

Влияние прямой солнечной засветки на 3D Flash Ladar датчики для высокоавтоматизированных транспортных средств

Е. Старовойтов, к. т. н.¹, З. Кондрашов², В. Игнатенко³

УДК 629.056.8 | ВАК 2.2.11

Лазерные локационные системы или лидары на базе 3D Flash Ladar технологии широко используются для навигации высокоавтоматизированных транспортных средств. К актуальным задачам при эксплуатации этих приборов относятся определение их работоспособности в условиях прямой солнечной засветки, оценка снижения пороговой чувствительности и определение необходимого динамического диапазона фотодетекторов.

Лазерные локационные системы (ЛЛС), или лидары (англ. lidar – light detection and ranging), или ладары (англ. ladar – laser detection and ranging) используются в качестве датчиков внешней информации для управления летательными аппаратами, мобильными роботами и высокоавтоматизированными автотранспортными средствами (ВАТС). Перспективу представляет их применение в системах интеллектуальной навигации, а также для комплексирования с абонентскими терминалами локальной системы навигации (ЛСН) «Консул».

В предыдущих работах [1–3] рассматривались требования к бортовым ЛЛС, предназначенным для установки на ВАТС, разные схемы построения аппаратуры, выполнялись оценки дальности и погрешности измерений в условиях фоновой засветки. Оценки влияния на процесс обнаружения объекта внутренних шумов, требуемого динамического диапазона и снижения пороговой чувствительности фотодетектора при работе в условиях прямой солнечной засветки не выполнялись.

В настоящей статье проведена оценка влияния прямой солнечной засветки на фотодетекторы многоэлементного фотоприемного устройства (ФПУ) ЛЛС на базе 3D Flash Ladar технологии.

ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА

В ЛЛС могут применяться фотодетекторы двух типов: с внутренним усилением (лавинные фотодиоды – ЛФД) или без него (pin-фотодиоды или pin-ФД) [4, 5].

Наибольшей чувствительностью и быстродействием в спектральном диапазоне 0,6...1,2 мкм обладает ЛФД, величина его внутреннего усиления около $10^3...10^4$. Динамический диапазон ЛФД составляет около 10^3 .

Фотодетекторы на основе p-n-переходов с большим обедненным слоем без внутреннего усиления называются pin-ФД. Они отличаются быстродействием, высокой температурной стабильностью, меньшей стоимостью и динамическим диапазоном до 10^6 .

Для изготовления ЛФД и pin-ФД может использоваться кремний (длины волн от 0,6 до 0,9 мкм) и структуры InP/InGaAsP (длины волн от 1,0 до 1,6 мкм).

Если вместо ЛФД в качестве фотодетекторов применяются pin-ФД, то отсутствие внутреннего усиления у последних не позволяет обнаруживать слабые эхо-сигналы. В ЛЛС на базе 3D Flash Ladar технологии используются преимущественно массивы ЛФД, работающие в режиме Гейгера (GMAPDs), обладающие чувствительностью к отдельным фотонам.

ЛФД при низком напряжении смещения работает как обычный pin-ФД, а при увеличении напряжения вместе с коэффициентом усиления также растет темновой ток ЛФД. Чрезмерное повышение усиления ограничено наступлением пробоя p-n-перехода.

Кривые чувствительности pin-ФД и ЛФД, изготовленных из кремния и InP/InGaAsP, представлены на рис. 1.

Мощность подсветки от лазерного источника излучения определяется требованиями по дальности измерений

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

² АО «НИИМА «Прогресс», генеральный директор.

³ АО «НИИМА «Прогресс», тестировщик.

