УДК 004.4

СОВЕРМЕННЫЕ СИСТЕМЫ LIDAR: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ОБЗОР АРХИТЕКТУР, ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ И ПРИМЕНИМОСТИ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Порохин Ю.М., студент гр. ИТб-221, 4 курс,
Научный руководитель: Сыркин И.С., к.т.н., доцент.
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горабачева
Россия, г. Кемерово

LiDAR (Детектирование и измерение расстояния с помощью света) – специальный сенсор, измеряющий дистанцию до объекта с высокой точностью. Точность достигается благодаря использованию источников, излучающих лазерные импульсы и измерению интервалов времени, необходимого для прохождения этих импульсов до поверхности цели, отражения и возврата к датчику (принцип времени полета луча), схема представлена на рисунке 1 [1].

LiDAR – один из ключевых сенсоров в автономных транспортных системах и робототехнике. Сенсор обеспечивает прямое измерение расстояний посредством точного расчета времени полета лазерных импульсов и формирует густые облака точек. Полученные данные пригодны для решения задач SLAM, обнаружения объектов, трехмерного моделирования и построения карт местности высокой точности. LiDAR, в отличии от камер, зависящих от освещения, обеспечивает стабильность работы в независимости от внешнего освещения.

Современный рынок LiDAR неоднороден, выделяют: механические вращающиеся модели, цифровые твердотельные сенсоры и архитектуры с MEMS-зеркалами. Они развиваются параллельно, предлагая различные компромиссы характеристик и стоимости. Основные характеристики представлены в таблице 1.

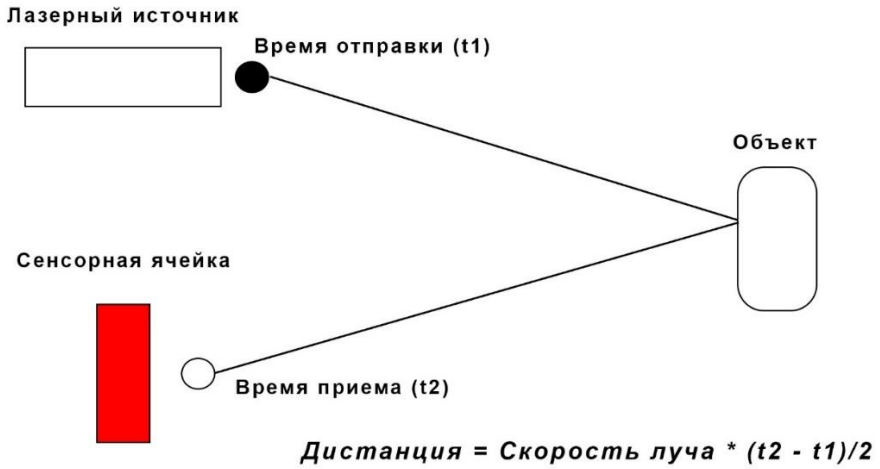

Рисунок 1 – Принцип времени полета луча в LiDAR.

Таблица 1 – Характеристики LiDAR.

Характеристика	Определение	Значимость
Угловое разрешение	Градусы на пиксель в горизонтальной/вертикальной плоскости	Определяет пространственную точность облака точек
Плотность облака точек	Количество точек на кадр при максимальном диапазоне работы	Определяет детализированность записанной сцены
Максимальный диапазон	Дистанция съемки при котором достигается отражательная способность равная 80%	Определяет эффективную рабочую область для записи
Частота (Гц)	Сканы в секунду при полном разрешении	Определяет задержку обновления сцены при работе в реальном времени
Потребляемая мощность (Вт)	Постоянное потребление при номинальной работе	Определят энергозатраты на съемку

Представителем архитектуры механических вращающихся систем является компания Velodyne с их линейкой сенсоров. Velodyne остается эталоном индустриальных LiDAR благодаря многолучевой конструкции, формирующей угол обзора в 360°. В сенсоре используется вращающийся оптико-механический блок, распределяющий лазерные импульсы для сканирования. Сенсоры Velodyne обеспечивают до 128 каналов излучения, позволяет достигать высокой плотности облака точек, полноценный круговой обзор и стабильную работу на дальности 120 – 300 метров, в зависимости от модели. Надежность сенсоров, подтверждена многолетними испытаниями и применением в различных задачах. При этом к ограничения относятся износ механических компонентов, примерно через 10-15 тыс. часов работы, чувствительность сенсора к вибрациям и ухудшение работы в дождь или тумане из-за рассеивания и отражений лучей [2, 3, 4].

LiDAR с твердотельной цифровой архитектурой разрабатывает компания Ouster. В линейке своих сенсоров они используют массив SPAD-детекторов (Single-Photon Avalanche Diodes), регистрирующие единичные фотоны с пикосекундной точностью. Лучи формируются через дифракционные элементы, а обработка сигналов выполняется непосредственно на кристалле. В отличии от механических систем в таких сенсорах отсутствует движущая часть и время их работы возрастает до более чем 50 тыс. часов. LiDAR от Ouster обладают высокой плотностью точек, гибкой программной настройкой параметров таких как частота кадров и фильтрации, а также лучшей устойчивостью к яркому солнечному свету, благодаря цифровой обработке. В то же время недостатками таких сенсоров SPAD-«мертвое время» - физическое ограничение

технологии, из-за которого сенсор хуже работает с множественными отражениями, уменьшение дальности в условиях тумана примерно на 30% [5].

