

Лазерные локационные системы 3D Flash Ladar для интеллектуальной навигации транспорта

Е. Старовойтов, к. т. н.¹, Е. Скиба²

УДК 6629.056.8 | ВАК 2.2.11

Лазерные локационные системы, или лидары являются одним из основных типов датчиков, применяемых на беспилотном транспорте и в мобильных роботах. Рассмотрены лидары с оптико-механическим сканированием, на базе 3D Flash Ladar технологии и гибридной схемы.

Лазерные локационные системы (ЛЛС), или лидары (англ. lidar – light detection and ranging), или ладары (англ. ladar – laser detection and ranging) могут быть использованы в системах интеллектуальной навигации беспилотных транспортных средств и мобильных роботов, для комплексирования с абонентскими терминалами локальной системы навигации, при определении местоположения в закрытых и экранированных сооружениях и др.

В настоящее время ЛЛС широко применяются в системах ADAS (англ. Advanced driver-assistance systems, интеллектуальная система помощи водителям автомобилей) и для управления беспилотным автотранспортом (автолидары), наряду с телекамерами и радиотехническими системами (авторадарами).

Автолидары в сравнении с авторадарами обладают меньшей погрешностью измерений дальности, а также имеют преимущество по угловому разрешению, что позволяет обнаруживать малоразмерные объекты. Данное преимущество ЛЛС перед радиотехническими системами уже давно применяется в портативных средствах для контроля скоростного режима автотранспорта [1]. Это обстоятельство является особо важным при работе в условиях плотного транспортного потока, в котором необходимо выделить потенциально опасные с точки зрения столкновения объекты.

Данное направление в развитии навигационных датчиков является одним из важнейших для развития беспилотного транспорта и мобильных роботов.

КОНСТРУКЦИИ ЛАЗЕРНЫХ ЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В настоящее время в большинстве решений преимущественно используется традиционная конструкция ЛЛС на базе оптико-механического сканера. Для обнаружения объекта и определения его формы выполняется последовательный просмотр поля обзора сканирующим полем с малым угловым размером по различным траекториям.

Такие ЛЛС не могут быть использованы для навигации в реальном времени высокодинамичных объектов из-за большой длительности сканирования всей зоны обзора, за время которого может произойти существенное искажение формируемого «облака точек».

Продолжительность оптико-механического сканирования связана не только со скоростью оптических деталей, но и с максимальной дальностью измерений. Дальность измеряется в основном времяпролетным методом по величине задержки между излучением зондирующего импульса и приходом эхо-сигнала

$$D = \frac{c \cdot t_{зд}}{2}, \quad (1)$$

где $t_{зд}$ – время задержки между излучением зондирующего лазерного импульса и приходом эхо-сигнала. Длительность сканирования зоны обзора по двум осям можно оценить с помощью выражения [2]:

$$t_c = \frac{2D \cdot \Omega_{обз}}{c \cdot \Omega_{пр}}, \quad (2)$$

где $\Omega_{обз}$ – телесный угол поля обзора ЛЛС; $\Omega_{пр}$ – телесный угол поля зрения приемного канала ЛЛС.

Для выполнения обзора в зоне $90^\circ \times 30^\circ$ приемным каналом с полем $0,2^\circ \times 0,2^\circ$ на дальности 300 м (как у серийно выпускаемых в настоящее время автомобильных радаров) потребуется 0,14 с, что уже сопоставимо со скоростью реакции человека-водителя и нивелирует преимущества автоматических датчиков.

¹ АО «НИИМА «Прогресс», заместитель начальника отдела разработки смешанных СВЧ-модулей.

² АО «НИИМА «Прогресс», начальник отдела главного конструктора.

