

# Методология и алгоритмы получения дальностных 3D-портретов объектов по 2D-распределениям интенсивности усеченных реализаций отраженного лазерного излучения

В.И. Иванов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИИ ядерных проблем Белорусского государственного университета, 2203001, Беларусь, г. Минск, ул. Бобруйская, д. 11

## Аннотация

Рассмотрены методология и алгоритмы получения дальностных 3D-портретов объектов по 2D-распределениям интенсивности усеченных реализаций отраженного лазерного излучения. Исследованы методические и инструментальные аспекты повышения разрешающей способности 3D-портретов по глубине рельефа поверхности. Получены уравнения зависимости разрешающей способности по рельефу от оптического контраста поверхности объекта. Показано, что разрешающая способность может быть менее 1 см. Предложенная методология и алгоритмы при одинаковой мощности зондирующих импульсов позволяют в десятки раз увеличить дальность действия 3D-лидаров по сравнению с ToF-технологией на основе алгоритмов «Range gated imagers», а также обеспечивают возможность реализации данной методологии на общедоступной элементной базе без необходимости применения специализированных интегральных ToF-процессоров.

**Ключевые слова:** 3D-портреты, 3D-изображения, лазерно-локационное распознавание.

**Цитирование:** Иванов, В.И. Методология и алгоритмы получения дальностных 3D-портретов объектов по 2D-распределениям интенсивности усеченных реализаций отраженного лазерного излучения / В.И. Иванов // Компьютерная оптика. – 2024. – Т. 48, № 3. – С. 386-396. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1301.

**Citation:** 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. Computer Optics 2024; 48(3): 386-396. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1301.

## Введение

В комплексе задач видеонаблюдения важную практическую значимость имеет задача обнаружения и распознавания дальностных (расположенных в дальней зоне Фраунгофера) малоразмерных объектов с квазиулевым оптическим контрастом их поверхности: малоразмерных летательных, наземных, надводных и подводных аппаратов, робототехнику, неразорвавшихся боеприпасов, фрагментов объектов, потерпевших крушение, вооруженных и невооруженных людей др. [1–9]. В широком арсенале методов и средств видеонаблюдения таких объектов важное место занимают лазерные локационные системы (ЛЛС), в которых получаемая информация используется как для непосредственного зрительного восприятия и анализа получаемых изображений объектов, так и с применением компьютерных алгоритмов обработки, анализа и визуализации [10, 11].

Достоверность обнаружения и различения деталей объектов по получаемым изображениям во многом определяется оптическим (яркостным) контрастом поверхности объекта [12], под которым понимается дифференциальная разность отражательных характеристик поверхности объекта и фона – при обнаружении объекта или разность отражательных характеристик соседних элементов поверхности (межэлементный контраст) при различении

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

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 [12]

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

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

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

Величина  $\Delta K$  определяет разность отраженных сигналов

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

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

Из (4) следует, что при  $\Delta K \rightarrow 0$ , для любых значений мощности  $P$ ,  $\Delta B \rightarrow 0$ , т.е. обнаружение и различение объектов с контрастом менее некоторого порогового значения  $\delta_k \leq \delta_{kr}$  по отраженной мощности зондирующего излучения практически невозможно.

Объекты с оптическим контрастом меньше порогового (шумового) контраста ЛЛС  $\delta_k \leq \delta_{kr}$  относятся к классу объектов с квазиулевым контрастом [12, 13].

Искусственное снижение оптического контраста является эффективным приемом их маскировки. Однако сохраняющиеся при этом объемность, форма и рельеф поверхности объекта являются существенными демаскирующими признаками. В этой связи получение информации об объемных характеристиках (рельефе) поверхности объекта является доминирующим фактором повышения эффективности обнаружения и распознавания объектов с квазинулевым контрастом [2, 13].

Решение данной задачи осуществляется по нескольким направлениям, одним из которых является метод сверхширокополосной локации (СШЛ) в радиочастотном [14–15] или оптическом диапазонах [6, 7, 11, 16]. Метод основан на облучении объекта радиочастотными или лазерными импульсами ультракороткой длительности  $\tau_p$  и анализом двумерной диаграммы рассеяния отраженных сигналов. В настоящей работе под двумерной диаграммой рассеяния понимается исходная информация о дальностном портрете объекта, обработка которой осуществляется специальными алгоритмами получения дальностных портретов методами сверхширокополосной лазерной локации (СШЛ) [11].

Огибающая сигнала представляет собой одномерную рельефометрическую сигнатуру объекта в координатах амплитуда-время, интегральный энергетический спектр которой определяется пространственной частотой рельефа поверхности по глубине (дальности). Разрешающая способность  $\Delta\xi$  по глубине рельефа объекта  $\xi$  в получаемой сигнатуре определяется длительностью зондирующего импульса  $\tau_p$  в соответствии с уравнением

$$\Delta\xi = 0,5C\tau_p. \quad (5)$$

Применение методов СШЛ для дистанционного обнаружения и распознавания малоразмерных объектов нерационально, так как для обеспечения требуемого высокого разрешения  $\Delta\xi$  (на уровне единиц сантиметров и менее) необходимо применение зондирующих импульсов с длительностью 100–200 пс с обеспечением полосы пропускания приемоизмерительного тракта на уровне 5–10 ГГц. Получаемая при этом рельефометрическая сигнатура малоразмерного объекта методом СШЛ мало информативна для непосредственного зрительного восприятия и интерактивного анализа лазерно-локационной информации в системах технического зрения; основная область эффективного применения СШЛ – обнаружение и автоматизированная классификации относительно крупных объектов: самолетов, кораблей и т.п. [11], а также подповерхностная локация [17].

Второе направление основано на получении и анализе трехмерных сигнатур объекта (3D-портретов) в виде матриц глубины (возвышений) рельефа поверхности  $S(\mathbf{r}, t)$ , где  $\mathbf{r}$  – вектор в пространстве декартовых координат  $x, y, z$ , лазерно-локационными ме-

тодами. Наиболее распространенным является метод сканирующей лазерной дальнометрии (лазерной профилометрии) на базе одного или множества лазеров [6, 7, 18, 19] с определением расстояний  $R_i$  до каждой  $i$ -й точки поверхности  $R_i = R_b + \xi_i$ , где  $R_b$  – расстояние до точек поверхности с  $\xi_i = 0$ . Реализация данного подхода для определения 3D-сигнатур высокодинамичных малоразмерных объектов, включая задачи их распознавания с подвижных носителей, требует высокой точности позиционирования лазерного луча при одновременном обеспечении высокой скорости сканирования и частоты повторения лазерных импульсов. Разновидностью данного направления являются стробоскопические методы [5, 8, 10], основанные на подсветке объекта лазерными импульсами со смещением импульса стробирования сигнала по дальности (глубине рельефа объекта  $\xi$ ) на каждом  $i$ -м цикле зондирования на величину  $i\Delta\tau$  (где  $\Delta\tau = 2\Delta\xi/C$ ) с последующей 2D-регистрацией отраженного светового поля, принятого в моменты стробирования сигнала. При этом для получения электронного 3D-портрета объекта с глубиной рельефа поверхности  $\xi$  при разрешении по глубине  $\Delta\xi$  требуется  $N_s$  циклов стробирования с получением  $N_s$  изображений «срезов» поверхности объекта по глубине ( $N_s = \xi/\Delta\xi$ ). Так, например, в работах по дистанционной идентификации личности человека [5], дистанционной диагностике дефектов теплоизоляционных плит космических кораблей Spase Shuttle [8] при оценке глубины рельефа в диапазоне до  $\xi_{max} = 0,2$  м и разрешении  $\Delta\xi \approx 1$  мм осуществляется более 200 циклов зондирования с субнаносекундным стробированием  $\Delta\tau \leq 100$  пс с последующим получением и реконструкцией 3D-портрета объекта по 200 и более изображениям «срезов». Данное обстоятельство существенно снижает оперативность получения информации и затрудняет применение таких систем для рутинной видеоразведки.