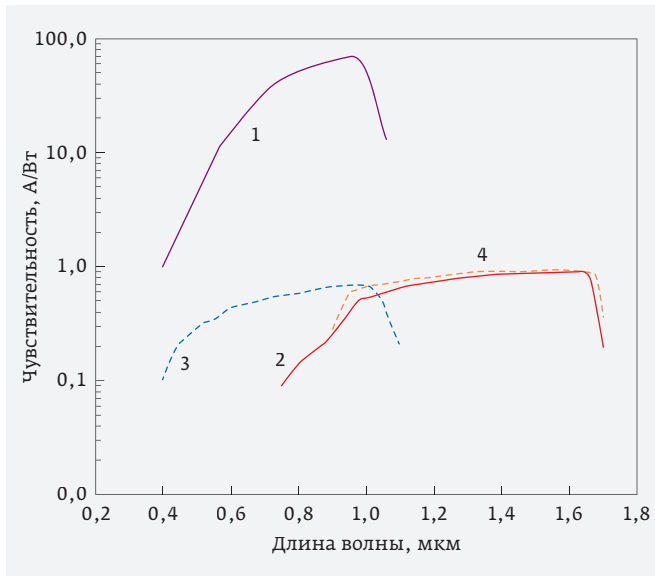


Рис. 1. Кривые чувствительности фотодетекторов разных типов: 1 - кремниевый ЛФД; 2 - ЛФД на базе InP/InGaAsP; 3 - кремниевый pin-ФД; 4 - pin-ФД на базе InP/InGaAsP

и помеховой обстановкой. Самым мощным источником помех в рабочем диапазоне длин волн ЛЛС является Солнце. Спектральная плотность потока солнечной энергии на уровне земли в видимом и ближнем ИК-диапазоне, согласно модели ASTM G173-03 (международный стандарт ISO 9845-1, 1992), показана на рис. 2.

При использовании ЛЛС в промышленности и установке на транспортные средства должны выполняться требования к безопасности зондирующего излучения. Для органов зрения случайных наблюдателей опасность представляют короткие мощные импульсы. Из-за фокусирующего

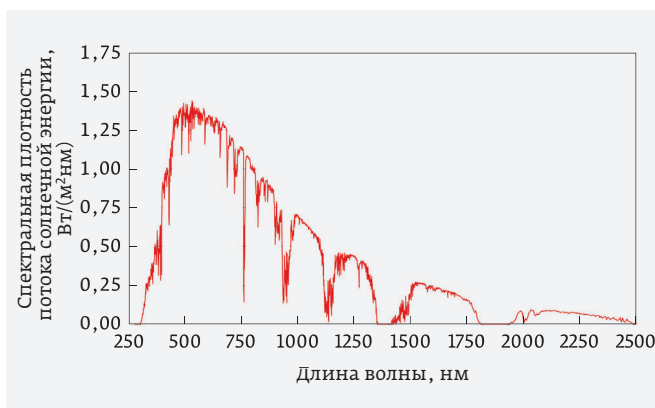


Рис. 2. Спектральная плотность потока солнечной энергии на уровне земли в видимом и ближнем ИК-диапазоне

действия хрусталика излучение собирается на очень малой площади сетчатки, что может вызвать повреждения, приводящие к необратимой потере зрения.

Поэтому при выборе лазерного источника излучения необходимо учитывать спектральные характеристики глаза [6]. На рис. 3 в верхней части показаны спектр пропускания глазных сред, а на рис. 4 – спектр поглощения тканей глазного дна.

Лазерное излучение с длиной волны менее 1,4 мкм наиболее опасно, так как оно не ослабляется оптическими средами глаза. С увеличением длины волны затухание

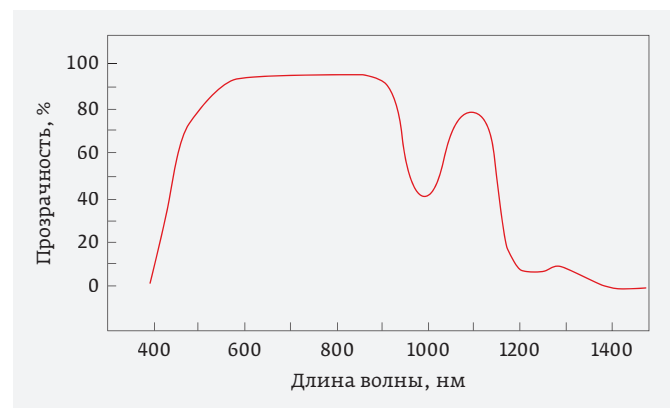


Рис. 3. Спектр пропускания глазных сред [6]

