

УДК 004.9

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ***Дулин С. К.**, д.т.н., в.н.с., E-mail: s.dulin@ccas.ru**Якушев Д. А.**, аспирант,

Институт проблем информатики РАН, Москва, Россия

Аннотация. Представлены концептуальный подход и основные принципы организации мобильного лазерного сканирования, реализующего технологическую возможность получения геопространственной информации с движущихся платформ. Разработана технология контроля качества результатов мобильного лазерного сканирования (экспресс-анализ), являющегося важнейшим мероприятием, от которого зависит не только качество получаемых геоданных, но и время, затрачиваемое на получение корректного результата. Предлагаемый подход основан на комплексной оценке плотности покрытия, точности позиционирования и результатов сравнения с данными наземного обследования. Технология выполнения съемки в движении является инновационной в области выполнения измерений для создания картографических материалов, паспортизации, мониторинга и фиксации состояния инфраструктурных транспортных объектов.

Ключевые слова: принципы проведения мобильного лазерного сканирования, технология экспресс-анализа, геоданные мобильного лазерного сканирования.

AUTOMATED REMOTE METHODS OF ANALYSIS OF THE STATE OF LENGTHY INFRASTRUCTURE OBJEKTS***Dulin S. K.**, D.ofSci., senior researcher, E-mail: s.dulin@ccas.ru**Yakushev D. A.**, graduate student,

Institute of Informatics problems of RAS, Moscow, Russia

Summary. The conceptual approach and main principles of the organization of the transportable laser scanning realizing technological possibility of obtaining of the geospace information from moving platforms are presented. The technology of quality control of results transportable laser the scannings (express train-analysis), being is developed by the major action on which depends not only quality of received geodata, but also time spent for obtaining of correct result. The offered approach is grounded on a complex estimation of density of a coating, accuracy of positioning and results of matching with data of ground inspection. The technology of execution of shooting in movement is innovative in the field of execution of measurements for creation of maps and sharts, certification, monitoring and fixing of a state of infrastructural transport objects.

Keywords: principles of carrying out of transportable laser scanning, technology the express train-analysis, geodata of transportable laser scanning.

Введение

Как научная дисциплина, компьютерное зрение относится к теории и технологии создания искусственных интеллектуальных систем, которые получают информацию из изображений. Видеоданные могут быть представлены множеством форм, таких как

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 14-07-00040).

видеопоследовательность, изображения с различных камер или трехмерными данными, например с устройства лазерного сканера[1].

В настоящее время последовательность процедур обработки изображений принято рассматривать в соответствии с так называемой парадигмой Д.Марра, которая утверждает, что обработка изображений опирается на несколько последовательных уровней восходящей информационной линии: иконическое представление объектов (растровое изображение, неструктурированная информация) —> символическое представление (векторные и атрибутивные данные в структурированной форме, реляционные структуры).

Связанные с этими этапами уровни обработки обычно называются соответственно обработка нижнего уровня, среднего уровня, высокого уровня. В то время как алгоритмы обработки нижнего уровня (фильтрация простых шумов, гистограммная обработка) могут рассматриваться как хорошо проработанные и детально изученные, алгоритмы среднего уровня (сегментация) продолжают сегодня оставаться центральным полем приложения исследовательских усилий. За последние годы значительный прогресс был достигнут по отношению к проблемам сопоставления точек и фрагментов изображений (matching), выделения признаков внутри малых фрагментов, высокой точности 3D-позиционирования точек.

Одной из актуальных проблем, на которой сосредоточена данная работа, является развитие методов автоматического мониторинга инфраструктуры РЖД, основанного на обработке статистических данных, полученных с помощью лазерного сканирования. Технологически данная задача решается путем установки двух лазеров на задней стенке последнего вагона. В процессе движения вагона каждый лазер сканирует свою часть полупространства – соответственно, слева и справа относительно движения поезда, формируя совокупность замеров. В результате получается облако точек (см. рис. 1), из которого следует выделить полезную информацию, касающуюся положения объектов и их технического состояния. Так, например, при мониторинге контактной сети требуется оценка параметров, описывающих пространственное положение опор контактной сети, провисание проводов и др. Другой важной задачей является также автоматизация построения комплексной трехмерной модели инфраструктуры РЖД. В настоящее время данные работы уже ведутся на основе полученных сканированных данных в полуавтоматическом режиме с помощью специального программного обеспечения.

Поскольку использование мобильных сканирующих систем для комплексного анализа состояния инфраструктуры железных дорог является достаточно новым направлением, рассмотрим историю возникновения технологии лазерного сканирования.

