

Радиостроение

Научно-практический журнал

<http://www.radiovega.su>

Ссылка на статью:

// Радиостроение. 2019. № 01. С. 1–18

DOI: [10.24108/rdeng.0119.0000144](https://doi.org/10.24108/rdeng.0119.0000144)

Представлена в редакцию: 27.12.2018

© НП «НЕИКОН»

УДК 629.7.051.53:629.7.058.43:629.7.058.45

Метод снижения потерь при обнаружении динамического точечного объекта лазерной локационной системой с линейкой фотодетекторов

Старовойтов Е.И.^{1,*}, Юрчик И.А.¹

[*evgstarovojtov@yandex.ru](mailto:evgstarovojtov@yandex.ru)

¹АО "Концерн радиостроения "Вега", Москва, Россия

Разработан метод снижения потерь при обнаружении динамического точечного объекта лазерной локационной системой с многоэлементным фотоприемным устройством. Основой данного метода является дефокусировка изображения точечного объекта в плоскости фотоприемного устройства. Результат заключается в улучшении характеристик лазерной локационной системы: снижении потерь энергии эхо-сигнала, снижении погрешностей измерения дальности до динамического объекта и его скорости. Разработанный метод может быть использован при разработке бортовых лазерных локационных систем для различных летательных аппаратов.

Ключевые слова: лазерная локационная система, линейка фотодетекторов, точечный объект, обнаружение, дефокусировка, дифракция

Введение

Лазерная локация широко используется для определения координат, измерения скоростей и распознавания объектов, движущихся в атмосфере и в космическом пространстве, а также обеспечения безопасности маловысотных полетов летательных аппаратов [1–9]. Лазерные локационные системы (ЛЛС) превосходят радиотехнические системы по угловому разрешению (что позволяет обнаруживать малоразмерные объекты), но требуют больше времени на поиск и обнаружение объекта без дополнительного целеуказания.

ЛЛС традиционного типа для обнаружения объекта в широком угловом поле выполняют продолжительное сканирование узким зондирующим пучком, совмещенным с полем зрения приемного канала.

Для измерений на малых дальностях (сотни метров) применяется 3D Flash Ladar технология. В таких ЛЛС используется широкая диаграмма зондирующего излучения, полностью перекрывающая поле обзора, и фотоприемное устройство (ФПУ) на базе матрицы фотодетекторов для измерения дальностей до разных участков поверхности объекта без использования сканирования.

Основное преимущество 3D Flash Ladar-систем состоит в том, что один зондирующий импульс позволяет сразу получить трехмерное изображение объекта. Однако эта технология неэффективна для поиска объекта на средних и больших дальностях в полях обзора более нескольких градусов.

Были разработаны бортовые ЛЛС гибридного типа, использующие т.н. «ножевую» диаграмму зондирующего излучения, и многоэлементное ФПУ на базе линейки фотодетекторов. Обнаружение удаленных объектов (угловой размер которых меньше разрешающей способности ЛЛС – т.н. «точечных» объектов) может выполняться путем разворота носителя или одномерного сканирования с использованием ФПУ на базе линейки фотодетекторов, на полный просмотр поля обзора потребуется время от 0,1 до 25,0 с [4,5].

В настоящий момент времени не исследована проблема ослабления эхо-сигнала от точечного объекта из-за геометрических потерь, обусловленных дискретностью линейки фотодетекторов, и методов компенсации ухудшающихся при этом характеристик ЛЛС.

Цель данной статьи состоит в разработке метода снижения потерь при обнаружении динамического объекта ЛЛС с линейкой фотодетекторов.

1. Детектирование эхо-сигнала и обнаружение объекта

В связи с наличием в оптическом диапазоне мощного источника помех (прямых и фоновых засветок) – Солнца, отношение сигнал/шум выбирается как можно большим. В бортовых ЛЛС космического базирования принимается $q \sim 10$, что соответствует значениям $p_{лт} = 10^{-6}$ и $p_{нс} = 10^{-6}$ [4]. В зависимости от конкретных типов ЛЛС и ее носителя эти величины могут иметь другие значения.

Отношение сигнал/шум представляет собой отношение тока сигнала к шумовому току фотодетектора

$$q = \frac{i_c}{i_{ш}}, \quad (1)$$

где i_c – ток сигнала; $i_{ш}$ – шумовой ток.

Полный шумовой ток включает шумовой ток фотодетектора и шумовой ток усилительного каскада [10]

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

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

Для приема сигналов в ЛЛС преимущественно используются ФПУ на основе лавинных фотодиодов (ЛФД) – фотодетекторов с внутренним усилением, позволяющих детектировать слабые эхо-сигналы. Также используются ФПУ на базе pin-фотодиодов (pin-ФД).

Шумовой ток фотодетектора определяется выражением [11]

$$i_{шфд} = \sqrt{\Delta f \cdot \left(\frac{4kT}{R} + 2e \cdot M^2 \cdot F \cdot (i_T + S_i \cdot P_{фз}) \right)}, \quad (3)$$

где Δf – ширина полосы пропускания; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ 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 (для ЛФД); x – показатель шума избыточного лавинного умножения (для ЛФД); i_T – темновой ток фотодетектора; S_i – токовая чувствительность фотодетектора; $P_{\phi z}$ – мощность фоновой засветки.

Ширина полосы пропускания и сопротивление нагрузки определяются как

$$\Delta f = \frac{2}{t_u}, \quad (4)$$

$$R = \frac{1}{2C \cdot \Delta f}, \quad (5)$$

где t_u – длительность импульса излучения; C – емкость перехода фотодетектора.

Таким образом, выражение (1) принимает вид

$$q = \frac{S_i \cdot M \cdot P_c}{\sqrt{\Delta f \cdot \left(\left(\frac{4kT}{R} + 2e \cdot M^2 \cdot F \cdot (i_T + S_i \cdot (P_{\phi z} + P_c)) \right) + i_{uy}''^2 \right)}}, \quad (6)$$

где P_c – мощность принятого эхо-сигнала; i_{uy}'' – шум усилителя.

С использованием выражения (6) можно определить величину P_{cq} , соответствующую заданному значению q . Эти величины могут быть использованы в качестве исходных данных для оценки характеристик ЛЛС.

Пороговая энергия сигнала, регистрируемая ФПУ равна

$$E_{nop} = P_{cq} \cdot t_u. \quad (7)$$

Измеряемая ЛЛС дальность до точечного объекта с диффузно отражающей поверхностью в приближении геометрической оптики определяется выражением [4,11]

$$D = \sqrt[4]{\frac{E_l \cdot S_{ob} \cdot d_{np}^2 \cdot \rho_{ob} \cdot \tau_{nep} \cdot \tau_{np} \cdot \tau_a^2}{\pi \cdot \theta_1 \cdot \theta_2 \cdot N \cdot E_{nop}}}, \quad (8)$$

где E_l – энергия импульса лазерного источника; S_{ob} – отражающая площадь объекта; θ_1, θ_2 – углы расходимости зондирующего пучка в двух перпендикулярных плоскостях; d_{np} – диаметр приемного объектива; ρ_{ob} – коэффициент отражения поверхности объекта; N – количество фотодетекторов в ФПУ; τ_{nep} – коэффициент пропускания передающего оптического тракта; τ_{np} – коэффициент пропускания приемного оптического тракта; τ_a – коэффициент пропускания атмосферы.

