

УДК 528.331: 528.721.221.6

DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-2-72-85

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПОСТРОЕНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРИ НАЗЕМНОМ ЛАЗЕРНОМ СКАНИРОВАНИИ КРУПНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Анжелика Алексеевна Шарафутдинова

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, аспирант кафедры инженерной геодезии; ООО «Три-метари Консалтинг», 190031, Россия, г. Санкт-Петербург, пр. Маршала Блюхера, 12, инженер-геодезист, тел. (911)279-56-07, e-mail: anzhelikaalexeevna@gmail.com

Михаил Ярославович Брын

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии, тел. (921)348-80-35, e-mail: bryn@pgups.ru

При выполнении наземного лазерного сканирования крупных промышленных объектов необходимо уделять особое внимание проектированию и построению геодезической сети для трансформирования измерений в заданную систему координат. Однако проектирование геодезических сетей классическими методами геодезии не учитывает всех особенностей метода наземного лазерного сканирования. Также стоит учитывать специфику обработки данных лазерного сканирования. Ввиду этого актуальным становится вопрос разработки методики проектирования и построения геодезических сетей при наземном лазерном сканировании. Для этого в работе выполнен анализ особенностей съемки крупных промышленных объектов методом наземного лазерного сканирования, а также методами взаимного и внешнего ориентирования результатов измерений. На основании выполненного анализа и практического опыта разработана технологическая схема построения геодезической сети, основанная на выполнении взаимного ориентирования с использованием точек сканирования и выполнении внешнего ориентирования аналитическим методом с использованием специальных марок. Также исходя из практического опыта определена зависимость значений средней квадратической ошибки взаимного ориентирования и средней квадратической ошибки определения положения станций лазерного сканирования от расстояния между станциями, участвующими в оптимизации. В результате обоснована методика проектирования и построения сети, которая включает два этапа: первый этап – проектирование и оценка точности положения пунктов опорной сети, координаты которых определяются от исходных пунктов традиционными методами геодезии; второй – проектирование и оценка точности положения пунктов сканерной сети, координаты которых определяются от пунктов опорной сети.

Ключевые слова: алгоритм ИСР, взаимное ориентирование, внешнее ориентирование, геодезическая сеть, метод Монте-Карло, наземное лазерное сканирование, оценка точности, проектирование, сканерная сеть

Введение

Для реализации проектов геодезической съемки крупных промышленных объектов методом наземного лазерного сканирования (НЛС) необходимо уделять особое внимание проектированию и построению геодезической сети (ГС). Это обусловлено тем, что геодезической съемке подлежат большие площади технологических установок, представляющих собой комплекс зданий и соору-

жений, в состав которых входит большое количество технологического оборудования, строительных конструкций и инженерных коммуникаций. Главная особенность такой съемки – высокая детализация и соответственно большое количество установок станций лазерного сканера (ЛС) для выполнения требуемых измерений.

Лазерному сканированию подлежат все блоки технологических установок, при этом измерения выполняются как внутри, так и снаружи зданий и сооружений, а также на каж-

дом уровне многоуровневых конструкций. В результате объем измерений представляет собой огромный массив данных, который требуется объединить в заданной системе коор-

динат (СК). Для примера приведем статистические данные, полученные при НЛС на двух различных технологических установках (таблица).

Статистические данные НЛС технологических установок промышленных объектов

Тип технологической установки	Площадь установки, га	Количество технологических блоков	Максимальное количество уровней многоуровневых конструкций	Количество станций ЛС
Установка подготовки нефти	16	95	4	1 493
Установка каталитического крекинга	4,3	32	24	1 652

Результатом измерений с одной станции ЛС является дискретная точечная модель (далее модель), в которой каждая измеренная точка описана пространственными координатами X, Y, Z [1]. При объединении массива измерений со всех станций ЛС возникает задача взаимного ориентирования моделей в единую модель с ее последующим внешним ориентированием в заданную СК.

Для решения этой задачи необходимо спроектировать и построить ГС с учетом особенностей и конфигурации технологической установки. При этом геодезическая съемка промышленных объектов методом НЛС и дальнейшая обработка результатов имеет ряд особенностей, которые следует учитывать при проектировании и построении ГС. Так, можно выделить: большое количество станций (что было отмечено ранее); короткие расстояния между станциями ЛС из-за ограниченной видимости; малые углы между осью падения лазерного луча и поверхностью измеряемого объекта; разрешение сканирования. Отметим, что основным требованием для проектирования и построения ГС являются требования к точности положения пунктов. В свою очередь, точность положения пунктов зависит от состава измерений и их точности, геометрии сети и метода обработки результатов измерений.

В связи с этим актуальным становится вопрос разработки методики проектирования ГС в соответствии с требованиями к точности и последующее формирование методики выполнения работ на основании результатов проектирования.

Для разработки методики проектирования и построения ГС в первую очередь проанализируем методы взаимного и внешнего ориентирования измерений лазерного сканирования, наиболее часто используемые на практике.

Анализ методов взаимного и внешнего ориентирования

В практике лазерного сканирования можно выделить два основных метода взаимного ориентирования моделей:

- с использованием специальных марок, которые устанавливаются на объекте до начала измерений с учетом обеспечения их видимости с различных станций ЛС [1];
- с использованием точек сканирования, при котором взаимное ориентирование двух моделей выполняется с помощью итерационного алгоритма ближайших точек (ICP) [2].

Каждый из методов имеет свои особенности, однако на основании практического опыта сканирования промышленных объектов с плотной застройкой и большой насыщенностью строительных конструкций алгоритм ICP является наиболее применимым. В основе вычислительного алгоритма лежит процесс поиска ближайших точек в двух моделях и вычисления для них параметров преобразования с последующим уточнением общих элементов преобразования для всей модели. При этом одна модель принимается истинной и не меняет своего положения, а вторая является подвижной и стремится занять положение, наиболее близкое к истинной мо-

дели [2–4]. Взаимное ориентирование представляет собой последовательный процесс, при котором ориентирование последующей модели и предыдущей происходит до тех пор, пока все модели не будут объединены в единую.

Для внешнего ориентирования в практике лазерного сканирования наибольшее распространение получили два метода [1, 2]:

– прямой: линейные и угловые элементы внешнего ориентирования определяются в результате центрирования, горизонтирования лазерного сканера над точкой с известными координатами и ориентирования прибора по заданному направлению;

– аналитический: линейные и угловые элементы внешнего ориентирования вычисляются математически после сканирования специальных марок, координаты которых известны.

