

# Оценка возможностей 3D Flash Ladar технологии для использования в бортовых датчиках высокоавтоматизированных транспортных средств

Е. Старовойтов, к. т. н.<sup>1</sup>, З. Кондрашов<sup>2</sup>, В. Игнатенко<sup>3</sup>

УДК 629.056.8 | ВАК 2.2.11

Лазерные локационные системы или лидары относятся к основным информационным датчикам, используемым для интеллектуальной навигации высокоавтоматизированных транспортных средств. Характеристики лидаров в значительной степени определяются входящей в их состав компонентной базой. Проведена оценка дальности и погрешности измерений лидаром на базе 3D Flash Ladar технологии в условиях фоновой засветки на разных длинах волн, при использовании разных типов источников излучения и фотодетекторов.

Лазерные локационные системы (ЛЛС) служат одним из основных типов информационных датчиков наряду с радаром и телекамерами, данные от которых используются для навигации высокоавтоматизированных транспортных средств (ВАТС). В настоящее время получили распространение и применяются на практике ЛЛС, построенные на базе 3D Flash Ladar технологии, в конструкции которых отсутствуют подвижные части. Основной составной частью является специальное фотоприемное устройство (ФПУ), включающее в себя массив фотодетекторов с интегральной схемой считывания и обработки сигналов (ASIC).

Объект облучается широким пучком зондирующего излучения, а ФПУ измеряет расстояние до разных участков его поверхности с использованием времяпролетного метода измерений. Отдельным преимуществом является то, что один зондирующий импульс позволяет сразу определить форму или ориентацию объекта. Отсутствие подвижных оптических деталей обеспечивает малые массу и габариты такого лидара, а также его повышенную надежность.

Приборы данного типа отечественной промышленностью до недавнего времени не производились. Основные разработчики аппаратуры и комплектующих находятся в США и Канаде.

В связи с развитием беспилотного транспорта и робототехники сегодня актуальна разработка датчиков данного типа в России, что, в свою очередь, потребует разработки и производства соответствующей компонентной базы. Как показывают экспертные оценки, отечественная промышленность обладает технологиями, достаточными для производства лидаров на базе 3D Flash Ladar технологии и комплектующих для них.

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ НАВИГАЦИИ АВТОТРАНСПОРТА

ЛЛС могут использоваться в системах интеллектуальной навигации подвижных объектов для комплексирования с абонентскими терминалами локальной системы навигации «КОНСУЛ» [1], навигации в закрытых сооружениях типа туннелей [2], навигационного обеспечения беспилотных логистических коридоров [3, 4] и др.