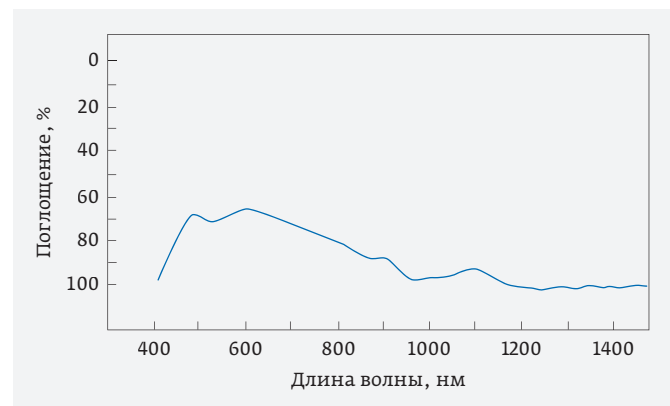


Рис. 4. Спектр поглощения глазного дна [6]

в них возрастает, и импульс уже не достигает поверхности сетчатки, поэтому ЛЛС с рабочей длиной волны более 1,4 мкм считаются безопасными для органов зрения.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПРЯМОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЗАСВЕТКИ

Полный шумовой ток сигнала включает шумовой ток фотодетектора и шумовой ток усилительного каскада [7]:

$$i_{ш} = \sqrt{(i_{шфд}^2 + i_{шув}^2)}, \quad (1)$$

где $i_{шфд}$ – шумовой ток фотодетектора; $i_{шув}$ – шумовой ток усилительного устройства.

Шумовой ток фотодетектора составляет:

$$i_{шфд} = \sqrt{\Delta f \cdot (4kT/R + 2e \cdot M^2 \cdot F \cdot [i_T + S_i \cdot (P_3 + P_c)])}, \quad (2)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; R – сопротивление нагрузки; $e = (-)1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; M – коэффициент внутреннего усиления фотодетектора по току (для ЛФД); $F = M^x$ – коэффициент шума лавинного умножения ($x = 0,3$ для кремния и $x = 0,7$ для InP/InGaAsP); i_T – темновой ток фотодетектора; S_i – токовая чувствительность фотодетектора; P_3 – мощность засветки; P_c – мощность эхо-сигнала.

Полоса пропускания определяется выражением [5, 8]:

$$\Delta f = 0,35/t_n, \quad (3)$$

где t_n – время нарастания импульса.

Входное сопротивление трансимпедансного усилителя рассчитывается по соотношению [5]:

$$R = \frac{1}{2\pi \cdot C \cdot \Delta f}, \quad (4)$$

где C – емкость обратносмещенного перехода фотодетектора.

Мощность прямой солнечной засветки от Солнца отдельного фотодетектора равна

$$P_{сз} = F_\lambda \cdot \xi \cdot S_{вх} \cdot \sigma \cdot \Delta \lambda \cdot \tau_{пр} \cdot \tau_A, \quad (5)$$

где F_λ – спектральная плотность потока энергии излучения Солнца, проходящего через единицу поверхности на уровне Земли; ξ – коэффициент перекрытия диска Солнца полем зрения фотодетектора; $S_{вх}$ – площадь входного зрачка приемной апертуры; σ – коэффициент заполнения массива фотодетекторов ФПУ; $\Delta \lambda$ – оптическая полоса пропускания светофильтра; $\tau_{пр}$ – коэффициент пропускания приемного оптического тракта; τ_A – коэффициент пропускания атмосферной трассы.

Значение коэффициента ξ определяется отношением:

$$\xi = \frac{n}{m_1 \cdot m_2}, \quad (6)$$

где n – количество элементов ФПУ (пикселей), которое занимает изображение солнечного дискаⁱ; m_1, m_2 – количество элементов ФПУ (пикселей) по двум осям.

