

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-09-29-39

УДК 535.31:681

Контроль взаимного пространственного положения элементов конструкций, в том числе трансформируемых, с применением лазерного измерительного канала и широкопольных световозвращателей

ЕВГЕНИЙ ПЕТРОВИЧ МЕСНЯНИН¹, СЕРГЕЙ ЛЕОНТЬЕВИЧ ПОТАПОВ²,
НИНА ИВАНОВНА ПОТАПОВА³✉

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор
Ленинградской обл., Россия

¹mesnjankinEP@niioep.ru <https://orcid.org/0000-0001-8777-5308>

²potapovSL@niioep.ru <https://orcid.org/0000-0002-6735-0959>

³potapovaNI@niioep.ru <https://orcid.org/0000-0003-0520-2077>

Аннотация

Предмет исследования. Лазерные системы с контрольными световозвращающими элементами для определения пространственного положения элементов конструкций оптико-механических устройств. **Цель работы.** Разработка высокоточного способа и устройства лазерного измерительного канала для определения пространственного положения элементов конструкций, в том числе и трансформируемых. **Методы.** Снижение погрешности определения координат основано на использовании широкопольных световозвращающих элементов, имеющих возможности кодировки, цифровой регистрации и обработки полученных отраженных сигналов. **Основные результаты.** Разработан лазерный контрольный канал со световозвращающими контрольными элементами, обеспечивающий измерения пространственного положения подвижных элементов конструкций с высокой точностью. Предложены конструкция световозвращающих элементов, позволяющая получить углы световозвращения, близкие 180°, и методы кодировки, обеспечивающие идентификацию отдельных контрольных элементов. Изготовлены образцы световозвращающих элементов, подтверждающие их расчетные характеристики. Совокупность предложенных решений позволяет создавать лазерные контрольные каналы для высокоточного контроля координат поверхности элементов конструкций, в том числе трансформируемых устройств, работающих в условиях космического пространства. **Практическая значимость.** Предложенные в работе световозвращающие оптические элементы с большим полем зрения и системой идентификации позволяют создавать контрольные каналы с наибольшей погрешностью определения пространственных координат до 1,5 мм, что дает возможность определять положение подвижных элементов в конструкциях космических аппаратов. Результаты проведенного исследования развивают и дополняют существующие средства и методы контроля пространственного положения трансформируемых конструкций с применением лазерного измерительного канала.

Ключевые слова: световозвращатель, контрольные элементы, лазерный контрольный канал, пространственное положение, трансформируемые элементы конструкции, идентификация

Ссылка для цитирования: Меснянкин Е.П., Потапов С.Л., Потапова Н.И. Контроль взаимного пространственного положения элементов конструкций, в том числе трансформируемых, с применением лазерного измерительного канала и широкопольных световозвращателей // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 9. С. 29–39. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-09-29-39>

Коды OCIS: 070.0070, 110.2960, 1102970, 120.0120, 140.0140, 230.0230, 250.0250

Control of relative spatial position of structural elements, including transformable ones, using a laser measuring channel and wide-field retroreflectors

EVGENII P. MESNJANKIN¹, SERGEI L. ПОТАПОВ², NINA I. ПОТАПОВА³✉

Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

¹mesnjankinEP@niiiep.ru <https://orcid.org/0000-0001-8777-5308>

²potapovSL@niiiep.ru <https://orcid.org/0000-0002-6735-0959>

³potapovaNI@niiiep.ru <https://orcid.org/0000-0003-0520-2077>

Abstract

Subject of study. Laser systems with control retroreflective elements for determining the spatial position of structural elements of optical-mechanical devices. **Aim of study.** Development of a high-precision method and arrangement of a laser measuring channel for determining the spatial position of structural elements, including transformable ones. **Method.** The method of reducing the error in determining coordinates is based on the use of wide-field retroreflective elements with the encoding feature, digital registration and processing of the received reflected signals. **Main results.** The laser control channel with retroreflective control elements allowing the spatial position of movable structural elements to be measured with high accuracy is developed. A design scheme of retroreflective elements enabling us to obtain retroreflective angles close to 180° is proposed. Encoding methods are proposed to ensure the identification of individual control elements. Samples of retroreflective elements with the confirmed design characteristics have been produced. The combination of the proposed solutions enables us to develop laser control channels for high-precision control of the coordinates of the surface of structural elements, including transformable devices operating in outer space. **Practical significance.** The retroreflective optical elements with a large field of view and identification system proposed in the work allow us to create control channels with the largest margin of error up to 1.5 mm in determining spatial coordinates, which permits determination of the position of movable elements in spacecraft structures. The results of the study develop and complement the existing means and techniques for monitoring the spatial position of transformed structures using a laser measuring channel, which constitutes their practical significance.

Keywords: retroreflector, reference elements, laser control channel, spatial position, transformable structural elements, identification

For citation: Mesnjankin E.P., Potapov S.L., Potapova N.I. Control of the relative spatial position of structural elements, including transformable ones, using a laser measuring channel and wide-field retroreflectors [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 9. P. 29–39. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-09-29-39>

OCIS codes: 070.0070, 110.2960, 1102970, 120.0120, 140.0140, 230.0230, 250.0250

ВВЕДЕНИЕ

При создании современных высокоточных систем определения координат, осуществлении локации, оптической связи широко распространены в настоящее время являются методы, основанные на использовании лазер-

ного излучения, такие как лазерное зондирование, лазерная локация и лазерное измерение дальности [1–13].