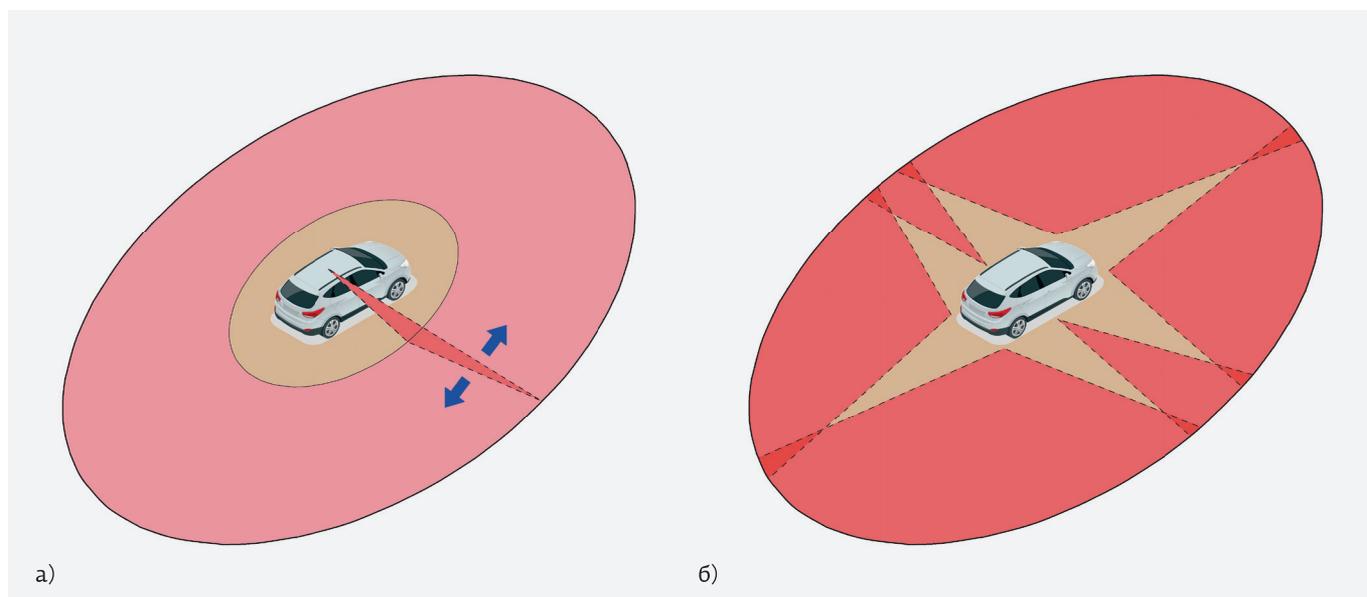
Специалистами АО «НИИМА «Прогресс» был проведен анализ рынка ЛЛС (бортовых лидаров) для ВАТС. Из полученных результатов следует, что в сегменте лидаров на базе 3D Flash Ladar технологии ожидается самый высокий ежегодный прирост в течение периода 2022–2029 годов из-за растущего использования в ВАТС. Разработчики бортовых лидаров разных типов, используемых при управлении и навигации ВАТС, представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, ВАТС могут иметь 3...4 лидара малой дальности и от 1 до 5 лидаров большой дальности. Лидары большой и малой дальности будут отличаться по своему функционалу и конструкции.

<sup>1</sup> АО «НИИМА «Прогресс», начальник отдела научных исследований и защиты интеллектуальной собственности.

<sup>2</sup> АО «НИИМА «Прогресс», генеральный директор.

<sup>3</sup> АО «НИИМА «Прогресс», тестировщик.



**Рис. 1.** Поле обзора бортовых лидаров ВАТС: а – бортовой лидар на базе оптико-механического сканера с круговым полем обзора, сформированным путем вращения приемо-передающих каналов вокруг вертикальной оси; б – группа из шести бортовых лидаров на базе 3D Flash Lidar технологии с неподвижными полями зрения, перекрывающими полный круг

При использовании нескольких лидаров можно уменьшить поле обзора каждого из них, что позволит повысить разрешение по углу, которое для 3D Flash Lidar технологии определяется форматом ФПУ.

На рис. 1 схематично показаны поля обзора для одиночного бортового лидара на базе оптико-механического сканера (а) и для группы из нескольких бортовых лидаров на базе 3D Flash Lidar технологии (б).

Бортовые лидары ВАТС должны обладать сантиметровой погрешностью измерений дальности, обеспечивая при этом разрешение по углу  $0,1...2,0^\circ$  и частоту обновления навигационных данных до 10 Гц. Конструкции на базе 3D Flash Lidar технологии немного уступают оптико-механическим сканерам по максимальной дальности измерений (41 м и 100 м) и угловому разрешению в азимутальной плоскости ( $1,9^\circ$  и  $0,4^\circ$ ) [5, 6].