Из выражения (8) следует, что каждому значению q соответствует своя максимальная дальность обнаружения D_{max} . Тогда

$$\frac{q_1}{q_2} = \left(\frac{D_{max2}}{D_{max1}} \right)^4. \quad (9)$$

При отслеживании динамических объектов особое значение имеют величины погрешностей измерений скорости, на которые оказывает влияние величина q .

В отличие от радиотехнических систем, в бортовых ЛЛС затруднено применение эффекта Доплера для измерения скорости сближения с динамическим объектом [4].

В ЛЛС измерение радиальной скорости технически реализуется на основе конечно-разностного (дифференциального) метода по двум измерениям дальности

$$v = \frac{D_1 - D_2}{\Delta t}, \quad (10)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1, \quad (11)$$

где D_1, D_2 – измеренные значения дальности в моменты времени t_1, t_2 .

Для измерения дальностей свыше 200 м используется преимущественно времяпролетный метод, основанный на измерении времени прохождения зондирующего импульса t_u до объекта и обратно

$$D = \frac{c \cdot t_u}{2}, \quad (12)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

Из радиотехники известны соотношения, позволяющие оценить погрешности измерений при моноимпульсном зондировании [4,12].

Погрешность определения момента прихода отраженного сигнала определяется выражением

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{t_u}{\Delta f \cdot q}}, \quad (13)$$

откуда погрешность определения дальности

$$\sigma_D = \frac{c}{2} \cdot \frac{1}{\Delta f \cdot \sqrt{q}}, \quad (14)$$

и пропорциональная ей погрешность измерения скорости

$$\sigma_v = \frac{\sqrt{2} \cdot \sigma_D}{\Delta t^2}. \quad (15)$$

2. Анализ распределения энергии в изображении точечного объекта на многоэлементном ФПУ с учетом дифракции

Современные технологии изготовления многоэлементных ФПУ позволяют получить размер одного фотодетектора (пикселя) менее 25×25 мкм с коэффициентом заполнения около 50 % [13]. В этом масштабе уже будут проявляться дифракционные свойства изображения точечного источника.

Для минимизации потерь при приеме эхо-сигнала должно соблюдаться условие

$$2,44 \frac{\lambda \cdot f}{d_{np}} \leq L, \quad (16)$$

где λ – длина волны излучения; L – линейный размер пикселя; f – фокусное расстояние приемного объектива.

При выполнении условия (16) центральный диск Эйри (содержащий 83,78 % энергии сфокусированного пучка излучения) не выходит за геометрические пределы отдельного пикселя ФПУ.

В выражении (8) не учитываются потери, обусловленные «каналом» между пикселями многоэлементного ФПУ («мертвой зоной»).

Если центр изображения точечного источника попадает в «мертвую зону», то в этом случае теряется часть энергии эхо-сигнала. В зависимости от взаимного положения изображения точечного объекта и «мертвой зоны» между пикселями будет изменяться величина потерь энергии эхо-сигнала (см. рис. 1).

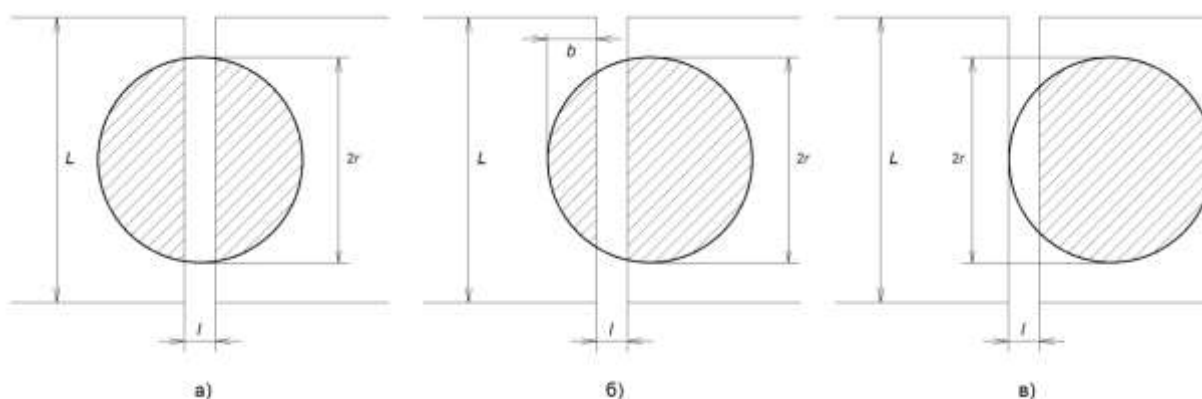


Рис. 1. Геометрические потери в многоэлементном ФПУ при смещении центра изображения точечного объекта относительно «мертвой зоны» («канала») между пикселями: L – линейный размер пикселя; l – ширина «канала» между пикселями; r – линейный радиус изображения точечного источника; b – высота малого сегмента окружности, отсекаемого «каналом»

Если центр изображения попадает прямо в середину «мертвой зоны» между пикселями (см. рис. 1а), то можно допустить, что энергия равномерно распределена между ними, а коэффициент геометрических потерь в изображении будет определяться следующим очевидным соотношением

$$\varphi(r) = \frac{2 \cdot \arccos\left(\frac{l}{2r}\right) - \sin\left(2 \cdot \arccos\left(\frac{l}{2r}\right)\right)}{\pi}, \quad (17)$$

где l – ширина «канала» между пикселями; r – линейный радиус изображения точечного источника ($2r < L$).

При смещении центра изображения точечного объекта относительно «мертвой зоны» (см. рис. 1б) коэффициент геометрических потерь примет вид

$$\varphi(r) = \frac{\pi - \frac{1}{2} \cdot \left(2 \cdot \arccos\left(\frac{x}{r}\right) - \sin\left(2 \cdot \arccos\left(\frac{x}{r}\right)\right) + 2 \cdot \arccos\left(\frac{x'}{r}\right) - \sin\left(2 \cdot \arccos\left(\frac{x'}{r}\right)\right) \right)}{\pi}, \quad (18)$$

$$x = r - b - l, \quad (19)$$

$$x' = r - b, \quad (20)$$

где b – высота малого сегмента окружности, отсекаемого «каналом» (см. рис. 1б).