При контроле состояния оптико-механических крупногабаритных систем, например *Webb space telescope* [14], необходимо знать

взаимное положение элементов трансформируемых конструкций. Особенно это актуально при размещении объекта наблюдения в сложно доступных местах (например, в космическом пространстве [14], вблизи ядерных реакторов [15] и др.). Для определения взаимного расположения элементов конструкции относительно друг друга необходимо знать пространственные координаты конкретных точек элементов, для этого на них должны быть нанесены маркеры (метки), при этом каждый маркер должен иметь уникальный код. Чтобы идентифицировать метку, находящуюся на расстоянии сотен метров, необходимо иметь соответствующие оптические системы с высоким разрешением и высокочувствительные приемные матрицы. Можно воспользоваться лазерной подсветкой метки, в этом случае требования к приемной системе снижаются. В качестве меток используются различные отражатели [3, 8–13, 16–19]. Угловые отражатели (призмы) часто применяются для лазерных геодезических спутников [9–11], но при всех их достоинствах имеют угловые характеристики, не достаточные для контроля пространств больших размеров. Чтобы увеличить углы приема и отражения, угловые отражатели располагают в единой конструкции по несколько штук, что сильно усложняет конструкцию отдельного отражателя, кроме того, такой отражатель не обладает идентификационным кодом. Чтобы иметь возможность идентификации, конструкцию необходимо еще больше усложнить.

Целью работы является разработка высокоточного способа и устройства лазерного измерительного канала для определения пространственного положения элементов конструкций, в том числе и трансформируемых.

ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ

Лазерный измерительный модуль (ЛИМ) используется для контроля положения элементов трансформируемых оптико-механических конструкций совместно с контрольными световозвращающими элементами (КСЭ). Он содержит следующие узлы:

- лазерный излучатель;
- оптическую систему для формирования пучка излучения и для приема излучения, отраженного от КСЭ, устройство формирования

изображения КСЭ и его анализа для получения соответствующего ему идентификационного кода;

- дальномер для определения дальности до КСЭ;
- сканирующее зеркало для наведения лазерного излучения на КСЭ;
- оптическую развязку приемного и передающего каналов.

Схема ЛИМ представлена на рис. 1.

Лазерный измерительный модуль работает следующим образом. Лазерный пучок, выходящий из лазерного источника, с помощью двух расширителей лазерного пучка преобразовывается в пучок с требуемыми апертурой и расходимостью, который поступает на сканирующее зеркало. Поляризатор пропускает линейно поляризованное излучение от лазерного источника, а четвертьволновая ($\lambda/4$) пластина преобразует линейно поляризованное излучение в излучение с круговой поляризацией.

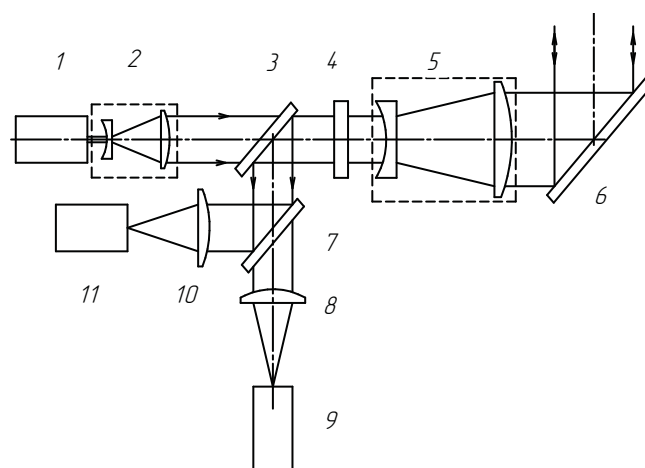


Рис. 1. Схема ЛИМ для устройства определения координат трансформируемой оптико-механической конструкции. 1 — источник лазерного излучения, 2, 5 — расширители лазерного пучка, 3 — поляризационный светоделитель, 4 — пластина $\lambda/4$, 6 — сканирующее зеркало, 7 — светоделительная пластина, 8, 10 — объективы, 9 — матричное ФПУ с устройством идентификации, 11 — дальномер

Fig. 1. Diagram of a laser measuring module for a device for determining the coordinates of a transformable optical-mechanical construction. (1) laser radiation source, (2) and (5) are laser beam expanders, (3) polarization beam splitter, (4) $\lambda/4$ plate, (6) scanning mirror, (7) beam splitter plate, (8) and (10) are lenses, (9) matrix photodetector with device identification, (11) rangefinder

Зеркало, вращаясь в двух плоскостях, сканирует излучение в пространстве. При попадании излучения на КСЭ оно отражается назад и, проходя через пластину $\lambda/4$, преобразуется в излучение с линейной поляризацией, повернутой на 90° относительно первоначальной оси поляризации. Поэтому это излучение отражается от поляризатора и светоделительной пластиной разделяется на два пучка. Один пучок попадает на дальномер, другой — на матричный фотоприемник с устройством идентификации. При сканировании в пространстве зеркалом излучение может отражаться от различных посторонних объектов и попадать на фотоприемное устройство (ФПУ). Но так как у них нет идентификационных меток, то ФПУ будет идентифицировать их как ложные. Если у объекта есть идентификационная метка, то ФПУ определит ее номер (код), по углам поворота сканирующего зеркала будет определено угловое положение объекта, а дальномером — расстояние до него. Таким образом находится пространственное положение объекта с КСЭ. Информация о дальности до объекта, определяемая дальномером, также используется и для установки матрицы ФПУ в плоскость наилучшего изображения, соответствующую расстоянию до объекта, от которого пришло отраженное излучение.

Таким образом, ЛИМ осуществляет следующие функции: обзор заданного поля с обнаружением имеющихся в нем КСЭ, определение (измерение) угловых положений обнаруженных КСЭ относительно приборной системы координат ЛИМ и расстояний (дальностей) до КСЭ относительно ЛИМ с привязкой к приборной шкале времени, идентификацию обнаруженных КСЭ (определение уникального кода КСЭ).

Каждый из отдельных блоков ЛИМ представляет собой применяемые в современной технике конструкции, основанные на использовании известных методов. Поскольку расстояния до объектов измерения рассматриваются от десятков до нескольких сотен метров, то в качестве дальномера в настоящей работе использован фазовый лазерный дальномер, позволяющий измерять дальность до объекта с наибольшей погрешностью 1–2 мм. Современные матричные ФПУ имеют характеристики (разрешающую способность, чувствительность фотоприемного элемента, поле зрения), позволяющие определить код КСЭ при

использовании соответствующих объективов и средств обработки изображения.