В связи с освоением за рубежом интегральных технологий времяпролетных измерений на основе высокочувствительных быстродействующих ПЗС-матриц с интегрированными многоканальными процессорами и созданием 3D- ToF-камер (Time-of-Flight-camera) [20] широкое распространение получают лидары на базе таких камер – «Флэш-лидары» (Flash-LIDAR) [20–22]. Съёмочные системы класса 3D-Flash LIDAR представляют собой лазерно-локационные системы для дистанционного получения метрики рельефа поверхности объекта одновременно на множестве  $N$  точек поверхности без оптико-механического сканирования.

Флэш-лидары на основе ToF-технологий обладают высокой разрешающей способностью (менее 1 см) и быстродействием за счет определения 3D-портретов одновременно на большом множестве  $N$  точек поверхности. Основным недостатком данного типа лидаров, существенно ограничивающим область

их эффективного применения (при приемлимой мощности зондирующих импульсов  $P_0$ ), является небольшая дальность действия  $R_{max}$ .

Данное ограничение обусловлено необходимостью излучения в ТоF-лидарах «длинных» зондирующих импульсов, длительность которых определяется уравнением [20]

$$\tau_{p,TOF} \geq 2R_{max} / C, \tag{6}$$

в отличие от нашей концепции [23], согласно которой длительность зондирующих импульсов определяется в виде

$$\tau_p \geq 2\xi_{max} / C, \tag{7}$$

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

и в  $n_R$  раз меньше  $\tau_{p,TOF}$  при дистанционных измерениях, т. е. при  $R_{max} > \xi_{max}$

$$n_R = \tau_{p,TOF} / \tau_p = R_{max} / \xi_{max}. \tag{8}$$

Из уравнения (8) следует, что при равной энергии зондирующих импульсов  $E_{TOF} = P_{0,TOF} \tau_{p,TOF} = E_p = P_{0,p} \tau_p$  импульсная мощность лазерных импульсов  $P_{0,p}$  по предлагаемой методологии в  $n_R$  раз больше мощности лазерных импульсов  $P_{0,TOF}$  по ТоF-технологии, т. е.  $P_{0,p} = n_R P_{0,TOF} = (R_{max} / \xi_{max}) P_{0,TOF}$ , так как длительность зондирующего импульса  $\tau_p$  в  $n_R$  раз меньше длительности зондирующего импульса  $\tau_{p,TOF}$  по ТоF-технологии.

Учитывая квадратичную зависимость дальности действия лидача  $R_{max}$  от мощности зондирующих импульсов для протяженных объектов с диффузным отражением, коэффициент увеличения дальности  $K_R$  по сравнению с ТоF-технологией пропорционален  $\sqrt{n_R}$ , т. е.  $K_R = \sqrt{n_R} = \sqrt{R_{max} / \xi_{max}}$ .

Так, например, для объектов с максимальной глубиной рельефа поверхности  $\xi_{max} = 3$  м, соответствующего большинству задач обнаружения и распознавания малоразмерных объектов, и расположенных даже на сравнительно небольшом расстоянии от лидача, например  $R_{max} = 300$  м,  $K_R = \sqrt{300/3} = 10$ , т. е. дальность действия лидача по нашей технологии при прочих равных условиях составит  $R'_{max} = K_R R_{max} = 3$  км. Чтобы обеспечить такую дальность  $R'_{max}$  в ТоF-лидаре, мощность его излучения должна быть увеличена в  $K_R^2 = n_R = 100$  раз, так как длительность зондирующего импульса  $\tau_{p,TOF}$  в соответствии с (8) составляет  $\tau_{p,TOF} = 100\tau_p$ .

Ниже рассмотрены методология и алгоритмы получения дальностных 3D-портретов малоразмерных объектов. Исследованы методические и инструментальные аспекты повышения разрешающей способности 3D-портретов по глубине рельефа поверхности. Получены уравнения зависимости разрешающей способности по рельефу от оптического контраста по

верхности объекта. Показано, что разрешающая способность может быть менее 1 см. Предложенная методология и алгоритмы при одинаковой мощности зондирующих импульсов позволяют в десятки раз увеличить дальность действия 3D-лидаров по сравнению с ТоF-технологией на основе алгоритмов «Range gated imagers», а также обеспечивают возможность реализации данной методологии на общедоступной элементной базе без необходимости применения специализированных интегральных ТоF-процессоров.

### 1. Методология получения 3D-портретов

Поверхность объекта, находящегося на расстоянии  $R$  от лидача, облучают прямоугольными импульсами лазерного излучения с увеличенной расходимостью пучка. Длительность лазерных импульсов определяется условием [23]

$$\tau_p \geq 2\xi_{kmax}(\mathbf{r}) / C, \tag{9}$$

где  $\xi_{kmax}(\mathbf{r})$  – максимальная глубина рельефа поверхности;  $\mathbf{r}$  – вектор координат  $x, y$  в предметной плоскости;  $C$  – скорость света.

Для большинства малоразмерных объектов  $\xi_{kmax}(\mathbf{r}) \leq 300$  см, соответственно,  $\tau_p \geq 20$  нс.

Поверхность объекта представляем множеством элементарных плоскостей  $\Delta S_i$ , каждая из которых практически перпендикулярна оси зондирующего луча и характеризуется коэффициентом отражения  $K_i$  и глубиной расположения  $\xi_i$  относительно поверхности объекта, наиболее близкой к лидару ( $\xi_i = 0$ );  $\Delta S_i = f(K_i, \xi_i)$ . Размеры элементарных площадок (площадь)  $\Delta S_i$  определяются пространственной частотой изменчивости  $\xi_i$  в плоскости объекта. При высокой пространственной частоте  $\xi_i$  размеры прямоугольных площадок (элементов) поверхности  $\Delta S_k$  могут быть весьма малыми и обеспечиваются выбором коэффициента увеличения (коэффициента масштабирования)  $\beta$  телескопической оптической системы (ОС) лидача с переменным фокусным расстоянием.

Координаты в плоскости изображения ОС лидача определены таким образом, чтобы между координатами точек  $x, y$  лоцируемой поверхности и координатами  $x', y'$  ее параксиального изображения существовала простая связь:

$$\mathbf{S} = \beta \mathbf{r}, \tag{10}$$

где  $\beta = d/R$  – коэффициент увеличения приемной ОС лидача;  $d$  – расстояние от линзы ОС до плоскости изображения, в которой установлен матричный многоэлементный фотодетектор (МФД) с накоплением заряда, например, ПЗС;  $R$  – расстояние от лидача до поверхности объекта;  $\mathbf{S}$  – вектор координат  $x', y'$  в плоскости изображения;  $\mathbf{r}$  – вектор координат  $x, y$  в предметной плоскости.

Отраженный сигнал  $E(\mathbf{r}, t)$ , поступающий на вход МФД лидача размерностью  $N = n_x \times n_y$  элементов,

представляет собой совокупность  $N$  элементарных волн (парциальных пучков)  $E_i(\mathbf{S})$ , отраженных от  $N$  элементарных площадок поверхности  $\Delta S_i$ , каждый из которых характеризуется своей интенсивностью  $E_i$  и временем запаздывания прихода  $\tau_i$  на МФД лидача в зависимости от глубины рельефа поверхности  $\xi_i$

$$\tau_i = 2\xi_i / C. \quad (11)$$

В этой связи определение времени запаздывания  $\tau_i(\mathbf{S}, t)$  каждого из субпучков отраженного излучения позволяет определить рельеф поверхности объекта  $\xi_k(\mathbf{r})$

$$\xi_i(\mathbf{r}) = 0,5\tau_i(\mathbf{S}, t). \quad (12)$$

Максимальное значение времени запаздывания парциальных пучков отраженного сигнала определяется величиной

$$\tau_{i\max}(\mathbf{S}, t) = 2\xi_{i\max}(\mathbf{r}) / C, \quad (13)$$

а момент начала прихода переднего фронта  $t_1$  отраженного поля по отношению к моменту излучения  $t_0$  лазерного импульса  $\tau_p$  равен

$$t_1 = 2R / C, \quad (14)$$

где  $R$  – расстояние до точки поверхности с максимальным возвышением, для которой ( $\xi_i = 0$ ).

