

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-1-31-39

УДК 535.2

Подход к получению изображений объектов на основе данных не прямой лазерной локации

Андрей Николаевич Григорьев¹, Александр Иванович Алтухов²,
 Денис Сергеевич Коршунов³✉

^{1,2,3} Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация

¹ Grig-AN@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6941-6475>

² aai_51@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4105-0296>

³ korshunov.denis@rambler.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6344-2533>

Аннотация

Предмет исследования. Предложен подход к получению изображений объектов на основе данных не прямой лазерной локации. Разработана концепция регистрации и обработки фотометрических данных об объекте, подразумевающая совместное использование оптического квантового генератора и камеры с фотоприемным устройством на основе однофотонных лавинных диодов. Регистрация рассеянного объектом оптического излучения выполняется при условии размещения объекта вне прямой видимости зондирующей аппаратуры, например, за светонепроницаемым препятствием. Обработка фотометрических данных направлена на моделирование формы объекта. **Методы.** Ведение не прямой лазерной локации подразумевает облучение объекта серией световых импульсов и последующую регистрацию рассеянного оптического излучения. Так как объект расположен вне прямой видимости зондирующей аппаратуры, световые импульсы распространяются от оптического квантового генератора до поверхности, переотражающей указанные импульсы в направлении исследуемого объекта. Фотометрические данные формируются в результате регистрации рассеянного объектом оптического излучения, распространяющегося в обратном направлении. Вертикальная и горизонтальная развертки изображения обеспечиваются перемещением лазерного луча во время сканирования пространства. Изображение объекта формируется в результате выполнения ряда последовательных операций по выделению из состава рассеянного оптического излучения фотометрических данных об объекте, расчета значений яркости и определения положений вокселей раstra в пространстве прямоугольной системы координат. **Основные результаты.** Разработана концептуальная модель не прямой лазерной локации на основе: импульсного лазера; сканирующей и фокусирующей оптических систем; камеры для регистрации рассеянного оптического излучения; устройства синхронизации времени генерации и регистрации световых импульсов. Предложен подход к обработке данных не прямой лазерной локации, обеспечивающий получение трехмерных изображений объектов. Приведены результаты эксперимента по формированию изображения объекта на основе открытых материалов лазерной локации. **Практическая значимость.** Использование комплекса не прямой лазерной локации позволяет получить изображения объектов в условиях отсутствия прямого зрительного контакта. Результаты эксперимента по формированию изображения показывают, что при размещении объекта за светонепроницаемым препятствием возможно получить достоверное представление о его структуре и форме. Изображение, полученное в соответствии с предложенным подходом, характеризуется высоким графическим подобием и является источником информации об объектах, доступ к которым затруднителен.

Ключевые слова

непрямая лазерная локация, оптическое излучение, трехмерное изображение объекта

Ссылка для цитирования: Григорьев А.Н., Алтухов А.И., Коршунов Д.С. Подход к получению изображений объектов на основе данных не прямой лазерной локации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 1. С. 31–39. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-1-31-39

Approach to getting images of objects based on indirect laser location data

Andrey N. Grigor'ev¹, Alexander I. Altuchov², Denis S. Korshunov³

^{1,2,3} Mozhaysky Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation

¹ Grig-AN@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6941-6475>

² aai_51@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4105-0296>

³ korshunov.denis@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6344-2533>

Abstract

Subject of Research. The paper presents an approach to obtaining images of objects based on indirect laser location data. The concept of recording and processing photometric data about an object is developed, which implies the joint usage of an optical quantum generator and a camera with a photodetector based on single-photon avalanche diodes. Registration of an optical radiation scattered by an object is performed if the object is placed outside the sight line of the probing equipment, for example, behind a light-tight obstacle. Photometric data processing is aimed at the object shape modeling. **Methods.** Indirect laser location involves irradiation of an object with a series of light pulses and registration of scattered optical radiation. Since the object is located outside the sight line of the probing equipment, light pulses are propagated from the optical quantum generator to the surface that re-reflects these pulses in the direction of the object under study. Photometric data are formed as a registration result of optical radiation scattered by the object, propagating in the opposite direction. Vertical and horizontal scanning of the image is provided by the laser beam movement during the scanning of space. The object image is formed as a result of a series of sequential operations to extract photometric data about the object from the scattered optical radiation, calculate brightness values, and determine the positions of the raster voxels in the space of a rectangular coordinate system. **Main Results.** A conceptual model of indirect laser location is developed based on: a pulsed laser, scanning and focusing optical systems, a camera for scattered optical radiation recording, time synchronization device for generation and registration of light pulses. An approach is proposed to the processing of indirect laser location data, which provides three-dimensional images of objects. An experiment results are presented on the formation of an object image based on open materials of laser location. **Practical Relevance.** The indirect laser location system application gives the possibility to get object images in the absence of direct eye contact. The results of the image formation experiment demonstrate that when an object is placed behind a light-tight obstacle, it is possible to get a reliable idea of its structure and shape. The image obtained in accordance with the proposed approach is characterized by high graphic similarity and is a source of information about objects that are difficult to access.

Keywords

non-direct laser location, optical radiation, three-dimensional object image

For citation: Grigor'ev A.N., Altuchov A.I., Korshunov D.S. Approach to getting images of objects based on indirect laser location data. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 31–39 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-1-31-39

Введение

Появление фотоприемных устройств, способных регистрировать единичные фотоны, открывает путь к совершенствованию комплексов лазерной локации. Главное достоинство усовершенствованных комплексов — наличие режима получения изображений объектов, расположенных вне зоны прямой видимости зондирующей аппаратуры [1–6]. Непрямая лазерная локация базируется на идее регистрации оптического излучения, рассеянного объектом на окружающие его поверхности. Очевидно, что многократное рассеяние потока оптического излучения сопровождается уменьшением его плотности. По этой причине для регистрации оптического излучения второго и более высокого порядков необходимо использовать камеру, фотоприемное устройство (ФПУ) которой создано на основе однофотонных лавинных диодов (ОЛД) [6–10]. В отличие от комплементарной структуры металл-оксид-полупроводник (КМОП), используемой для изготовления ФПУ современных камер, структура ОЛД подразумевает применение фотоэлектронного умножителя, преобразующего единичные фотоны в «лаvinу» электронов. Например, на один фотон может приходиться до 1 млн электронов, что говорит о возможности получения экспозиции, требуемой для

формирования изображения, даже на основе единичных фотонов [11]. Также ФПУ на основе ОЛД обеспечивают более высокую частоту получения кадров. Временное разрешение современных ФПУ достигает 100 пс. Примеры изображений, полученные в результате регистрации оптических сигналов малой интенсивности с использованием КМОП- и ОЛД-камер, приведены на рис. 1.