Особенностью рассматриваемой системы контроля взаимного расположения элементов трансформируемых конструкций является схемное решение с использованием оригинальных компактных широкопольных линзовых световозвращающих элементов, позволяющих создавать идентификационные коды.

ЛИНЗОВЫЕ ШИРОКОПОЛЬНЫЕ СВЕТОВОЗВРАЩАЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Для определения положения элементов трансформируемых конструкций в составе ЛИМ используются КСЭ. В их конструкции предлагается применение линзовых широкопольных световозвращающих элементов (СЭ), представленных в патенте [19].

Разработанный СЭ (рис. 2) состоит из двух плосковыпуклых линз, толщины и радиусы апертур которых равны радиусам кривизны сферических поверхностей соответствующих линз. Толщина СЭ составляет сумму радиусов сферических поверхностей линз. Линзы располагаются соосно и соединяются друг с другом плоскими поверхностями, при этом центры их кривизны совмещаются. Основным достоинством предлагаемого СЭ является возможность его работы в широком угловом

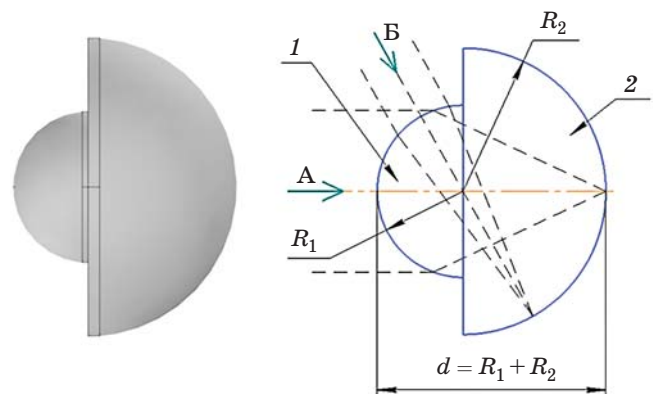


Рис. 2. Схема световозвращателя. 1 — первая линза, 2 — вторая линза, А — пучок излучения, падающий по оси СЭ, Б — пучок излучения, падающий под углом к оси СЭ

Fig. 2. Diagram retroreflector. (1) The first lens, (2) the second lens, the letter A denotes a beam of radiation incident along the retroreflective element axis, the letter B denotes a beam of radiation incident at an angle to the retroreflective element axis



Рис. 3. Фотография СЭ с угловым полем 176° без покрытия (слева) и с защитным покрытием (справа)
Fig. 3. Photograph of retroreflective elements with a field of view of 176° (left) without coating and (right) with protective coating

поле, близком к 180° . Чтобы исключить полное внутреннее отражение излучения, проходящего под большими углами через границу соединения линз, они должны соединяться друг с другом либо с помощью глубокого оптического контакта, либо с помощью оптического клея, имеющего показатель преломления, близкий (или равный) показателю преломления материала линз. Соотношение между радиусами кривизны сферических поверхностей линз выбирается так, чтобы излучение, падающее на поверхность первой линзы, фокусировалось на поверхности второй линзы. Это требование приводит к следующему соотношению между радиусами сферических поверхностей линз (в случае одинакового показателя преломления стекол линз n): $R_2 = R_1/(n - 1)$. Для увеличения отражения на сферическую поверхность второй линзы может наноситься отражающее покрытие.

Фотография СЭ, без покрытия и с защитным покрытием приведена на рис. 3.

КОНТРОЛЬНЫЕ СВЕТОВОЗВРАЩАЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА БАЗЕ ЛИНЗОВЫХ СВЕТОВОЗВРАЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ВНУТРЕННЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ МЕТКОЙ

В работе рассмотрены два варианта конструкции КСЭ, созданных на основе рассмотренного выше линзового СЭ.

В первом варианте идентификационная метка, с помощью которой может осуществляться идентификация КСЭ, наносится на плоскую поверхность одной из линз, т.е. располагается между линзами. Возможный вид идентификационной метки представлен на рис. 4.

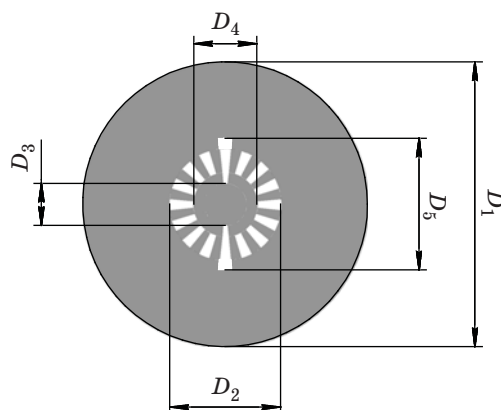


Рис. 4. Идентификационная метка. Пояснения в тексте

Fig. 4. Identification mark. Explanations are in the text

Идентификационная метка представляет собой непрозрачный экран диаметром D_1 , на котором имеются прозрачные секторы. Так как в общем случае ориентация КСЭ, а следовательно, и метки в пространстве может быть произвольной и заранее не известной, то необходимо иметь какой-то элемент, по которому можно определять ориентацию метки. Для этого предполагается использовать вертикальные секторы (реперные), которые отличаются от других секторов размером (например длиной); на рис. 4 их два. Остальные секторы можно использовать для идентификации метки; на рисунке изображены 14 таких секторов (может быть и другое количество (N) секторов). Таким образом, всего на рис. 4 имеется 16 секторов. Так как излучение, попадающее на метку, проходя через какой-то сектор после отражения, должно проходить через сектор, расположенный осесимметрично, то число секторов-меток будет в два раза меньше (в данном случае их будет 7). Часть секторов в метке может отсутствовать. В этом случае метку можно идентифицировать по присутствующим в метке секторам. Число возможных вариантов меток (т.е. ее код) будет равно $2^{N/2}$, в рассматриваемом случае их будет $2^7 = 128$. Таким образом, с помощью рассматриваемых меток с 16 секторами можно определить положение в пространстве 128 различных элементов конструкции и по коду метки — какой это элемент. Определение положения элементов конструкции и их идентификацию предполагается проводить сканированием

лазерным излучением пространства, в котором ожидается нахождение идентифицируемых элементов конструкции. При попадании излучения на СЭ оно отражается назад и возвращается в место расположения лазерного излучателя, который должен быть совмещен с приемником излучения. Он состоит из приемной оптической системы (ОС), формирующей и направляющей излучение на фотодиод, находящийся в составе дальномера, и на матрицу ПЗС. При этом на матрице ПЗС должно строиться изображение контрольной метки, приемлемое для ее идентификации.

