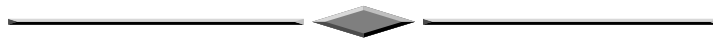


ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ



УДК 528.8:004.9

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-58-67

СОЗДАНИЕ МЕТРИЧЕСКОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ «ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА» АКТИВНЫМ МЕТОДОМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Максим Александрович Алтынецв

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (952)915-29-80, e-mail: mnbcv@mail.ru

Павел Александрович Карпик

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1, магистрант, тел. (983)319-08-09, e-mail: karpikpavel@yandex.ru

В последнее время активно развивается направление, посвященное созданию трехмерных метрических имитационных моделей цифровых двойников. Цель создания цифровых двойников заключается в возможности переноса сложных технологических производственных процессов, которые выполняются во время наблюдений за состоянием реальных объектов, в компьютерную среду, где сначала формируется информационная трехмерная модель. В условиях проектирования, строительства и эксплуатации реальных объектов при внесении в них изменений ключевыми являются требования точности и оперативности. Данным требованиям удовлетворяет такой активный метод дистанционного зондирования Земли, как лазерное сканирование. Для моделирования объектов на сравнительно небольшой площади с целью достижения максимальной точности применяют наземное лазерное сканирование. Задача создания моделей цифровых двойников предъявляет повышенные требования к выбору методики полевого этапа лазерного сканирования и имеет множество особенностей при выполнении трехмерного моделирования по полевым данным. В статье предложена методика трехмерного моделирования с целью создания информационных моделей сооружений. Выполнен анализ точности результатов наземного лазерного сканирования. В качестве объекта исследования было выбрано подлежащее реконструкции складское помещение. На примере данных лазерного сканирования этого объекта было показано, что рассматриваемый метод позволяет обеспечить точность построения трехмерной информационной модели до 1 см.

Ключевые слова: активные методы дистанционного зондирования Земли, наземное лазерное сканирование, трехмерное моделирование, информационная модель здания, цифровой двойник, имитационная модель

Введение

Методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) широко распространены во многих сферах производственной деятельности человека. ДЗЗ является процессом,

в ходе которого выполняется сбор данных об объекте и окружающей его территории без непосредственного контакта с ними. К ДЗЗ относятся съемки, выполняемые с воздушных и космических летательных аппаратов, подводных лодок и судов, наземных стан-

ций. В зависимости от источника энергии методы ДЗЗ разделяют на пассивные и активные. Пассивные методы основаны на регистрации отраженной от объекта съемки солнечной энергии или собственного электромагнитного излучения его поверхности. Выделяют фотографические, оптико-механические и оптико-электронные пассивные съемочные системы. В результате съемки с применением пассивных методов получают снимки в различных диапазонах электромагнитного спектра от 0,25 мкм до 1 м. Активные методы основаны на том, что съемочная система посылает сигнал собственного источника энергии до объекта, а затем регистрирует отражение сигнала с помощью приемника излучения. Выделяют радиолокационные и лазерные активные съемочные системы. Преимуществом активных методов является большая чувствительность и точность измерений, возможность фиксации множественных отражений по пути следования излучения [1, 2].

Среди описанных методов ДЗЗ наивысшей точности измерений достигают посредством применения лазерных съемочных систем, установленных на наземных станциях. В этом случае процесс съемки называют наземным лазерным сканированием (НЛС). НЛС позволяет получать точечные модели территорий с высокой плотностью до нескольких точек на квадратный сантиметр и миллиметровой точностью, которые используются для решения различных топографических и инженерных задач.

Метод НЛС является наиболее оптимальным источником данных для решения задач трехмерного моделирования, в процессе которого выполняется построение координатно-метрических каркасных, поверхностных и твердотельных моделей реальных объектов с высокой степенью детализации. Преимуществом данного метода является также высокая скорость сбора информации на большой по площади территории с любой степенью застройки. Это позволяет, например, оперативно выполнять надежный контроль в процессе строительства и эксплуатации сооружений гражданской и производственной сферы. Трехмерные модели, создаваемые по данным НЛС, также являются основой для

построения более технологически сложных видов моделей – информационных и моделей цифровых двойников [3].

