

УДК 621.391.63;535.361

**МЕТОД ЛАЗЕРНО-ЛОКАЦИОННОГО ПОЛУЧЕНИЯ 3D ПОРТРЕТОВ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ С КВАЗИНУЛЕВЫМ ОПТИЧЕСКИМ КОНТРАСТОМ ПОВЕРХНОСТИ****Иванов В. И.***НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Рассмотрен метод лазерно-локационного получения рельефометрических сигнатур высокодинамичных малоразмерных объектов с квазиулевым оптическим контрастом поверхности. Метод позволяет существенно уменьшить число вычислительных операций, упростить программное обеспечение и юстировку и тем самым повысить быстродействие и надежность функционирования флэш-лидара.

**Ключевые слова:** флэш-лидар, распознавание объектов с квазиулевым оптическим контрастом/

**METHOD OF LASER-LOCATION OBTAINING 3D PORTRAITS OF SMALL-SIZE OBJECTS WITH QUASI-ZERO OPTICAL SURFACE CONTRAST****Ivanov V.***Institute for nuclear problems of BSU  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** The paper considers a method of laser-location obtaining relief-metric signatures of highly dynamic small-sized objects with quasi-zero optical contrast of the surface. The method allows to significantly reduce the number of computational operations, simplify the software and adjustment and thereby increase the speed and reliability of the flash lidar

**Keywords:** flash lidar, recognition of objects with quasi-zero optical contrast.

*Адрес для переписки: Иванов В. И., ул. Бобруйская 11, г. Минск 220030, Республика Беларусь  
e-mail: ivanov.inp@gmail.com*

Достоверность дистанционного обнаружения и распознавания объектов во многом определяется оптическим (яркостным) контрастом поверхности объекта

$$\Delta K = K_1 - K_2, \quad (1)$$

где  $K_1$  – коэффициента отражения поверхности объекта или элемента поверхности;  $K_2$  – коэффициент отражения некоторой фоновой поверхности или соседнего элемента поверхности.

На практике для определения контраста  $\delta_k$ , используются относительные величины, например, в виде отношений [1]

$$|\delta_k| = (K_i - K_j)/K_j = \pm \Delta K / K_j, \quad (2)$$

$$|\delta_k| = \pm \Delta K / \bar{K}; \quad (3)$$

где  $\bar{K}$  – среднее значение коэффициента отражения.

Величина  $\Delta K$  определяет разность отраженных сигналов

$$\Delta V = P \Delta K, \quad (4)$$

где  $P$  – мощность лазерного излучения, падающего на поверхность объекта.

Из (4) следует, что при  $\Delta K \rightarrow 0$ , для любых значений мощности  $P$ ,  $\Delta V \rightarrow 0$ , т. е. обнаружение и различение объектов с квазиулевым контрастом  $\delta_k$ , т. е. с контрастом менее некоторого порогового (шумового) контраста  $\delta_k \leq \delta_{kp}$ , по отраженной мощности зондирующего излучения практически невозможно [1, 2]. Искусственное

снижение оптического контраста объектов является эффективным приемом их маскировки. Однако сохраняющиеся при этом объемность, форма и рельеф поверхности объекта  $S$  являются существенными демаскирующими признаками. В этой связи получение информации о рельефометрической сигнатуре поверхности объекта (3D портретов) объектов  $\xi_i(S)$  (где  $\xi_i$  – глубина рельефа поверхности  $S$  в  $i$ -той точке) является доминирующим фактором повышения эффективности обнаружения и распознавания объектов с квазиулевым контрастом, в частности, с использованием лидарных систем типа (Flash-LIDAR) [3–5],

Применение флэш-лидаров на базе многопиксельных матричных фотодетекторов с интегрированными процессорами многоканальных времяпролетных измерений обеспечивает высокое быстродействие получения рельефометрических сигнатур объекта  $\xi_i(S)$  одновременно на большом множестве  $N$  точек поверхности без оптико-механического сканирования.