При этом ЛЛС, установленные на ВАТС, имеют поле зрения по углу места около 30° [2]. В этом случае

максимальная высота Солнца над горизонтом, при которой оно будет попадать в поле зрения ЛЛС, будет не больше 15° (зенитный угол $\theta = 75^\circ$)ⁱⁱ. При оценке необходимо принимать во внимание, что [9]

$$F_\lambda(\theta) = F_\lambda \cdot \cos(\theta). \quad (7)$$

Коэффициент снижения пороговой чувствительности фотодетектора в отсутствие эхо-сигнала ($P_c = 0$) [10] составляет:

$$\zeta = i_{шфд}(0) / i_{шфд}(P_{сз}), \quad (8)$$

где $i_{шфд}(0)$ – ток фотодетектора в отсутствие засветки; где $i_{шфд}(P_{сз})$ – ток фотодетектора при наличии прямой солнечной засветки.

Динамический диапазон фотодетектора можно определить как

$$\Delta_{ФД} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{сз}}{(P_c)_{min}}\right), \quad (9)$$

где $(P_c)_{min}$ – минимальная обнаруживаемая мощность эхо-сигнала.

Величина $(P_c)_{min}$ соответствует значению, при котором происходит превышение заданного отношения сигнал/шум, выбираемого следующим образом.

В процессе обнаружения эхо-сигнала возможно наступление четырех независимых событий с вероятностями

$$p_{по} + p_{пс} = 1, \quad (10)$$

$$p_{пно} + p_{пам} = 1, \quad (11)$$

где $p_{по}$ – вероятность правильного обнаружения; $p_{пс}$ – вероятность пропуска сигнала; $p_{пно}$ – вероятность правильно-го необнаружения; $p_{пам}$ – вероятность ложной тревоги.

В лазерной локации широко используют критерий Неймана – Пирсона [4], согласно которому предварительно выбирается допустимое значение $p_{пам}$, а затем находится решение, соответствующее максимальному значению $p_{по}$ [11].

При высоком уровне световых помех, создаваемых Солнцем, распределение фотоэлектронов подчиняется закону Гаусса [4]. В этом случае [4, 11]:

$$p_{по} = \frac{1}{2} [1 - \Phi(u_0 - q_0)], \quad (12)$$

ⁱ В реальности распределение яркости по пикселям будет неравномерным из-за потемнения диска Солнца к краю.

ⁱⁱ При движении ВАТС на крутых подъемах и спусках в поле зрения ЛЛС может попадать Солнце, с высотой над горизонтом более 15°.

$$p_{ам} = \frac{1}{2} [1 - \Phi(u_0)], \quad (13)$$

где u_0 – относительный порог срабатывания; q_0 – отношение сигнал/шум на выходе согласованного фильтра; Φ – функция Лапласа (интеграл вероятностей):

$$\Phi = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (14)$$

Для надежного обнаружения отношение сигнал/шум часто принимается $q = 7 \dots 10$ [12], так как величине $q = 10$ соответствуют значения $p_{ам} = 10^{-6}$ и $p_{нс} = 10^{-7}$. Такие значения не всегда достижимы на практике, но отношение сигнал/шум не должно быть меньше 3 [13]. Зависимость $p_{но}$ от величины q при разных значениях $p_{ам}$ показана на рис. 5.

Выражение для отношения сигнал/шум имеет вид:

$$q = \frac{S_i \cdot M^2 \cdot P_c}{\sqrt{\Delta f \cdot \left(\left(\frac{4kT}{R} + 2e \cdot M^2 \cdot F \cdot (i_T + S_i \cdot (P_3 + P_c)) \right) + \omega_{шy}^2 \right)}}, \quad (15)$$

где $\omega_{шy} = i_{шy} / \sqrt{\Delta f}$ – шум усилителя.

ЛЛС, установленная на ВАТС, обнаруживает большие объекты, занимающие не менее нескольких пикселей. При прямой солнечной засветке фотодетектора он может обнаруживать только точечный объектⁱⁱⁱ, так как объект больших размеров просто перекроет собой солнечный диск. Таким образом, реальные объекты будут полностью закрывать Солнце, ЛЛС данного типа не предназначены для решения задач обнаружения точечных объектов, а пиксели ФПУ с прямой засветкой от Солнца могут быть алгоритмически исключены при обработке полученного «облака точек».