На практике при лазерном сканировании все полевые измерения выполняются в условной СК, и дальнейшее внешнее ориентирование происходит в процессе камеральной обработки через стандартную процедуру преобразования координат. При этом можно выделить следующие методы внешнего ориентирования: каждая модель обрабатывается отдельно и затем трансформируется в заданную СК; выполняется взаимное ориентирование всех моделей, и полученная единая модель трансформируется в заданную СК [2].

В настоящей работе разработка методики проектирования ГС основывается на выполнении взаимного ориентирования моделей с использованием точек сканирования и выполнении внешнего ориентирования аналитическим методом с использованием специальных марок.

Анализ практических результатов взаимного ориентирования с использованием алгоритма ICP

Выполним анализ результатов взаимного ориентирования на примере рассматриваемых в статье промышленных объектов (см. таблицу). В качестве тестируемых было выбрано четыре группы станций ЛС, проложенных между пунктами с известными координатами.

Каждая группа включала 10–11 станций ЛС, среднее расстояние между которыми составляло 18 м. Места установки ЛС определялись с учетом конфигурации объекта измерений и видимости между предыдущей и последующей станциями ЛС. Измерения выполнялись прибором со средней квадратической ошибкой (СКО) измерения горизонтальных и вертикальных углов 8", СКО измерения расстояний – 1,2 мм на расстоянии до 270 м и разрешением сканирования 6,3 × 6,3 мм на 10 м. Взаимное ориентирование моделей было выполнено с помощью алгоритма ICP, включающего следующие шаги [2, 5]:

1) определение приближенного значения направления для двух оптимизируемых моделей в ручном режиме;

2) поиск соответствующих точек N (количество пар) в двух моделях $X = \{x_1 \dots x_n\}$ и $Y = \{y_1 \dots y_n\}$;

3) вычисление параметров преобразования для точек подвижной модели: \mathbf{R} , \mathbf{t} – матрицы поворота и смещения между двумя СК, с учетом минимизации целевой функции:

$$f(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|X_{x,i} - R(Y_{y,i}) - \mathbf{t}\|^2; \quad (1)$$

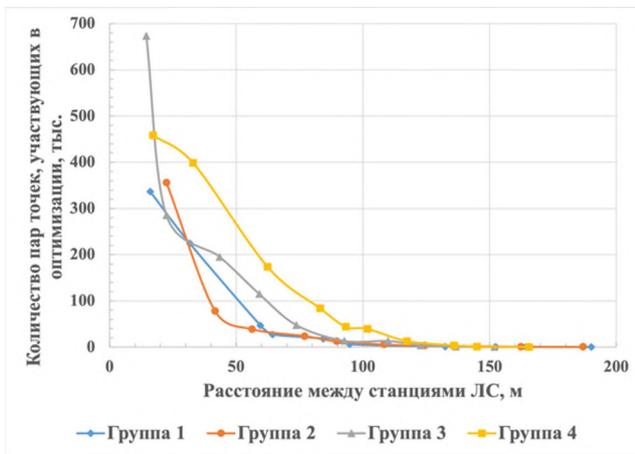
4) повторение итерационного процесса до момента достижения минимального значения целевой функции или максимального количества итераций.

На основе анализа приведенного алгоритма можно сделать вывод о том, что одним из факторов минимизации целевой функции является количество соответствующих пар точек, найденных в двух моделях, и расстояние между ними. В этом случае можно предположить, что чем больше область перекрытия содержит четких контуров с двух соседних станций, тем меньше будет значение целевой функции после выполнения оптимизации. При лазерном сканировании в условиях плотной застройки обеспечение достаточного перекрытия возможно при соблюдении определенного расстояния между станциями ЛС. Для исследования вышеуказанной зависимости был проведен анализ результатов взаимного ориентирования при увеличении расстояния между смежными станциями ЛС, участ-

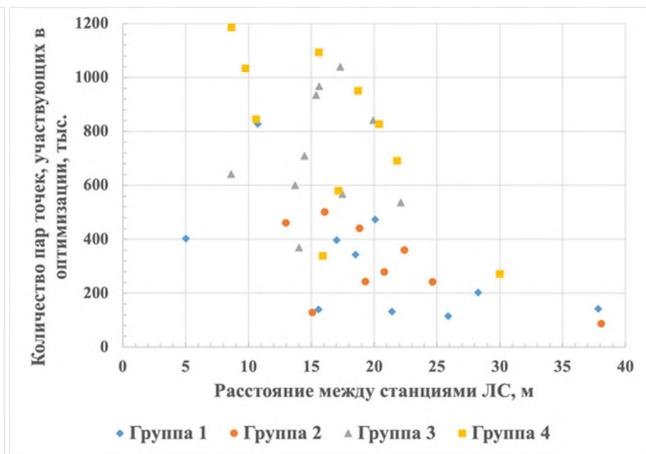
вующими в оптимизации. Взаимное ориентирование было выполнено двумя способами: при последовательном ориентировании последующей станции ЛС с предыдущей; при ориентировании относительно первой станции ЛС всех последующих. В первом случае среднее расстояние между станциями ЛС составило 18 м, во втором – расстояние между станциями ЛС увеличивалось и максимальное значение для различных групп станций ЛС составило 150–190 м.

Из графика на рис. 1, а видно, что при увеличении расстояния между станциями ЛС уменьшается количество соответствующих

пар точек, участвующих в оптимизации. Так, на расстоянии 20 м алгоритм определяет порядка 300 тыс. пар точек, на расстоянии 70 м количество точек уменьшается до 20–70 тыс. пар, а на расстоянии 150 м количество найденных соответствующих пар точек не превышает 1 тыс. При последовательном взаимном ориентировании, в случае если расстояние между станциями не превышает 30 м, алгоритм определяет более 200 тыс. пар соответствующих точек (рис. 1, б). Однако стоит отметить, что эта зависимость не применима в случае, если не обеспечивается достаточная область перекрытия между станциями ЛС.