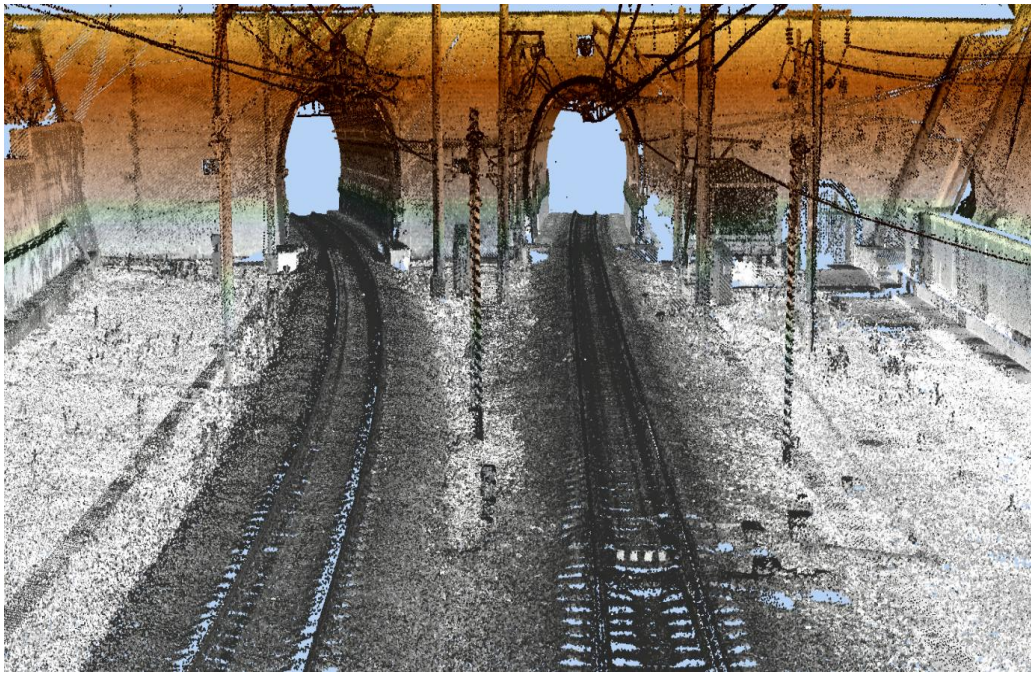


Рис.1. Облако точек, получаемое в процессе измерений мобильного лазерного сканера.

1. История возникновения и виды сканирующих лазерных систем

Термин LiDAR (LightDetectionandRanging) появился в работе Миддлтона и Спилхауса «Метеорологические инструменты» [2] в 1953. Но одно из первых зафиксированных измерений, произведенных с помощью светового луча, было произведено в России в 1905г. инженером Кузнецовым В.В., когда с помощью мощного прожектора, направленного вертикально вверх и прибора, регистрирующего отраженный свет, было произведено измерение высоты облаков. Подобные измерения производились вплоть до изобретения лазеров в 1960-м году в лаборатории Hughes Research Теодором Майманом и использования их в лазерных дальномерах (LiDAR) с 1963г.

Первые эксперименты, проводимые с лазерными излучателями Дж. Фиоккои Смуллин Л.Д. [4] показали что приборы способны не только определять расстояние до непрозрачных отражающих поверхностей, но и проводить дистанционную диагностику прозрачной среды, рассеивающей свет, анализировать ее свойства, определять направление и скорость перемещения воздушных потоков, фиксировать и идентифицировать наличие посторонних примесей в воздушной массе в различных слоях атмосферы, измерять их концентрацию. Эти возможности LiDAR-систем обусловлены тем, что, в отличие радара, эффективно отражающегося только от больших металлических объектов, оптическое излучение, отражается от частиц малых и сверхмалых размеров(за счет маленькой длины волны).

Дистанционность и бесконтактность измерений, возможность определения выбранной характеристики воздушной среды на любом направлении лазерного луча и

получения всевозможных сведений о свойствах атмосферы на разной высоте, хорошее пространственно-временное разрешение, связанное с малой продолжительностью и высокой частотой повторения импульсов лазерного излучения, являются принципиальными достоинствами лазерных систем и несомненными преимуществами перед альтернативными диагностическими системами [3].

При дистанционном зондировании атмосферы именно молекулы газов и аэрозоли являются причиной ослабления проходящего через нее лазерного излучения. В среде, которую исследуют, часть излучения либо поглощается, либо рассеивается (на молекулах газа или аэрозольных частицах в сторону приемника), либо отражается от объектов или специально подготовленных поверхностей. «Обратный» луч проходит через ту же рассеивающую среду, что и прямой луч от источника, подвергаясь вторичному рассеянию и поглощению. Это излучение собирается с помощью приемной оптики со спектроанализатором и направляется на фотодетектор, который преобразует его в электрический сигнал, пропорциональный интенсивности принятого оптического излучения. Принимаемый сигнал несет информацию как о плотности рассеивающих центров, их природе и физическом состоянии, так и о скорости их движения. Поскольку принимаемый сигнал является сложной суперпозицией множества процессов, происходящих при взаимодействии оптического излучения с веществом, восстановление действительных параметров распределенной оптической среды — довольно сложная физическая задача, решаемая как аналитическими, так и эвристическими методами [3].

Начиная с 70-х годов прошлого века с активным развитием военной промышленности и геодезии лазерные приборы стали использовать для дистанционного зондирования (измерения расстояния) до поверхности земли и различных объектов.

2. Методы измерения расстояний с помощью лазеров

Наиболее известные и используемые в настоящее время технологии измерения расстояний с помощью лазера [5]:

- **Триангуляция** – геометрический метод, используемый для измерения расстояния в диапазоне от 1 мм до многих километров. метод для измерения расстояний, часто с использованием лазера. Он использует способность лазерного луча распространяться с малой расходимостью на большие расстояния. Обычно лазерный луч подсвечивает точку, расстояние до которой необходимо измерить; по существу, лазер используется в качестве указателя. Рассеянное или зеркальное отражения от этой точки контролируются детектором, который устанавливается на некотором расстоянии от лазерного луча, таком, что источник лазерного излучения, объект и детектор образуют треугольник. Принцип триангуляции также может быть также реализован с помощью лазерного луча, в

направлении которого производится быстрое сканирование в двух измерениях. Таким образом, можно получить трехмерные (3D) изображения.

- В идеале, лазерный источник для триангуляции должен иметь высокое качество пучка, чтобы осветить небольшое пятно на большом расстоянии. Так же требуется определенная оптическая мощность, особенно для целей с рассеянным отражением. Лучше использовать безопасные для глаз длины волны лазерного излучения (например, в 1.5 мкм).

- **Импульсный метод** – основан на измерении времени прохода лазерного импульса от измерительного прибора до некоторой цели и обратно. Такие методы обычно используются для больших расстояний, от сотен метров до нескольких километров. Используя передовые технологии, можно измерить расстояние между Землей и Луной с точностью до нескольких сантиметров. Типичная точность простых устройств измерения коротких расстояний равна нескольким миллиметрам или сантиметрам.

- **Фазовый метод** - использует модулированный по интенсивности лазерный луч. По сравнению с интерферометрическим методом, его точность ниже, но он позволяет делать однозначные измерения на больших расстояниях и больше подходит для целей с рассеянным отражением.

- **Методы частотной модуляции** используют частотно-модулированные лазерные лучи, например, с повторяющимся линейным законом изменения частоты. Измеряемые расстояния могут быть переведены в смещение частоты, которые могут быть измерены с помощью биения исходящего и принятого пучка.