Поэтому при оценке работы ЛЛС в выражении (15) учитываем только фоновую засветку, создаваемую отраженным от поверхности объекта излучением Солнца

$$P_{Фз} = \frac{\sigma}{m_1 \cdot m_2} \cdot F_{\lambda} \cdot \rho_n \cdot \Omega_{ПП} \cdot \frac{d_{ВХ}^2}{4} \cdot \Delta\lambda \cdot \tau_{ПП} \cdot \tau_A, \quad (16)$$

где $d_{ВХ}$ – диаметр входного зрачка приемного объектива; ρ_n – коэффициент отражения поверхности объекта.

Принимаемая отдельным фотодетектором мощность эхо-сигнала в приближении геометрической оптики определяется основным уравнением лазерной локации [10, 12]:

$$P_c = \frac{\eta \cdot \sigma \cdot P_{и} \cdot d_{ВХ}^2 \cdot \rho_n \cdot \tau_{и} \cdot \tau_{ПП} \cdot \tau_A}{4 \cdot D^2 \cdot m_1 \cdot m_2}, \quad (17)$$

где η – коэффициент перекрытия области подсветки полем зрения приемного канала; $P_{и}$ – мощность зондирующего

лазерного импульса; D – дальность до объекта; $\tau_{и}$ – коэффициент пропускания излучающего оптического тракта.

ОЦЕНОЧНЫЙ РАСЧЕТ

Для оценочного расчета рассматривается неохлаждаемое ФПУ на базе ЛФД или рп-ФД [8, 14, 15], работающее при 20 °С. Для датчиков ВАТС дальность измерений редко превышает 500 м, а в ясную погоду, когда возможна прямая солнечная засветка, потерями излучения на атмосферной трассе такой протяженности можно пренебречь из-за их малой величины ($\tau_A = 1,0$).

Оценка влияния прямой солнечной засветки на работу ЛЛС выполняется с учетом следующих допущений:

- для расчета используются формулы геометрической оптики;
- при оценке прямой солнечной засветки высота Солнца над горизонтом составляет 15°;
- не учитывается потемнение диска Солнца к краю;
- при определении фоновой засветки высота Солнца над горизонтом не учитывается;
- при определении минимальной обнаруживаемой мощности эхо-сигнала засветки не учитываются, а минимальное отношение сигнал/шум принято $q = 3$.

Приняты следующие характеристики ЛЛС: $\eta = 0,8$; $\sigma = 0,9$; $d_{ВХ} = 10$ см; $\tau_{ПП} = \tau_{и} = 0,9$; $\Delta\lambda = 40$ нм; $m_1 = m_2 = 128$. Изображение солнечного диска на матрице фотодетекторов занимает 4 пикселя (соответствует полю зрения одного фотодетектора $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ при поле зрения ЛЛС $32^\circ \times 32^\circ$).

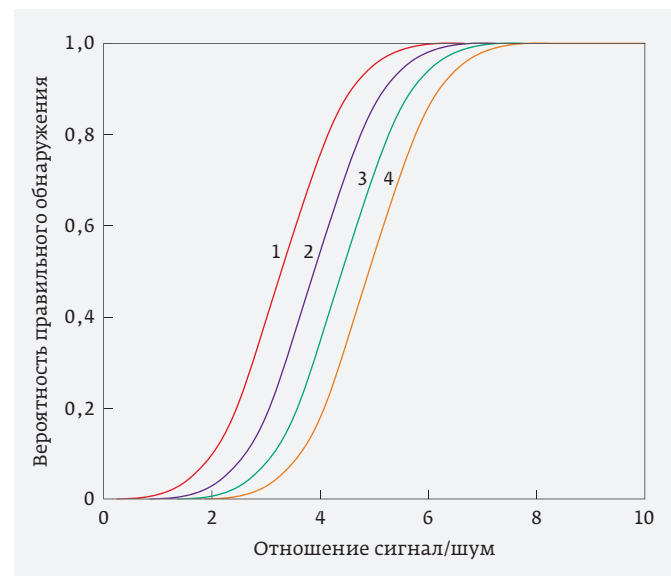


Рис. 5. Зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум при разных значениях вероятности ложной тревоги:

1 – $p_{ам} = 10^{-3}$; 2 – $p_{ам} = 10^{-4}$; 3 – $p_{ам} = 10^{-5}$; 4 – $p_{ам} = 10^{-6}$

ⁱⁱⁱ Точечный объект имеет угловой размер значительно меньше угла расходимости зондирующего пучка и поля зрения фотодетектора.