а)



б)

Рис. 1. Зависимость количества пар точек, участвующих в оптимизации, от расстояния между станциями ЛС:

а) при ориентировании относительно первой станции всех последующих; б) при последовательном ориентировании последующей станции ЛС с предыдущей

На рис. 2, а видно, что увеличение расстояния между станциями ЛС, участвующими в оптимизации, также влияет на значение СКО взаимного ориентирования. Это связано с тем, что при увеличении расстояния от сканера до объекта сканирования увеличиваются горизонтальное и вертикальное разрешения сканирования. Соответственно при взаимном ориентировании плотность контуров на большем расстоянии от сканера до объекта будет уменьшаться. Также при увеличении расстояния между станциями ЛС уменьшается область перекрытия двух моделей. Эти два фактора приводят к тому, что расстояние между парой соответствующих точек увеличивается, и, соответ-

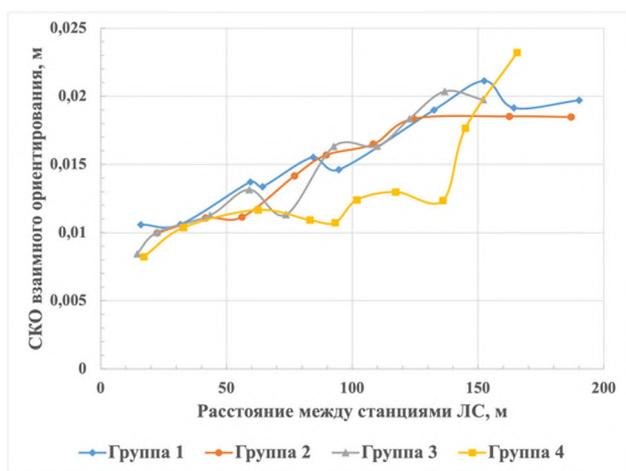
ственно, увеличивается значение СКО взаимного ориентирования. Следует отметить, что с увеличением расстояния между станциями ЛС до 70 м значение СКО взаимного ориентирования плавно увеличивается и линия тренда четко прослеживается. Однако с увеличением расстояния между станциями ЛС более 70 м, значения СКО взаимного ориентирования не укладываются в отмеченную выше закономерность, как видно на рис. 2, а для группы 4.

Анализируя результаты последовательного ориентирования станций ЛС, расстояние между которыми не превышает 30 м, можно сделать вывод, что значение СКО взаимного ориентирования находится в примерно оди-

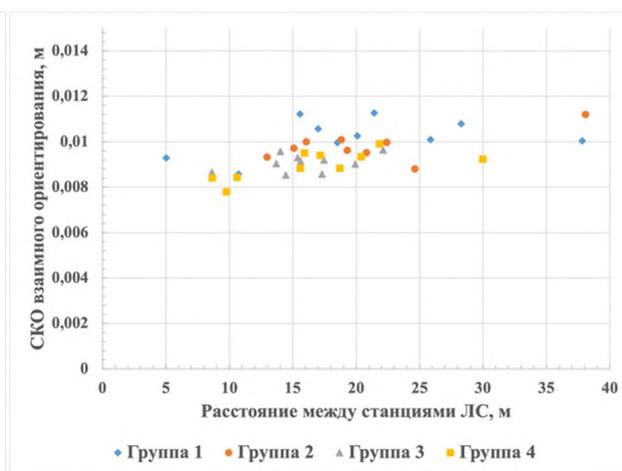
наковом диапазоне и в большинстве случаев не превышает 10 мм (рис 2, б).

По результатам взаимного ориентирования двумя способами были определены новые координаты станций ЛС и произведено сравнение их значений. Из графика на рис. 3 видно, что увеличение расстояния между станциями ЛС приводит к увеличению значения СКО определения положения станций ЛС. Так, на расстоянии до 50 м СКО определения положения станций ЛС составляет

до 5 мм, на расстоянии до 70 м – до 10 мм, а на расстоянии более 70 м возрастает до 70 см. Отметим также, что значения СКО определения положения станций ЛС плавно увеличиваются с увеличением расстояния между станциями ЛС до 70 м и линия тренда также четко прослеживается. С увеличением расстояния между станциями ЛС более 70 м значения СКО определения положения станций ЛС не укладываются в отмеченную выше закономерность, как видно на рис. 3.



а)



б)

Рис. 2. Зависимость значения СКО взаимного ориентирования от расстояния между двумя станциями:

а) при ориентировании относительно первой станции всех последующих; б) при последовательном ориентировании последующей станции ЛС с предыдущей

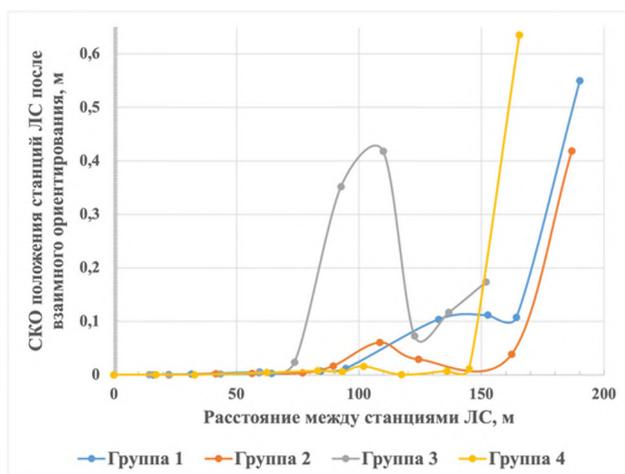


Рис. 3. Зависимость значения СКО определения положения станции ЛС от расстояния между двумя станциями при взаимном ориентировании

Условия проектирования геодезической сети

Рассмотрим условия проектирования ГС с учетом схемы ее построения, предложенной авторами статьи на основании практического опыта и состоящей из пяти последовательных этапов выполнения работ (рис. 4). Предлагается проектирование сети выполнять в два этапа: первый – проектирование и оценка точности положения пунктов опорной сети, координаты которых определяются от исходных пунктов традиционными методами геодезии; второй – проектирование и оценка точности положения пунктов сканерной сети, координаты которых определяются от пунктов опорной сети. Под сканерной сетью будем понимать сеть, проложенную между пунктами

опорной сети и представляющую собой станции ЛС, взаимное ориентирование которых выполняется по точкам сканирования последовательно от предыдущей к последующей станции ЛС.

Для определения наилучшего расположения пунктов опорной сети и станций ЛС выполняется рекогносцировка территории объекта. В условиях съемки промышленных объектов всю территорию технологической установки предлагается разбивать на зоны, границы которых совпадают с границами техно-

логических блоков (рис. 5). Это необходимо для того, чтобы выполнять взаимное ориентирование моделей отдельно для каждого технологического блока или нескольких взаимосвязанных блоков. Выполнение взаимного ориентирования отдельно для каждой выделенной зоны позволит минимизировать ошибки взаимного ориентирования за счет уменьшения количества станций ЛС, участвующих в оптимизации, и исключения станций ЛС, у которых расстояние до объекта сканирования превышает рекомендуемую дальность измерений.

