

## ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-311-319

УДК 535.2

### Концепция фотограмметрической обработки данных непрямо́й оптической лока́ции

Андрей Николаевич Григорьев<sup>1</sup>, Александр Иванович Алтухов<sup>2</sup>,  
 Денис Сергеевич Коршунов<sup>3</sup>✉

<sup>1,2,3</sup> Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация

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

<sup>2</sup> aai\_51@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4105-0296>

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

#### Аннотация

**Предмет исследования.** Предложена концепция получения изображений исследуемых объектов на основе данных непрямо́й оптической лока́ции. Цель концепции — повышение графического подобия изображений исследуемых объектов и придание им измерительных свойств. Для достижения поставленной цели сформулирован подход к фотограмметрической обработке кадровых изображений, полученных путем ведения непрямо́й оптической лока́ции. **Методы.** Графическое подобие изображений предложено повысить с помощью выделения из состава зарегистрированного оптического излучения фотометрических данных, относящихся к объекту и фону. На основе выделенных данных выполнена статистическая оценка выборочного среднего значения интенсивности оптического излучения от указанных источников. Полученные оценки использованы для формирования монохромного цифрового изображения. Добавление измерительных свойств выполнено путем преобразования координат цифрового изображения в относительные координаты, имеющие метрическое выражение. **Основные результаты.** Определена причина снижения графического подобия изображений, сформированных на основе данных непрямо́й оптической лока́ции. Сложение световых волн от различных источников, за отведенное время экспонирования фотоприемного устройства, ведет к слиянию объекта и фона на результирующем изображении. Разработан подход к разделению фотометрических данных от различных источников, основанный на наблюдении за разностью фаз излучаемых и регистрируемых световых волн. Создан математический аппарат привязки полученных изображений к относительной системе координат, адаптированный для случая непрямо́й оптической лока́ции. Предложен подход к ведению непрямо́й оптической лока́ции с использованием специального оптико-электронного комплекса. Определены требования к аппаратуре оптико-электронного комплекса, генерирующего и регистрирующего оптическое излучение с требуемыми параметрами. Получены результаты эксперимента по формированию изображений с измерительными свойствами, подтверждающие целесообразность использования предложенной концепции обработки данных. **Практическая значимость.** Ведение непрямо́й оптической лока́ции открывает путь к получению изображений местности недоступной для человека. Результаты эксперимента демонстрируют, что использование предложенной концепции обеспечивает получение снимков объекта, размещенного за светонепроницаемым препятствием, которые характеризуются наличием измерительных свойств и с высоким графическим подобием отражают детали исследуемого объекта.

#### Ключевые слова

непрямо́й оптической лока́ция, оптическое излучение, трехмерное изображение

**Ссылка для цитирования:** Григорьев А.Н., Алтухов А.И., Коршунов Д.С. Концепция фотограмметрической обработки данных непрямо́й оптической лока́ции // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 3. С. 311–319. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-311-319

**An approach to photogrammetric processing of indirect optical location data****Andrey N. Grigor'ev<sup>1</sup>, Alexander I. Altuchov<sup>2</sup>, Denis S. Korshunov<sup>3</sup>**<sup>1,2,3</sup> Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation<sup>1</sup> Grig-AN@ya.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6941-6475><sup>2</sup> aai\_51@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4105-0296><sup>3</sup> korshunov.denis@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6344-2533>**Abstract**

The paper proposes an approach to obtaining images of the objects under investigation based on indirect optical location data. The goal of the study is to increase the graphic similarity of the images and to assign them measuring properties. To achieve this goal, the concept of photogrammetric processing of frame images obtained by conducting indirect optical location in a certain way is formulated. The graphical similarity of the images is proposed to be improved by extracting photometric data related to the object and the background from the registered optical radiation. Based on the selected data, a statistical evaluation of the sample average of the optical radiation intensity from these sources is carried out. The obtained estimates are used to form a monochrome digital image. Adding measurement properties is done by converting the coordinates of the digital image to relative coordinates that have a metric expression. The reason for the decrease in the graphical similarity of the images obtained on the basis of indirect optical location data is determined. In particular, the addition of light waves from different sources, during the allotted exposure time of the photodetector, leads to the merging of the object and the background in the resulting image. The paper presents an approach to the separation of photometric data from different sources that is based on the observation of the phase difference between the emitted and recorded light waves. The authors define the mathematical apparatus for linking the obtained images to the relative coordinate system that is adapted for the case of indirect optical location. The concept of conducting indirect optical location using a special optoelectronic complex is proposed. The study describes the requirements for the equipment of an optoelectronic complex that generates and registers optical radiation with the required parameters. The results of an experiment on the formation of images with measuring properties confirm the feasibility of using the proposed method. Conducting an indirect optical location opens the way to obtaining images of an area that is inaccessible to humans. In particular, the results of the experiment demonstrate that the use of the proposed concept provides images of an object placed behind a light-tight obstacle, which are characterized by the presence of measuring properties and reflect the details of the object under study with high graphical similarity.

**Keywords**

indirect optical location, optical radiation, three-dimensional image

**For citation:** Grigor'ev A.N., Altuchov A.I., Korshunov D.S. An approach to photogrammetric processing of indirect optical location data. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 311–319 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-311-319

**Введение**

Одно из направлений научных исследований — поиск путей получения оптических изображений местности, недоступной для человека [1–8]. Под оптическим изображением понимается растр, элементам которого присвоены уникальные значения яркости. При необходимости выполнения измерений по изображению, элементам растра присваиваются абсолютные или относительные координаты [9]. Существующие подходы к ведению съемки местности не всегда обеспечивают получение изображений, воспроизводящих форму и детали исследуемых объектов с высоким графическим подобием [10], обладающих измерительными свойствами. Примером является случай получения оптического изображения в условиях отсутствия прямой видимости между объектом съемки и регистрирующей аппаратурой [6, 7].

