



СОЗДАНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Мартынов Сергей Павлович

старший преподаватель кафедры геодезии и дистанционного зондирования,
Белорусский государственный университет
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация

В статье рассматриваются современные методы создания цифровых моделей рельефа (ЦМР) на основе технологии лазерного сканирования. Проанализированы физические принципы лазерного зондирования поверхности, особенности работы наземных и воздушных лидаров, а также методы обработки облаков точек. Особое внимание уделено вопросам фильтрации шумов, классификации отражённых сигналов и генерации моделей с высокой точностью. Представлены примеры применения ЦМР в инженерных изысканиях, строительстве, гидрологии и экологическом мониторинге. Рассмотрены современные тенденции развития лидарных технологий и перспективы их интеграции с данными спутникового и фотограмметрического зондирования.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, лидар, лазерное сканирование, облако точек, топография, пространственные данные, геоинформационные системы, точность измерений.

Введение

Цифровые модели рельефа являются одним из ключевых элементов современной геоинформационной инфраструктуры. Они служат основой для решения широкого круга инженерных, экологических и картографических задач. Точность и детализация ЦМР напрямую зависят от методов получения исходных данных. Среди всех современных технологий лидарное лазерное сканирование занимает особое место, обеспечивая высокое пространственное разрешение и возможность получения трёхмерной информации о рельефе с сантиметровой точностью.

С начала XXI века лазерное сканирование стало неотъемлемой частью геодезических работ. Его применение охватывает архитектуру, строительство, горное дело, сельское хозяйство и моделирование природных процессов. В отличие от традиционных методов съёмки, технология лидар позволяет получать миллионы измерений в секунду, создавая детальные модели даже в труднодоступных районах.

Цель данной статьи — рассмотреть принципы построения цифровых моделей рельефа на основе лазерного сканирования, особенности обработки данных и примеры практического применения технологии в различных областях.

Принципы лазерного сканирования и типы систем

Лазерное сканирование основано на измерении времени распространения светового импульса от источника до поверхности и обратно. Основным параметром, определяющим точность измерений, является скорость света и временная разрешающая способность сенсора. Каждый отражённый импульс фиксируется с координатами, что позволяет формировать пространственное облако точек.

Существуют три основных типа лидарных систем — наземные, воздушные и мобильные. Наземные системы используются при архитектурных и инженерных изысканиях, обеспечивая максимальную точность и детализацию. Воздушное лазерное сканирование применяется для картографирования больших территорий и используется в сочетании с GPS и инерциальными измерительными системами для определения положения в пространстве. Мобильные системы, установленные на транспортных средствах, позволяют создавать модели дорожной инфраструктуры и городских пространств.

Каждый тип системы имеет свои преимущества и ограничения. Наземное сканирование обеспечивает высокую точность, но ограничено в охвате территории, в то время как воздушное позволяет получать данные о больших площадях, но имеет меньшую плотность точек. Современные гибридные технологии стремятся объединить преимущества обеих систем, создавая универсальные платформы для комплексных измерений.

Получение и структурирование данных

Результатом лазерного сканирования является облако точек — массив пространственных координат, отражающих поверхность местности. Каждая точка характеризуется не только положением, но и дополнительными параметрами, такими как интенсивность отражённого сигнала, номер возврата и цвет, полученный при совмещении с фотоснимками.

Процесс получения данных требует высокой точности синхронизации между лазерным сканером, GPS-приёмником и инерциальной системой. Ошибка в несколько миллисекунд может привести к смещению координат на десятки сантиметров. Поэтому важным этапом является калибровка оборудования и корректировка траекторий движения платформы.

После сбора данных производится предварительная обработка, включающая удаление выбросов, фильтрацию шумов и выравнивание отдельных проходов сканирования.

Современные алгоритмы позволяют объединять облака точек, полученные из разных источников, в единую координатную систему, создавая непрерывную модель поверхности.

Особое внимание уделяется выравниванию точек по рельефу и удалению элементов растительности и построек при построении моделей земной поверхности. Для этого применяются методы классификации точек с использованием статистических и нейросетевых подходов.

Построение цифровых моделей рельефа

Создание цифровой модели рельефа включает несколько последовательных этапов — классификацию точек, интерполяцию поверхности и построение триангуляционной сетки. На первом этапе выделяются точки, принадлежащие земной поверхности, с исключением объектов, таких как деревья, здания и транспорт.

Далее выполняется интерполяция, то есть вычисление высот между известными точками. Наиболее распространёнными методами являются обратное взвешивание расстояний, метод сплайн-интерполяции и триангуляция Делоне. Полученная поверхность представляется в виде регулярной сетки или нерегулярной триангуляционной модели (TIN).

При создании ЦМР особое значение имеет разрешение модели. Для инженерных задач используется шаг сетки 0,5–2 метра, для региональных карт — 5–10 метров. Современные лидарные системы позволяют формировать модели с вертикальной точностью до 5 сантиметров, что делает их незаменимыми при проектировании сооружений и анализе деформаций земной поверхности.