Изображения на рис. 1, б сформированы на основе единичных фотонов, падающих на поверхность ФПУ в результате многократного рассеяния потока оптического излучения, что подтверждает практическую возможность создания комплексов непрямо́й лазерной локации. Такие комплексы могут использоваться в системах дистанционного зондирования Земли воздушного и орбитального базирования, что позволит получать более широкий набор данных о местности. Развитие технологий непрямо́й лазерной локации обуславливает необходимость разработки новых подходов к ведению съемки объектов, расположенных вне зоны прямой видимости зондирующей аппаратуры, а также создания решений в части обработки данных лазерной локации с целью формирования изображений объектов [1–10]. В частности, под изображением понимается растр, состоящий из вокселей, каждому из которых строго определено положение в пространстве трехмерной

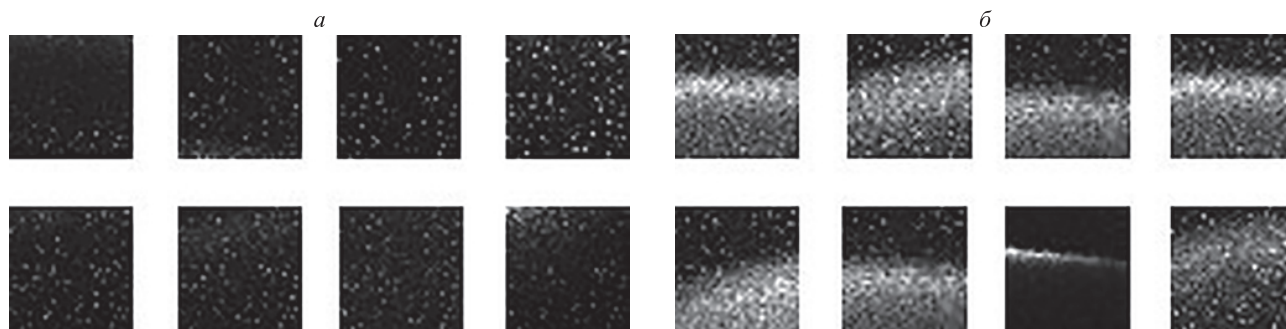


Рис. 1. Изображения фронта сферической световой волны, полученные с использованием камер: на основе комплементарной структуры металл-оксид-полупроводник (а); на основе однофотонных лавинных диодов (б)

Fig. 1. Images of the spherical light wave front obtained using cameras: complementary metal-oxide-semiconductor structure (a); single-photon avalanche diodes (b)

прямоугольной системы координат и задано уникальное значение яркости.

В настоящей работе предложен подход к получению изображений объектов, расположенных вне зоны прямой видимости оптико-электронной камеры, на основе данных не прямой лазерной локации. Данный подход находит применение при невозможности установления зрительного контакта с исследуемым объектом, например, при его размещении за светонепроницаемым препятствием. Реализация подхода предполагает решение двух задач:

1) разработку концепции ведения не прямой лазерной локации;

2) разработку подхода к обработке данных, полученных в результате регистрации рассеянного оптического излучения.

Концептуальная модель не прямой лазерной локации

С высокой графической точностью получить изображение объекта можно используя комплекс технических средств, включающий в свой состав (рис. 2): импульсный лазер; сканирующую и фокусирующую оптические системы; камеру для регистрации рассеянного оптического излучения с одноэлементным