Решить обозначенную проблему можно путем ведения съемки с использованием камер, регистрирующих слабоинтенсивное оптическое излучение. В основу фотоприемных устройств (ФПУ) таких камер положена структура из однофотонных лавинных фотодиодов [1–7, 11–13], которые компонуются фотоэлектронными умножителями. Благодаря данной конструктивной особенности требуемая экспозиция для формирования изображения может быть получена даже на основе единичных фотонов (рис. 1). В современной научной

и технической литературе указанная аппаратура получила название SPAD-камеры (Single-Photon Avalanche Diode) [1, 7, 14].

Согласно рис. 1, на основе одинакового количества зарегистрированных фотонов ФПУ SPAD-камеры генерирует большее количество фотоэлектронов (рис. 1, *a*), по сравнению с типовой камерой (рис. 1, *b*). Использование фотоумножителя позволяет добиться генерации на  $10^6$  фотоэлектронов больше, чем без него. Техническая возможность получения изображений на основе оптического излучения с низкой интенсивностью подтверждается снимками световых волн (рис. 2), рассеянных объектом вне зоны прямой видимости регистрирующей аппаратуры [7, 15].

Другое полезное свойство SPAD-камер — высокое временное разрешение формирования кадра, значение которого в настоящее время достигает порядка 100 пс [1, 7, 15]. Высокие светочувствительность и временное разрешение формирования кадра позволяют наблюдать за распространением световых волн в пространстве, описывать на основе полученных данных форму исследуемых объектов, а также формировать изображения с измерительными свойствами.

Возможность получения изображений на основе оптического излучения с низкой интенсивностью делает актуальной разработку подходов к сбору и обработке данных непрямой оптической локации. Результат применения подходов — снимок исследуемого объекта,

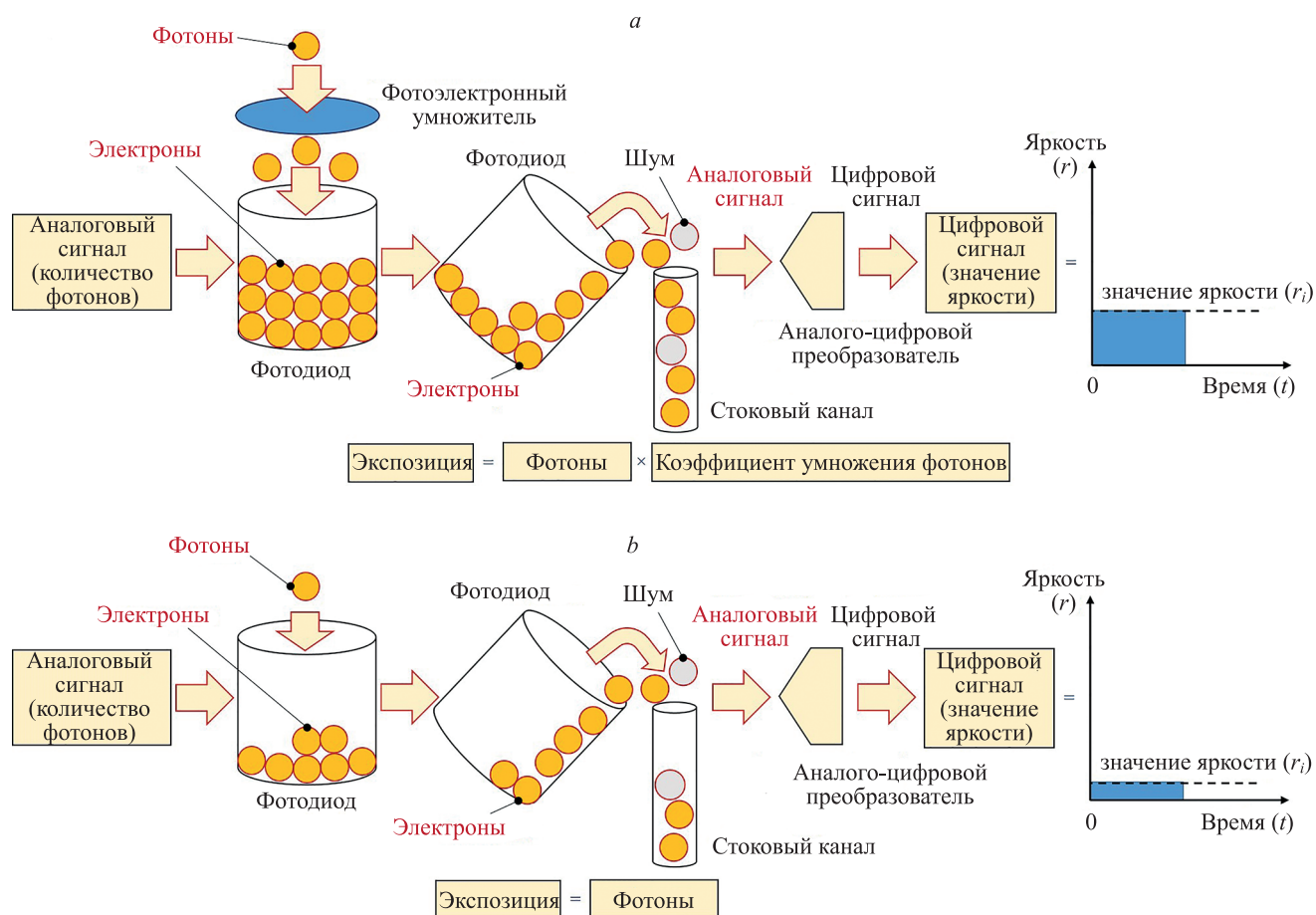


Рис. 1. Схема аналого-цифрового преобразования сигнала: в камере на однофотонных лавинных фотодиодах (а); в типовой камере (б)