**Таблица 1.** Использование бортовых лидаров для ВАТС

Разработчик ВАТС	Разработчик лидара	Число лидаров малой дальности	Число лидаров большой дальности
Waymo	Waymo	4	1
Cruise	Hesai, Velodyne Lidar	0	5
Aurora	Blackmore, Hesai	4	3
Apollo	Hesai	4	1
Didi	Hesai	4	1
Motional	Hesai, Velodyne Lidar	3	1
Pony	Hesai	3	2
We Ride	Hesai	4	3
Autox	Hesai	0	2
ООО «Яндекс»	ООО «Яндекс»	0	4
Zoox	Hesai	4	4

В лидарах обоих типов существующие требования реализуются с использованием времяпролетного метода измерений, при котором лазерный источник излучает короткие мощные зондирующие импульсы.

Опико-механическое сканирование накладывает ограничение на частоту обновления информации из-за последовательного просмотра поля обзора. При этом для получения комплексированного навигационного решения с субметровой точностью (локальная система навигации и лидар) потребуется частота обновления информации около 400 Гц [1]. В этом случае неоспоримые преимущества получают лидары на базе 3D Flash Ladar технологии.

### КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА 3D FLASH LADAR ТЕХНОЛОГИИ

Используемые для считывания и обработки сигналов от фотодетекторов в 3D Flash Ladar системах интегральные схемы ASIC называют ROIC (Readout Integrated Circuit). ROIC производятся преимущественно по технологии 180 нм [7], что без труда позволяет выпускать их на предприятиях отечественной микроэлектронной промышленности. Аналогичные по функционалу интегральные схемы разрабатываются для применения в медицинской технике и в научном приборостроении, где возникают задачи регистрации заряженных частиц.

Российские предприятия обладают опытом изготовления многорежимного аналогового ФПУ для ЛЛС на базе матрицы рin-фотодиодов 320 × 256 [8].

Для использования в промышленности, транспорте и других областях с широким применением, лидары

должны соответствовать требованиям по безопасности зондирующего излучения. При этом необходимо согласовать спектральные характеристики, необходимую энергию импульсов излучения с ограничениями, обеспечивающими безопасность органов зрения технического персонала и случайных наблюдателей.

Серийно выпускаемые лидары работают в спектральном диапазоне 0,81...1,57 мкм, для которого промышленность выпускает широкую номенклатуру лазерных источников излучения и фотодетекторов, а также узкополосные светофильтры (включая интерференционные фильтры). Кроме того, для этих длин волн может применяться обычная оптика, используемая для работы в видимом диапазоне спектра (0,38...0,78 мкм).

Для получения излучения с необходимыми параметрами подходят три основных типа лазеров: твердотельные с диодной накачкой, полупроводниковые лазерные диоды и волоконные лазеры. Наиболее оптимальное сочетание показателей выходного излучения долгое время обеспечивали только одну из разновидностей лазеров первого типа (твердотельные микрочип<sup>i</sup> лазеры), поэтому первые образцы 3D Flash Ladar систем были построены на их базе [9, 10].

<sup>i</sup> Твердотельный микрочип лазер – это монолитный твердотельный лазер с продольной накачкой от полупроводниковых лазерных диодов, резонатором малых размеров (образованным нанесением диэлектрических зеркал на две плоскопараллельные грани активного элемента) и пассивной модуляцией добротности, позволяющий получать импульсы излучения пикосекундной длительности и мегаваттной мощности [11, 12].

**Таблица 2.** Результаты оценки потенциальной погрешности измерений дальности ЛЛС

Тип лазерного источника	Длина волны, мкм	Мощность зондирующего импульса, Вт	Спектральная плотность потока солнечной энергии, (Вт/м <sup>2</sup> )·нм	Максимальная дальность измерений, м	Поле зрения отдельного пикселя ФПУ	Отношение сигнал/шум	Потенциальная погрешность измерений дальности, см
Полупроводниковые лазерные диоды на AlGaAs/GaAs	0,81	30	1,12	100	0,2°×0,2°	5,5	3,2
	0,91	50	0,89	100	0,2°×0,2°	11,5	2,2
Иттербиевые волоконные лазеры	1,06	1000	0,64	300	0,3°×0,3°	15,8	1,8
Эрбиевые волоконные лазеры	1,56	5000	0,24	500	0,4°×0,4°	42,7	1,1

К настоящему времени развитие волоконных лазеров позволяет применять их в компактной серийно выпускаемой аппаратуре потребительского уровня [13]. Одним из основных преимуществ данного типа лазеров являются высокие частоты повторения импульсов излучения с длительностью и мощностью, достаточными для применения в ЛЛС.