Создание информационных моделей и моделей «цифровых двойников»

Концепция информационной модели была предложена еще в 1974 г. [4]. Тогда она получила название BDS (building description system), что означает «система описания зданий». Суть этой концепции заключалась в создании чертежей зданий и их хранении в компьютерных базах данных. Дополнительно к геометрическим данным хранилась атрибутивная информация, описывающая составные элементы зданий, такие как крыша, стены, окна, двери, колонны и др., включая порядок следования материалов, из которых создаются эти элементы. Полное описание здания должно было производиться на определенный момент времени с возможностью обновления в будущем [4, 5]. Современное представление данной концепции отражено в виде термина «информационная модель здания» BIM (building information model). Данный термин был введен Г. А. ван Недервином и Ф. П. Толманом в 1992 г. [6].

Процесс информационного моделирования затрагивает все этапы жизненного цикла объекта от планирования и составления технического задания до его строительства, эксплуатации, ремонта и даже демонтажа. Современная BIM модель представляется в трехмерном виде, работа с ней производится в единой информационной среде с возможностью внесения изменений на различных этапах всеми участниками моделирования [5]. BIM модель отражает данные об объекте на определенный момент времени.

Дальнейшим развитием концепции цифрового моделирования стало появление понятия «цифровой двойник». Концепция «цифрового двойника» впервые была представлена в 2003 г. профессором Мичиганского университета Майклом Гривзом [7]. «Цифровой двойник» существенно расширяет понятие BIM.

Под цифровым двойником понимают компьютерную модель, которая копирует

поведение реального физического объекта. Модель цифрового двойника в течение всего цикла существования физического объекта симулирует режимы его работы, учитывая все внешние факторы и процессы управления, а также позволяет выполнить прогноз состояния развития данного объекта. Процесс создания цифрового двойника основан на имитационном моделировании, при котором в компьютерной среде возможно проводить испытания физических объектов, выполнять оптимизацию сложного производственного оборудования, предсказывать аварийные ситуации. Имитационная модель является универсальным средством исследования физических объектов и отдельных элементов сложных систем, описывает способы их взаимодействия, которые отражают последовательность действий, выполняемых в моделируемой системе [8–10].

Создание модели цифрового двойника сопровождается сложными технологическими процессами, и чтобы модель наиболее полно отражала сущность реального объекта, должны применяться исходные данные, полученные с максимально возможной точностью и детальностью. Данные НЛС среди всех методов ДЗЗ наилучшим образом соответствуют этим критериям. Каждый объект моделирования или группа объектов чаще всего представляют собой уникальные сооружения. При лазерном сканировании таких сооружений требуется учитывать их особенности. В зависимости от имеющегося геодезического оборудования, особенностей объекта моделирования и его

назначения применяют определенные методики лазерного сканирования, включающие создание технического проекта, рекогносцировку местности, создание съемочного обоснования, непосредственно лазерное сканирование, камеральную обработку его результатов [3, 11–20].

Наземное лазерное сканирование складского помещения

Весной 2020 г. Сибирским государственным университетом геосистем и технологий было выполнено лазерное сканирование подвещающегося реконструкции складского помещения, находящегося в г. Новосибирске. Целью сканирования являлось получение трехмерной информационной модели сооружения с точностью взаимного отображения несущих конструкций до 1 см и с возможностью дальнейшего обновления полученной модели в ходе реконструкции. Площадь сооружения составила 9 000 м². Съемка была выполнена с помощью наземного лазерного сканера Leica ScanStation 2, позволяющего измерять координаты точек объекта с точностью до 6 мм. На рис. 1 приведены фрагменты сканируемого помещения внутри и снаружи.

Лазерное сканирование было выполнено с 18 станций. Для взаимного ориентирования сканов применялись черно-белые марки, размещенные на стенах и колоннах по периметру помещения, а также марка Leica HDS (рис. 2). Всего было применено 33 марки.