Сигнал с фотодиода попадает на измерительную схему дальномера, определяющую расстояние до элемента конструкции, а сигнал с матрицы ПЗС — на компьютер, который вычисляет угловое положение элемента и идентифицирует его по коду метки на СЭ.

Для построения изображения на поверхности матрицы ПЗС ОС должна быть настроена так, чтобы расстояние (L_{iz}) от задней главной плоскости приемной ОС до поверхности матрицы составило $L_{iz} = F + F^2/(L - F)$, где F — заднее фокусное расстояние ОС, L — расстояние от КСЭ до приемной системы, которое должно определяться дальномером.

В работе проанализированы требования к размерам контрольной метки, длине волны лазерного излучения, матрице ПЗС, параметрам ОС и их зависимости от расстояния, на котором находится идентифицируемый элемент конструкции с контрольным элементом.

На рис. 5 приведен ход лучей падающего излучения в СЭ. Видно, что ОС СЭ обладает большими аберрациями, поэтому размер элементов контрольной метки должен быть ограничен.

Расчет хода лучей в ОС СЭ показал, что максимальное отклонение элементов идентификационной метки от оси должно быть не более $0,5R_1$, где R_1 радиус апертуры первой линзы. Также, для того чтобы элементы идентификационной метки были разрешаемы на поверхности матрицы ПЗС, их размеры не должны быть слишком малыми. Минимальный размер элементов контрольной метки зависит от расстояния до контрольного элемента, длины волны сканирующего излучения и диаметра апертуры объектива приемной ОС. Наименьшие элементы в контрольной метке — это идентификационные секторы. Их размер рассчитывается как $h = (D_2 - D_4)/2$,

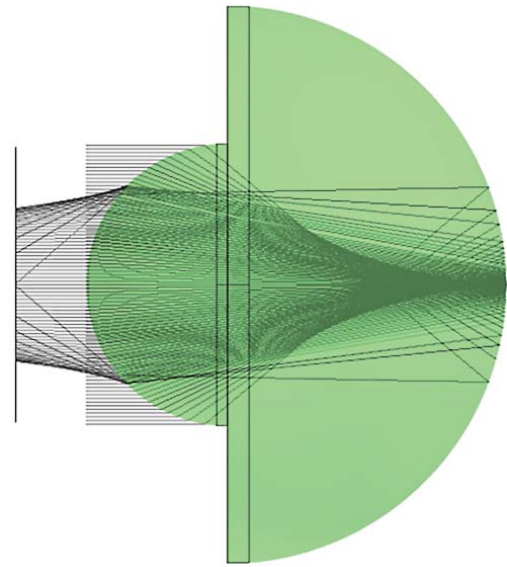


Рис. 5. Ход лучей через СЭ

Fig. 5. The path of rays through the retroreflective element

а форма должна быть близка к прямоугольной. Как известно, дифракционная картина от таких элементов представляет собой чередование максимумов и минимумов интенсивности излучения [20]. Размер центрального пика излучения в случае излучения с длиной волны λ на расстоянии L составит $(2\lambda/h)L$. Для того чтобы на матрице ПЗС сформировалось изображение контрольной метки, по которому можно различить отдельные секторы, в апертуру объектива приемной ОС должен попадать, по крайней мере, один пик излучения. То есть должно выполняться соотношение $(2\lambda/h)L \leq D_{os}$, где D_{os} — диаметр апертуры объектива ОС. В работе проведен расчет распределения плотности мощности излучения, отраженного от СЭ, формируемого в плоскости матрицы ПЗС. Расчет проводился следующим образом. Предполагалось, что на СЭ падает параллельный пучок лучей от лазерного излучателя. Трассировка этого пучка через СЭ показала, что в результате на выходе получается пучок лучей с разными значениями пройденного оптического пути. Разность оптических путей соответствовала распределению фазы излучения на выходе СЭ. Так как оптические пути лучей, прошедших через СЭ, отличаются несильно, а поглощение в СЭ небольшое, то можно считать, что амплитуда излучения на выходе из СЭ по сечению пучка постоянная.

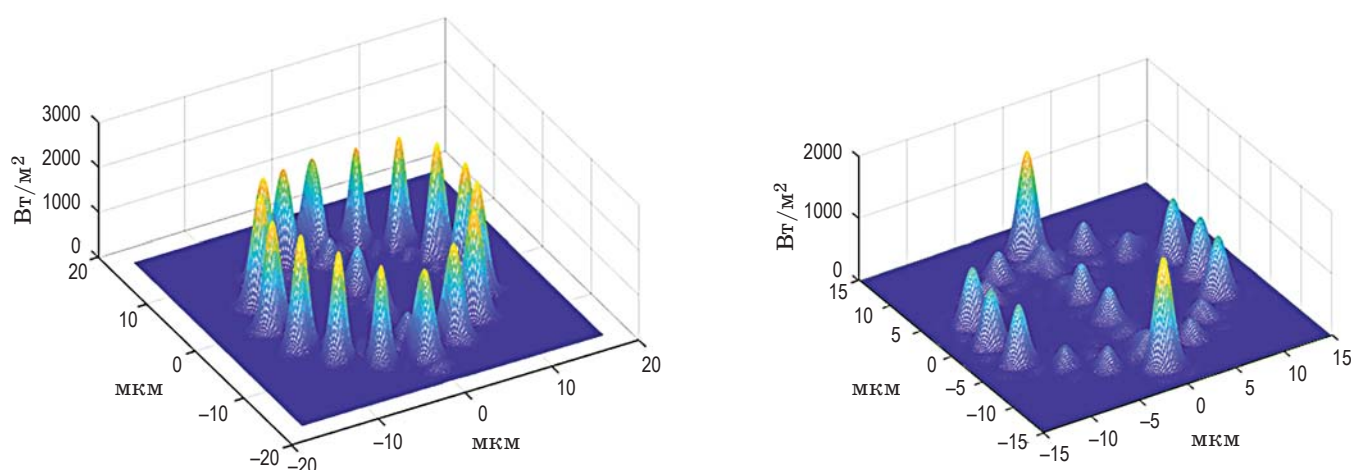


Рис. 6. Распределение плотности мощности излучения в плоскости матрицы ПЗС, отраженного от СЭ, без наклона СЭ (а) и при наклоне на 35° (б)