Fig. 1. Analog-to-digital signal conversion scheme: in a chamber with single-photon avalanche photodiodes (a); in a typical camera (b)

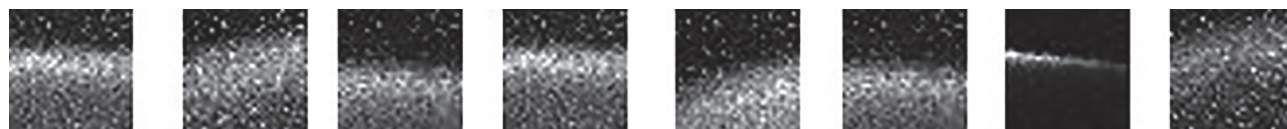


Рис. 2. Изображения фронта сферической волны, сформированные на основе оптического излучения

Fig. 2. Images of the spherical wave front formed on the basis of optical radiation

обладающий высоким графическим подобием и измерительными свойствами.

**Подход к ведению непрямо́й опти́ческой лока́ции с использо́ванием специа́льного оптико-электронного комплекса**

Задача непрямо́й опти́ческой лока́ции сводится к получению изображения исследуемого объекта, расположенного за светонепроницаемым препятствием. Сбор необходимых данных осуществляется путем облучения световыми волнами поверхности, рассеивающей эти волны в направлении исследуемого объекта (рис. 3, а). Фронт световой волны, рассеянной объектом в обратном направлении, попадая в линейное поле зрения SPAD-камеры, регистрируется многоэлементным ФПУ кадрового типа (рис. 3, б). Использование указанного ФПУ для регистрации оптического излучения позволя-

ет сформировать набор данных об объекте в виде трехмерной матрицы  $\mathbf{A} = \|a_{ijl}\|$ , где  $a$  — величина зарядового пакета с фотоэлектронами;  $i, j$  — строка и столбец, указывающие на фотодатчик матрицы ФПУ;  $l$  — время регистрации фотодатчиком зарядового пакета с фотоэлектронами. На основе собранных фотометрических и временных данных строится изображение исследуемого объекта, обладающее высоким графическим подобием. Под графическим подобием понимается способность изображения воспроизводить форму и детали исследуемого объекта.

Фотограмметрическая обработка, примененная к полученному изображению, позволяет придать ему измерительные свойства, что открывает возможность к определению размеров исследуемого объекта, а также дальности до него. Из рис. 4, а видно, что матрица  $\mathbf{A} = \|a_{ijl}\|$  формируется каждым фотодатчиком ФПУ во время распространения световых волн в пределах

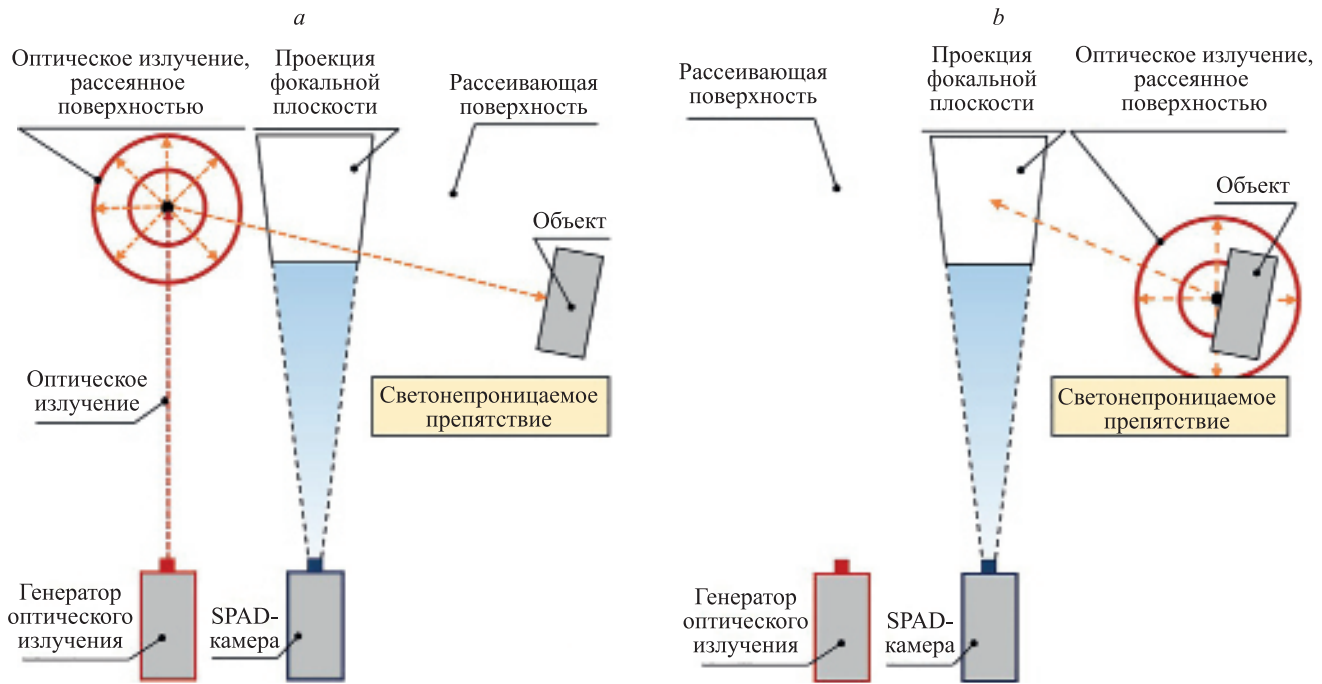


Рис. 3. Подход к ведению непрямой оптической локации: облучение объекта световыми волнами (а); образование регистрируемых световых волн от объекта (b)

Fig. 3. The concept of conducting indirect optical location: irradiation of an object with light waves (a); formation of recorded light waves from an object (b)

проекции фокальной плоскости SPAD-камеры на рассеивающую поверхность. Полагая, что относительные координаты излучающей и регистрирующей аппаратуры известны (рис. 4, b), предлагается определить

относительные координаты проекций фотодатчиков, содержащих изображение рассеивающей поверхности и исследуемого объекта, что обеспечит возможность проведения измерений по снимку.