Выражение (2) также можно представить в следующем виде [3]:

$$t_c = N_\theta \cdot N_z \cdot \frac{2D}{c}, \quad (3)$$

где N_θ , N_z – число зондирующих импульсов в азимутальной и угломестной плоскостях. Отсюда следует, что для быстрого просмотра зоны обзора должна использоваться высокая частота повторения зондирующих импульсов. Для рассмотренного случая она составляет 500 кГц. При таких высоких частотах повторения импульсов излучения потребуются оптимизация параметров лазерного источника излучения.

Для инженерных расчетов энергетическая оценка ЛЛС выполняется в приближении геометрической оптики, согласно которому максимальная дальность измерений составляет [2]:

$$D = \sqrt{\frac{E_3 \cdot d_{\text{вх}}^2 \cdot \rho_n \cdot \tau_{\text{изл}} \cdot \tau_{\text{пр}} \cdot e^{-2D \cdot \alpha}}{4q \cdot E_{\text{пор}}}}, \quad (4)$$

где E_3 – энергия зондирующего лазерного импульса; $d_{\text{вх}}$ – диаметр входного зрачка приемного объектива; q – отношение сигнал/шум; ρ_n – коэффициент отражения поверхности; $E_{\text{пор}}$ – пороговая регистрируемая ФПУ энергия; $\tau_{\text{изл}}$, $\tau_{\text{пр}}$ – коэффициенты пропускания излучающего и приемного оптических трактов, α – коэффициент потерь на атмосферной трассе.

Из выражения (4) следует, что мощность зондирующего импульса пропорциональна квадрату дальности измерений. При этом средняя мощность лазерного источника излучения определяется с учетом его КПД и частоты повторения импульсов

$$P_{\text{л}} = \frac{1-\eta}{\eta} \cdot E_3 \cdot f_{\text{max}}, \quad (5)$$

где η – КПД лазерного источника; f_{max} – максимальная частота повторения зондирующих импульсов.

При большой мощности излучения и низком КПД увеличивается энергопотребление ЛЛС и может потребоваться принудительное охлаждение, что, в свою очередь, усложнит конструкцию, а также приведет к увеличению ее массы и габаритов.

Кроме того, недостатки оптико-механического сканирования также заключаются в ограниченных значениях скоростей подвижных частей, их износе в процессе эксплуатации и, как итог, ограниченном сроке службы.

Альтернативой сканированию узкими пучками является 3D Flash Ladar технология (3D-камеры с лазерной подсветкой, времяпролетные камеры) [4–7]. ЛЛС на базе 3D Flash Ladar технологии обладают следующими преимуществами:

- отсутствие оптико-механического сканирования;
- определение формы и ориентации объекта за один импульс подсветки;
- частота выдачи информации не ограничивается скоростями подвижных оптических деталей.

Эти ЛЛС уже широко используются в качестве датчиков для управления подвижными объектами, в том числе в автотранспорте.

В 2016 году концерн Continental AG (Германия) выкупил разработку Advanced Scientific Concepts Inc. (США) для использования в автомобилях с системой ADAS [8]. Впоследствии концерном был представлен лидар HFL110 (рис. 1), предназначенный для использования в автотранспорте, сельскохозяйственных машинах, строительной технике, беспилотных летательных аппаратах и др.

Фирма LeddarTech (Канада) представила аналогичный лидар Leddar Pixel (рис. 2), обеспечивающий полное покрытие «слепых зон» автотранспортного средства [9]. Лидар предназначен для формирования вокруг автомобиля комплексного «кокона» обнаружения, в котором отслеживаются объекты и на основе их положения, скорости и направления движения прогнозируется вероятность столкновения, при этом не используется центральный процессор автомобиля. Leddar Pixel может быть установлен в беспилотном автотранспорте и в системах ADAS.

3D Flash Ladar системы могут быть построены только с использованием специального фотоприемного устройства (ФПУ), состоящего из массива фотодетекторов с интегральной схемой считывания и обработки сигналов в виде единой сборки.