- **Интерферометрия** позволяет измерять расстояния с точностью, превышающей длину волны используемого света. Принцип действия всех интерферометров одинаков, и различаются они лишь методами получения когерентных волн и тем, какая величина непосредственно измеряется. Пучок света с помощью того или иного устройства пространственно разделяется на два или большее число когерентных пучков, которые проходят различные оптические пути, а затем сводятся вместе.

В месте схождения пучков наблюдается интерференционная картина, вид которой, т. е. форма и взаимное расположение интерференционных максимумов и минимумов, зависит от способа деления пучка света на когерентные пучки, от числа интерферирующих пучков, разности их оптических путей (оптической разности хода), относительной интенсивности, размеров источника, спектрального состава света.

В настоящее время лазерный сканер (LiDAR) по существу относится к геодезическому оборудованию и является угломерным прибором с лазерным дальномером. В отличие от своего предшественника (обычного тахеометра), лазерный сканер позволяет производить массу измерений в единицу времени, вращая плоскость

измерений (или зеркало, отражающее лазерный луч) вокруг своей оси. Измеряя при этом время задержки выходного и отраженного лазерного сигнала, измеряется расстояние до объекта. В результате мы получаем плотное облако точек (от 10 до нескольких тысяч точек на квадратный метр), позволяющее зафиксировать актуальное состояние сканируемого пространства и объектов в нем в трехмерном виде.

По сравнению с ультразвуковыми или радио- и микроволновыми устройствами (радары), основное преимущество лазерных методов измерения расстояния в том, что лазерное излучение обладает гораздо меньшей длиной волны, что позволяет направить узкий сканирующий пучок и, таким образом, достичь более высокого пространственного разрешения. Еще одно преимущество в том, что оптический полосовой фильтр позволяет очень эффективно отсеять шум, возникающий от других оптических частот.

Как и практически при всех других методах измерения с использованием лазеров, при лазерном измерении расстояния присутствует лазерный шум. Другие, связанные с шумом проблемы могут возникнуть в результате шума детектирования, рассеивания света, и спекл-эффектов.

Цели (объекты) могут обладать различными свойствами отражения и рассеяния. Проблемы могут возникнуть из-за очень низкого отражения или из-за зеркального отражения.

Следует обратить внимание, что использование лазеров поднимает серьезные вопросы безопасности, особенно при использовании коротких интенсивных импульсов с модуляцией частоты. Связанные с этим опасности могут быть сильно уменьшены за счет использования безопасных для глаз длин волн лазеров.

3. Принципы воздушного и мобильного лазерного сканирования

Развитие военных технологий, связанных с высокоточным позиционированием движущегося объекта в пространстве с помощью системы глобального позиционирования GPS и установленного на мобильный носитель лазерного сканера привело к возникновению новой высокоточной технологии дистанционного измерения.

Совмещение лазерных LiDAR и инерциальных навигационных систем позволило создать воздушную лазерную сканирующую систему. Пионером в этой области выступила компания Optech Inc. Canada, которая в 1973 году выпустила первый батиметрический сканер и в 1982 году - первый воздушный для канадского национального агентства изучения атмосферы земли.

Воздушные лазерные сканеры устанавливаются на такие носители как самолет или вертолет и предназначены для съемки больших участков местности с воздуха в процессе полета. Так как положение и ориентация сканера непрерывно меняются, такие системы укомплектовываются GPS приемником и инерциальной системой IMU (Inertial

Measurement Unit), измеряющими в реальном времени положение и ориентацию носителя/сканера в пространстве

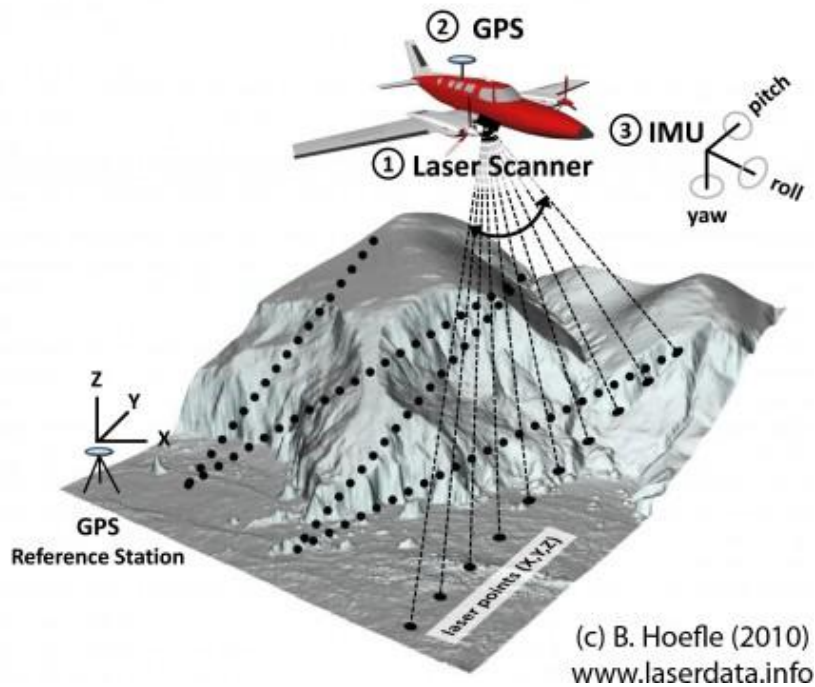


Рис 2. Принцип действия воздушной лазерной системы.

Инерциальная система (IMU) поставляет данные в специальный вычислительный комплекс, который вычисляет данные по скорости, положению и ориентации носителя в пространстве. Инерциальная система жестко связана с носителем (воздушным судном), на которую оно крепится.