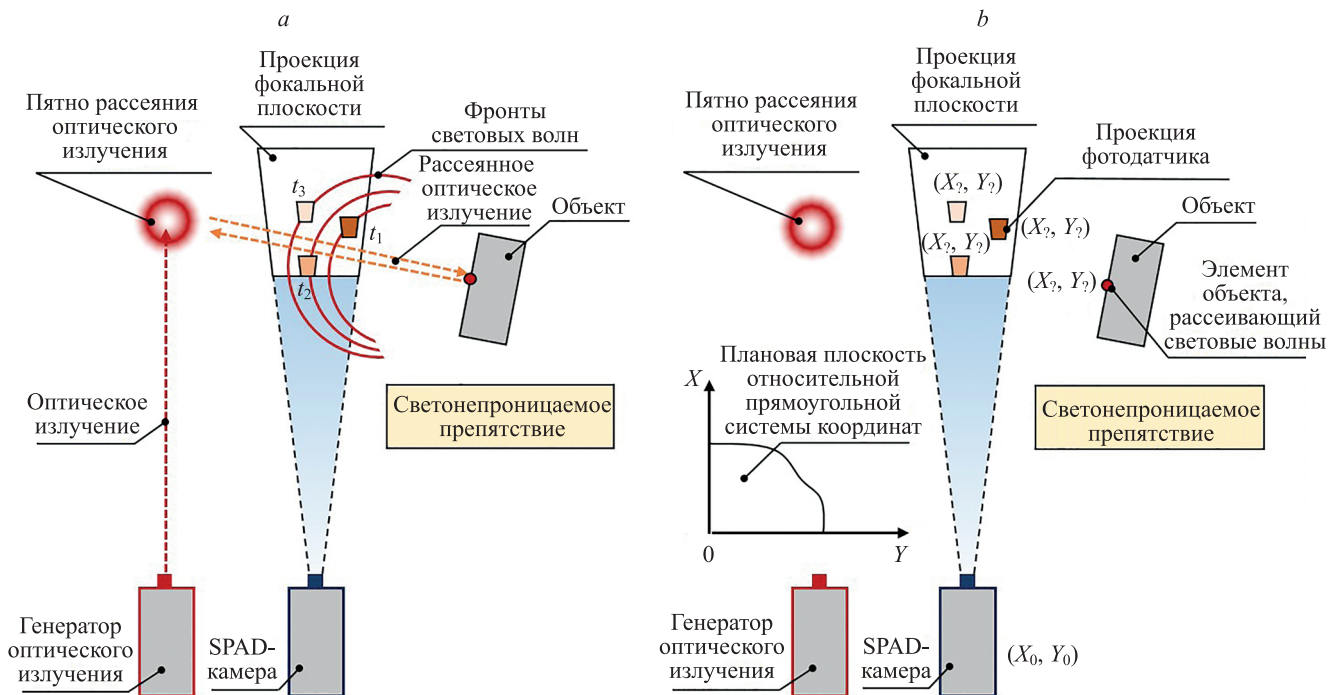


Рис. 4. К вопросу ведения непрямой оптической локации: момент регистрации световых волн, рассеянных объектом (а); известные и искомые относительные координаты (b)

Fig. 4. On the issue of conducting indirect optical location: the moment of registration of light waves scattered by the object (a); known and desired relative coordinates (b)

На рис. 4 используются обозначения:  $t_1, t_2, t_3$  — моменты времени регистрации световых волн элементами ФПУ;  $OX, OY$  — оси относительной прямоугольной системы координат;  $X_0, Y_0$  — относительные координаты оптико-электронного комплекса;  $X_2, Y_2$  — относительные координаты проекций фотодатчиков на рассеивающую поверхность.

Ведение не прямой оптической локации подразумевает использование специального оптико-электронного комплекса, в состав которого входит квантовый оптический генератор и SPAD-камера с ФПУ кадрового типа. В качестве квантового оптического генератора использован пикосекундный диодный лазер «Picopower-LD-405», который предназначен для получения данных трехмерного моделирования объектов [1–5]. Лазер способен генерировать оптическое излучение в импульсном режиме: длительность импульса 40 пс; длина волны 405 нм; частота 80 МГц. Регистрация рассеянного оптического излучения выполнена с использованием SPAD-камеры «SPC 3». Камера оснащена гейгеровским режимом работы [7, 8], что обеспечивает возможность регистрации единичных фотонов. ФПУ представляет собой матрицу кадрового типа, состоящую из 2048 фотодатчиков, накапливающих и считывающих зарядовые пакеты с фотоэлектронами независимо друг от друга. Временное разрешение формирования кадров SPAD-камеры составляет 96 000 кадров в секунду.

Оптико-электронный комплекс, генерирующий и регистрирующий оптическое излучение с указанными параметрами, обеспечивает получение данных, необходимых для формирования измерительного изображения объекта, размещенного вне зоны прямой видимости SPAD-камеры. Измерительное изображение формируется, используя разработанный подход к фотометрической обработке кадровых снимков, адаптированный для случая не прямой оптической локации.