Рис. 1. Фотографии складского помещения

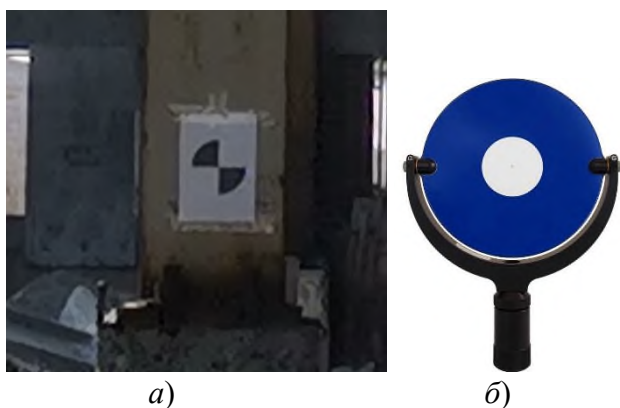


Рис. 2. Сканерные марки:

а) черно-белая марка; б) марка Leica HDS

На рис. 3 приведена схема размещения марок, сканерных станций и результат уравнивания данных НЛС. Цвет отображения отдельных точек массива ТЛО определяется значениями их отметок.

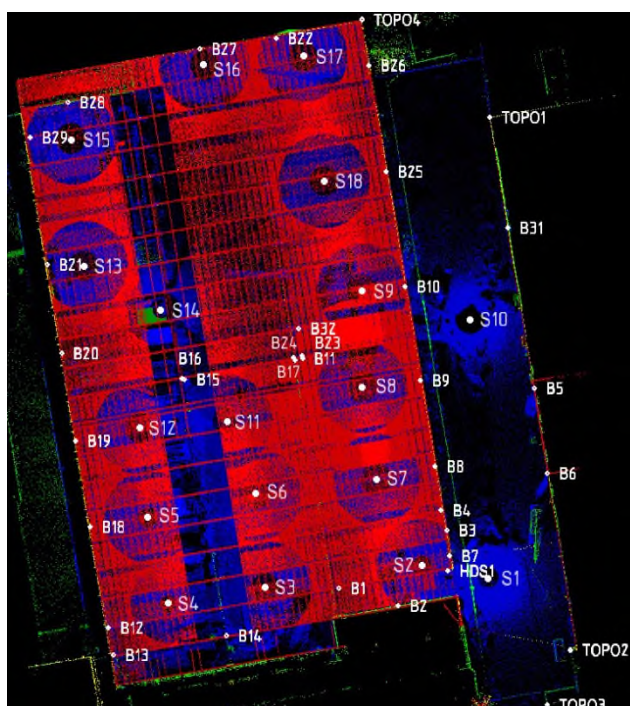


Рис. 3. Схема размещения марок и сканерных станций:

S1–S18 – станции сканирования; B1–B31 – черно-белые марки; HDS1 – марка Leica HDS; ТОРО1–ТОРО4 – точки с топографического плана для внешнего ориентирования результатов лазерного сканирования

С каждой станции выполнялся скан с линейным разрешением 10 см по горизонтали и 3 см по вертикали на расстоянии 50 м от сканера, а также детальное с максимальным разрешением сканирование 5–6 марок, размещенных на противоположных стенах и близлежащих колоннах. Среди данных марок в зонах взаимного перекрытия соседних сканов оказывалось 3–4. Разрешение панорамного скана выбиралось исходя из обеспечения необходимой плотности данных и приемлемого времени сканирования. Угол сканирования по вертикали задавался в диапазоне от минус 30 до 45°. Детально отсканированные марки применялись для автоматического взаимного ориентирования сканов. Оценка точности взаимного ориентирования сканов приведена в табл. 1.

Таблица 1

Оценка точности результатов взаимного ориентирования сканов

Вид ошибки	По маркам		
	X, м	Y, м	Z, м
Средняя ошибка	0,002	0,001	0,001
Средняя квадратическая ошибка	0,002	0,001	0,001
Максимальная ошибка	0,012	0,005	0,004

Для создания трехмерной информационной модели складского помещения требовалось получение точечной модели только с максимальной точностью взаимного положения объектов. Поэтому определение координат марок и сканерных станций во внешней системе координат не выполнялось. Ориентирование точечной модели во внешнюю систему осуществлялось с помощью координат четырех характерных точек, измеренных по топографическому плану. Фрагмент топографического плана приведен на рис. 4. Положение характерных точек показано на рис. 3. В табл. 2 приведена оценка точности внешнего ориентирования точечной модели.

