

Скрябин Роман Михайлович

студент

Уткова Злата Максимовна

студентка

Научный руководитель

Щепин Константин Михайлович

аспирант, старший преподаватель

ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения»

г. Екатеринбург, Свердловская область

ПРИМЕНЕНИЕ БПЛА ДЛЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ

***Аннотация:** в статье показаны ограничения традиционных наземных методов и преимущества воздушной съёмки. Рассмотрены вопросы метрологического обеспечения полётных заданий и факторы, влияющие на итоговую точность построения цифровых моделей. Представлена методика изысканий с использованием БПЛА, классификация летательных аппаратов, сравнение фотограмметрии и лазерного сканирования (LiDAR), а также примеры практической реализации на крупных транспортных магистралях России. Обоснован переход от традиционного картографирования к созданию цифровых двойников местности.*

***Ключевые слова:** БПЛА, беспилотные летательные аппараты, линейные объекты, инженерно-геодезические изыскания, цифровая модель местности, воздушное лазерное сканирование, LiDAR, фотограмметрия, аэросъёмка, геопространственные данные, облако точек, ортофотоплан, цифровая модель рельефа, геодезическое обоснование, RTK, PPK, классификация БПЛА.*

Сеть линейных сооружений решает вопросы передачи и получения различного сырья, продукции и энергии, тем самым помогая развитию ключевых секторов экономики и считается основой развития как производственной, так и социальной инфраструктур. К линейным объектам относят: железнодорожные

линии, линии электропередач, трубопроводы, автомобильные дороги, линии связи и прочие подобные сооружения.

Инженерно-геодезические изыскания особенно важны при проектировании линейных объектов. Первостепенной целью выполнения инженерно-геодезических изысканий является получение информации о рельефе, почвенных условиях и существующих сооружениях, что позволяет выявить оптимальные трассы и минимизировать риски. Геодезические изыскания предоставляют точные координаты будущего объекта в пространстве, обеспечивая его привязку к существующей местности.

Результаты изысканий формируют исходную ЦММ для всех последующих стадий жизненного цикла объекта. ЦММ – цифровая модель местности, это трехмерное представление земной поверхности, обладающее высокой точностью и детализацией. Сбор данных для создания ЦММ проводится по всей земной поверхности, включая в себя информацию о рельефе, поверхности водных объектов, зданиях, дорожных сетях и других объектах. Эти данные в дальнейшем обрабатываются с помощью программных приложений, позволяющих создать трехмерную модель местности. Схема формирования информационной модели представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема формирования информационной модели

ЦММ объединяет проектировщиков и строителей в единой координатной системе. Ошибки на стадии изысканий оборачиваются серьезными проблемами на всей трассе: перерасходом материалов, доработками на стройке, снижением надёжности и крупными убытками. К примеру, неточные перепады высот

искажают расчёт уклонов (риск застоев или перегрузок), а сдвиг трассы грозит сносом объектов или нарушением экозон.

Стоит отметить, что инженерно-геодезические изыскания проводятся не только при строительстве объекта, но и в случаях его реконструкции, ведь данные отчета актуальны только два года после проведения изысканий. Этот срок обусловлен динамичностью окружающей среды: рельеф может меняться из-за природных процессов или деятельности человека, а инфраструктура постоянно обновляется.

В настоящее время в области геодезии наблюдается стремительный технологический прогресс, который внес существенные изменения в методы и средства проведения геодезических работ. Одной из наиболее перспективных инноваций в этой области становится использование БПЛА, оборудованных специализированными геодезическими сенсорами [1].

Беспилотная съемка линейных объектов нуждается в строгой методике, которая обеспечивает непрерывный контроль качества на всех этапах, от предпроектных расчетов до передачи готовых цифровых результатов. Разработанная методика выступает в роли стандартизированного плана, адаптированного к особенностям протяженных инфраструктурных сооружений, таких как дороги, железные дороги, линии электропередач и трубопроводы, и гарантирующего соответствие нормативным требованиям по точности и полноте полученной информации [1].

Этап 1. Подготовительный

Успех полевых работ зависит от детального планирования. На основе технического задания анализируют территорию по картам и данным съёмки, определяют границы изысканий и зоны особого внимания (мосты, пересечения, оползни). Ключевой этап – создание полётных заданий в ПО: для линейного объекта применяют коридорную съёмку с параллельными галсами и расчётным перекрытием для полного покрытия полосы. Обязательны рельефный полёт (постоянная высота) и выбор оптимальных точек взлёта/посадки с учётом дальности БПЛА. Параллельно разрабатывают схему геодезического

обоснования – закладывают опорные (GCP) и контрольные (CP) точки с шагом, обеспечивающим надёжную привязку. Завершается этап получением разрешений на полёты.

Этап 2. Полевой

Данный этап реализует подготовленные планы на местности. Первой задачей является создание планово-высотного обоснования: геодезисты выполняют закрепление и высокоточное координирование опорных точек с использованием GNSS-оборудования в режиме статических или RTK-измерений. После приемки геодезической основы начинаются аэросъёмочные работы. Оператор БПЛА выполняет запуск аппарата по запланированному маршруту, осуществляя непрерывный мониторинг телеметрии, стабильности связи и работы сенсоров. Для съёмки протяженных участков практикуется секционное выполнение работ с несколькими вылетами. Важным элементом является оперативный контроль первичных данных – проверка логов полета и выборочный просмотр отснятого материала непосредственно в поле для своевременного выявления и устранения дефектов покрытия.

Этап 3. Камеральный

Это наиболее трудоемкая стадия, на которой выполняется преобразование исходных данных в пригодные для проектирования форматы. Процесс разделяется по типам данных. Для фотограмметрической информации в ПО выполняется аэотриангуляция с привязкой к координатам GCP (наземных контрольных точек), что обеспечивает высокую абсолютную точность. Далее строятся плотное цветное облако точек, текстурированная 3D-модель, цифровая модель поверхности и ортофотоплан.