Полупроводниковые лазерные диоды (инжекционные лазеры) при использовании соответствующих методов обработки эхо-сигнала также могут быть применены в 3D Flash Ladar системах [14].

В качестве фотодетекторов могут использоваться кремниевые структуры (0,81...0,91 мкм) и структуры InP/InGaAsP (1,06...1,57 мкм). В зависимости от выбора материала различаются конструкция ФПУ и технология ее сборки [15].

Определить степень влияния разных типов источников излучения и фотодетекторов на характеристики 3D Flash Ladar систем позволяет оценочный расчет.

### ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНОЙ ДАЛЬНОСТИ И ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

При приеме отдельным фотодетектором эхо-сигнала на фоне случайных шумов потенциальная погрешность измерений времяпролетного метода зависит от отношения сигнал/шум и ширины полосы пропускания [16]. Если полоса пропускания согласована с шириной спектра сигнала, то имеем

$$\Delta D = \frac{c}{2 \cdot \Delta f \cdot \sqrt{n_0}}, \quad (1)$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме;  $n_0$  – отношение сигнал/шум;  $\Delta f$  – ширина полосы пропускания;

$$\Delta f \approx \frac{2}{t_{\text{и}}}, \quad (2)$$

где  $t_{\text{и}}$  – длительность зондирующего лазерного импульса.

В результате получаем:

$$\Delta D = \frac{c t_{\text{и}}}{4 \cdot \sqrt{n_0}}. \quad (3)$$

Определить отношение сигнал/шум можно путем энергетического расчета, выполняемого в приближении геометрической оптики [17], при котором максимальная дальность измерения ЛЛС, без учета внутренних шумов фотодетекторов, в первом приближении определяется выражением:

$$D = \sqrt{\frac{P_{\text{и}} \cdot d_{\text{вх}}^2 \cdot \rho_{\text{п}} \cdot \tau_{\text{изл}} \cdot \tau_{\text{пр}} \cdot \tau_{\text{а}} \cdot \eta \cdot \sigma}{4 n_0 \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot P_{\text{фз}}}}, \quad (4)$$

где  $P_{\text{и}}$  – мощность зондирующего лазерного импульса;  $d_{\text{вх}}$  – диаметр входного зрачка приемного объектива;  $\rho_{\text{п}}$  –

коэффициент отражения поверхности;  $m_1, m_2$  – количество элементов ФПУ (пикселей) по двум осям;  $\tau_{\text{изл}}$ ,  $\tau_{\text{пр}}$  – коэффициент пропускания излучающего и приемного оптических трактов;  $\tau_{\text{а}}$  – коэффициент пропускания атмосферной трассы;  $P_{\text{фз}}$  – мощность фоновой засветки;  $\eta$  – коэффициент перекрытия области подсветки полем зрения приемного канала;  $\sigma$  – коэффициент заполнения массива фотодетекторов ФПУ.

Мощность зондирующего лазерного импульса равна

$$P_{\text{и}} = \frac{E_{\text{и}}}{t_{\text{и}}}, \quad (5)$$

где  $E_{\text{и}}$  – энергия зондирующего лазерного импульса.

Коэффициент пропускания атмосферной трассы

$$\tau_{\text{а}} = e^{-\alpha \cdot D}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент ослабления излучения, зависящий от среды и длины волны.