Приемник GPS необходим для корректировки IMU путем оценки погрешностей и инициализации исходного положения. Основная алгоритмическая задача возложена на специальный бортовой вычислитель, который в режиме реального времени получает решение уравнений движения (Ньютона), описывающих положение, скорость и ориентацию IMU сенсоров в пространстве с учетом вращения земли. Вычисления выполняются на основе данных, получаемых с помощью гироскопов и акселерометров, которые жестко связаны с носителем. Соответственно, произведенные вычисления могут быть пересчитаны в любой точке, размещенной на том же носителе, например в точке центра сканирующего центра лазерного локатора. Без GPS, инерциальная навигационная система существует только в локальной системе координат.

На практике применяется работа в так называемом дифференциальном GPS-режиме, когда навигационное решение формируется в реальном времени. Для этого необходимо использовать одну или несколько референсных (базовых) станций, расположенных вдоль трассы сканирования на расстоянии не более 50 км друг от друга. По данным этих измерений в процессе постобработки ее результатов с привлечением точно вычисленных

положений GPS-спутников выполняется дифференциальная коррекция траектории носителя (и угловых координат), которая используется при вычислении полного точного навигационного решения.

Имея полномасштабное навигационное решение можно точно определить положение излученного импульса, измерить время отклика и рассчитать расстояние до объекта отражения.

4. Вопросы точности лазерных данных

Важность вопроса точности лазерных данных не нуждается в дополнительных комментариях, поскольку лазерный сканер есть, по определению, средство геодезических измерений. Однако большое внимание должно быть уделено правильной трактовке такого понятия, как точность.

Как известно из общей метрологии: проблема точности любого средства измерения сводится к исследованию источника и характера ошибок между истинным и замеренным значением измеряемого параметра. Применительно к лазерным измерениям можно предложить несколько аспектов рассмотрения этого вопроса. Возможные способы классификации погрешностей:

- паспортные и реальные;
- приборные и методические;
- по источнику происхождения.

Паспортные и реальные погрешности. Паспортные значения ошибок измерений специфицируются производителем. В качестве примера рассмотрим спецификацию точности лазерного локатора ALTM 3100 канадской компании Ortech Inc. (табл. 1).

Табл. 1. Типовая спецификация точности лазерно-локационных данных

Параметр	Значение
Точность в плане(1δ)	Не хуже, чем $1/3000 \times H$, где H – высота съемки
Точность по высоте (1δ)	Не хуже 15 см при высоте до 1200 м Не хуже 35 см при высоте до 3000 м
Разрешение по дальности	1 см

Паспортная спецификация точности лазерных измерений, обеспечиваемая тем или иным прибором, обладает следующими особенностями:

1) количество определяемых параметров сильно ограничено, а определение точности сильно упрощено. По сути указывается только предельное значение ошибки и вероятность в предположении, что характер распределения погрешности – Гауссовый.

Целесообразность такого подхода определяется в большей мере коммерческими, а не техническими обстоятельствами. Кроме того, спецификация такого рода у каждого производителя предполагает наличие хорошо определенной процедуры контроля точности, включающей летные и наземные измерения. Такая процедура, как правило, используется в качестве приемо-сдаточной;

2) неявно подразумевается, что указанные значения точности соответствуют идеальным условиям съемки, т.е. в процессе эксперимента обеспечены следующие условия: благоприятная GPS обстановка, по количеству спутников, значению PDOP, надлежащее геодезическое обеспечение, качественное пилотирование, обеспечивающее получение полноценного навигационного решения, нормальные оптические свойства отражающих поверхностей наземного объекта, используемого в качестве эталона.

Реальные погрешности почти всегда отличаются от паспортных в худшую сторону. Здесь речь идет не о том, что паспортные спецификации точности содержат недостоверную информацию. Правильнее будет говорить, что в реальности съемка выполняется не всегда в идеальных условиях, поскольку в расчет принимаются не только технические, но и экономические факторы. Поэтому на практике приходится сталкиваться со значительным снижением точности по отношению к паспортным значениям. По этой же причине категория точности лазерных данных намного сложнее формы, указываемой в спецификации, так как на практике в не самых благоприятных условиях приходится считаться с множеством факторов, прямо или косвенно влияющих на точность [8].

Деление погрешностей на приборные и методические в метрологии считается классическим. Приборные погрешности связаны с неустранимыми эффектами в форме шумов и наводок, содержащимися в результирующих измерениях и носящих случайный характер. В аэросъемочном лидаре это приборные погрешности оптико-электронного тракта приемника и излучателя, схемы измерения дальности, ошибки механизма развертки, а также ошибки GPS и IMU. Контроль за величиной и динамикой (изменением значений приборных погрешностей в ходе эксплуатации) выражается в проведении периодических лабораторных калибровок и поверок, в ходе которых определяется множество поправочных коэффициентов к результатам непосредственных измерений дальнометрического и навигационного блока. Применение этих поправок позволяет в значительной степени устранить системные погрешности и определить величину остаточного разброса значений, которые и принимаются за точность.

Как и для других средств дистанционного зондирования и измерения вообще, следует различать абсолютную и относительную точность измерения, а также такие категории, как точность и чувствительность (или разрешающая способность).

Методические погрешности, по определению, возникают от того, что для получения результата измерений в конечные сроки и с «разумными» затратами всегда приходится игнорировать некоторые неглавные факторы, которые, тем не менее, оказывают некоторое воздействие на результат. В авиационной и мобильной лазерной локации главными источниками методических погрешностей оказываются бортовой GPS приемник, а также средства геодезического обеспечения.

Приведем некоторые примеры методических погрешностей:

- конечная расходимость зондирующего луча;
- ширина мгновенного поля зрения приемника, которая шире эффективной расходимости зондирующего луча;
- рефракция в атмосфере;
- гравитационные аномалии.

Классификация погрешностей по источнику происхождения имеет важное практическое значение, так как всегда важно понимать, какой блок в составе лидара или какой процесс является источником той или иной погрешности или неисправности. Локализация источника позволяет принять адекватные корректирующие действия, так как применительно к каждому отдельному блоку разработчиком прописаны процедуры контроля, калибровки и профилактики. Повторим еще раз, что источником различного рода погрешностей в лазерной локации могут выступать:

- сканирующий блок;
- дальнометрический блок;
- навигационный комплекс GPS+IMU;
- средства геодезического обоснования, т.е. опорная геодезическая сеть;
- ошибки по результатам определения выставочных параметров.