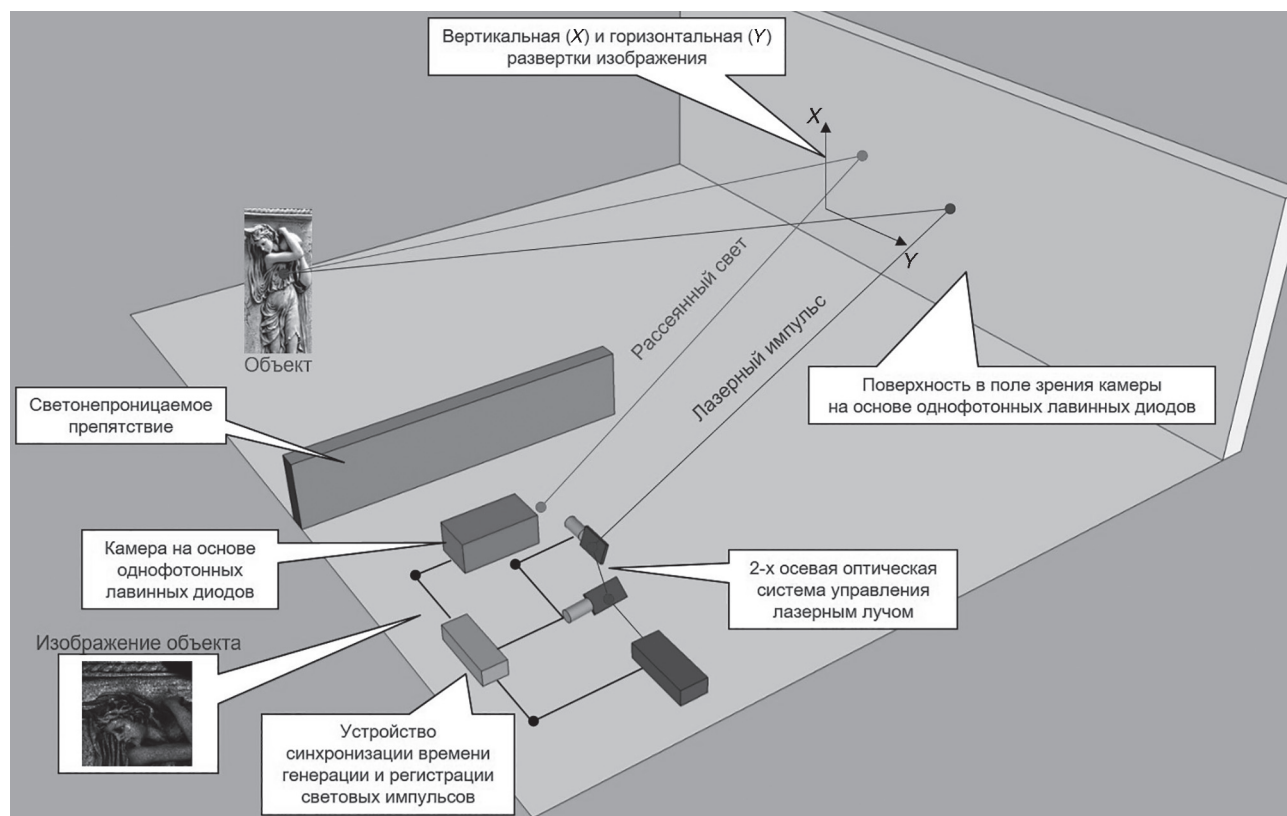


Рис. 2. Концептуальная модель комплекса не прямой лазерной локации

Fig. 2. Conceptual model of the indirect laser location complex

ФПУ на основе ОЛД; устройство синхронизации времени генерации и регистрации световых импульсов. Формирование изображения объекта, расположенного вне зоны прямой видимости оптико-электронной камеры, выполняется на основе результатов обработки фотометрических и пространственно-временных данных, извлекаемых из световых волн третьего порядка.

Согласно рис. 2, объект съемки расположен за светонепроницаемым препятствием, что исключает возможность его нахождения в зоне прямой видимости оптико-электронной камеры. Для получения изображения такого объекта проводится облучение поверхности серией световых импульсов, с которой у объекта соблюдается условие прямой видимости. Источником оптического излучения является пикосекундный лазер, например, «Alphalas Picorpower-LD-450-50», средняя мощность которого составляет 0,406 мВт при частоте импульсов 10 МГц на длине волны 450 нм [1]. Формирование горизонтальной и вертикальной разверток изображения достигается путем перемещения линии визирования лазера с использованием сканирующей оптики, представленной системой вращающихся зеркал. Управление зеркалами осуществляется с помощью двухосевого роторного механизма, примером которого может служить устройство «Thorlabs GVS012» [1].

Облученная поверхность, являясь источником вторичных световых волн, рассеивает оптическое излучение в пространство равномерно во всех направлениях (рис. 3, а). При этом часть фронта световой волны проникает в пространство за светонепроницаемым препятствием, где расположен скрытый объект. В результате рассеяния оптического излучения объектом формиру-

ются световые волны третьего порядка, распространение которых происходит в обратном направлении (рис. 3, б). Фотоны в составе рассеянного объектом оптического излучения, достигая поверхности, расположенной в зоне прямой видимости оптико-электронной камеры, регистрируются ФПУ.

Линейное поле наблюдаемого пространства определяется параметрами оптической системы, представленной совокупностью линз, фокусирующих рассеянное излучение на поверхности ФПУ. Примером регистрирующей аппаратуры, используемой в комплексах не прямой лазерной локации, служит камера «Micro Photon Devices PD-100-CTD» с одноэлементным ФПУ на основе ОЛД площадью 100×100 мкм и временным разрешением ≈ 27 пс [1]. В процессе регистрации рассеянного оптического излучения ведется подсчет количества фотонов, и ставятся отметки времени измерений.

Результатом сканирования пространства является массив значений, представленный в виде двумерной матрицы $A = \|a_{mj}\|$, элементы которой характеризуют количество зарегистрированных фотонов в моменты измерений. Количество столбцов матрицы A соответствует количеству вокселей m формируемого растрового изображения. Количество строк матрицы A соответствует количеству измерений t , выполненных при фиксированном положении лазерного луча, направление которого задается через вертикальный α и горизонтальный β углы сканирования. Таким образом, количество элементов в матрице A определяется из соотношения $a = mt$, где $m = \sum_i \sum_j j$; i — столбец растрового изображения; j — строка растрового изображения.

Площадь поля сканируемого пространства определяется площадью и количеством световых пучков,

