

# Предварительная обработка данных мобильного лазерного сканирования в системе IndorCloud

Медведев В.И., ведущий разработчик ООО «ИндорСофт» (г. Томск)  
 Сарычев Д.С., к.т.н., директор по развитию ООО «ИндорСофт» (г. Томск)  
 Скворцов А.В., д.т.н., профессор, генеральный директор ООО «ИндорСофт» (г. Томск)

*Дётся представление о ранних стадиях обработки данных мобильной лазерной съёмки. Прежде чем приступить к извлечению нужных данных, необходимо получить промежуточную модель — облако точек.*

В последние годы в дорожной отрасли начали широко применяться высокопроизводительные инструменты мобильного лазерного сканирования, работающие на основе высокоточных технологий GPS/ГЛОНАСС, инерциальных навигационных и лазерных систем. Мобильное лазерное сканирование применяется в нашей стране уже около 10 лет для паспортизации и создания ГИС [1]. С 2013 г. Государственная компания «Российские автомобильные дороги»

и Федеральное дорожное агентство начали применять мобильное лазерное сканирование для проектирования ремонтов автомобильных дорог.

Несмотря на первые многообещающие успехи новой технологии, ей пока ещё не удалось органично вписаться в существующие организационно-технические процессы в отрасли [2, 3]. В первую очередь, это вызвано огромным потоком исходных данных, которые не в состоянии должным образом обработать используемые

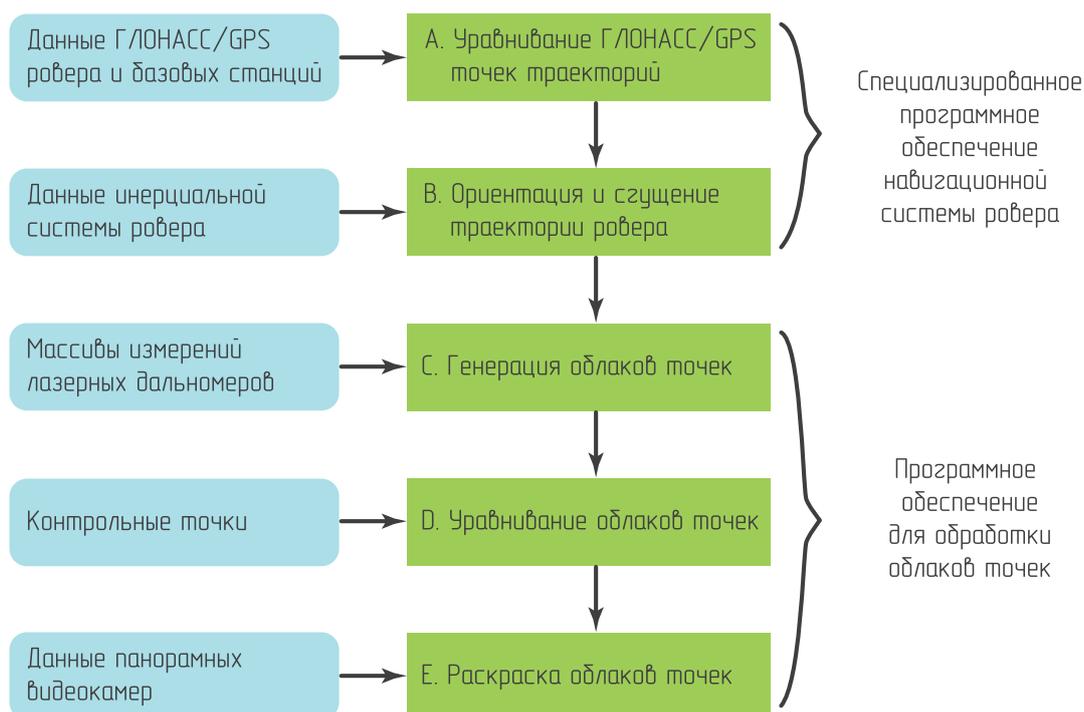


Рис. 1. Стадии предварительной обработки данных лазерного сканирования

в организациях программы классов САПР и ГИС. Именно поэтому приходится либо существенно ограничивать объёмы обрабатываемых за раз данных (например, порциями по 100 м дороги), либо прореживать данные (например, оставив только каждую 10-ю точку). Но даже прореженные специальными интеллектуальными алгоритмами данные (в программах типа TerraScan компании Terrasolid, Финляндия) по-прежнему слишком массивны для большинства используемых в России САПР и ГИС.

Именно поэтому наша компания «ИндорСофт» ведёт разработки в области ввода и обработки данных мобильного лазерного сканирования. Для обработки первичных данных и интеллектуальной классификации точек лазерного сканирования в настоящее время разрабатывается система IndorCloud.

Целью настоящей статьи является рассмотрение основных принципов, лежащих в основе геометрической обработки точек лазерного сканирования, реализованных в программе IndorCloud, уже прошедшей опытную эксплуатацию на ряде проектов Федерального дорожного агентства.