### Подход к обработке данных не прямой оптической локации

В соответствии с предложенным подходом к ведению не прямой оптической локации, формирование изображения выполняется на основе фотометрических и временных данных, полученных в результате регистрации рассеянного оптического излучения. Из

рис. 3 и рис. 4 следует, что существуют два источника рассеянного оптического излучения — рассеивающая поверхность  $P_1$  и исследуемый объект  $P_2$  (рис. 5). Излучение от указанных источников регистрируется в разное время, что объясняется различным расстоянием, которое проходит световая волна в направлении: источник — SPAD-камера.

График 1 на рис. 6, *a* характеризует излучаемую световую волну с параметрами: длина волны  $\lambda = 400$  нм; период волны  $T = 1,3$  фс; амплитуда волны  $A = 0,5$ ; смещение колеблющейся точки на начало генерации волны  $x = 0$ ; начальная фаза  $\varphi = 0$  рад. График 2 на рис. 6, *a* характеризует зарегистрированную световую волну, параметры которой изменены: амплитуда волны  $A = 0,3$ ; начальная фаза  $\varphi = 0,46$  рад. Изменение параметров вызвано сложением рассеянных световых волн за время накопления заряда ФПУ, графики которых приведены на рис. 6, *b*. Изображение объекта формируется на основе обобщенных фотометрических данных, включающих в свой состав как данные об объекте, так и о других источниках оптического излучения. Результат сложения световых волн — снижение графического подобия изображения, что проявляется в виде слияния объекта и фона [15, 16].

На рис. 6 используются обозначения:  $x_0, x_1, x_2$  — смещения колеблющихся точек на начало генерации световой волны, на момент регистрации световой волны от рассеивающей поверхности и на момент регистрации световой волны от исследуемого объекта;  $T_1, T_2, T_3$  — периоды световых волн;  $t_1, \dots, t_4, t_1', \dots, t_4', t_1'', \dots, t_4''$  — моменты времени, характеризующие колеблющиеся точки с одинаковой фазой.

Повысить графическое подобие формируемого изображения предложено путем выделения излучения от объекта из состава регистрируемого излучения SPAD-камерой.

Решить данную задачу можно с помощью наблюдения за изменением разности фаз световых волн и рассмотреть на примере модели гармонической световой волны:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где  $x$  — значение колеблющейся физической величины в момент времени  $t$ ;  $A$  — амплитуда волны;  $\omega$  — циклическая фаза волны;  $\varphi_0$  — начальная фаза волны.

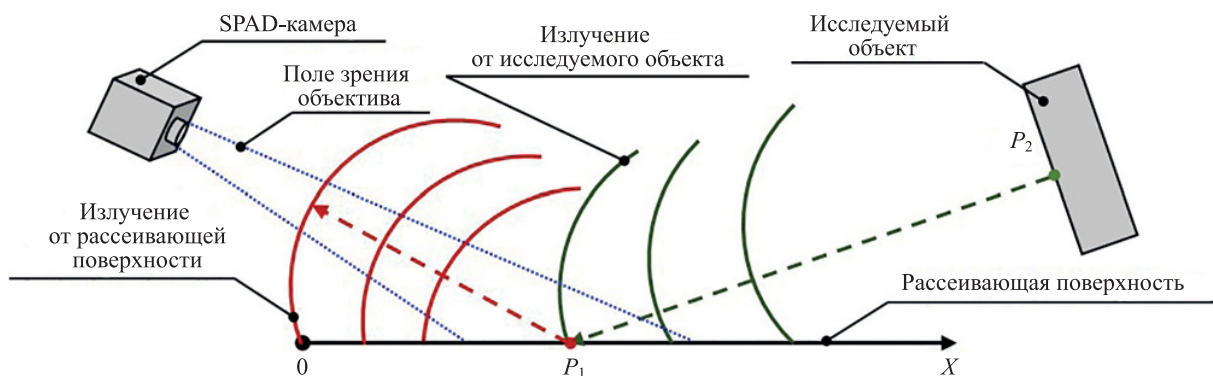


Рис. 5. Источники рассеянного оптического излучения

Fig. 5. Sources of scattered optical radiation

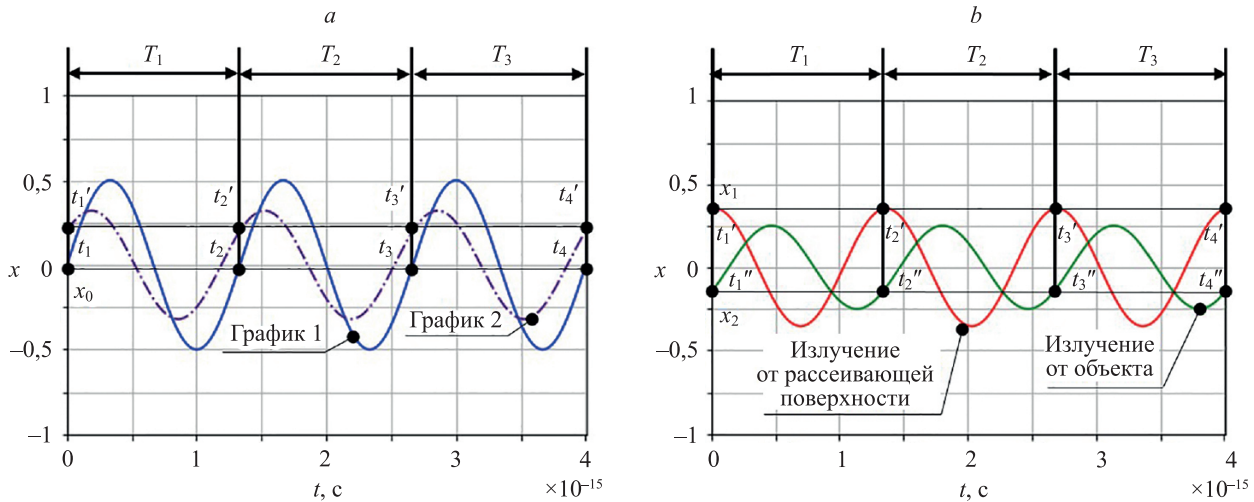


Рис. 6. Графики гармонических колебаний: излучаемая и регистрируемая световые волны (а); рассеянные световые волны (b)