Недостатками данной технологии являются ограниченные дальность измерений и разрешающая способность ЛЛС. Это обусловлено большой расходимостью луча зондирующего излучения, которым одновременно подсвечивается широкое поле обзора, и ограниченным



Рис. 1. Автолидар HFL110 (Continental AG, ФРГ):
а – внешний вид лидара;
б – работа лидара, установленного на движущемся автомобиле

форматом ФПУ, не достигающим в настоящее время значений, как у ПЗС- и КМОП-матриц.

Для 3D Flash Ladar систем в знаменатель выражения (4) вводится количество фотодетекторов ФПУ.

По этим причинам более перспективными считаются лидары гибридной схемы с использованием линейного ФПУ и одномерным сканированием по одной из осей, обладающие преимуществами как 3D Flash Ladar технологии, так и оптико-механического сканера [10].

К гибридным ЛЛС, не использующим 3D Flash Ladar технологию, можно отнести известный лидар VLP-16 (США, Velodyne LiDAR, Inc., в настоящее время Ouster Inc.) [11]. Отечественным аналогом данного изделия является разрабатываемый АО «Ижевский радиозавод» лидар IRZ SensL-01 [12].

Для ЛЛС гибридной схемы выражение (3), по которому определяется длительность сканирования, будет иметь вид

t_1c=N_c\cdot\frac{2D}{c}, (6)

где N_c – число зондирующих импульсов в плоскости, в которой производится сканирование.

Принцип работы и упрощенные схемы ЛЛС всех трех типов показаны на рис. 3. В табл. 1 представлены технические характеристики ЛЛС, предназначенных для автотранспорта, в которых используется гибридная схема и 3D Flash Ladar технология.

ФПУ ДЛЯ 3D FLASH LADAR СИСТЕМ

3D Flash Ladar системы обычно работают с очень слабыми отраженными сигналами, так как подсветка охватывает широкую область и отраженный сигнал распределяется на большое количество пикселей. Поэтому в ФПУ для 3D Flash Ladar систем часто используют массивы лавинных фотодиодов (ЛФД), работающих в режиме Гейгера (GMAPDs), которые обладают чувствительностью к отдельным фотонам.

В диапазоне длин волн 0,6...1,2 мкм наибольшей чувствительностью и быстродействием обладают ЛФД (10^3 и более). Основное преимущество ЛФД заключается во внутреннем усилении фототока, которое происходит за счет электрического пробоя p-n-перехода и образования

Таблица 1. Технические характеристики ЛЛС гибридной схемы и на базе 3D Flash Ladar технологии, предназначенных для автотранспорта [7, 8, 11, 12]

ЛЛС	Разработчик	Длина волны, мкм	Формат ФПУ	Дальность измерений/ угловое разрешение	Частота выдачи информации, Гц	Погрешность измерений дальности, м	Поле зрения	Масса, кг	Габариты/объем	Потреб. мощность, Вт
VLP-16	Velodyne LiDAR, Inc., США	0,91	16 кана- лов	100 м/ 0,1°...0,4° горизонт. 2,0° верт.	10	0,03	360°×30°	0,83	ø10,3×7,2 см	–
IRZ SensL-01	АО «ИРЗ»	0,91	–	0,5...100,0 м/ 0,18° горизонт. 0,5° верт.	50	0,02	90°×8°	2,5	16×16×10,6 см	–
HFL110	Continental AG, ФРГ	1,06	128×32	–	25...30	–	120...30°	0,75	10×12×65 см	–
Leddar Pixel	LeddarTech, Канада	0,91	96×8	23 м...41 м*/ 1,9° горизонт. 2,0° верт.	20	0,05	177,5°×16°	2,25	24,5×12,7×8,6 см	20

* Определяется коэффициентом отражения поверхности объекта.

лавинного процесса размножения поступающих в p - n -переход неосновных носителей. Поэтому ЛФД широко применяются в ЛЛС различного назначения.