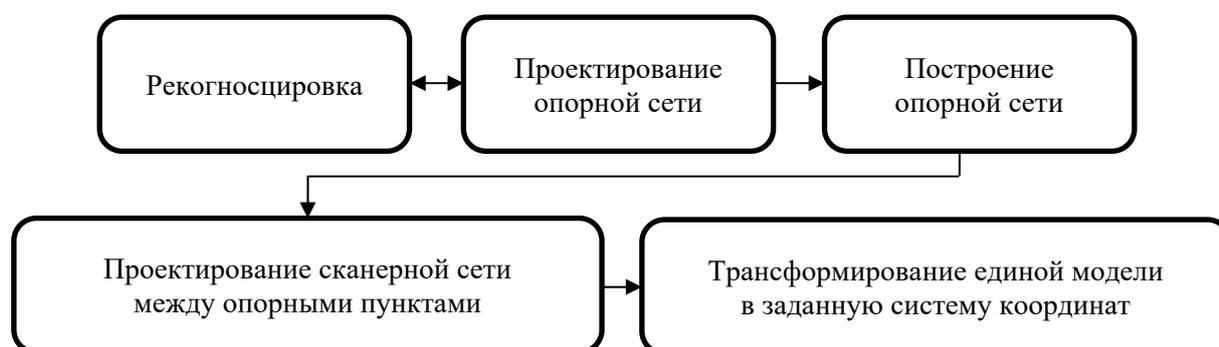


Рис. 4. Технологическая схема построения ГС

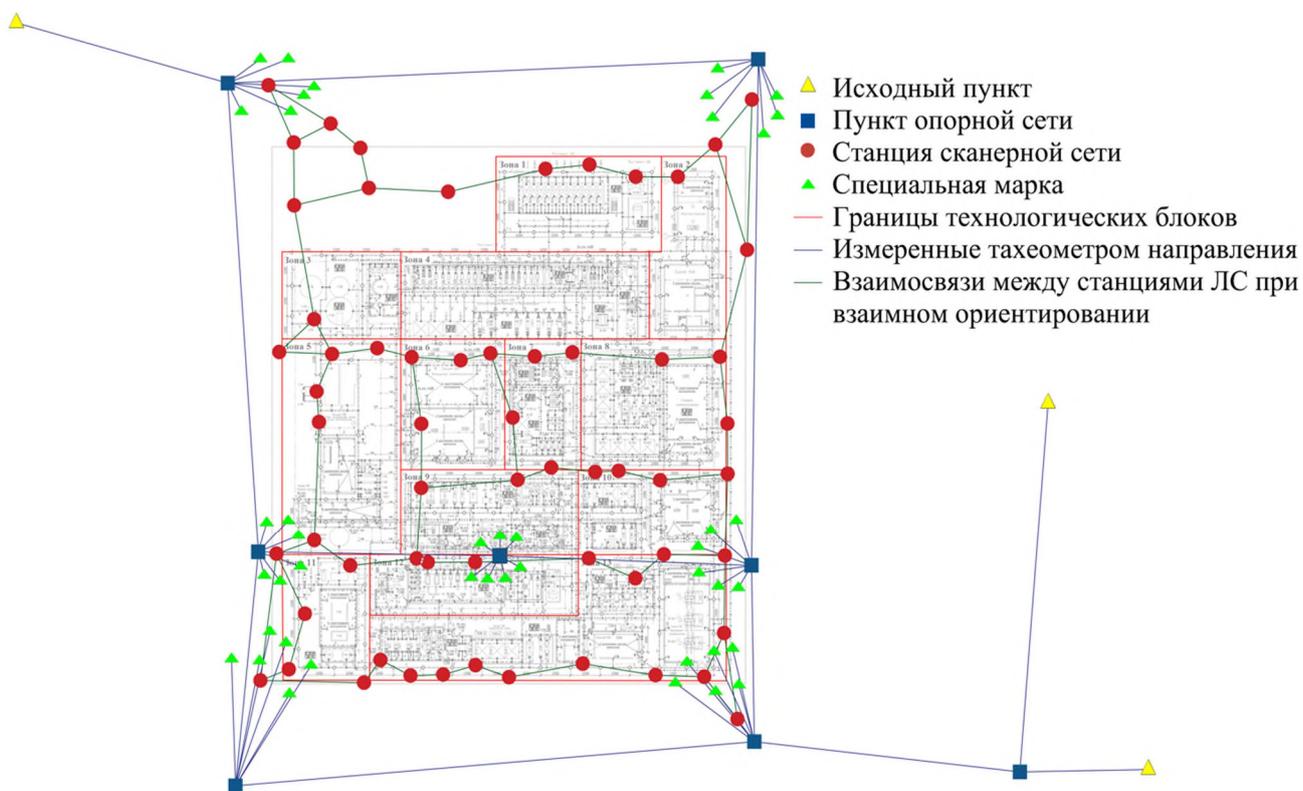


Рис. 5. Схема ГС на объекте «Установка каталитического крекинга»

Условия проектирования опорной сети

Как правило, для внешнего ориентирования единой модели в заданную СК на промышленных объектах необходимо заново создавать ГС, так как исходные пункты часто не удовлетворяют требованиям съемки ни по плотности, ни по точности, и зачастую утрачиваются в процессе эксплуатации объекта. Точность и методы создания ГС зависят от целей и задач, для решения которых проводится геодезическая съемка, и должны быть установлены на основании специальных расчетов относительно требований к точности конечного результата.

В настоящее время при создании ГС широкое распространение получил метод, основанный на использовании аппаратуры, работающей по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [6]. Однако в условиях проведения съемки на территории промышленного объекта применение ГНСС-метода может быть осложнено плотной застройкой, которая заслоняет видимость спутников. В связи с этим разработка методики проектирования опорной сети выполнена с учетом использования наземных методов путем построения линейно-угловых сетей с одновременным определением высот пунктов в прямом и обратном направлении из тригонометрического нивелирования (см. рис. 5). Расположение пунктов опорной сети предлагается определять исходя из необходимости обеспечения взаимной видимости на смежные пункты опорной сети и равномерного покрытия пунктами всей территории объекта съемки.

В связи с тем, что длины сторон опорной сети (как правило) превышают рекомендованное полезное расстояние лазерного сканирования, для ориентирования лазерного сканера предлагается закреплять специальные марки в радиусе 10–20 м вокруг пунктов опорной сети. Такое расстояние обусловлено тем, что при увеличении расстояния от лазерного сканера до объекта измерений увеличивается разрешение сканирования. Таким образом, при сканировании марки на большом расстоянии будет получена разряженная точечная модель, в которой возможна большая

погрешность определения положения центра марки. В предлагаемой методике с каждого пункта опорной сети электронным тахеометром определяются пространственные координаты 5–7 марок.