Для диффузно рассеивающей поверхности объекта двумерное распределение амплитуды поля отраженного лазерного излучения в плоскости изображения лидача  $E(\mathbf{S})$ , образованное совокупностью парциальных пучков  $E_i(\mathbf{S})$ , определяется обобщенной пространственно-частотной передаточной функцией  $F(\mathbf{S}, t)$ , которую можно представить в виде произведения частотно-передаточной функцией отдельных звеньев

$$F(\mathbf{S}, t) = K(\mathbf{r}, t)T_a(\mathbf{S}, t)A(\mathbf{S}); \quad (15)$$

$$E(\mathbf{S}) = \sum_i E_0(\mathbf{r}, t)K(\mathbf{r}, t)T_a(\mathbf{S}, t)A(\mathbf{S}) = \sum_i E_i(\mathbf{S}), \quad (16)$$

где  $E_0(\mathbf{r}, t)$  – функция, описывающая закон распределения комплексной амплитуды лазерного излучения на поверхности;  $K(\mathbf{r}, t)$  – функция распределения коэффициента отражения поверхности;  $T_a(\mathbf{S}, t)$  – передаточная функция среды переноса лазерного излучения по трассе локации (атмосфера, гидросфера);  $A(\mathbf{S})$  – аппаратная передаточная функция лидача.

Одновременное определение  $\tau_i(\mathbf{S}, t)$ , а соответственно, и  $\xi_i(\mathbf{S})$  на множестве элементов  $N$  поверхности  $\mathbf{S}$  основано на получении двумерных распределений энергии  $B(\mathbf{S})$  части полной временной реализации отраженного светового поля  $E(\mathbf{S}, t)$  длительностью  $T$  на усеченных по времени реализациях  $E(\mathbf{S}, t)$ , т. е. на временных интервалах  $T_i$  (времени экспозиции)  $T_i < T$ ;  $T_i \in T$ , путем одновременного накопления заряда отраженного поля  $E(\mathbf{S}, t)$  во всех  $N$  пикселях

МФД (уравнение (16) в пространственно-временных строках с длительностью, равной длительности лазерных импульсов  $\tau_{s1} = \tau_{s2} = \tau_p$  на интервале  $(t_1, t_1 + \tau_p)$ , который включает часть реализации отраженного поля с передним фронтом  $B_1(\mathbf{S})$ , или на интервале  $(t_1 + \tau_p, t_1 + 2\tau_p)$  – для части реализации поля с задним фронтом  $B_2(\mathbf{S})$ ).

В результате аналого-цифрового преобразования выходных сигналов МФД получаем цифровые образы двумерного (2D) распределения энергии усеченных реализаций поля отраженного лазерного излучения  $B(\mathbf{S})$ :

для передней части поля

$$B_1(\mathbf{S}) = |E_i(\mathbf{S})|^2 \int_{t_1}^{t_1 + \tau_p} f^2(t - \tau_i) dt = |E_i(\mathbf{S})|^2 (\tau_p - \tau_i), \quad (17)$$

для задней части поля  $B(\mathbf{S})$

$$B_2(\mathbf{S}) = |E_i(\mathbf{S})|^2 \int_{t_1 + \tau_p}^{t_1 + 2\tau_p} f^2(t - \tau_i) dt = |E_i(\mathbf{S})|^2 \tau_i. \quad (18)$$

Моменты  $t_1 = 2R/C$  определяются по сигналу одноэлементного фотодетектора (ФД), интегрированного в приемно-оптическую систему лидача ( $R$  – расстояние до объекта).

Согласно уравнениям (17), (18) энергии парциальных пучков, отраженных от одного и того же  $i$ -го элемента поверхности  $\Delta S_i$  в распределениях  $B_1(\mathbf{S})$ ,  $B_2(\mathbf{S})$ , можно записать в виде:

$$B_{1i} = P_i K_i F_{pi} (\tau_p - \tau_i); \quad (19)$$

$$B_{2i} = P_i K_i F_{pi} \tau_i, \quad (20)$$

где  $P_i$  – мощность падающего лазерного излучения на  $i$ -й элемент поверхности объекта  $\Delta S_i$ ;  $K_i$  – коэффициент отражения элемента поверхности  $\Delta S_i$ ;  $F_{pi}$  – оператор преобразования, определяемый в соответствии с (15) в виде  $F_{pi} = T_{ai} A_i$ .

Уравнения (19), (20) являются базовыми уравнениями для получения дальностных 3D-портретов.

Как следует из (17)–(20), энергия каждого парциального пучка отраженного излучения одновременно зависит от двух, в общем случае статистически независимых, случайных величин: энергии оптической составляющей, которая определяется коэффициентом отражения поверхности  $K_i$ , и от рельефометрической составляющей  $\xi_i$ , характеризуемой временем запаздывания  $\tau_i = 2\xi_i/C$  прихода парциальных пучков. Соответственно, распределения  $B_1(\mathbf{S})$ ,  $B_2(\mathbf{S})$  представляют собой энергетические спектры свертки пространственных частот глубины рельефа и коэффициента отражения поверхности.

Получение информации о рельефе поверхности объекта в виде рельефометрических сигнатур дальностных объектов  $\mathbf{S}(x_i, y_i, \xi_i)$  обеспечивается простыми вычислительными операциями обработки цифровых 2D-распределений энергий  $B_1(\mathbf{S})$ ,  $B_2(\mathbf{S})$  в соответствии с алгоритмами, приведенными ниже.

## 2. Алгоритмы получения 3D-портретов

### 2.1. Алгоритм 1

По выходному сигналу точечного фотодетектора с калиброванной чувствительностью ФД (фотодиода) определяется интегральное значение энергии отраженного поля  $B_0(\mathcal{S})$

$$B_0(\mathcal{S}) = |E_i(\mathcal{S})|^2 \int_{t_1}^{t_1 + 2\tau_p} f^2(t - \tau_p) dt = |E_k(\mathcal{S})|^2 \tau_p. \quad (21)$$

$B_0(\mathcal{S})$  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  $\mathcal{S}$

$$B_0(\mathcal{S}) = \sum_{i=1}^n B_{0i} = F_p \tau_p \sum_{i=1}^n P_i K_i. \quad (22)$$

При равномерном распределении мощности лазерного излучения по поверхности  $\mathcal{S}$  среднее значение энергии парциального пучка определяется уравнением

$$\bar{B}_0 = B_0(\mathcal{S}) / n = P_1 F_p \tau_p \sum_{i=1}^n K_i / n = P_1 F_p \tau_p \bar{K}. \quad (23)$$

Поэлементное отношение энергий распределения  $B_i(\mathcal{S})$  – уравнение (21) к  $\bar{B}_0$  имеет вид

$$B_i / \bar{B}_0 = (\tau_p - \tau_i) K_i / \tau_p \bar{K} = (\tau_p - \tau_i) k_i / \tau_p, \quad (24)$$

