



Сканирующие лазерные дальномеры (LIDAR)

Андрей Антонов (г. Волгоград)

В статье представлен общий обзор технологии лазерного сканирования объектов в пространстве, рассмотрены устройства, реализующие эту технологию и применяющиеся в мобильных робототехнических комплексах.

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ LIDAR

Термин LIDAR (от англ. Light Detection and Ranging) относится к системам радиолокации, работающим в оптическом диапазоне и использующим в качестве источника излучения лазер. Часто в зарубежных источниках можно встретить аналогичные термины – LADAR (Laser Detection and Ranging) и Laser Radar.

В мобильных наземных робототехнических комплексах и беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) эта технология играет очень важную роль: она используется для автоматического построения трёхмерной карты (сцены) окружающего пространства и пространственной ориентации аппарата.

Существуют разные варианты систем LIDAR, но в общем случае все они включают следующие ключевые элементы, определяющие принцип работы системы:

- источник фотонов (чаще всего это лазер);
- детектор фотонов;
- тактирующая цепь;
- оптическая приёмно-передающая часть [1].

Системы LIDAR времяпролётно-го типа (Time-of-Flight, ToF) используют короткие импульсы лазерного излучения, с высокой точностью фиксируя моменты их передачи и приёма откликов (отражённых сигналов), чтобы вычислить расстояния до объектов в окружающем пространстве или на поверхности земли (например, при топосъёмке с БПЛА). После объединения серии таких измерений с информацией о местоположении и ориентации аппарата, создаётся результирующая трёхмерная сцена интересующей области пространства. Чаще всего эта сцена сохраняется в виде массива координат (x, y, z), называемого облаком точек.

Несмотря на то, что существует множество устройств LIDAR для разных областей применения, все они состоят из похожего набора функциональных узлов (см. рис. 1), таких как:

- подсистема измерения расстояния (лазерный передатчик и приёмник);
- сканирующая подсистема;
- подсистема позиционирования и ориентации;
- система управления;
- хранилище данных.

ПОДСИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЯ

Принципиальные отличия отдельных устройств LIDAR заключаются в реализации функции измерения расстояния.

Важнейший узел системы LIDAR – подсистема измерения расстояния – состоит, в свою очередь, из таких внутренних подсистем, как лазерный передатчик и электрооптический приёмник.

Лазерный передатчик излучает энергию в виде сфокусированного луча, который до выхода из устройства проходит через ряд преобразовательных компонентов: переключатель приёмопередатчика, расширители луча, выходная телескопическая оптика и другое.

В системе LIDAR могут использоваться различные типы лазеров, но чаще всего применяют твердотельный Nd:YAG-лазер, активной средой в котором выступает алюмо-иттриевый гранат ($Y_3Al_5O_{12}$), легированный ионами неодима.

Лазерные сканирующие дальномеры работают на различных длинах волн, но чаще других используются следующие:

- 1064 нм (ближний инфракрасный диапазон) – для топографических сканеров;
- 532 нм (зелёный) – для батиметрических (измеряющих глубину) сканеров;