Мощность фоновой засветки определяется выражением [18]

$$P_{\text{фз}} = \frac{\sigma}{m_1 \cdot m_2} \cdot F_{\lambda} \cdot \rho_{\text{п}} \cdot \Omega_{\text{пп}} \cdot \frac{d_{\text{вх}}^2}{4} \cdot \Delta \lambda \cdot \tau_{\text{пр}} \cdot \tau_{\text{а}}, \quad (7)$$

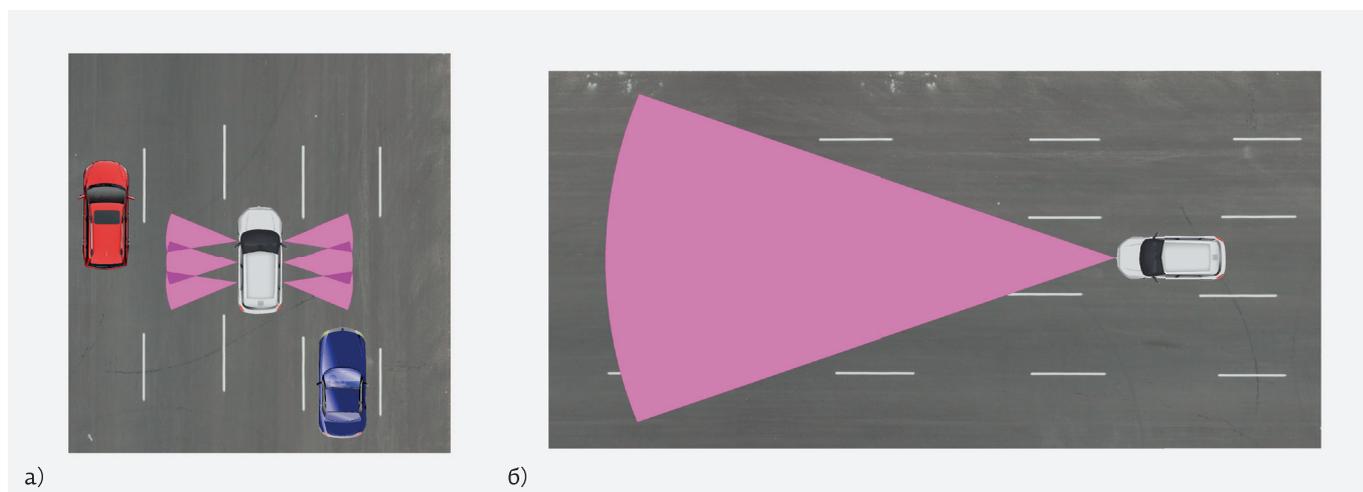
где  $F_{\lambda}$  – спектральная плотность потока энергии излучения Солнца, проходящего через единицу поверхности на уровне Земли;  $\Omega_{\text{пп}}$  – угловое поле зрения отдельного пикселя;  $\Delta \lambda$  – оптическая полоса пропускания светофильтра.

Упрощая выражение (4), получаем

$$n_0 = \frac{\eta \cdot P_{\text{и}} \cdot \tau_{\text{изл}}}{D^2 \cdot F_{\lambda} \cdot \Omega_{\text{пп}} \cdot \Delta \lambda}. \quad (8)$$

Оценку характеристик ЛЛС проведем для максимальной дальности измерений  $D = 100$  м. В качестве источника излучения могут использоваться полупроводниковые лазерные диоды и волоконные лазеры, выпускаемые рядом предприятий в России и Республике Беларусь [13, 19]. Длительность зондирующих импульсов принимается  $t_{\text{и}} = 1$  нс, полоса пропускания светофильтра составляет  $\Delta \lambda = 40$  нм. Для примерной оценки потери в оптических трактах не учитываем, принимаемая  $\tau_{\text{изл}} = 1,0$ ,  $\eta = 1,0$ .