### Стадии предварительной обработки

Обработка данных лазерного сканирования является первой задачей при получении цифровой модели местности (ЦДММ). Полная технологическая цепочка обработки охватывает несколько этапов: уравнивание траекторий и облаков точек, устранение

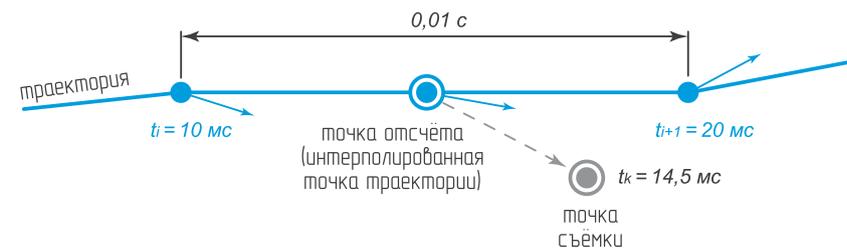


Рис. 2. Использование траектории для получения облака точек

шумов, раскраску в естественные или синтетические цвета и классификацию точек, удаление помех, оцифровку объектов и экспорт в САПР и ГИС для дальнейшей работы [4]. Данная статья подробно рассматривает первые стадии обработки данных, целью которых является создание готовых облаков точек.

Особого внимания заслуживает тот факт, что после выполнения лазерной съёмки мы не получаем сразу облака точек и готовую модель местности. Мы получаем записанные в файлы показания встроенных в систему лазерного сканирования приборов: ГЛОНАСС/GPS-приёмника, гироскопа, акселерометра, датчика вращения колеса автомобиля, лазерных дальнометров и, возможно, данные панорамных видеокамер. Поэтому первоочередная задача на данном этапе — обработка полученных измерений с целью формирования облаков точек.

Рассмотрим основные стадии предварительной обработки (рис. 1).

**А. Уравнивание ГЛОНАСС/GPS точек траекторий.** На данной стадии производится пост-обработка

ГЛОНАСС/GPS-данных. Поскольку для определения положения мобильной лазерной системы (ровера) используется высокоточный режим измерений с базовыми станциями, на вход стадии поступают сразу несколько наборов измерений — от ровера и от базовых станций. Процесс получения ГЛОНАСС/GPS-трека из нескольких наборов измерений называется уравниванием траектории на базовые станции.

**В. Ориентация и сгущение траектории ровера.** На данной стадии траектория, представленная ГЛОНАСС/GPS-треком, дополняется множеством промежуточных точек и получает вектора ориентации в каждой точке. Также производится дополнительное уравнивание точек ГЛОНАСС/GPS-трека. Результатом является траектория, состоящая из множества точек положения ровера в пространстве, точного времени нахождения в данных точках и ориентации ровера.

**С. Генерация облаков точек.** Эта стадия использует траекторию для расчёта XYZ-координат точек, соответствующих измеренным лазерными

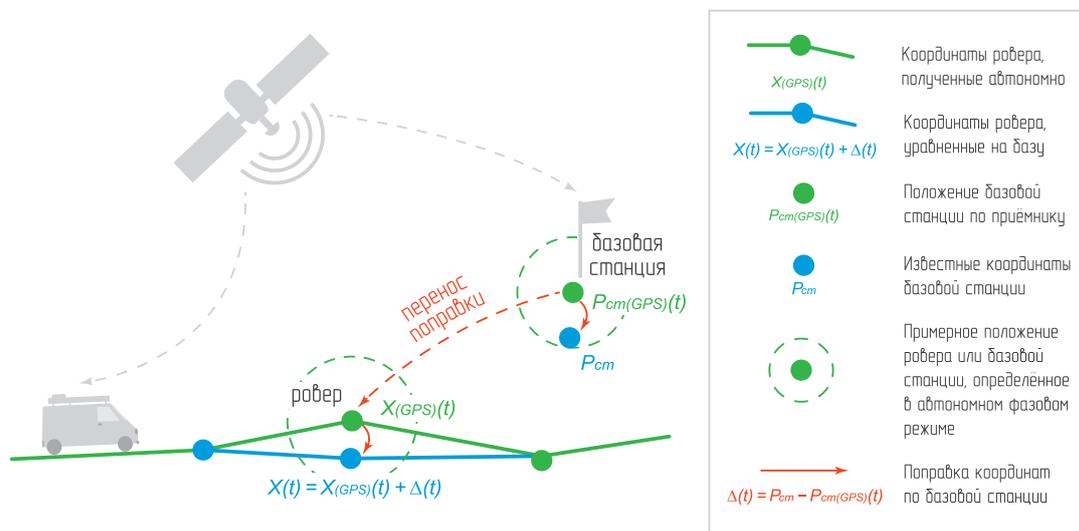


Рис. 3. Уравнивание траектории по базовым станциям

ми дальномерами расстояниям. Таким образом массивы измерений лазерных сканеров превращаются в облака точек.

**Д. Уравнивание облаков точек.** Полученные точки могут содержать ошибки положения, поэтому в зависимости от исходной задачи может потребоваться устранение этих ошибок путём уравнивания облаков.

**Е. Раскраска облаков точек.** На данной стадии облака точек дополняются информацией о цвете снятых точек, получаемой из панорамных фотоснимков.

## Траектория как исходные данные для получения точек

Важнейшим элементом технологии обработки данных лазерного сканирования является траектория движения. Лазерный сканер сообщает лишь расстояние до объекта съёмки. Чтобы получить XYZ-координаты точки съёмки, являющейся элементом облака точек, необходимо знать, откуда и в каком направлении производилось данное измерение расстояния.