Таблица 1. Основные характеристики фотодетекторов разных типов, коэффициент снижения их пороговой чувствительности и необходимый динамический диапазон при прямой солнечной засветке в диапазоне длин волн 0,81...1,56 мкм

Материал фотодетектора	Кремний				InP/InGaAsP			
	ЛФД		pin-ФД		ЛФД		pin-ФД	
λ , мкм	0,81	0,91	0,81	0,91	1,06	1,56	1,06	1,56
S_i , А/Вт	50,00	60,00	0,60	0,65	0,50	0,90	0,70	0,90
i_T , нА	1	4	1	1	2	2	10	10
M	100	100	-	-	10	10	-	-
ζ	0,0032	0,0043	0,9839	0,9884	0,3216	0,3371	0,9881	0,9923
$\Delta_{ФД}$, дБ	69,29	67,61	10,37	8,92	27,55	27,08	9,06	7,12
$\Delta_{отн}$	2,31	2,25	0,17	0,15	0,92	0,90	0,15	0,12

Таблица 2. Оценка дальности измерений и отношения сигнал/шум для безопасных значений мощности зондирующего лазерного импульса в диапазоне длин волн 0,81 ... 1,56 мкм

λ , мкм	ЛФД (на основе кремния и InP/InGaAsP)				pin-ФД (на основе InP/InGaAsP)	
	λ , мкм	0,81	0,91	1,06	1,56	1,06
P_u , Вт	20 ¹	20 ¹	6 600 ²	10 000 ³	6 600 ²	10 000 ³
D , м	500	500	100	200	20	20
q	11,67	10,45	10,24	7,04	3,68	7,15

¹ Полупроводниковый лазерный диод (инжекционный лазер) на AlGaAs/GaAs.

² Иттербиевый волоконный лазер.

³ Эрбиевый волоконный лазер.

При $t_u=1,5$ нс время нарастания импульса составит $t_n=0,4$ нс, а полоса пропускания будет равна $\Delta f=875$ МГц, для емкости фотодетектора 1 пФ сопротивление нагрузки составит 181,9 Ом. Шум усилителя равен $\omega_{ш} = 7,5$ пА/ $\sqrt{\text{Гц}}$.

Значения коэффициента снижения пороговой чувствительности и необходимый динамический диапазон для разных типов фотодетекторов и длин волн указаны в табл.1. При оценке динамического диапазона фотодетектора для сравнения ($\Delta_{отн}$) в качестве базы приняты значения 10^3 (30 дБ) для ЛФД и 10^6 (60 дБ) для pin-ФД.

Видно значительное падение пороговой чувствительности и превышение реального динамического диапазона более чем в два раза для ЛФД на длинах волн 0,81 и 0,91 мкм. При этом пороговая чувствительность pin-ФД практически не изменяется во всем рассматриваемом диапазоне длин волн, а фотодетектор не использует полностью свой динамический диапазон.

В табл. 2 для мощностей зондирующего лазерного импульса, не превышающих безопасные значения, установленные ГОСТ 31581-2012 «Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации

лазерных изделий», представлены оценки дальности измерений при фоновой засветке отраженным излучением Солнца и отношения сигнал/шум.

Оценки дальности измерений при фоновой засветке отраженным излучением Солнца ($\rho_n=1,0$) и отношения сигнал/шум для мощностей зондирующего лазерного импульса, не превышающих безопасные значения, установленные ГОСТ 31581-2012 «Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий», представлены в табл. 2.

ЛФД за счет внутреннего усиления обеспечивает обнаружение объекта с $q \sim 7 \dots 11$ во всем диапазоне длин волн на дальностях более 100 м. В то же время pin-ФД позволяет получить надежные измерения без превышения безопасных значений мощности подсветки на дальности до 20 м только на длинах волн 1,06 и 1,56 мкм.