Для данных воздушного лазерного сканирования производится совместная обработка данных лидара, бортового GNSS и IMU с последующей классификацией облака точек на тематические классы, что служит основой для построения цифровой модели рельефа и местности (рис. 2).

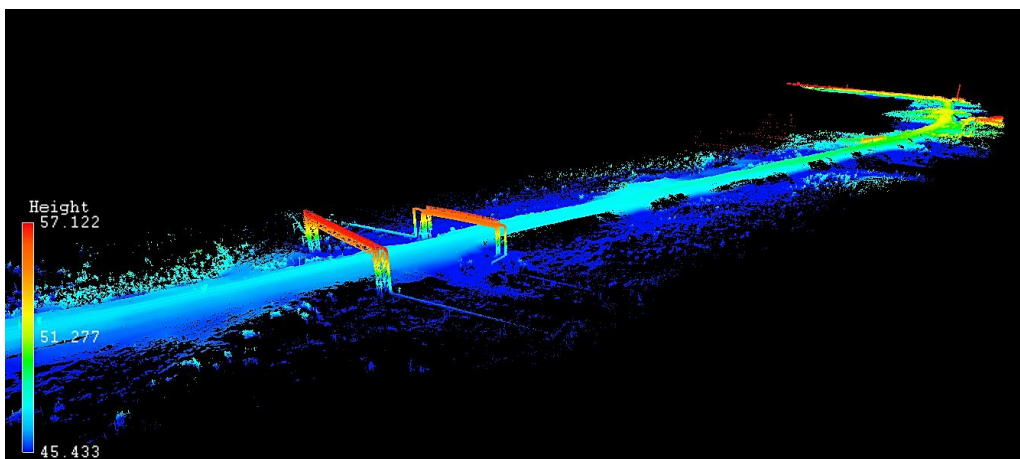


Рис. 2. Первичная обработка облака точек

Этап 4. Отчетный

На завершающей стадии на основе созданных моделей генерируются производные продукты, непосредственно используемые проектировщиками: продольные и поперечные профили трассы, тематические карты уклонов и инсоляции, подсчеты объемов земляных масс. Одновременно выполняется контроль точности путем сравнения полученных моделей с независимыми контрольными точками, рассчитываются среднеквадратические ошибки. Все этапы работ, исходные и выходные данные, протоколы контроля тщательно документируются для формирования итогового технического отчета, соответствующего требованиям СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства».

Качество и обоснованность проектных решений в территориальном планировании напрямую зависят от полноты и достоверности данных изысканий. В современных условиях, динамика развития транспортной и инженерной инфраструктуры обостряет эти требования, делая важным не только достоверность, но и оперативность получения исходных геопространственных данных.

За несколько лет геодезическая съемка стала одним из этапов изысканий, который должен основываться на разработке единых требований. К ним можно отнести:

- тип пространственных данных и способ их представления;
- формат пространственного описания;

- точность и детальность;
- правила цифрового описания объектов;
- принципов классификации, кодирования и ведения нормативно-справочной информации об объекте исследования и его характеристиках;
- периодичность обновления баз геопространственных данных.

Традиционные наземные методы изысканий, основанные на тахеометрической съемке и GNSS-профилировании, несмотря на локальную точность, становятся все менее актуальными при работе с протяженными объектами из-за низкой производительности, высокой трудоемкости и длительных сроков выполнения работ на протяженных и труднодоступных участках. Наземная съемка неизбежно оставляет «слепые» зоны, в то время как воздушная съемка обеспечивает полный охват территории с произвольных ракурсов [2].

Внедрение комплексов на базе беспилотных летательных аппаратов инициирует смену технологического уклада в инженерной геодезии. Этот переход преодолевает ограничения традиционных методов за счет создания синергии между двумя ключевыми критериями – оперативностью сбора данных и повышением их метрической точности и детальности, что позволяет в сжатые сроки создавать цифровые модели рельефа и местности, служащие объективной основой для всех последующих проектных решений и согласований.

На сегодняшний день одними из важнейших преимуществ воздушной съемки являются оперативность и точность получения геопространственных данных. В отличие от наземной съемки, метод предполагает выполнение автономного полета БПЛА по заранее заданной траектории. Это позволяет за один вылет оперативно собрать геодезические данные на протяженных участках в десятки километров.

Данные, получаемые за один полет, формируют единую, внутренне непротиворечивую пространственную модель, с сантиметровым уровнем точности, исключая каскадные ошибки, характерные для поэтапной ручной съемки и сшивки отдельных участков [3]. Ключевое преимущество лидарной

технологии – способность луча частично проникать сквозь растительность – позволяя построить точную цифровую модель рельефа под лесным пологом, что недостижимо для классических методов.

БПЛА – беспилотные летательные аппараты, стали незаменимым средством для получения высококачественных геопространственных данных. Они могут использоваться для аэрофотосъемки, создания цифровых моделей местности, обновления карт, ведение объекта строительства и прочих задач. БПЛА представляют собой автономные устройства, способные осуществлять полеты без присутствия пилота на борту, и оснащены современным оборудованием для выполнения геодезических измерений и аэрофотосъемки с высокой точностью [4].

БПЛА, применяемые в инженерной геодезии, классифицируются, прежде всего, по аэродинамической схеме, которая определяет их летные возможности и оптимальную область применения. Характеризуют три основных типа: самолетные, мультироторы и гибридные [5].

Получение геопространственной информации с использованием беспилотных платформ реализуется через два основных технологических метода, каждый из которых базируется на различных физических принципах и предоставляет уникальные по своим характеристикам данные. Выбор между ними или решение об их совместном использовании определяется конкретными задачами проекта. Этими методами являются аэрофотосъемка с фотограмметрической обработкой и воздушное лазерное сканирование

(Рис. 3). Компонент, определяющий качество и тип получаемых геопространственных данных – сенсорное оборудование, такое как фотокамера или лазерный сканер.