В роли такой системы отсчёта выступают положение и ориентация ровера в пространстве в соответствующий момент времени. Эти данные можно получить, используя траекторию движения лазерной системы, представленную набором точек, в каждой из которых точно известны положение и ориентация ровера. За положение ровера принимают положение центра его внутренней системы отсчёта (зачастую совпадает с центром инерциальной навигационной системы или антенны ГЛОНАСС/GPS-приёмника). Проиллюстрируем следующим примером.

*Пусть имеется подготовленная траектория, и требуется найти координаты точки съёмки, полученной в момент времени  $t_k = 14,5$  мс (рис. 2). Точные координаты ровера нам известны только в моменты времени  $t_i = 10$  мс и  $t_{i+1} = 20$  мс, поэтому координаты точки отсчёта и ориентацию ровера в момент времени  $t_k$  можно получить интерполяцией по точкам траектории. Затем точка отсчёта используется для вычисления точки съёмки по известному вектору расстояния.*

Траектория — это модель перемещения лазерного сканера за вре-

мя съёмки, получаемая обработкой данных от встроенных ГЛОНАСС/GPS-приёмника, инерциальной системы (гироскопа и акселерометра) и ГЛОНАСС/GPS-приёмников базовых станций. Каждая точка траектории имеет параметры времени, положения и ориентации ровера в пространстве и, возможно, априорных ошибок измерения всех величин.

**В зависимости от задачи, для решения которой предназначено итоговое облако точек, к облаку точек, а следовательно, и к траектории предъявляются различные требования точности.**

В зависимости от задачи, для решения которой предназначено итоговое облако точек, к облаку точек, а следовательно, и к траектории предъявляются различные требования точности [5, 8]. Для таких задач, как проектирование реконструкции и ремонта формальные требования точности выражаются в требованиях к характеристикам теодолитного хода при геодезических изысканиях [9], что на практике означает точность измерения в плане порядка 1–5 см, по высоте — 5–10 мм.

Для достижения такой точности съёмки погрешность определения положения ровера должна составлять единицы миллиметров, а ориентации — единицы угловых минут. Это возможно только с использованием всех рассматриваемых ниже стадий обработки данных лазерного сканирования.

Для ряда других задач, например паспортизации автомобильных дорог, требования точности существенно ниже, вплоть до дециметров. В таких случаях некоторые стадии обработки, такие как уравнивание облаков, можно опустить.

## Уравнивание траектории по базовым станциям

Точки траектории ровера получают с помощью встроенного в ровер ГЛОНАСС/GPS-приёмника. Приёмник подобного типа поддерживает несколько режимов работы, существенно отличающихся точностью определения координат.

Автономный режим обеспечивает точность до 30 м в худшем случае и до 3–5 м в среднем и вряд ли может быть эффективен для решения рассматри-

ваемых задач. Дифференциальный кодовый режим подразумевает съёмку с установленными референц-станциями и обеспечивает точность 0,5–5 м. Этого может быть достаточно для решения задач масштаба геоинформационных систем.

Для наиболее точного определения координат ровера в пространстве используется дифференциальный фазо-

вый режим, позволяющий добиться точности порядка 0,5–20 мм [10, 11]. Если приёмники поддерживают данный режим, целесообразно сделать выбор в его пользу.

Оба дифференциальных режима позволяют производить координирование в реальном времени за счёт обмена данными между ровером и базовыми станциями по радиосвязи. Однако из-за подверженности радиосигнала помехам и наличию запаздывания применения дифференциальных поправок более подходящим является второй способ — автономная запись данных ровера и станций с последующей пост-обработкой.

В ходе пост-обработки, называемой уравниванием ГЛОНАСС/GPS-измерений по базовым станциям, используются данные с приёмника ровера и приёмников стационарных базовых станций, размещённых вдоль пути следования ровера. У каждой базовой станции есть известные координаты  $P_{ст}$ , которые используются для вычисления вектора поправки  $\Delta(t)$  к показаниям приёмника базовой станции  $P_{ст(GPS)}(t)$ . На основании поправок на всех базовых станциях вычисляется уравненная поправка, которая затем применяется к показаниям приёмника ровера  $X_{(GPS)}(t)$ , в результате чего получают уравненные координаты ровера  $X(t)$ . Данное уравнивание выполняется с помощью специализированных программ (рис. 3).

## Ориентирование и сгущение траектории

Полученный на стадии уравнивания траектории набор точек всё ещё не пригоден в качестве точек отсчёта

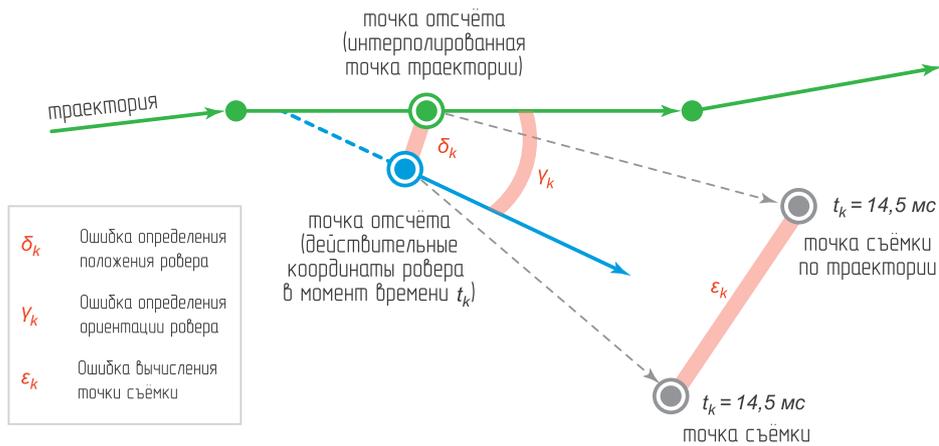


Рис. 4. Влияние качества траектории на ошибку вычисления точки съёмки

для вычисления облаков точек по двум причинам:

1. Отсутствуют данные об ориентации в каждой точке (требуется ориентирование).