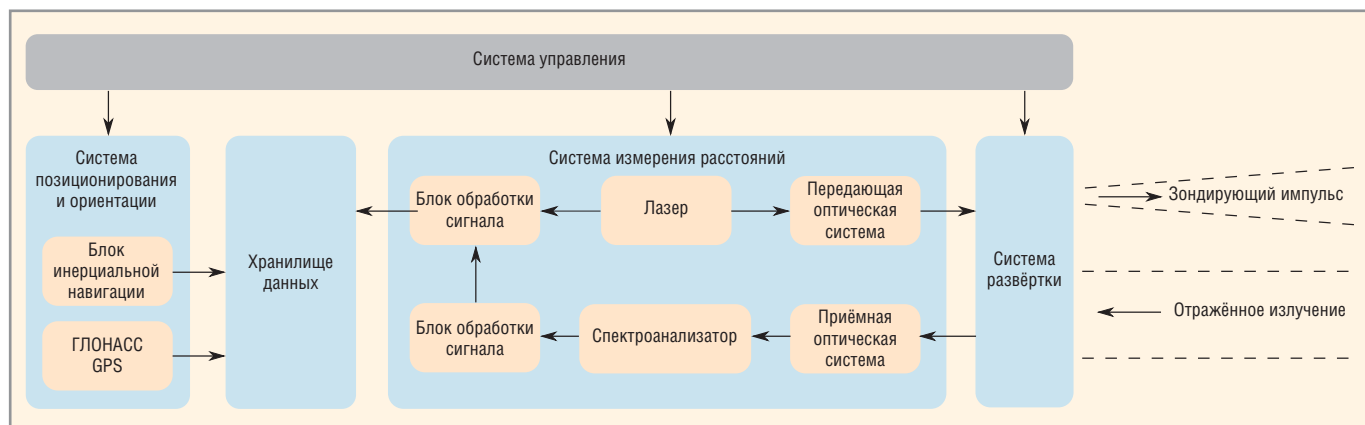


Рис. 1. Компоненты системы LIDAR

- 600–1000 нм – для наземных устройств, предназначенных для коммерческого использования;
- ~1500 нм – для наземных сканирующих систем, используемых в научных целях.

Выбор длины волны лазерного излучателя зависит от целого ряда факторов:

- отражающих свойств сканируемых объектов;
- характеристик окружающей среды;
- чувствительности используемого детектора;
- необходимой степени безопасности для глаз;
- требований к конструкции устройства.

Помимо длины волны излучения нужно также учитывать мощность лазера.

Электрооптический приёмник получает энергию лазерного луча, отражённого или рассеянного целью, и фокусирует её на светочувствительном детекторе при помощи входной оптики.

Методы определения расстояния

Зафиксированные значения моментов передачи и приёма лазерного луча используются для расчёта времени, проведённого светом в пути, и, следовательно, расстояния до объекта, отражившего луч.

В системе LIDAR обычно используется один из двух режимов, определяющих метод измерения расстояния: импульсный режим или режим непрерывной волны.

В системах с импульсной модуляцией, также известных как времяпролётные системы, лазером излучаются единичные световые импульсы с высокой частотой следования. Измеряется время, прошедшее с момента излучения импульсного сигнала до момента возврата отклика в приёмник. Расстояние до точки поверхности объекта, в которой произошло отражение лазерного луча, может быть вычислено по формуле:

$$D = 0,5 \times c \times t, \quad (1)$$

где c – скорость света, t – полное время прохождения светом пути до точки отражения и обратно (раундтрип), D – искомое расстояние до точки отражения.

В системах с непрерывной волной лазер излучает непрерывный сигнал, к которому затем применяется синусоидальная амплитудная модуляция.

В этом случае время прохождения светом полного пути от передатчика до приёмника будет прямо пропорционально сдвигу фаз в излучённом и принятом сигналах:

$$t = \frac{\varphi}{2\pi} \cdot T, \quad (2)$$

где φ – фазовый сдвиг, T – период сигнала.

После определения времени t прохождения луча, расстояние D , как и в первом случае, вычисляется по формуле (1). Для снижения неопределённости может быть использована многогоночная синусоидальная модуляция.

Также в системах с непрерывной волной используется альтернативный метод – с линейной частотной модуляцией. В таких системах переданный и принятый сигналы смешиваются, а для демодуляции и получения информации, содержащейся в несущей частоте, используется когерентный приёмник.

Нужно отметить, что в уравнениях (1) и (2) предполагается, что детектор в течение времени t стационарен. Для случаев с передвигающимся детектором необходимо будет внести в уравнения соответствующие поправки.

Методы детекции

Обычно в системах LIDAR используется два способа детекции: прямая и когерентная.

При прямой детекции приёмник преобразует сигнал непосредственно в напряжение или ток, который пропорционален входящей оптической мощности. Приёмники могут включать лавинные фотодиоды и фотоэлектронные умножители.

LIDAR-детекторы также могут работать в режиме счёта фотонов. В этом режиме детектор способен регистрировать даже очень небольшое количество фотонов, а в режиме счётчика Гейгера становится чувствительным даже к отдельным фотонам. Электронная схема приёмника производит измерение генерируемого тока с поправкой на время пролёта фотонов в приёмнике, в результате чего получается прямое измерение момента приёма оптического отклика.

При когерентной детекции полученный оптический сигнал смешивается с локальным осциллятором посредством гетеродина, и только после этого фокусируется на фоточувствительном элементе. При смешивании

информация преобразуется в узкополосный сигнал, что снижает шум по сравнению с методом прямого детектирования, где используется оптический фильтр.

Бегущий луч и массив

Важно отметить, что описанные методы определения расстояния и способы детектирования требуют различной геометрии приёмников.

