаемости и делимости параметров, так что калибровка на основе точечного поля может быть использована для проверки временной стабильности сканера по отношению к некоторым инструментальным несовершенствам, в то время как другие должны будут контролироваться и калиброваться на уровне компонентов. Необходимы дальнейшие исследования, чтобы дать конкретные рекомендации для такого мультимодального процесса калибровки. Сложность при настройке этой полной калибровочной модели заключается, в частности, в том, что производители публикуют свои калибровочные функции и процедуры лишь в редких случаях. Для калибровки наземного лазерного сканера необходимо оценить параметры функциональной калибровочной модели в поле калибровочных точек (Ch. Holst, и др., 2016).

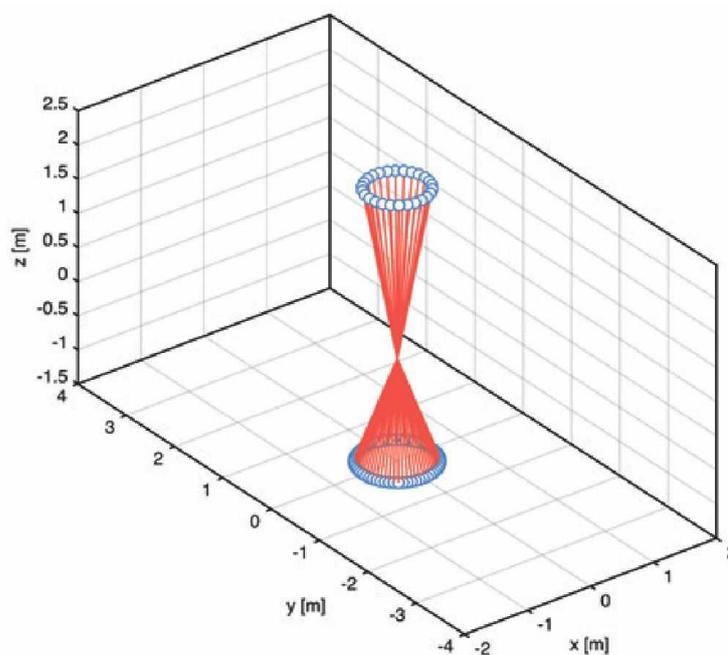


Рисунок 16. Минимальная конфигурация известных объектных точек (ОТ) для оценки a_0 , b_1 , b_2 , c_0 из известной установки сканера с использованием одного сканирования в помещении высотой 4 м (сканер в положении $[0, 0, 0]$, синие круги указывают на ОТ, красные линии указывают на соответствующую линию визирования) (Ch. Holst, H. Neuner, A. Wieser, Th. Wunderlich, H. Kuhlmann, 2016).

Как правило, процедура калибровки должна проводиться в условиях точности не менее чем в 3 – 10 раз лучшей, чем в той, которая необходима в данном способе. Смогут ли данные условия быть соблюдены при калибровке наземных лазерных сканеров – остается под вопросом, даже если задачи, упомянутые в этом способе, будут успешно решены.

Как уже было указано ранее, ошибки наземного лазерного сканера частично отличаются от ошибок тахеометра. Однако современные подходы к калибровке сканеров, описанные в данном способе основаны на моделировании несовершенств, подобных тем, которые есть у тахеометра (Holst и Kuhlmann 2016). Результирующие эффекты этой прямой модели, приводящие к систематическим отклонениям в облаке точек, еще не были параметризованы. Эта параметризация будет равна обратной модели. Для тахеометра эта обратная модель давно установлена, например, описывающая систематическую ошибку горизонтального направления из-за ошибки оси коллимации. Кроме того, данный способ калибровки указывает на то, что разработка оптимального поля калибровочных точек еще не закончена. В идеале калибровочное поле должно позволять оценивать калибровочные параметры с небольшими корреляциями для разделения потенциальных дефектов лазерного сканера. Поэтому необходимо учитывать различные расстояния в точечном поле и большие перепады высот. К тому же, учёт внешнего определения наклона и ориентации лазерных сканеров может оказаться более эффективным, чем кажется на первый взгляд.

2.4. Способ системной калибровки панорамных лазерных сканеров с одной станции

В данном способе представлен подход к системной калибровке панорамного наземного лазерного сканера для обеспечения высокого качества лазерного сканирования. Три основные цели этого способа заключались в следующем: а) доказать, что большинство калибровочных параметров можно оценить с одной сканирующей станции, б) доказать, что предложенная двусторонняя регулировка может дать аналогичные результаты более сложной само-калибровке, основанной на регулировке лазерного луча, и в) представить адаптацию механически интерпретируемых калибровочных параметров к системе калибровки наземных лазерных сканеров (Holst, 2016).

В целом, вышеупомянутые НЛС имеют три основные оси и не достижение их ортогональности приводит к погрешностям измерений. Однако из-за сложной структуры прибора число возможных рассогласований в сканерах данного типа больше, чем в тахеометре (Chow, J, 2013). Для полноты картины ниже в таблице приведены все калибровочные параметры панорамных НЛС и их сравнение с калибровочными параметрами тахеометров.

Полный перечень параметров калибровки панорамных наземных лазерных сканеров и их сравнение с параметрами тахеометра (Muralikrishnan, 2015).

Параметр калибровки	Описание параметра калибровки для НЛС	Аналогичный параметр для тахеометра
X_{1n}	Смещение горизонтального луча	Горизонтальный эксцентриситет оси коллимации *
X_{1z}	Смещение вертикального луча	–
X_2	Смещение горизонтальной оси	Вертикального смещение оси лазера *
X_3	Смещение зеркала	–
X_4	Индекс вертикального смещения	Идентичный
X_{5n}	Горизонтальный наклон луча	Ошибка эксцентриситета вертикального круга *
X_{5z}	Вертикальный наклон луча	Ошибка эксцентриситета горизонтальной оси и вертикального круга
X_6	Наклон зеркала	Ошибка оси коллимации
X_7	Ошибка горизонтальной оси	Идентичный
X_{8x}	Эксцентриситет датчика горизонтального угла	Идентичный
X_{8y}	Эксцентриситет датчика горизонтального угла	Идентичный
X_{9n}	Эксцентриситет датчика вертикального угла	Идентичный
X_{9z}	Эксцентриситет датчика вертикального угла	Идентичный
X_{10}	Смещение дальномера	Идентичный
X_{11a}	Ошибка масштаба второго порядка в датчике горизонтального угла	Идентичный
X_{11b}	Ошибка масштаба второго порядка в датчике горизонтального угла	Идентичный
X_{12a}	Ошибка масштаба второго порядка в датчике вертикального угла	Идентичный
X_{12b}	Ошибка масштаба второго порядка в датчике вертикального угла	Идентичный

*Параметры смоделированы для тахеометра только частично.

Набор параметров, представленный в левой части вышеприведённой таблице 3, нуждается в калибровке. Некоторые параметры оказывают совершенно одинаковое влияние на результаты измерений, следовательно, они не могут быть оценены отдельно и должны быть объединены. В данном способе требуются два случая комбинаций параметров. Параметры вертикального наклона луча (x_{5z}) и наклон горизонтальной оси (x_7) объединяется в одну (x_{5z-7}) благодаря одному и тому же функциональному определению. Пренебрежение данной операцией привело бы к более худшим условиям и неповторимости эксперимента в нормальных уравнениях. Особое внимание стоит уделить на параметры x_{1n} и x_2 : их также объединяют в единый комбинированный параметр x_{1n+2} . Исключение упомянутого параметра привело бы к существенному смещению в окончательных оценках калибровочных параметров. Кроме того, теоретически горизонтальный наклон луча (x_{5n}) влияет как на горизонтальный, так и на вертикальный углы, но на практике дело обстоит иначе. Как было доказано, этот член погрешности частично поглощается параметрами внешней ориентации, точнее углом поворота вокруг вертикальной оси (Lichti, 2016). Следовательно, влияние на горизонтальные углы отсутствует, и этим параметром можно пренебречь в уравнении для горизонтальных углов. Кроме того, используемый лазерный сканер использует четыре ортогональные считывающие головки для расчета как горизонтальных, так и вертикальных углов (Walsh, 2016). Поэтому можно предположить, что все ошибки, связанные с датчиками (табл. 3), усредняются и удаляются. В результате они исключаются из функциональной модели.

Конечные функциональные соотношения для дальности (r), горизонтальных (φ) и вертикальных (θ) угловых поправок измерений описываются следующим образом:

$$\Delta r_j^i = x_2 \sin(\theta_j^i) + x_{10} + v_{r_j^i} \quad (4)$$

$$\Delta \varphi_j^i = \frac{x_{1z}}{r_j^i \tan(\theta_j^i)} + \frac{x_3}{r_j^i \sin(\theta_j^i)} + \frac{x_{5z-7}}{\tan(\theta_j^i)} + \frac{2x_6}{\sin(\theta_j^i)} + \frac{x_{1n}}{r_j^i} + v_{\varphi_j^i} \quad (5)$$

$$\Delta \theta_j^i = \frac{x_{1n+2} \cos(\theta_j^i)}{r_j^i} + x_4 + x_{5n} \cos(\theta_j^i) - \frac{x_{1z} \sin(\theta_j^i)}{r_j^i} - x_{5z} \sin(\theta_j^i) + v_{\theta_j^i} \quad (6)$$

где Δr_j^i , $\Delta \varphi_j^i$, $\Delta \theta_j^i$ – поправки для калибровочной модели, r_j^i , φ_j^i , θ_j^i – измерения в полярных координатах, $x_{1n/2}$ и др. – параметры калибровки, описывающие систематические ошибки, а $v_{r_j^i}$, $v_{\varphi_j^i}$, $v_{\theta_j^i}$ – корректировочные остатки, описывающие случайные ошибки. Как видно из уравнений, в данном способе используется набор из 11 калибровочных параметров для описания всех соответствующих механических рассогласований (Holst и Kuhlmann, 2017).

Для эксперимента в полевых условиях использовался прибор Leica ScanStation P20. Это высокоточный панорамный лазерный сканер с максимальной дальностью действия 120 м и полем зрения 360° на 270°. Номинальная точность угловых измерений составляет 8" а точность дальномерных измерений – не более 2 мм во всем диапазоне измерений (Leica Geosystems AG, 2013). Разрешение сканирования было выбрано наилучшее (0,8 мм при 10 м), а уровень качества при этом был установлен 1 уровне, в результате чего время сканирования составило 54 минуты. Максимальное разрешение было необходимо из-за больших размеров калибровочного поля. Уровень качества 1 был выбран для того, чтобы уменьшить влияние дополнительных вычислений на данные измерений. А именно, уровень качества обозначает, сколько различных точечных измерений усредняется для получения координат одной точки в облаке точек, причем уровень 1 является самым низким уровнем, без какого-либо усреднения.

Измерения проводились в мае 2016 года в большом машинном зале, принадлежащем Боннскому университету. Насколько известно авторам, это самое большое крытое сооружение, когда-либо использовавшееся для этой цели. Размеры зала составляют примерно 71,5 × 25,0 × 8,5 м, и он был использован для того, чтобы повысить чувствительность калибровки. Большинство калибровочных параметров являются угловыми величинами и их влияние на результирующую точечную погрешность возрастает на более высоких диапазонах. Всего по всему измерительному объему было распределено 291 мишень. Целевые местоположения были обусловлены свойствами здания. Как это видно на рисунке 4, стены здания сделаны из листов поликарбоната, поддерживаемых бетонными столбами. Только задняя стена полностью сделана из бетона. Большинство мишеней были размещены на столбах, чтобы обеспечить хорошую устойчивость и хорошие отражающие свойства. Крыша здания опирается на деревянные ребра, что полезно для достижения благоприятных углов падения на более высоких высотах (Holst и Kuhlmann, 2017).



Рисунок 17. Испытательный полигон (Holst и Kuhlmann, 2017).

Большинство марок были бумажными, основанными на официальном шаблоне Leica (Black & White) и отпечатано на плотной бумаге формата A4 (177 г/м²). Они были прикреплены клейкой лентой в заранее определенных местах на здании. Полевое тест-сканирование выполнялось через в течение следующих 24 часа после создания опорной сети, чтобы гарантировать стабильность марок испытательного полигона. Кроме того, 16 марок «Tilt & Turn», размещенные на штативах и магнитных держателях, были встроены для улучшения геометрии сети на других закрытых участках в задней части здания. Полученная конфигурация сети визуализируется на рисунке 18. На нём наблюдается большое горизонтальное рассеивание марок. В своё очередь вертикальное распределение марок было ограничено. Марки на крыше размещались выборочно из-за нехватки времени. Более того, мишени на полу использовались только в непосредственной близости от сканера, чтобы избежать углов падения более 60 градусов. Это привело к диапазону вертикальных углов от 2 до 140 градусов и от 219 до 358 градусов (разрыв под штативом). Полученная вертикальная дисперсия марок обеспечивала достаточную чувствительность для хорошей оценки калибровочных параметров. Кроме того, полученные измерения расстояния варьируются от 2,2 м до 69,1 м. Важно отметить, что не каждая цель была видна с каждой станции (Holst и Kuhlmann, 2017).