Благодаря более широкому динамическому диапазону, меньшей стоимости и доступности в ФПУ также применяют pin-фотодиоды – фотодетекторы на основе p - n -переходов с большим обедненным слоем. Эти фотодетекторы обладают достаточной для ЛЛС чувствительностью и быстродействием.

В ФПУ 3D Flash Ladar для обработки сигналов от массива фотодетекторов используется специальная интегральная схема (Readout Integrated Circuit – ROIC), относящаяся к одному из двух основных типов. Первый тип основан на преобразователе времени в цифровой код (ПВЦК) [4], а второй тип – на базе аналого-цифрового преобразователя (АЦП) [5].

ROIC первого типа построена на преобразователе времени в цифровой код и позволяет достигнуть высокой точности измерений на малых дальностях, но при этом отсутствует информация об интенсивности эхо-сигнала и затрудняется обнаружение вторичного эхо-сигнала от нескольких объектов, расположенных один за другим (стробирование по дальности). В этом случае должны применяться лазерные



Рис. 2.
Автолидар
Leddar Pixel
(LeddarTech,
Канада):
а – внешний
вид лидара;
б – работа
лидара,
установленного
на движущемся
автомобиле

источники с короткими стабильными импульсами (твердотельные или волоконные лазеры).

ФПУ с ROIC на основе АЦП извлекают больше информации из эхо-сигнала, позволяя определять материал