2. Временной интервал между точками слишком велик (0,1–1 с), что соответствует расстоянию более метра при расчётной скорости движения ровера 60 км/ч (требуется сгущение).

В качестве наиболее простого приближённого решения можно довольствоваться интервалом между точками в несколько метров и считать, что ориентация ровера совпадает с вектором между соседними точками. Однако слишком грубое приближение: автомобиль всегда имеет

небольшой боковой снос и крен на поворотах, «взлетает» или «клюёт носом» при ускорении и торможении и т.д. В результате углы курса, тангажа и крена автомобиля, а следовательно, и ровера, могут заметно расходиться с направлением его движения (по крайней мере, существенно больше требуемой нам точности, исчисляемой в угловых минутах).

В таком случае при работе с точкой отсчёта, взятой примерно посередине между точками траектории, ошибка измерения угла  $\gamma_k$  может составить целые градусы, а ошибка определения положения  $\delta_k$  — дециметры (например из-за попадания колеса в выбоину или на кочку в результате резкого тормо-

жения или другого манёвра). В сумме, учитывая, что расстояние от лазера до точки съёмки составляет десятки метров, это даст ошибку определения точки съёмки  $\epsilon_k$  до метра, что неприемлемо при решении большинства задач. На рис. 4 проиллюстрирован пример такой ситуации.

Лучший способ ориентирования и сгущения траектории заключается в использовании данных, полученных от гироскопов и акселерометров, образующих инерциальную навигационную систему (ИНС) [12, 13]. ИНС регистрирует, как перемещался и как менял направление ровер относительно некоторого известного начального положения и направления, и работа-