где

$$k_i = K_i / \bar{K}. \quad (25)$$

В соответствии с (24) при  $k_i=1$  истинные значения  $\tau_i, \xi_i$  определяются уравнениями

$$\tau_i = \tau_p (1 - B_i / \bar{B}_0); \quad (26)$$

$$\xi_i = 0,5 C \tau_i = 0,5 C \tau_p (1 - B_i / \bar{B}_0). \quad (27)$$

Однако измеряемое отношение  $B_i / \bar{B}_0$ , как следует из уравнения 24, зависит от отражательных характеристик поверхности объекта (коэффициент  $k_i$ ), значение которого в большинстве случаев неизвестно. В этой связи мы получаем оценки  $\tau'_i, \xi'_i$ , которые отличаются от истинных значений  $\tau_i, \xi_i$  (26), (27)

$$\tau'_i = \tau_p (1 - B_i / \bar{B}_0 k_i) = \tau_p [1 - B_i / \bar{B}_0 (1 \pm \delta_{ki})]; \quad (28)$$

$$\xi'_i = 0,5 C \tau_p \tau'_i, \quad (29)$$

где

$$k_i = K_i / \bar{K} = (\bar{K} \pm \Delta K_i) / \bar{K} = 1 \pm \delta_{ki}; \quad (30)$$

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

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

$$|\Delta \tau_i| = \tau'_i - \tau_i = \tau_p [(B_i / \bar{B}_0) (\pm \delta_{ki} / (1 \pm \delta_{ki}))], \quad (31)$$

$$|\Delta \xi_i| = 0,5 C \tau_p |\Delta \tau_i| = (0,5 C \tau_p - \xi_i) (\pm \delta_{ki} / (1 \pm \delta_{ki})), \quad (32)$$

т. е. 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 поверхности  $\Delta S_i$  можно представить независимыми случайными величинами с равномерным законом распределения в диапазоне  $\Delta K = 2\Delta K = K_{max} - K_{min}$ ;  $\bar{K} = 0,5 (K_{min} + K_{max})$ . При этом среднееквадратичное отклонение (СКО) коэффициента отражения  $\sigma_k$  определяется уравнением

$$\sigma_k = \Delta K / \sqrt{12}. \quad (33)$$

С учетом (33) СКО оптического контраста (3) запишем в виде

$$\sigma_{\delta_k} = \sigma_k / \bar{K} = \delta_k / \sqrt{12}. \quad (34)$$

С учетом (34) среднееквадратичное значение методической погрешности оценки глубины рельефа, согласно уравнению (32), определяется уравнением

$$\sigma_{\xi_i} = (0,5 \tau_p C - \xi_i) (\delta_{ki} / (\delta_{ki} + \sqrt{12})). \quad (35)$$

Для объектов с квазинулевым оптическим контрастом

$$\delta_{ki} \leq \delta_{kp} = 0,02, \quad (36)$$

где  $\delta_{kp} = 0,02$  – пороговый контраст (2 %) зрительного различения деталей объекта [12, 13].

С учетом (36) для объектов с квазинулевым контрастом  $\sigma_{\xi_i}$  определяется величиной

$$\sigma_{\xi_i} \leq (0,5 \tau_p C - \xi_i) 0,00574. \quad (37)$$

При высоком оптическом контрасте, например  $\delta_{ki} = 0,1$ ; (10 %),  $\sigma_{\xi_i} \leq (0,5 \tau_p C - \xi_i) 0,028$ .

На рис. 1 приведены графики зависимости погрешности  $\sigma_{\xi}$  (уравнение 35),  $\tau_p = 20$  нс.

Как следует из рис. 1, погрешность  $\sigma_{\xi_i}$  пропорционально возрастает с увеличением оптического контраста  $\delta_k$  и линейно уменьшается с увеличением глубины рельефа  $\xi$ . При этом  $\sigma_{\xi_i}$  тем меньше, чем меньше оптический контраст поверхности объекта  $\delta_k$ . Для большинства объектов с квазинулевым оптическим контрастом  $\delta_k \leq 0,02$  данной погрешностью можно пренебречь. Так, например, при  $\delta_k \approx 0,02$  и диапазоне глубины рельефа 1 см – 300 см  $\sigma_{\xi_i}$  изменяется от 1,7 см до 0,05 мм. Границы применимости алгоритма 1 для объектов с более высоким контрастом определяются рельефометрической характеристикой объектов и требуемой точностью (разрешающей способностью) получения их 3D-портретов.

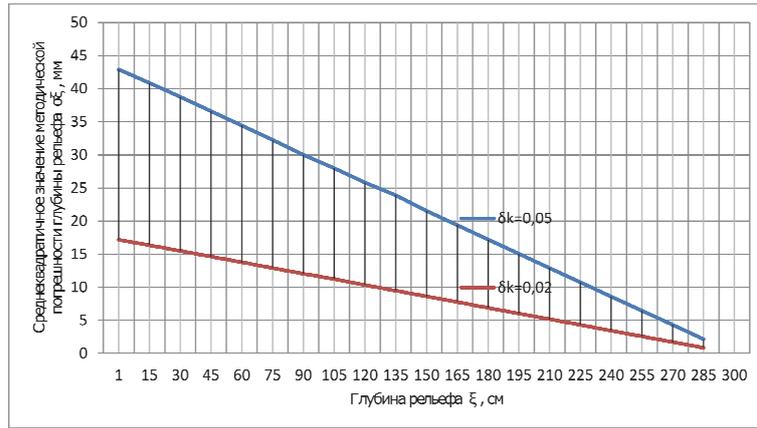


Рис. 1. Зависимости среднеквадратичных значений методической погрешности глубины рельефа поверхности  $\sigma_{\xi}$  при различных значениях оптического контраста  $\delta_k$

2.2. Алгоритм 2

В соответствии с (19) энергия  $i$ -го частичного пучка распределения  $B_1(\mathbf{S})$

$$B_{1i} = P_i K_i F_p (\tau_p - \tau_i). \tag{38}$$

Из (38) следует, что максимальной энергией обладают частичные пучки лазерного излучения, отраженные от точек поверхности с «нулевой» глубиной рельефа  $\xi_i = 0$ , т.е. отраженные от точек поверхности, наиболее близких к лидару. В этом случае  $\tau_i = 0$  и уравнение (38) для пучков с максимальной энергией имеет вид

$$B'_{1i,max} = P_i F_p \tau_p K_i. \tag{39}$$

Оценку среднего значения  $\bar{B}'_{0,max}$  проводим по выборке всех значений  $B'_{1i}$  полученного распределения  $B_1(\mathbf{S})$ , попадающих в интервал  $(B'_{1,max}, B'_{1,min})$ , верхняя граница которого  $B'_{1,max}$  соответствует максимальной интенсивности («яркости») частичных пучков в распределении, а нижняя граница  $B'_{1,min}$  определяется уравнением

$$B'_{1,min} = B'_{1,max} - \delta_k B'_{1,max} = B'_{1,max} (1 - \delta_k). \tag{40}$$

Для объектов с квазиулевым контрастом при  $\delta_k = \delta_{kn} = 0,02$

$$B'_{1,min} = 0,98 B'_{1,max}. \tag{41}$$

Соответственно,  $\bar{B}'_{0,max}$  определяется в виде

$$\bar{B}'_{0,max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B'_{1,max}, \tag{42}$$

где  $n$  – число элементов в выборке, значения энергий которых попадают в интервал  $(B'_{1,max}, B'_{1,min})$ .

Уравнение (42) запишем в виде

$$\bar{B}'_{0,max} = F_p \tau_p \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i = P_i F_p \tau_p \bar{K}. \tag{43}$$

Из отношения энергий распределения  $B_1(\mathbf{S}) / \bar{B}'_{0,max}$  аналогично алгоритму 1 (уравнение (35)) получено:

$$\sigma_{\xi_i} = (0,5 \tau_p C - \xi_i) (\delta_{ki} / (\delta_{ki} + \sqrt{12})). \tag{44}$$

Для объектов с квазиулевым контрастом  $\delta_{ki} \leq 0,02$

$$\sigma_{\xi_i} \leq (0,5 \tau_p C - \xi_i) 0,00574. \tag{45}$$

При сравнительной методической погрешности алгоритмов 1 и 2 в алгоритме 2 исключается необходимость в дополнительном измерении интегральной энергии отраженного поля отдельным ФД.