Fig. 6. The distribution of the radiation intensity in the plane of the CCD matrix reflected from the retroreflective element (a) without an inclination of the retroreflective element (a) and (b) at an inclination of 35°

Зная распределение фазы и амплитуды по сечению пучка, с помощью интеграла Френеля–Кирхгофа рассчитывалось распределение светового поля на апертуре приемного объектива. Зная это распределение, с помощью того же интеграла Френеля–Кирхгофа рассчитывалось распределение плотности мощности на поверхности матрицы ПЗС.

На рис. 6а приведено распределение плотности мощности излучения в плоскости матрицы ПЗС. При расчете считалось, что СЭ изготовлен из стекла марки К8, расположен на расстоянии 100 м от приемника излучения и имеет следующие размеры: $R_1 = 7,7$ мм, $R_2 = 15$ мм. Контрольная метка имеет размеры: $D_1 = 15,4$ мм, $D_2 = 6$ мм, $D_3 = 0,4$ мм, $D_4 = 4$ мм, $D_5 = 8$ мм. Диаметр апертуры объектива приемника излучения составлял 125 мм, а его фокусное расстояние — 625 мм. Для расчета выбрана длина волны излучения 632,8 нм (излучение He-Ne лазера). Фокусное расстояние объектива следует выбирать из соображений компактности приемного устройства и простоты его разработки и изготовления. Кроме этого, на требуемое значение фокусного расстояния объектива влияет размер пикселей матрицы ПЗС. Фокусное расстояние должно быть достаточно большим, чтобы можно было различить отдельные детали изображения. В то же время размер матрицы ПЗС должен соответствовать полю зрения ОС.

При наклонном падении излучения на СЭ, т.е., если СЭ наклонен под некоторым углом относительно направления на излучатель, сечение пучков излучения, прошедших через прозрачные элементы метки, уменьшается тем больше, чем больше угол наклона. Также меняется видимая со стороны приемного устройства форма контрольной метки. Это приводит к искажению ее изображения на поверхности матрицы ПЗС. Расчет показал, что предельный угол наклона СЭ, при котором можно идентифицировать контрольную метку, находится в диапазоне от -35° до $+35^\circ$ (рис. 6б).

КОНТРОЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА БАЗЕ НАБОРА ЛИНЗОВЫХ СВЕТОВОЗВРАЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Другой вариант конструкции КСЭ приведен на рис. 7. Контрольный световозвращающий элемент представляет собой набор СЭ, расположенных в одной плоскости на расстоянии l друг от друга. Три СЭ, находящиеся в левом верхнем углу, служат для определения ориентации КСЭ в пространстве.

По сравнению с первым вариантом этот КСЭ требует гораздо большего количества СЭ. Однако размер СЭ может быть существенно меньше, чем в первом варианте. Представленный на рис. 7 КСЭ содержит 12 СЭ, из которых 9 служат для идентификации КСЭ.

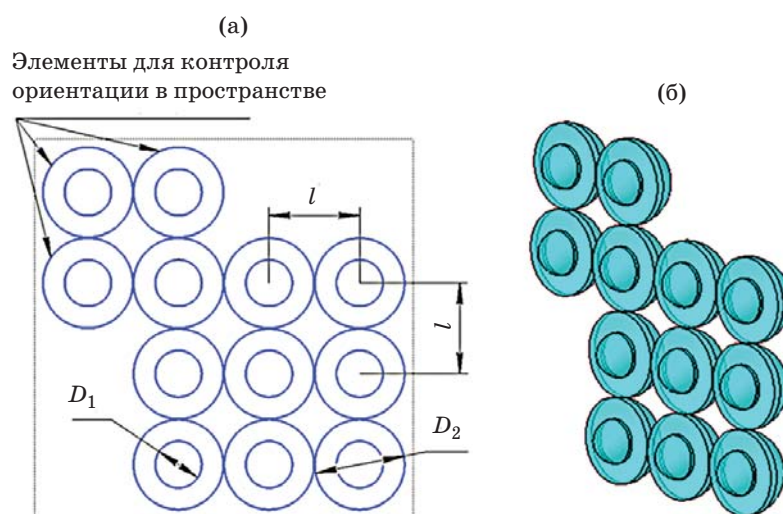


Рис. 7. Контрольный световозвращающий элемент в виде набора СЭ
Fig. 7. A control retroreflective element in the form a set of retroreflective elements