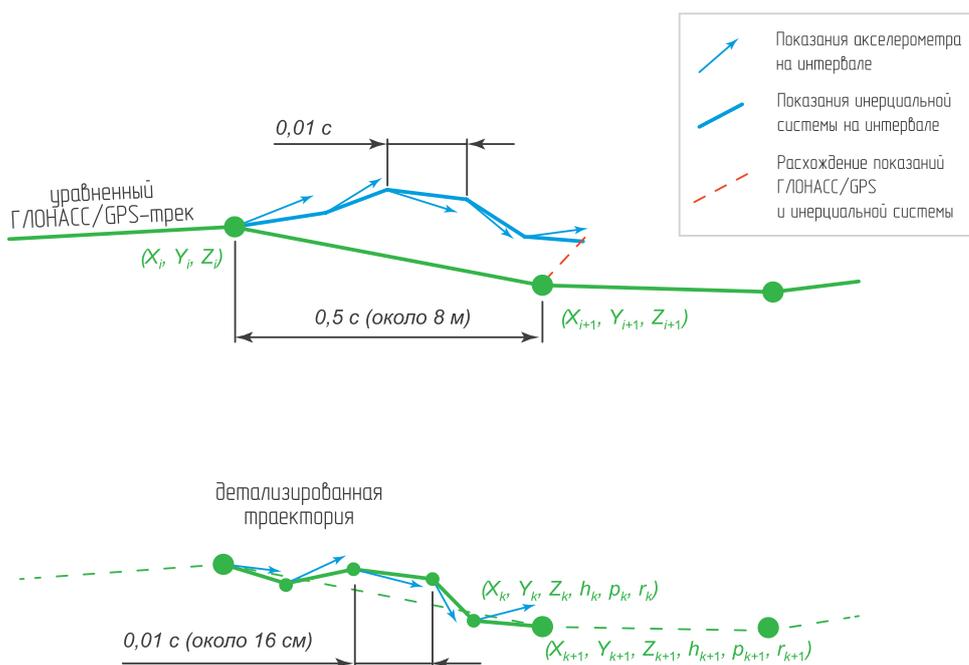


Рис. 5. Ориентирование и сгущение траектории по данным инерциальной системы

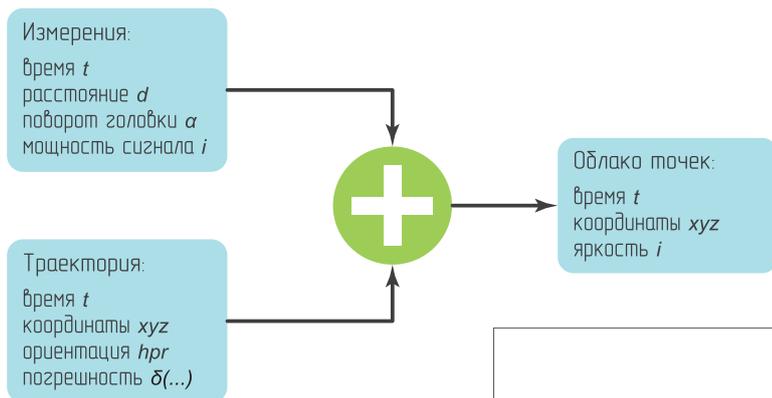


Рис. 7. Геометрическая интерпретация вычисления точки съёмки

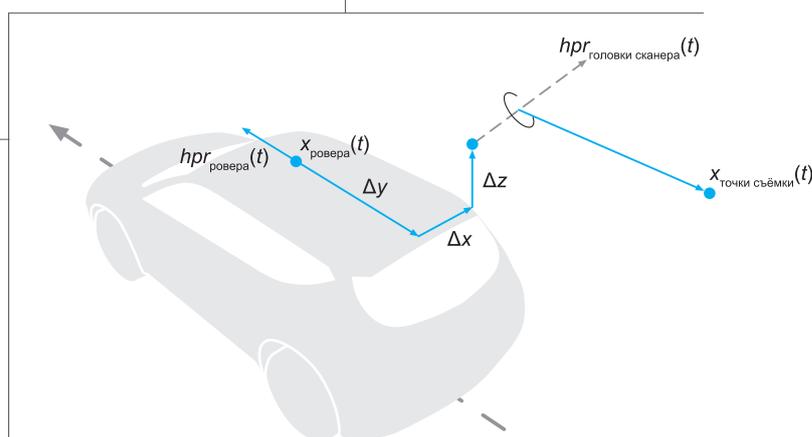


Рис. 6. Измерения, участвующие в вычислении точек съёмки

ет на частоте порядка 100 Гц, что соответствует временному интервалу в 10 мс или расстоянию 16 см при расчётной скорости 60 км/ч и является удовлетворительным условием для построения облака точек.

Приборы ИНС, в свою очередь, имеют собственную погрешность [14, 15], вследствие которой суммарный вектор перемещения, вычисленный по истечению длительного времени, может существенно не совпадать с вектором от одной ГЛОНАСС/GPS-точки траектории до следующей, что приводит к необходимости выполнять уравнивание показаний ИНС по точкам ГЛОНАСС/GPS-траектории.

Для этого между каждыми двумя точками ГЛОНАСС/GPS-трека с известными координатами положения  $X_i$  и  $X_{i+1}$  вписываются показания, полученные инерциальной системой на данном временном интервале: показания акселерометра при известной скорости автомобиля в начальной точке определяют ряд смещений, а показания гироскопа — отклонения в углах ориентации от некоторого первоначального направления (пример на рис. 5). Одновременно решается задача ориентирования и сгущения траектории: на каждом смещении создаётся новая точка траектории  $X'_k$ , дополненная координатами ориентации  $(h_{kr}, p_{kr}, r_{kr})$ , т.е. плотность расположения точек возрастает, и каждая точка получает вектор направления движения ровера в трёхмерном пространстве.

Эта стадия может быть выполнена с помощью программных пакетов Trimble Trident (Trimble, США), Applanix POSPac MMS (Applanix, Канада), Topcon Spatial Factory (Topcon, Япония), GrafNav/GrafNet (NovAtel, Канада), RT PostProcess (Oxford Technical Solutions, Великобритания).

Отдельного внимания заслуживает вопрос определения начальной ориентации ровера. Поскольку гироскоп показывает лишь отклонения от ориентации в начальный момент времени, углы начального курса, тангажа и крена ровера являются неизвестными. Причём если первые два можно определить по точкам траектории, то начальный крен можно определить, только если траектория не является прямолинейной, а ещё лучше — содержит самопересечения в одном уровне. Получение начальной ориентации ровера называется инициализацией и выполняется таким образом, чтобы маршрут съёмки начинался с разворотов на  $360^\circ$ .

### Генерация облака точек

Облако точек — это специфическая цифровая модель местности, представленная большим количеством точек в трёхмерном пространстве. Координаты точек могут быть дополнены различными параметрами [16].

Особенность работы лазерного сканера заключается в том, что он не вычисляет «на лету» координаты каждой снятой точки, а лишь сохраняет параметры события: время  $t$ , скалярное расстояние от лазера до точки  $d(t)$  и угол поворота головки  $\alpha(t)$  в данный момент времени. Поэтому первая задача, необходимая для генерации облака точек — преобразование измерений в координаты точки съёмки  $X(t)$ , используя данные траектории (рис. 6).

Рассмотрим схему вычисления координат одной точки, снятой в момент времени  $t$ . Допустим, мы уже знаем точку отсчёта, соответствующую положению ровера  $X_{ровера}(t)$  с заданными углами курса, тангажа и крена  $hpr_{ровера}(t)$  (аббревиатура

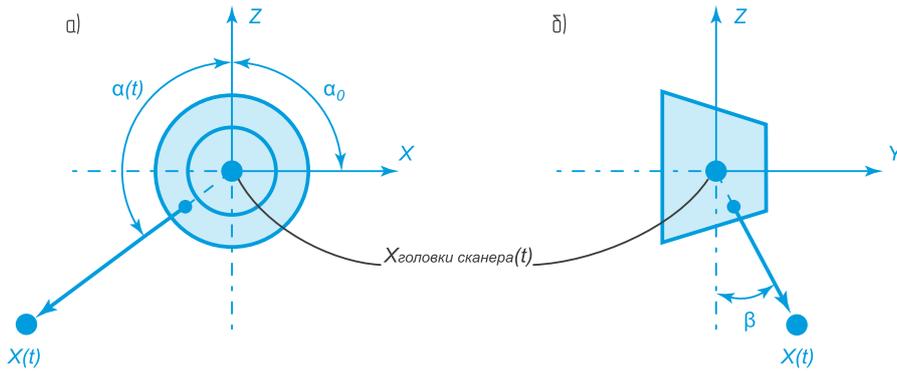


Рис. 8. Углы выходящего лазерного луча в системе координат головки сканера: а) углы поворота; б) угол склонения луча назад