Предлагаемый метод определения рельефометрических сигнатур  $\xi_i(S)$  слабоконтрастных объектов основан на получении и обработке только одного а не двух [3–5] 2D распределений энергии отраженного лазерного излучения.

По выходному сигналу точечного фотодетектора с калиброванной чувствительностью определяется интегральное значение энергии отраженного поля

$$B_0(S) = |E_i(S)|^2 \int_{t_1}^{t_1 + 2\tau_p} f^2(t - \tau_p) dt = |E_k(S)|^2, \quad (5)$$

где  $t_1$  – момент начала прихода отраженного сигнала по отношению к моменту излучения лазерного импульса  $t_0$ ;  $\tau_p$  – длительность излучаемого импульса

$$\tau_p \geq 2\xi_{max}/C, \quad (6)$$

где  $\xi_{max}$  – максимальная глубина рельефа поверхности заданного класса объектов;  $C$  – скорость света.

$B_0(S)$  представляет собой сумму энергий всех  $N$  парциальных пучков  $B_{0i} = P_i K_i F_p \tau_p$ , отраженных от  $N$  элементарных площадок  $\Delta S_i$  поверхности  $S$

$$B_0(S) = \sum_{i=1}^n B_{0i} = F_p \tau_p \sum_{i=1}^n P_i K_i. \quad (7)$$

При равномерном распределении мощности зондирующего лазерного излучения по поверхности  $S$  среднее значение энергии парциального пучка определяется уравнением

$$\bar{B}_0 = B_0(S)/n = P_1 F_p \tau_p \sum_{i=1}^n K_i/n = P_1 F_p \tau_p \bar{K}, \quad (8)$$

Получаемое аналогично [5] 2D распределение отраженного излучения  $B_1(S)$  имеет вид

$$\begin{aligned} B_1(S) &= |E_i(S)|^2 \int_{t_1}^{t_1+\tau_p} f^2(t - \tau_i) dt = \\ &= |E_i(S)|^2 (\tau_p - \tau_i); \end{aligned} \quad (9)$$

Поэлементное отношение энергий 2D распределения  $B_1(S)$  к  $\bar{B}_0$  (8), равно

$$B_{1i}/\bar{B}_0 = (\tau_p - \tau_i) K_i / \tau_p \bar{K} = (\tau_p - \tau_i) k_i / \tau_p, \quad (10)$$

где

$$k_i = K_i / \bar{K}. \quad (11)$$

В соответствии с (9) при  $k_i = 1$  истинные значения  $\tau_i$ ,  $\xi_i$  определяются уравнениями

$$\tau_i = \tau_p (1 - B_{1i}/\bar{B}_0), \quad (12)$$

$$\xi_i = 0,5 C \tau_i = 0,5 C \tau_p (1 - B_{1i}/\bar{B}_0). \quad (13)$$

Однако отношение  $B_{1i}/\bar{B}_0$  (10), зависит от отражательных характеристик объекта (коэффициент  $k_i$ ), значение которого в большинстве случаев, неизвестно. Следовательно получаемые оценки  $\tau'_i$ ,  $\xi'_i$  отличаются от истинных значений  $\tau_i$ ,  $\xi_i$  (12), (13)

$$\tau'_i = \tau_p (1 - B_{1i}/\bar{B}_0 k_i) = \tau_p [1 - B_{1i}/\bar{B}_0 (1 \pm \delta_{ki})], \quad (14)$$

$$\xi'_i = 0,5 C \tau_p \tau'_i, \quad (15)$$

где

$$k_i = K_i / \bar{K} = (\bar{K} \pm \Delta K_i) / \bar{K} = 1 \pm \delta_{ki}, \quad (16)$$

$\delta_{ki}$  – оптический контраст поверхности (3).