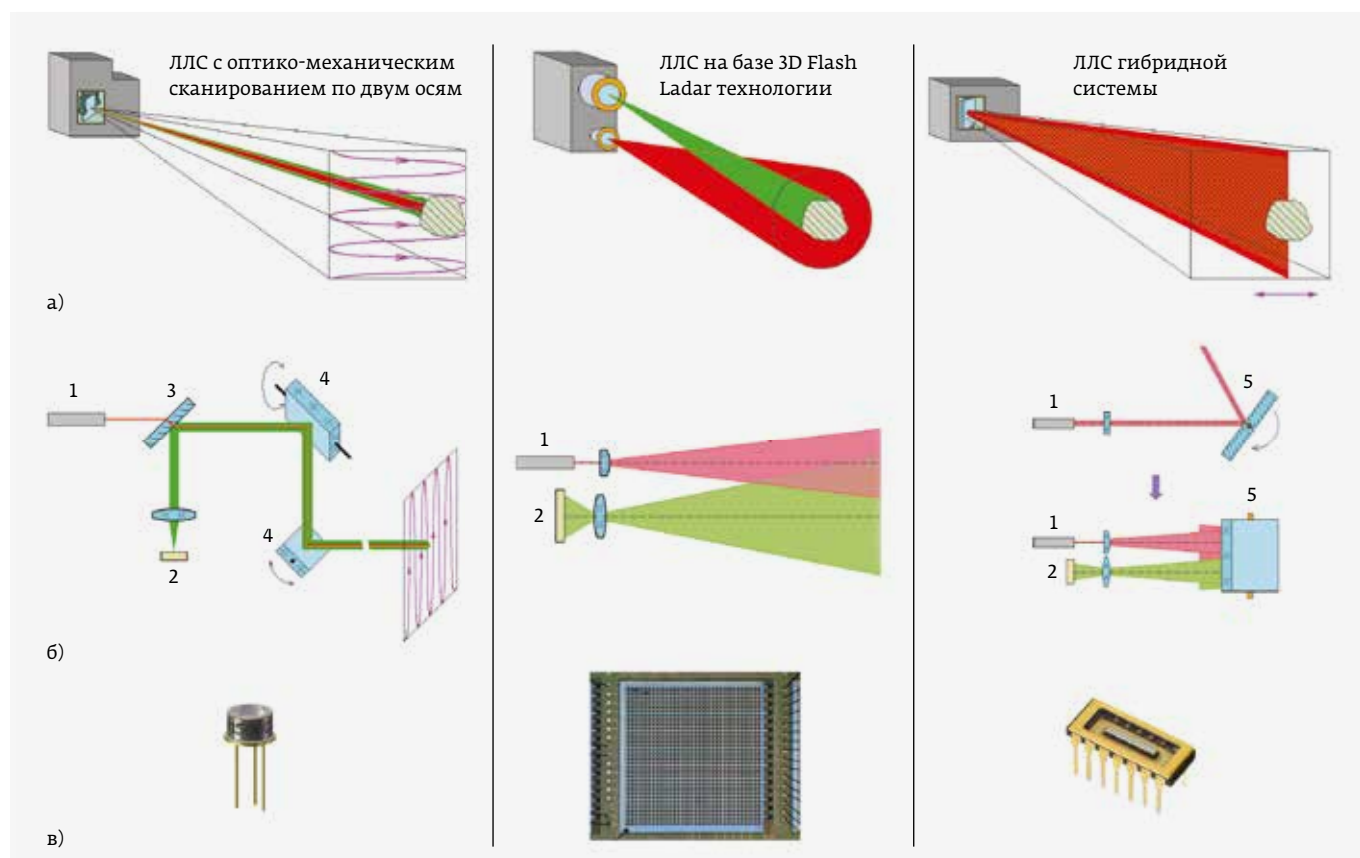


Рис. 3. Варианты различных конструкций ЛЛС: а – схема работы; б – оптическая система; в – внешний вид ФПУ; 1 – лазерный источник; 2 – ФПУ; 3 – полупрозрачное зеркало; 4 – качающееся зеркало; 5 – вращающееся зеркало

и отражательные характеристики поверхности объекта, но точность определения формы сигнала зависит от частоты дискретизации. Здесь для подсветки могут быть использованы полупроводниковые лазерные диоды [5, 6].

Кроме лазерной локации аналогичные ФПУ используются для регистрации слабых оптических сигналов в детекторах ионизирующих излучений, применяемых в ядерной физике [13].

В ЛЛС применяются фотодетекторы, изготовленные либо из кремния, либо из структур InP/InGaAsP. Кремниевые фотодетекторы используются для работы на длинах волн от 810 до 900 нм. Фотодетекторы на основе InGaAs/InP позволяют обнаруживать излучение на длинах волн 1064 и 1550 нм. Конструкция ФПУ, технология изготовления его составных частей и сборки заметно отличаются для компонентов из кремния и InP/InGaAsP [7].

Российской компанией ООО «ДЕФАН» [14] разработаны лавинные фотодетекторы нового поколения для регистрации световых сигналов с высокой чувствительностью в широком динамическом диапазоне, работающие в режиме Гейгера, устойчивые к фоновой засветке и имеющие низкий уровень собственных шумов. Эти приборы сочетают в себе преимущества ЛФД и кремниевых фотомножителей, что делает их перспективными для использования в системах ADAS и робототехнике.

На сегодняшний день имеются отечественные образцы 3D Flash Ladar систем, из которых можно упомянуть РТ-ЛИДАР фирмы ООО «РАСТР-ТЕХНОЛОДЖИ» с матричным ФПУ на основе pin-фотодиодов для неразрушающего контроля [15] и разработки компании ООО «ДЕФАН».

Предприятиями накоплен опыт изготовления много-режимного аналогового ФПУ для ЛЛС, задел по созданию массивов фотодетекторов с внутренним усилением и интегральных схем считывания и обработки сигналов ROIC (ASIC).