2.3. Алгоритм 3

Алгоритм 3 аналогичен алгоритму 1, но только выполняемому для распределения  $B_2(\mathbf{S})$ .

Отношение энергий  $B_2(\mathbf{S}) / \bar{B}$  для  $i$ -го элемента поверхности  $\Delta S_i$  с учетом (23) определяется уравнением

$$B_{2i} / \bar{B}_0 = \tau_i K_i / \tau_p \bar{K} = \tau_i k_i / \tau_p. \tag{46}$$

Истинные значения  $\tau_i, \xi_i$  получаем из уравнения (46) при  $k_i = 1$

$$\tau_i = \tau_p (B_{2i} / \bar{B}_0); \tag{47}$$

$$\xi_i = 0,5 C \tau_i = 0,5 C \tau_p (B_{2i} / \bar{B}_0). \tag{48}$$

При  $k_i \neq 1$  оценочные значения  $\tau'_i, \xi'_i$ , полученные из (46), определяются уравнениями

$$\tau'_i = \tau_p (B_{2i} / \bar{B}_0 k_i) = \tau_p [B_{2i} / \bar{B}_0 (1 + \delta_{ki})]; \tag{49}$$

$$\xi'_i = 0,5 C \tau'_i = 0,5 C \tau_p [B_{2i} / \bar{B}_0 (1 + \delta_{ki})]. \tag{50}$$

Абсолютная методическая погрешность оценки глубины рельефа получена аналогично алгоритму 1 в виде

$$|\Delta \xi'_i| = \xi_i (\pm \delta_{ki} / 1 \pm \delta_{ki}). \tag{51}$$

С учетом уравнений (33), (35) среднеквадратичное значение методической погрешности для равноверо-

ятного закона распределения коэффициента отражения поверхности, как случайной величины, определяется уравнением

$$\sigma_{\xi_i} = \xi_i (\delta_{ki} / \delta_{kp} + \sqrt{12}). \quad (52)$$

Для объектов с квазиулевым оптическим контрастом  $\delta_k \leq \delta_{kp} = 0,02$

$$\sigma_{\xi_i} \leq \xi_i 0,00574. \quad (53)$$

На рис. 2 приведены графики зависимости погрешности  $\sigma_{\xi}$  (уравнение 52),  $\tau_p = 20$  нс.

Согласно рис. 2 погрешность  $\sigma_{\xi_i}$  линейно возрастает, т. е. разрешающая способность по рельефу поверхности ухудшается с увеличением глубины рельефа  $\xi$ . При этом  $\sigma_{\xi_i}$  тем меньше, чем меньше оптический контраст поверхности объекта  $\delta_k$ . Так, для объектов с квазиулевым контрастом  $\delta_k \leq 0,02$   $\sigma_{\xi_i}$  изменяется в диапазоне до 300 м от 0,05 мм до 1,7 см.

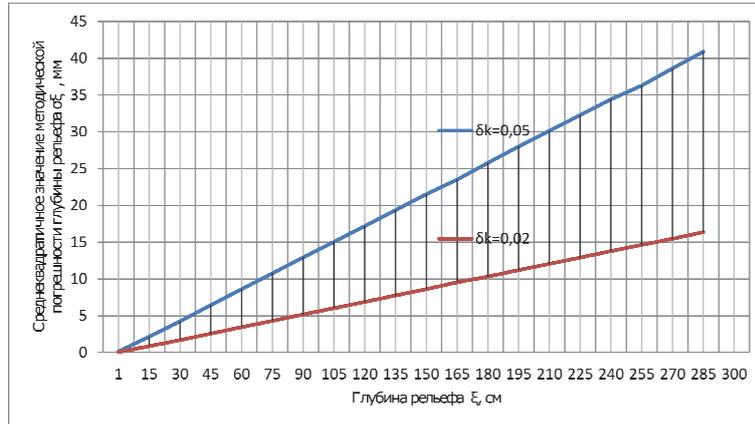


Рис. 2. Зависимости среднеквадратичных значений методической погрешности глубины рельефа поверхности  $\sigma_{\xi}$  при различных значениях оптического контраста  $\delta_k$

Данный алгоритм обеспечивает более высокое разрешение по рельефу поверхности в нижней области диапазона  $\xi \leq C\tau_p/2$  (в данном случае для  $\xi \leq 150$  см) в отличие от алгоритмов 1 и 2, для которых характерно более высокое разрешение в верхней части диапазона рельефа  $\xi \geq C\tau_p/2$ , т.е. для  $\xi \geq 150$  см.

В этом заключается преимущество применения алгоритма 3 для определения рельефа малоразмерных объектов со сложным мелкомасштабным рельефом поверхности.

#### 2.4. Алгоритм 4

В соответствии с уравнениями (19), (20), энергии парциальных пучков  $B_{1i}$  и  $B_{2i}$ , отраженных от одного и того же  $i$ -го элемента поверхности  $\Delta S_i$  с коэффициентом отражения  $K_i$ , определяются в виде

$$B_{1i} = P_i K_i F_p (\tau_p - \tau_i); \quad (54)$$

$$B_{2i} = P_i K_i F_p \tau_i. \quad (55)$$

В этой связи отношение энергий одноименных пучков  $B_1(\mathbf{S})/B_2(\mathbf{S})$  или  $B_2(\mathbf{S})/B_1(\mathbf{S})$  для  $i$ -го элемента поверхности  $\Delta S_i$  соответственно равны

$$B_{1i} / B_{2i} = (\tau_p - \tau_i) / \tau_i; \quad (56)$$

$$B_{2i} / B_{1i} = \tau_i / (\tau_p - \tau_i). \quad (57)$$

Из (56) или (57) искомые параметры  $\tau_i$ ,  $\xi_i$  определяем в виде

$$\tau_i = \tau_p (B_{2i} / (B_{1i} + B_{2i})). \quad (58)$$

$$\xi_i = 0,5 C \tau_i = 0,5 C \tau_p (B_{2i} / (B_{1i} + B_{2i})). \quad (59)$$

$$\xi(\mathbf{S}) = 0,5 C \tau(\mathbf{S}) = 0,5 C \tau_p (B_2(\mathbf{S}) / (B_1(\mathbf{S}) + B_2(\mathbf{S}))). \quad (60)$$

В плане определения  $\tau_i$ ,  $\xi_i$  уравнения (56) и (57) инвариантны.

Знаменатель  $B_{1i} + B_{2i}$  в уравнении (59) или (60) на основании уравнений (54) и (55) можно записать в виде

$$B_{0i} = B_{1i} + B_{2i} = P_i K_i F_p \tau_p. \quad (61)$$

Как следует из (61), распределение  $B_0(\mathbf{S})$  не зависит от рельефометрической составляющей, а определяется только отражательными характеристиками поверхности объекта  $K_i$ . При этом распределение  $B_0(\mathbf{S})$  представляет собой яркостное 2D-изображение объекта в режиме лазерной подсветки, которое предоставляет дополнительную существенную информацию для распознавания объектов [10].

Для сокращения объема вычислений предпочтительнее получать распределение  $B_0(\mathbf{S})$  не суммированием распределений  $B_0(\mathbf{S}) = B_1(\mathbf{S}) + B_2(\mathbf{S})$ , а путем регистрации распределения интенсивности полной реализации отраженного сигнала, т. е. за время экспозиции  $\tau \geq 2\tau_p$

$$B_{0i}(\mathbf{S}) = |E_i(\mathbf{S})|^2 \int_{t_i}^{t_i+2\tau_p} f^2(t - \tau_p) dt \equiv P_i(\mathbf{S}) K_i(\mathbf{S}) F_p(\mathbf{S}) \tau_p. \quad (62)$$

По отношению одного из распределений  $B_1(\mathbf{S})$  или  $B_2(\mathbf{S})$  к распределению  $B_0(\mathbf{S})$  получаем 3D-портреты объекта в соответствии с уравнением

$$\xi(\mathcal{S}) = 0,5 C \tau_p (B_2(\mathcal{S}) / B_0(\mathcal{S})),$$

которое тождественно уравнению (60).