В целом, большинство коммерческих систем LIDAR работают по принципу «бегущего луча», где для одного излучённого импульса фиксируется один или несколько (как правило, от 2 до 5) значений расстояния для оптических сигналов, вернувшихся вдоль одной и той же линии визирования (множественные возвраты). Для следующего импульса подсистема целеуказания изменяет направление линии визирования, и затем снова записывается несколько значений расстояния.

Этот метод – метод точечного сканирования – обычно применяется в системах LIDAR, работающих в линейном режиме, при котором энергия лазера фокусируется на малой области исследуемой поверхности, и требуется достаточно сильный отражённый сигнал для записи отклика и расчёта дистанции. Однако существуют также системы LIDAR, которые используют лазерное излучение для засветки большой площади поверхности. При этом они оснащены покадровым матричным детектором с целью измерения значений расстояния для каждого пикселя в массиве. Этим системам с кадровой развёрткой требуется небольшая сила отражённого сигнала. Они записывают сотни или даже тысячи расстояний для излучённого импульса.

Подсистема развёртки (сканирования)

В тех случаях, когда необходимо не просто определить расстояние до объекта, а сделать обзор целевой области, система LIDAR должна производить измерения во множестве точек. Для построения сцены целевой области пространства используется комбинация движения LIDAR-устройства в целом и работы подсистемы развёртки, через которую проходит излучаемый оптический сигнал.

Распространённый вариант реализации подсистемы развёртки основан на использовании качающегося зеркала. Последовательное изменение направ-

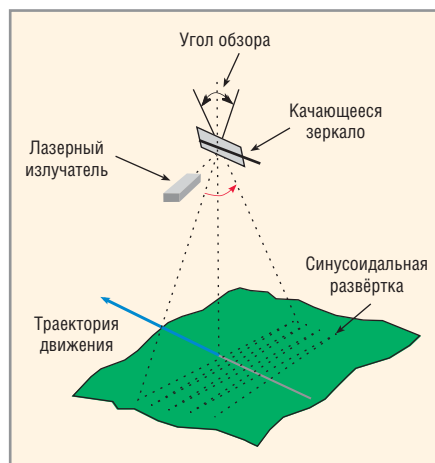


Рис. 2. Система развёртки с качающимся зеркалом

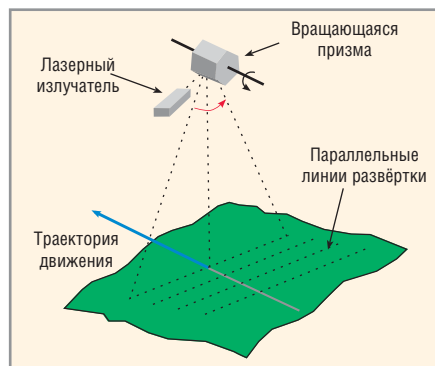


Рис. 3. Система развёртки с вращающейся призмой



Рис. 4. Сканирующая система с вращающимся зеркалом

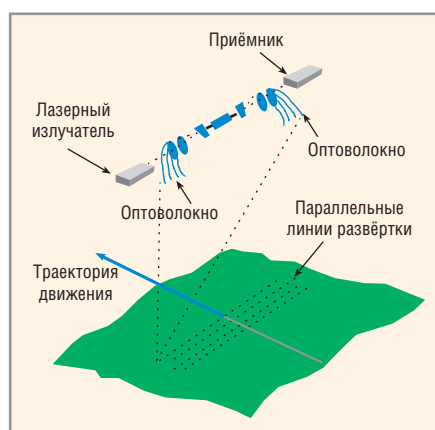


Рис. 5. Оптоволоконная система развёртки

ления линии визирования, вдоль которой излучается оптический сигнал, осуществляется с помощью подвижного зеркала. Это зеркало поворачивается на ограниченный угол (угол обзора) вокруг оси, лежащей на его плоскости и, как правило, параллельной направлению движения устройства. Качание зеркала позволяет сканировать целевую область пространства и формировать сцену нужной ширины, определяемой углом качания зеркала (см. рис. 2). Подсистема на основе качающегося зеркала создаёт синусоидальную развёртку. При этом частота качания обратно пропорциональна заданному углу обзора (ширине сцены). Основным недостатком такого способа развёртки – непостоянная скорость движения зеркала. Дважды в течение рабочего цикла зеркало должно замедлиться, полностью остановиться, изменить направление движения на противоположное и вновь ускориться. В результате измерения, производимые с постоянной частотой, формируют сцену с неравномерной плотностью точек (меньше точек в середине полосы сканирования и больше по краям). Подсистема развёртки лазерного луча с помощью качающегося зеркала применяется, в частности, в лазерных сканерах фирм Leica [2] и Optech [3].