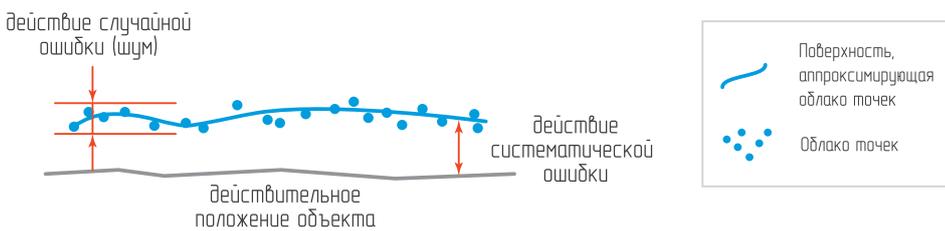


Рис. 9. Влияние случайных и систематических ошибок на положение точек съёмки

от англоязычных названий углов — *heading, pitch, roll*), образующую таким образом локальную систему координат ровера.

В этой системе координат по смещениям  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  находится центр головки лазерного сканера, имеющей собственные углы курса, тангажа и крена  $hpr_{\text{головки сканера}}(t)$  (рис. 7). Смещения и углы установки головки являются паспортными данными лазерного устройства и постоянны с точностью до калибровочных поправок.

Находясь в системе координат головки сканера, пойманной в момент времени  $t$  сигнал отражённого лазерного луча, требуется получить координаты точки съёмки  $X(t)$ , находящейся на измеренном расстоянии  $d(t)$ . Для этого необходимо знать направление лазерного луча, которое определяется двумя углами. Первый — это угол поворота головки лазерного сканера  $\alpha_0 + \alpha(t)$ , где  $\alpha_0$  — нулевой угол поворота. Второй — это угол  $\beta$ , определяющий смещение луча назад относительно плоскости вращения головки сканера (рис. 8).

Обозначив за  $h, p$  и  $r$  углы курса, тангажа и крена ровера в момент времени  $t$  либо установочные углы курса, тангажа и крена головки сканера (в зависимости от контекста), общую схему вычисления положения точки съёмки в системе координат ровера можно записать следующей формулой [17]:

$$X(t) = \begin{pmatrix} d(t) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \times M_{\text{направления луча}} \times M_{\text{ориентации головки}} \times M_{\text{смещения головки}} \times M_{\text{ориентации ровера}},$$

где:

$$M_{\text{направления луча}} = \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(\alpha_0 + \alpha(t)) & 0 & \sin(\alpha_0 + \alpha(t)) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\alpha_0 + \alpha(t)) & 0 & \cos(\alpha_0 + \alpha(t)) \end{pmatrix},$$

$$M_{\text{ориентации ровера или головки сканера}} = \begin{pmatrix} \cos r & 0 & \sin r \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin r & 0 & \cos r \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos p & -\sin p \\ 0 & \sin p & \cos p \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos h & -\sin h & 0 \\ \sin h & \cos h & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$M_{\text{смещения головки сканера}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z \end{pmatrix}.$$

Применив эти формулы к данным уравненной траектории и массивам измерений, можно сформировать набор (облако) точек. Координаты точки отсчёта  $X_{\text{ровера}}(t)$  и  $hpr_{\text{ровера}}(t)$  получаются линейной интерполяцией между соседними точками траектории (рис. 2).

Работа по генерации облаков производится в системах обработки лазерных данных, среди которых стоит отметить Bentley TerraSolid (Terrasolid, Финляндия), Trimble Trident-3D (Trimble, США), Riegl RiSCAN Pro (Riegl, Австралия), Topcon Spatial Factory (Topcon, Япония), CG2 LIDAR Fusion Geoint (CG2, США), FARO Scene (Faro, США), IndorCloud («ИндорСофт», Томск). Заметим, что некоторые из перечисленных программ также пригодны и на стадии уравнивания траектории, особенно в случае программного обеспечения, поставляемого вместе с лазерным сканером.

### Уравнивание облаков точек

Вычисленные точки облаков могут отклоняться относительно действительного положения на расстояния до нескольких сантиметров. Такое несоответствие (абсолютная невязка) следует из ошибок вычисления начальных углов курса, тангажа и крена ровера, а также погрешностей измерений навигационных приборов и самого сканера [18].

Ошибка вычисления координат включает в себя как случайную компоненту, так и накопленную систематическую ошибку, т.е. проявляющуюся на каком-то соизмеримом с масштабом съёмки интервале (рис. 9). Методы, о которых пойдёт дальше речь, позволяют устранять только систематические ошибки. Систематические ошибки зачастую вызваны неверно заданными параметрами устройства, например углом установки курса одной из головок сканера.

В силу природы систематических ошибок, точки, снятые примерно в одно и то же время, будут подвержены примерно одинаковой ошибке, в то время как точки, разнесённые по времени, могут иметь разные ошибки. Для минимизации невязки необходимо каким-то образом различать массивы точек, подверженные разным значениям ошибки. По этой причине данные с прямого и обратного проездов, а также от разных головок сканера относят к разным облакам точек (рис. 10), которые затем подвергают независимым корректировкам. Этот процесс называется уравниванием облаков точек [19].