Как следует из данных уравнений, методическая погрешность определения 3D-портретов по алгоритму 4 практически равна нулю, в первую очередь, за счет исключения влияния коэффициента отражения поверхности. Это позволяет применять данный алгоритм не только для объектов с малым оптическим контрастом, но и для любых других объектов, включая объекты с высокой неоднородностью коэффициента отражения поверхности.

### 3. Оценка инструментальной погрешности

Инструментальная погрешность определения глубины рельефа поверхности  $\xi_i(\tau_i)$  при работе МФД в линейном режиме доминирующим образом зависит от шумовых параметров МФД и точности аналого-цифрового преобразования  $\Delta$ . Применительно к уравнению (62) получаемую оценку  $\tau'_i$  с учетом вносимой обобщенной погрешности  $\pm \Delta_{nB}$  можно записать в виде [25]

$$\tau'_i = \tau_p [(B_{2i} / (B_{0i}) + \Delta_{nB2i} / B_{2i} + \Delta_{nB0i} / (B_{0i}))]. \quad (63)$$

Как будет показано ниже, данная погрешность характеризуется только положительной величиной  $\pm \Delta_{nB}$ . Согласно уравнению (62), которое выражено в виде отношения двух измеряемых распределений  $B_{2i}/B_{0i}$ , погрешности измерения данных величин  $\Delta_{nB0i}$  и  $\Delta_{nB2i}$  частично компенсируют друг друга и оценка их влияния на результат измерения согласно (63) является завышенной [25]. Более адекватной является оценка согласно уравнению

$$\tau'_i = \tau_p [(B_{2i} + \Delta_{nB2i}) / (B_{0i} + \Delta_{nB0i})]. \quad (64)$$

С учетом (64) погрешность глубины рельефа поверхности в  $i$ -й точке определяем по формуле

$$\Delta \xi_i = 0,5 C (\tau'_i - \tau_i); \quad (65)$$

$$\Delta \xi_i = 0,5 C \tau_p [(B_{2i} + \Delta_{nB2i}) / (B_{0i} + \Delta_{nB0i}) - (B_{2i} / B_{0i})]. \quad (66)$$

Обобщенную оценку инструментального шума  $\sigma_{nB}$  можно представить суммой квадратов значений ряда составляющих [24, 26, 27]

$$\sigma_{nB} = \sqrt{(B + B_b) + \sigma_{sn}^2 + \sigma_{qd}^2 + \sigma_{qr}^2 + \sigma_{qQv}^2}, \quad (67)$$

где  $\sqrt{B + B_b}$  – дробовой шум, обусловленный квантовой природой сигнала и внешнего светового фона  $B_b$ ;  $\sigma_{sn}$  – параметр структурного шума МФД, обусловленный неоднородностью чувствительности пикселей МФД;  $\sigma_{qd}$ ,  $\sigma_{qr}$  – среднеквадратичные значения темнового тока и считывания зарядов пикселей МФД соответственно;  $\sigma_{qQv}$  – среднеквадратичное значение шума квантования, обусловленное аналого-цифровым преобразованием.

В общем случае составляющая структурного шума компенсируется нормирующими коэффициентами, которые определяются путем калибровки МФД известными методами [24, 26, 27]. Для алгоритма 4 влияние этого параметра несущественно, так как 3D-портреты объектов получаем по отношениям энергий парциальных пучков отраженного излучения от  $i$ -го элемента поверхности, детектируемых одним и тем же пикселем матрицы-уравнения (60), (62).

Влиянием внешнего светового фона  $B_b$  и темнового тока  $i_{qd}$  также пренебрегаем, так как на малых экспозициях наносекундного диапазона, например при экспозиции  $\tau_p = 2010^{-9}$  с, их значения  $\sigma_{qd} = i_{qd} \tau_p$  и  $B_b$  ничтожно малы.

В этой связи обобщенная оценка инструментального шума  $\sigma_{nB}$  определяется уравнением

$$\sigma_{nB} = \sqrt{B + \sigma_{qr}^2 + \sigma_{qQv}^2}. \quad (68)$$

Шум квантования  $\sigma_{qQv}$  уменьшается с уменьшением шага квантования  $\Delta_q$ , т. е. с увеличением разрядности аналого-цифрового преобразования, и определяется уравнением [28]

$$\sigma_{qQv} = \Delta_q / \sqrt{12}, \quad (69)$$

$$\Delta_q = B_{max} / N_q, \quad (70)$$

где  $B_{max}$  – максимальное значение энергии сигнала, соответствующее верхней границе диапазона лидара по глубине рельефа  $\xi_{max}$ ;  $N_q = 2^{nq}$  – число уровней квантования;  $nq$  – число разрядов аналого-цифрового преобразователя.

В этой связи среднеквадратичное значение шума квантования определяется величиной

$$\sigma_{qQv} = B_{max} / 2^{nq} \sqrt{12}. \quad (71)$$

МФД 2 при разрядности аналого-цифрового преобразования  $N_q = 2^{11} = 2048$ .

МФД 1: КМОП, CMOSIS CMV – 4000: FWS (глубина потенциальной ямы пиксела)  $\approx 13000$  электронов (в дальнейшем эл),  $\sigma_{qr} = 13$  эл,  $\sigma_{qQv} = FWS / N_q \sqrt{12} = 1,8$  эл,  $\sigma_{qd} = 125$  эл/с.

МФД 2: ПЗС KAI-1003M: FWS  $\approx 170000$  эл,  $\sigma_{qr} = 40$  эл,  $\sigma_{qQv} = FWS / N_q \sqrt{12} = 24$  эл,  $\sigma_{qd} = 2500$  эл/с.

Пороговые значения сигнала (SNR  $\approx 1$ ) определяет шумовой составляющей  $B_n \approx \sigma_{nB}$

$$B_n = \sigma_{nB} / \sqrt{\sigma_{nB} + \sigma_{nB}^2}. \quad (72)$$

Соответственно, для МФД 1  $\sigma_{nB1} = 13$  эл,  $B_{n1} = 13,6$  эл; для МФД 2  $\sigma_{nB2} = 47$  эл,  $B_{n2} = 47,2$  эл.

Полагаем, что для МФД 1 и МФД 2 максимальные энергии детектируемых сигналов  $B_{1max}$  и  $B_{2max}$  определяются уровнями FWS1 и FWS2 соответственно, т. е.  $B_{1max} = 13000$  эл,  $B_{2max} = 17000$  эл. В этой связи при длительности зондирующего импульса  $\tau_p = 20$  нс ( $\xi_{max} = 0,5 \tau_p C \approx 300$  см) на единицу меры

глубины рельефа  $\xi$  (времени запаздывания прихода парциального пучка  $\tau$ ) приходится энергия:

$$\Delta B_1 = 13000/20 = 0,65 \text{ эл/пс}; \Delta B_2 = 170000/20 = 8,5 \text{ эл/пс}.$$

Пороговые значения  $\tau_n, \xi_n$  при SNR=1 для МФД 1 и МФД 2 соответственно равны:

$$\tau_{1n} = B_{n1}/\Delta B_1 = 13,6/0,65 = 21 \text{ пс}; \xi_{1n} = 3,15 \text{ мм};$$

$$\tau_{2n} = B_{n2}/\Delta B_2 = 47/8,5 = 5,5 \text{ пс}; \xi_{in} = 0,8 \text{ мм}.$$

$$SNR = B / \sigma_{nB} = B / \sqrt{B + \sigma_{qr}^2 + \sigma_{qQn}^2}. \quad (73)$$

На рис. 3–5 приведены графики зависимостей абсолютной  $\Delta\xi_i$  и относительной  $\delta\xi = \Delta\xi_i/\xi_i$  погрешностей по глубине рельефа в диапазоне до 300 см (уравнение 66) для МФД 1 и МФД 2 при разных SNR.