В случае расположения «мертвой зоны» на краю изображения (см. рис. 1в), коэффициент геометрических потерь составит

$$\varphi(r) = \frac{\pi - \frac{1}{2} \cdot \left(2 \cdot \arccos\left(\frac{x''}{r}\right) - \sin\left(2 \cdot \arccos\left(\frac{x''}{r}\right)\right) \right)}{\pi}, \quad (21)$$

$$x'' = r - l. \quad (22)$$

При смещении центра изображения точечного объекта в «мертвую зону» будет падать отношение q , что приведет, согласно выражению (9), к снижению D_{\max} . Таким образом, на предельных дальностях измерений угловое смещение объекта может привести к потере эхо-сигнала.

Необходимо отметить, что «канал» между пикселями нельзя делать слишком узким, так как при небольших размерах фотодетекторов это приведет к «растеканию» сигнала между ними.

Для снижения потерь при обнаружении и уменьшения погрешностей измерений дальности и скорости, предлагается использовать дефокусировку изображения точечного объекта в плоскости ФПУ.

Дефокусировка изображения точечного объекта применяется для повышения пороговой чувствительности при гетеродинном приеме в когерентных доплеровских ЛЛС с многоэлементным ФПУ [14]. Широко используется дефокусировка изображений звезд в звездных датчиках для повышения достоверности обнаружения астроориентиров и точности определения их угловых координат [15,16].

Распределение энергии в кружке рассеяния, формируемом приемным объективом, определяется функцией рассеяния точки (ФРТ). Для идеальной оптической системы, в которой отсутствуют искажения, рассеяние определяется только дифракцией. Наблюдаемая дифракционная картина изменяется при дефокусировке [17,18].

ФРТ сфокусированного изображения в идеальной оптической системе

$$h_{\lambda}(r') = \frac{\pi^2 \cdot d_{np}^4}{4 \cdot \lambda^2 \cdot f^2} \cdot \left(2 \frac{J_1 \cdot (r')}{r'} \right)^2, \quad (23)$$

где $J_1(r')$ – функция Бесселя первого порядка первого рода; r' – нормированный радиус, равный

$$r' = \frac{\pi \cdot d_{np} \cdot r}{\lambda \cdot f}. \quad (24)$$

Величина дефокусировки изображения точечного объекта определяется выражением

$$p = \frac{\pi \cdot d_{np}^2 \cdot z'}{2 \cdot \lambda \cdot f^2}, \quad (25)$$

где z' – продольное линейное смещение плоскости изображения.

При величине z' , равной

$$z' = 8 \cdot k \cdot \lambda \cdot \left(\frac{f}{d_{np}} \right)^2, \quad (26)$$

где k – целое число, центральный максимум обращается в нуль: изображение точечного объекта принимает вид яркого кольца (или нескольких колец при $k > 1$) с размытыми краями и темной точкой в центре – «провалом».

Если «провал» попадает на «мертвую зону» между пикселями многоэлементного ФПУ, то это позволит компенсировать падение отношения q . При этом подразумевается, что размеры дефокусированного изображения точечного объекта не превышают двух пикселей.

При наличии дефокусировки и выполнения условия $r'/p > 1$ (т.е. внутри светового конуса – прямого пучка света), ФРТ описывается выражением

$$h_\lambda(p, r') = \frac{\pi^2 \cdot d_{np}^4}{4 \cdot \lambda^2 \cdot f^2} \cdot \frac{1}{p^2} \cdot [U_1^2(p, r') + U_2^2(p, r')], \quad (27)$$

где $U_1(p, r')$, $U_2(p, r')$ – функции Ломмеля.

Плотность энергии в дифракционном изображении характеризуется функцией концентрации энергии (ФКЭ)

$$L(r') = \iint_{2r'} h_\lambda(r'_x, r'_y) dr'_x dr'_y, \quad (28)$$

где r'_x , r'_y – координаты в плоскости ФПУ относительно центра изображения точечного объекта.

Относительная концентрация энергии в дифракционном изображении с радиусом r' определяется выражением

$$L'_\lambda = \frac{\iint h_\lambda(r'_x, r'_y) dr'_x dr'_y}{\iint_{\infty} h_\lambda(r'_x, r'_y) dr'_x dr'_y}. \quad (29)$$

На рис. 2 и рис. 3 схематично представлены ФРТ изображений точечного объекта с центром в «мертвой зоне» между пикселями многоэлементного ФПУ. На рис. 2 показана ФРТ сфокусированного изображения, а на рис. 3 – ФРТ изображения при его дефокусировке

$p = 4\lambda$.

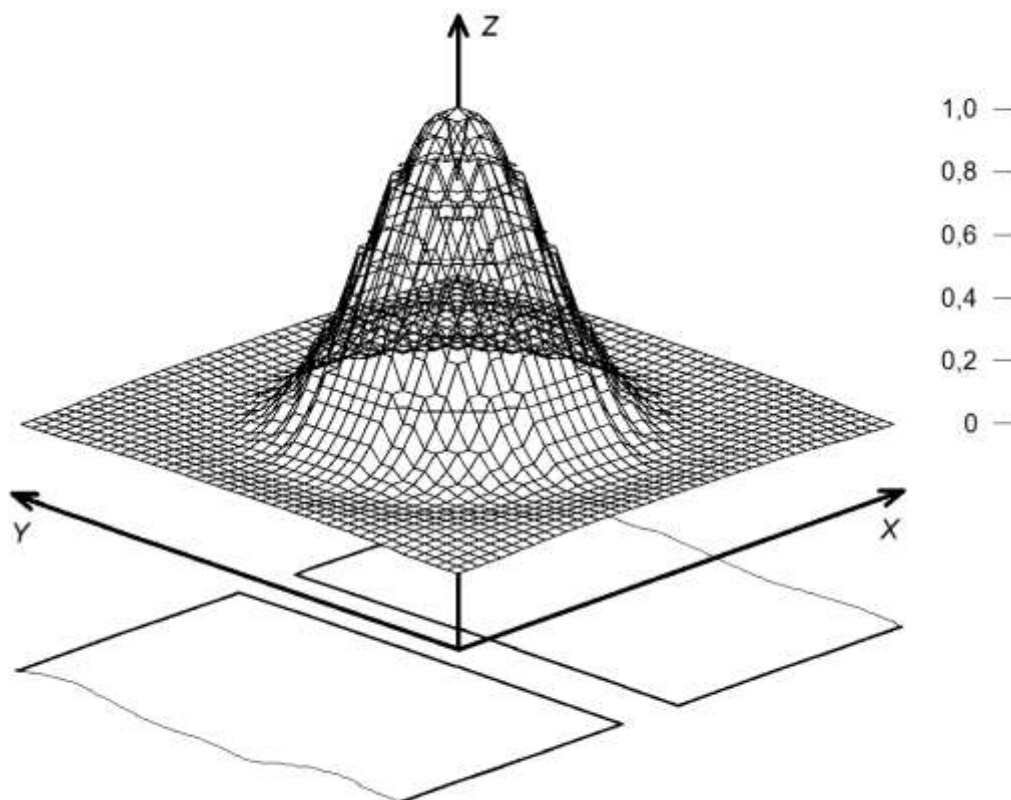


Рис. 2. ФРТ сфокусированного изображения с центром в «мертвой зоне» между двумя пикселями многоэлементного ФПУ