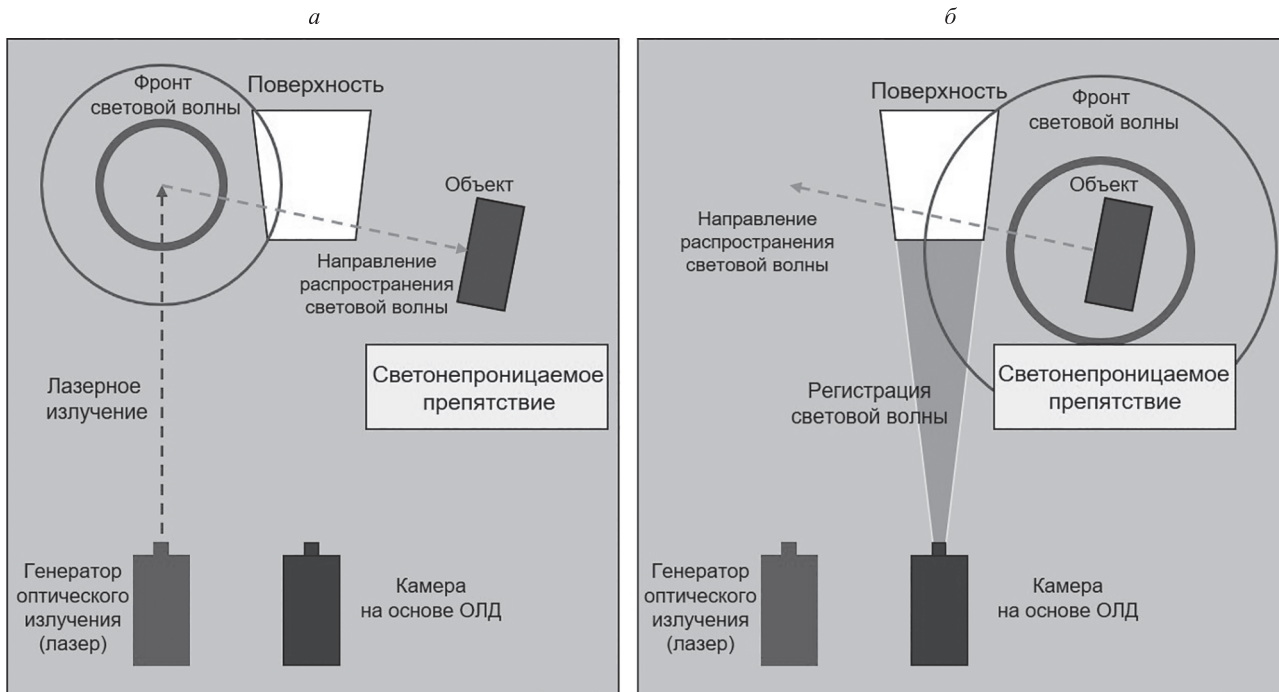


Рис. 3. К вопросу ведения не прямой лазерной локации: генерация световых волн, облучающих объект (а); рассеянные световые волны, регистрируемые камерой (б)

Fig. 3. On the issue of conducting indirect laser location: generation of light waves irradiating the object (a); scattered light waves recorded by the camera (b)

образуемых лазерным лучом в результате перемещения по горизонтали и вертикали:

$$S_{\Delta} = \Delta_x \Delta_y, \Delta_x = \frac{dc(t_1 - t_0)}{f} \sum i, \Delta_y = \frac{dc(t_1 - t_0)}{f} \sum j,$$

где S_{Δ} — площадь поля сканируемого пространства; Δ_x и Δ_y — длины горизонтальной и вертикальной сторон поля сканируемого пространства соответственно; d — диаметр лазерного луча; c — скорость света; t_0 — время начала генерации лазерных импульсов; t_1 — время начала регистрации рассеянного оптического излучения; f — расстояние от источника излучения до сканирующей оптики.

Ведение не прямой лазерной локации в соответствии с предложенным подходом позволяет получить набор данных, на основе которого возможно сформировать плановое изображение объекта и описать его форму.

Обработка данных не прямой лазерной локации

Формирование изображений объектов выполняется на основе данных о величине зарядовых пакетов, времени их регистрации и параметров работы комплекса не прямой лазерной локации. Суть обработки указанных данных сводится к последовательному решению задач: выделение из состава рассеянного оптического излучения фотометрических данных об объекте; расчет значений яркости вокселя; распределение вокселей в пространстве прямоугольной системы координат $OXYZ$.

Камера регистрирует рассеянное оптическое излучение как скрытым объектом, так и окружающими его поверхностями. На первом этапе формирования изображения из состава зарядовых пакетов выделяются фотоны, рассеянные объектом. Решение данной задачи выполняется путем сравнения характеристик разновре-

менных оптических сигналов при условии, что первая группа сигналов получена от фоно-целевой обстановки, а вторая, только от фоновой обстановки. Согласно концепции ведения не прямой лазерной локации (рис. 2, 3), сигналы регистрируются в условиях статического положения лазерного луча. Это дает возможность построить гистограмму, показывающую изменение количества электронов e в зарядовом пакете на интервале времени регистрации сигнала от t_1 до t_2 . Количество таких гистограмм соответствует сумме статических положений лазерного луча и количеству вокселей формируемого растра m . Наглядно суть процедуры сравнения разновременных гистограмм оптических сигналов на примере одного статического положения лазерного луча показана на рис. 4.

Математически результат сравнения разновременных гистограмм оптических сигналов можно представить, как разность матриц одинаковой размерности [12]:

$$\|\mathbf{a}_{mt}^{\Delta}\| = \|\mathbf{a}_{mt}^2\| - \|\mathbf{a}_{mt}^1\|,$$

где $\|\mathbf{a}_{mt}^{\Delta}\|$, $\|\mathbf{a}_{mt}^2\|$, $\|\mathbf{a}_{mt}^1\|$ — матрицы, характеризующие оптическое излучение, рассеянное объектом, фоно-целевой обстановкой и фоном соответственно.

На основе фотометрических данных об объекте рассчитываются значения яркости вокселей растра [11, 12]. В терминах математической статистики яркость вокселя можно выразить через выборочное среднее, которое используется для статистической оценки математического ожидания случайной величины:

$$\bar{e}_m = \frac{1}{k} \sum_{t=1}^k e_{t,m},$$

где \bar{e}_m — среднее количество электронов, зарегистрированное ФПУ; k — количество измерений; $e_{t,m}$ — ко-