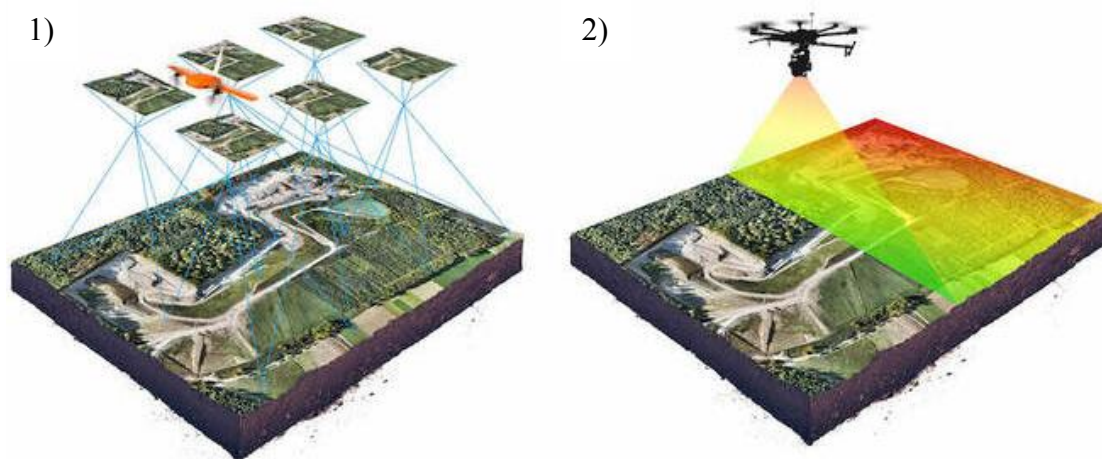


Рис. 3. Технология съемки поверхности земли БПЛА с помощью:

1 – фотограмметрии; 2 – лидара.

Фотограмметрия – это технология измерения и анализа объектов на основе высокоточных фотоизображений [6]. Для её реализации с помощью БПЛА выполняется съемка местности с множества точек, что позволяет зафиксировать объект с разных ракурсов. Подобно бинокулярному зрению человека, которое формирует восприятие глубины, фотограмметрия сопоставляет перекрывающиеся снимки для создания трехмерной модели (рис. 6 и рис. 7). На основе модели строится плотное облако точек, каждая из которой содержит пространственные координаты, что облегчает последующие измерения и интерпретацию характеристик объекта (рис. 4 и рис. 5).

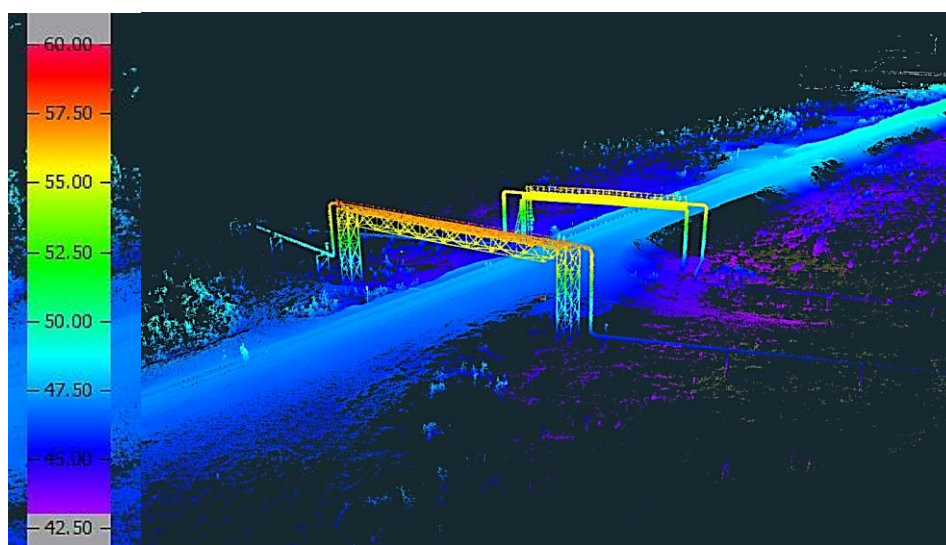


Рис. 4. Облако точек на карте высот рельефа

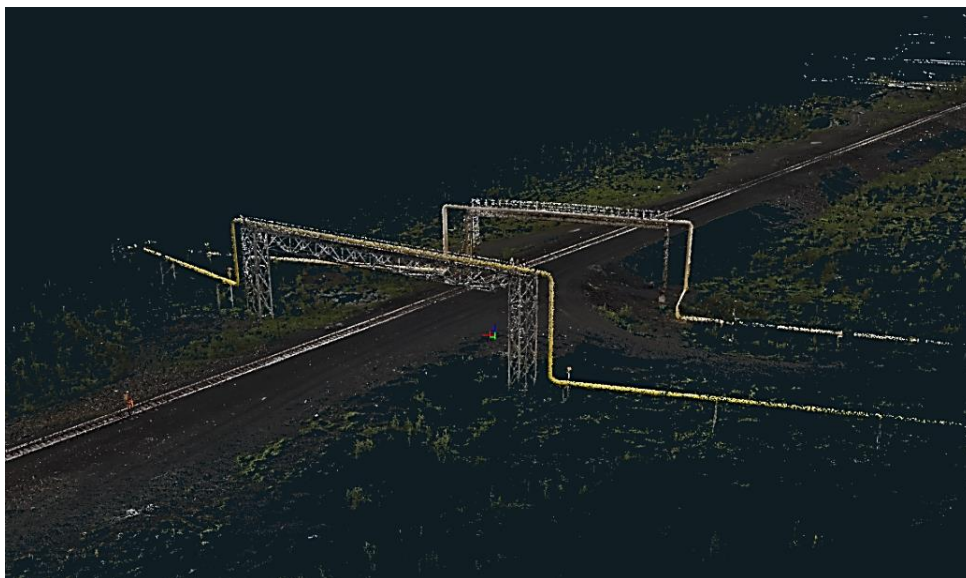


Рис. 5. Облако точек в цвете

Полный технологический цикл начинается с выполнения аэросъемки: БПЛА совершает полет по заданному маршруту с продольным и боковым перекрытием снимков для обеспечения стереоэффекта.