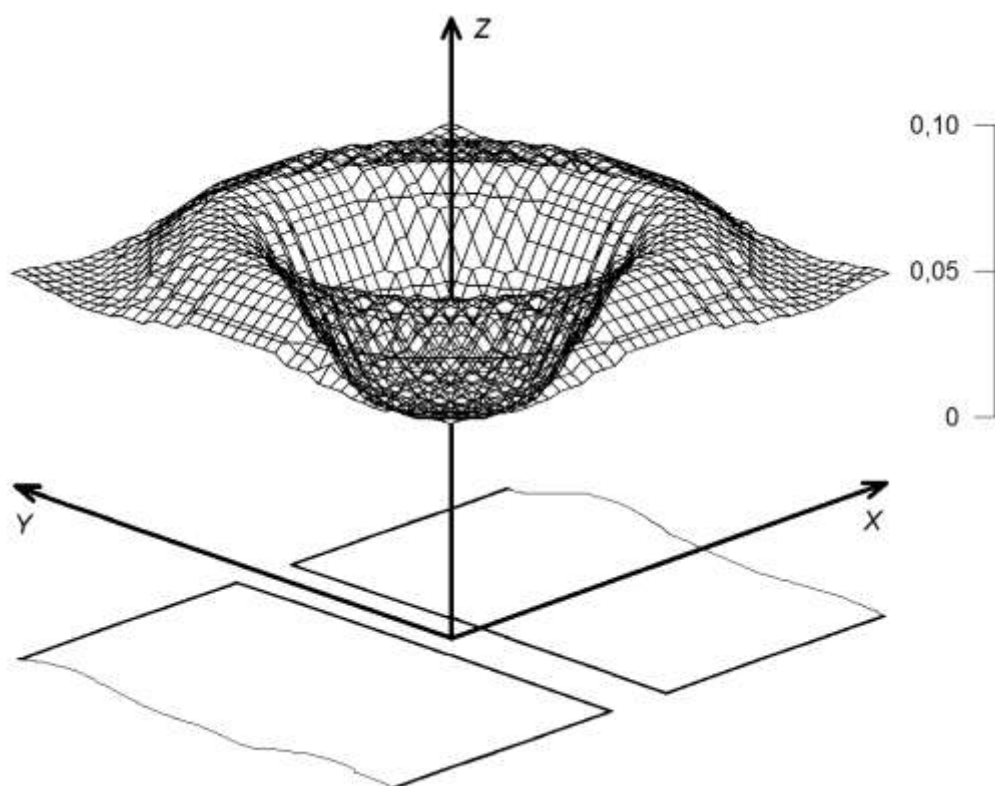


Рис. 3. ФРТ при дефокусировке $p = 4\pi$ с центром в «мертвой зоне» между двумя пикселями многоэлементного ФПУ

3. Влияние дефокусировки изображения точечного объекта на характеристики ЛЛС

Введем следующие величины:

- полная энергия E в сфокусированном изображении точечного объекта, которое удовлетворяет условию (16);

- энергия E' в изображении точечного объекта с учетом потерь в «мертвой зоне» между пикселями.

Отношение E'/E позволяет оценить энергетику эхо-сигнала при наличии «мертвой зоны». Так как $E' = E \cdot \varphi(r)$, то $E'/E = \varphi(r)$.

На рис. 4 представлена зависимость E'/E от ширины «канала» между двумя пикселями в единицах r' . Изображение точечного объекта сфокусированное, центр ФРТ находится в «мертвой зоне» – середине «канала» между пикселями.

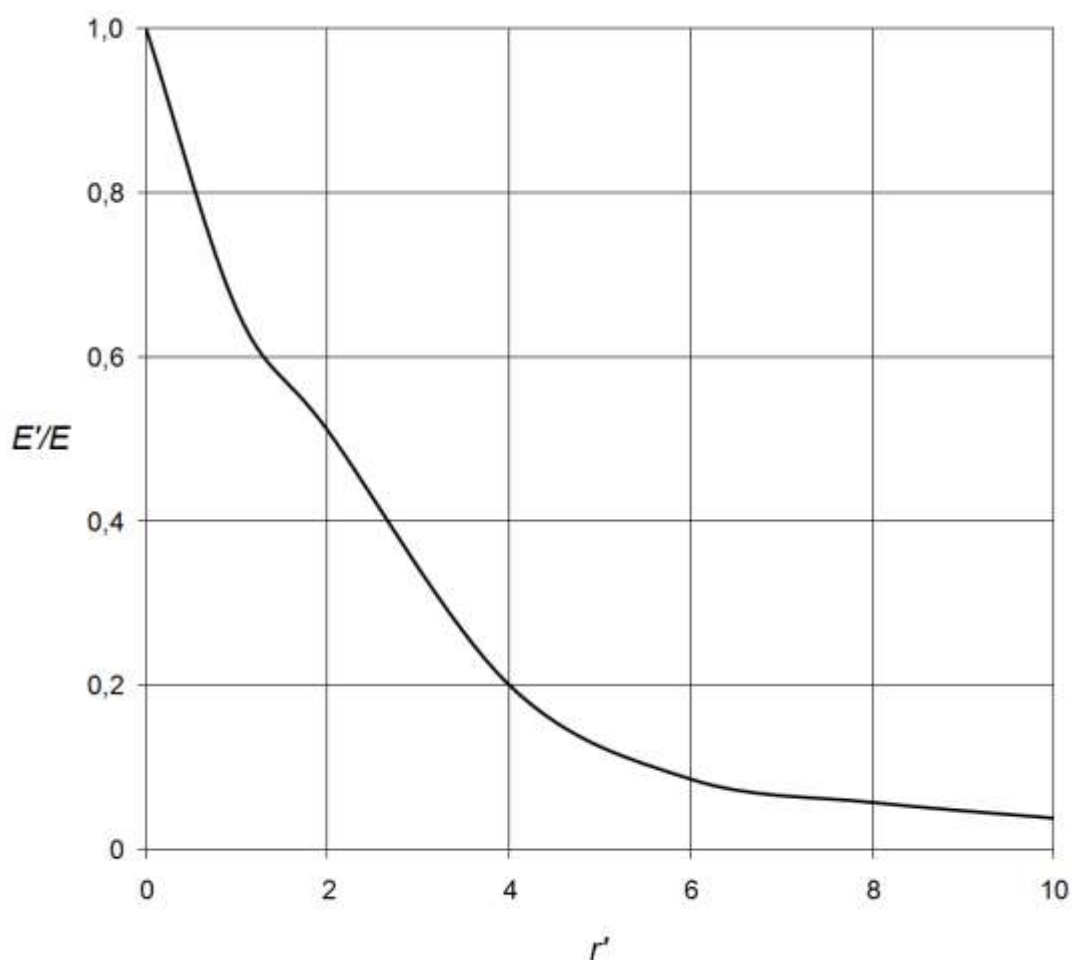


Рис. 4. Зависимость E'/E от ширины «канала» между двумя пикселями для сфокусированного изображения точечного объекта с центром в «мертвой зоне»

Если принять, что размеры пикселя соответствуют условию (16), т.е. не менее $7,6 \cdot r' \times 7,6 \cdot r'$, то при коэффициенте заполнения 50 % ширина «канала» между двумя пикселями составит около $r' = 6$. Это значение примем для дальнейших оценок.