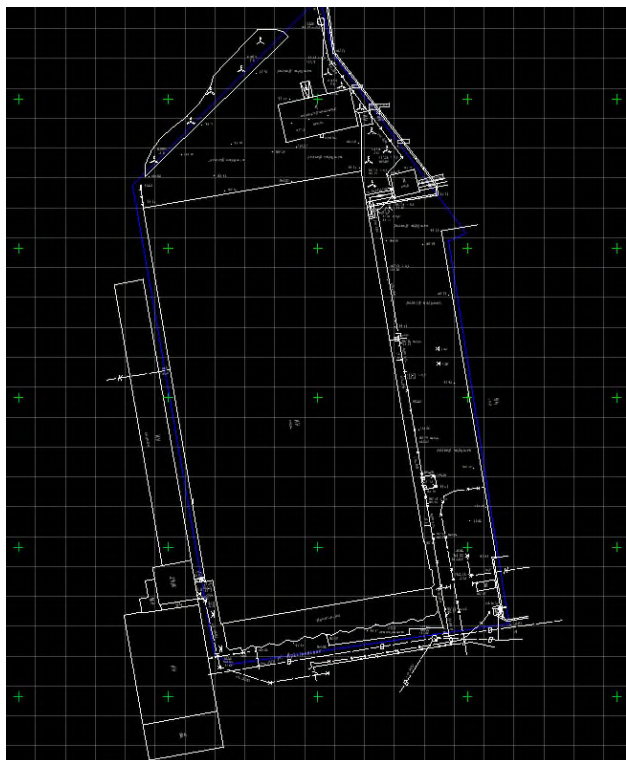


Рис. 4. Фрагмент топографического плана масштаба 1 : 500 для внешнего ориентирования сканов

Таблица 2

Оценка точности результатов внешнего ориентирования точечной модели

Вид ошибки	По точкам ТОРО1–ТОРО4		
	X, м	Y, м	Z, м
Средняя ошибка	0,075	0,068	0,037
Средняя квадратическая ошибка	0,081	0,073	0,040
Максимальная ошибка	0,123	0,082	0,075

Полученная точечная модель далее была классифицирована на точки класса «земля» и все остальные. По точкам класса «земля» выполнялось построение цифровой модели рельефа (ЦМР), которая в дальнейшем использовалась как часть информационной модели здания.

Создание трехмерной информационной модели складского помещения

Для создания трехмерных информационных моделей и моделей цифровых двойников

применяется специализированное программное обеспечение (ПО). Такое ПО содержит большую библиотеку элементов, соответствующих определенным строительным нормам и правилам, включает возможности по созданию собственных элементов и назначению им соответствующих свойств. В отличие от многих других программ трехмерного моделирования и систем автоматизированного проектирования (САПР), в программах, поддерживающих BIM технологии, можно, например, не просто создавать твердотельный элемент, соответствующий элементу здания, но и назначать ему определенный класс (стена, балка, крыша и т. д.) и выбирать его материал.

Как правило, специализированное ПО информационного моделирования не содержит определенных инструментов, позволяющих в автоматизированном режиме вписывать трехмерные элементы в точечную модель. Моделирование выполняется интерактивным методом. Наличие автоматизированных инструментов трехмерного моделирования в большей степени присуще программам, нацеленным на обработку данных лазерного сканирования. ПО Leica Cyclone, используемое лазерным сканером ScanStation 2, включает наиболее мощные автоматизированные инструменты, но не поддерживает BIM технологии. Поэтому компанией Leica для различных программ информационного моделирования и систем автоматизированного проектирования был разработан специальный плагин CloudWorx, позволяющий загружать базу данных, созданную в ПО Cyclone. Одной из таких программ информационного моделирования является Autodesk Revit. В данном случае плагин CloudWorx позволяет использовать многие автоматизированные инструменты из ПО Leica Cyclone в системе Revit [21].

В случае отсутствия плагина CloudWorx возможно выполнить трехмерное моделирование в Cyclone, а затем результаты импортировать в Revit. Недостатком данного способа является необходимость осуществления большого количества операций по редактированию трехмерной модели после импорта для того, чтобы она стала информационной. По этой причине часто проще выполнить импорт исходной точечной модели в систему BIM, где с самого начала осуществить процесс информа-

ционного моделирования. Данным способом было выполнено создание информационной модели складского помещения.