Альтернативный способ сканирования основан на использовании вращающейся призмы. В такой подсистеме развёртки многогранная призма с зеркальными гранями непрерывно вращается вокруг своей оси симметрии. Лазерный луч переходит от одной грани призмы к другой скачкообразно, в результате чего массив точек, формирующийся при движении устройства, состоит из ряда параллельных линий (см. рис. 3). Этот вариант лишён недостатков качающегося зеркала, однако он сложнее в реализации и в том, что касается обработки результатов измерений. Системы LIDAR с вращающейся призмой производит австрийская фирма Riegl [4].

Третий вариант подсистемы сканирования использует вращающееся зеркало. Ось вращения в этом варианте расположена почти перпендикулярно к поверхности зеркала (см. рис. 4). За счёт отклонения поверхности зеркала от плоскости, перпендикулярной к оси вращения, формируется развёртка отражённого лазерного луча в виде эллиптической кривой. Преимущество метода заключается в том, что каждая точка

пространства сканируется дважды. Вместе с тем эллиптическая развёртка значительно усложняет обработку результатов сканирования, так как обработка двойных измерений является весьма сложной задачей. Кроме того, поскольку точки в одной и той же области получены с разных позиций (так как система движется и меняет ориентацию в пространстве), полученное таким способом облако точек может содержать большое количество «шумов» [5]. Примерами систем, использующих развёртку лазерного луча с помощью вращающегося зеркала, являются сканеры Leica ANAB DragonEye.

В качестве альтернативы механической развёртке в настоящее время существует применяемая в некоторых системах LIDAR оптоволоконная подсистема для направления лазерного луча на целевую область. При таком способе достигается более стабильная геометрия сканирования, благодаря фиксированным связям между оптоволоконными каналами и другими оптическими каналами устройства. Лазерный луч направляется с помощью оптоволоконного пучка, а направление сканирования для каждого импульса зависит от того, из какого оптоволоконного канала он излучается. Подобная система пучков используется и в приёмной оптике (см. рис. 5).

Подсистема позиционирования и ориентации

Для практического использования информации, получаемой с помощью сканирующих лазерных дальномеров, одного только массива значений расстояния от устройства до объектов и величин относительных углов сканирования недостаточно. Достоверность данных об окружающем пространстве (получаемых в виде трёхмерного облака точек или двумерного изображения с данными о расстояниях) может быть достигнута только при условии, что для каждой точки измеряются абсолютные значения положения и ориентации несущей платформы системы LIDAR в пространстве в момент приёма отклика от импульса. Для таких измерений используется подсистема ориентации и позиционирования.

Эта подсистема включает в себя два основных компонента: приёмный модуль системы глобального позиционирования (ГЛОНАСС или GPS) и блок инерциальной навигации (IMU). Дан-



Рис. 6. Основные подсистемы беспилотного автомобиля Google

ные GPS-приёмника используются для записи местоположений несущей платформы в определённые моменты времени. Из множества существующих методов уточнения GPS-координат, в системах LIDAR, как правило, применяется дифференциальная постобработка сигнала со стационарной базовой станции или дифференциальные обновления в реальном времени. Для получения более точных наборов данных накладываются строгие ограничения на размещение базовой станции относительно платформы лазерного дальномера. Ориентация платформы измеряется при помощи блока инерциального измерительного устройства, в котором используются гироскопы и акселерометры. Данные GPS и IMU записываются во время движения платформы и объединяются (обычно во время шага постобработки данных).

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ (СИСТЕМНЫЙ КОНТРОЛЛЕР)

Для генерации облака точек все подсистемы, составляющие систему LIDAR, должны работать совместно. Качество полученных данных напрямую зависит не только от параметров каждой подсистемы, но и от взаимосогласованности их работы. Выставление параметров сенсоров и контроль работы подсистем осуществляет системный контроллер лазерного дальномера.

ХРАНИЛИЩЕ ДАННЫХ

Конечные данные LIDAR представляют собой файлы со значениями

координат GPS и IMU, с измеренными значениями расстояний и иногда с информацией от других подсистем. Поскольку системы LIDAR могут генерировать очень большие объёмы данных, в системе предусмотрен накопитель, на который данные сохраняются сразу после сбора.