Траекторное (навигационное) решение является ключевым этапом предварительной обработки данных измерений МЛС, от которых зависит абсолютная точность позиционирования.

Существует шесть классов ошибок при вычислении траекторного решения [6]:

- 1) **Ephemerisdata**--Ошибки в передаче координат спутника .
- 2) **Satelliteclock**-- ошибки в передаче отметок времени.
- 3) **Ionosphere**--Ошибки при вычислении коррекционных поправок расстояния, вызванных ионосферными помехами .
- 4) **Troposphere**-- Ошибки при вычислении коррекционных поправок расстояния, вызванных тропосферными помехами.
- 5) **Multipath**--ошибки, вызванные переотраженным сигналом, поступающим на вход антенны.

б) **Receiver**--Ошибки измерения дальности, вызванные термальным шумом, программной точностью и межканальными отклонениями.

Механизм неточного знания эфемерид связан, прежде всего, с наблюдаемыми на практике расхождениями между предсказываемой и реальной (подверженной влиянию возмущающих сил) орбитами. К возмущающим силам относят различные факторы как гравитационного, так и не гравитационного происхождения.

Наиболее существенное влияние на неточность знания эфемерид спутников, входящих к состав систем GPS и ГЛОНАСС, оказывает солнечное радиационное давление и атмосферное торможение. Как показывают пред расчеты, отклонения спутников от расчетной траектории из-за воздействия прямого солнечного радиационного давления лежат в пределах от 5-6 м (для трехчасовых дуг) до 100-800 м (для двухсуточных дуг).

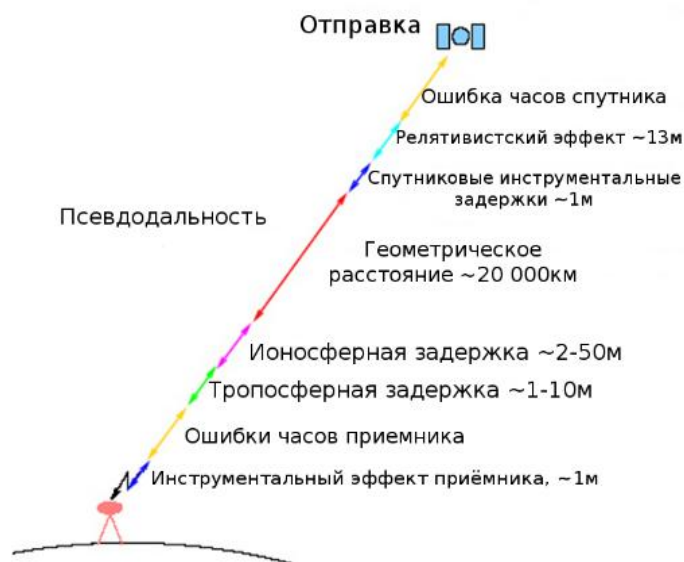


Рис 3. Основные ошибки позиционирования движущихся целей.

Отмеченные расчеты характеризуются невысокой надежностью по следующим причинам:

- интенсивность солнечного излучения не остается постоянной с течением времени;
- модель влияния данного фактора существенно изменяется при переходе спутника в зону тени и полутени;
- эффективная поверхность спутника плохо поддается пред расчету как из-за сложной конфигурации такой поверхности, так и из-за вариаций положения спутника в пространстве.

При использовании апостериорного метода определения эфемерид, сущность которого состоит в том, что при окончательной обработке спутниковых измерений используют не те значения эфемерид, которые сбрасываются со спутника по радиоканалу,

а от специально организуемых служб, которые накапливают реальные (а не прогнозируемые) значения эфемерид в банке данных на основе использования результатов измерений точность определения эфемерид составляет 1-2 м.

Встроенные часы GPS-приемника уступают в точности атомным часам, находящимся на борту спутников. Это может быть причиной небольших систематических ошибок в определении времени прохождения сигнала.

Из-за присутствия свободных электронов в ионосфере, GPS сигнал не распространяется со скоростью света как в вакууме. Задержка модулированного сигнала прямо пропорциональна количеству свободных электронов и обратно пропорциональна частоте несущей в квадрате. Для компенсации возникающей при этом ошибки определения псевдодальности используется метод двухчастотных измерений на частотах L1 и L2 (в двухчастотных приемниках). Линейные комбинации двухчастотных измерений не содержат ионосферных погрешностей первого порядка. Кроме того, для частичной компенсации этой погрешности может быть использована модель коррекции, которая аналитически рассчитывается с использованием информации, содержащейся в навигационном сообщении. При этом величина остаточной не моделируемой ионосферной задержки может вызывать погрешность определения псевдодальности около 1-2 м.

Под тропосферными ошибками понимают задержку радиосигналов в нейтральных слоях атмосферы стратосфере и тропосфере, где показатель преломления радиоволн с частотами до 15 ГГц от частоты радиосигнала не зависит и потому одинаков для обеих несущих частот L1, L2 и кодовых сигналов. Величина задержки зависит от метеопараметров (давления, температуры, влажности), а также от высоты спутника над горизонтом. Компенсация тропосферных задержек производится путем расчета математической модели этого слоя атмосферы. В общем случае данные ошибки приводят к погрешности до 1 м.

Ошибки, связанные с переотражением сигнала происходят, когда сигнал GPS отражается от объектов, таких как высокие здания или скалы и попадает в GPS-приемник. Увеличение времени прохождения отраженного сигнала приводит к возникновению ошибки.

Это происходит, когда сигнал GPS отражается от крупных препятствий, расположенных в непосредственной близости от приемника. При этом возникает явление интерференции и измеренное расстояние оказывается больше действительного. Аналитически данную погрешность оценить достаточно трудно, а наилучшим способом борьбы с ней считается комбинация рационального размещения антенны приемника

относительно препятствий и маскирования приема сигнала от спутников расположенных близко к горизонту.