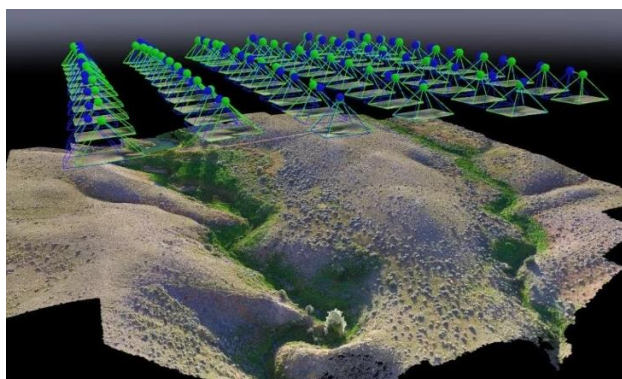


Рис. 6.



Рис. 7. Получение данных фотограмметрии

Полученные данные последовательно обрабатываются в специализированном программном обеспечении, на основании общих ключевых

точек на перекрывающихся снимках и восстанавливает точное пространственное положение каждой камеры, формируя облако точек. Финальными производными продуктами обработки являются ортофотоплан, цифровая модель местности и, после фильтрации надземных объектов, цифровая модель рельефа.

Лидар (от англ. Light Detection and Ranging – «обнаружение и определение дальности с помощью света») – это технология, предназначенная для измерения расстояния до объектов или поверхностей путем отправки лазерных импульсов [7]. Лазерный сканер состоит из дальномера, зеркала, излучателя и приёмника. Излучатель посылает луч со скоростью света, он отражается от объекта и возвращается в приёмник. По времени прохождения сигнала туда и обратно вычисляют расстояние до объекта.

Есть и второй метод измерения – фазовый. Он основан на определении разности фаз, посылаемых и принимаемых модулированных сигналов. Чем больше разница, тем дальше объект [8]. За счет измерения разных частот модулируемого сигнала можно определить интенсивность отражающейся способности материала и цвет объекта.

Импульсный метод сканирования используется на расстоянии до одного километра, в то время как фазовый – на расстоянии до ста метров в малых сканерах.

В движении лидар выполняет сканирование, направляя тысячи импульсов в секунду, что в результате формирует миллионы точек с точными координатами (X, Y, Z) во всемирной системе геодезических параметров Земли WGS 84 и информацией об интенсивности отражённого сигнала (рис. 8). Последующая группировка точек позволяет восстановить форму, структуру и пространственные характеристики объектов.

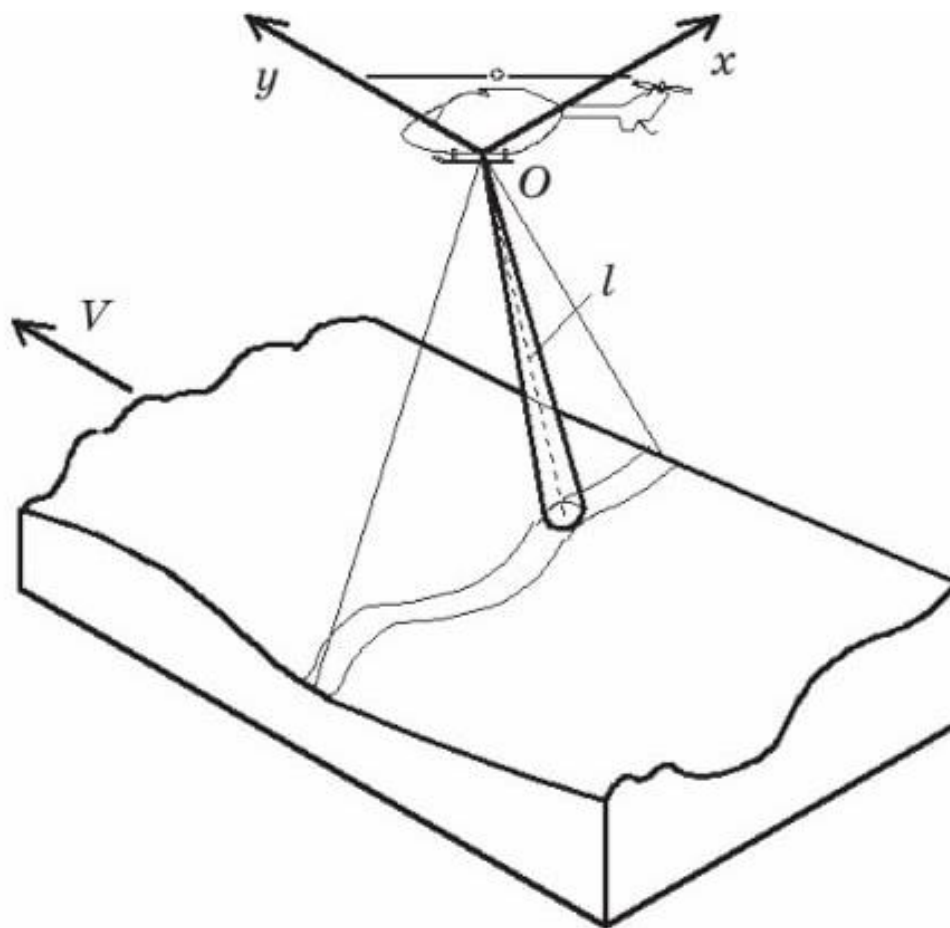


Рис. 8. Схема воздушного лазерного сканирования [9]

Ключевым этапом является первичная обработка, в ходе которой выполняется совместное решение данных лидара, высокоточного GNSS-позиционирования и инерциальной системы. Это позволяет присвоить каждому отражению точные трехмерные координаты в единой геодезической системе, формируя исходное геопривязанное плотное облако точек. Из облака впоследствии формируется высокодетальный ортофотоплан, цифровая модель местности и трехмерная модель.