Fig. 6. Graphs of harmonic oscillations: emitted and recorded light waves (a); scattered light waves (b)

Полагая, что фаза гармонической световой волны — линейная функция времени, то непрогнозируемое изменение фазы на некотором интервале времени будет свидетельствовать о смене источника ее излучения. Согласно концепции ведения непрямой оптической локации, квантовый оптический генератор излучает световые волны с фазой  $\varphi_1 = (\omega t + \varphi_0)$ , которые пройдя путь до источников отражаются и распространяются в обратном направлении, после чего регистрируются SPAD-камерой.

Фаза зарегистрированных волн с тем же началом отсчета времени рассчитывается по следующей формуле:

$$\varphi_2 = \omega(t - \Delta t) + \varphi_0,$$

где  $\varphi_2$  — фаза зарегистрированной волны;  $\Delta t$  — время распространения волны от квантового оптического генератора до регистрирующей аппаратуры.

На основе значений фаз, излученных и зарегистрированных световых волн, оценивается их разность:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \varphi_2 - \varphi_1 = \omega t_2 + \varphi_0 - \omega t_1 - \varphi_0 = \\ &= \omega(t_2 - t_1) = \omega\Delta t = 2\pi f\Delta t, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Delta\varphi$  — разность фаз волн;  $f$  — частота волн;  $t_1$  — время излучения волны;  $t_2$  — время регистрации волны.

Разделение световых волн по источникам излучения выполняется согласно условию:

$$\Delta\varphi_1 \neq \Delta\varphi_t - \Delta\varphi_{t-1},$$

где  $\Delta\varphi_t$  — разность фаз волн для текущего измерения;  $\Delta\varphi_{t-1}$  — разность фаз волн для предыдущего измерения;  $\Delta\varphi_1$  — разность фаз волн для первого измерения.

Из выражения (1) следует, что начало временного интервала регистрации световой волны от соответствующего источника рассчитывается следующим образом:

$$t_2 = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f} + t_1.$$

Разделив световые волны от различных источников (рис. 7, a), появляется возможность получения их

изображений. Изображения источников рассеянного излучения (рис. 7, b) формируются на основе значений выборочного среднего [17], которые рассчитываются в пределах установленных временных интервалов  $\Delta t$  по формуле:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{i,j},$$

где  $\bar{X}$  — значение выборочного среднего;  $x_{i,j}$  — измеренное значение интенсивности оптического излучения;  $N$  — число измеренных значений;  $i, j$  — координаты пиксела цифрового изображения.

На рис. 7, b приведена структура многомерного изображения, отдельные измерения которого с высоким графическим подобием воспроизводят геометрическую форму исследуемого объекта. Для расширения границ практического применения таких изображений рекомендуется придать им измерительные свойства. Полагая, что относительные координаты местоположения оптико-электронного комплекса известны  $S(X_0, Y_0)$ , решена задача преобразования координат цифрового изображения в относительные координаты, имеющие метрическое выражение. Пересчет выполнен с использованием формул, выражающих строгую зависимость между координатами точки местности и кадрового снимка [14], адаптированным для случая непрямой оптической локации:

$$\begin{aligned} X &= X_0 + D \frac{\left(\Delta j_0 - \frac{\Delta \sum j}{2}\right) + \left(\Delta i_0 - \frac{\Delta \sum i}{2}\right) - F}{\left(\Delta j_0 - \frac{\Delta \sum j}{2}\right) + \left(\Delta i_0 - \frac{\Delta \sum i}{2}\right) - F}; \\ Y &= Y_0 + D \frac{\left(\Delta j_0 - \frac{\Delta \sum j}{2}\right) + \left(\Delta i_0 - \frac{\Delta \sum i}{2}\right) - F}{\left(\Delta j_0 - \frac{\Delta \sum j}{2}\right) + \left(\Delta i_0 - \frac{\Delta \sum i}{2}\right) - F}, \end{aligned} \quad (2)$$