В результате воздействия этого фактора ошибка определения псевдодальности может быть сведена до 1.0 м.

Ошибки приемника обусловлены, прежде всего, наличием шумов в электронном тракте приемника. Отношение сигнал/шум приемника определяет точность процедуры сравнения принятого от спутника и опорного сигналов, т.е. погрешность вычисления псевдодальности. Наличие данной погрешности приводит к возникновению координатной ошибки порядка 0.2м.

Дальше проанализированы источник и величина ошибок, определения геометрии движения спутников, результаты представлены в таблице. Каждая ошибка описана как смещение (persistenceofminutesormore) и случайный эффект такой как "белый шум", и показана небольшая корреляция между выборками. Общая ошибка каждой категории представлена как квадратный корень из суммы этих двух компонент.

Предполагается что каждый компонент ошибки статистически не коррелирован с другими, и приемник фильтрует измерения около 16 выборок.

В таблице 2 приведены результаты, когда режим селективного доступа SA выключен. Следовательно, средняя ошибка синхронизации часов, составляет 2.1м, что не является преобладающей ошибкой, по сравнению с ионосферной достигающей 4.0м. Таким образом, ошибка позиционирования GPS потенциально может составлять 10 м (в плане).

Таблица 2. Выключен режим селективного доступа SA.

Table 2 Standard error model - L1 C/A (no SA)					
One-sigma error, m					
Error source	Bias	Random	Total	DGPS	
Ephemeris data		2.1	0.0	2.1	0.0
Satellite clock	2.0	0.7	2.1	0.0	
Ionosphere		4.0	0.5	4.0	0.4
Troposphere		0.5	0.5	0.7	0.2
Multipath		1.0	1.0	1.4	1.4
Receiver measurement		0.5	0.2	0.5	0.5

User equivalent range error (UERE), rms*		5.1	1.4	5.3	1.6
Filtered UERE, rms		5.1	0.4	5.1	1.5

Vertical one-sigma errors--VDOP= 2.5		12.8	3.9		
Horizontal one-sigma errors--HDOP= 2.0		10.2	3.1		

Второй пример показывает влияние режима SA. В случае преднамеренного загробления синхронизации часов приемника и спутника, ошибка по времени становится

доминирующей, все остальные ошибки можно игнорировать. Результаты (Таблица 3) постоянно подтверждаются реальными измерениями. Заметим что SA указанное в столбце как bias не может быть усреднено в 0 с помощью односекундного фильтра. В принципе это значение можно свести к нулю, но при усреднении очень длинных выборок в течение многих часов и даже дней. Такое усреднение невозможно осуществить на практике, когда спутники наблюдаются на в определенной точке небольшими порциями (в течение нескольких часов). Если использовать дифференциальную коррекцию, влияние ошибки SA можно свести к нулю.

Таблица 3

Table 3 Standard error model - L1 C/A (with SA)					
One-sigma error, m					
Error source	Bias	Random		Total	DGPS
Ephemeris data	2.1	0.0		2.1	0.0
Satellite clock (dither)	20.0	0.7	20.0	0.0	
Ionosphere		4.0		0.5	4.0 0.4
Troposphere		0.5		0.5	0.7 0.2
Multipath		1.0		1.0	1.4 1.4
Receiver measurement	0.5	0.2		0.5	0.5

User equivalent range error (UERE), rms*	20.5	1.4	20.6	1.6	
Filtered UERE, rms	20.5	0.4	20.5	1.5	

Vertical one-sigma errors--VDOP= 2.5		51.4	3.9		
Horizontal one-sigma errors--HDOP= 2.0		41.1	3.1		

Ошибки двухчастотного PN-кода аналогичны описанным выше. Ожидаемая горизонтальная ошибка составляет менее 10м. Ионосферная ошибка может быть уменьшена до 0.7м при двухчастотном измерении. Основные ошибки в данном случае - ошибка эфемерид (точность позиционирования спутника)и точность синхронизации часов (Таблица 4).

Таблица 4

Table 4 Precise error model, dual-frequency, P(Y) code					
One-sigma error, m					
Error source	Bias	Random		Total	DGPS
Ephemeris data	2.1	0.0		2.1	0.0
Satellite clock	2.0	0.7		2.1	0.0
Ionosphere		1.0		0.5	1.2 0.1
Troposphere		0.5		0.5	0.7 0.1
Multipath		1.0		1.0	1.4 1.4
Receiver measurement	0.5	0.2		0.5	0.5

User equivalent range error (UERE), rms*		3.3		1.5	3.6 1.5
Filtered UERE, rms		3.3		0.4	3.3 1.4

Vertical one-sigma errors--VDOP= 2.5	8.3	3.7
Horizontal one-sigma errors--HDOP= 2.0	6.6	3.0

Примерные суммарные ошибки GPS системы приведены в следующей таблице 5.

• Эффект Ионосферы	• ± 5 метров
• Изменение орбиты спутника	• ± 2.5 метра
• Ошибка часов спутника	• ± 2 метра
• Влияние отражения сигналов	• ± 1 метр
• Эффект Тропосферы	• ± 0.5 метра
• Погрешности вычисления и округления	• ± 1 метр

В целом, суммарная ошибка составляет ± 15 метров. Корректировки таких систем, как WAAS (американская глобальная система распространения дифференциальных поправок) и EGNOS(европейская геостационарная служба навигационного покрытия), которые в основном уменьшают влияние эффекта ионосферы, а также влияния ошибок изменения орбиты спутника и часов спутника, позволяют уменьшить погрешность до $\pm 3 - 5$ метров.

5. Использование LiDAR данных

Начиная с 1982 года воздушные лазерные системы развивались экспоненциально и в настоящее время они позволяют собирать данные с высот до 10км и точностью 15-30см.

Как правило, совместно со сканирующей системой, на носитель устанавливается цифровая фотоаппаратура, позволяющая производить аэрофотосъемку одновременно с лазерным сканированием.