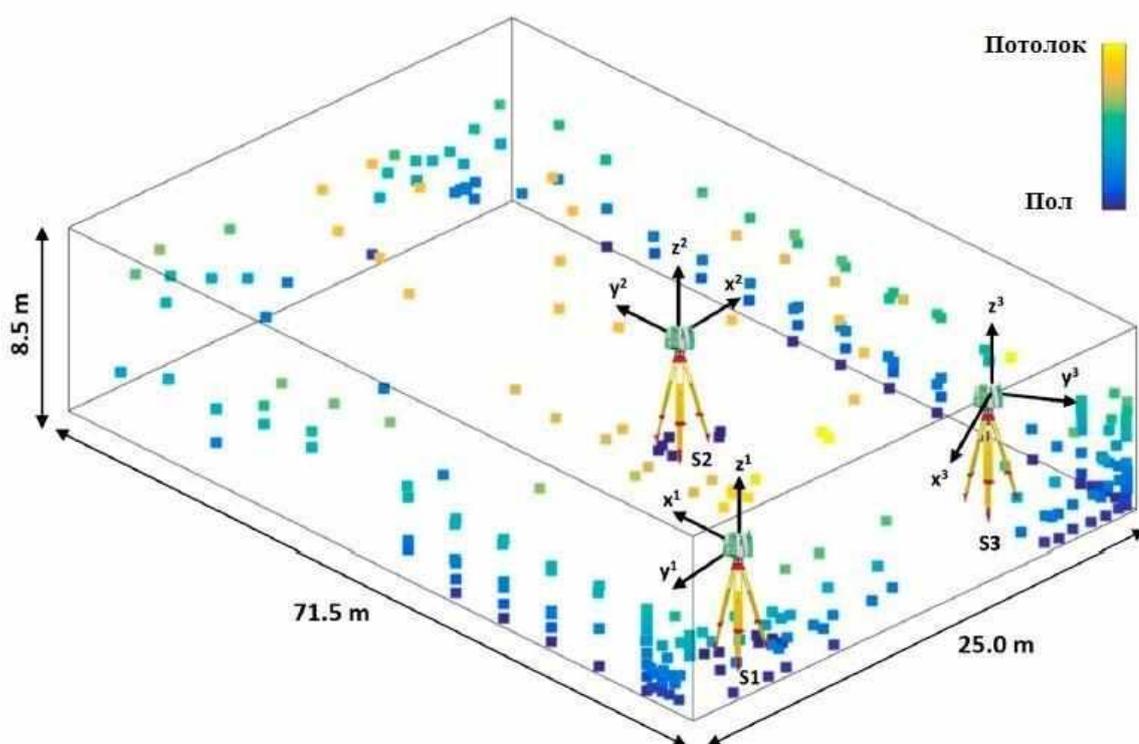


Рисунок 18. Конфигурация сети – расположение станций сканера (S1, S2, S3) с ориентацией локальных систем координат сканера и целевым распределением (Holst и Kuhlmann, 2017).

Обоснованность предложенной гипотезы была проверена в проведенных экспериментах. Новая параметризация, основанная на подлинной геометрии сканера, была адаптирована к подходу само-калибровки. В сканере были обнаружены ошибки, влияющие на результаты измерений, и значения большинства калибровочных параметров были определены с заметной точностью (Lichti, 2017).

Из этого исследования можно сделать некоторые выводы: большинство параметров могут быть оценены с одной сканирующей станции, без необходимости какой-либо справочной информации. Точнее, таким образом были успешно определены девять из 11 калибровочных параметров. Это означает, что время калибровки может быть значительно сокращено, в данном случае примерно с пяти до двух часов. Для того, чтобы оценить все механические параметры калибровки с одной сканирующей станции, необходимы измерения. А именно, это относится к оставшимся двум параметрам, которые не чувствительны к двусторонним измерениям (x_{10} и x_{5z}). Предложенная двусторонняя регулировка может дать результаты, сопоставимые с обычными стратегиями само-калибровки. Несмотря на то, что он не является строгим, данный способ доказал, что является быстрым и простым решением для калибровки сканера с одной станции. Реализация новой параметризации систематических погрешностей в обычном подходе само-калибровки требует некоторых модификаций. Самым интересным из них является введение калибровочного параметра x_{1n+2} , который успешно устранил смещение некоторых параметров. Использование одного и того же набора параметров внешней ориентации для двух последовательных сканирований с одной станции сканера (двусторонние измерения) является обязательным условием калибровки сканера только с одной станции, если положение сканера не контролируется должным образом.

В будущем планируется повторить эксперимент с использованием специального контроля для проверки стабильности оцениваемых параметров, что будет является основной целью использования механических параметров. Для следующей попытки калибровки будут приложены значительные усилия для реализации улучшенной геометрии сети, чтобы успешно обнаруживать и удалять шумы, уменьшать оставшиеся корреляции и повышать чувствительность для оценки оставшихся параметров калибровки с одной станции сканирования. В конце концов, целью следующей калибровки будет расширение модели параметров, включающей в себя ошибки, связанные с датчиками, и комплексной параметризации дальномера.

2.5. Способ само-калибровки наземных лазерных сканеров на основе выбора наилучших геометрических параметров

В заключительном способе представлена стратегия геометрической калибровки, используемая для повышения производительности гибридных и панорамных наземных лазерных сканеров на основе статистического анализа с помощью безразмерного индекса качества.

В целом, геометрическая калибровка, основанная на точечных объектах, как и предыдущий способ предусматривает создание эталонной сети (тест-полигона). Эта сеть будет определять трёхмерную систему координат пространства объектов. Измерения одних и тех же целей наземным лазерным сканером будут привязаны к системе координат лазерного сканера; начало координат и оси определяются самим прибором (начало координат измерений дальности соответствует теоретически пересечение трех осей: оси коллимации, оси цапфы и вертикальной оси). Обе системы координат будут связаны трёхмерным преобразованием с тремя вращениями и тремя перемещениями, которые составляют шесть параметров внешней ориентации (ПВО) для каждой станции сканирования. ПВО играет ключевую роль в согласовании обеих систем координат. Три уравнения (1) разрабатываются для каждой контрольной точки, измеряемой в обеих системах координат (García-San-Miguel и Lerma, 2013):

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} = R_\kappa R_\varphi R_\omega \begin{pmatrix} X_s & X_s \\ Y_i & -Y_s \\ Z_i & Z_s \end{pmatrix} \quad (1)$$

Где x_i, y_i, z_i являются координатами точки объекта « i » в система сканирования; P_κ, R_φ и P_ω являются матрицами для трёх поворотов вокруг осей X, Y и Z соответственно; X_i, Y_i, Z_i – это пространственные координаты точки объекта « i »; X_s, Y_s, Z_s являются предметно-пространственными координатами источника лазерного сканера. Перевод между системами координат будет задан как X_s, Y_s, Z_s .

Модель ошибок, вносимая в позиционирование одной точки (i), зависит от ошибок трёх исходных компонентов наблюдения: дальность (ρ), горизонтальный угол (θ) и угол возвышения (α) относятся к горизонтальной плоскости. Координаты точки « i » в сканирующей системе « j » (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) требуют применения поправок к исходному наблюдению с помощью $\Delta\rho, \Delta\theta$ и $\Delta\alpha$ через уравнения 2-4. Следовательно, ($\Delta\rho, \Delta\theta, \Delta\alpha$) являются априорно неизвестными систематическими ошибками, связанными с тремя необработанными координатами наблюдаемой точки.

Некоторые из этих параметров соответствуют классическим ошибкам, обнаруженным в тахеометрах, таким как смещение дальности (аддитивная коррекция дальномера) – a_0 , ошибка оси коллимации – b_1 , ошибка оси цапфы – b_2 и ошибка индекса вертикального круга – c_0 (Lichti,

2007, 2009). Набор дополнительных параметров включает 21 коэффициент ($a_0... a_8, b_1... b_7, c_0...c_4$), которые обычно делятся на две группы: физические параметры, представляющие собой классические инструментальные погрешности традиционных геодезических приборов, таких как теодолит (смещение осей и неперпендикулярность) и эмпирические параметры, сформулированные на основе нескольких экспериментов и анализа невязок.

$$\rho + \varepsilon_\rho = \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + z_{ij}^2} + \Delta\rho \quad (2)$$

$$\theta + \varepsilon_\theta = \operatorname{atan} \frac{z_{ij}}{y_{ij}} + \Delta\theta \quad (3)$$

$$\alpha + \varepsilon_\alpha = \operatorname{atan} \left(\frac{z_{ij}}{\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2}} \right) + \Delta\alpha \quad (4)$$

Целесообразней всего задать полную математическую модель, учитывающую как модель погрешности, так и преобразование твердого тела: множественное соотношение между одними и теми же точками в обеих системах координат, включая дополнительные параметры в измерениях лазерного сканера. Каждая наблюдаемая точка даст систему из трёх уравнений: первое – для дальности, второе – для горизонтального угла и третье – для вертикального угла (Уравнения 2, 3 и 4 соответственно). Когда лазерный сканер выровнен, матричная система должна быть расширена двумя дополнительными наблюдениями на станцию j (ω_j, φ_j), обеспечиваемыми двухосным компенсатором (уравнения 5-6). Таким образом, группа наблюдений задается $(\rho_i, \theta_i, \alpha_i, \omega_j, \varphi_j)$.

$$\omega_j + \varepsilon_{\omega_j} = 0 \quad (5)$$

$$\varphi_j + \varepsilon_{\varphi_j} = 0 \quad (6)$$

Также немаловажно правильно подобрать набор дополнительных параметров. Сначала выполняются корректировки без дополнительных параметров для удаления грубых ошибок. Можно последовательно устранять все сомнительные точки с помощью статистических тестов, таких как тест слежения за данными (Baarda, 1968) и тест Тау (также называемый тестом Поуп (Pope, 1976). По проведённым опытам (Baselga, 2011) выяснилось, что не существует способа обнаружить одновременно несколько грубых ошибок при корректировке по методу наименьших квадратов (МНК). В приведённом способе единичные грубые ошибки будут удаляться итеративно с помощью правильного выбора весовой матрицы. Каждое уравнение будет взвешиваться в соответствии с точностью наблюдаемого, обеспечиваемой производителями, представленными самим уравнением. Поэтому влияние каждого наблюдаемого в конечной параметризации контролируется этой априорной точностью (или априорная дисперсия). (Soudarissanane и др., 2011) представляет подход, позволяющий изолировать шум, индуцированный геометрией сканирования.

Несколько экспериментов с использованием синтетических данных показали, что неверный набор весов приведет к неверному определению калибровочных параметров. Следует отметить, что распределение веса также влияет на апостериорную точность, полученную для дополнительных параметров и скорректированных ПВО. Следовательно, для осуществления обнаружения грубых ошибок и обеспечения качества достигнутой параметризации необходимо проверить статистическую согласованность как априорной дисперсии, то есть предыдущей точности взвешивания каждого уравнения, так и апостериорной дисперсии, то есть среднего значения остатков, полученных при корректировке, обеспечивающей достигнутой точности наблюдаемых объектов (Hoffman и др., 2001). Сравнение между обеими оценками проводится с помощью критерия Фишера-Снедекора, принимая нулевую гипотезу для уровня значимости 1%, когда две оценки совпадают. Если нулевая гипотеза отвергнута, процесс будет повторяться до тех пор, пока наблюдаемые объекты не будут полностью отфильтрованы и весовые коэффициенты не станут статистически правильными.

Последний шаг для получения набора описательных дополнительных параметров требует выполнения нескольких статистических инструментов, таких как Т-критерий Стьюдента, корреляционная матрица и глобальная корреляция для само-калибровки расслоения (Kraus и др., 1997). Следует выбирать только некоррелированные параметры со статистической значимостью. Будет проведен сравнительный анализ индекса качества для выбора наилучшей настройки само-калибровки при различных моделях параметризации (García-San-Miguel и Lerma, 2013). Анализ следует после четырёх оценок качества: 1) для наблюдаемых точек; 2) для ПВО; 3) для опорной сети (тест-полигона); и 4) суммы трёх предыдущих. Наилучший набор дополнительных параметров – тот, который обеспечивает максимальный показатель качества (т. е. минимальное значение) для группы наблюдаемых точек, ПВО и опорных точек полигона.

Максимизация предлагаемого показателя качества включает в себя два основных принципа, реализованных на основании метода наименьших квадратов: минимизация квадрата сумм остатков и минимизация следов матриц дисперсии-ковариации для корректировки. Первое непосредственно связано с апостериорной точностью, достигнутой для наблюдаемых точек. Поскольку в корректировку включены как угловые, так и линейные величины, все стандартные отклонения преобразуются в безразмерные коэффициенты, чтобы сравнить сумму этих абсолютных величин. Вычисление отношения между апостериорными и априорными дисперсиями достигается безразмерное значение для группы уравнений. Кроме того, это значение не зависит от количества дополнительных калибровочных параметров, участвующих в корректировке. Уравнения (7, 8 и 9) представляют собой первые три оценки количественной конечной точности; четвертая (Q) – это сумма трех.

$$Q_{obs} = \frac{\hat{\sigma}_\rho^2}{\sigma_\rho^2} + \frac{\hat{\sigma}_\theta^2}{\sigma_\theta^2} + \frac{\hat{\sigma}_\alpha^2}{\sigma_\alpha^2} \quad (7)$$

$$Q_{EOP} = \frac{\hat{\sigma}_\omega^2}{\sigma_\omega^2} + \frac{\hat{\sigma}_\varphi^2}{\sigma_\varphi^2} + \frac{\hat{\sigma}_\kappa^2}{\sigma_\kappa^2} + \frac{\hat{\sigma}_{Tx}^2}{\sigma_{Tx}^2} + \frac{\hat{\sigma}_{Ty}^2}{\sigma_{Ty}^2} + \frac{\hat{\sigma}_{Tz}^2}{\sigma_{Tz}^2} \quad (8)$$

$$Q_{XYZ} = \frac{\hat{\sigma}_x^2}{\sigma_x^2} + \frac{\hat{\sigma}_y^2}{\sigma_y^2} + \frac{\hat{\sigma}_z^2}{\sigma_z^2} \quad (9)$$

Оценка наблюдаемых точек (7) будет получена из соотношений между статистическими дисперсиями (априорными весами) расстояния (ρ), горизонтального угла (θ) и вертикального угла (α). Апостериорные значения будут получены из усредненных остатков. Таким образом, учитывая статистическую согласованность обеих дисперсий, Q_{obs} должен быть близок к 3. Поскольку ПВО неизвестны при корректировке, необходимо избавиться от априорных значений, чтобы сделать соотношение и преобразовать величины в безразмерные коэффициенты. Следовательно, стандартные отклонения, определенные при первоначальной регистрации каждого облака точек, используются для вычисления коэффициента. Повышение точности ПВО обычно значительно (по крайней мере, в два раза больше начального), поэтому $Q_{EOP}(ПВО)$ имеет гораздо меньшую величину, чем Q_{obs} . Уравнение (9) необходимо для оценки опорных точек тест-полигона. В этом случае априорная точность хорошо известна на основе локальной геодезической корректировки и будет использована для взвешивания поправок этих координат.