Согласно графикам на рис. 3–5, разрешающая способность по рельефу, а соответственно, и относительная погрешность определения глубины рельефа улучшаются как с увеличением глубины рельефа, так и с увеличением SNR (рис. 4, 5).

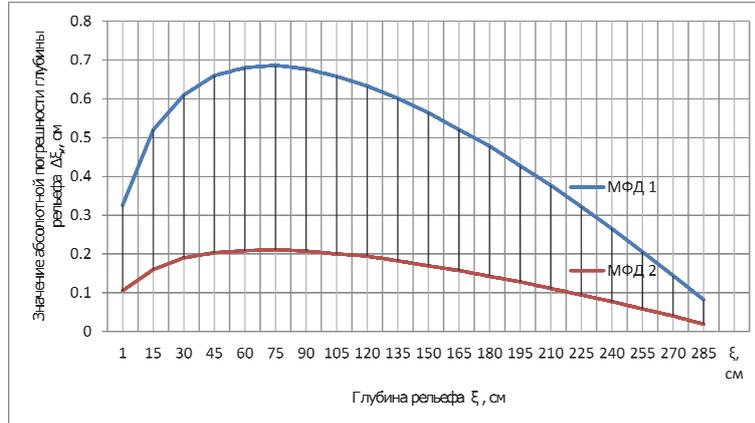


Рис. 3. Зависимости абсолютной погрешности глубины рельефа  $\Delta\xi$  для SNR = 1;  $\tau_p = 20$  нс

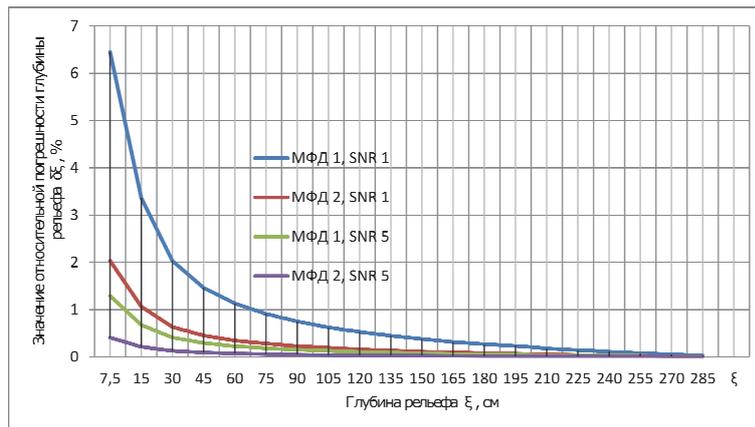


Рис. 4. Зависимости относительной погрешности глубины рельефа поверхности  $\delta\xi$  от глубины рельефа  $\xi$  для различных значений SNR;  $\tau_p = 20$  нс

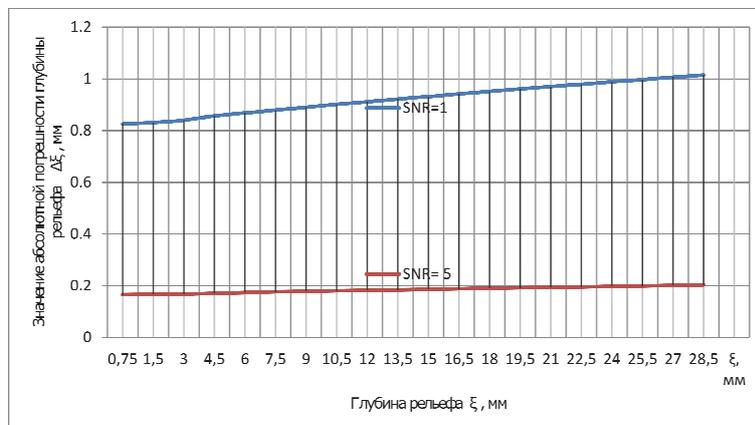


Рис. 5. Зависимости абсолютной погрешности  $\Delta\xi$  в диапазоне малых значений глубины рельефа  $\xi$  для различных значений SNR; МФД 2;  $\tau_p = 20$  нс

Полученные результаты характеризуются высокими метрологическими показателями, свидетельствующими о возможности получения дальностных 3D-портретов малоразмерных объектов при высоких значениях  $SNR \geq 5$  с разрешением по глубине рельефа менее 1 см.

Повышение SNR возможно как с использованием высокочувствительных МФД [29], увеличением мощности зондирующих импульсов, так и усреднением получаемых 2D-распределений отраженного светового поля по  $n$  циклам зондирования объекта, обеспечивающего увеличение SNR в  $\sqrt{n}$  раз.

Реализация данной методологии возможна в различных спектральных диапазонах при использовании сенсоров с соответствующей спектральной областью чувствительности, различного формата и размеров пикселей и источников лазерного излучения с длиной волны в необходимом спектральном диапазоне. Выбор технологии матричных многоэлементных фотодетекторов обусловлен их динамическим диапазоном, который определяется глубиной потенциальной ямы пикселя, т.е. максимальной величиной заряда, который может быть накоплен на емкости пикселя МФД. Это, в свою очередь, позволяет обеспечить более высокий динамический диапазон 3D-лидара по рельефу, возможность работы в режиме накопления зарядов на емкостях пикселей по  $n$  циклам зондирования объекта, а также использовать более высокую мощность зондирующих сигналов для повышения SNR.

### Заключение

Предложенная методология и алгоритмы позволяют обеспечить оперативное получение дальностных 3D-портретов малоразмерных объектов с разрешением по глубине рельефа менее 1 см.

Алгоритмы 1–3, основанные на обработке одиночных 2D-распределений интенсивности усеченных реализаций отраженного светового поля, наиболее эффективны для получения 3D-портретов объектов с малым и квазиулевым оптическим контрастом поверхности.

Алгоритм 4, заключающийся в совместной обработке двух 2D-распределений интенсивности отраженного поля, является более сложным в реализации по сравнению с алгоритмами 1–3, но и наиболее точным. Погрешность определения метрических характеристик рельефа поверхности в 3D-портретах не зависит от пространственной неоднородности частотно-передаточной функции, возможного неравномерного распределения комплексной амплитуды лазерного излучения на поверхности объекта и чувствительности МФД, а также от оптического контраста поверхности объекта.

Рассмотренная методология и алгоритмы при одинаковой мощности зондирующих импульсов позволяют в десятки раз увеличить дальность действия 3D-лидаров по сравнению с ToF-технологией на ос-

нове алгоритмов «Range gated imagers» и обеспечивают возможность реализации данной методологии на общедоступной элементной базе без необходимости применения специализированных интегральных TOF-процессоров.