ПРАКТИЧЕСКИЙ ПРИМЕР: VELODYNE HDL-64E

В качестве примера рассмотрим устройство лазерного сканирующего дальномера высокого разрешения HDL-64E, производимого компанией Velodyne. Именно этот 64-лучевой LIDAR с трёхмерным сканированием установлен на беспилотные автомобили, разработанные компанией Google. Лазерный дальномер стал одним из ключевых компонентов, позволившим сделать автомобиль по-настоящему автономным.

Устройство Velodyne, установленное на крыше беспилотного автомобиля (см. рис. 6), генерирует подробную трёхмерную карту окружающего пространства. Бортовой компьютер объединяет данные измерений, полученных с LIDAR, с картами высокого разрешения, формируя различные модели данных, которые позволяют роботизированному автомобилю передвигаться самостоятельно, избегая столкновений с препятствиями и не нарушая правил дорожного движения [6].

Модель дальномера HDL-64E имеет 64 пары излучатель-детектор, которые обеспечивают наличие равноотстоящих секторных полей обзора по 26,5°.

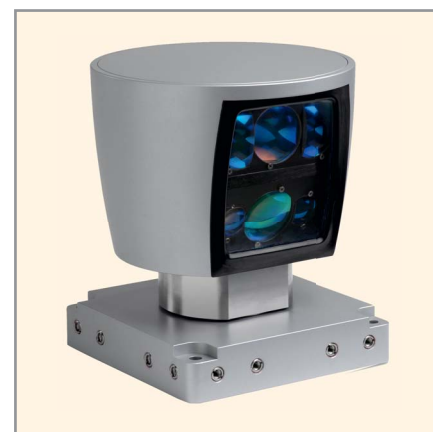


Рис. 7. Внешний вид лазерного дальномера HDL-64E

Для обеспечения 360-градусного обзора по азимуту весь оптический блок закреплён на вращающемся основании (см. рис. 7) и вращается с частотой 600 оборотов в минуту. При необходимости эта частота регулируется в диапазоне 300...900 об/мин путём передачи простой текстовой команды через последовательный интерфейс. Этот же последовательный порт может быть использован для обновления прошивки сканера.

Дальномер Velodyne обладает максимальным диапазоном измерения расстояния – до 120 м с погрешностью не более 2 см [7]. Независимо от частоты вращения оптического блока, устройство постоянно генерирует большой объём данных – 1 млн точек в секунду, что соответствует горизонтальному угловому разрешению 0,05°. Устройство статически и динамически сбалансировано, что сводит к минимуму воздействие вибрации и обеспечивает стабильное изображение сцены.

Каждый лазер дальномера HDL-64E излучает оптический импульс продолжительностью 5 нс (на уровне 50% амплитуды с максимальной пиковой мощностью 60 Вт). Высокое напряжение, необходимое для создания пикового тока в излучателе на уровне 30 А, генерируется схемой обратного преобразователя, что позволяет использовать для питания лазерной установки низкие напряжения. Выходной лазерный луч фокусируется линзами. При попадании на цель часть излучения отражается обратно в направлении источника. Этот отражённый свет проходит через отдельную систему линз и УФ-фильтр, необходимый для снижения фоновой оптической засветки (увеличения отношения сиг-