Условия проектирования сканерной сети

В ходе выполнения внешнего ориентирования отдельных блоков внутри технологической установки в требуемую СК необходимо соблюдать условие отсутствия коллизий двух моделей отдельных блоков. Для этого необходимо выполнить предварительное взаимное ориентирование моделей всех блоков в единую модель. Одним из способов решения этой задачи является построение сканерной сети между пунктами опорной сети и проходящих по границам технологических блоков (см. рис. 5). Преимущество построения сканерной сети заключается в том, что в последующей оптимизации участвует небольшое количество точечных моделей относительно всего объема лазерного сканирования, тем самым не «утяжеляя» и не накапливая ошибки при выполнении взаимного ориентирования.

Методика проектирования геодезической сети

Проектирование опорной сети

Проектирование опорной сети предлагается выполнять на основе параметрического способа метода наименьших квадратов [7–10].

При этом предполагается выполнить следующие действия:

- выполнять проектирование для пространственной сети с учетом того, что измерения производятся электронным тахеометром;
- моделирование опорной сети выполнять относительно исходных пунктов, имеющих на промышленном объекте;
- моделировать результаты измерений с учетом ошибок измерений методом Монте-Карло, описанном в работах [11–13];
- СКО положения пунктов вычислять на основе уравнивания параметрическим способом.

С учетом вышесказанного приведем последовательность проектирования опорной сети.

Шаг 1. По цифровому генеральному плану предприятия определяются приближенные пространственные координаты X, Y, H всех запроектированных пунктов опорной сети (см. рис. 5).

Шаг 2. По известным формулам вычисляются приближенные результаты измерений n_i (направления N_i , наклонные расстояния D_i и зенитное расстояние z_i):

$$N_i = \arctg\left(\frac{(Y_j - Y_i)}{(X_j - X_i)}\right) - A_0;$$

$$D_i = \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (H_j - H_i)^2}; \quad (2)$$

$$z_i = \arccos\left(\frac{(H_j - H_i)}{D_i}\right),$$

где X_i, Y_i, H_i и X_j, Y_j, H_j – координаты левого и правого пункта соответственно; A_0 – дирекционный угол нулевого направления на каждой станции сети.

Шаг 3. Определяются СКО измеряемых наклонных и зенитных расстояний m_D и m_z по заданным в техническом паспорте прибора параметрам, а СКО измеряемых направлений определяется из выражения $m_N = m_\beta / \sqrt{2}$, где m_β – СКО измерения углов.

Шаг 4. Вычисляются веса p_i каждого значения измерений:

$$p = \mu^2 / m^2,$$

где μ – априорная ошибка единицы веса, которая принимается как СКО измерения направления [14].

Далее составляется матрица \mathbf{P} , диагональными элементами которой будут являться веса запланированных к измерению в проектируемой сети величин:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & p_n \end{pmatrix}.$$

При этом следует использовать те значения СКО, которые характеризуют точность измерения вертикальных и горизон-

тальных углов и расстояний [14]: $p_N = \mu^2 / m_N^2, p_D = \mu^2 / m_D^2, p_z = \mu^2 / m_z^2$.

Шаг 5. Выполняется моделирование ошибок измерений методом Монте-Карло. Для каждого приближенного результата измерений n_i , вычисленного по формулам (2), моделируется ошибка измерения ξ_i при условии, что математическое ожидание ошибки измерения $M(\xi) = n_i$, а дисперсия ошибки измерения определяется из технического паспорта прибора $D(\xi) = m^2$. Тогда значения ξ_i генерируются в интервале $-3m \leq \xi_i \leq 3m$ для каждого n_i [11, 12].

Шаг 6. Результаты измерений n'_i , содержащие ошибки измерений, вычисляются путем введения в приближенные результаты измерений n_i значения ошибок измерений ξ_i [11, 13]:

$$N'_i = N_i + \xi_{N_i}; \quad D'_i = D_i + \xi_{D_i}; \quad z'_i = z_i + \xi_{z_i}.$$

Шаг 7. Далее составляются уравнения поправок для всех подлежащих измерению величин и формируется матрица коэффициентов \mathbf{B} параметрических уравнений поправок и вектор \mathbf{L} свободных членов параметрических уравнений поправок. Уравнения поправок v имеют следующий вид [13, 14]:

– уравнение поправок для направлений v_N

$$v_N = \left(\rho \frac{\sin \alpha_{ij}}{S_{ij}}\right) \tau_{X_i} - \left(\rho \frac{\cos \alpha_{ij}}{S_{ij}}\right) \tau_{Y_i} - \left(\rho \frac{\sin \alpha_{ij}}{S_{ij}}\right) \tau_{X_j} + \left(\rho \frac{\cos \alpha_{ij}}{S_{ij}}\right) \tau_{Y_j} - \tau_p + (N_{ij} - N'_{ij}),$$

где τ – поправки к приближенным значениям координат; τ_p – поправка к приближенному значению ориентирного угла; α_{ij} – дирекционный угол; ρ – число секунд в радиане; S_{ij} – горизонтальное проложение, вычисляемое по формуле $S_{ij} = D_{ij} \sin(z_{ij})$;

– уравнение поправок для наклонных расстояний v_D :

$$v_D = -\frac{X_j - X_i}{D_{ij}} \tau_{X_i} - \frac{Y_j - Y_i}{D_{ij}} \tau_{Y_i} - \frac{H_j - H_i}{D_{ij}} \tau_{H_i} + \frac{X_j - X_i}{D_{ij}} \tau_{X_j} + \frac{Y_j - Y_i}{D_{ij}} \tau_{Y_j} + \frac{H_j - H_i}{D_{ij}} \tau_{H_j} + (D'_{ij} - D_{ij});$$

– уравнение поправок для зенитных расстояний v_z :

$$v_z = \left(\frac{1}{S_{ij}} \right) \tau_{H_i} - \left(\frac{1}{S_{ij}} \right) \tau_{H_j} + (z_{ij} - z'_{ij}).$$

Шаг 8. Вычисляется матрица коэффициентов нормальных уравнений $\mathbf{N} = \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B}$.

Шаг 9. Далее моделируется еще одна совокупность ошибок измерений ξ_i и шаги 5–8 повторяются. Согласно [13], для надежного определения СКО результатов измерений n'_i целесообразно совершать минимум 100 циклов моделирования ошибок измерений для каждого приближенного результата измерений n_i . Следовательно, в результате вычислений получим 100 матриц \mathbf{N} .

Шаг 10. Для всех матриц \mathbf{N}_i вычисляются обратные им матрицы \mathbf{N}^{-1} .

Шаг 11. Вычисляется вектор свободных членов $\lambda = \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{L}$, вектор поправок к координатам определяемых пунктов $\tau = -\mathbf{N}^{-1} \lambda$ и вектор поправок к результатам измерений $\mathbf{V} = \mathbf{B} \tau + \mathbf{L}$.