Основное различие между данными лидара и фотограмметрии заключается в источнике информации [9]. Лидар, как активный сенсор, создаёт точные трёхмерные карты геометрии и высот, тогда как фотограмметрия, будучи пассивным методом, обеспечивает цветное, текстурное и визуальное детализированное представление местности. Сравнительный анализ лидара и фотограмметрии представлен в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение методов получения геопространственных данных

Критерий сравнения	БПЛА с камерой (Фотограмметрия)	БПЛА с лазерным сканером (LiDAR)
Основной принцип	Создание 3D-модели по перекрывающимся снимкам	Измерение расстояния до объекта импульсным лазером и прямая запись 3D-координат каждой точки
Ключевой результат	Текстурная 3D модель, ортофотоплан	Облако точек с координатами X, Y, Z и интенсивностью
Преимущество	Цветная текстура, низкая стоимость, детализация	Высочайшая точность работ, независимость от освещения, проникновение сквозь растительность
Недостаток	Зависимость от освещения, не видит под растительностью	Высокая стоимость оборудования, отсутствие цвета (часто решается совмещением с камерой), плохо сканирует материалы с высокой отражающей способностью
Сфера применения	Создание ортофотопланов, визуализация, мониторинг	Создание ЦМР, съемка в лесистой местности, съемка ЛЭП, точные данные

Комбинированное применение обеих технологий является наиболее эффективным подходом. Оно позволяет совместить высокоточную геометрию лидарной модели с фотореалистичной текстурой, полученной методом фотограмметрии. Такой синтез обеспечивает создание всесторонней цифровой модели местности, включающей как метрические данные, так и визуальную информацию.

Аэросъемка, как комплексная технология получения данных трехмерной модели поверхности земли, подразделяется на два основных метода, принципиально различающихся по физическому принципу получения данных: аэрофотосъемку и воздушное лазерное сканирование (LiDAR).

Независимо от выбранного метода геодезического обоснования, будь то RTK, РРК или с использованием опознаков, основой аэрофотосъемки остаются фотоматериалы [10]. На смену традиционным физическим снимкам пришли цифровые, но ключевым фактором является то, что каждый метод требует уникального подхода в последующей обработке.

Первый метод геодезического обоснования происходит при использовании режима RTK (Real Time Kinematic) в реальном времени. Этот метод

высокоточного позиционирования в реальном времени с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS), который позволяет получить высокоточные координаты, сопоставимые по уровню с данными стационарных GNSS-приемников, непосредственно в процессе полета записываются в метаданные каждого снимка. Таким образом, результатом съемки становится готовый набор цифровых фотографий, которые можно сразу загружать в фотограмметрическое программное обеспечение для построения модели.

Метод PPK (Post Processed Kinematic), в отличие от РТК, предусматривает постобработку для достижения максимальной точности. В ходе данного метода приемник на борту БПЛА и базовая станция работают независимо друг от друга. После аэросъемки оператор располагает несколькими массивами данных: снимками с приблизительными координатами, сырыми данными с бортового приемника, RINEX-файлом с базовой станции и ее точными координатами. Чтобы получить точное положение центров снимков, эти данные необходимо объединить и обработать с помощью специализированного ПО, что составляет отдельный и обязательный этап работ.

Пользующийся заслуженной популярностью специалистов является метод с использованием опознаков, который переносит центр точности с борта на землю. Результатом аэрофотосъемки является набор снимков с низкоточными координатами и сеть заранее подготовленных опознаков, координаты которых определены методом РТК с точностью до сантиметров. Камеральная обработка в этом случае представляет собой классический фотограмметрический процесс: сначала выполняется внутреннее ориентирование снимков в программе, а затем их внешнее ориентирование путем привязки к точно известным координатам опорных точек на местности [11].

Независимо от выбранного метода съемки, финальным этапом фотограмметрической обработки становится построение плотного облака точек. На его основе впоследствии формируются все требуемые представления

данных – от ортофотопланов и цифровых моделей до векторных картографических слоёв.

Технология лазерного сканирования принципиально отличается от аэрофотосъёмки, и её первичные данные не образуют целостной пространственной модели. Облако точек визуализируется как трёхмерная траектория полёта, а результатом служит набор файлов: данные инерциальной системы, спутникового позиционирования и отдельные облака точек на каждый момент времени. Итоговое облако, полученное лазерным методом, обычно плотнее и геометрически точнее, чем при фотограмметрии.

При выполнении аэросъёмки, для получения точной информационной модели, критически важны следующие функции автопилота:

- точное следование по запланированному маршруту с заданным перекрытием между соседними проходами (галсами);
- поддержание постоянной высоты и скорости полета, что обеспечивает равномерную плотность и качество данных;
- стабилизация и компенсация внешних возмущений (порывы ветра);
- управление полезной нагрузкой: синхронизация момента съёмки или включения лидара с текущим положением БПЛА.

На сегодняшний день, аэросъёмка представляет собой динамически развивающуюся область, где методы воздушного лазерного сканирования и высокоточной аэрофотосъёмки, активно совершенствуясь, становятся всё более доступными и востребованными для специалистов в данной сфере [12].