После генерации модели выполняется сглаживание и проверка на топологическую корректность. На этом этапе устраняются артефакты, вызванные шумами, и восстанавливаются недостающие фрагменты поверхности.

Применение цифровых моделей рельефа

Цифровые модели рельефа, созданные на основе лазерного сканирования, нашли широкое применение в самых разных областях. В инженерных изысканиях ЦМР используются для проектирования дорог, мостов и гидротехнических сооружений. Высокоточная информация о рельефе позволяет оптимизировать проектные решения и снизить строительные риски.

В гидрологии модели рельефа применяются для моделирования стока поверхностных вод, прогнозирования паводков и определения зон возможного затопления. Совмещение ЦМР с данными о почвах и растительности позволяет анализировать эрозионные процессы и оценивать влияние климатических факторов.

В экологическом мониторинге цифровые модели используются для анализа изменений ландшафтов, оценки последствий вырубки лесов и техногенных нарушений. Лидарные данные также востребованы в археологии — они позволяют обнаруживать древние структуры, скрытые под растительным покровом.

Особое направление составляет использование ЦМР в создании цифровых двойников территорий. Это обеспечивает возможность визуализации городской и природной среды в трёхмерной форме, применяемой для планирования инфраструктуры, транспортных схем и строительства.

Проблемы точности и обработка ошибок

Несмотря на высокую технологичность метода, качество цифровых моделей рельефа зависит от множества факторов. Основными источниками ошибок являются неточности позиционирования, атмосферные искажения и погрешности отражения сигнала.

При воздушном сканировании ошибки могут быть вызваны турбулентностью, отклонением лазерного луча и изменением плотности атмосферы. В наземных системах существенное влияние оказывает отражательная способность поверхности и наличие теневых зон.

Для повышения точности применяются методы статистической фильтрации и выравнивания данных. Использование контрольных точек, измеренных традиционными геодезическими способами, позволяет выполнять геодезическую привязку модели и корректировать смещения.

Современные программные комплексы, такие как TerraScan, LAStools и ArcGIS Pro, содержат встроенные инструменты анализа точности и автоматической коррекции ошибок. Кроме того, активно развиваются методы машинного обучения, которые позволяют распознавать типичные артефакты и удалять их без участия оператора.

Перспективы развития технологий лазерного сканирования

Лидарные технологии продолжают активно развиваться. Повышение частоты сканирования и разрешения сенсоров позволяет получать всё более детальные данные. Одним из перспективных направлений является использование мноволновых лидаров, которые измеряют отражения в нескольких спектральных диапазонах, обеспечивая информацию о типе поверхности и её физических свойствах.

Развитие мобильных и беспилотных платформ открывает новые возможности для съёмки труднодоступных районов. Применение дронов с компактными лидарами делает возможным оперативное картографирование с минимальными затратами.

Другим направлением становится интеграция лазерных данных с фотограмметрией и радиолокационными наблюдениями. Совмещение различных источников позволяет получать модели не только рельефа, но и объектов на его поверхности.

В будущем ожидается развитие технологий в направлении автоматизации всего цикла — от сбора до построения цифровых моделей, что обеспечит значительное сокращение времени геодезических работ и повышение точности пространственных данных.

Заключение

Создание цифровых моделей рельефа на основе лазерного сканирования представляет собой одно из наиболее точных и универсальных направлений современной геодезии. Лидарная технология обеспечивает высокую степень детализации и позволяет получать трёхмерные данные о земной поверхности в любых условиях.

Интеграция лидарных измерений с геоинформационными системами создаёт основу для пространственного анализа и моделирования природных процессов. Применение этих технологий способствует повышению эффективности инженерных изысканий, экологического мониторинга и территориального планирования.

В перспективе дальнейшее развитие лазерного сканирования, повышение точности сенсоров и автоматизация обработки данных приведут к созданию цифровых двойников земной поверхности, которые станут фундаментом для научных исследований, управления природными ресурсами и проектирования инфраструктуры будущего.

Литература

1. Белов Н.П. Лидарные технологии в геодезии и картографии. — М.: ГеоПресс, 2022.
2. Дубровин В.А. Цифровые модели рельефа: теория и практика. — Минск: БГУ, 2023.
3. Kraus K. Laser Scanning Principles and Applications. — Taylor & Francis, 2020.
4. Axelsson P. DEM Generation from Laser Scanner Data. // ISPRS Journal of Photogrammetry. — 2021.
5. ESA Earth Observation Programme. Airborne LIDAR Systems in Terrain Mapping. — Brussels, 2023.
6. Chen Y., Liu Z. Multispectral Lidar for 3D Earth Observation. // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. — 2024.
7. Kazakh Geospatial Research Center. UAV-Based LIDAR for Regional Topographic Mapping. — Almaty, 2024.