Методика моделирования помещения в Revit осуществлялась в следующем порядке:

- импорт точечной модели;
- импорт ЦМР в виде триангуляционной поверхности;
- задание временной системы координат с ориентированием оси Y вдоль длинной стороны помещения;
- трехмерное моделирование посредством вписывания элементов из библиотеки в массив ТЛО и редактирования их размеров и свойств в следующей последовательности: колонны; крепящиеся к колоннам балки; стены; балки крыши;
- создание поверхности крыши из металлопрофиля по формообразующим;
- назначение текстур трехмерным элементам;

– ввод атрибутивной информации.

На рис. 5 показано сечение результата трехмерного моделирования участка помещения, соответствующего колонне, балке и крыше. В процессе вписывания трехмерных элементов в точечную модель измерялись расстояния между гранями трехмерных элементов и соответствующими гранями в точечной модели. Если вписываемый элемент отклонялся в некоторых сечениях от точечной модели более чем на 1 см, элемент разбивался на составные части.

На рис. 6 приведен итоговый результат трехмерного информационного моделирования. Созданная в Revit информационная модель складского помещения в процессе его реконструкции и повторного лазерного сканирования может быть оперативно обновлена. Данная информационная модель может служить в качестве исходного материала для создания модели цифрового двойника.

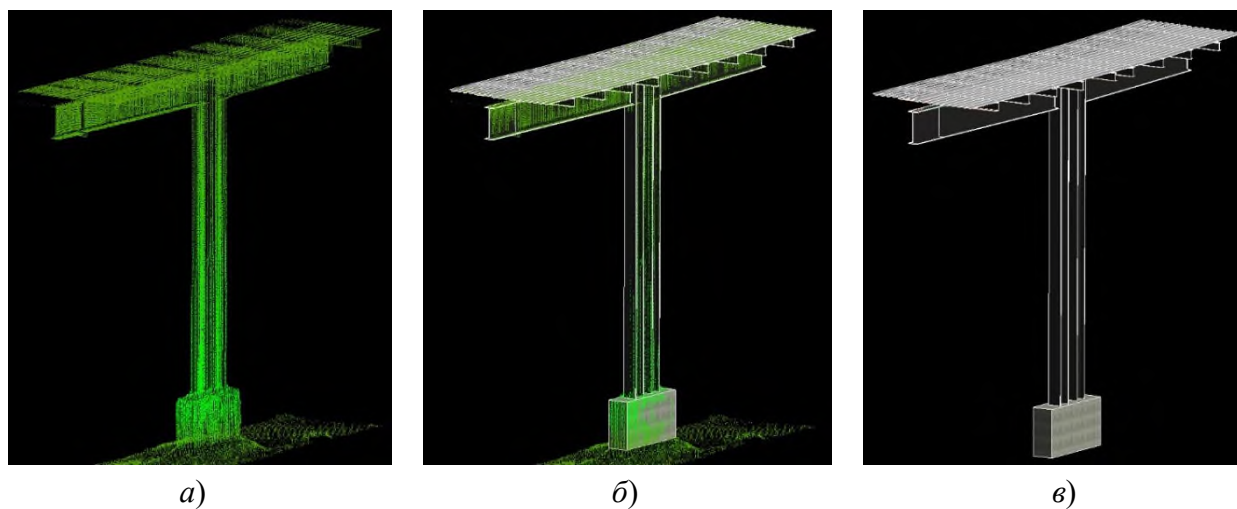


Рис. 5. Результаты трехмерного моделирования фрагмента помещения:
а) точечная модель; б) точечная и трехмерная модель; в) трехмерная модель