В целом, удаление дополнительных параметров из настройки калибровки приведет к увеличению оценки наблюдаемых точек, но улучшит как ПВО, так и оценки опорных точек тест-полигона. Оптимальная настройка требует некоррелированных и очень значимых дополнительных параметров. Однако контроль значений дополнительных параметров отсутствует по двум причинам: во-первых, нет способа узнать их априорные оценки; во-вторых, каждая корректировка имеет разное количество дополнительных параметров.

В итоге, стратегия автоматической калибровки состоит из трех этапов (García-San-Miguel and Lerma, 2013): во-первых, регистрация и фильтрация входных данных; во-вторых, общая корректировка наблюдений без дополнительных параметров, т. е. обычная целевая корректировка расслоения на основе метода наименьших квадратов за уравнением 1 после линеаризации по ПВО и контрольным точкам; и, в-третьих, корректировка с дополнительными параметрами и перспективное удаление незначимых и коррелированных дополнительных параметров. Параметризация, дающая минимальное значение индекса качества ($Q \rightarrow \min$) считается лучшим калибровочным решением среди всех различных вариантов коррекции.

После определения наилучшего набора ПВО, три необработанных компонента наблюдения: дальность (ρ), горизонтальный угол (θ) и вертикальный угол (α) будут

скорректированы на основании уравнений (2, 3 и 4). Новые калиброванные облака точек (без систематических ошибок) будут получены с каждой станции на основе скорректированных ПВО.

Тест-полигон состоит из 62 точек (круговых черно-белых мишеней – марок) распределённых равномерно по всей комнате (примерно 15 м x 8 м x 3 м), охватывая всё поле зрения сканера, включая потолок (до зенита) и пол (до минимального угла возвышения ниже горизонта плоскость) (рис. 19). Конструкция сети должна быть достаточно прочной, чтобы устранить корреляции между дополнительными параметрами. Измерение марок производилось с помощью тахеометра Leica TS-30 с номинальной точностью 0,5" для угловых измерений и 0,5 мм для расстояния.

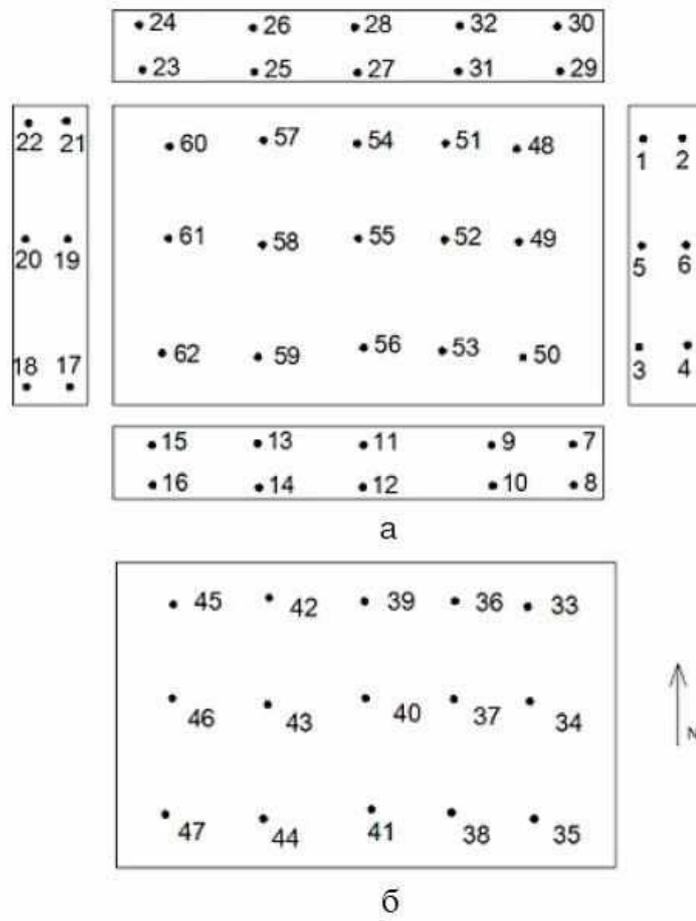


Рисунок 19. Опорная сеть: а) вид пола и стен, проецируемых с каждой стороны; б) вид потолка (García-San-Miguel u Lerma, 2013).

Разработка конкретной стратегии сбора данных – это необходимость максимизации наблюдаемости и восстановления дополнительных параметров. В данном способе предлагается ввести как минимум четыре станции сканирования (рис. 20). Высота каждой станции сканера также должна варьироваться, и слегка наклоненное сканирование повышает точность ошибки оси коллимации по сети, включающей все номинально-уровневые сканирования для наземных лазерных сканеров (Lichti и др., 2011; Chow и др., 2013).

Тест-сканирование преследует две цели: во-первых, обеспечить достаточную избыточность для корректировки; во-вторых, смягчить наличие неявных линейных корреляций между некоторыми параметрами ориентации, которые в противном случае могли бы помешать сходимости корректировки.

Конструкция опорной сети также важна, вводя корреляции в корректировку в случаях слабой геометрии. Размер калибровочной комнаты также имеет значение, играя ключевую роль для определения смещения диапазона (a_0), и на самом деле требуется широкий диапазон наблюдаемых расстояний (Lichti, 2010).

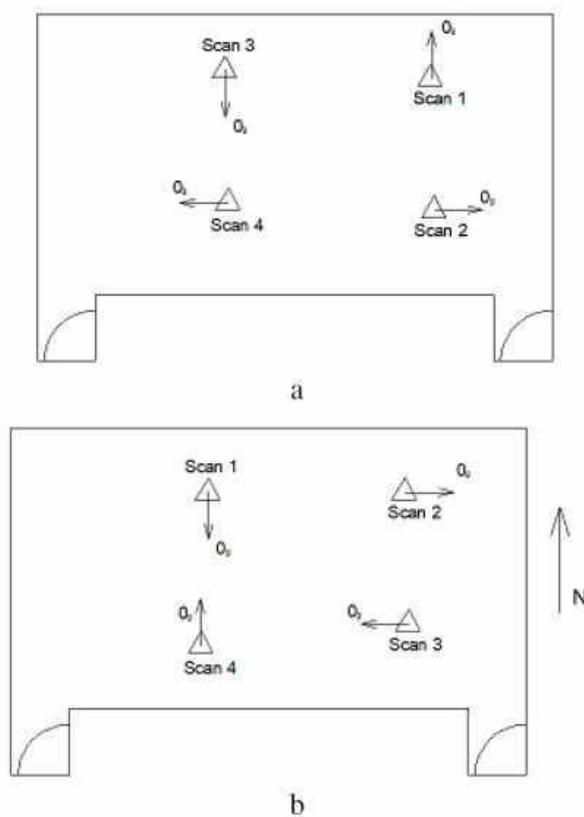


Рисунок 20. Станции лазерного сканера и ориентации нулевых линий внутри калибровочной комнаты: а) Leica HDS3000; б) FARO LS 880 (García-San-Miguel u Lerma, 2013).

Подход геометрической калибровки начинался с регистрации облака точек четырех сканирующих станций, достигая среднеквадратичного значения остатка на контрольных точках равно 0,002 м. Затем были исключены наблюдения с резко отличающимися параметрами и проведено статистическое тестирование для выбора значимых дополнительных параметров с использованием стратегии. Как только резко отличающиеся значения были обнаружены и удалены, выполняется первоначальная корректировка с полным набором параметров. В дальнейшем производится постепенное исключение дополнительных параметров. В частности,

удаляются несущественные параметры, начиная с более низких значимых вероятностей, от 70%, до 99,9%.

Геометрическая само-калибровка может быть предпринята для обеспечения безошибочных систематических измерений. Это требует глубоких математических и статистических знаний и баланса между попытками минимизировать корреляцию между параметрами и максимизировать надежность на основе статистических оценок качества. Для достижения наилучшей параметризации необходима комплексная стратегия само-калибровки.

В данном способе представлены результаты калибровки двух лазерных сканеров, одного импульсного Leica HDS 3000 и фазового FARO LS 880. Улучшение точности контрольных точек первых составило в среднем почти 60% (59,3%), в то время как у второго устройства погрешности усреднились лишь до 27%. Более высокие коэффициенты улучшения были достигнуты как по среднеквадратичным ошибкам регистрации, так и по наблюдаемым с соответствующим набором дополнительных параметров. Безразмерные представленные оценки показателей качества для определения наилучшего набора дополнительных параметров настоятельно рекомендуются для успешной калибровки наземных лазерных сканеров: следует учитывать не только улучшение наблюдаемых параметров, но и улучшение параметров внешней ориентации и наземных контрольных точек. Не следует пренебрегать геометрической калибровкой наземных лазерных сканеров для улучшения выходных наборов данных, упрощая последующую обработку данных, такую как фильтрация и сглаживание. Стабильность дополнительных параметров во времени и при различных сценариях, внутренние и наружные, короткие и длинные дистанции будут дополнительно оценены в будущем. Тем не менее, большие, чем обычно, косвенные ошибки регистрации являются простыми доказательствами, которые должны встревожить пользователей об ухудшении производительности системы лазерного сканирования. Именно поэтому не следует недооценивать стратегию геометрической само-калибровки.

Таким образом, во второй главе диссертации были подробно рассмотрены наиболее распространённые и разнообразные способы калибровки лазерных сканеров. Сначала в настоящей главе были проанализированы способы калибровки сканеров фирмами изготовителями, далее был рассмотрен способ калибровки с применением модели коррекции систематических ошибок в наземном лазерном сканере, за ним был представлен метод на основе настройки функциональной модели калибровки наземного лазерного сканера, затем была обобщена информация о способе системной калибровки панорамных лазерных сканеров с одной станции и в завершении был рассмотрен способ само-калибровки наземных лазерных сканеров на основе выбора наилучших геометрических параметров. Хочется отметить, что каждый из способов калибровки сопровождался собственными математическими моделями на основании теорий, матриц и систем уравнений, подкреплённых наглядными иллюстрациями.

Глава 3. Калибровка наземных лазерных сканеров FARO Focus 3D по сканам испытательного полигона

В третьей главе выпускной квалификационной работы описывается реализация технологии калибровки наземного лазерного сканера по сканам испытательного полигона. Сам процесс включал в себя следующие этапы: обустройство испытательного полигона для калибровки НЛС; создание линейно-угловой сети и её последующее уравнивание в инженерном ПО Mathcad 15; выполнение наземного лазерного сканирования двумя сканерами FARO Focus 3D; обработка результатов сканирования в ПО ScanIMAGER 3.7 Professional; выявление первичных ошибок несоответствия координат марок полигона и марок, измеренных по сканам; посткалибровка сканов; оценка качества посткалибровки сканов различного разрешения между двумя сканерами и «внутри» конкретного прибора; апробация результирующих поправок на сканах, полученных на тест-полигоне №2; подведение итогов.

3.1. Организация испытательного полигона для калибровки лазерных сканеров

Организация калибровочного полигона состоялась на кафедре картографии и геоинформатики СПбГУ по адресу г. Санкт-Петербург, 10-ая линия В.О., д. 33-35, ауд. 13. Марки типа «песочные часы» были созданы в графическом редакторе CorelDRAW 2020, а затем распечатаны на самоклеящейся бумаге в количестве 230 штук.

Лучше всего создавать испытательный полигон для калибровки НЛС (и не только) в помещениях, в которых в дальнейшем не планируется ликвидировать наклеенные марки. Таким образом, имея под рукой полигон, можно в любой момент времени произвести испытания того или иного устройства (НЛС, цифровой камеры, электронного тахеометра) и по необходимости откалибровать прибор, нуждающийся в данной процедуре.



Рисунок 21. Марка типа «песочные часы».

Основные марки (220 штук) имеют размер 5x5 см, а дополнительные (дальние, 6 штук) марки – 10x10 см. Все марки были равномерно распределены по всему полигону в поле зрения наземного лазерного сканера. В местах, где нельзя наклеить марки, в дверных проёмах, были расставлены стойки, по одной на каждый проём, на которых также были наклеены марки, по 5 штук на каждую стойку.

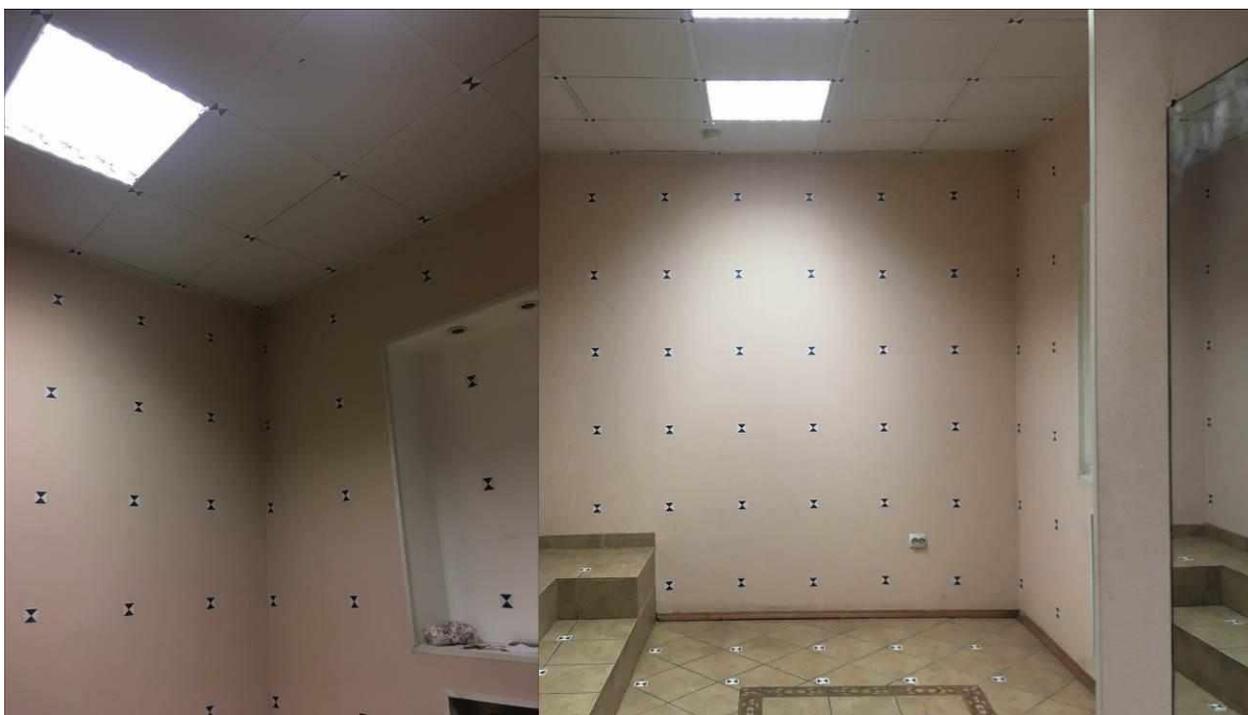


Рисунок 22. Испытательный полигон для калибровки НЛС с нанесёнными марками типа «песочные часы».