Дальность действия воздушных сканеров – от нескольких сотен до нескольких тысяч метров. Точность фиксации отражений по высоте – 10-15 см, в плане – 1/2000 высоты полета, что обусловлено существенной дивергенцией лазерного луча. Таким образом, при съемке местности с высоты 500м, плановая точность будет не хуже 25 см. Плотность отражений обычно составляет от единиц до сотен точек на 1 кв.м и зависит от частоты генерируемых импульсов и высоты полета. Возможность фиксации нескольких откликов от каждого импульса позволяет получать лазерные отражения от поверхности земли, скрытой растительностью – т.е. восстанавливать рельеф местности там, где это невозможно сделать с помощью традиционной аэрофотосъемки.

Воздушное сканирование применяется для съемки как площадных, так и протяженных инфраструктурных объектов, таких как дороги, трубопроводы, линии

электропередач и т.д. Результаты воздушной лазерной съемки применяются в проектировании, инвентаризации объектов, картографии и многих других областях.

Технология использования и обработки данных воздушного лазерного сканирования поставлена на "поток" и в Америке можно заказать лазерную съемку своего участка земли по вполне приемлемой цене. Подобная доступность пространственных данных для промышленного и коммерческого использования в разных масштабах в единой открытой национальной системе координат позволяет решать многие юридические споры, касающиеся землепользования и охраны окружающей среды.

Основным результатом воздушного лазерного сканирования является Цифровая Модель Рельефа (DTM), которая является входной информацией в частности для таких систем как системы управления наводнением и предупреждение последствий от затоплений. Здесь существует масса проблем и задач, связанных с предварительной фильтрацией данных лазерного сканирования. Фильтрация во время процесса LiDAR может быть определена как выделение и отделение точек земной поверхности и точек объектов. Не так давно, было разработано некоторое количество алгоритмов разработанных для улучшения процесса выделения, в котором точки от поверхности земли отделялись от облаков точек, полученных LiDAR. Большинство этих алгоритмов фильтрации классифицирует данные по крайней мере на две категории, именуемые как объект и поверхность, используя операции по определению точек из локального окружения (Sithole и Vosselman, 2004). Каждый фильтр делает предположение о структуре точек «твердой земли» в локальном окружении. Например, точки «твердой земли» в конкретном месте должны соответствовать данной параметрической поверхности. Четыре отдельных группы фильтров могут быть идентифицированы:

Первая группа - так называемое, математическое морфологическое фильтрование. Вторая группа может быть описана как прогрессивные фильтры. В третьей группе алгоритмов Triangulated Irregular Network (TIN) получена из минимумов окрестных точек, и затем облако лазерных точек прогрессивно сгущено. Этот процесс называют уплотнением. Четвертая группа фильтров состоит из основанных на сегментации фильтров, где каждый пиксель на основании сегментации классифицирован как «земля» или «не-земля».

Главное различие между этими разными методами можно увидеть в стратегии, которую они используют, чтобы оценить плановую и высотную разность между точками объекта и поверхностью. В дополнение, до сих пор, большинство этих алгоритмов было построено для сельской окружающей среды, и очень немногие были сосредоточены на отделении городских объектов от сложной городской поверхности.

Начиная с 2005 года стало развиваться другое направление лазерного сканирования - мобильное, совмещающее в себе черты воздушного сканирования (мобильность) и наземного (плотность и точность измерений).

Разрабатываемое в основном для проведения геодезических изысканий для автомобильных дорог, этот вид сканирования в последние несколько лет стал использоваться также и для железных дорог.

Идеологически мобильная лазерная съемка схожа с воздушной, только в качестве носителя здесь используется наземная платформа - например, автомобиль, железнодорожная моторка или катер. Как правило, мобильная сканирующая система состоит из 2-х или более лазерных сканеров, нескольких цифровых фото/видео камер, а также GPS и IMU модулей. Сканирование производится в процессе движения носителя по дороге, железнодорожному полотну или водной поверхности. В отличие от воздушного сканера, состав объектов, находящихся при этом в зоне видимости, меньше, но плотность отражений, а значит и детальность облаков точек существенно выше.

С точки зрения геопозиционирования, основное отличие от воздушной платформы заключается в том, что, находясь близко к поверхности земли, GPS приемник мобильной системы часто попадает в области затенения сигналов спутников от зданий, растительности, элементов рельефа местности. Поэтому проблема повышения точности данных мобильного сканирования на сегодняшний день является весьма актуальной. Основное применение мобильного сканирования – съемка автомобильных и железных дорог, мостов, путепроводов, городских улиц, береговой линии.

6. Обзор и основные характеристики МЛС

Как уже говорилось, мобильное лазерное сканирование имеет огромный потенциал для уменьшения суммарной стоимости изыскательских и проектировочных работ. Мобильная сканирующая система – это сложный технический комплекс, позволяющий на движущемся транспортном средстве в любое время суток и при любых погодных условиях собирать данные о пространственном расположении зданий и сооружений какой-либо местности. Получение трехмерного изображения происходит с привязкой к единой системе координат.

Мобильное лазерное сканирование (МЛС) реализует технологическую возможность получения геопространственных данных с движущихся платформ. Сканер монтируется на автомобилях, судах, железнодорожных платформах и интегрируется с фото и видеокамерами, спутниковыми приемниками позиционирования ГЛОНАСС/GPS, таким образом, получается единая система сбора геопространственной информации. Система

собирает большой массив данных лазерного сканирования и видеоизображения в сжатые сроки с высокой точностью.

Технология мобильного лазерного сканирования объединила в себе скорость получения и объемы данных от воздушного сканирования, а точность и детальность - от наземного [9]. В плане конструктивных решений, данная технология аналогична лазерной аэрофотосъемке (воздушное лазерное сканирование). Технология выполнения съемки в движении является инновационной в области выполнения измерений для создания картографических материалов, паспортизации, мониторинга и фиксации состояния протяженных инфраструктурных объектов.