LiDAR с применением MEMS-зеркал выпускает компания Livox. MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) – это микромеханические структуры изготовленные по технологиям, близким к производству микросхем, в контексте LiDAR MEMS-зеркало – это крошечный подвижный отражающий элемент, который способен быстро отклонять лазерный луч в горизонтальной и вертикальной плоскостях. При работе в сенсоре MEMS-зеркало формирует нерегулярную «квазислучайную» траекторию луча, из-за чего полный обзор собирается не в одном кадре, а за несколько последовательных сканов, это позволяет применять только один лазерный излучатель, в отличии от механической или твердотельной архитектуры, что позволяет снизить стоимость в 3 – 10 раз. Такие LiDAR отличаются низким энергопотреблением, высокой дальностью работы в пределах 260-460 метров, в зависимости от модели, компактность, позволяющую применять такие сенсоры для дронов. К ограничениям можно отнести неполное покрытие одного кадра, что требует интеграции нескольких кадров для формирования точной картины, ухудшение работы в тумане с сокращением эффективной дальности примерно до 25 метров [6,7].

В таблице 2 представлено сравнение основных моделей LiDAR с разными архитектурами.

Таблица 2 –Сравнение LiDAR с разными архитектурами.

Параметр	Velodyne VLP-16	Ouster OS1-64	Livox Horizon
Угловое разрешение	~2°	0.512°	~0.2° (эффективное)
Плотность точек	27 тыс./кадр	131 тыс./кадр	38 тыс./кадр
Максимальная дальность	120-200 м	180-240 м	260 м
Частота	10-20 Гц	5-20 Гц	10-25 Гц
Потребляемая мощность	12-15 Вт	8-10 Вт	5-6 Вт
Стоимость	4-8 тыс. $	18-25 тыс. $	1.2-2 тыс. $

Выбор конкретного LiDAR всегда обуславливается условиями применения. Так в системах помощи водителю и автономного вождения критически важны дальность обнаружения не менее 100м, высокая плотность точек для уверенного классифицирования объектов и устойчивость к неблагоприятным погодным условиям, включая дождь и туман. Исходя из этих условий лучшим выбором будет применение сенсоров Ouster с твердотельной архитектурой, что обеспечивает оптимальный баланс между дальностью работы и плотностью точек, хорошую устойчивость к неблагоприятным погодным условиям при применении цифровой фильтрации. Для беспилотных летательных платформ решающим фактором становится масса, энергопотребление и широкое поле зрение для захвата структуры местности под углом. В таких условиях широкое

применение получили сенсоры Livox, разработанные совместно с DJI, одного из крупнейших производителей БПЛА. Архитектура с использованием MEMS-зеркал выделяется минимальной массой, высокой энергоэффективностью и высокой дальностью работы, что отлично подходит для применения на дронах. А для использования в робототехнике и применения в закрытых пространствах большое применение получили LiDAR Velodyne с механической архитектурой. В помещении ключевыми параметрами становятся угол обзора в 360°, высокая частота обновления и предсказуемость структуры облака точек, что обеспечивает стабильные карты для алгоритмов мобильных роботов.

Таким образом, на сегодняшний день существует несколько архитектур LiDAR-сенсоров, каждая обладает своими достоинствами и недостатками, но в то же время особенности каждой из архитектур позволяют находить применение сенсоров в различных областях.

Список литературы:

1. What is LiDAR and how does it work? // LiDAR Solutions [Электронный ресурс] URL: https://www.lidarsolutions.com.au/what-is-lidar/ (дата обращения: 20.11.2025).
2. VLS-128 User Manual // data.ouster.io [Электронный ресурс] URL: https://data.ouster.io/downloads/velodyne/user-manual/alpha-prime-rev4-user-manual.pdf (дата обращения: 20.11.2025).
3. VLP-32 User Manual // data.ouster.io [Электронный ресурс] URL: https://data.ouster.io/downloads/velodyne/user-manual/vlp-32c-revd-user-manual.pdf (дата обращения: 20.11.2025).
4. VLP-16 User Manual // data.ouster.io [Электронный ресурс] URL: https://data.ouster.io/downloads/velodyne/user-manual/vlp-16-user-manual-revf.pdf (дата обращения: 20.11.2025).
5. Beer, M.; Haase, J.F.; Ruskowski, J.; Kokozinski, R. Background Light Rejection in SPAD-Based LiDAR Sensors by Adaptive Photon Coincidence Detection. // mdpi.com [Электронный ресурс] URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/18/12/4338#metrics (дата обращения: 20.11.2025).
6. Zheng Liu, Fu Zhang, Xiaoping Hong Low-cost Retina-like Robotic Lidars Based on Incommensurable Scanning // arXiv [Электронный ресурс] URL: https://arxiv.org/abs/2006.11034 (дата обращения: 20.11.2025).
7. Liu Tianhao, Kang Hanwen, Chen Chao ORB-Livox: A real-time dynamic system for fruit detection and localization // Computers and Electronics in Agriculture. - 2023. - №209. - С. 107834.