В целом, марки были расклеены таким образом, чтобы они попадали в поле зрения лазерного сканера. При этом точка стояния НЛС была выбрана заранее – центр пола комнаты, и поэтому процесс наклеивания марок прямо под сканирующей системой не имеет практической значимости, так как данная область будет образовывать так называемый «окклюзионной круг», пример которого был приведён в первой главе выпускной квалификационной работы на рисунке 2, и марки на этой области никаким образом не смогут попасть на конечный скан.

3.2. Создание линейно-угловой сети с помощью электронного тахеометра

Марки, наклеенные на стенах, стойках, потолке и полу наблюдались с помощью электронного тахеометра Sokkia SET530R3 с четырёх основных станций и трёх дополнительных на протяжении пяти дней. Каждая марка была измерена как минимум с двух станций, а большинство марок были измерены с четырёх станций при двух кругах электронного тахеометра. Измерялись вертикальные и горизонтальные углы, а также расстояния до центра каждой марки.

Перед началом измерений, после горизонтирования электронного тахеометра, прибор подвергался поверке и дальнейшей юстировке.



Рисунок 23. Электронный тахеометр Sokkia SET530R3.

Таким образом, перед созданием линейно-угловой сети, были выполнены следующие операции: поверка и юстировка места нуля и зенит прибора, согласно инструкции по использованию электронного тахеометра. В итоге, значения коллимационной ошибки и места нуля находились в пределах допустимого, и измерения, полученные данным электронным тахеометром можно считать точными.

Также немаловажными являются технические характеристики тахеометра, с помощью которого создаётся линейно-угловая сеть на полигоне, в частности точность измерения расстояний без отражателя (при расстоянии до 100 метров) и угловая точность. Данные технические характеристики выделены красным на рисунке ниже. В целом, приведённый электронный тахеометр имеет хорошую угловую точность, которая составляет 5", что в 6 раз выше, чем у испытуемых наземных лазерных сканеров FARO Focus 3D (S120 и X330).

В целом, можно было использовать и более высокоточный прибор с угловой точностью 1", но даже для таких целей, как создание испытательного полигона – это будет избыточная точность, ведь куда больше на конечный результат съёмки влияют внешние факторы, такие как условия окружающей среды и наличие опыта высокоточных измерений у геодезиста.

Увеличение зрительной трубы, \times :	30
Угол поля зрения, $^{\circ}$:	1,50
Минимальное расстояние фокусировки, м:	1,3
Диапазон измерения расстояний, м:	
На отражающую марку 5×5 см	1,5 - 800
На мини-призму	1,5 - 3000
На одну стандартную призму	1,5 - 6000
В безотражательном режиме	0,3 - 350
Точность измерения расстояний, мм:	
На отражатель	$\pm(2+2 \times D10^{-6})$
Без отражателя (при расстоянии до 100 м)	$\pm(3+2 \times D10^{-6})$
Длина волны, нм	610 - 695
Тип компенсатора:	Двухосевой
Диапазон компенсации, $'$:	$\pm 3,0$
Минимальный отображаемый отсчет, $"$:	1,0
СКО измерения угла одним приемом, $"$:	5,0

Рисунок 24. Технические характеристики электронного тахеометра Sokkia SET530R3 (Руководство по эксплуатации тахеометров Sokkia SET 230R/330R/530R/530RS/630R).

Следующим шагом, после измерения электронным тахеометром всех марок, является уравнивание полученных результатов. Данная процедура выполнялась в математическом программном обеспечении для инженерных расчётов Mathcad 15 с помощью специально написанного для этого алгоритма. В итоге, каталог опорных точек тахеометра после уравнивания включает в себя координаты 231 точки испытательного полигона. Стоит отметить, что самые крупные значения невязок можно наблюдать на самых дальних, крупных марках. По всей видимости это в некоторой мере ухудшит результаты посткалибровки, но только на сканах разрешения 1/1. На остальных сканах более низкого разрешения центры дальних марок не будут вычисляться в программном обеспечении ScanIMAGER и, следовательно, будут частично пренебрегаться в дальнейшем исследовании.

3.3. Наземное лазерное сканирование на полигоне

Как уже было заявлено ранее, наземное лазерное сканирование выполнялось двумя сканерами – FARO Focus 3D S120 и FARO Focus 3D X330, внешний вид которых в рабочем состоянии приведён на рисунке ниже. Всего было выполнено по 9 сканов каждым прибором при различных разрешениях и полностью отключенных датчиках барометра, GPS и компаса. Выбранные параметры сканирования на обоих сканерах приведены в таблицы 4. Сравнение технических характеристик лазерных сканеров были представлены в третьей части первой главы настоящей выпускной квалификационной работы.



Рисунок 25. Лазерные сканеры FARO Focus 3D S120 (слева) и X330 (справа).

После выполнения лазерного сканирования необходимо скачать данные на ПК или ноутбук используя специальное ПО от компании FARO под названием «SCENE». Затем следует конвертировать получившиеся сканы в формат *spf* уже в другом программном обеспечении – ScanIMAGER. В итоге после использования встроенного модуля конвертирования ScanIMAGER Converter можно приступить к обработке материалов наземного лазерного сканирования, а именно к вычислению центров марок на сканах с помощью специального встроенного алгоритма.

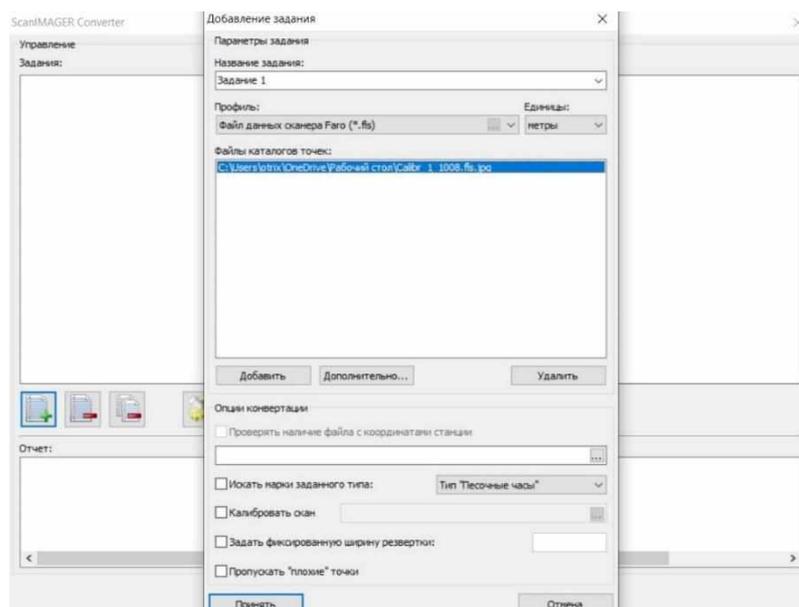


Рисунок 26. Окно ScanIMAGER Converter в момент конвертации скана из формата *fls* в формат *spf*.

Параметры сканирования Faro Focus 3D S120 и X330 ((FARO Laser Scanner Focus3D User's Manual, 2011 и 2015).

Разрешение сканирования	Качество сканирования	Активные датчики	Тыс. точек/сек	Млн. точек (полная область сканирования)	Чистое время сканирования
1/1	2x	Нивелир	976	710,7	0:28:38
1/2		–	488	177,7	0:07:09
1/2		Нивелир		177,7	0:07:09
1/4		–		44,4	0:01:47
1/4		Нивелир		44,4	0:01:47
1/5		–		28,4	0:01:09
1/5		Нивелир		28,4	0:01:09
1/8		–		11,1	0:00:27
1/8		Нивелир		11,1	0:00:27

3.4. Обработка результатов лазерного сканирования в ScanIMAGER 3.7 Professional

Обработка полученных сканов производилось в специальном программном обеспечении, созданным ООО «НПП «Фотограмметрия» – ScanIMAGER Professional 3.7. Данный программный продукт эффективен в областях, где используются результаты лазерного сканирования (архитектурные обмеры, инженерная геодезия, машиностроение и т. д.). Сам же программный пакет ScanIMAGER позволяет: загружать сканы, содержащие до 4 000 000 000 точек в одном файле (количество одновременно подгружаемых файлов ограничивается возможностями компьютера) сводить (регистрировать) сканы в единой системе координат; раскрашивать облако точек по набору цифровых фотоснимков; строить ортофотопланы, спроецированные на заданные плоскости; снимать размеры по скану; получать разрезы объекта; получать сечения деталей; вырезать фрагменты; вычислять объемы; экспортировать данные в формат DXF и другое.



Рисунок 27. Программное обеспечение ScanIMAGER 3.7 Professional.

Все сканы заранее были конвертированы в формат `srf` – внутренний формат файлов, содержащих облака точек, открывающийся в вышеуказанном ПО. Таким образом, после загрузки файла с облаком точек нам сразу же доступен непосредственно сам скан. Дальнейшая обработка будет осуществляться на развёртке, а не на самом скане.



Рисунок 28. Развёртка скана 360° на 180° при разрешении $1/2$, выполненный лазерным сканером *Faro Focus 3D X330*.

После открытия развёртки, с помощью специального алгоритма измерения, запрограммированного в ScanIMAGER, были вычислены центры всех марок в общей сложности у 18 сканов с субпиксельной точностью.

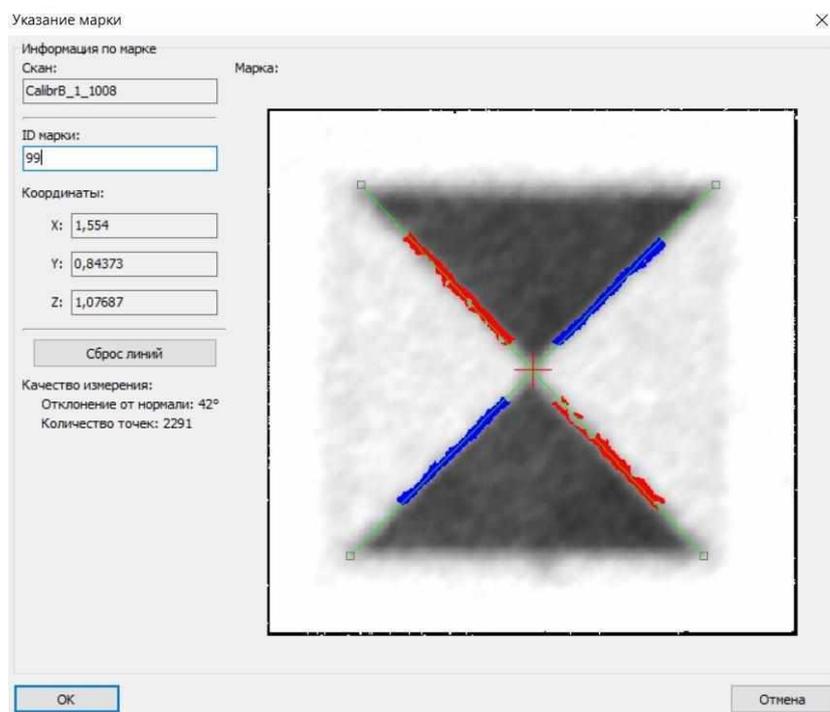


Рисунок 29. Процесс измерения марки типа «песочные часы».

Далее необходимо привести все сканы к скану наивысшего разрешения (в нашем случае это скан с разрешением 1/1) и произвести пересчёт координат центров марок в угловые градусы, минуты и секунды для выявления первичных невязок.

3.5. Выявление первичных невязок на сканах

После вычисления координат центра марок на всех сканах необходимо произвести выявление ошибок несоответствия координат марок полигона и марок, измеренных по сканам, но для начала был произведён поворот систем координат в специализированном ПО. В программе PointsTransform 2.1.1 в графе файла опорных точек выбирается самый лучший по разрешению скан, так как он считается наиболее точным из-за большей плотности покрытия точек, и в нашем случае это скан с разрешением 1/1, выполненный сканером X330. Во второй графе – в графе файла трансформированных точек, выбирается файл, который будет проходить проверку на точность вычисленных центров марок.