### References

- [1] Katenin VA. Laser technologies in foreign naval forces [In Russian]. Expert Union 2012; 6: 30-36.
- [2] Baloev VN, Mishanin CC, Ovsyannikov VA, Yakubson CE, Yatsyk VC. Analysis of ways to improve the efficiency of ground-based optoelectronic observation complexes [In Russian]. Optl J 2012; 9(3): 22-32. DOI: 10.17586/1023-5086.
- [3] Letalick D, Ahlberg J, Andersson P, Chevalier T, Grönwal Ch, Larsson H, Persson A, Klasén L. 3-D imaging by laser radar and applications in preventing and combating crime and terrorism. 2004. Source: <<https://www.sto.nato.int/MP-SCI-158-16.pdf>>.
- [4] Busck J. Optical identification of sea-mines – Gated viewing three-dimensional laser radar. Technical University of Denmark; 2005. Source: <[https://backend.orbit.dtu.dk/backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/3429200/Afhandling\\_jbfinal.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/3429200/Afhandling_jbfinal.pdf)>.
- [5] Andersen JF, Busch J, Heiselberg H. Long distance high accuracy 3-D laser radar and person identification. Proc SPIE 2005; 5791. DOI: 10.1117/12.604345.
- [6] Van den Heuvel JC, Schoemaker RV, Schleijsen RHMA. Identification of air and sea-surface targets with a laser range profiler. Proc SPIE 2009; 7323: 73230Y. DOI: 10.1117/12.818426.
- [7] Schoemaker RM, Benoist KW. Characterisation of small targets in a maritime environment by means of laser range profiling. Proc SPIE 2011; 8037: 803705. DOI: 10.1117/12.884575.
- [8] Andersen JF, Busch J, Heiselberg H. Submillimeter 3-D laser radar for Spase Shuttle Tile inspection. Copenhagen, Denmark: Danisch Defense Research Establishment 2013. Source: <<https://stanfordcomputeroptics.com/download/Submillimeter%203-D%20Laser%20Radar%20for%20Space%20Shuttle%20Tile%20Inspection.pdf>>.
- [9] Steinvall O, Tulldahl M. Laser range profiling for small target recognition. Opt Eng 2017; 56(3): 031206. DOI: 10.1117/1.OE.56.3.031206.
- [10] Karasik VE, Orlov VM. Location laser vision systems [In Russian]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publisher; 2013.
- [11] Buryi EV. Pulse LIDARs: physical and informational base of new capabilities [In Russian]. Moscow: “Nauka” Publisher; 2020. ISBN: 978-5-02-040772-5.
- [12] Zege EP, Ivanov FP, Katsev IL. Image transfer through a scattering medium. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 1991. ISBN: 3540519785.
- [13] Ivanov VI, Ivanov NI. Method creasing the efficiency of laser active-pulsed vision systems for objects with quasi-zero optical contrast. J Appl Spectr 2022; 89(6): 858-868. DOI: 10.47612/0514-7506-2022-89-6-858-868.
- [14] Kostylev AA. Identification of a radar target when using ultra-wideband signals: methods and applications [In Russian]. Foreign Radio Electronics 1984; 4: 75-104.
- [15] Mitrofanov EV, Cherepenin VA. Radio vision of a target when probing with nanosecond pulses [In Russian]. Electromagnetic Waves and Electronic Systems 2015; 20(3): 46-58.

- [16] Labunets LV, Borzov AB, Akhmetov IM. Real-time models of pulsed reflective characteristics of 3D objects in a single-position laser location system [In Russian]. *Opt J* 2020; 87(9): 17-23. DOI: 10.17586/1023-5086.
- [17] Grinev AY, ed. Questions of subsurface location [In Russian]. Moscow: "Radio Engineering" Publisher; 2005.
- [18] Antonov A. Scanning laser rangefinders [In Russian]. *Modern Electronics* 2016; 1: 10-16.
- [19] Scanning laser rangefinders (LIDAR) [In Russian]. Source: <<https://solarlaser.com/wp-content/uploads/2020/11/LIDAR-SOLARLS-2020-10-10.pdf>>.
- [20] Hansard M, Seungkyu L, Ouk Ch, Horaud H. Time of flight cameras: Principles, methods, and applications. Springer; 2012. ISBN: 978-1-4471-4658-2.
- [21] Bai X, Hu Z, Zhu X, Huang Q, Chen Y, Fu H, Tai C-L. TransFusion: Robust LiDAR-camera fusion for 3D object detection with transformers. *arXiv Preprint*. 2022. Source: <<https://arxiv.org/abs/2203.11496>>.
- [22] Li Y, Yu AW, Meng T, Caine B, Ngiam J, Peng D, Shen J, Wu B, Lu Y, Zhou D, Le QV, Yuille A, Tan M. DeepFusion: Lidar-camera deep fusion for multi-modal 3D object detection. *arXiv Preprint*. 2022. Source: <<https://arxiv.org/pdf/2203.08195.pdf>>.
- [23] Ivanov VI, Ivanov NI. Long-range 3D imaging of highly dynamic objects using the intensity ratios of partial beams of reflected laser light. *Quantum Electron* 2018; 48(7): 679-682. DOI: 10.1070/QEL16612.
- [24] Ivanov VI, Ivanov NI. Investigation of the effect of noise parameters of 3D lidar on the error in estimating relief signatures of distant objects from 2D field intensity distributions of reflected radiation. *Quantum Electron* 2020; 50(11): 1068-1073. DOI: 10.1070/QEL17329.
- [25] Taylor J. An introduction to error analysis. University Science Books; 1982. ISBN: 9780935702071.
- [26] Matyukhin VV, Parinov DG, Tatarinova EA. Model noise photosensitive matrix Dalsa CM42M [In Russian]. *Appl Physics* 2017; 6: 60-67.
- [27] Irie K, McKinnon AE, Unsworth K, Woodhead IM. A technique for evaluation of CCD videocamera noise. *IEEE Trans Circuits Syst Video Technol* 2008; 18(2): 280-284.
- [28] Edwards S. Optimization of noise parameters of signal circuits. Part 2. Noise and distortion in data converters. *Electronic Components* 2013; 11: 19-25.
- [29] Coates K, Fowler B, Holst G. Elimination of restrictions when using a scientific CMOS CAMERA (SCMOS) [In Russian]. *Photonika* 2016; 58(4): 102-110.

### *Сведения об авторе*

**Иванов Владимир Игоревич** в 1983 году окончил Московский электротехнический институт связи (Московский технический университет связи и информатики), ведущий научный сотрудник НИИ ядерных проблем Белорусского государственного университета. Область научных интересов: радиофизика, включая квантовую радиофизику, дистанционная локационная диагностика объектов и сред, компьютерная обработка информации. Автор более 150 научных публикаций и 40 патентов на изобретения. E-mail: [ivanov.inp@gmail.com](mailto:ivanov.inp@gmail.com)

ГРНТИ: 28.23.15;47.49.43

Поступила в редакцию 8 марта 2023 г. Окончательный вариант – 3 ноября 2023 г.

---

# 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<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University,  
220006, Minsk, Belarus, Bobrujskaya Str. 11

## Abstract

A methodology and algorithms for obtaining long range 3D portraits of objects by 2D distributions of intensity of truncated realizations of reflected laser radiation are considered. The methodological and instrumental aspects of increasing the resolution of 3D portraits in terms of topography depth are investigated. Relationships between the relief resolution and optical contrast of the object surface are obtained. It is shown that the resolution can be less than 1 cm. Using the same probing pulse power, the proposed methodology and algorithms allow a tenfold increase in the range of 3D lidars compared to ToF (Time-of-Flight) technology based on the "Range-gated imagers" algorithms. The proposed scheme also provides the possibility of implementing this methodology using standard components without the need to use specialized integrated ToF processors.

**Keywords:** 3D-portraits, 3D-images, laser-location recognition.

**Citation:** Ivanov VI. Methodology and algorithms for obtaining long-range 3D-portraits of objects based on 2D-intensity distributions of truncated realizations of reflected laser radiation. *Computer Optics* 2024; 48(3): 386-396. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1301.

---

## Author's information

**Vladimir Igorevich Ivanov** graduated from the Moscow Electrotechnical Institute of Communications (Moscow Technical University of Communications and Informatics) in 1983, a leading researcher at the Research Institute of Nuclear Problems of the Belarusian State University. Research interests: radiophysics, including quantum radiophysics, remote location diagnostics of objects and environments. Author of more than 150 scientific publications and 40 patents for inventions. E-mail: [ivanov.inp@gmail.com](mailto:ivanov.inp@gmail.com)

---

*Received March 8, 2023. The final version – November 3, 2023.*

---