Шаг 12. Вычисляется СКО единицы веса $\mu = \sqrt{[pv^2] / (n - k)}$, где $[pv^2] = \mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}$, а $(n - k)$ – количество избыточных измерений.

Шаг 13. Используя диагональные элементы матрицы $\mathbf{Q} = \mathbf{N}^{-1}$, оцениваются ошибки по всем координатам пунктов опорной сети $m_{t_i} = \mu \sqrt{Q_{t_i}}$, где m_{t_i} – СКО определения координат; Q_{t_i} – обратный вес оцениваемой коор-

динаты. Далее вычисляется СКО положения пунктов опорной сети $m_p = \sqrt{m_X^2 + m_Y^2 + m_H^2}$.

Шаг 14. Расчеты, аналогичные шагам 10–13, повторяются для каждой полученной матрицы \mathbf{N}_i , и из полученных значений m_p находят среднее.

Как было описано ранее, с каждого пункта опорной сети определяются координаты центров специальных марок, относительно которых выполняется внешнее ориентирование единой точечной модели в заданную СК. Тогда СКО определения пространственного положения центра марки m_c (рис. 5) можно вычислить из выражения

$$m_c = \sqrt{m_p^2 + m_{\text{изм}}^2}, \quad (3)$$

где $m_{\text{изм}}$ – СКО измерений, равная

$$m_{\text{изм}} = \sqrt{m_S^2 + 2 \left(S^2 m_\beta^2 \left(1 / \rho^2 \right) \right)}.$$

При выполнении измерений прибором с точностью $m_\beta = 5''$, $m_S = 2$ мм и S , не превышающем 20 м (как упоминалось ранее), $m_{\text{изм}}$ не превысит 2 мм.

Проектирование сканерной сети

Для проектирования и оценки точности пунктов сканерной сети первоначально приведем технологическую схему выполнения измерений и обработки результатов измерений.

Первую станцию ЛС предлагается устанавливать вблизи начального пункта опорной сети таким образом, чтобы обеспечивалась видимость на специальные марки, центры которых определены при построении опорной сети. Выполняется круговое лазерное сканирование, в том числе и сканирование специальных марок. Далее устанавливается следующая станция ЛС на расстоянии 15–20 м от начальной станции таким образом, чтобы между предыдущей и последующей станцией образовывалась область перекрытия и выполнялось круговое сканирование; при этом ориентирование на начальную станцию ЛС (как правило) не выполняется. До конечного пункта опорной сети станции ЛС устанавли-

ваются последовательно, аналогично второй станции ЛС. Вблизи конечного пункта опорной сети измерения выполняются аналогично начальной станции ЛС. Таким образом развивается сканерная сеть между всеми пунктами опорной сети (см. рис. 5).

Обработка результатов выполняется в два этапа. В первую очередь выполняется взаимное ориентирование всех станций ЛС в единую модель. Вторым этапом выполняется преобразование координат из СК лазерного сканера в СК опорной сети.

С учетом вышеизложенного при проектировании сканерной сети необходимо определить:

- СКО определения положения центров специальных марок лазерным сканером;
- СКО преобразования координат станций ЛС из СК лазерного сканера в СК опорной сети;
- СКО взаимного ориентирования двух смежных станций ЛС;
- условия накопления СКО взаимного ориентирования всех станций ЛС между начальным и конечным пунктами опорной сети;
- СКО положения станций ЛС.

Тогда на основании изложенного может быть сформирована следующая методика проектирования сканерной сети.

Шаг 1. По цифровому генеральному плану определяются приближенные пространственные координаты станций ЛС и вычисляются горизонтальные проложения S между ними.

Шаг 2. Определяются СКО измерений лазерным сканером зенитных расстояний m_z , наклонных расстояний m_D и горизонтальных направлений m_N из технического паспорта прибора. Тогда СКО лазерного сканирования можно представить выражением $m_{scan} = \sqrt{m_D^2 + m_N^2 D^2 + m_z^2 D^2}$, где m_N и m_z выражаются в радианах.

Шаг 3. В зависимости от производителя и модели прибора СКО определения положения центров специальных марок $m_{c.scan}$ индивидуальна и максимально может достигаться на определенном в настройках расстоянии от лазерного сканера. Однако не все приборы

имеют устройства наведения на специальные марки, и определение положения их центров производится во время камеральной обработки. При этом в данном случае СКО определения положения центров специальных марок $m_{c.scan}$ лазерным сканером зависит от разрешения сканирования ψ , расстояния R от станции ЛС до марки и СКО лазерного сканирования m_{scan} . Согласно исследованию [15] зависимость $m_{c.scan}$ от ψ и R носит экспоненциальный характер, возрастает с увеличением ψ и R и может быть вычислена по формуле [15]

$$m_{c.scan} = (0,22e^{0,03R})e^{(5,9R^{0,615})\psi}. \quad (4)$$

Так, при $R = 20$ м (как приводилось ранее, расстояние до марки выбирается в пределах 10–20 м) и $\psi = 3$ мм ($0^\circ 1' 1,88''$) максимальная $m_{c.scan} = 0,76$ мм.

Отметим, что $m_{c.scan}$ также должна включать СКО определения положения центра специальной марки m_c при построении опорной сети, вычисляемое из выражения (3). Тогда выражение (4) примет вид

$$m_{c.scan} = \sqrt{m_c^2 + \left((0,22e^{0,03R})e^{(5,9R^{0,615})\psi} \right)^2}. \quad (5)$$

В случае если $m_{c.scan}$ определено техническими характеристиками прибора (обозначим параметр как $m_{c.scan.тех}$), то выражение (5) примет вид

$$m_{c.scan} = \sqrt{m_c^2 + m_{c.scan.тех}^2}.$$

Шаг 4. Преобразование координат начальной $t.St_i$ и конечной $t.St_j$ станций ЛС из системы координат лазерного сканера в систему координат опорной сети выполняется относительно центров специальных марок. Следовательно, СКО преобразования координат станции ЛС $m_{t.St_i,j}$ зависит от значений $m_{c.scan_i}$ для каждой марки и количества марок k , которые были отсканированы со станции ЛС,

и может быть вычислена по преобразованной формуле [16, 17]:

$$m_{t.St_{i,j}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k m_{c.scan} \cdot \sqrt{k} \quad (6)$$

Шаг 5. Для вычисления СКО взаимного ориентирования $m_{Bз.оп}$ был проанализирован график зависимости значений $m_{Bз.оп}$ от расстояния между двумя станциями (см. рис. 2, а). Из графика видно, что зависимость представляет собой линейную функцию: чем больше расстояние между станциями ЛС, тем больше значение $m_{Bз.оп}$. На основании этого была подобрана аппроксимирующая функция методом наименьших квадратов. Так, значение $m_{Bз.оп}$ при $\psi = 6,3$ и дальности сканирования 100 м можно вычислить по формуле

$$m_{Bз.оп} = 6,8 \cdot 10^{-5} S + 0,0081.$$

Шаг 6. Вычисление координат второй и последующих станций ЛС выполняется через преобразование в пространстве, которое можно записать с помощью преобразования Гельмерта. При этом масштабный коэффициент при отсутствии систематических погрешностей измерений равен единице. Тогда выражение примет вид $S_{t_j} = t + R S_{t_i}$, где S_{t_j} и S_{t_i} – вектор-столбец (3×1) координат последующей и предыдущей станции ЛС; t – вектор-столбец (3×1) смещения; R – матрица поворота (3×3).