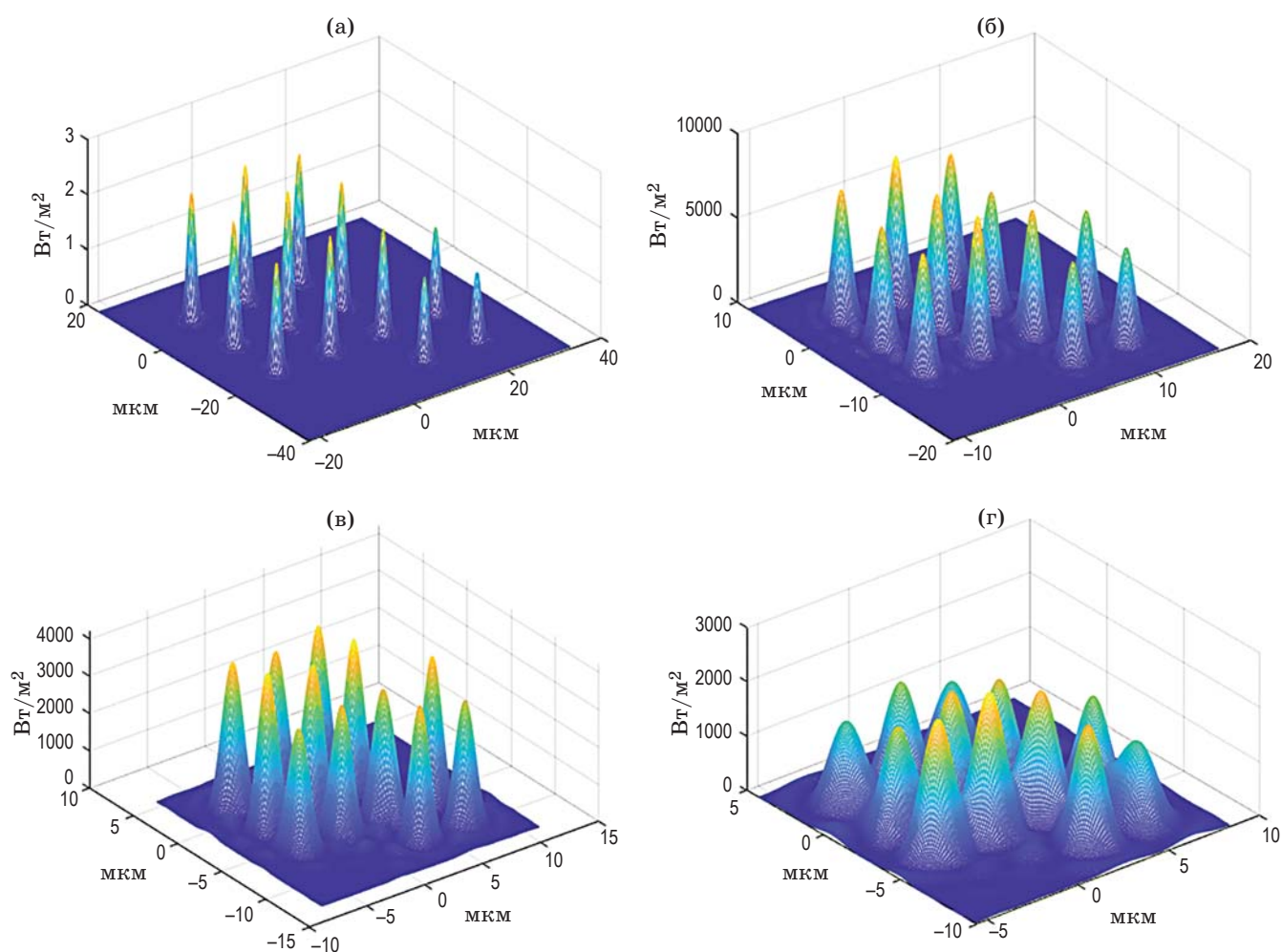


Рис. 8. Распределения плотности мощности излучения в плоскости матрицы ПЗС при расстояниях между приемным устройством и КСЭ 50 (а), 100 (б), 150 (в) и 200 (г) м
Fig. 8. Radiation intensity distributions in the plane of the CCD matrix for distances between the receiver and the control retroreflective element (a) 50, (б) 100, (в) 150, (г) 200 m

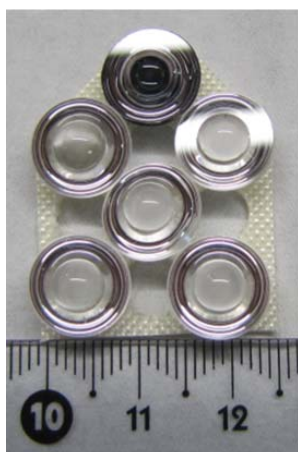


Рис. 9. Фотография шестиэлементного КСЭ

Fig. 9. Photograph of a six-element control retroreflective element

Таким образом, данный КСЭ может иметь $2^9 = 512$ вариантов набора СЭ. То есть с его помощью можно идентифицировать большее количество различных составных частей оптико-механических конструкций.

На рис. 8 представлены рассчитанные распределения плотности мощности излучения в плоскости матрицы ПЗС при различных расстояниях между КСЭ и приемным устройством. При расчете размеры КСЭ брались следующие: $D_1 = 3,6$ мм, $D_2 = 7$ мм, $l = 7,5$ мм. Предполагалось, что лазерное излучение имеет длину волны 632,8 нм и мощность 1 мВт, а объектив оптического устройства приемной и передающей ОС имеет диаметр апертуры 30 мм и фокусное расстояние 75 мм.

На рис. 9 приведена фотография шестиэлементного КСЭ. Шестой СЭ сделан с большим отражением от задней поверхности и используется в качестве репера, остальные пять могут служить для получения набора кодов. Количество возможных вариантов кодов в данном случае составляет $2^5 = 32$.

Рассматриваемый КСЭ может функционировать при гораздо большем угле падения излучения на него по сравнению с КСЭ, рассмотренном в первом варианте. Расчет показал, что угол падения излучения может меняться в пределах от -75° до 75° . Кроме того, в данном случае требуется ОС с меньшим диаметром апертуры объектива для того, чтобы можно было разрешить отраженные пучки излучения от отдельных СЭ. Требуемый для разре-

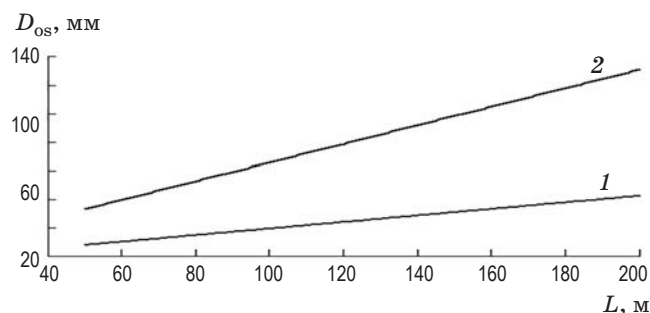


Рис. 10. Зависимости требуемого диаметра апертуры приемного объектива ОС от расстояния до КСЭ при углах наклона КСЭ 0 (1) и 75° (2)