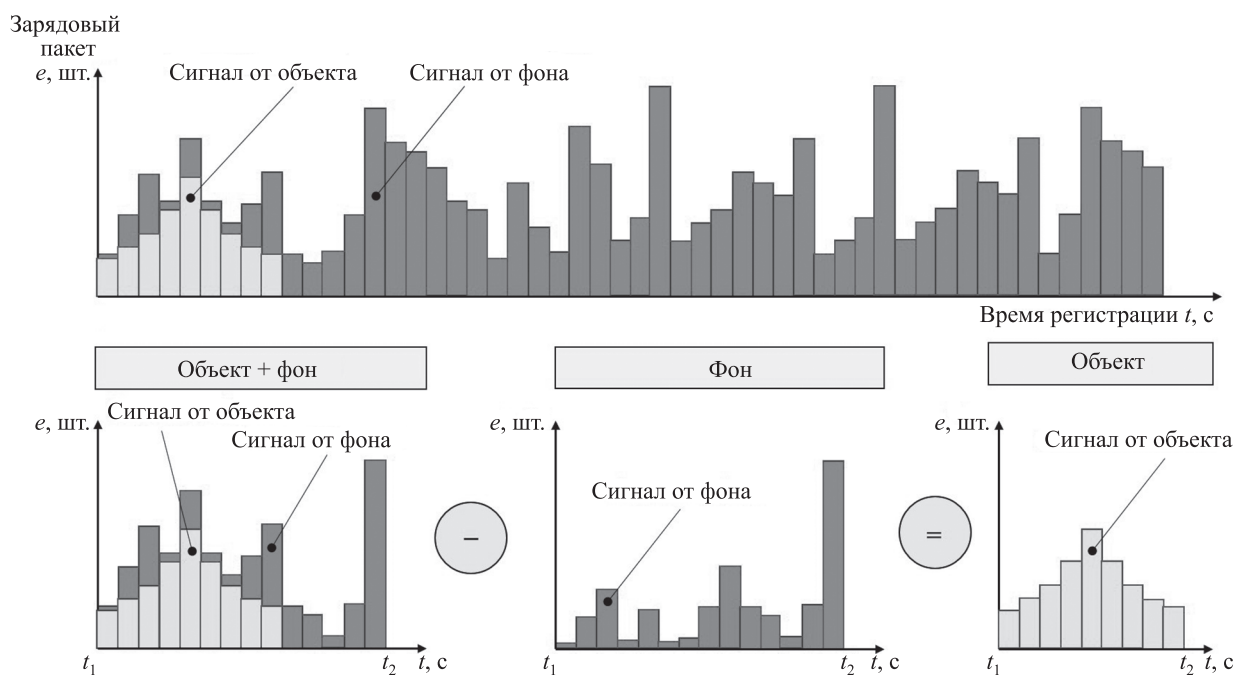


Рис. 4. Выделение из состава рассеянного оптического излучения фотометрических данных об объекте

Fig. 4. Isolation of photometric data about the object from composition of scattered optical radiation

личество электронов в измеренном зарядовом пакете; t — время измерения; m — столбец матрицы $\|\mathbf{a}_{mt}\|$. Также яркость вокселя можно определить путем последовательного сравнения высоты бинов гистограммы, каждый из которых характеризует величину зарядового пакета на определенный момент времени. Выбор бина, характеризующего максимальный зарядовый пакет, выполняется с учетом правила:

$$e_m = bin_{t,m} - bin_{t,m-1} \geq bin_{t,m-1} - bin_{t,m-2} \geq \dots \\ \dots \geq bin_{t,m-\Delta t} - bin_{t,m-(\Delta t+1)},$$

где e_m — максимальное измеренное количество электронов; $bin_{t,m}$ — измеренный бин гистограммы; $bin_{t,m}$, $bin_{t,m-1}$, $bin_{t,m-2}$, $bin_{t,m-\Delta t}$, $bin_{t,m-(\Delta t+1)}$ — ранее измеренные бины гистограммы; t и Δt — время измерения очередного и предшествующего бинов соответственно. Расчет значений яркости вокселей выполняется по формуле:

$$B_m = \frac{B_{\max} \bar{e}_m}{e_{\max}},$$

где B_m — яркость вокселя; B_{\max} — максимальная яркость раstra; e_{\max} — количество фотонов, соответствующее максимальной яркости раstra \bar{e}_m .

На заключительном этапе формирования изображения определяется положение вокселей раstra в про-

странстве прямоугольной системы координат $OXYZ$. Решение этой задачи выполняется путем ее декомпозиции: определяются аппликаты вокселей относительно оси OZ , рассчитываются плановые координаты вокселей в плоскости OXY . Исходными данными для расчета аппликат вокселей является время регистрации оптического излучения ФПУ, которое определяется по формуле нормального распределения Гаусса, используемой в математической статистике для оценки плотности распределения случайной величины [13–15]:

$$f(t_m) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t_m - \bar{t})^2}{2\sigma^2}\right),$$

где t_m — время измерения; \bar{t} — среднее время измерений; σ — среднее квадратичное отклонение; σ^2 — значение выборочной дисперсии. Числовое значение, соответствующее пику гауссианы, принимается за искоемое время регистрации оптического излучения ФПУ, что позволяет выразить значение аппликаты вокселя по формуле:

$$Z_m = cT_m, \tag{1}$$

где Z_m — аппликата вокселя в пространстве системы координат $OXYZ$; $T_m = t_m - t_0$ — время распространения оптического излучения от источника до регистрирующей аппаратуры.