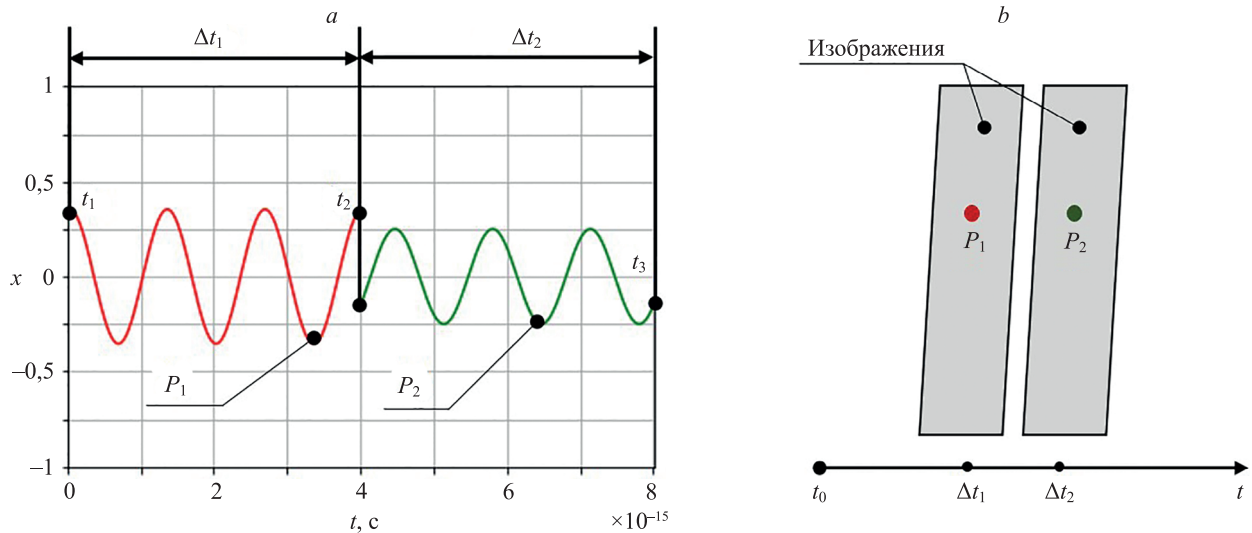


Рис. 7. К вопросу получения изображений источников световых волн: световые волны, рассеянные источниками  $P_1$  и  $P_2$  (a); изображения источников  $P_1$  и  $P_2$  (b)

Fig. 7. On the issue of obtaining images of light wave sources: light waves scattered by sources  $P_1$  and  $P_2$  (a); source images  $P_1$  and  $P_2$  (b)

где  $i_0, j_0$  — координаты пиксела цифрового изображения, через который проходит главная оптическая ось оптико-электронного комплекса;  $\Delta$  — линейные размеры пиксела;  $X, Y$  — относительные координаты выбранного пиксела;  $X_0, Y_0$  — относительные координаты оптико-электронного комплекса;  $D$  — расстояние от оптико-электронного комплекса до исследуемого объекта;  $F$  — фокусное расстояние объектива.

В выражении (2) неизвестным параметром является расстояние от оптико-электронного комплекса до исследуемого объекта  $D$ . Полагая, что скорость распространения световой волны  $c$  постоянна, а также при наличии результатов измерения разности фаз  $\Delta\varphi$  на частоте  $f$ , возникшей в результате прохождения световой волной расстояния от квантового оптического генератора до исследуемого объекта и обратно, указанный параметр можно рассчитать:

$$D = \frac{c\Delta t}{2} = \frac{c\Delta\varphi}{4\pi f}$$

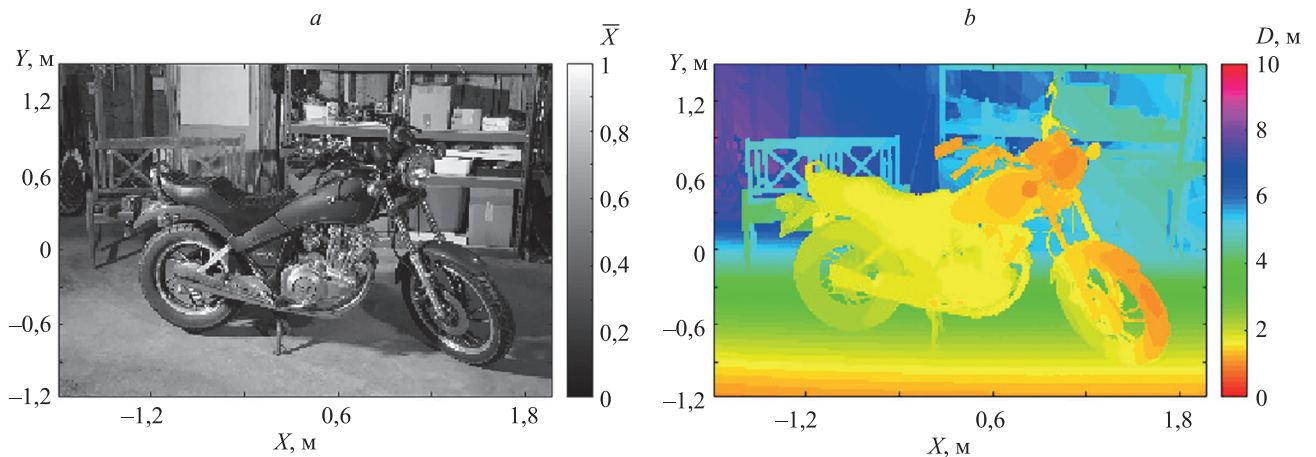


Рис. 8. Изображения с измерительными свойствами: двухмерное монохромное изображение (a); цветное изображение — карта глубины (b)

Fig. 8. Images with measurement properties: two-dimensional monochrome image (a); color image — depth map (b)

Обработка данных непрямо́й оптической локации предложенным способом позволяет получить растровые изображения, которые воспроизводят с высоким графическим подобием форму исследуемых объектов и обеспечивают возможность выполнения измерений в трехмерном пространстве относительной системы координат. На основе работы [1], получены примеры изображений (рис. 8), имитирующие результаты обработки данных непрямо́й оптической локации, выполненной в соответствии с представленной в настоящей работе концепцией.