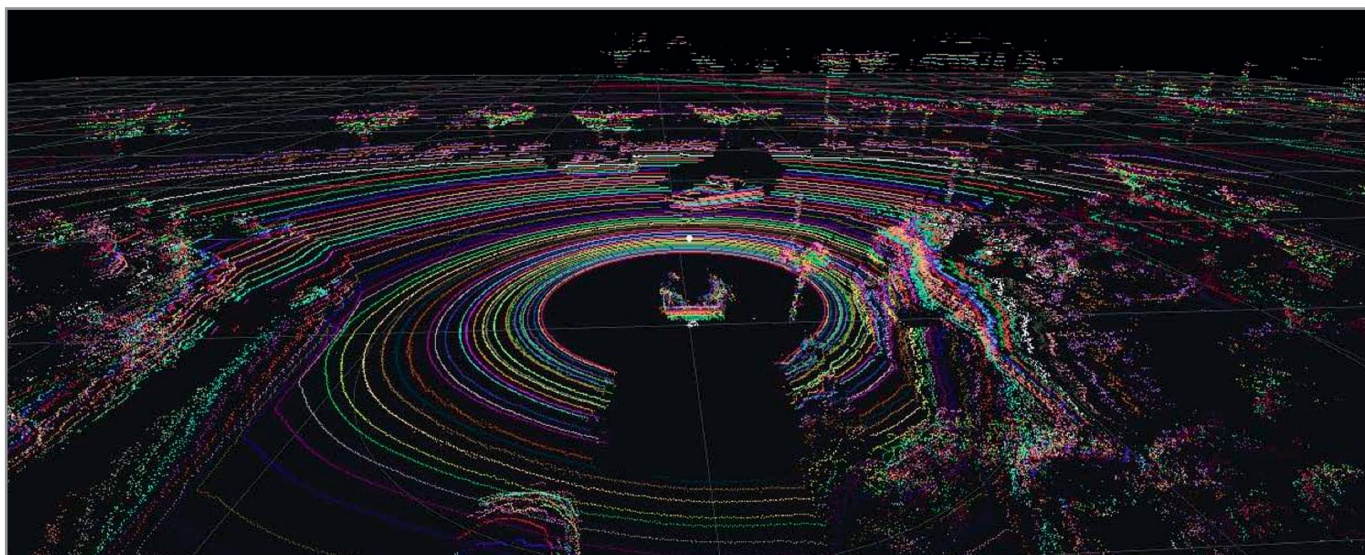


Рис. 8. Изображение, полученное с использованием HDL-64E (один из кадров)

нал/шум). Линзы приёмной системы фокусируют отражённое излучение на лавинный фотодиод, генерирующий электрический сигнал, пропорциональный интенсивности оптического. Лазер и лавинный фотодиод юстируются на заводе-изготовителе для обеспечения максимальной чувствительности при минимизации перекрёстных сигнальных помех, образуя, таким образом, наиболее эффективную пару излучатель-детектор.

В соответствии с силой отражённого сигнала, детектируемого лавинным фотодиодом и схемой усилителя, система изменяет амплитуду лазерного импульса, поддерживая минимальный необходимый уровень излучения. Эта автоматическая подстройка мощности лазера, во-первых, снижает нагрев оптического блока и повышает его надёжность, а во-вторых, не даёт детекторам войти в режим насыщения. В противном случае, при получении детектором слишком большого количества оптической энергии, наступал бы режим насыщения, для выхода из которого детектору требуется значительное время (если оно превышает период следования импульсов, это неизбежно приводит к искажению детектируемого сигнала). В-третьих, если уровень сигнала сопоставим с шумом, что усложняет его детектирование, система автоматически повышает уровень мощности лазерного излучения. Это может происходить, например, в случае приближения к порогу чувствительности (120 м) или при слабом отражении от чёрной матовой поверхности.

Выходной сигнал усиливается и передаётся на аналого-цифровой

преобразователь с частотой дискретизации 3 ГГц. Затем оцифрованный сигнал с детектора передаётся в цифровой сигнальный процессор (DSP), использующий собственный алгоритм анализа данных и определения времени возврата сигнала. Использование коротких оптических импульсов в сочетании с высокочастотной обработкой сигнала обеспечивают большую разрешающую способность системы.

Пары излучатель-детектор поделены на две группы по 32 лазера. Одна группа расположена в верхней части модуля и направлена на верхнюю половину поля обзора, а вторая группа, находящаяся под первой, направлена на нижнюю половину поля обзора. Поскольку верхний оптический блок предназначен для измерения больших расстояний, угловое расстояние между оптическими импульсами у него больше, чем в нижнем блоке, который проводит измерения на более коротких дистанциях.

Устройство предоставляет данные пользователю через стандартный порт 100BaseT Ethernet. Информация непрерывно передаётся в виде кадров. Частота генерации кадров равна частоте вращения оптического блока (при 600 об/мин – 10 Гц). Объём данных, переданных за секунду, может содержать более миллиона точек. В пакетах данных содержится информация о расстоянии и интенсивности излучения для каждой пары излучатель-детектор, а также соответствующая угловая координата. Эти данные могут быть собраны с помощью стандартной утилиты сбора Ethernet-пакетов, напри-

мер Wireshark [8], и визуализированы в компьютерной программе, такой как Velodyne Digital Sensor Recorder. Также полученные данные могут быть обработаны автономной навигационной системой для создания оценочной карты, которая затем может использоваться для выявления препятствий, поиска оптимального маршрута и, в конечном итоге, для вычислений, связанных с рулевым управлением, торможением и ускорением.