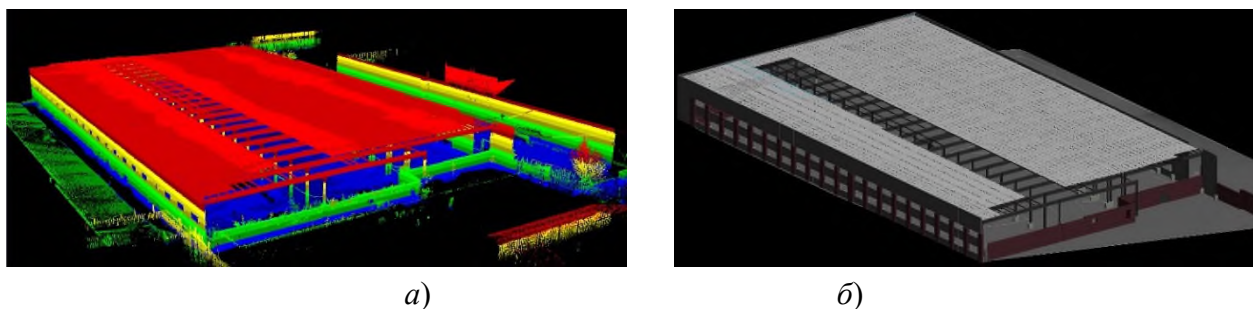


Рис. 6. Результаты трехмерного моделирования складского помещения:
а) точечная модель; б) трехмерная модель

Заключение

Среди всех активных методов ДЗЗ для создания цифровых трехмерных информационных моделей и моделей цифровых двойников отдельных сооружений за счет своей высокой точности и детальности наиболее оптимальным является метод НЛС. Созданная информационная модель складского помещения описывает состояние реального объекта, включая его тип, материал. Ошибка вписывания трехмерных элементов несущих конструкций, стен и крыши в массив ТЛО не превысила 1 см.

Данная информационная модель может являться основой для формирования имитационной модели «цифрового двойника». Создание трехмерных имитационных моделей позволяет значительно упростить производственные процессы при решении широкого круга задач в различных отраслях, одной из которых является нефтегазовая.

Например, в нефтегазовой отрасли трехмерное имитационное моделирование позволяет осуществлять контроль состояния различных сооружений, в частности защитных.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Разработка теории и технологических решений контроля состояния защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов методами активного дистанционного зондирования», № 0807-2020-0002).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сутырина Е. Н. Дистанционное зондирование Земли : учеб. пособие. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2013. – 165 с.
2. Назаров А. С. Фотограмметрия : учеб. пособие для студентов. – Минск : ТетраСистемс, 2006. – 368 с.
3. Алтынцев М. А., Карпик П. А. Методика создания цифровых трехмерных моделей объектов инфраструктуры нефтегазодобывающих комплексов с применением наземного лазерного сканирования // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 2. – С. 121–139.
4. Eastman C., Fisher D., Lafue G., Lividini J., Stoker D., Yessios C. An Outline of the Building Description System / Institute of Physical Planning, Carnegie-Mellon University, 1974. – № 50.
5. Рыбин Е. Н., Амбарян С. К., Аносов В. В., Гальцев Д. В., Фахратов М. А. BIM-технологии // Изв. вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2019. – Т. 1, № 1 (28). – С. 98–105.
6. Van Nederveen G. A., Tolman F. P. Modelling multiple views on buildings // Automation in Construction. – 1992. – Vol. 1 (3). – С. 215–224.
7. Grieves M. W. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. – LLC, 2014. – 7 p.
8. Кокорев Д. С., Юрин А. А. Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса // Colloquium-journal. – 2019. – № 10 (34). – С. 31–35.
9. Васильев А. Н., Тархов Д. А., Малыгина Г. Ф. Методы создания цифровых двойников на основе нейросетевого моделирования // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2018. – Т. 14, № 3. – С. 521–532.
10. Петров А. В. Имитация как основа технологии цифровых двойников. // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 10. – С. 56–66.
11. Середович В. А., Комиссаров А. В., Комиссаров Д. В., Широкова Т. А. Наземное лазерное сканирование : монография. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 261 с.
12. Середович В. А., Алтынцев М. А., Попов Р. А. Особенности применения данных различных видов лазерного сканирования при мониторинге природных и промышленных объектов // Вычислительные технологии. – 2013. – Т. 18.1. – С. 141–144.
13. Комиссаров Д. В., Миллер Е. В., Аверков М. А., Загородний В. В. Построение трехмерных моделей спортивных сооружений средствами лазерного сканирования (на примере Новосибирского биатлонного комплекса) // ГЕО-Сибирь-2005. Науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск : СГГА, 2005. Т. 1, ч. 1. – С. 216–220.
14. Ткачева А. А., Фаворская М. Н. Моделирование трехмерных сцен лесных участков по данным лазерного сканирования и аэрофотоснимкам // Информационно-управляющие системы. – 2015. – № 6. – С. 40–49.