Выполненная оценка для многоэлементного ФПУ ЛЛС на базе 3D Flash Ladar технологии с выбранными параметрами показала следующее:


- Прямая солнечная засветка ЛФД на длинах волн 0,81 и 0,91 мкм приведет к падению пороговой чувствительности на несколько порядков и превышению его динамического диапазона и к высокой вероятности пробоя p-n-перехода.
- Прямая солнечная засветка ЛФД на длинах волн 1,06 и 1,56 мкм не приводит к превышению его динамического диапазона и снижает его пороговую чувствительность в три раза.
- Прямая солнечная засветка pin-ФД не оказывает существенного влияния на его работу.
- ЛФД могут быть использованы в датчиках для обнаружения объектов на дороге перед ВАТС, а pin-ФД на основе InP/InGaAsP – в периферийных датчиках, следящих за обстановкой по периметру ВАТС.

Существующие ограничения ЛФД и pin-ФД подчеркивают необходимость развития и серийного производства фотодетекторов нового поколения [16], не имеющих подобных недостатков.

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.
2. **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.
3. **Старовойтов Е.И., Кондрашов З., Игнатенко В.** Оценка возможностей 3D Flash Ladar технологии для использования в бортовых датчиках высокоавтоматизированных транспортных средств // ЭЛЕКТРОНИКА. Наука. Технология. Бизнес. 2025. № 2. С. 130–135. DOI: 10.22184/1992-4178.2024.241.10.130.135.
4. Основы импульсной лазерной локации: Учебное пособие для вузов / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.М. Орлов и др.; под ред. В.Н. Рождествина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 571 с.
5. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей: учебник для вузов / В.В. Крухмалев, В.Н. Гордиенко, А.Д. Моченов и др. / Под ред. В.Н. Гордиенко и В.В. Крухмалева. М. Горячая линия. 2004. 510 с.
6. **Mainster M.A., Sliney D.H., Belcher C.D. Ш, Buzney S.M.** Laser photodysrupters; damage mechanisms, instrument design and safety // Ophthalmology. 1983. Vol. 90. PP. 973-991.
7. **Мельников К.В.** Оптимизация фотоприемного устройства лазерной телеметрической системы // Доклады БГУИР. 2012. № 7 (69). С. 34–39.
8. **Eun-Gyu Lee, Jae-Eun Lee, Han-Woong Choi, Kyeong-Hyeok Lee, Bang Chul Jung, Choul-Young Kim.** Low-power CMOS Frontend ROIC using Inverter feedback RGC TIA for 3-D Flash LADAR Sensor. Journal of Semiconductor Technology and Science, vol.18, 2018, no.1, February, pp.57-64. <https://doi.org/10.5573/JSTS.2018.18.1.057>.
9. **Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К.** Солнечная энергетика: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Электроэнергетика» / Под ред. В. И. Виссарионов. М.: МЭИ, 2008. 276 с.
10. **Рудь Е.Л.** Импульсные высотометры на основе твердотельных и полупроводниковых лазеров для контроля окружающей среды и характеристик объектов подстилающей поверхности: Дисс. канд. техн. наук. Казань. 2009. 152 с.
11. **Финкельштейн М.И.** Основы радиолокации: Учебник для вузов. 2-е изд. М.: Радио и связь, 1983. 536 с.
12. **Назаров В.Н., Балашов И.Ф.** Энергетическая оценка импульсных лазерных дальномеров. Режим доступа: http://de.ifmo.ru/bk_netra/start.php?bn=27 (дата обращения 2.10.2021).
13. **Ставров А.А., Поздняков М.Г.** Импульсные лазерные дальнометры для оптико-локационных систем // Доклады БГУИР. 2003. Т.1. № 2. С. 59–65.
14. **Joо 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. **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.
16. Фотодетектор. <https://www.dephan.com/photodetector>.

ООО
СМП






ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН

www.SMD.ru

электронные
**для поверхностного
 монтажа**

НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК

- Разборные металлические EMI SMD экраны
- Кварцевые генераторы 0532 на частоты до 125 МГц

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