При последовательном взаимном ориентировании станций ЛС в единую точечную модель из-за накопления $m_{Bз.оп}$ происходит пространственное смещение положения станций ЛС. Так как на начальной и конечной станции ЛС между пунктами опорной сети определяются центры специальных марок, то СКО смещения начальной и конечной станции ЛС m_{Δ_j} будет минимальной. Следовательно, накопление ошибок распределяется между всеми станциями ЛС и максимальное m_{Δ} следует ожидать в середине

сети. Тогда m_{Δ} для наиболее слабого пункта сканерной сети:

$$m_{\Delta} = \frac{m_{Bз.оп}}{2} \sqrt{n},$$

где n – количество станций ЛС между двумя пунктами опорной сети.

Шаг 7. С учетом СКО определения положения начальной и конечной станций ЛС, которые равны $m_{p.St_{i,j}} = m_{t.St_{i,j}}$, СКО определения положения $m_{p.St}$ наиболее слабого пункта сканерной сети можно вычислить по формуле

$$m_{p.St} = \frac{m_{Bз.оп} + \sqrt{m_{t.St_i}^2 + m_{t.St_j}^2}}{2} \sqrt{n}.$$

Аналогично вычисления производятся для всех участков сканерной сети между всеми пунктами опорной сети и вычисляются $m_{p.St}$ наиболее слабых пунктов.

Выводы

С повышением уровня активности применения метода НЛС для выполнения геодезической съемки территорий промышленных объектов становится актуальным совершенствование существующих методик, в том числе и методик проектирования и построения ГС. Для этого в работе проведен анализ особенностей НЛС промышленных объектов. В связи с тем, что методы обработки напрямую влияют на методику выполнения измерений, выполнен анализ методов взаимного и внешнего ориентирования результатов лазерного сканирования.

На основании практического опыта предложено проектирование ГС выполнять с учетом того, что взаимное ориентирование моделей основывается на использовании точек сканирования, а внешнее ориентирование выполняется аналитическим методом с использованием специальных марок. В ходе исследования выявлена зависимость уменьшения значений СКО взаимного ориентирования и значений СКО определения положе-

ния станций ЛС при уменьшении расстояний между станциями, участвующими в оптимизации.

В соответствии с результатами проведенного исследования разработана технологическая схема построения ГС, элементами которой являются: рекогносцировка, проектирование опорной сети, проектирование сканерной сети между опорными пунктами, построение опорной и сканерной сети и трансформация единой модели в заданную СК. С учетом специфики технологической схемы разработана последовательность проектирования и оценки точности положения пунктов ГС.

Особенностью предложенной методики относительно классических методов является учет специфик метода НЛС, таких как: большое количество станций, короткие расстояния между ними и особенности разрешения сканирования, а также методы взаимного и внешнего ориентирования результатов НЛС. Проектирование ГС как комплекса, включающего опорную и сканерную сеть, позволяет

детально определить состав измерений и методы их обработки.

Построение ГС по предложенной методике с учетом разбивки всей территории технологической установки на зоны, границы которых совпадают с границами технологических блоков, позволяет обеспечить площадку работ достаточным количеством пунктов для последующего внешнего ориентирования отдельных технологических блоков внутри установки в единую модель, исключая коллизии со смежными блоками.

Разработанная методика проектирования ГС позволяет оценить возможные результаты построения ГС до начала выполнения работ, тем самым позволяя внести изменения в состав измерений, схемы сети и оборудования для повышения точности в случае необходимости.

Приведенная методика проектирования и построения ГС может эффективно применяться в процессе выполнения НЛС больших территорий промышленных объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Середович В. А., Комиссаров А. В., Комиссаров Д. В., Широкова Т. А. Наземное лазерное сканирование : монография. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 261 с.
2. Шульц Р. В. Наземное лазерное сканирование в задачах инженерной геодезии. – Кишинев : Palmarium Academic Publishing, 2013. – 348 с.
3. Gruen A., Akca D. Least squares 3D surface and curve matching // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2005. – Vol. 59 (3). – P. 151–174.
4. Besl P. J., McKay N. D. A method for registration of 3-D shapes // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1992. – Vol. 14 (2). – P. 239–356.
5. Zhang Z. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces // International Journal of Computer Vision. – 1994. – Vol. 13 (2). – P. 119–148.
6. Никонов А. В., Чешева И. Н. О точности построения планово-высотной геодезической разбивочной основы наземными методами. Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 9 т. (Новосибирск, 24–26 апреля 2019 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. Т. 1, № 1. – С. 130–143.
7. Дуда П. И., Таратинский Г. М., Степанов Д. И. Методика проектирования геодезических сетей в условиях применения наземного лазерного сканирования // Маркшейдерский вестник. – 2010. – Т. 77, № 3. – С. 34–39.
8. Мазуров Б. Т., Падве В. А. Метод наименьших квадратов (статика, динамика, модели с уточняемой структурой) // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 2. – С. 22–35.
9. Медведская Т. М. Исследование точности опорных сетей для геодезического мониторинга крупногабаритного промышленного оборудования // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 56–65.
10. Хатум Х. М., Мустафин М. Г. Проектирование и оценка геодезических наблюдений за деформациями обнажений выемки при строительстве станции метрополитена // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 4. – С. 45–57.
11. Шевченко Г. Г. Разработка технологии геодезического мониторинга зданий и сооружений способом свободного stationирования с использованием поискового метода нелинейного программирования: дис. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2020. – 212 с.