Признаком постоянных систематических ошибок является расхождение точек облаков на больших расстояниях от сканера, и напротив — практически полное совпадение вблизи сканера. Для устранения постоянных ошибок необходимо откалибровать лазерную систему. Для этой цели выполняется специальная калибровочная съёмка, и вычисляются отклонения параметров для каждой головки сканера

в предположении, что ошибка определения координат ровера устранена в силу особенностей проведения такой съёмки: открытой местности, низкой скорости движения и избыточности полученной информации.

### Алгоритмы устранения систематических ошибок

Для устранения систематических ошибок используются различные алгоритмы уравнивания облаков. Идеи, лежащие в основе алгоритмов уравнивания, во многом заимствованы из инженерной геодезии [20], и отличаются главным образом применением к огромным массивам данных. Наиболее распространённый подход заключается в определении точек и линий соответствия облаков [19, с. 15–17]. Точка или линия соответствия представлена набором сопоставленных элементов, каждый из которых распознаётся в своём облаке (рис. 11). В этом случае за невязку берётся разность координат сопоставленных точек или линий. Если невязки примерно одинаковы на различных участках облака, что говорит о действии постоянных ошибок, решается задача минимизации невязок с подбираемыми поправками к параметрам участка траектории.

В случае с непостоянными ошибками поправки к параметрам подбираются не для больших участков, соответствующих целым облакам точек, а для каждого небольшого участка проезда, на котором ошибка осталась относительно постоянной.

Применение таких поправок является непростой задачей, поскольку необходимо правильно интерполировать значения поправок в каждый момент времени. Дополнительно могут подключаться данные о точности координирования.

Любой алгоритм даст лучшие результаты, если материал будет дополнен данными контрольной геодезической съёмки (рис. 11). При подготовке к выполнению лазерного сканирования желательно также нанести специальные метки на поверхности в точках съёмки, которые в дальнейшем можно будет визуально распознать в облаке и сопоставить с данными контрольных измерений не только по высоте, но и по координатам в горизонтальной плоскости [1].

Результат операции уравнивания может быть сохранён в виде отдельного файла с поправками либо применён к траектории или облаку точек путём перезаписи соответствующего файла.

### Раскраска облака точек

Уравненные облака точек уже пригодны для извлечения данных ЦММ, однако в демонстрационных целях могут быть раскрашены различными методами. Простые методы позволяют раскрасить облако градиентом по высотной отметке, мощности сигнала, номеру отражения, классу точек, принадлежности облаку, траектории или головке сканирующего устройства.

При подключении данных панорамного видеоряда возможно использование для раскраски цветов, взятых с фотографий, снятых с определённым