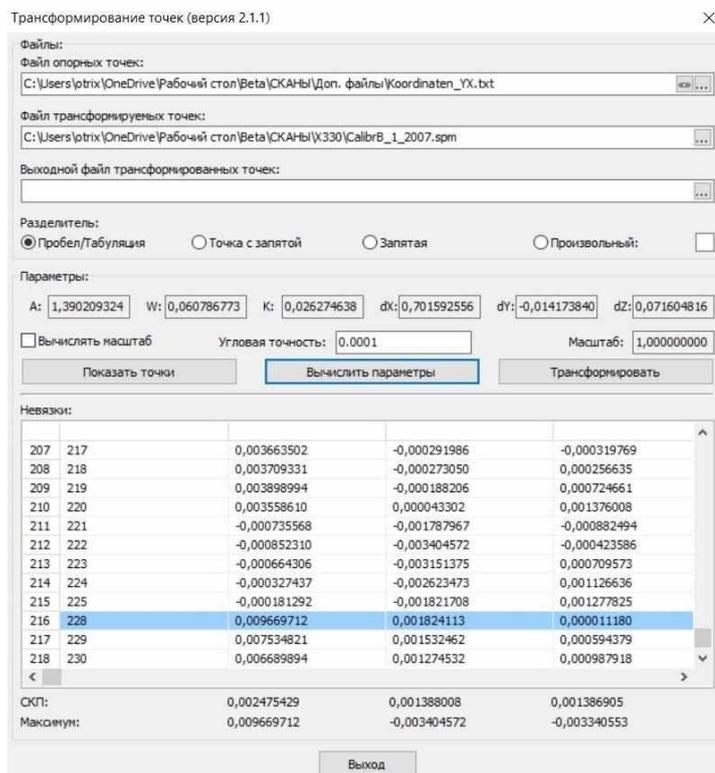


Рисунок 30. Процесс вычисления невязок между каталогом опорных точек тахеометра и скана в утилите PointsTransform 2.1.1.

В итоге, после сравнения всех сканов, было выяснено, что максимальные несоответствия координат марок были на потолке и полу, то есть в зените и в надире по отношению к трёхмерной сканирующей системе соответственно. Также, при разрешении сканирования 1/1 были замечены небольшие невязки на дальних, крупных марках. Кроме того, эти же самые дальние марки не распознавались в ПО ScanIMAGER при вычислении центров марок с помощью специального встроенного алгоритма и будут исключены в дальнейшей посткалибровке на сканах среднего и низкого разрешения.

Расстояние	Горизонтальный угол	Вертикальный угол
$\max(\text{Rez}^{(2)}) = 0.00986$	$\max(\text{Rez}^{(3)}) = 0.0519$	$\max(\text{Rez}^{(4)}) = 0.04217$
$\min(\text{Rez}^{(2)}) = -0.00045$	$\min(\text{Rez}^{(3)}) = -0.0518$	$\min(\text{Rez}^{(4)}) = -0.0345$
$\text{stdev}(\text{Rez}^{(2)}) = 0.00147$	$\text{stdev}(\text{Rez}^{(3)}) = 0.01657$	$\text{stdev}(\text{Rez}^{(4)}) \cdot 10^4 = 103.05692$
$\text{mean}(\text{Rez}^{(2)}) = 0.003$	$\text{mean}(\text{Rez}^{(3)}) = 0.00674$	$\text{mean}(\text{Rez}^{(4)}) = -0.00034$
	$\text{filter}(\text{Rez}^{(3)}, \min(\text{Rez}^{(3)})) = 143$	
	$\text{filter}(\text{Rez}^{(3)}, \max(\text{Rez}^{(3)})) = 185$	

Рисунок 31. Выявление ошибок несоответствия координат марок полигона и марок, измеренных по сканам Faro Focus 3D X120 в Mathcad 15.0.

Таким образом, максимальные невязки в горизонтальных и вертикальных углах составили около 5 и 4 минут соответственно, а невязки расстояний находятся в пределах допустимой нормы.

После вычисления первичных невязок можно приступить к разделению общих каталогов точек сканирования марок испытательного полигона на прямые и обратные ходы. В результате данной процедуры мы получили 36 каталогов: 9 каталогов точек прямого хода сканирования и 9 каталогов точек обратного хода сканирования для каждого из двух сканеров FARO Focus 3D (S120/X330). Помимо каталогов точек сканирования также были приведены в надлежащий вид каталоги опорных точек тахеометра отдельно для каждого скана (всего в общей сложности 18 сканов).



Рисунок 32. Визуальный пример разделения каталога точек сканирования на прямой и обратные ходы.

На рисунке выше приведён пример того, как визуально происходило деление каталога сканирования на ходы для исключения ошибок перекрытия сканов: все координаты марок скана, которые попали в диапазон от 0° до 180° относятся к прямому ходу, а все остальные координаты марок в диапазоне сканирования от 180° до 360° – к обратному.

В дальнейшем планируется вычислить поправки к выявленным невязкам по сканам и произвести посткалибровку наземных трёхмерных сканирующих систем. Вычисления невязок и соответствующим им поправок будет происходить в утилите ScanCalibr, а дальнейшая их коррекция в свою очередь произойдёт в утилите PTXCorrector.

3.6. Посткалибровка сканов в утилите ScanCalibr 1.0.1

Посткалибровка будет происходить в утилите ScanCalibr версии 1.0.1, в которую был запрограммирован алгоритм на основании которого производится вычисление невязок, поправок и остаточных невязок каждой точки из каталога сканирования. В целом, в функционал утилиты входит добавление сразу нескольких станций сканирования для их последующего уравнивания между собой с целью понижения влияния грубых ошибок. В нашем же случае станция сканирования всего одна и набор файлов, необходимых для добавления в утилиту выглядит следующим образом: каталог сканирования (прямой ход), каталог сканирования (обратный ход) и каталог опорных точек тахеометра. Стоит отметить, что разделение общего каталога сканирования на прямой и обратные ходы необходимо для исключения зоны перекрытия скана.

Сам алгоритм построен на вычислении коэффициентов степенных полиномов, а значения невязок и поправок в свою очередь зависят напрямую от конкретной степени полинома, подбираемого вручную для каждого из трёх составляющих каталог сканирования – для горизонтального и вертикального угла, а также для расстояния.

В итоге, эмпирический анализ позволил подобрать следующий набор степеней полиномов: $6 - 7 - 3$ (6 – для горизонтального угла, 7 – для вертикального и 3 для расстояния). При вышеприведённых параметрах значения поправок максимально компенсируют невязки.

Пример первичной посткалибровки приведён на рисунке ниже. Исходя из результатов можно сделать вывод, что значения средне квадратичной погрешности горизонтального угла улучшились более чем в 6 раз, вертикального угла в 3,5 раза, а СКП расстояния в 1,5 раза. Таким образом, можно сделать вывод, что посткалибровка показала хорошие результаты, и, в целом, алгоритм основанный на вычислении коэффициентов полиномов достаточно эффективен.

Добавление каталогов сканирования и опорных точек тахеометра можно охарактеризовать как «ввод станции». После добавления каталогов точек и вычисления параметров для визуальной оценки ведённых данных можно приступить к подбору параметров полиномов. Стоит отметить, что итоговые угловые значения можно вывести в радианах (умноженных на 1000), в минутах и секундах, а значения расстояний в метрах, сантиметрах и миллиметрах. В нашем примере угловые значения представлены в минутах, а расстояния даны в метрах.

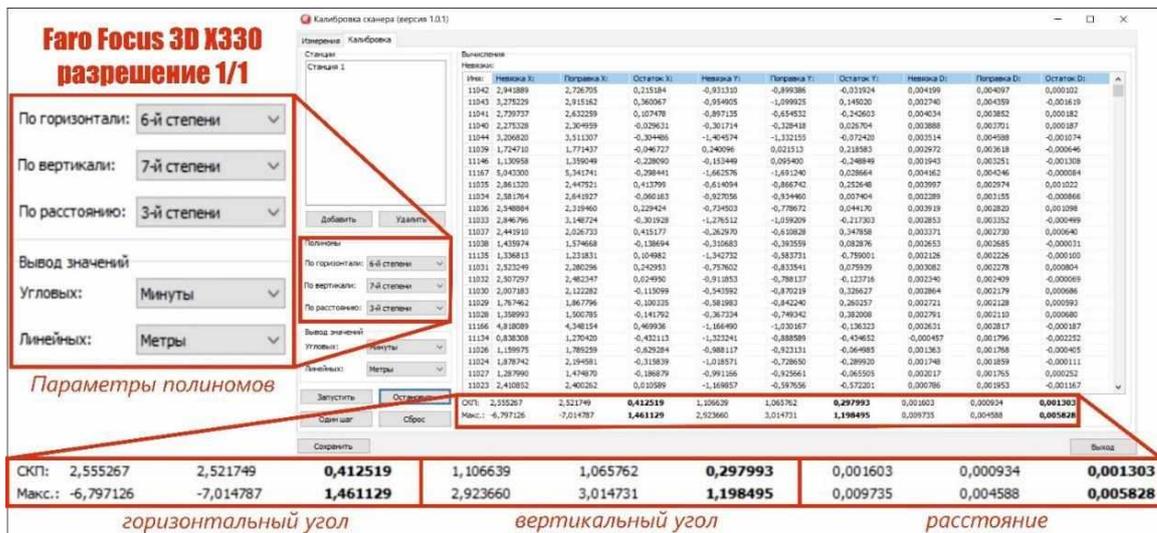


Рисунок 33. Результат первичной посткалибровки на примере сканера X330 при максимальном разрешении.

3.7. Оценка эффективности калибровок фирмой изготовителем FARO

Прежде чем произвести оценку первичной калибровки необходимо оценить, насколько эффективны заводские калибровки каждого из приборов. Для данного эксперимента будет создана модель первичных, так называемых, «сырых» данных для скана с разрешением 1/8, содержащий в себе около 11 млн. точек. Модель будет создаваться на основании исходных данных, заранее конвертированных в формат rtx в ПО FARO SCENE. Стоит отметить, что структура скана в выбранном формате следующая: сам скан состоит из значений координат X, Y, Z и значений оптической плотности. В данном формате скан с выбранным для эксперимента разрешением содержит в себе 5078 строк и 2134 столбцов. Для более детального рассмотрения структуры скана было принято решение конвертировать значения из координат в горизонтальные и вертикальные углы в градусах, чтобы оценить угловой шаг в каждой из плоскостей. Значения вертикального угла на скане находятся в диапазоне от 150 до 0 градусов и повторяются на скане 5078 раз, а значения же горизонтального угла раскинулись в диапазоне от 360 до 0 и уже не повторяются на скане. Проанализировав данные, мы выявили оптимальный угловой шаг, который составил 4.2662 минут (255.97 секунд). Стоит также отметить, что по сравнению с «сырыми» данными, полученными непосредственно после сканирования, наш «искусственный» скан не будет иметь зону перекрытия. Таким образом, исходный файл «сырых» данных содержал в себе 10 836 452 точки, а наш усреднённый файл без зоны перекрытия насчитывает на 9990 точек меньше, чем исходный. Стоит отметить, что было создано два файла с первичными данными – один файл имитирующий скан, выполненный прибором X330, второй файл «сырых» данных имитирует скан прибора S120. Содержание пространственной информации вышеприведённых

файлов идентично за исключением значений оптической плотности, формирующих панхроматическое изображение сканов. После создания файла с данными в угловых величинах его необходимо перевести обратно в координаты и конвертировать в формат *spf* с помощью *ScanIMAGER Converter*. Затем, после вычисления центров марок на «сыром» скане, следует, во-первых, выявить расхождения координат, сравнив файл с координатами марок «сырого» скана и файл с координатами марок обычного скана того же разрешения с опорным файлом координат тахеометра. Во-вторых, следует вычислить поправки к невязкам на «сырых» сканах в утилите *ScanCalibr* и сравнить, насколько эффективно они компенсируют расхождения в сравнении с обычными сканами тех же разрешений. Вычисление поправок происходило на основании единых параметрах полиномов, степень которых составляла 3 для горизонтального угла, вертикального угла и расстояния.

Ниже представлена таблица с результатами сравнения эффективности заводских и калибровок «сырых» данных для каждого из сканеров FARO Focus 3D, результаты даны по СКП, для углов – значения представлены в минутах, а для расстояния – в метрах. В таблице приведены значения невязок, поправок и остаточных невязок.

Таблица 5

Оценка эффективности различных типов калибровок в сканерах *Faro Focus 3D*.

Элемент калибровки	Горизонтальный угол (минуты)			Вертикальный угол (минуты)			Расстояние (метры)		
	В таблице используются сокращения: Н – невязки, П – поправки, О – остаточные невязки								
	Сд – «сырые» данные, Зк – заводская калибровка								
Разрешение скана	Н	П	О	Н	П	О	Н	П	О
1/8 (S120, Зк)	3.706	3.394	1.488	1.493	1.238	0.834	0.0012	0.0008	0.0009
1/8 (S120, Сд)	4.257	3.431	2.763	2.904	1.312	1.922	0.0001	0.0008	0.0009
1/8 (X330, Зк)	2.525	2.191	1.254	1.025	0.695	0.754	0.0012	0.0012	0.0010
1/8 (X330, Сд)	2.916	1.685	2.256	2.702	2.118	1.677	0.0015	0.0008	0.0013

На вышеприведённой таблице отчётливо видно, что заводские калибровки так или иначе более эффективно компенсируют невязки, в отличие от калибровок «сырых» данных. Стоит упомянуть, что для исследования неспроста было решено использовать именно два прибора. Один из них – S120 эксплуатировался значительно дольше, чем X330 и, что очевидно, ряд узлов первого прибора испытывал куда больше нагрузок, чем у второго испытуемого сканера. Таким образом, износ узлов S120 напрямую влияет и на результаты заводской калибровки, которая всё же позволяет ей компенсировать систематические ошибки на порядок лучше, чем если бы мы могли пренебречь данным видом калибровки и использовать «сырые» данные для исследования.

3.8. Посткалибровка сканов различного разрешения

Оценка посткалибровки будет производиться исходя из полученных результатов остаточных невязок для каждого скана в зависимости от разрешения сканирования. Результат данного исследования предоставит возможность проследить изменение качества посткалибровки НЛС в зависимости от исходного состояния самого прибора и разрешения скана. Кроме того, оценка будет производиться не только между двумя сканерами, но и между сканами различного разрешения в рамках каждого прибора. Ниже приведены таблицы с результатами посткалибровки двух сканеров FARO Focus 3D: S120 и X330 при различных разрешениях сканов. Значения в таблицах даны для СКП: углы в минутах, а расстояния в метрах.

Таблица 5

Результаты посткалибровки сканов различного разрешения прибора Faro Focus 3D S120.