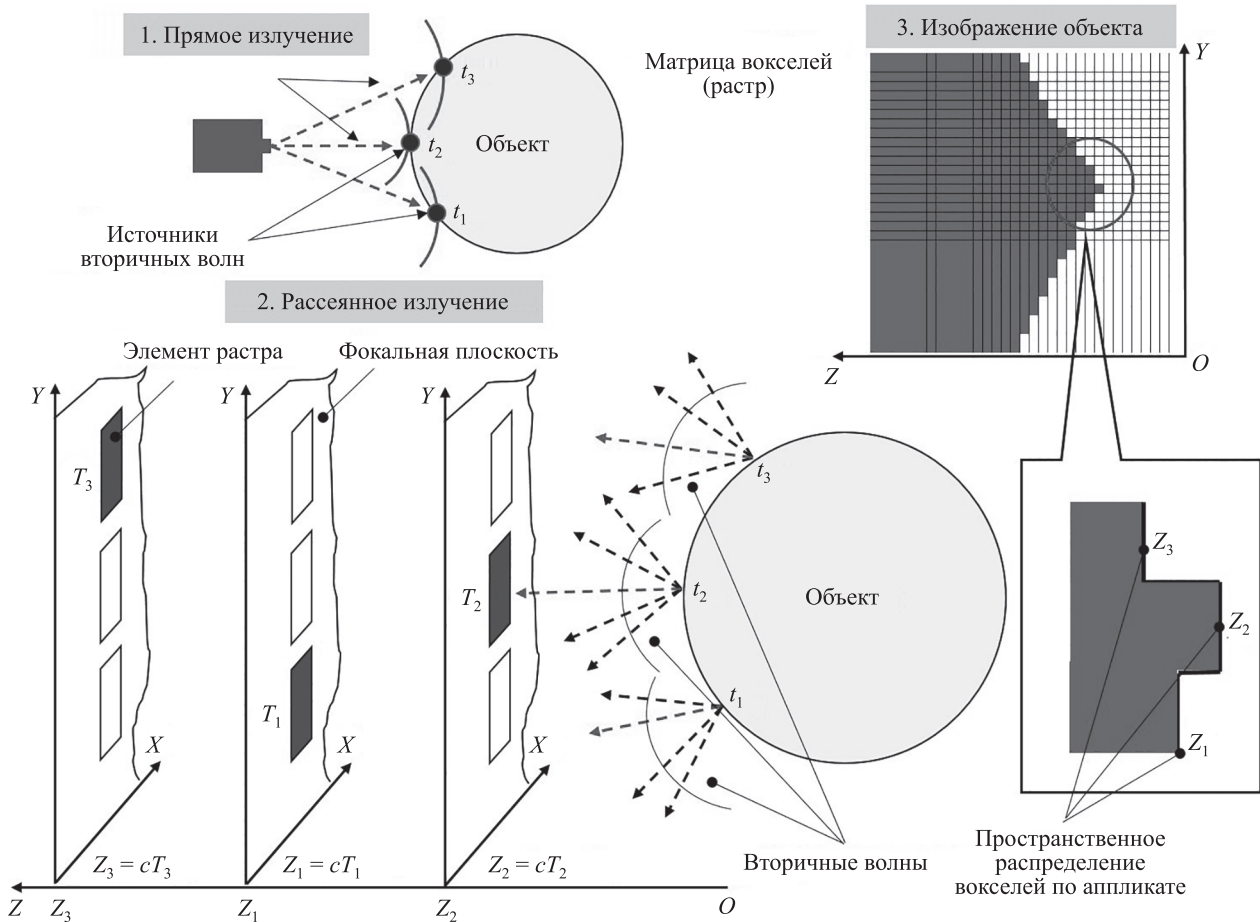


Рис. 5. К вопросу определения аппликат вокселей
Fig. 5. On the determination question of voxel applicates

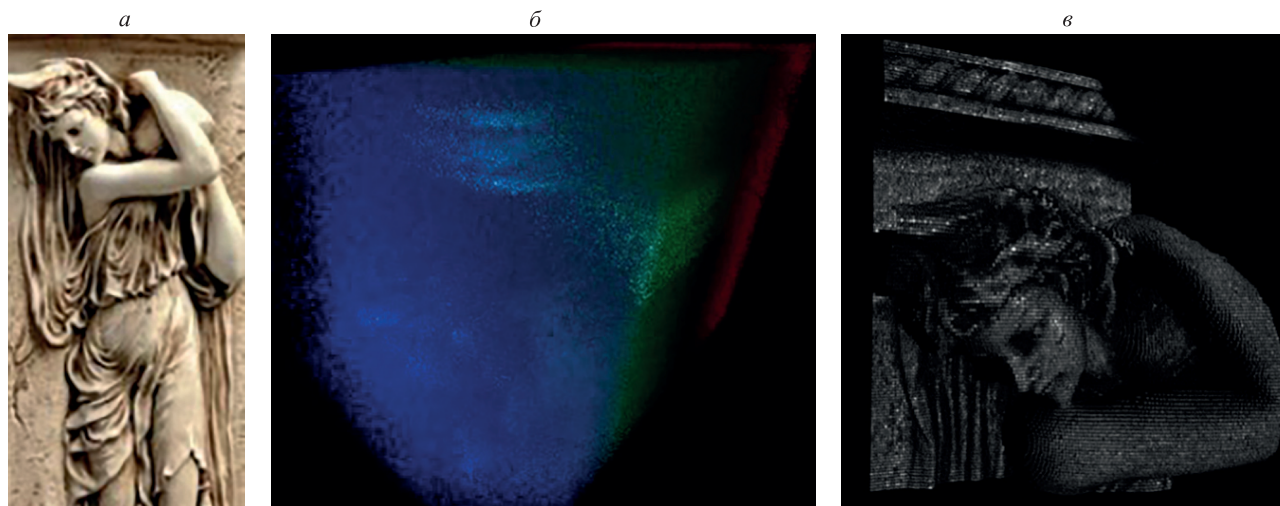


Рис. 6. Результаты обработки данных непрямой лазерной локации: сканируемый объект (а); пространственно-яркостная картина (б); трехмерное изображение объекта (в)

Fig. 6. Results of indirect laser location data processing: scanning object (a); spatial brightness pattern (b); three-dimensional object image (c)

Разница в значениях аппликат вокселей объясняется тем, что рассеяние оптического излучения разными участками поверхности объекта происходит неодновременно. На примере трех точек, лежащих на поверхности объекта (рис. 5), можно наблюдать, что фронт световой волны, генерируемой оптическим квантовым генератором, достигает указанных точек в разные моменты времени t_1, t_2, t_3 . Временная задержка, наблюдаемая при формировании оптических сигналов от объекта, определяет разницу во времени их регистрации ФПУ T_1, T_2, T_3 и, как следствие, разницу в значениях аппликат вокселей Z_1, Z_2, Z_3 в пространстве системы координат $OXYZ$.