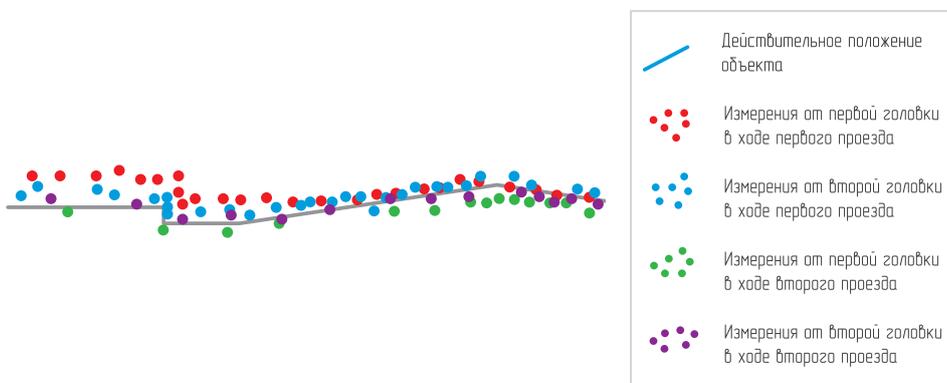


Рис. 10. Несоответствие между облаками точек и действительным положением объекта

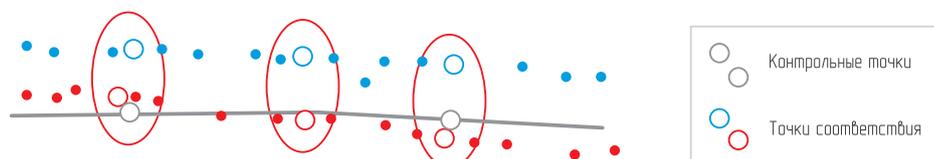


Рис. 11. Уравнивание облаков точек с использованием точек соответствия

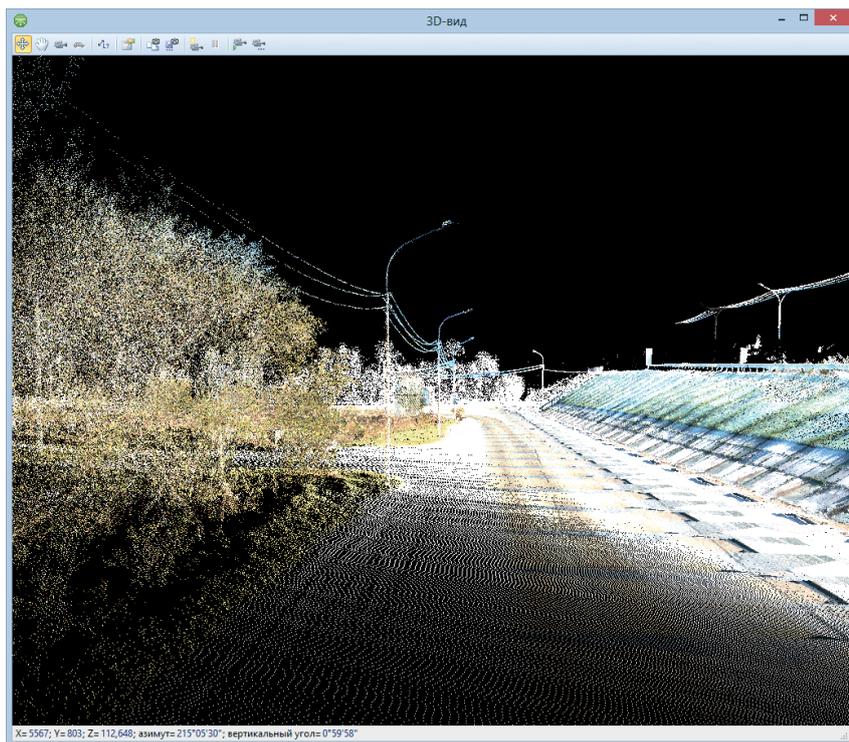


Рис. 12. Раскрашенное облако в IndorCloud

интервалом. После такой раскраски в облаке точек гораздо лучше угадываются очертания многих объектов, будь то бордюрный камень, дорожный знак, окно здания или канализационный люк. Такой вид облаков целесообразно применять в задачах паспортизации и демонстрационных целях (рис. 12).

## Резюме

В заключение перечислим рекомендации по выполнению съёмки и предварительной обработке её результатов с учётом особенностей рассмотренных в статье стадий:

- Для задач, требующих высокой точности исполнения модели местности (порядка 1 см и менее в плане и по высоте), необходимо проводить съёмку только в дифференциальном фазовом режиме координирования. Иначе можно использовать автономный фазовый режим.

- Для дифференциальных режимов координирования предпочтительнее использовать пост-обработку, а не обмен данными с помощью радиосвязи, поскольку радиосвязь между ровером и базовой станцией подвержена помехам, прежде всего из-за вероятных препятствий на пути сигнала.

- Перед началом движения ровера ГЛОНАСС/GPS-приёмник должен быть

проинициализирован, для этого требуется около 5–10 минут.

- Данные траектории могут быть детализированы с помощью показаний инерциальной системы. При этом корректное определение начального крена ровера возможно, только если маршрут ровера включал в себя петли (например проезды по примыкающим под прямым углом дорогам).

## Литература:

1. Сарычев Д.С. Мобильное лазерное сканирование // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2013. №1(1). С. 36–41.
2. Бойков В.Н. IT-технологии в поддержке жизненного цикла дорог // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2014. №1(2). С. 1–7.
3. Скворцов А.В. ВМ для дорожной отрасли: что-то новое или мы этим уже занимаемся? // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2014. №1(2). С. 8–11.
4. Сарычев Д.С. Обработка данных лазерного сканирования // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2014. №1(2). С. 16–19.
5. Байгулов А.Н., Романескул М.А., Шумилов Б.М. Метод проектирования ремонтов автомобильных дорог на основе мобильного лазерного сканирования // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2013. №1(1). С. 29–35.
6. Мотуз В.О. Сарычев Д.С. Применение лазерного сканирования и 3D-моделей в жизненном цикле автомобильных дорог // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2014. №1(2). С. 12–15.

7. Pereira L.M.G. Suitability of laser data for DTM generation: a case study in the context of road planning and design // Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 54, No. 4, 1999. P. 244–253.
8. Huising E.J. Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications // Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 53, No. 5, 1998. P. 245–261.
9. СП 11-104-97 Инженерно-геодезические изыскания для строительства. М., 1997.
10. Введение в GPS (Глобальная Навигационная Система). Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Швейцария, 2001. 63 с.
11. Давыдов С. Дифференциальные поправки в ГЛОНАСС и GPS навигации. 2009. URL: [http://gps-club.ru/gps\\_think/detail.php?ID=44517](http://gps-club.ru/gps_think/detail.php?ID=44517)
12. Ryu J. Integrating Inertial Sensors With Global Positioning System (GPS) for Vehicle Dynamics Control // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 126, June 2004. P. 243–254.
13. Bevy D.M. Integrating INS Sensors With GPS Measurements for Continuous Estimation of Vehicle Sideslip, Roll, and Tire Cornering Stiffness // IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems 7 (4), December 2006. P. 483–493.
14. Кузовков Н.Т. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация / Кузовков Н.Т., Салычев О.С. М.: Машиностроение, 1982. 216 с.
15. Матвеев В.В. Инерциальные навигационные системы 2012. Учеб. пособие: ТулГУ, 2012. 199 с.
16. Soininen A. TerraScan User's Guide. Terrasolid, 2014. P. 38–39.
17. Лурье А. И. Аналитическая механика. М.: Физматлит. 1961 г. 824 с.
18. Barber D. Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system // Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 63, No. 1, 2008. P. 128–141.
19. Soininen A. TerraMatch User's Guide. Terrasolid, 2014. 89 p.
20. Куштин И. Ф. Инженерная геодезия / Куштин И. Ф., Куштин В. И. Ростов-на-Дону: Феникс, 2002. 417 с.