На рис. 5 представлена зависимость E'/E от смещения (в единицах r') центра ФРТ относительно «канала» между пикселями – «мертвой зоны».

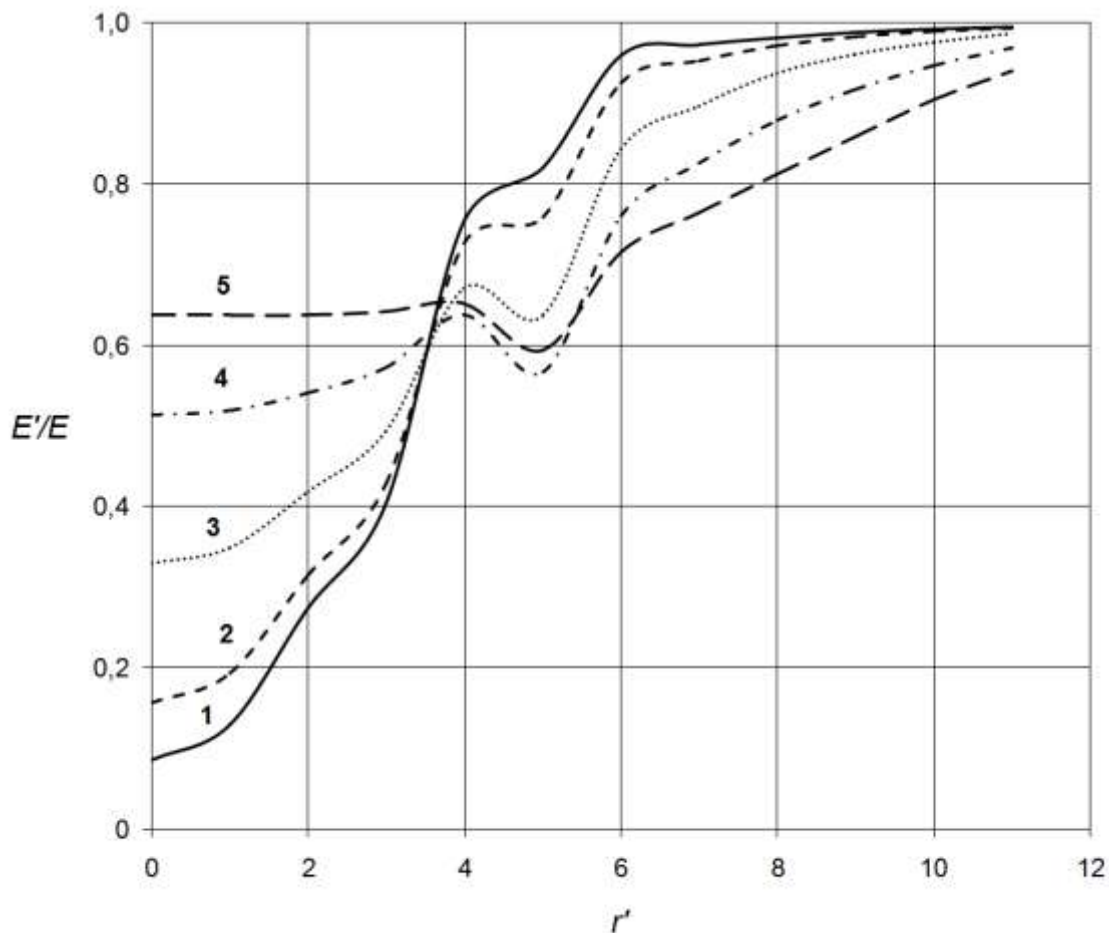


Рис. 5. Зависимость E'/E от смещения центра ФРТ относительно «мертвой зоны»: 1 – $p = 0$; 2 – $p = \pi$; 3 – $p = 2\pi$; 4 – $p = 3\pi$; 5 – $p = 4\pi$

Как видно из рис. 5, дефокусировка изображения точечного объекта компенсирует потери энергии эхо-сигнала, даже если центр ФРТ находится в середине «мертвой зоны». Максимальная компенсация и наибольшая стабильность отношения E'/E при смещении центра ФРТ относительно «мертвой зоны» наблюдаются при дефокусировке $p = 4\pi$.

Для выполнения оценки снижения максимальной дальности измерений по аналогии введем отношение D_{\max}'/D_{\max} .

При попадании сфокусированного изображения точечного объекта в «мертвую зону» между двумя пикселями

$$D_{\max}'/D_{\max} = 0,46,$$

и при наличии дефокусировки $p = 4\pi$

$$D_{\max}'/D_{\max} = 0,72.$$

Таким образом, при сфокусированном изображении падение максимальной дальности обнаружения ЛЛС из-за «мертвую зоны» может достигать 54 %, а в случае дефокусировки падение D_{\max} составляет 28 %.

Компенсировать снижение D_{\max} возможно еще один путем. В случае одновременной и равномерной засветки двух пикселей может применяться алгоритм обнаружения эхо-сигнала, обеспечивающий сохранение требуемых значений вероятностей ложной тревоги $p_{лт}$ и правильного обнаружения $p_{но}$ при снижении отношения q' для отдельных пикселей.

Если изначально были заданы значения $p_{лт} = 10^{-6}$ и $p_{нс} = 10^{-6}$ (соответствующие $q = 10$), то при засветке двух соседних пикселей решение об обнаружении принимается только в случае приема эхо-сигнала с обоих пикселей. Тогда $p_{лт}$ и $p_{нс}$ для отдельного пикселя составят

$$p'_{лт} = \sqrt{p_{лт}}, \quad (30)$$

$$p'_{нс} = p_{нс}. \quad (31)$$

В табл. 1 представлены оценки снижения максимальной дальности измерений ЛЛС при попадании изображения точечного объекта в «мертвую зону» между двумя пикселями многоэлементного ФПУ – линейки фотодетекторов, при отсутствии и наличии дефокусировки $p = 4\pi$. Оценки выполнены для разных значений $p_{лт}$ и $p_{нс}$ с использованием описанного алгоритма обнаружения эхо-сигнала.