Первичная задача программного обеспечения для управления БПЛА – обеспечение автоматического полета по заданному маршруту. Примерами таких решений служат DroneDeploy, Teobox и DJI Terra.

DroneDeploy – облачная платформа для планирования полётов беспилотных летательных аппаратов, обработки полученных изображений и анализа аэроданных. Сервис автоматически превращает снимки, сделанные дроном, в высокоточные ортофотопланы, 3D-модели и другие геопродукты (рис. 9).

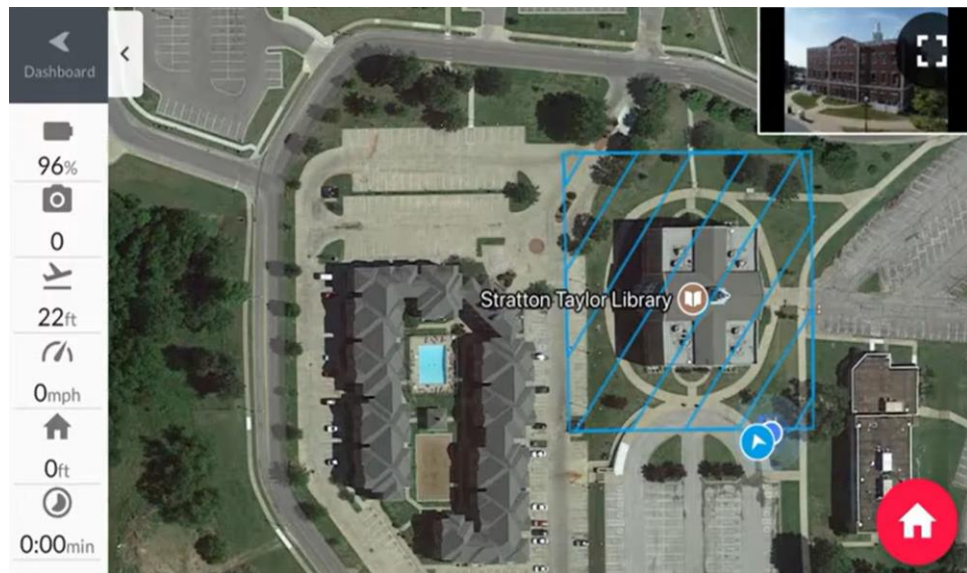


Рис. 9. Пример создания полетного задания в DroneDeploy

Платформа охватывает весь цикл работы с аэроданными – от планирования миссии до коллективного анализа результатов. Некоторые возможности DroneDeploy:

- автоматизированное планирование маршрутов, управление взлётом, полётом, съёмкой и посадкой дрона;
- построение 2D-карт, цифровых моделей рельефа и интерактивных 3D-моделей на базе фотограмметрии;
- аналитика изображений: измерения расстояний, площадей и объёмов, расчёт NDVI и поиск дефектов на инженерных объектах;
- совместная работа: аннотации, маркеры, отчёты и виртуальные обходы объектов;
- управление флотом БПЛА и журналами полётов;
- объединение аэрофото с наземными 360°-снимками и данными роботов для построения цифровых двойников.

Сервис доступен в веб- и мобильном приложении. Например, есть приложение DroneDeploy Flight для Android и iOS, которое позволяет планировать полёты и обрабатывать изображения. Положительной стороной отмечают интуитивно понятный интерфейс.

Teobox – программа для работы с данными аэрофотосъёмки. Она предназначена для контроля соответствия количества снимков и координат,

фильтрации лишних фотографий, учёта смещения координат из-за наклона коптера в момент фотографирования, задания уникальных имён снимков и экспорта координат в exif фотографий. Программа создана специально для ГНСС квадрокоптера «Теодрон», но может использоваться для предобработки данных с коптеров других производителей (рис. 10).

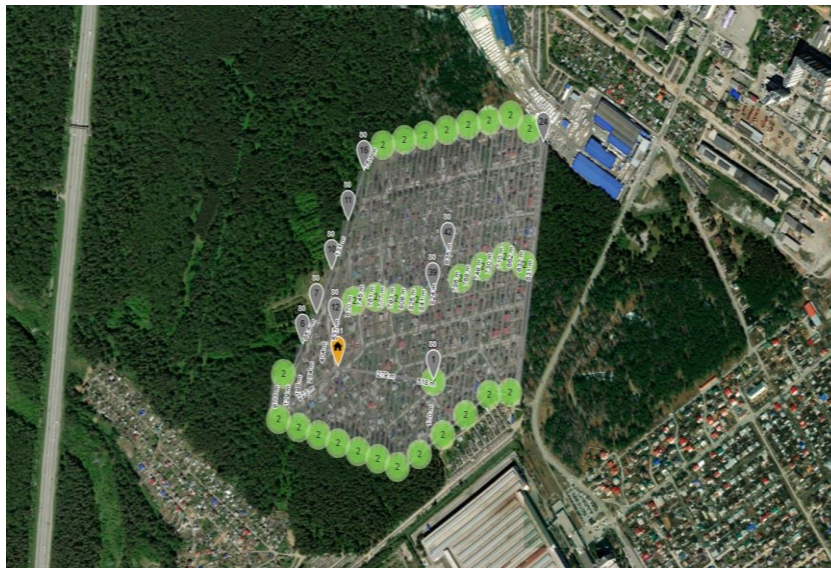


Рис. 10. Пример создания полетного задания в Teobox

DJI Terra – это комплексное прикладное программное обеспечение, созданное компанией DJI. Оно предназначено для планирования полётов, оперативного сбора, обработки и первичного анализа пространственной информации. Основная область применения DJI Terra – создание различного рода моделей по результатам съёмок с дронов.