12. Deb S. Variational Monte Carlo Technique // Resonance. – 2014. – Vol. 19. – P. 713–738.
13. С. П. Войтенко, Р. В. Шульц, О. Й. Кузьмич, Ю. В. Кравченко. Математичне оброблення геодезичних вимірів : підручник. – К. : Знання, 2015. – 654 с.
14. Гордеев В. А. Теория ошибок измерений и уравнивательные вычисления : учеб. пособие. – Екатеринбург : УГГУ, 2004. – 429 с.
15. Гриднев С. О., Охотин А. Л. Анализ погрешностей ориентирно-соединительной съемки, выполненной лазерной сканирующей системой // Вестник ИрГТУ. – 2013. – Т. 80, № 9. – С. 130–139.
16. Горяинов И. В. О наилучшей конфигурации обратной линейно-угловой засечки и необходимом количестве пунктов для достижения заданной точности // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – № 4. – С. 41–47.
17. Горяинов И. В. Экспериментальные исследования применения обратной линейно-угловой засечки для оценки стабильности пунктов плановой деформационной геодезической сети // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 28–39.

Получено 10.12.2021

© А. А. Шарафутдинова, М. Я. Брын, 2022

TECHNIQUE FOR DESIGNING AND CONSTRUCTING A GEODETIC NETWORK WHEN PERFORMING TERRESTRIAL LASER SCANNING AT INDUSTRIAL OBJECT

Anzhelika A. Sharafutdinova

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moscow Prospect St., Saint Petersburg, 190031, Russia, Ph. D. Student, Department of Engineering Geodesy; Trimetari Consulting LLC, 12, Marshal Blucher Prospect St., Saint-Petersburg, 190031, Russia, Engineer Surveyor, phone: (911)279-56-07, e-mail: anzhelikaalexeevna@gmail.com

Michael Ja. Bryn

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moscow Prospect St., Saint Petersburg, 190031, Russia, D. Sc., Professor, Department of Engineering Geodesy, phone: (921)348-80-35, e-mail: bryn@pgups.ru

When performing terrestrial laser scanning of large industrial facilities, it must give special attention to designing and establishing a geodetic network to datum transformation measurements into a coordinate system. However, the design of geodetic networks by traditional geodesy methods does not consider all the features of the technique of terrestrial laser scanning. Also worth taking into account is the specifics of laser scanning data processing. Therefore, it is necessary to develop a methodology for designing and establishing a geodetic network in the context of terrestrial laser scanning. For this, the article analyzes the features of terrestrial laser scanning of large industrial facilities and methods for measurement results processing. Based on the analysis and practical experience, developing a flow chart for establishing a geodetic network was on the condition that registration of point cloud performing used iterative closest points algorithm and datum transformation coordinate system performing using HDS targets. Also, based on practical experience, the dependence of the values of the root-mean-square error of registration point cloud and the root-mean-square error of laser scanning station positioning on the distance between the stations. As a result, a methodology for designing and establishing the geodetic network has been substantiated, including two stages. The first stage is the design and accuracy assessment of the geodetic control network, the coordinates of which are determined from the datum points by traditional geodesy methods. The second stage is the design and accuracy assessment of the laser scanning station positioning, the coordinates of which are determined from the geodetic control network.

Keywords: ICP algorithm, point cloud registration, datum transformation, geodetic network, Monte Carlo method, terrestrial laser scanning, accuracy assessment, designing, network of laser scanning station

REFERENCES

1. Seredovich, V. A., Komissarov, A. V., Komissarov, D. V., & Shirokova, T. A. (2009). *Nazemnoe lazernoe skanirovanie [Terrestrial laser scanning]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 261 p. [in Russian].

2. Schulz, R. V. (2013). *Nazemnoye lazernoye skanirovaniye v zadachakh inzhenernoy ge-odezii [Terrestrial laser scanning in engineering geodesy]*. Kishinev: Palmarium Academic Publ., 348 p. [In Russian].
3. Gruen, A., & Akca, D. (2005). Least squares 3D surface and curve matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(3), 151–174.
4. Besl, P. J., & McKay N. D. (1992). A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), 239–356.
5. Zhang, Z. (1994). Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. *International Journal of Computer Vision*, 13(2), 119–148.
6. Nikonov, A. V., & Chesheva, I. N. (2019). Accuracy of the geodetic control network developed by land methods. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2019: Mezhdunarodnoynauchnoy konferentsii: T. 1, no. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, markshejderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2019: International Scientific Conference: Vol. 1, No. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 130–143). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
7. Duda, P. I., Taratinsky, G. M., & Stepanov, D. I. (2010). Methodology for designing geodetic networks in the conditions of using terrestrial laser scanning. *Marksheyderskiy vestnik [Mine Surveying Bulletin]*, 77(3), 34–39 [in Russian].
8. Mazurov, B. T., & Padve, V. A. (2017). The method of least squares (statics, dynamics, and models with updated structure). *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(2), 22–35 [in Russian].
9. Medvedskaya, T. M. (2019). Study of accuracy of reference networks for geodesic monitoring of large-size industrial machinery. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 56–65 [in Russian].
10. Hatoum, H. M., & Mustafin, M. G. (2020). Methodology for designing and evaluating results of geodesic observations of engineering structures using the least square method. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(4), 45–57 [in Russian].
11. Shevchenko, G. G. (2020). Development of technology for geodetic monitoring of buildings and structures by the method of free stationing using the search method of nonlinear programming. *Candidate's thesis*. Saint-Peterburg, 212 p. [in Russian].
12. Deb, S. (2014). Variational Monte Carlo Technique. *Resonance*, 19, 713–738.
13. Voitenko, C. P., Schulz, R. V., Kuzmich, O. Y., & Kravchenko, Y. V. (2015). *Matematychnye obroblyennya heodezychnykh vymiriv: pidruchnyk [Mathematical processing of geodetic measurements: a textbook]*. Kiev: Znannya Publ., 654 p. [in Ukrainian].
14. Gordeev, V. A. (2004). *Teoriya oshibok izmereniy i uravnitel'nyye vychisleniya [Measurement error theory and equalization calculations]*. Ekaterinburg: UGGU Publ., 429 p. [in Russian].
15. Gridnev, S. O., & Okhotin, A. L. (2013). Analysis of errors of orientation-connecting survey performed by a laser scanning system. *Vestnik IrGTU [Vestnik ISTU]*, 80(9), 130–139 [in Russian].
16. Goryainov, I. V. (2016). On the best configuration of the inverse linear-angular serifs and the required amount of points to achieve the desired accuracy. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 4, 41–47 [in Russian].
17. Goryainov, I. V. (2018). Pilot studies of linear–angular resection application for point stability estimation in horizontal deformation geodetic network. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(1), 28–39 [in Russian].

Received 10.12.2021

© A. A. Sharafutdinova, M. Ja. Bryn, 2022