Элемент калибровки	Горизонтальный угол (минуты)			Вертикальный угол (минуты)			Расстояние (метры)		
	Ниже используются сокращения: Н – невязки, П – поправки, О – остаточные невязки								
Разрешение скана	Н	П	О	Н	П	О	Н	П	О
1/1	2.95	2.92	0.412	1.42	1.41	0.222	0.0015	0.0008	0.0013
1/4	3.19	3.14	0.58	1.40	1.35	0.37	0.0014	0.0008	0.0011
1/8	3.74	3.65	0.83	1.48	1.39	0.50	0.0012	0.0007	0.0009

Стоит ещё раз упомянуть, что для всех сканов была подобрана одна комбинация степеней полиномов: 6-7-3. При такой комбинации значения остаточных невязок находятся в оптимальном диапазоне.

По вышеприведённой таблице можно проследить как разрешение скана влияет на невязки элементов калибровки: на сканах низкого разрешения (1/8) можно наблюдать повышенные значения невязок в сравнении со сканом разрешения 1/1. По такому же принципу, в целом, изменяются значения поправок и остаточных невязок. Так, наиболее хорошие результаты посткалибровки прослеживаются в значениях вертикального угла: на скане с разрешением 1/1 СКП горизонтального угла улучшились более чем в 7 раз, при разрешении 1/4 в 5 раза, а при 1/8 в 3,5 раза соответственно. Остаточные невязки вертикального угла улучшились практически также эффективно: на скане разрешения 1/1 СКП горизонтального угла улучшились в 7 раз, при разрешении 1/4 в 4, а при 1/8 в 3 раза. На данном примере можно проследить закономерное повышение значений самих невязок и ухудшение значений остаточных невязок в зависимости от понижения разрешения скана. Таким образом, благодаря данному мини-исследованию можно чётко проследить, как количество точек в скане влияет на результат посткалибровки с применением степенных полиномов.

Далее ниже будет приведена таблица с результатами посткалибровки второго сканера – X330.

Таблица 6

Результаты посткалибровки сканов различного разрешения прибора Faro Focus 3D X330.

Элемент калибровки	Горизонтальный угол (минуты)			Вертикальный угол (минуты)			Расстояние (метры)		
	Ниже используются сокращения: Н – невязки, П – поправки, О – остаточные невязки								
	Н	П	О	Н	П	О	Н	П	О
1/1	2.55	2.52	0.41	1.10	1.06	0.29	0.0016	0.0009	0.0013
1/4	2.61	2.51	0.68	1.02	0.96	0.34	0.0015	0.0008	0.0012
1/8	2.44	2.31	0.78	0.98	0.85	0.49	0.0012	0.0007	0.0010

По вышеприведённой таблице можно также проследить аналогичную закономерность: при разрешении скана 1/1 значения самих невязок и остаточных невязок имеют самые низкие значения, также как это было с предыдущим сканером. Наилучшие результаты можно наблюдать на скане 1/1 как по горизонтальному углу, так и по вертикальному. Так, значения СКП остаточных невязок по горизонтальному углу улучшились почти в 6 раз, а по вертикальному почти в 3,5. Разрешения сканов 1/4 и 1/8 тоже, в целом, имеют хорошие результаты в плане остаточных невязок. Стоит отметить, что мы не рассматривали результаты посткалибровки по расстоянию, так как значения невязок по данному элементу находятся в пределах допустимых. Тем не менее, значения остаточных невязок улучшились в диапазоне от 1,5 до 2 раз, что тоже достаточно неплохо.

Если же сравнивать результаты посткалибровок между сканерами, то тут всё более чем очевидно: значения невязок, поправок и остаточных невязок у сканера X330 ниже, чем у S120 практически в 1,5 раза вне зависимости от разрешения сканов. Таким образом можно сделать следующие выводы: во-первых, для более эффективной посткалибровки необходимо выполнять сканирование испытательного полигона в разрешении 1/1, чтобы достичь наилучших результатов по всем элементам калибровки. Во-вторых, степень изношенности от длительной эксплуатации геодезического прибора в некоторой степени также влияет на конечный результат посткалибровки по сканам испытательного полигона

3.9. Коррекция сканов в утилите PTXCorrector 1.0.4

После оценки посткалибровки следует перейти к коррекции исходных сканов в утилите PTXCorrector. Для начала необходимо сохранить в утилите ScanCalibr файлы калибровки сканера в формате scf и уже потом перейти в PTXCorrector 1.0.4. Для коррекции необходим исходный скан соответствующего разрешения в формате ptx. Скан в данном формате можно получить, экспортировав исходный скан в ПО SCENE. Затем, необходимо загрузить в PTXCorrector файл калибровки в формате scf, указать путь к выходящему откорректированному скану и предоставить программе непосредственно исходный скан в формате ptx. Внешний вид окна утилиты во время процесса коррекции приведён на рисунке ниже.

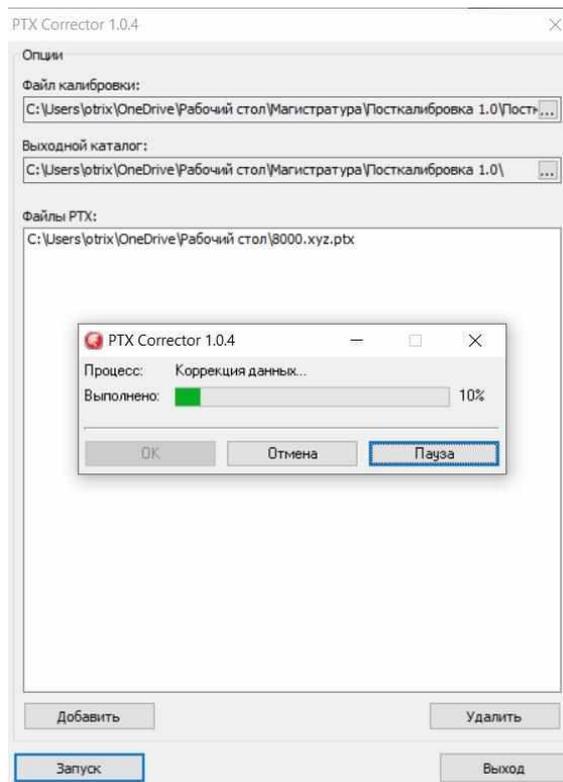


Рисунок 34. Процесс коррекции исходного скана в утилите PTXCorrector.

После завершения процесса коррекции скана его необходимо конвертировать в формат *srm* для последующей загрузки в ПО ScanIMAGER Professional. Процесс конвертации продемонстрирован на рисунке ниже.

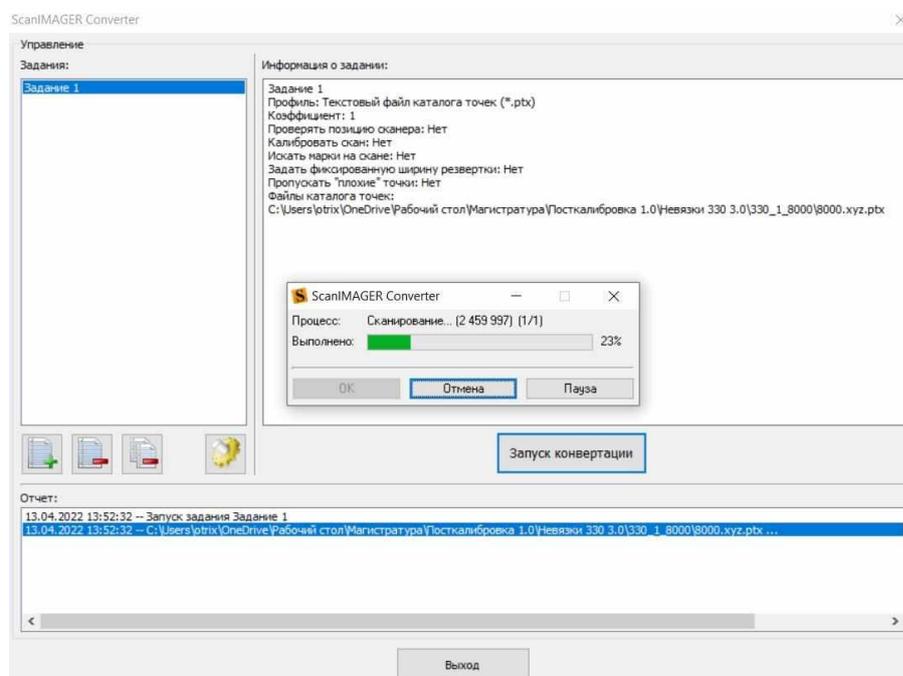


Рисунок 35. Процесс конвертации скана из формата *ptx* в формат *srm* с помощью ScanIMAGER Converter.

После завершения процесса конвертации скан доступен для загрузки в ScanIMAGER. Далее все действия будут происходить не на самом скане, а на его развёртке. Данный этап работ подразумевает вычисление центров всех имеющихся на развёртке марок с помощью встроенного алгоритма, позволяющий вычислять центры марок с субпиксельной точностью. Подобные манипуляции уже совершались ранее в научно-исследовательской работе, поэтому не имеет смысла подробно описывать данный процесс.

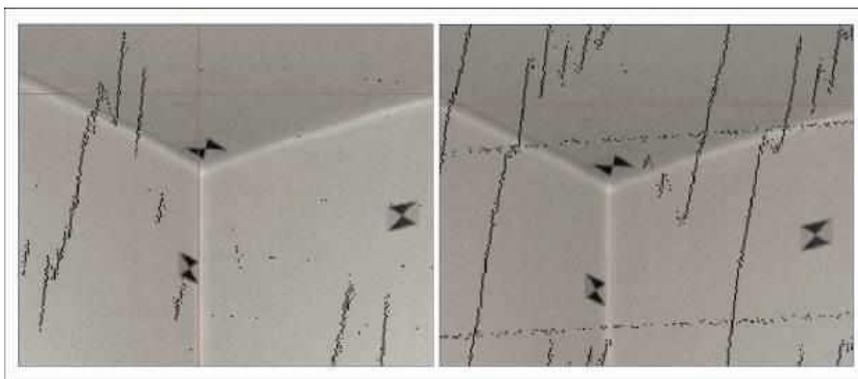


Рисунок 36. Сравнение сканов до коррекции (слева) и после коррекции (справа).

На вышеприведённом рисунке можно заметить, как коррекция визуально повлияла на скан. На рисунке справа (исходный скан) можно проследить остаточное влияние предыдущей калибровки, которая уже не справляется с компенсацией ошибок в диапазоне допуска. Рисунок справа (скан после корректировки) отражает в себе следы свежей калибровки, которая позволит компенсировать систематические ошибки и, в теории, улучшить точность выходящего каталога точек в несколько раз. Как раз оценка качества калибровки и будет главной задачей в представленной ниже части работы.

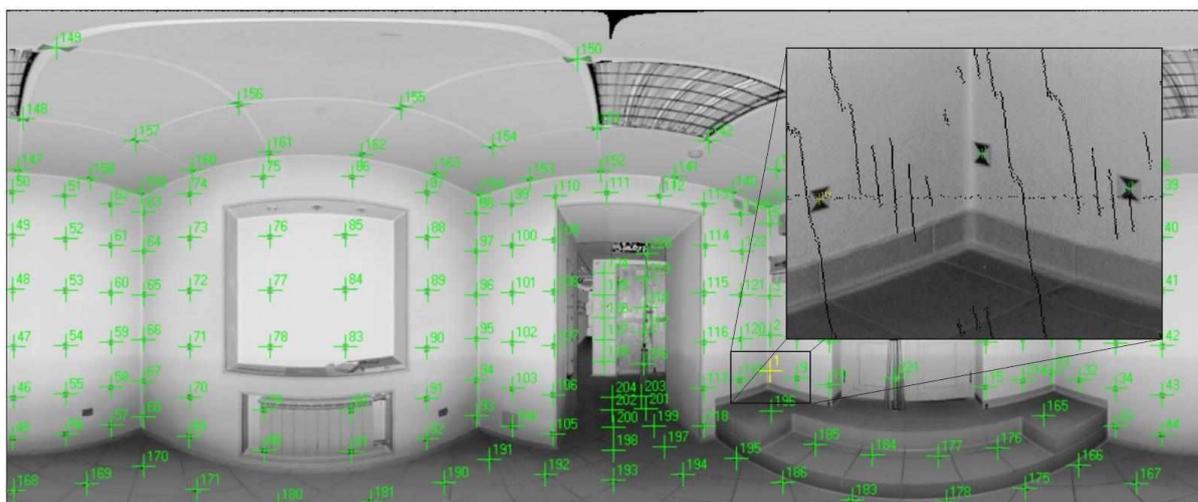


Рисунок 37. Вычисление центров марок на развёртке откорректированного скана, выполненная прибором X330 при разрешении 1/1.

Итак, после вычисления центров всех имеющихся на скане марок можно приступить к выявлению ошибок несоответствия координат марок полигона и марок, измеренных по сканам в утилите PointsTransform 2.1.1.

3.10. Оценка качества посткалибровки в утилите PointsTransform 2.1.1

Первый этап оценки качества посткалибровки будет производиться в утилите PointsTransform 2.1.1, которая ранее уже была задействована в данном исследовании. Оценка калибровки заключается в сравнении значений невязок координат точек каталогов сканирования с каталогом опорных точек тахеометра до коррекции исходных сканов с помощью поправок, полученных в результате посткалибровки в разделе 3.8, и, соответственно, после коррекции. Ниже представлены таблицы, на которых приводится наглядное сравнение значений максимальных невязок (Max) и невязок точек по СКП в миллиметрах для сканов двух приборов.

Таблица 7

Первый этап оценки качества посткалибровки сканера Faro Focus 3D S120.