Таблица 1. Оценки снижения максимальной дальности измерений ЛЛС при отсутствии и наличии дефокусировки

$p_{лт}$	$p_{нс}$	q	q'	D'/D	
				$p = 0$	$p = 4\pi$
10^{-6}	10^{-6}	10,0	8,2	0,48	0,76
10^{-4}	10^{-2}	6,1	4,6	0,49	0,77
10^{-3}	0,10	4,5	3,1	0,50	0,79

Из табл. 1 следует, что совместное использование дефокусировки изображения $p = 4\pi$ и описанного алгоритма позволяет дополнительно компенсировать падение максимальной дальности измерений ЛЛС и снизить вероятность потери эхо-сигнала от точечного объекта при его угловом смещении.

Уменьшение отношения q кроме снижения D_{\max} , согласно выражениям (14) и (15), также приводит к росту погрешности измерений дальности до точечного объекта σ_D и, соответственно, погрешности определения его скорости σ_v .

Зависимость погрешности измерений дальности σ_D от отношения q сильнее проявляется при использовании ФПУ на базе pin-ФД [12].

Далее выполним оценку влияния дефокусировки изображения точечного объекта на σ_D в диапазоне дальностей 500...3000 м для ЛЛС с «ножевой» диаграммой зондирующего излучения и многоэлементным ФПУ на базе линейки фотодетекторов двух типов.

Исходные данные для расчета: $E_n = 25$ мДж; $\theta_1 = 128$ мрад, $\theta_2 = 1$ мрад; $d_{np} = 15$ см; $\tau_{nep} = \tau_{np} = 0,8$; $S_{об} = 0,78$ м²; $\rho_{об} = 0,9$; $N = 128$; $t_u = 7$ нс. Принимается, что величины $P_{фз}$ и τ_a не оказывают существенного влияния на мощность эхо-сигнала. Абсолютная температура равна $T = 293$ К, шум усилителя составляет $i''_{шy} = 2$ пА/Гц^{1/2}. Многоэлементные ФПУ изготовлены на основе ЛФД ($i_T = 2,2$ нА; $S_i = 7,2$ А/Вт; $C = 0,23$ пФ; $M = 10$; $M^x = 5,5$) и pin-ФД ($i_T = 120$ нА; $S_i = 0,85$ А/Вт; $C = 270$ пФ) [12].

На рис. 6 показаны зависимости σ_D от отношения q в диапазоне дальностей 500...3000 м для двух положений центра ФРТ относительно «мертвой зоны».

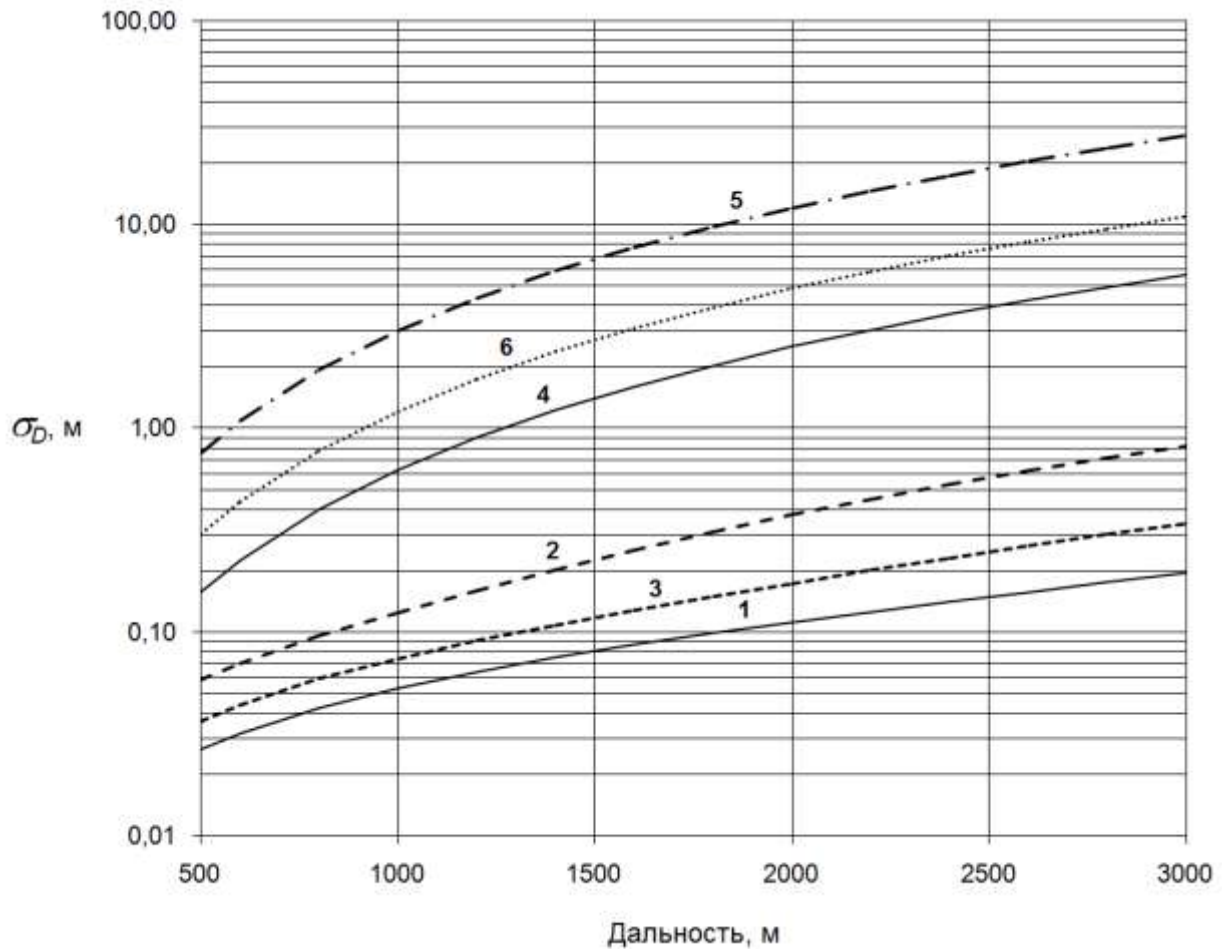


Рис. 6. Зависимости σ_D от отношения q для двух типов ФПУ; линейка ЛФД: 1 – эхо-сигнал без потерь; 2 – центр сфокусированного изображения в «мертвой зоне»; 3 – центр изображения в «мертвой зоне», дефокусировка $p = 4\pi$; линейка pin-ФД: 4 – эхо-сигнал без потерь; 5 – центр сфокусированного изображения в «мертвой зоне»; 6 – центр изображения в «мертвой зоне», дефокусировка $p = 4\pi$

Оценки показывают, что для ФПУ на базе линейки ЛФД погрешность измерения дальности σ_D во всех случаях не превышает 1 м. Из-за внутреннего усиления фотодетекторов рост σ_D в «мертвой зоне» и ее компенсация дефокусировкой различаются в пределах рассматриваемого диапазона дальностей. При попадании центра ФРТ сфокусированного изображения в «мертвую зону» между двумя пикселями, на дальности $D = 1000$ м погрешность σ_D увеличивается в 2,4 раза, а на дальности $D = 3000$ м – в 4,2 раза. При дефо-

кусировке изображения $p = 4\pi$ возрастание σ_D на этих дальностях не превышает 1,4 и 1,7 раза соответственно.