Основные компоненты, из которых состоит мобильная сканирующая система:

- подвижная платформа, поглощающая удары и тряску;
- одомер – прибор для измерения пути, пройденного транспортным средством;
- блок управления, интерфейс пользователя и специальное ПО для управления процессом съемки;
- лазерный сканирующий блок (один или несколько – в зависимости от поставленных задач);
- интегральная навигационная система GPS/IMU - инерциальная навигационная система IMU;
- цифровые камеры высокого разрешения;
- базовая станция или сеть базовых станций GPS и приемные устройства глобальных навигационных спутниковых систем.

Таблица 6. Сравнительные технические характеристики мобильных сканирующих систем Optech LYNX M1, RIEGLVMX-250, RIEGLVMX-450

Характеристика	Optech LYNX M1	RIEGL VMX-250	RIEGL VMX-450
Точность лазерного дальномера	8 мм	до 10 мм (на расстоянии 150 м)	8 мм (на расстоянии 100 м) 2-3 мм (на расстоянии 20м)
Максимальная дальность измерений	200 м, при коэффициенте отражения 20%	180 м, при коэффициенте отражения 10%	300 м, при коэффициенте отражения 10%
Частота сканирования	200 Гц, программируется	100 Гц	200 Гц, программируется
Частота излучения лазера	500 кГц	300 кГц	550кГц.
Температура эксплуатации	От -10°С до +40°С, возможно расширение диапазона	От -10°С до +40°С, возможно расширение диапазона	От -10°С до +40°С, возможно расширение диапазона
Число сенсоров	1-2	1-2	1-2
Число цифровых камер	До 4(2MPx)	До 6(5MPx)	До 6 (5MPx)
Угол обзора камер	73°x59°	80°x65°	80°x65°
Абсолютная пространственная	+/- 5 см, 1 б	+/- 2-5 см, 1 б	+/- 2-5 см, 1 б

погрешность			
Точность по облаку точек (повторяемость)	8 мм	5 мм	5 мм
Класс лазера	1	1	1
Количество отраженных импульсов от одного исходящего	до 4-х	не ограничено (классификация по номеру отражения – первый, единственный, промежуточные, последний)	не ограничено (классификация по номеру отражения – первый, единственный, промежуточные, последний)
Напряжение питания	12 В	11-15 В	11-15 В
Поле зрения сканирования	360°	360°	360°
Вес системы	78 кг	43 кг	43 кг
Разрешение видеокамер	2MPx доступны также другие камеры	5MPx доступны также камеры (по запросу): 1.4; 2.0; 10; 16 Mpix	5MPx доступны также камеры (по запросу): 1.4; 2.0; 10; 16 Mpix
Время появления системы на рынке	2007г.	2010 г.	2012 г.
Программное обеспечение			
Расчет траекторий	ApplanixPOSPAC MMS	ApplanixPOSPAC MMS	ApplanixPOSPAC MMS
Развертывание облака точек	Optech LMS	RiWORD, RiProcess	RiWORD, RiProcess
Получение LAS файлов	Optech LMS	RiPROCESS	RiPROCESS
Уравнивание данных	Optech LMS	RiPRECISION	RiPRECISION
Обработка ТЛО с привязкой к контрольным точкам	Optech LMS	RiPROCESS, RiPRECISION, RiSCAN PRO	RiPROCESS, RiPRECISION, RiSCAN PRO
Преимущества			
Разрешающая способность	+	++	+++
Вписывание головки рельса	+	++	+++ (более четкий абрис)
Калибровка	нужна	Не нужна	Не нужна
Всепогодность (дождь)	-	-	-
Пакетная обработка данных	Не известно	+	+
Сведение данных разных проездов	Не известно	+	+
Стоимость (включая ПО)	~850 евро	~950 евро	~1200 евро
Сертификация нового МЛС	требуется	не требуется	не требуется
Предпочтение	+	++	+++

Заключение

К основным преимуществам технологии лазерного сканирования, несомненно, можно отнести высокую скорость и оперативность съемки, недостижимую любыми другими методами измерений. В области обследования линий электропередач воздушная лазерная съемка сегодня является практически мировым стандартом. При этом нельзя забывать о правовых вопросах. Например, для проведения любой аэросъемки требуется пройти долгий путь получения соответствующих разрешений, связанных как с вопросами

секретности, так и с вопросами использования воздушного пространства. Это может занимать весьма значительное время, что отрицательно влияет на оперативность.

Основным результатом лазерного сканирования – будь то наземное, воздушное или мобильное – является облако трехмерных точек, с той или иной точностью описывающих геометрические параметры объекта съемки. Количество лазерных отражений, полученных при съемке объекта обследования, часто составляет сотни миллионов и даже миллиарды [10]. Обработка таких массивов данных и формирование на их основе конечных продуктов для пользователей в различных отраслях деятельности сегодня является наиболее трудоемкой составляющей лазерной технологии.

Список литературы

1. Дулин С.К. Структурная согласованность данных и знаний. Учебное пособие. М.: МЗ Пресс, 2005, 361 с.
2. Middleton, W. E. K, and Spilhaus, A. F. Meteorological Instruments, University of Toronto, 3rd ed., 1953.
3. Привалов В. Е., Фотиади А. Э., Шеманин В. Г. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы: Учебное пособие. 1-е изд. ISBN 978-5-8114-1370-6, 2013, 288 с.
4. Fiocco G., Smullins L. D. Detection of Scattering Layers in the Upper Atmosphere (60-140km) by Optical Radar// Nature. 199. 1275-1276, 1963.
5. <http://www.laser-portal.ru>
6. Журнал Геопрофи №5, 2005.
7. Ionospheric effects on GPS, GPS World. Vol.2. No. 4. P. 48, April 1991.
8. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. Лазерная локация земли и леса. Москва-Красноярск, Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007.
9. Дулин Н.Г., Якушев Д.А. Анализ ошибок измерений при использовании мобильного лазерного сканера – М.: ВЦ РАН, 2013. 27 с.
10. Single Event Upsets (SEUs), US Satellites and Space Weather Center, <http://www.sel.noaa.gov/info/satellites.html>.