Абсолютное значение методической погрешности времени запаздывания  $i$ -того парциального пучка  $\Delta\tau_i$ , а соответственно  $\Delta\xi_i$ , определяются уравнениями

$$|\Delta\tau_i| = \tau'_i - \tau_i = \tau_p [(B_{1i}/\bar{B}_0) (\pm \delta_{ki} / (1 \pm \delta_{ki}))], \quad (17)$$

$$|\Delta\xi_i| = 0,5 C \tau_p |\Delta\tau_i| = (0,5 C \tau_p - \xi_i) (\pm \delta_{ki} / (1 \pm \delta_{ki})). \quad (18)$$

Согласно (18) погрешность определения глубины рельефа  $\Delta\xi_i$  возрастает с увеличением оптического контраста поверхности объекта (степени неоднородности коэффициента отражения поверхности);  $\Delta\xi_i = 0$  при  $\delta_{ki} = 0$ .

Учитывая статистический характер флуктуаций коэффициента отражения поверхности в пределах  $\pm \Delta K_i$  относительно среднего значения  $\bar{K}$ , коэффициенты отражения  $K_i$  элементарных площадок  $\Delta S_i$  поверхности  $S$  можно представить независимыми случайными величинами с равномерным законом распределения в диапазоне  $\Delta K = 2\Delta K = K_{max} - K_{min}$ ;  $\bar{K} = 0,5(K_{min} + K_{max})$ . Среднеквадратичное отклонение (СКО) коэффициента отражения  $\sigma_k$  определяется в этом случае уравнением

$$\sigma_k = \Delta K / \sqrt{12}. \quad (19)$$

На основании (19) СКО оптического контраста (3) запишем в виде

$$\sigma_{\delta_k} = \sigma_k / \bar{K} = \delta_k / \sqrt{12}. \quad (20)$$

С учетом (20) среднеквадратичное значение методической погрешности оценки глубины рельефа, согласно уравнению (18), определяется уравнением

$$\sigma_{\xi_i} = (0,5 \tau_p C - \xi_i) (\delta_{ki} / (\delta_{ki} + \sqrt{12})). \quad (20)$$

Для объектов с квазиулевым оптическим контрастом

$$\delta_k \leq \delta_{kp} = 0,02, \quad (21)$$

где  $\delta_{kp} = 0,02$  – пороговый контраст (2 %) зрительного различения деталей объекта [1, 2].

С учетом (21) для объектов с квазиулевым контрастом  $\sigma_{\xi_i}$  определяется величиной

$$\sigma_{\xi_i} \leq (0,5 \tau_p C - \xi_i) 0,00574. \quad (22)$$

При высоком оптическом контрасте, например  $\delta_{ki} = 0,1$  (10%),  $\sigma_{\xi_i} \leq (0,5 \tau_p C - \xi_i) 0,028$ . Согласно (22) погрешность  $\sigma_{\xi_i}$  пропорционально возрастает с увеличением оптического контраста  $\delta_k$  и линейно уменьшается с увеличением глубины рельефа  $\xi$ . При этом погрешность  $\sigma_{\xi_i}$  тем меньше, чем меньше оптический контраст поверхности объекта  $\delta_k$ . Для большинства объектов с квазиулевым оптическим контрастом  $\delta_k \leq 0,02$  данной погрешностью можно пренебречь. Так, например, при  $\delta_k \approx 0,02$  и диапазоне глубины рельефа от 1 до 300 см  $\sigma_{\xi_i}$  изменяется от 1,7 см до 0,05 мм.

Предложенный метод наряду с обеспечением высокой точности определения рельефометрических сигнатур слабоконтрастных объектов позволяет существенно уменьшить число вычислительных операций, упростить программное обес-

печение и юстировку и тем самым повысить быстродействие и надежность функционирования флэш-лидара.

#### Литература

1. Zege, E. P. Image Transfer through a Scattering Medium / E. P. Zege, F. P. Ivanov, I. L. Katsev. – Verlag, Berlin, 1991.

2. Ivanov, V. I. Method creasing the efficiency of laser active-pulsed vision systems for obyects wich quasi-zero optical contrast / V. I. Ivanov, N. I. Ivanov // J. Appl. Spectr. – 2022. – V. 89 (6).