Для ФПУ на базе линейки рпн-ФД величина σ_D может достигать 50 м. При попадании центра изображения в «мертвую зону» σ_D возрастает в 4,8 раза во всем диапазоне дальностей, в случае дефокусировки изображения σ_D возрастает не более чем в 1,9 раз.

Таким образом, дефокусировка изображения точечного источника на величину $p = 4\pi$ позволяет сдерживать рост погрешности измерения дальности σ_D до 1,9 раз при попадании центра ФРТ в «мертвую зону» между двумя пикселями линейек фотодетекторов обоих типов.

Заключение

Разработан метод снижения потерь при обнаружении динамического точечного объекта ЛЛС с многоэлементным ФПУ (линейкой фотодетекторов). Основой данного метода является дефокусировка изображения точечного объекта в плоскости ФПУ.

Для многоэлементного ФПУ с коэффициентом заполнения 50 % выполнены оценки падения отношения сигнал/шум, снижения максимальной дальности измерений ЛЛС, возрастания погрешностей измерений дальности и скорости при попадании изображения точечного объекта в «мертвую зону» между двумя пикселями.

Были получены следующие результаты:

1. Попадание центра сфокусированного изображения точечного объекта в «мертвую зону» между двумя пикселями ФПУ сопровождается падением максимальной дальности измерений на 54 %, а при дефокусировке $p = 4\pi$ падение не превышает 28 %;

2. При совместном использовании дефокусировки изображения $p = 4\pi$ и предложенного алгоритма обнаружения эхо-сигнала, принимаемого двумя соседними пикселями, падение максимальной дальности измерений ЛЛС не превышает 21...24 %;

3. Попадание центра сфокусированного изображения точечного объекта в «мертвую зону» между двумя пикселями ФПУ на базе линейек рпн-ФД и ЛФД вызывает увеличение погрешности измерения дальности в 4,8 раза (в диапазоне дальностей 500...3000 м), а при дефокусировке изображения $p = 4\pi$ погрешность возрастает не более чем в 1,9 раза.

Практическая значимость представленных результатов состоит в улучшении характеристик ЛЛС при работе по динамическим точечным объектам.

Предложенный метод может быть использован при разработке бортовых ЛЛС, выполняющих обнаружение точечных объектов путем разворота носителя или осуществляющих одномерное сканирование с использованием многоэлементного ФПУ на базе линейки фотодетекторов.

Список литературы

1. Бельский А. Оптико-электронные и лазерные системы в современных и перспективных комплексах бортового оборудования вертолетов // Фотоника. 2012. № 6 (36). С. 26–31.
2. Федоров О.В. Функциональное построение оптико-локационной системы летного контроля с полупроводниковыми лазерами // XII Всеросс. совещание по проблемам управления: ВСПУ-2014 (Москва, Россия, 16-19 июля 2014 г.): Тр. М.: Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 7076–7080.
3. Ивойлов Е.В., Слободян С.М., Цупин А.А., Деева В.С. Моделирование мехатронно управляемой динамической платформы с лазерной системой наведения для задач ориентирования и встреч космических аппаратов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016. Т. 3. № 4. С. 80–88.
4. Старовойтов Е.И. Бортовые лазерные локационные системы космических аппаратов: учеб. пособие. Королев: ОАО «РКК «Энергия», 2015. 160 с.
5. 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.
6. Липанов С.И. Применение адаптивной развертки в лазерно-локационно-тепловизионной системе при маловысотном полете // Изв. Тульского гос. ун-та. Техн. науки. 2018. № 5. С. 139–151.
7. Trickey E., Church P., Xiaoying Cao. Characterization of the OPAL obscurant penetrating LiDAR in various degraded visual environments // Proc. of the Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). 2013. Vol. 8737. 9 p. DOI: [10.1117/12.2015259](https://doi.org/10.1117/12.2015259)
8. Бельский А., Жосан Н., Гребенщиков В., Каргаев А., Брондз Д., Горбачев К., Воробьев Д. Лазерные локационные системы для повышения безопасности полетов вертолетов // Фотоника. 2013. № 5 (41). С. 66–75.
9. Дановский В.Н., Ким В.Я., Лисицын В.М., Обросов К.В., Тихонова С.В. Сравнение возможностей радиолокации и лазерной локации как методов информационного обеспечения безопасности маловысотного полета // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2007. № 4. С. 153–165.
10. Мельников К.В. Оптимизация фотоприемного устройства лазерной телеметрической системы // Докл. Белорус. гос. ун-та информатики и радиоэлектроники (БГУИР). 2012. № 7 (69). С. 34–39.
11. Малашин М.С., Каминский Р.П., Борисов Ю.Б. Основы проектирования лазерных локационных систем: учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1983. 207 с.
12. Старовойтов Е.И. Лазерная локационная аппаратура в системах управления, межбортовой передачи энергии и информации космических аппаратов: учеб. пособие. Королев: ОАО «РКК «Энергия», 2016. 147 с.

13. Near infrared MPPC[®] (Multi-Pixel Photon Counter). S13720 series. Режим доступа: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13720_series_kapd1060e.pdf (дата обращения 16.02.2019).
14. Меньших О.Ф. Способ лазерного гетеродинного приема излучений: пат. № 2349930 Российская Федерация. 2009. Бюл. № 8. 7 с.
15. Федосеев В.И., Колосов М.П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов: учеб. пособие. М.: Логос, 2007. 247 с.
16. Прохоров М.Е., Захаров А.И., Тучин М.С. Расчет оптимальных характеристик оптической системы и матричного приемника излучения звездного датчика ориентации по его тактико-техническим характеристикам // Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов: 3-я Всерос. науч.-техн. конф. (Таруса, Россия, 10-13 сент. 2012 г.): Тр. М.: ИКИ РАН, 2013. С. 80–89.
17. Борн М., Вольф Э. Основы оптики: пер. с англ. 2-е изд. М.: Наука, 1973. 719 с. [Born M., Wolf E. Principles of optics. 2nd ed. N.Y.: McMillan, 1964. 808 p.].
18. Михельсон Н.Н. Оптические телескопы: Теория и конструкция. М.: Наука, 1976. 510 с.

Loss-reducing Method in Detecting Dynamic Point Object by a Laser Ranging System Based on a Line of Photo-detectors

E.I. Starovoytov^{1,*}, I.A. Yurchik¹

[*evgstarovojtov@yandex.ru](mailto:evgstarovojtov@yandex.ru)

¹Radio Engineering Corporation "Vega", Moscow, Russia

Keywords: laser ranging system, line of photo-detectors, point object, detecting, defocusing, diffraction

Laser detection and ranging is widely used to locate, measure speeds and detect the objects moving in the atmosphere and in space, as well as to ensure the safety of low-altitude aircrafts.