Некоторые функции программы:

- построение полётных заданий;
- измерения на созданных моделях. DJI Terra позволяет производить измерения на ортофотопланах, на облаке точек и на 3D-моделях;
- обработка данных лазерного сканирования. Например, сглаживание плотного облака точек и изменение плотности;
- создание LAS-файлов. С их помощью можно продолжить работу в сторонних программах, при этом первичную обработку можно выполнить только с помощью DJI Terra (рис. 11).

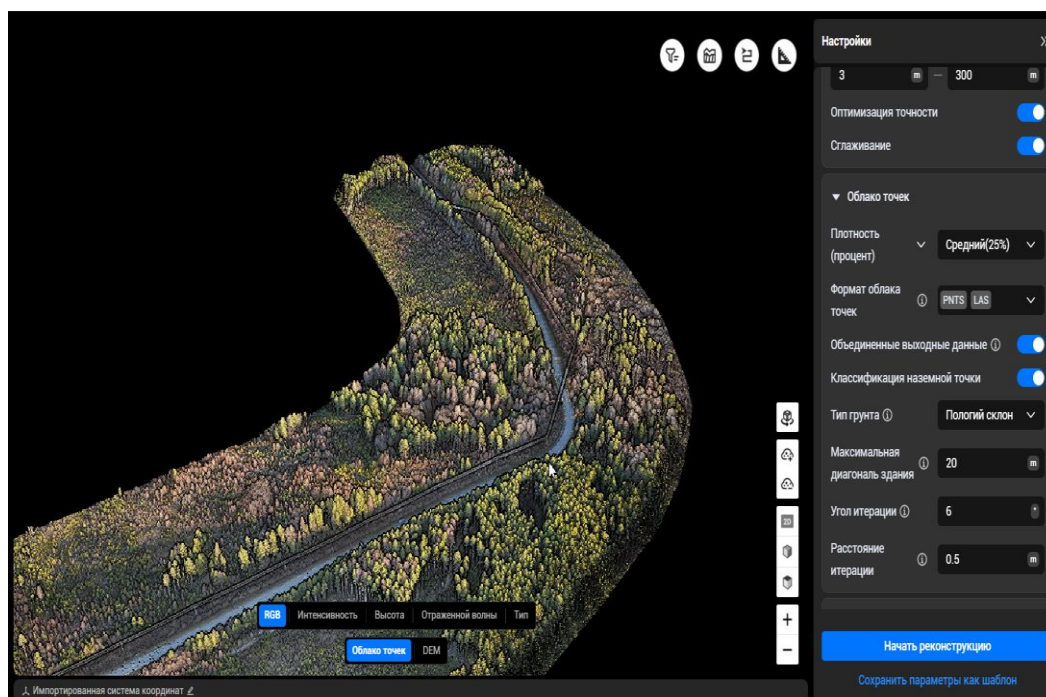


Рис. 11. Создание плотного облака точек в DJI Terra

DJI Terra используется в разных сферах, включая общественную безопасность, строительство, проверку инфраструктуры, сельское хозяйство.

Технологический цикл геодезических изысканий с использованием БПЛА завершается камеральным этапом, основное место в котором занимает обработка первичных данных специализированным программным обеспечением. Качество, точность и информативность конечных продуктов (ортофотопланов, цифровых моделей, облаков точек) напрямую зависят от возможностей применяемых программных комплексов.

CoPre – программное обеспечение для обработки данных лазерного сканирования, разработанное компанией CHCNAV. Оно предназначено для быстрой и эффективной обработки данных мобильного геопространственного картографирования (рис. 12).

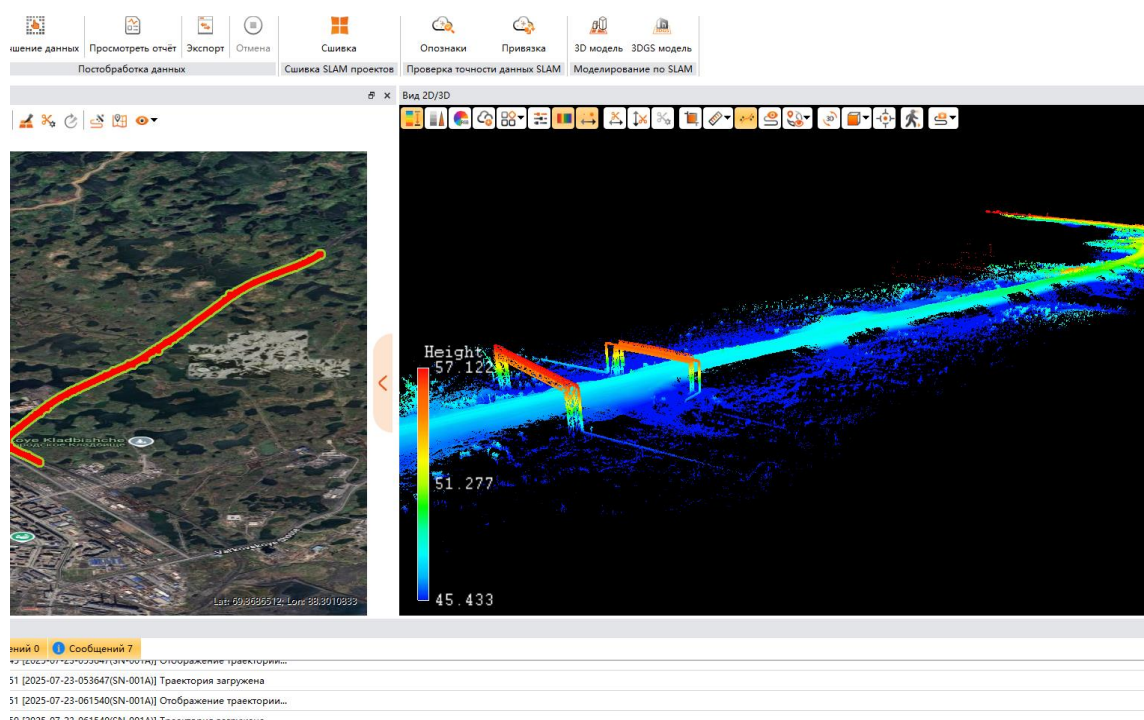


Рис. 12. Облако точек в CoPre

Особенности:

- использует оптимизированную структуру данных октодеревя для эффективной обработки больших облаков точек;
- поддерживает данные с десятками миллионов точек;
- выпускается под лицензией GNU General Public License (GPL);
- кросс-платформенное, совместимо с Windows, Linux и macOS.