Fig. 10. Dependences of the required aperture diameter of the receiving lens of the optical system on the value of the distance to the control retroreflective element at the angle of inclination of the control retroreflective element (1) 0 and (2) 75°

шения пятен фокусировки от отдельных СЭ (разрешение кода КСЭ) размер апертуры объектива зависит от расстояния между СЭ (от значения l), длины волны излучения и расстояния между КСЭ и приемной ОС. Наклон КСЭ на угол α приводит к уменьшению видимого промежутка между СЭ пропорционально $\cos \alpha$. При использовании КСЭ в системах, где необходимы большие максимальные углы наклона, требуется ОС с большим диаметром приемной апертуры объектива. Значение диаметра D_{0s} , обеспечивающего выполнение этого требования, определяется простой формулой — $D_{0s} = L\lambda/(l \cos \alpha)$. На рис. 10 представлены зависимости требуемого диаметра приемного объектива ОС от предельного расстояния между КСЭ и приемной системой при двух значениях угла наклона α (0 и 75°).

Так как КСЭ может освещаться излучением дальномера под различными углами, проведен анализ применимости КСЭ предложенных размеров при различных углах освещения КСЭ, в результате которого определен предельный угол и требуемый размер КСЭ для работы при максимальном угле. Расчет показал, что максимальный допустимый угол падения излучения при выбранных конструктивных параметрах КСЭ составляет 75° .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана схема лазерного устройства, с помощью которого можно определять простран-

ственные координаты подвижных элементов оптико-механических конструкций с их идентификацией при использовании КСЭ. Представлены два вида КСЭ с системой идентификации, позволяющей с помощью сканирования маломощным лазерным излучением и получения отраженного от них излучения определять пространственное положение элементов оптико-механических конструкций. Использование КСЭ, состоящего из одного СЭ, упрощает конструкцию. Но при этом для разрешения изображения контрольной метки ОС дальномера требуется использование объекта с диаметром более 100 мм. Получены за-

висимости параметров КСЭ от расстояния до элементов оптико-механических конструкций. Также получены требования к параметрам приемной ОС при заданной длине волны лазерного излучения.

Предложенная в работе конструкция лазерного контрольного канала в совокупности с разработанными световозвращателями с большим полем зрения и системой идентификации позволяют реализовать метод контроля пространственного положения элементов трансформируемых конструкций оптико-электронных систем с наибольшей погрешностью определения пространственных координат до 1,5 мм.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бокшанский В.Б., Карасик В.Е., Таранов М.А. Автоматическое обнаружение световозвращателей с помощью лазерных локационных систем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2011. № 2. С. 25–35.
Bokshansky V.B., Karasik V.Ye., Taranov M.A. Automatic detection of retroreflectors using laser location systems [in Russian] // Herald of Bauman MSTU. Instrument Engineering Ser. 2011. № 2. P. 25–35.
2. Васильев Ю., Камышев А. Система определения координат движущихся объектов с лазерным сопровождением // Компоненты и технологии. 2005. № 9. С. 1–3.
Vasil'ev Yu., Kamyshev A. A system for determining coordinates of moving objects with laser tracking [in Russian] // Components and Technol. 2005. № 9. P. 1–3.
3. Ведешин Л.А., Ипатов А.В. Первые космические эксперименты по лазерной локации Луны (К 50-летию посадки на Луну Лунохода-1) // Тр. Института прикладной астрономии РАН. 2020. Вып. 53. С. 30–37. <https://doi.org/10.32876/ApplAstron.53.30-37>
Vadeshin L.A., Ipatov A.V. The first space experiments on the laser location of the Moon (On the 50th anniversary of Lunokhod-1 moonfall) [in Russian] // Proc. Institute of Applied Astronomy RAS. 2020. Iss. 53. P. 30–37. <https://doi.org/10.32876/ApplAstron.53.30-37>
4. Tolker-Nielsen T., Guillen J-C. The first European optical communication terminal in orbit // ESA Bulletin. 1998. № 96. P. 1–3.
5. Keizo N., Yamamoto A. Preliminary design of laser utilizing communications equipment (LUCE) installed on optical inter-orbit communications engineering test satellite (OICETS) // Free-Space Laser Commun. Technol. VII. Internat. Soc. for Optics and Photonics. 1995. V. 2381. P. 14–26.
6. Carrizo C., Knapek M., Horwath J., et al. Optical inter-satellite link terminals for next generation satellite constellations // Proc. Soc. Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). 2020. V. 11272. Article id. 1127203. P. 1–11. <https://doi.org/10.1117/12.2545629>
7. Меснянкин Е.П., Павлов Н.И., Потапов С.Л. и др. Аналитическая модель лазерного дальномера для измерения расстояний до объектов с плохо прогнозируемой динамикой движения // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 2. С. 46–58. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-02-46-58>
Mesnjankin E.P., Pavlov N.I., Potapov S.L., et al. Analytical model of a laser rangefinder for measuring distances to objects with poorly predicted motion dynamics // J. Opt. Technol. 2023. V. 90. № 2. P. 81–87. <https://doi.org/10.1364/JOT.90.000081>
8. Бурдинов К.А., Шашкина К.М., Шагхаев Э. Исследование системы автоматического управления стабилизации изображения бортовых оптико-электронных приборов наведения и слежения // Advanced Eng. Res. 2022. V. 22. № 2. P. 150–160. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-2-150-160>
Burdinov K.A., Shashkina K.M., Shagkhaev E. Study of the automatic image stabilization control system for on-board optoelectronic guidance and tracking devices [in Russian] // Advanced Eng. Res. 2022. V. 22. № 2. P. 150–160. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-2-150-160>
9. Барышников Н.В., Карасик В.Е., Степанов Р.О. Исследование отражательных характеристик тетраэдрических световозвращателей в ИК-диапазоне // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2010. № 1. С. 3–16.
Baryshnikov N.V., Karasik V.Ye., Stepanov R.O. Study of reflective characteristics of tetrahedral retroreflectors in the IR range [in Russian] // Herald of Bauman MSTU. Instrument Engineering Ser. 2010. № 1. P. 3–16.
10. Старовойтов Е.И., Савчук Д.В. Исследование и оптимизация применения угольных отражателей для локации космических объектов // Космическая техника и технологии. 2013. № 1. С. 38–43.
Starovoitov Ye.I., Savchuk D.V. Study and optimization of the use of angle reflectors for the location of space objects [in Russian] // Space Eng. and Technol. 2013. № 1. P. 38–43.
11. Королев Б.В., Кочергин П.П. Использование комплекса аппаратуры космической оптической линии связи для решения задач высокоточной автономной навигации и ориентации космического аппарата // Вторая Всероссийская научно-техн. конф. Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов. Сб. тр. / Под ред. Аванесова Г.А.