На рисунке 8 показан пример кадра данных с устройства HDL-64E, полученного при помощи приложения Velodyne Digital Sensor Recorder. Вблизи центра изображения различима белая точка, указывающая на положение сенсора. Для каждой пары излучатель-детектор сгенерированное облако точек представлено отдельным цветом. Пространственное представление данных формируется объединением двухмерных облаков точек. При вращении модуля набор точек от одной пары излучатель-детектор образует на ровной поверхности непрерывную окружность.

Приведённый пример относится к варианту установки дальномера на крыше кабины грузовика, поэтому на изображении ниже белой точки имеется тёмная область – кузов. Как видно на рисунке, впереди грузовика находятся два транспортных средства: другой грузовик, пытающийся повернуть налево, и легковой автомобиль, пересекающий перекрёсток. Кроме того, позади легкового автомобиля на изображении видны дорожное ограждение, земля и деревья. Слева и справа от сенсора видны волнистые области,

соответствующие дорожному ограждению и тротуару и выделяющие проезжую часть в поле зрения. Вдоль тротуара различим кустарник. Полученные данные также позволяют определить дорожную ситуацию позади сенсора – на изображении имеется транспортное средство, находящееся за грузовиком.

Важно, что в любом из облаков точек нет разрывов в круговых данных (вокруг грузовика). Этот факт показывает, что частоты следования лазерных импульсов для верхнего и нижнего блоков дальномера сконфигурированы правильно. Если бы частота следования импульсов была ниже, чем требуется, то каждая из окружностей состояла бы из пунктирных линий.

Пустые области на изображении возникают из-за находящихся на оптическом пути препятствий, не позволяющих получить данные о пространстве за ними (эффект затенения). Например, так возникает чёрная полоса позади кузова грузовика.

Следует отметить, что устройство LIDAR также может быть установлено под углом 90° к вертикальной оси для

Основные характеристики Velodyne HDL-64E

Параметры	Характеристики
Сенсор	<ul style="list-style-type: none"> • 64 лазера (4 сборки по 16 лазеров) • горизонтальный обзор 360° (азимут) • угловое разрешение 0,09° (азимут) • вертикальный обзор 26,8° (угол возвышения) • разрешение при измерении расстояния <5 см • частота обновления области обзора 5...15 Гц (выбирается пользователем) • диапазон измерения для дорожного полотна – до 50 м (доля отражения ~0,10) • диапазон измерения для автомобилей и листьев – до 120 м (доля отражения ~0,80) • скорость измерений >1 млн точек в секунду • задержка измерений <0,05 мс
Лазер	<ul style="list-style-type: none"> • Class 1M (безопасен для глаз) • длина волны 905 нм • длительность импульса 5 нс • адаптивная система управления мощностью для минимизации насыщения
Питание	<ul style="list-style-type: none"> • напряжение 12...16 В постоянного тока • максимальный потребляемый ток 4 А
Выход данных	<ul style="list-style-type: none"> • 100 Мбит Ethernet с UDP

изменения области обзора. Такая схема установки может быть использована в геодезических и картографических приложениях.

Рассмотренный лазерный дальномер Velodyne HDL-64E относится к классу 1M, то есть считается безопасным для глаз. Сенсор помещён в водонепроницаемый корпус, сохраняет работоспособность при экстремальных температурах и оптимален для использования в автомобилях. Основные технические характеристики устройства приведены в таблице.

ЛИТЕРАТУРА

1. CSMWG Information Guidance Document. Light Detection and Ranging (LIDAR) Sensor Model Supporting Precise Geopositioning. NGA.SIG.0004_1.1, 2011-08-01.
2. www.leica-geosystems.com.
3. www.optech.com.
4. www.riegl.com.
5. www.lidar.pro/wiki/Воздушный_лазерный_сканер.
6. www.robotosha.ru/robotics/how-it-works-driverless-car-google.html.
7. www.velodynelidar.com.
8. www.wireshark.org.



PROCHIP

POWERED BY PROSOFT

Активный компонент вашего бизнеса

- + Различные решения по подбору элементной базы
- + Осуществление поставок комплектующих для серийного производства и новых разработок
- + Поддержка склада
- + Оказание технической и информационной поддержки



+7 (495) 232-2522
 INFO@PROCHIP.RU
 WWW.PROCHIP.RU



Реклама