Ключевые тренды в развитии ПО – автоматизация классификации и векторизации через машинное обучение, облачная обработка сверхбольших массивов данных и интеграция с BIM-платформами для сквозного информационного моделирования на всех этапах жизненного цикла объекта.

Беспилотники эффективны для съёмки протяжённых линейных объектов благодаря автоматической привязке данных и классификации точек по координатам и интенсивности сигнала. Это обеспечивает высокоточные целостные массивы данных, что делает БПЛА оптимальным решением для проектирования, строительства и мониторинга таких объектов. Получаемый комплекс данных позволяет перейти от картографирования к цифровому двойнику территории, охватывающему все стадии жизненного цикла объекта.

Список литературы

1. <https://www.interactiv-plus.ru/>

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

1. Жвавая А.А. Применение беспилотных летательных аппаратов для геодезического сопровождения строительства железных дорог / А.А. Жвавая, Т.Р. Кадыров // Наука и образование транспорту. – 2023. – № 2. – С. 176–179. – EDN GJYGIL
2. Шварцфельд В.С. Основные аспекты применения беспилотных летательных аппаратов при проектировании и эксплуатации железнодорожной инфраструктуры / В.С. Шварцфельд, Е.Е. Гасилина // Инфраструктура транспорта. – 2023. – № 2(6). – С. 56–63. – EDN HJFWMK
3. Романенко В.А. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в геодезической съемке: преимущества, проблемы и перспективы / В.А. Романенко // Скиф. Вопросы студенческой науки. – 2024. – № 11(99).
4. Турк Г.Г. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в геодезии / Г.Г. Турк, Н.К. Карачев // Вектор ГеоНаук. – 2023. – Т. 6, № 2. – С. 56–60. – DOI 10.24412/2619–0761–2023–2–56–60. – EDN ETATBS
5. Шкретов А.А. Беспилотные летательные аппараты в геодезии. Методы их применения / А.А. Шкретов, Г.Г. Турк // Московский экономический журнал. – 2023. – Т. 8, № 5. – DOI 10.55186/2413046X_2023_8_5_229. – EDN YEFBLL
6. Применение данных аэрофотосъемки при помощи беспилотного летательного аппарата (БПЛА) на инженерно-геодезических изысканиях автомобильных дорог / Н.Ы. Исмаилов, А.К. Бектуров, Б.А. Оморев, К. Рахатбек Уулу // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. – 2018. – № 1(59). – С. 29–35. – EDN RUGWHR
7. Ерин А.А. Расчет предельно измеряемой дальности лидара на беспилотном летательном аппарате для задач распознавания объектов / А.А. Ерин, А.Д. Хомоненко // Бюллетень результатов научных исследований. – 2020. – № 2. – С. 45–59. – DOI 10.20295/2223-9987-2020-2-45-59. – EDN NNCCUP
8. Назаров А.А. Обзор сканирующего лидара применительно к робототехническим системам / А.А. Назаров // Механика и машиностроение. Наука и практика: Материалы международной научно-практической

конференции, Санкт-Петербург, 09 декабря 2022 года. Том 5. – СПб.: ИП Жукова Елена Валерьевна, 2022. – С. 28–30. – EDN CABVGQ

9. Луняка Н.В. О возможностях комбинированного применения технологий фотограмметрии и лидара на беспилотных летательных аппаратах при проведении осмотра места происшествия / Н.В. Луняка, А.Л. Смаль // Вестник Краснодарского университета МВД России. – 2023. – № 4(62). – С. 36–40. – EDN ITGMFO

10. Липанов И.Д. Технологии и методы планирования перемещения БПЛА по маршрутным точкам / И.Д. Липанов, А.Д. Хомоненко // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2024. – № 3(39). – С. 30–43. – DOI 10.20295/2413-2527-2024-339-30-43. – EDN BOPRZL

11. Сацюк А.В. Особенности разработки беспилотных летательных аппаратов для отрасли железнодорожного транспорта / А.В. Сацюк, А.А. Воробьев // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2023. – № 68. – С. 13–21. – EDN GSWIPU

12. Тихонова К.В. Техническое обеспечение создания и обновления картографической основы местности. Перспектива внедрения нейросетей в процесс создания цифровых моделей рельефа / К.В. Тихонова, П.Д. Чепелев, Д.А. Тихонов // Экономика и экология территориальных образований. – 2023. – Т. 7, № 2. – С. 50–61. – DOI 10.23947/10.23947/2413-1474-2023-7-2-50-61. – EDN YFDVDG

13. Мамажакыпова Г.Т. Совместная обработка материалов аэрокосмических и наземных съемок для создания 3D моделей местности / Г.Т. Мамажакыпова, Г. Байышбек Кызы // Бюллетень науки и практики. – 2024. – Т. 10, № 5. – С. 134–139. – DOI 10.33619/2414-2948/102/17. – EDN DTKRTR

14. Алексеенко Н.Н. Применение технологии лазерного сканирования в различных отраслях и на различных этапах жизненного цикла объектов / Н.Н. Алексеенко // Вестник МГСУ. – 2016. – № 2. – С. 62–73. – EDN VMNAZX