В табл. 2 для двух типов источников излучения и четырех длин волн представлены значения отношения сигнал/шум, обеспечиваемые при использовании лазеров, соответствующих требованиям к изделиям класса 1 (безопасными при предполагаемых условиях эксплуатации) по ГОСТ 315-2012 «Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий», а также потенциальная погрешность измерений дальности. Оценка выполнена с учетом спектральной плотности потока



**Рис. 2.** Бортовые лидары ВАСС двух типов: а – малой дальности с узким полем зрения для контроля за окружающей обстановкой по периметру ВАСС; б – большой дальности с широким полем обзора для оценки обстановки перед ВАСС

солнечной энергии [18], создающего фоновую засветку (случай прямой солнечной засветки не рассматривался<sup>ii</sup>). Потенциальная погрешность определялась без учета составляющих, возникающих при обработке сигнала интегральной схемой ROIC.

Из табл. 2 следует, что полупроводниковые лазерные диоды и кремниевые фотодетекторы подходят для применения в ЛЛС малой дальности (до 100 м) с узким полем обзора, которые могут быть установлены в количестве нескольких штук по периметру ВАСС для контроля за окружающей обстановкой (рис. 2,а). Волоконные лазеры и фотодетекторы на InP/InGaAsP позволяют реализовать ЛЛС большой дальности (300...500 м) с широким

полем обзора, которые могут оценивать обстановку перед ВАСС при его движении по автостраде (рис. 2,б).

\*\*\*

ЛЛС на базе 3D Flash Ladar технологии уже в настоящее время используются для интеллектуальной навигации ВАСС. Актуальной задачей является разработка таких датчиков силами отечественной промышленности.

Было исследовано влияние разных типов источников излучения и фотодетекторов на характеристики бортовых 3D Flash Ladar систем путем расчета в приближении геометрической оптики и согласования полосы пропускания с шириной спектра сигнала.

Полученные оценки дальности и погрешности измерений при наличии фоновой засветки в диапазоне длин волн 0,81...1,56 мкм позволяют сделать следующие выводы:

- кремниевые фотодетекторы могут применяться в ЛЛС малой дальности (до 100 м) с узким полем обзора для контроля за окружающей обстановкой по периметру ВАСС;
- волоконные лазеры и фотодетекторы на InP/InGaAsP позволяют реализовать ЛЛС большой дальности (300...500 м) с широким полем обзора, которые могут отслеживать обстановку на полосе, по которой движется ВАСС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Старовойтов Е.И.** Технология интеллектуальной навигации на основе комплексирования ЛСН проекта «КОНСУЛ» и данных лазерной локации // НАНОИНДУСТРИЯ. 2024. № S10-1 (128). С.31–38. DOI: 10.22184/1993-8578.2024.17.10s.31.38.

<sup>ii</sup> Прямая солнечная засветка является маловероятным событием в плотной городской застройке, для наступления которого необходимо совпадение многих факторов: определенная высота Солнца над горизонтом, отсутствие создающих тень объектов, хорошая погода.

ООО  
СМП

ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН  
[www.SMD.ru](http://www.SMD.ru)

электронные  
для поверхностного  
монтажа

НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК

- Катушки индуктивности на токи до 10 А
- U.FL разъемы и pigtail со SMA

Москва, Ленинградский пр., 80 к. 32; e-mail: sale@smd.ru  
Тел.: (499) 158-7396, (495) 940-6244, (499) 943-8780