Полученные значения аппликат Z_m служат исходными данными для определения плановых координат вокселей относительно плоскости $OXYZ$. Учитывая, что строки матрицы $\|a_{m\Delta}^{\Delta}\|$ могут быть представлены в виде $m = \sum_i \sum_j$, то формулы для расчета плановых координат вокселей можно выразить следующим образом:

$$X_i = \tan(\beta_i)Z_{i,j}; Y_j = \tan(\alpha_j)Z_{i,j}, \quad (2)$$

где X_i, Y_j — абсцисса и ордината вокселя в пространстве системы координат соответственно; α_j, β_i — вертикальный и горизонтальный углы разворота сканирующей системы соответственно; i, j — столбец и строка раstra соответственно. Результатирующим выражением, обеспечивающим связь между яркостью вокселя B_m и его положением в пространстве системы координат $OXYZ$, является формула наклонной дальности $D_{i,j}$, которая с учетом формул (1) и (2), имеет вид:

$$D_{i,j} = \sqrt{(\tan(\beta_i)c(t_{i,j} - t_0))^2 + (\tan(\alpha_j)c(t_{i,j} - t_0))^2 + (c(t_{i,j} - t_0))^2},$$

где $D_{i,j}$ — наклонная дальность в пространстве системы координат $OXYZ$; $t_{i,j}$ — время регистрации рассеянного оптического излучения ФПУ; t_0 — время генерации прямого оптического излучения лазером.

Применение комплекса непрямой лазерной локации, в соответствии с предложенной концепцией ведения

съемки и последующей обработки данных дистанционного зондирования, обеспечивает получение трехмерных растровых изображений объектов, пригодных для интерпретации оператором. Пример такого изображения (рис. 6) получен на основе открытых материалов лазерной локации [1, 6]. Выбор исходных данных для моделирования выполнен таким образом, чтобы имитировать предложенный подход к получению изображений объектов на основе данных непрямой лазерной локации.

Малый угол расходимости лазерного луча при увеличении расстояния до объекта и сканировании пространства с использованием отражающих поверхностей определяет высокое пространственное разрешение формируемых изображений. Высокие частота кадров и светочувствительность ФПУ на основе ОЛД обеспечивают возможность воссоздания не только двумерного изображения объекта, но и моделирование его формы, что открывает доступ к дополнительному набору дешифровочных признаков, используемых при интерпретации снимков.

Заключение

В работе предложен подход к получению изображений объектов, расположенных вне зоны прямой видимости оптико-электронной камеры. Подход основан на идее ведения непрямой лазерной локации и последующей обработке фотометрических данных. В частности, вести непрямую лазерную локацию предлагается с использованием специального комплекса, включающего в свой состав аппаратуру, генерирующую узконаправленное оптическое излучение, сканирующую оптическую систему, регистрирующую оптико-электронную камеру, фотоприемное устройство которой создано на основе однофотонных лавинных диодов. Выбор подобной элементной базы, обеспечивает высокое временное разрешение съемки и экспозицию, требуемую для формирования изображений, пригодных для интерпретации.

Изображение, полученное в соответствии с предложенным подходом, характеризуется высоким графическим подобием и является источником информации о форме и размерах объекта. Формирование изображения подразумевает выполнение ряда процедур по выделению из состава рассеянного оптического излучения фотометрических данных об объекте, расчету значений яркости вокселей растра и распределению вокселей в пространстве трехмерной прямоугольной системы координат.

Целесообразность использования предложенного подхода подтверждается результатами эксперимента по созданию изображений на основе открытых данных непрямо́й лазерной локации. Результаты эксперимента показали, что в условиях размещения объекта за светонепроницаемым препятствием возможно получить изображение, которое с высоким графическим подобием отражает его структуру и форму.

Литература

1. Heide F., Diamond S., Lindell D.B., Wetzstein G. Sub-picosecond photon-efficient 3D imaging using single-photon sensors // *Scientific Reports*. 2018. V. 8. P. 17726. doi: 10.1038/s41598-018-35212-x
2. McCarthy A., Krichel N., Gemmell N., Ren X., Tanner M., Dorenbos S., Zwiller V., Hadfield R., Buller G. Kilometer-range, high resolution depth imaging via 1560 nm wavelength single-photon detection // *Optics Express*. 2013. V. 21. N 7. P. 8904–8915. doi: 10.1364/OE.21.008904
3. Pawlikowska A., Halimi A., Lamb R., Buller G. Single-photon three-dimensional imaging at up to 10 kilometers range // *Optics Express*. 2017. V. 25. N 10. P. 11919–11931. doi: 10.1364/OE.25.011919
4. Shin D., Kirmani A., Goyal V.K., Shapiro J.H. Photon-efficient computational 3-D and reflectivity imaging with single-photon detectors // *IEEE Transactions on Computational Imaging*. 2015. V. 1. N 2. P. 112–125. doi: 10.1109/TCLI.2015.2453093
5. Warburton R., Aniculaesei C., Clerici M., Altmann Y., Garipey G., McCracken R., Reid D., McLaughlin S., Petrovich M., Hayes J., Henderson R., Faccio D., Leach J. Observation of laser pulse propagation in optical fibers with a SPAD camera // *Scientific Reports*. 2017. V. 7. P. 43302. doi: 10.1038/srep43302
6. Garipey G., Krstajić N., Henderson R., Li C., Thomson R.R., Buller G.S., Heshmat B., Raskar R., Leach J., Faccio D. Single-photon sensitive light-in-flight imaging // *Nature Communications*. 2015. V. 6. P. 6021. doi: 10.1038/ncomms7021
7. Garipey G., Tonolini F., Henderson R., Leach J., Faccio D. Detection and tracking of moving objects hidden from view // *Nature Photonics*. 2016. V. 10. P. 23–26. doi: 10.1038/nphoton.2015.234
8. Chen Z., Liu B., Guo G. Adaptive single photon detection under fluctuating background noise // *Optics Express*. 2020. V. 28. N 20. P. 30199–30209. doi: 10.1364/OE.404681
9. Korotaev V.V., Maraev A.A. *Sources and detectors of optical radiation*. St. Petersburg: ITMO University, 2017. 104 p.
10. Горбачёв А.А., Коротаев В.В., Ярышев С.Н. Твердотельные матричные фотопреобразователи и камеры на их основе. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 98 с.
11. Buttafava M., Zeman J., Tosi A., Eliceiri K., Velten A. Non-line-of-sight imaging using a time-gated single photon avalanche diode // *Optics Express*. 2015. V. 23. N 16. P. 20997–21011. doi: 10.1364/OE.23.020997
12. Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D и 3D изображений: учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 608 с.
13. Алтухов А.И., Шабakov Е.И., Коршунов Д.С. Метод повышения контраста изображений в условиях съемки Земли из космоса // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018. Т. 18. № 4. С. 573–580. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-573-580
14. Vasilev A.S., Korotaev V.V. Research of the fusion methods of the multispectral optoelectronic systems images // *Proceedings of SPIE*. 2015. V. 9530. P. 953007. doi: 10.1117/12.2184554
15. Velten A., Willwacher T., Gupta O., Veeraraghavan A., Bawendi M.G., Raskar R. Recovering three-dimensional shape around a corner using ultrafast time-of-flight imaging // *Nature Communications*. 2012. V. 3. P. 745. doi: 10.1038/ncomms1747