Ось координат	X		Y		Z	
	СКП (мм)	Max (мм)	СКП (мм)	Max (мм)	СКП (мм)	Max (мм)
Разрешение скана	Ниже используются сокращения: СдК – скан до калибровки, СпК – скан после калибровки					
1/1 (СдК)	0.906	- 3.990	1.546	- 4.849	0.699	- 4.144
1/1 (СпК)	0.733	- 1.749	0.597	- 1.569	0.550	- 1.934
1/4 (СдК)	2.083	4.976	1.879	- 3.830	1.586	- 3.290
1/4 (СпК)	0.681	2.542	0.595	- 1.876	0.514	- 1.875
1/8 (СдК)	2.016	4.918	1.931	- 3.874	1.571	- 3.383
1/8 (СпК)	0.875	- 4.071	0.787	- 2.507	0.802	3.040

Первый этап оценки качества посткалибровки сканера Faro Focus 3D X330.

Ось координат	X		Y		Z	
	СКП (мм)	Мах (мм)	СКП (мм)	Мах (мм)	СКП (мм)	Мах (мм)
Разрешение скана	Ниже используются сокращения: СдК – скан до калибровки, СпК – скан после калибровки					
1/1 (СдК)	1.046	- 4.894	0.672	- 2.580	0.675	- 2.421
1/1 (СпК)	0.593	- 1.734	0.568	- 1.918	0.469	- 1.558
1/4 (СдК)	1.855	5.227	1.401	- 3.066	1.316	- 2.978
1/4 (СпК)	0.747	- 2.836	0.681	- 2.326	0.547	- 2.577
1/8 (СдК)	1.382	3.335	1.285	- 2.755	1.236	2.757
1/8 (СпК)	- 0.747	2.699	0.738	2.394	0.571	- 2.451

На вышеприведённых таблицах отчётливо видно, насколько уменьшились значения невязок на откорректированных сканах. Значения невязок по СКП на всех откорректированных сканах всех разрешений находятся ниже 1 миллиметра, в отличии от тех же невязок по СКП точек сканирования до коррекции, значения которых почти всегда было выше 1 миллиметра. Значения максимальных невязок на откорректированных сканах также снизились примерно в 1.5 раза по сравнению с исходными. Всё вышеперечисленное говорит нам о том, что файлы с поправками достаточно эффективно компенсируют все ошибки, которые возникают во время сканирования.

Также, в день наземного лазерного сканирования на полигоне, помимо 18 основных сканов, были сделаны ещё и дополнительные сканы с разрешением 1/4 с помощью всё тех же НЛС. Дополнительное сканирование проводилось в несколько повёрнутом положении сканера относительно основного сканирования, поэтому целесообразно провести апробацию файла с поправками на исходных «повёрнутых» сканах и сравнить результаты «до» и «после» корректировки.

В таблицах ниже приведены значения невязок (по СКП и максимальные), полученные при сравнении дополнительных (повёрнутых) сканов относительно исходных (не повёрнутых) до калибровки (выделены красным) и после калибровки (выделены зелёным) для двух сканеров в мм.

Таблица 9

Оценка качества посткалибровки дополнительного скана с разрешением 1/4 FARO Focus 3D S120.

Ось координат	X		Y		Z	
	СКП (мм)	Мах (мм)	СКП (мм)	Мах (мм)	СКП (мм)	Мах (мм)
Разрешение скана	Ниже используются сокращения: СдК – скан до калибровки, СпК – скан после калибровки, Дс – дополнительный (повёрнутый) скан с разрешением 1/4)					
1/4 (Дс, СдК)	1.137	- 3.821	1.402	5.845	0.917	- 2.740
1/4 (Дс, СпК)	0.717	- 1.972	0.886	2.069	0.852	- 1.856

Таблица 10

Оценка качества посткалибровки дополнительного скана с разрешением 1/4 FARO Focus 3D X330.

Ось координат	X		Y		Z	
	СКП (мм)	Мах (мм)	СКП (мм)	Мах (мм)	СКП (мм)	Мах (мм)
Разрешение скана	Ниже используются сокращения: СдК – скан до калибровки, СпК – скан после калибровки, Дс – дополнительный (повёрнутый) скан с разрешением 1/4)					
1/4 (Дс, СдК)	0.945	- 3.412	0.936	3.525	0.863	2.333
1/4 (Дс, СпК)	0.553	- 1.892	0.509	1.904	0.452	1.731

Таким образом, сравнительный анализ значений невязок повёрнутых сканов показал, что на дополнительных сканах, подвергшихся корректировке, значения невязок снизились в 1,5 – 2 раза по сравнению с исходными.

В завершении, для независимой оценки качества проделанной работы, мы протестировали сканеры FARO Focus 3D на новом тест-полигоне, на котором также была создана опорная сеть с помощью электронного тахеометра.



Рисунок 38. Схема расположения тест-полигона №2.

На новом полигоне были размещены марки типа «песочные часы» размером 21x21 см в количестве 15 штук. Линейно-угловая сеть создавалась тем же электронным тахеометром, что и в первый раз на предыдущем испытательном полигоне, но уже не с шести станций, а с двух, но также при двух кругах прибора. Как видно на схеме (рис. 38), у каждого сканера было 3 точки стояния, и на каждой новой станции прибор ориентировался отличительно от предыдущей. На протяжении всего эксперимента наземное лазерное сканирование выполнялось без активных датчиков и при одинаковых параметрах: разрешение сканирования – 1/2, качество – 2. Таким образом, по окончании полевых тестов всего было получено 6 облаков точек, по 3 скана каждым прибором. Стоит также отметить тот факт, что расстояния до марок от станций сканирования и от точек стояния тахеометра на данном полигоне в десятки раз больше, чем на первом тест-полигоне.

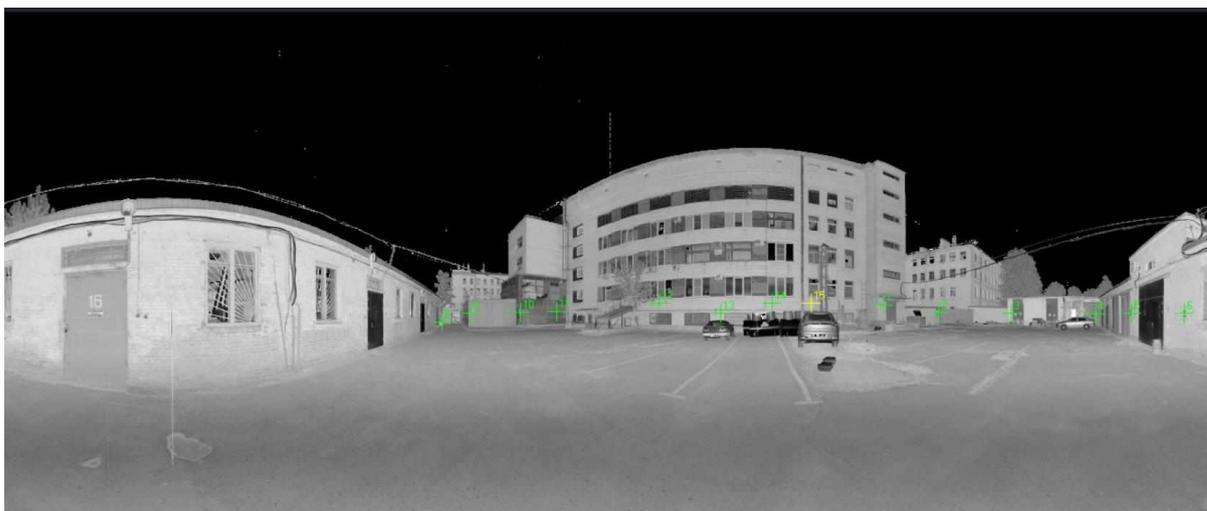


Рисунок 39. Развёртка скана с вычисленными центрами марок при разрешении 1/2, выполненным на тест-полигоне №2 со станции 1 при помощи НЛС FARO Focus 3D X330.

Дальнейшая обработка материалов лазерного сканирования заключается в вычислении центров марок на сканах и сравнении их координат с координатами опорной сети тест-полигона в утилите PointsTransform. На таблицах ниже приведены результаты сравнения значений невязок отдельно для каждой станции сканирования у обоих сканеров. Значения невязок даны в мм.

Таблица 11

Оценка качества калибровки скана на тест-полигоне №2 разрешения 1/2 на станции 1 (FARO Focus 3D).

Ось координат	X		Y		Z	
	СКП (мм)	Мах (мм)	СКП (мм)	Мах (мм)	СКП (мм)	Мах (мм)
Разрешение скана	Ниже используются сокращения: СдК – скан до калибровки, СпК – скан после калибровки					
1/2 (S120, СдК)	4.764	- 9.520	9.526	17.453	1.495	3.050
1/2 (S120, СпК)	2.426	- 5.911	4.372	8.956	1.192	1.995
1/2 (X330, СдК)	3.154	- 7.256	2.270	5.428	4.492	- 9.844
1/2 (X330, СпК)	1.581	- 3.492	1.343	2.763	2.297	- 3.928

Таблица 12

Оценка качества калибровки скана на тест-полигоне №2 разрешения 1/2 на станции 2 (Faro Focus 3D).

Ось координат	X		Y		Z	
	СКП (мм)	Мах (мм)	СКП (мм)	Мах (мм)	СКП (мм)	Мах (мм)
Разрешение скана	Ниже используются сокращения: СдК – скан до калибровки, СпК – скан после калибровки					
1/2 (S120, СдК)	4.388	- 8.279	8.145	- 12.473	1.484	3.979
1/2 (S120, СпК)	2.275	- 4.979	4.853	- 5.672	1.179	2.592
1/2 (X330, СдК)	2.870	- 6.078	3.136	5.839	5.494	12.363
1/2 (X330, СпК)	1.759	- 3.192	1.529	2.253	2.188	5.924

Таблица 13

Оценка качества калибровки скана на тест-полигоне №2 разрешения 1/2 на станции 3 (Faro Focus 3D).

Ось координат	X		Y		Z	
	СКП (мм)	Мах (мм)	СКП (мм)	Мах (мм)	СКП (мм)	Мах (мм)
Разрешение скана	Ниже используются сокращения: СдК – скан до калибровки, СпК – скан после калибровки					
1/2 (S120, СдК)	8.109	11.315	4.899	- 11.497	0.413	0.741
1/2 (S120, СпК)	4.670	5.424	2.488	- 5.556	0.515	0.667
1/2 (X330, СдК)	3.000	- 4.991	2.704	- 4.471	4.903	13.469
1/2 (X330, СпК)	1.445	- 2.722	1.469	- 2.188	2.460	6.779

Итак, сравнивая значения невязок «до» и «после» калибровки можно проследить закономерное уменьшение значений ошибок несоответствия координат примерно в 2 раза по сравнению с исходными у обоих наземных лазерных сканеров FARO Focus 3D.

Далее стоит сравнить значения невязок до и после калибровки в рамках каждого из приборов, приведя сканы со станций 2 и 3 к скану со станции 1, который для данного эксперимента будет считаться как эталонный, имитируя файл с опорными точками.

Таблица 14

Анализ невязок между сканами, выполненными с различных точек стояния на тест-полигоне №2 разрешения 1/2 относительно станции 1 до калибровки (Faro Focus 3D X330).

Ось координат	X		Y		Z	
	СКП (мм)	Мах (мм)	СКП (мм)	Мах (мм)	СКП (мм)	Мах (мм)
Разрешение скана						
1/2 (S330, ст.2)	1.628	3.368	3.294	- 5.662	5.612	11.337
1/2 (S330, ст.3)	1.595	2.502	2.199	- 4.912	5.555	-10.984

Таблица 15

Оценка качества калибровки сканов на тест-полигоне №2 разрешения 1/2 относительно станции 1 после калибровки (Faro Focus 3D X330).

Ось координат	X		Y		Z	
	СКП (мм)	Мах (мм)	СКП (мм)	Мах (мм)	СКП (мм)	Мах (мм)
Разрешение скана						
1/2 (S330, ст.2)	1.256	1.623	1.654	- 2.341	2.775	5.748
1/2 (S330, ст.3)	1.102	1.212	1.289	- 2.652	2.654	-4.992

Таблица 16

Анализ невязок между сканами, выполненными с различных точек стояния на тест-полигоне №2 разрешения 1/2 относительно станции 1 до калибровки (Faro Focus 3D S120).

Ось координат	X		Y		Z	
	СКП (мм)	Мах (мм)	СКП (мм)	Мах (мм)	СКП (мм)	Мах (мм)
Разрешение скана						
1/2 (S330, ст.2)	7.764	- 13.789	17.188	- 28.996	2.253	5.680
1/2 (S330, ст.3)	7.142	- 14.048	8.067	- 16.103	1.420	- 2.771

Таблица 17

Оценка качества калибровки скана на тест-полигоне №2 разрешения 1/2 относительно станции 1 после калибровки (Faro Focus 3D S120).

Ось координат	X		Y		Z	
	СКП (мм)	Мах (мм)	СКП (мм)	Мах (мм)	СКП (мм)	Мах (мм)
Разрешение скана						
1/2 (S330, ст.2)	3.382	- 6.529	8.077	- 12.339	1.667	2.711
1/2 (S330, ст.3)	3.290	- 6.992	4.031	- 7.552	1.110	-1.885

Анализируя вышеприведённые таблицы можно отчётливо проследить, что значения невязок у обоих приборов снизились примерно в 2 – 2,5 раза по сравнению с первоначальными. Стоит отметить, что значения невязок у устройства S120 были заметно выше по сравнению с X330.

Таким образом, в результате данной работы нам удалось откалибровать два наземных трёхмерных сканера, улучшив выходящее облако точек каждого из приборов минимум в 2 раза.

Заключение

Данная выпускная квалификационная работа была посвящена исследованию способов калибровки наземных трёхмерных сканирующих систем. Первая глава выпускной квалификационной работы носит исключительно теоретический характер, в которой затрагиваются вопросы, связанные с технологией наземного лазерного сканирования, устройством сканирующей системы, инструментальными и прочими ошибками, влияющие на выходящее облако точек.

Во второй главе диссертации представлены существующие способы калибровки лазерных сканеров, полученные в результате интеграции и корреляции различных методов и математических моделей, позволяющих улучшить точность выходящего облака точек в результате наземного лазерного сканирования.