2. **Kim K., Im Ju., Jee G.** Tunnel Facility-based Vehicle Localization in Highway Tunnel using 3D LIDAR // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. V. 23. ISS. 10. October 2022. PP. 17575–17583. DOI: 10.1109/TITS.2022.3160235.
3. **Дюкова О.М., Тарасенко М.К., Феоктистов М.В.** Использование беспилотного коммерческого транспорта в логистике // Тенденции развития науки и образования. 2024. № 112-3. С. 36–40. DOI 10.18411/trnio-08-2024-116.
4. **Белоногов А.А., Зыкова В.Ю.** Беспилотные логистические коридоры в России // Логистика – Евразийский мост: Материалы XIX Международной научно-практической конференции. Красноярск. КГАУ. 2024. С. 20–24.
5. **Sánchez Morales D., Thomas P.** Analysis and Calibration of the VLP-16 LiDAR for Automotive Applications. 32<sup>nd</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019). PP. 2611–2621. DOI: 10.33012/2019.17093.
6. **Старовойтов Е.И., Скиба Е.С.** Лазерные локационные системы 3D Flash Ladar для интеллектуальной навигации транспорта // ЭЛЕКТРОНИКА. Наука. Технология. Бизнес. 2024. № 10. С.126–130. DOI: 10.22184/1992-4178.2024.241.10.126.130.
7. **Song H.** Avalanche Photodiode Focal Plane Arrays and Their Application to Laser Detection and Ranging. In: Chee, K., editor. Advances in Photodetectors – Research and Applications [Internet]. London: IntechOpen; 2018. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/63912> doi:10.5772/intechopen.81294.
8. **Бурлаков И.Д., Кузнецов П.А., Мощев И.С., Болтарь К.О., Яковлева Н.И.** Матричный фотоприемный модуль на основе гетероструктуры InGaAs/InP для формирователей 3D-изображений в коротковолновом ИК-диапазоне // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 4. С. 383–392.
9. **Albota M., Aull B., Fouche D., Heinrichs R., Kocher D., Marino R., Mooney J., Newbury N., O'Brien M., Player B., Willard B., Zayhowski J.** Three-Dimensional Imaging Laser Radars with Geiger-Mode Avalanche Photodiode Arrays // Lincoln Laboratory Journal. 2002. V. 13. No. 2. PP. 351–370.
10. **Marino R., Davis W.** Jigsaw: A Foliage-Penetrating 3D Imaging Laser Radar System // Lincoln Laboratory Journal. 2005. V. 15. No. 1. PP.23–36.
11. **Шестаков А.** Активные элементы твердотельных лазеров // Фотоника. 2007. № 5. С. 30–32.
12. **Ивашко А.М.** Твердотельные Yb:YAG микрочип лазеры для систем дистанционного управления движущимися объектами. Дисс. канд. техн. наук. Минск. 2017. 135 с.
13. **Колегов А.А., Черникова А.В., Исаев А.В., Софиенко Г.С., Кулаков Д.В., Галеев А.В.** Оптоволоконные лазерные технологии в РФЯЦ-ВНИИТФ // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. 2019. № 1-1. С. 213–216.
14. **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>.
15. **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.
16. **Финкельштейн М.И.** Основы радиолокации: Учебник для вузов. 2-е изд. М.: Радио и связь, 1983. 536 с.
17. **Малашин М.С., Каминский Р.П., Борисов Ю.Б.** Основы проектирования лазерных локационных систем. М.: Высшая школа, 1983. 208 с.
18. **Козинцев В.И., Белов М.Л., Орлов В.М. и др.** Основы импульсной лазерной локации: Учеб. пособие для вузов / Под ред. В.Н.Рождествина. М. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 576 с.
19. **Воропай Е.С., Ермалицкий Ф.А., Радько А.Е., Самцов М.П.** Пикосекундные лазерные диодные излучатели // Приборы и техника эксперимента. 2021. № 2. С. 155–156. DOI 10.31857/S0032816221020245.

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1300 руб.

## ОСНОВЫ ТЕОРИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ И КОМПЛЕКСОВ

Верба В. С., Татарский Б. Г.

Учебник предназначен для студентов радиотехнических вузов, обучающихся по специальности 11.05.01 – Радиоэлектронные системы и комплексы.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ? ☎ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; ☎ +7 495 956-3346; [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru), [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)М: ТЕХНОСФЕРА, 2024. – 312 с.  
ISBN 978-5-94836-695-1