A serious problem is to reduce time for finding and detection of a long-ranged object in the wide field angle, simultaneously decreasing the energy losses in the laser ranging system.

So far, the hybrid on-board laser ranging systems have been developed. They use the “knife” type pattern of sounding radiation and multi-element photo-detectors. With using this technology, the viewing time of the search area does not exceed 30 s.

The paper presents a method to reduce losses when a laser ranging system, based on the line of photo-detectors, detects a dynamic point object. Defocusing of the point object image in the plane of the photo-detector device lies at the core of this method.

The theoretical principles of radars, optics, and optoelectronics were used as the base to develop the method.

Additionally, an algorithm for detecting the echo-signal received by two adjacent pixels to ensure the required detection characteristics when reducing the signal-to-noise ratio is proposed.

When an image of the point object enters the “channel” between two pixels of a multi-element photo-detector, the maximum range measured by the laser ranging system is reduced, and the range measurement error increases.

The point object image defocusing to 4π in combination with the proposed algorithm reduce the maximum measurement range of the laser ranging system to 21 ... 24%. The defocusing also enables us to reduce the increase in error of the measurement range to 1.9 times in the range of 500 ... 3000 m. Two types of photo-detectors, namely avalanche photodiodes and pin-photodiodes have been estimated.

The practical implication consists in improving characteristics of laser ranging systems when dealing with dynamic point objects.

The developed method can be used to create various laser ranging systems.

References

1. Belskiy A. Electrooptical and laser systems in helicopter's current and advanced onboard equipment complexes. *Fotonika* [Photonics], 2012, no. 6 (36), pp. 26–31 (in Russian).
2. Fedorov O.V. Funktsional'noe postroenie optiko-lokatsionnoj sistemy letnogo kontrolya s poluprovodnikovymi lazerami [Functional design of the optical-location system of flight control with semiconductor lasers]. *XII Vserossijskoe soveshchanie po problemam upravleniya: VSPU-2014* [XII All-Russian conf. on problems of control systems: VSPU-2014 (Moscow, Russia, July 16-19, 2014)]: Proc. Moscow: V.A. Trapeznikov Inst. of control sciences of RAS Publ., 2014. Pp. 7076–7080 (in Russian).
3. Ivoylov E.V., Slobodyan S.M., Tsupin A.A., Deeva V.S. Simulation of the mechatronic dynamic platform equipped with laser navigation system to operate the spacecrafts. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy* [Rocket-Space Device Engineering and Information Systems], 2016, vol. 3, no. 4, pp. 80–88 (in Russian).
4. Starovojtov E.I. *Bortovye lazernye lokatsionnye sistemy kosmicheskikh apparatov* [The onboard laser radar systems of spacecraft]: a textbook. Korolev: OAO «RKK «Energia» Publ., 2015. 160 p. (in Russian).
5. Gryaznov N.A., Kuprenyuk V.I., Sosnov E.N. Laser information system for spacecraft rendezvous and docking. *J. of Optical Technology*, 2015, vol. 82, no. 5, pp. 286–290.
DOI: [10.1364/JOT.82.000286](https://doi.org/10.1364/JOT.82.000286)
6. Lipanov S.I. Adaptive scanning application for laser-location-thermal system at low-altitude flight. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proc. of the Tula State Univ. (TSU). Technical sciences], 2018, no. 5, pp. 139–151 (in Russian).
7. Trickey E., Church P., Xiaoying Cao. Characterization of the OPAL obscurant penetrating LiDAR in various degraded visual environments. *Proc. of the Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 2013, vol. 8737. 9 p. DOI: [10.1117/12.2015259](https://doi.org/10.1117/12.2015259)
8. Belskiy A., Zhosan N., Grebenshikov V., Kargaev A., Brondz D., Gorbachev K., Vorobiev D. Laser locators for helicopter flight safety improvement. *Fotonika* [Photonics], 2013, no. 5 (41), pp. 66–75 (in Russian).
9. Danovskii V.N., Kim V.Ya., Lisitsyn V.M., Obrosov K.V., Tikhonova S.V. Information support of low-altitude flight safety. *J. of Computer and Systems Sciences Intern.*, 2007, vol. 46, no 4. pp. 651–662. DOI: [10.1134/S1064230707040168](https://doi.org/10.1134/S1064230707040168)
10. Mel'nikov K.V. Optimization of a laser telemetric system photoreceiving module. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki* [Doklady BGUIR], 2012, no. 7 (69), pp. 34–39 (in Russian).
11. Malashin M.S., Kaminskij R.P., Borisov Yu.B. *Osnovy proektirovaniia lazernykh lokatsionnykh sistem* [Bases of designing of laser location systems]: a textbook. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1983. 207 p. (in Russian).

12. Starovojtov E.I. *Lazernaia lokatsionnaia apparatura v sistemakh upravleniia, mezhbortovoj peredachi energii i informatsii kosmicheskikh apparatov* [Laser ranging equipment in control systems, energy and information's transmission systems between spacecraft]: a textbook. Korolev: OAO «RKK «Energiia» Publ., 2016. 147 p. (in Russian).
13. Near infrared MPPC[®] (Multi-Pixel Photon Counter). S13720 series. Available at: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13720_series_kapd1060e.pdf, accessed 16.02.2019.
14. Men'shikh O.F. *Sposob lazernogo geterodinnogo priema izluchenij* [Laser heterodyne radiation reception method]. Patent RF, no. 2349930. 2009. 7 p. (in Russian).
15. Fedoseev V.I., Kolosov M.P. *Optiko-elektronnye pribory orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov* [Optoelectronic devices of orientation and navigation of spacecrafts]: a textbook. Moscow: Logos Publ., 2007. 247 p. (in Russian).
16. Prokhorov M.E., Zakharov A.I., Tuchin M.S. Raschet optimal'nykh kharakteristik opticheskoi sistemy i matrichnogo priemnika izlucheniia zvezdnogo datchika orientatsii po ego taktiko-tekhnikeskim kharakteristikam [Optimum characteristics of the star tracker optical system and matrix photosensor]. *Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov: 3-ia Vserossijskaya nauchno-tekhnikeskaja konferentsiia* [Contemporary problems of spacecraft attitude determination and control: 3rd All-Russian scientific and technical conf. (Tarusa, Russia, Sept. 10-13, 2012)]: Proc. Moscow: IKI RAN Publ., 2013. Pp. 80–89 (in Russian).
17. Born M., Wolf E. *Principles of optics*. 2nd ed. N.Y.: McMillan, 1964. 808 p. (Russ. ed.: Born M., Wolf E. *Osnovy optiki*. 2th ed. Moscow: Nauka Publ., 1973. 719 p.).
18. Mikhel'son N.N. *Opticheskie teleskopy: Teoriia i konstruktsiia* [Optical telescopes: Theory and construction]. Moscow: Nauka Publ., 1976. 510 p. (in Russian).