В третьей главе настоящей работы описывается реализация технологии калибровки наземного лазерного сканера по сканам испытательного полигона. Сам процесс включал в себя следующие этапы: обустройство испытательного полигона для калибровки НЛС; создание линейно-угловой сети и её последующее уравнивание в инженерном ПО Mathcad 15; выполнение наземного лазерного сканирования двумя сканерами FARO Focus 3D; обработка результатов сканирования в ПО ScanIMAGER 3.7 Professional; выявление первичных ошибок несоответствия координат марок полигона и марок, измеренных по сканам; первичная посткалибровка сканов; оценка качества посткалибровки сканов различного разрешения между двумя сканерами и «внутри» конкретного прибора; апробация результирующих поправок на откорректированных сканах и на сканах, полученных на тест-полигоне №2.

Таким образом, предложенный способ калибровки наземных трёхмерных сканирующих систем по сканам испытательного полигона может считаться достаточно эффективным и универсальным, поскольку он позволил уменьшить значения среднеквадратических невязок минимум в 2 раза. Максимальные невязки также значительно уменьшились по сравнению с исходными.

Выпускная квалификационная работа содержит в себе введение, 3 главы, заключение и список литературы. В работе использованы 67 источников, включающих в себя научные статьи, как зарубежные, так и российские, инструкции к электронным тахеометрам и наземным лазерным сканерам, монографии и электронные ресурсы. Всего в работе представлено 39 рисунков и 17 таблиц. Исследовательская работа уместилась на 82 страницах напечатанного текста.

Литература

1. Abbas, M. A., Lichti, D. D., Chong, A. K., Setan, H., and Majid, Z. (2014). An on-site approach for the self-calibration of terrestrial laser scanner. In *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, volume 52:111–123.
2. Bae, K.-H. and Lichti, D. (2007). An on-site self-calibration method using planar targets for terrestrial laser scanners. In *Proceedings of the ISPRS Workshop, Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*, volume 36-3/W52, pages 14–19.
3. Baltsavias, E. P. (1999). Airborne Laser Scanning: Basic relations and formulas. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, volume 54:199–214. 115Bibliography
4. Beland, R. R. (1993). Propagation through atmospheric optical turbulence. In *Atmospheric Propagation of Radiation*, volume 2:157–232.
5. Beraldin JA, Gaiani M. Evaluating the performance of close range 3D active vision systems for industrial design applications, *Electronic Imaging 2005. Videometrics IX*. San Jose (California, USA): NRC 47405; 2005. P. 16–20.
6. Berg, M. d., Cheong, O., Kreveld, M. v., and Overmars, M. (2008). *Computational Geometry: Algorithms and Applications*. Third rev, Springer-Verlag.
7. Besl, P. J. and McKay, N. D. (1992). A method for registration of 3D shapes. In *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, volume 14(2):239–256.
8. Bessel, F.W. Untersuchung über die Wahrscheinlichkeit der Beobachtungsfehler. *Astron. Nachr.* 1837, 15, 369–404.
9. Boehler, W., Heinz, G., and Marbs, A. (2001). The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording. In *Proceedings of the International Symposium of CIPA*.
10. Boehler, W., Heinz, G., Marbs, A., and Siebold, M. (2002). 3D scanning software - An introduction. In *Proceedings of the International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording*.
11. Bolles RC, Kremers JH, Cain RA. A simple sensor to gather three-dimensional data. *Technical Report 249, SRI International*; July 1981.
12. Borah, D. K. and Voelz, D. G. (2007). Estimation of Laser beam pointing parameters in the presence of atmospheric turbulence. In *Applied Optics*, volume 46(23):6010– 6018.
13. Bottino, A., Laurentini, A., and Rosano, L. (2007). A tight lower bound for art gallery sensor location algorithms. In *Proceedings of the IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2007. ETFA*, pages 434–440.

14. Calibration of a Riegl LMS-Z429i based on a multi-station adjustment and a geometric model with additional parameters. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 38, Part 3/W8, pp.177-182.
15. Chan, T. O., Lichti, D. D., and Belton, D. (2015). A rigorous cylinder-based self-calibration approach for terrestrial laser scanners. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, volume 99:84–99.
16. Cheok, G. S., Leigh, S., and Rukhin, A. (2002). Technical report: Calibration experiments of a Laser Scanner. National Institute of Standards and Technology.
17. Chow, J. C. K., Lichti, D. D., Glennie, C., and Hartzell, P. Improvements to and comparison of static terrestrial lidar self-calibration methods. In *Sensors (Switzerland)*, volume 13(6):7224–7249, 2013.
18. Chow, J.; Ebeling, A.; Teskey, W. Low cost artificial planar target measurement techniques for terrestrial laser scanning. In *Proceedings of the FIG Congress 2010: Facing the Challenges—Building the Capacity*, Sydney, Australia, 11–16 April 2010.
19. Chvatal, V. (1975). A combinatorial theorem in plane geometry. In *Combinatorial Theory*, volume 18(1):39–41.
20. Cornille N, Garcia D, Sutton, S M A, Mc Neill R, Orteu JJ. Calibrage d’imageurs avec prise en compte des distorsions. *Photome’canique* 2004:104–25.
21. Couto, M. C., de Souza, C. C., and De Rezende, P. J. (2007). An exact and efficient algorithm for the orthogonal art gallery problem. In *Proceedings of the Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing*, pages 87–94.
22. Cuartero, A., Armesto, J., Rodriguez, P. G., and Arias, P. (2010). Error analysis of terrestrial laser scanning data by means of spherical statistics and 3D graphs. In *Sensors*, volume 10(11):10128–10145.
23. Danson, F. M., Hetherington, D., Morsdorf, F., Koetz, B., and Allgower, B. (2007). Forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning. In *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, volume 4(1):157–160.
24. Dantan JY, Rey R, Bourdet P. Calibrating the geometric position of a plane laser beam visio-sensor in a measuring system, In: *Proceedings of the Mecatronic’s 96*, Besanc-on, France; 1996. p. 233–238.
25. De Asis Lopez, F., Garcia-Cortes, S., Roca-Pardinas, J., and Ordonez, C. (2014a). Geometric optimization of trough collectors using terrestrial laser scanning: Feasibility analysis using a new statistical assessment method. In *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, volume 47:92–99.
26. De Asis Lopez, F., Ordonez, C., Roca-Pardinas, J., and Garcia-Cortes, S. (2014b).

27. Dorninger, P. and Nothegger, C. (2007). 3D segmentation of unstructured point clouds for building modelling. In Proceedings of the ISPRS Working Group - Photogrammetric Image Analysis, volume 34-3/W49A, pages 191–196.
28. Dorsch RH, Hausler G, Herrmann JM. Laser, triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement. Applied Optics 1994;33 (7/1):1306–14, 1994.
29. Du, Q. and Fowler, J. E. (2008). Low-complexity principal component analysis for hyperspectral image compression. In International Journal of High Performance Computing Applications, volume 22(4):438–448.
30. Eggert, D. W., Lorusso, A., and Fisher, R. B. (1997). Estimating 3D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms. In Machine Vision and Applications, volume 9(5):272–290.
31. Fan, L., Smethurst, J. A., Atkinson, P. M., and Powrie, W. (2015). Error in target-based georeferencing and registration in terrestrial laser scanning. In Computers and Geosciences, volume 83:54–64.
32. FARO Laser Scanner Focus 3D User Manual [Электронный ресурс]: офиц. сайт компании FARO. – Режим доступа: <https://knowledge.faro.com>
33. Friis, H. T. (1946). A note on a simple transmission formula. In Proceedings of the IRE, volume 34(5):254–256.
34. García-San-Miguel, D.; Lerma, J.L. Geometric calibration of a terrestrial laser scanner with local additional parameters: An automatic strategy. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 2013, 79, 122–136, 2013.
35. Geoff Jacobs. 3D laser scanning // Ultra-fast, High-Definition, Reflector less Topographic Survey: Professional Surveyor magazine №5. – 2004.
36. Geoff Jacobs. Uses in Building and Architectural Surveys: Professional Surveyor magazine №6. – 2005.
37. Geoff Jacobs. Uses of Scanning in Construction and Fabrication: Professional Surveyor magazine №2. – 2006.
38. Gielsdorf, F.; Rietdorf, A.; Gründig, L. A Concept for the Calibration of Terrestrial Laser Scanners. In Proceedings of the FIG WorkingWeek, Athens, Greece, 22–27 May 2004.
39. Glennie, C., Lichti, D.D., 2010. Static Calibration and Analysis of the Velodyne HDL-64E S2 for High Accuracy Mobile Scanning. Remote Sensing, 2(6):1610-1624.
40. Gold, P. O., Cowgill, E., Kreylos, O., and Gold, R. D. (2012). A terrestrial lidar-based workflow for determining three-dimensional slip vectors and associated uncertainties. In Geosphere, volume 8(2):431–442.

41. Golub, G. H. and Loan, C. v. (1980). An Analysis of the Total Least Squares Problem. In *SIAM Journal on Numerical Analysis*, volume 17(6):883–893.
42. Gonzalez-Banos, H. and Latombe, J.-C. (2001). A randomized art-gallery algorithm for sensor placement. In *Proceedings of the Symposium on Computational Geometry*, pages 232–240, 378674.
43. Heesun Yoon, Hajun Song, and Kyihwan Park // A phase-shift laser scanner based on a time-counting method for high linearity performance, 2010.
44. Hennes, M. Das Nivelliersystem-Feldprüfverfahren nach ISO 17123-2 im Kontext refraktiver Störeinflüsse *Allg. Vermess.* 2006, 3, 85–94.
45. Horaud R. *Vision par ordinateur*. Editions Hermes, France: 1995. p. 140–54.
46. Isheil, J.-P. Gonnet, D. Joannic, J.-F. Fontaine // Systematic error correction of a 3D laser scanning measurement, 2011
47. Kerekes, G.; Schwieger, V. Determining Variance-covariance Matrices for Terrestrial Laser Scans: A Case Study of the Arch Dam Kops. In in *Proceedings of the INGEO & SIG 2020*, Dubrovnik, Croatia, 1–4 April 2020.
48. Lerma, J.L.; García-San-Miguel, D. Self-calibration of terrestrial laser scanners: Selection of the best geometric additional parameters. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2014, 2, 219–226.
49. Lichti, D. (2007): Error modelling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61(2007), 307 – 324.
50. Lichti, D.; Chow, J.; Lahamy, H. (2011): Parameter de-correlation and model identification in hybrid-style terrestrial laser scanner self-calibration. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(2011), 317 – 326.
51. Lichti, D.; Licht, M. (2006): Experiences with terrestrial laser scanner modelling and accuracy assessment. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 36(2006), 155 – 160.
52. Lichti, D.D., Brüstle S., Franke, J., 2007. Self-calibration and analysis of the surphaser 25HS 3D scanner. In: *Proceedings of FIG Working Week*, Hong Kong SAR, China, 13-17.
53. Linares JM, Bourdet P, Sprauel JM. Quality measurement on CMM integrated design and manufacturing in mechanical engineering, *IDMME'2000*. Kluwer Academic Publishers; 2002. 219-226.
54. Point cloud comparison under uncertainty application to beam bridge measurement with terrestrial laser scanning. In *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, volume 51(1):259–264.
55. Reshetyuk, Y., 2009. Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. Ph.D. dissertation, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 162 p.

56. Riegl Laser Measurement Systems GmbH, Horn, Austria. Datasheet of Riegl VZ-2000.
57. Schneider, D. Calibration of a Riegl LMS-Z420i based on a Multi-Station Adjustment and a Geometric Model with Additional Parameters. In Proceedings of the Laser Scanning 2009, Paris, France, 1–2 September 2009; Bretar, F., Pierrot-Deseilligny, M., Vosselman, G., Eds.; IAPRS: Paris, France, 2009; Vol. XXXVIII, Part 3/W8.
58. Soudarissanane, S.S. The Geometry of Terrestrial Laser Scanning-identification of Errors, Modeling and Mitigation of Scanning Geometry. Ph.D. Thesis, Technical University of Delft, Delft, the Netherlands, 2016.
59. Tomas, A. P., Bajuelos, A. L., and Marques, F. (2006). On visibility problems in the plane – solving minimum vertex guard problems by successive approximations. In Proceedings of the International Symposium on Artificial Intelligence and Mathematics, volume 1, pages 1–12. [157] Torre de la, F. and Black, M. J. (2003). Robust principal component analysis for computer vision. In Computer Vision and Image Understanding, volume 91:53–71.
60. Tozoni, D., de Rezende, P., and de Souza, C. (2013). The Quest for Optimal Solutions for the Art Gallery Problem: A Practical Iterative Algorithm, volume 7933 of Lecture Notes in Computer Science, chapter 29, pages 320–336. Springer Berlin Heidelberg.
61. Tuexsen, H.-H. (2016): Werkskalibrierung und Überprüfung des Leica Scanners im Feld. In: VDVmagazin, (2016), 28 – 31.
62. Van Goor, B., Lindenbergh, R., and Soudarissanane, S. (2011). Identifying corresponding segments from repeated scan data. In Proceedings of the ISPRS Workshop, Laser Scanning 2011, volume 38.
63. Walsh, G. (2016): Leica ScanStation P-Series – Details that matter. White Paper. http://leica-geosystems.com/-/media/files/products/white%20papers/leica_scanstation_p-series_details_that_matter_wp_en.ashx?la=en.
64. Наземное лазерное сканирование / В. А. Середович, А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова. – Новосибирск: СГГА, 2009. – 261 с.
65. Никонов А. В. Исследование точности измерения расстояний электронными тахеометрами в безотражательном режиме // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 43–53.
66. Никонов А. В., Чешева И. Н., Лифашина Г. В. К вопросу об определении постоянной поправки дальномера электронного тахеометра // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29) – С. 54–61.
67. Руководство по эксплуатации тахеометров Sokkia SET 230R/330R/530R/530RS/630R [Электронный ресурс]: офиц. сайт компании SOKKIA РОССИЯ. – Режим доступа: <https://www.sokkia.ru>