На рис. 8, a изображен монохроматический снимок, полученный на основе результатов статистической оценки среднего выборочного значения интенсивности оптического излучения  $\bar{X}$ , яркости которого представлены в пределах нормированного интервала от 0 до 1. Снимок с высоким графическим подобием воспроизводит форму и детали объектов сцены, а также обеспечивает возможность измерений в двухмерной системе

координат. На рис. 8, *b* приведено цветное изображение, яркости пикселей которого образуют цветовую палитру, наглядно отражающую степень удаления  $D$  объектов сцены от регистрирующей аппаратуры. В существующей терминологии такое изображение обозначается как карта глубины [1]. Совместное использование представленных изображений позволяет наблюдать объекты, скрытые светонепроницаемым препятствием, а также выполнять измерения в трехмерном пространстве сканируемой сцены.

### Заключение

В работе предложена концепция получения изображений объектов на основе данных непрямо́й оптической локации. Концепция разработана с целью повышения графического подобия изображений и придания им измерительных свойств. Для выбора решения, обеспечивающего достижение поставленной цели, определена одна из причин снижения графического подобия изображений. Установлено, что за отведенное время регистрации оптического излучения наблюдается эффект сложения световых волн, который приводит к слиянию объекта и фона на результирующем изображении.

Повысить графическое подобие формируемого изображения предложено путем выделения из состава зарегистрированного оптического излучения фотометрических данных от различных источников. В каче-

стве решения данной задачи выбрано наблюдение за изменением разности фаз излучаемых и регистрируемых световых волн, резкое изменение которой служит сигналом о смене источника излучения.

Решена задача статистической оценки среднего выборочного значения интенсивности оптического излучения, зарегистрированного от идентифицированных источников. Результаты расчетов использованы для формирования цифрового изображения объектов. С целью расширения возможности практического применения сформированного изображения ему приданы измерительные свойства. Выполнено преобразование координат цифрового изображения в относительные координаты, имеющие метрическое выражение, используя математический аппарат, адаптированный для случая непрямо́й оптической локации.

Разработан подход к ведению непрямо́й оптической локации, в рамках которого сформулированы требования к оптико-электронному комплексу, излучающему и регистрирующему оптическое излучение. Целесообразность использования концепции подтверждена результатами эксперимента по созданию изображений на основе открытых данных непрямо́й оптической локации. Показано, что в условиях размещения объекта за светонепроницаемым препятствием возможно получить изображение с измерительными свойствами, которое с высоким графическим подобием отражает его детали 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. N 1. P. 17726. doi: 10.1038/s41598-018-35212-x
2. McCarthy A., Krichel N., Gemell 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/TCI.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., Krstajic 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. Григорьев А.Н., Алтухов А.И., Коршунов Д.С. Подход к ведению аэросъемки местности с использованием компоновки оптико-электронных камер // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2020. Т. 20. № 3. С. 318–326. doi: 10.17586/2226-1494-2020-3-318-326
10. Алтухов А.И., Шабатов Е.И., Коршунов Д.С. Метод повышения контраста изображений в условиях съемки Земли из космоса //

### 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, no. 1, pp. 17726. doi: 10.1038/s41598-018-35212-x
2. McCarthy A., Krichel N., Gemell 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/TCI.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., Krstajic 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. Grigor'ev A.N., Altukhov A.I., Korshunov D.S. Aerial mapping based on arrangement of optical electron cameras. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 318–326. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-3-318-326



- 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
11. Korotaev V.V., Maraev A.A. Sources and Detectors of Optical Radiation. St. Petersburg: ITMO University, 2017. 104 p.
  12. Горбачёв А.А., Коротаев В.В., Ярышев С.Н. Твердотельные матричные фотопреобразователи и камеры на их основе. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 98 с.
  13. 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
  14. Григорьев А.Н., Алтухов А.И., Коршунов Д.С. Подход к получению изображений объектов на основе данных непрямо 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
  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
  16. 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
  17. Алтухов А.И., Коршунов Д.С. Метод поиска изменений состояния земной поверхности по разновременным космическим снимкам // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 3. С. 410–416. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-410-416
  10. 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
  11. Korotaev V.V., Maraev A.A. *Sources and Detectors of Optical Radiation*. St. Petersburg, ITMO University, 2017, 104 p.
  12. 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)
  13. 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
  14. Grigor'ev A.N., Altukhov 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
  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
  16. 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
  17. Altukhov A.I., Korshunov D.S. Search method for changes of the earth's surface state through multi-temporal satellite images. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 410–416. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-410-416

#### Авторы

**Григорьев Андрей Николаевич** — доктор технических наук, доцент, доцент, начальник кафедры, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, [Grig-AN@ya.ru](mailto:Grig-AN@ya.ru), <http://orcid.org/0000-0001-6941-6475>, [scopus.org/57200211777](http://scopus.org/57200211777), [scopus.org/57220744213](http://scopus.org/57220744213)

**Алтухов Александр Иванович** — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, [aai\\_51@mail.ru](mailto:aai_51@mail.ru), <http://orcid.org/0000-0002-4105-0296>, [scopus.org/57217053398](http://scopus.org/57217053398)

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

#### Authors

**Andrey N. Grigor'ev** — D.Sc., Associate Professor, Head of Chair, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, [Grig-AN@ya.ru](mailto:Grig-AN@ya.ru), <http://orcid.org/0000-0001-6941-6475>, [scopus.org/57200211777](http://scopus.org/57200211777), [scopus.org/57220744213](http://scopus.org/57220744213)

**Alexander I. Altukhov** — PhD, Associate Professor, Head of Chair, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, [aai\\_51@mail.ru](mailto:aai_51@mail.ru), <http://orcid.org/0000-0002-4105-0296>, [scopus.org/57217053398](http://scopus.org/57217053398)

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

Статья поступила в редакцию 18.03.2021  
Одобрена после рецензирования 31.03.2021  
Принята к печати 23.05.2021

Received 18.03.2021  
Approved after reviewing 31.03.2021  
Accepted 23.05.2021



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»