В настоящее время основной задачей является максимальная локализация производства всех основных компонентов на территории России.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Абазадзе Ю.В., Лицарев Н.А., Почтарев В.Л. и др.** Особенности построения лазерного измерителя скорости и дальности ЛИСД-2М // Квантовая электроника. 2002. № 3. С. 247–250.
2. **Малашин М.С., Каминский Р.П., Борисов Ю.Б.** Основы проектирования лазерных локационных систем. М.: Высшая школа, 1983. 207 с.
3. **Бондаренко А. В., Бондаренко М. А., Докучаев И. В.** Аппаратная реализация бортовой автономной системы улучшенного и синтезированного зрения мобильной техники // Механика, управление и информатика. 2012. № 3 (9). С. 95–102.
4. **Takahide Mizuno, Hirokazu Ikeda, Terumasa Nagano, Takashi Baba, Makoto Mita, Yuya Mimasu, Takeshi Hoshino.** Three dimensional Image Sensor with MPPC for Flash LIDAR. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences. V. 63, 2020. No. 2. PP. 42–49. DOI: 10.2322/tjsass.63.42.
5. **Joo J.-E., Hu Y., Kim S., Kim H., Park S., Kim J.-H., Kim Y., Park S.-M.** An Indoor-Monitoring LiDAR Sensor for Patients with Alzheimer Disease Residing in Long-Term Care Facilities. Sensors 2022, 22, 7934. <https://doi.org/10.3390/s22207934>.
6. **Xianzhao Xia, Mao Ye, Jiaji He, Kai Hu, Yiqiang Zhao.** A novel TDC/ADC hybrid reconstruction ROIC for LiDAR. IEICE Electronics Express. 2019. V. 16. Iss. 3. PP. 20181076. Released on J-STAGE. February 10. 2019. <https://doi.org/10.1587/elex.16.20181076>.
7. **Aull B.F., Duerr E.K., Frechette J.P., K. Alexander McIntosh A.K., Schuette D.R., Younger R.D.** Large-Format Geiger-Mode Avalanche Photodiode Arrays and Readout Circuits. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. V. 24. No. 2. March/April 2018. DOI: 10.1109/JSTQE.2017.2736440.
8. Continental Automotive - High Resolution 3D Flash LiDAR™. URL: <https://www.continental-automotive.com/en-gl/Passenger-Cars/Autonomous-Mobility/Enablers/Lidars/3D-Flash-Lidar> (01.10.2024).
9. Leddar™ Pixell. Cocoon LiDAR for Autonomous Vehicles – LeddarTech. URL: https://leddartech.com/app/uploads/dlm_uploads/2021/04/Spec-Sheet_Leddar-Pixell_V7.0_EN.pdf (01.10.2024).
10. **Грязнов Н.А., Купренюк В.И., Соснов Е.Н.** Лазерная информационная система обеспечения сближения и стыковки космических аппаратов // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 5. С. 27–33.
11. **Bula, Jason & Derron, Marc-Henri & Mariethoz, Gregoire. (2020).** Dense point cloud acquisition with a low-cost Velodyne VLP-16. Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems. 9. 385–396. 10.5194/gi-9-385-2020.
12. Лидар IRZ SensL-01 – Ижевский радиозавод. URL: <https://www.irz.ru/products/sensorics/770.htm>.
13. **Бочаров Ю.И., Бутузов В.А., Симаков А.Б.** Специализированная интегральная микросхема для съема и аналоговой обработки сигналов матриц кремниевых фотоэлектронных умножителей // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 6. С. 23–34.
14. Фотодетектор. <https://www.dephan.com/photodetector>
15. РАСТР ТЕХНОЛОДЖИ – Лазерный 3D локатор «РТ-ЛИДАР» – <http://rastr.net/product/special/ndt-system/rt-lidar.html>.

С Новым годом и Рождеством!

Поздравляем Вас с наступающим 2025 годом и Рождеством!
Желаем Вам в предстоящем году новых достижений, приятных открытий,
удачи и исполнения желаний.
Здоровья, благополучия и хорошего Вам настроения!

Посты оптического микроконтроля

• Микроскоп МИКРО 200

DUV



• Высокоразрешающий
комплекс ГУФ

UV



• Комплекс
автоматизированный
МА-300

IR



• Комплекс
аналитический
«ФОТОН»

тел.: (+375 17) 377-90-64, e-mail: office@optes.by