15. Середович В. А., Середович А. В., Комиссаров А. В., Радченко А. В., Дементьева О. А., Радченко Л. К., Усиков А. В. Особенности создания цифровых моделей городских территорий средствами наземного лазерного сканирования // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск : СГГА, 2009. Т. 1, ч. 1. – С. 136–140.
16. Herban I., Vilceanu C. B. Terrestrial laser scanning used for 3D modeling // 12th International Multi-disciplinary Scientific GeoConference, 2012.
17. Катрич А. Е., Барина Т. А. Обработка данных наземного лазерного сканирования для получения 3D-моделей объектов / «Научные достижения и открытия современной молодежи» : сб. статей победителей международной научно-практической конференции: в 2-х частях. – Пенза : Наука и просвещение, 2017. – С. 1213–1215.
18. Иванов А. В., Горохова Е. И., Горохова Л. И., Мурашев К. В. Создание 3D-модели планетария СГГА по данным наземного лазерного сканирования для модернизации звездного зала // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. – С. 150–155.
19. Комиссаров А. В., Аманова А. К., Широкова Т. А. Разработка методики трехмерного моделирования объектов ситуации и рельефа городской территории по данным наземного лазерного сканирования г. Томска // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 1, ч. 3. – С. 79–83.
20. Алтынцев М. А., Чернов А. В. Применение технологии лазерного сканирования для моделирования объектов недвижимости в 3D-кадастре // Геодезия и картография. – 2018. – Т. 79. – № 9. – С. 52–63.
21. Программное обеспечение Leica CloudWorx Revit [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.geo optic.ru/product/leica-cloudworx-revit>.

Получено 20.08.2020

© М. А. Алтынцев, П. А. Карпик, 2020

CREATING METRIC SIMULATED MODEL OF A "DIGITAL TWIN" BY THE ACTIVE EARTH REMOTE SENSING METHOD

Maxim A. Altyntsev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D, Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (952)915-29-80, e-mail: mnbcv@mail.ru

Pavel A. Karpik

Novosibirsk State University, 1, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia, Graduate, phone: (983)319-08-09, e-mail: karpikpavel@yandex.ru

Recently, a line of research devoted to the creation of three-dimensional metric simulated models of digital twins has been actively developing. The goal of creating digital twins is to transfer the complicated manufacturing processes, that are performed while monitoring the state of real objects, to a computer environment where a three-dimensional information model was first created. The key requirements are accuracy and efficiency within the conditions of design, construction and operation of real objects when making changes to them. These requirements are met by an active method of the Earth remote sensing, such as laser scanning. Terrestrial laser scanning is used to model objects over a relatively small area and to achieve maximum accuracy. The task of creating digital twin models poses higher requirements for choosing a field stage laser scanning technique and has many features when performing three-dimensional modeling using field data. The article proposes technique of three-dimensional modeling for creating building information models. It analyses the accuracy of the terrestrial laser scanning results. A warehouse space to be reconstructed was selected as the subject of the study. Using the example of laser scanning data for this object, it was indicated that the method under consideration allows ensuring the accuracy of creating a three-dimensional information model

up to 1 cm. The laser scanning data of the object show that the considered method ensures 3D information model accuracy up to 1 cm.

Keywords: active Earth remote sensing methods, terrestrial laser scanning, 3D modelling, building information model, digital twin, simulated model