3. Time of Flight Cameras: Principles, Methods, and Applications / M. Hansard [et al.]. – Springer, 2012.

4. Ivanov, V. I. Methodology and algorithms for obtaining long-range 3D portraits of objects based on 2D intensity distributions of truncated realizations of reflected laser radiation / V.I. Ivanov // Computer Optics. – 2024. – V. 48, № 3. – P. 386–396.

5. Иванов, В. И. Метод увеличения дальности действия флэш – лидара на основе матричного фотодетектора с накоплением зарядов пикселов / В. И. Иванов // В настоящем сборнике.

УДК 621.391.63;535.361

### МЕТОД УВЕЛИЧЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ФЛЭШ-ЛИДАРА НА ОСНОВЕ МАТРИЧНОГО ФОТОДЕТЕКТОРА С НАКОПЛЕНИЕМ ЗАРЯДА ПИКСЕЛОВ

Иванов В. И.

*НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Рассмотрен метод увеличения дальности флэш-лидара для определения рельефометрических сигнатур дальностных объектов, позволяющий существенно повысить коэффициент эффективности использования зондирующего лазерного излучения и тем самым в десятки и сотни раз увеличить их дальность действия по сравнению с флэш-лидарами на основе ToF технологии «Range gated imagers».

**Ключевые слова:** флэш-лидар, рельефометрическая сигнатура, дальность.

### METHOD FOR INCREASING THE RANGE OF FLASH LIDAR BASED ON A MATRIX PHOTO DETECTOR WITH PIXEL CHARGE ACCUMULATION

Ivanov V.

*Institute for nuclear problems of BSU  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** The article considers a method for increasing the range of a flash lidar for determining relief-metric signatures of long-range objects, which allows to significantly increase the efficiency coefficient of using probing laser radiation and thereby increase their range by tens and hundreds of times compared to flash lidars based on ToF technology “Range gated imagers”.

**Keywords:** flash lidar, relief-metric signature, range.

*Адрес для переписки: Иванов В. И., ул. Бобруйская 11, г. Минск 220030, Республика Беларусь  
e-mail: ivanov.inp@gmail.com*

Обеспечение высокой вероятности правильного обнаружения и распознавания высокочастотных слабоконтрастных объектов во многих случаях требует получения рельефометрических сигнатур (3D портретов) объектов  $\xi_i(S)$  (где  $\xi_i$  – глубина рельефа поверхности  $S$  в  $i$ -той точке) лазерно-локационными методами [1, 2]. Необходимое при этом высокое быстродействие и широкоапертурный захват объекта достигается применением специальных лидаров – флэш-лидаров (Flash-LIDAR) на базе многопиксельных матричных TOF-камер с интегрированными процессорами многоканальной обработки, которые обеспечивают получение рельефометрических сигнатур объекта одновременно на большом множестве  $N$  точек его поверхности  $S$  без оптико-механического сканирования [2–5].

Согласно ToF технологии «Range gated imagers» [5] для каждого пиксела фотоматрицы ToF

осуществляется определение энергии отраженных сигналов, пропорционально времени запаздывания парциальных пучков отраженного излучения  $\tau_i(S, t)$ , в виде электрических зарядов на МДП – конденсаторах пиксела. Заряд конденсаторов каждого пиксела осуществляется во временных строках длительностью  $\tau_{si}$ , равной времени запаздывания парциальных пучков относительно моментов излучения лазерных импульсов. Причем, длительность лазерных импульсов должна удовлетворять условию [5]

$$\tau_{p.ToF} \geq 2R_{max}/C, \quad (1)$$

где  $R_{max}$  – максимальное расстояние до точки поверхности объекта от лидара;  $C$  – скорость света.

Как следует из уравнения (1), необходимая длительность  $\tau_{p.ToF}$ , а соответственно энергия зондирующих импульсов увеличивается с увеличением дальности  $R$ , что существенно ограничи-