References

1. Heide F., Diamond S., Lindell D.B., Wetzstein G. Sub-picosecond photon-efficient 3D imaging using single-photon sensors. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, pp. 17726. doi: 10.1038/s41598-018-35212-x
2. McCarthy A., Krichel N., Gemmell N., Ren X., Tanner M., Dorenbos S., Zwiller V., Hadfield R., Buller G. Kilometer-range, high resolution depth imaging via 1560 nm wavelength single-photon detection. *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 7, pp. 8904–8915. doi: 10.1364/OE.21.008904
3. Pawlikowska A., Halimi A., Lamb R., Buller G. Single-photon three-dimensional imaging at up to 10 kilometers range. *Optics Express*, 2017, vol. 25, no. 10, pp. 11919–11931. doi: 10.1364/OE.25.011919
4. Shin D., Kirmani A., Goyal V.K., Shapiro J.H. Photon-efficient computational 3-D and reflectivity imaging with single-photon detectors. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2015, vol. 1, no. 2, pp. 112–125. doi: 10.1109/TCLI.2015.2453093
5. Warburton R., Aniculaesei C., Clerici M., Altmann Y., Garipey G., McCracken R., Reid D., McLaughlin S., Petrovich M., Hayes J., Henderson R., Faccio D., Leach J. Observation of laser pulse propagation in optical fibers with a SPAD camera. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, pp. 43302. doi: 10.1038/srep43302
6. Garipey G., Krstajić N., Henderson R., Li C., Thomson R.R., Buller G.S., Heshmat B., Raskar R., Leach J., Faccio D. Single-photon sensitive light-in-flight imaging. *Nature Communications*, 2015, vol. 6, pp. 6021. doi: 10.1038/ncomms7021
7. Garipey G., Tonolini F., Henderson R., Leach J., Faccio D. Detection and tracking of moving objects hidden from view. *Nature Photonics*, 2016, vol. 10, pp. 23–26. doi: 10.1038/nphoton.2015.234
8. Chen Z., Liu B., Guo G. Adaptive single photon detection under fluctuating background noise. *Optics Express*, 2020, vol. 28, no. 20, pp. 30199–30209. doi: 10.1364/OE.404681
9. Korotaev V.V., Maraev A.A. *Sources and detectors of optical radiation*. St. Petersburg, ITMO University, 2017, 104 p.
10. Gorbachev A.A., Korotaev V.V., Yaryshev S.N. *Solid-State Matrix Photoconverters and Cameras Based on Them*. St. Petersburg, NIU ITMO, 2013, 98 p. (in Russian)
11. Buttafava M., Zeman J., Tosi A., Eliceiri K., Velten A. Non-line-of-sight imaging using a time-gated single photon avalanche diode. *Optics Express*, 2015, vol. 23, no. 16, pp. 20997–21011. doi: 10.1364/OE.23.020997
12. Krasilnikov N.N. *Digital Processing of 2D and 3D Images*. St. Petersburg, BHV Publ., 2011, 608 p. (in Russian)
13. Altukhov A.I., Shabakov E.I., Korshunov D.S. A method of images contrast enhancement under conditions of the Earth survey from space. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 573–580. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-573-580
14. Vasilev A.S., Korotaev V.V. Research of the fusion methods of the multispectral optoelectronic systems images. *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9530, pp. 953007. doi: 10.1117/12.2184554
15. Velten A., Willwacher T., Gupta O., Veeraraghavan A., Bawendi M.G., Raskar R. Recovering three-dimensional shape around a corner using ultrafast time-of-flight imaging. *Nature Communications*, 2012, vol. 3, pp. 745. doi: 10.1038/ncomms1747

Авторы

Григорьев Андрей Николаевич — доктор технических наук, доцент, доцент, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, [sc 57200211777](https://orcid.org/0000-0001-6941-6475), Grig-AN@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6941-6475>

Алтухов Александр Иванович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, [sc 57217053398](https://orcid.org/0000-0002-4105-0296), aai_51@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4105-0296>

Коршунов Денис Сергеевич — кандидат технических наук, старший преподаватель, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, [sc 57195312804](https://orcid.org/0000-0001-6344-2533), korshunov.denis@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6344-2533>

Authors

Andrey N. Grigor'ev — D.Sc., Associate Professor, Associate Professor, Mozhaysky Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, [sc 57200211777](https://orcid.org/0000-0001-6941-6475), Grig-AN@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6941-6475>

Alexander I. Altukhov — PhD, Associate Professor, Head of Chair, Mozhaysky Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, [sc 57217053398](https://orcid.org/0000-0002-4105-0296), aai_51@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4105-0296>

Denis S. Korshunov — PhD, Senior Lecturer, Mozhaysky Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, [sc 57195312804](https://orcid.org/0000-0001-6344-2533), korshunov.denis@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6344-2533>

Статья поступила в редакцию 08.12.2020
Одобрена после рецензирования 30.12.2020
Принята к печати 23.01.2021

Received 08.12.2020
Approved after reviewing 30.12.2020
Accepted 23.01.2021



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»