REFERENCES

1. Sutyryna, A. A. (2013). *Distantzionnoe zondirovanie Zemli [Earth remote sensing]*. Irkutsk: ISU Publ., 165 p. [in Russian].
2. Nazarov, A. S. (2006). *Fotogrammetriya [Photogrammetry]*. Minsk: Tetrasistems Publ., 368 p. [in Russian].
3. Altyntsev, M. A., & Karpik, P. A. (2020). The technique for creating digital three-dimensional models of oil and gas manufacturing facility object infrastructure using terrestrial laser scanning. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(2), 121–139 [in Russian].
4. Eastman, C., Fisher, D., Lafue, G., Lividini, J., Stoker, D., & Yessios, C. (1974). *An Outline of the Building Description System: No. 50*. Institute of Physical Planning, Carnegie-Mellon University.
5. Rybin, E. N., Ambaryan, S. K., Anosov, V. V., Galcev, D. V., & Fakhratov, M. A. (2019). BIM technology. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real Estate, I*, 1(28), 98–105 [in Russian].
6. Van Nederveen, G. A., & Tolman, F. P. (1992). Modelling multiple views on buildings. *Automation in Construction*, 1(3), 215–224.
7. Grieves, M. W. (2014). *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. LLC Publ., 7 p.
8. Kokorev, D. S., & Yurin, A. A. (2019). Digital twins: concept, types and benefits for business. *Colloquium-Journal*, 10(34), 31–35 [in Russian].
9. Vasiliev, G. G., Salnikov, A. P., Katanov, A. A., Lezhnev, M. A., Leonovich I. A., & Likhovtsev, M. V. (2014). About application of surface laser scanning in the oil and gas industry. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie [Science & Technologies: Oil and Gas Products Pipeline Transportation]*, 4(16), 47–51 [in Russian].
10. Petrov, A. V. (2018). Simulation as the basis of digital twin technology. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 22(10), 56–66 [in Russian].
11. 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].
12. Seredovich, V. A., Altyntsev M. A., & Popov, R. A. (2013). Features of different laser scanning data type application in monitoring of natural and industrial objects. *Vychislitel'nye tekhnologii [Computational Technologies]*, 18.1, 141–144 [in Russian].
13. Komissarov, D. V., Miller, E. V., Averkov, M. A., & Zagorodniy, V. V. (2005). Generating three-dimensional models of sports facilities by means of laser scanning (on the example of Novosibirsk biathlon complex). In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2005: T. 1, ch. 1 [Proceedings of GEO-Siberia-2005: Vol. 5]* (pp. 216–220). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
14. Tkacheva, A. A., & Favorskaya, M. N. (2015). Modeling of 3D Forest Scenes by Laser Scanning and Air Photo Data. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy [Information and Control Systems]*, 6, 40–49 [in Russian].
15. Seredovich, V. A., Seredovich, A. V., Komissarov, A. V., Radchenko, A. V., Demytyeva, O. A., Radchenko, L. K., & Usikov, A. V. (2009). Features of city territories digital model development by terrestrial laser scanning. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2009: T. 1, ch. 1 [Proceedings of GEO-Siberia-2009: Vol. 1, Part 1]* (pp. 136–140). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
16. Herban, I., & Vilceanu, C. B. (2012). Terrestrial laser scanning used for 3D modeling. *12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*.
17. Katrich, A. Y., & Barinova, T. A. (2017). Data processing of terrestrial laser scanning to produce 3d models of objects. In *Sbornik statey pobediteley mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Nauchnye dostizheniya i otkrytiya sovremennoy molodezhi [Proceedings of International Scientific Conference Champions: Scientific Achievements and Discoveries of Modern Youth]* (pp. 1213–1215). Penza: Nauka i prosveshchenie Publ. [in Russian].

18. Ivanov, A. V., Gorokhova, E. I., Gorokhova, L. I., & Murashov, K. V. (2014). Creating a 3D model of the planetarium SSGA according to terrestrial laser scanning for modernization of the star hall. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2014: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2 Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, markshejderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2014: International Scientific Conference: Vol. 2. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 150–155). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

19. Komissarov, A. V., Amanova, A. K., & Shirokova, T. A. (2010). Development of 3D modeling techniques for the objects of urban lands situation and relief using the data of terrestrial laser scanning in Tomsk. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2010: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 3. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, markshejderiya [Proceedings of GEO-Siberia-2010: International Scientific Conference: Vol. 3. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 79–83). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

20. Altyntsev, M. A., & Chernov, A. V. Application of laser scanning technology for modelling of real estate objects in 3D cadaster. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 79(9), 52–63 [in Russian].

21. Software Leica CloudWorx Revit. (n. d.). Retrieved from <https://www.geo optic.ru/product/leica-cloudworx-revit> (accessed date 16.08.2020) [in Russian].

Received 20.08.2020

© M. A. Altyntsev, P. A. Karpik, 2020