- Россия, Таруса. 13–16 сентября 2010. М.: ИКИ РАН, 2011. С. 129–140.
- Koroliyov B.V., Kochergin P.P. Application of a complex of space optical communication line equipment to solve the problems of high-precision autonomous navigation and orientation of the spacecraft [in Russian] // The Second All-Russian Scientific and Technical Conf. Modern problems of orientation and navigation of spacecraft. Proc. / Ed. by Avanesov G.A. RF, Tarusa. September 13–16, 2010. Moscow: SRI RAS Press, 2011. P. 129–140.
12. Савчук Д.В., Старовойтов Е.И. Характеристики бортовых лазерных локационных систем и угловых отражателей для увеличения дальности измерений до 2000 км при сближении космических аппаратов // Космическая техника и технологии. 2014. № 4(7). С. 47–53.
- Savchuk D.V., Starovoitov Ye.I. Characteristics of on-board laser location systems and angle reflectors for increasing the measurement range up to 2000 km when spacecrafts approach each other [in Russian] // Space Eng. and Technol. 2014. № 4(7). P. 47–53.
13. Соколов А.Л., Аментьев А.С., Ненадович В.Д. Космические ретрорефлекторные системы // Светотехника. 2017. № 4. С. 19–23.
- Sokolov A.L., Akentiev A.S., Nenadovich V.D. Space retroreflecting systems [in Russian] // Svetotekhnika. 2017. № 4. P. 19–23.
14. Электронный ресурс URL: <https://jwst.nasa.gov/content/webbLaunch/assets/documents/WebbMediaKit.pdf>
- Electronic resource URL: <https://jwst.nasa.gov/content/webbLaunch/assets/documents/WebbMediaKit.pdf>
15. Электронный ресурс URL: <https://telegra.ph/Rossiiskij-kosmicheskij-yadernyj-buksir-Zevs-byvshij-Nuklon-YAdro-TEHM-Gerkules-07-15>
- Electronic resource URL: <https://telegra.ph/Rossiiskij-kosmicheskij-yadernyj-buksir-Zevs-byvshij-Nuklon-YAdro-TEHM-Gerkules-07-15>
16. Цветков А.Д., Босый О.Н., Пасункин В.Н. и др. Измерение оптических характеристик катадиоптрических световозвращателей // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 8. С. 36–43. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-08-36-43>
- Tsvetkov A.D., Bosyi O.N., Pasunkin V.N., et al. Measurement of optical characteristics of catadioptric retroreflectors // J. Opt. Technol. 2019. V. 86. № 8. P. 486–492. <https://doi.org/10.1364/JOT.86.000486>
17. Соколов А.Л., Мурашкин В.В., Аментьев А.С. и др. Угловые отражатели с интерференционным диэлектрическим покрытием // Квант. электрон. 2013. Т. 43. № 9. С. 795–799.
- Sokolov A.L., Murashkin V.V., Akent'ev A.S., et al. Cube-corner reflectors with interference dielectric coating // Quantum Electronics. 2013. V. 43. № 9. P. 795–799. <https://doi.org/10.1070/QE2013v043n09ABEH015244>
18. Ненадович В.Д., Соколов А.Л. Стойкость углового отражателя с диэлектрическим просветляющим покрытием к действию факторов космического пространства // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 7. С. 37–44. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-07-37-44>
- Nenadovich V.D., Sokolov A.L. Resistance of a corner cube reflector with a dielectric antireflection coating to the space environment // J. Opt. Technol. 2022. V. 89. № 7. P. 395–399. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000395>
19. Меснянкин Е.П., Потапов С.Л., Потапова Н.И. Светоотражающий элемент // Патент РФ № RU2783298C1. 2021. Бюл. № 32. 2022.
- Mesnjanin E.P., Potapov S.L., Potapova N.I. Light-reflecting element // RF Patent № RU 2783298C1. 2021. Bull. № 32. 2022.
20. Аблоков В.К., Колядин С.А., Фролов А.В. Высоко разрешающие оптические системы. М.: Машиностроение, 1985. 176 с.
- Ablekov V.K., Koliadin S.A., Frolov A.V. High-resolution optical systems [in Russian]. Moscow: "Mashinostroenie" Publ., 1985. 176 p.

АВТОРЫ

Евгений Петрович Меснянкин — старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., 188540, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-8777-5308>; mesnjankinEP@nioep.ru

Сергей Леонтьевич Потапов — старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., 188540, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-6735-0959>; potapovSL@nioep.ru

Нина Ивановна Потапова — кандидат технических наук, начальник отдела, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., 188540, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-0520-2077>; potapovaNI@nioep.ru

AUTHORS

Evgenii P. Mesnjankin — Senior Researcher, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-8777-5308>; mesnjankinEP@nioep.ru

Sergei L. Potapov — Senior Researcher, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-6735-0959>; potapovSL@nioep.ru

Nina I. Potapova — PhD (Engineering), Head of Department, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-0520-2077>; potapovaNI@nioep.ru

Статья поступила в редакцию 01.03.2024
Одобрена после рецензирования 15.05.2024
Принята к печати 29.07.2024

The article was submitted to the editorial office 01.03.2024
Approved after review 15.05.2024
Accepted for publication 27.07.2024