

УДК 681.786

## ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ СМЕЩЕНИЙ С АКТИВНЫМИ РЕПЕРНЫМИ МАРКАМИ

Е.А. Сычева<sup>a</sup>, В.В. Коротаев<sup>a</sup>, И.С. Некрылов<sup>a</sup>, А.Н. Тимофеев<sup>a</sup>, М.А. Клешенок<sup>a</sup>, Ж. Родригеш<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>b</sup> Национальный институт телекоммуникаций – Инател, Санта-Рита-ду-Сапукаи, 37540-000, Бразилия

Адрес для переписки: [easycheva@corp.ifmo.ru](mailto:easycheva@corp.ifmo.ru)

### Информация о статье

Поступила в редакцию 03.01.18, принята к печати 15.02.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-205-211

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Сычева Е.А., Коротаев В.В., Некрылов И.С., Тимофеев А.Н., Клешенок М.А., Родригеш Ж. Выбор параметров оптико-электронных систем контроля смещений с активными реперными марками // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 2. С. 205–211. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-205-211

### Аннотация

**Предмет исследования.** Рассмотрена взаимосвязь параметров в оптико-электронной системе контроля пространственного положения крупногабаритных конструкций с активными реперными марками при компенсации влияния вертикального градиента температуры дисперсионным методом. Описано понятие и принцип работы дисперсионного метода определения вертикального градиента температуры с использованием цветной видеокамеры и источника оптического излучения в виде RGB-светодиода. Базовое условие выбора параметров оптико-электронных систем с активными реперными марками выведено из соотношений, определяющих аппаратную реализацию системы, и параметров воздушного тракта, используемых в дисперсионном методе. **Метод.** При исследованиях использован принцип равного влияния составляющих погрешности на суммарную погрешность работы системы. Введено допущение о том, что оптическое излучение распространяется в едином «рефракционном блоке», а флуктуации показателя преломления воздушного тракта во времени и пространстве отсутствуют.

**Основные результаты.** Предложен базовый критерий выбора параметров оптико-электронной системы контроля пространственного положения крупногабаритных конструкций с активными реперными марками, позволяющий подобрать параметры системы таким образом, чтобы минимизировать влияние вертикального градиента температуры. Подтверждена эффективность двухволнового дисперсионного метода для борьбы с рефракцией, а предложенное условие позволяет найти количественную меру этой эффективности и выбрать ряд параметров аппаратуры. **Практическая значимость.** Результаты работы могут найти применение в проектировании оптико-электронных систем с активными реперными марками, работающими в условиях, где воздействие вертикального градиента температуры сильно сказывается на точностных характеристиках системы.

### Ключевые слова

система оптико-электронная, градиент температуры воздушного тракта, метод дисперсионный, погрешность неисключенная, марка реперная активная

## CHOOSING PARAMETERS OF SPATIAL POSITION CONTROL OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEMS WITH ACTIVE REFERENCE MARKS

E.A. Sycheva<sup>a</sup>, V.V. Korotaev<sup>a</sup>, I.S. Nekrylov<sup>a</sup>, A.N. Timofeev<sup>a</sup>, M.A. Kleshchenok<sup>a</sup>,  
J. J. P. C. Rodrigues<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>b</sup> National Institute of Telecommunications – Inatel, Santa Rita do Sapucaí, 37540-000, Brazil

Corresponding author: [easycheva@corp.ifmo.ru](mailto:easycheva@corp.ifmo.ru)

### Article info

Received 03.01.18, accepted 15.02.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-205-211

Article in Russian

**For citation:** Sycheva E.A., Korotaev V.V., Nekrylov I.S., Timofeev A.N., Kleshchenok M.A., Rodrigues Joel J. P. C. Choosing parameters of spatial position control optical-electronic systems with active reference marks. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 205–211 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-205-211

**Abstract**

**Subject of Research.** The paper considers parameters relations in active reference mark optical-electronic system of large-sized structures spatial position control in the presence of vertical temperature gradient. We describe the idea and operation principle of the dispersion method for the vertical temperature gradient determination by color camera and RGB optical radiation source. The basic condition for choosing parameters of active reference mark optical-electronic system is derived from relations that define hardware realization of the system and parameters of the air tract, which are used in the dispersion method. **Method.** The principle of equal influence of error components on the total error is used. We admitted an assumption that optical radiation is propagating in the single "refractive block" and there is no fluctuations of the air tract refractive index in time and space. **Main Results.** The basic criterion is proposed for choosing parameters of active reference mark optical-electronic system for large-sized structures spatial position control in the presence of vertical temperature gradient. The efficiency of the dispersion method for minimization of vertical temperature gradient influence is proved. The basic condition proposed gives the possibility to estimate this efficiency and choose the hardware parameters. **Practical Relevance.** The results given in the paper can be used in design of active reference mark optical-electronic systems where the influence of the air tract is strong.

**Keywords**

optical-electronic system, air tract temperature gradient, dispersion method, non-excluded error component, active reference mark

**Введение**

В ряде случаев мониторинг деформаций крупногабаритных объектов может эффективно осуществляться с помощью оптико-электронных систем с активными реперными марками (ОЭС АРМ) [1–3]. Как правило, система состоит из активных реперных марок и одного или нескольких базовых блоков, программно объединенных блоком обработки, который и позволяет определять положение распределенных в пространстве марок в требуемой системе координат [4].

При работе ОЭС АРМ на больших дистанциях одним из основных влияющих факторов является искривление хода пучков лучей, вызванное рефракцией оптического излучения в воздушном тракте. Явление рефракции возникает вследствие неоднородного прогревания слоев воздушного тракта и формирования тем самым вертикального градиента температуры. Градиент температуры воздушных слоев порождает градиент показателя преломления, который может рассматриваться как оптический клин, стоящий на пути распространения оптического излучения. Известен дисперсионный метод измерения вертикального градиента температуры [5–9], заключающийся в анализе хода лучей в различных спектральных диапазонах. В силу дисперсии, возникающей при прохождении оптического излучения через воздушный тракт с вертикальным градиентом температуры, различные спектральные составляющие оптического излучения будут по-разному преломляться в воздушном тракте, что в конечном счете приведет к возникновению линейной разности  $H$  между координатами центров изображений активной реперной марки (АРМ) в различных спектральных диапазонах (рис. 1).

В большинстве случаев оптико-электронные системы контроля пространственного положения крупногабаритных объектов работают на открытом пространстве, где влияние воздушного тракта наиболее выражено. В таком случае при проектировании системы необходимо в обязательном порядке учитывать возможное влияние вертикального градиента температуры [10].

**Целью** настоящей работы является выработка базового критерия выбора параметров оптико-электронной системы контроля пространственного положения крупногабаритных конструкций с активными реперными марками при компенсации влияния вертикального градиента температуры дисперсионным методом.

**Теоретическая часть**

На рис. 1 геометрически показано искривление пучков лучей, идущих от АРМ и распространяющихся в воздушном тракте с вертикальным градиентом температуры  $grad_y T$ . На рис. 1: АРМ – активная реперная марка;  $\delta y_1$  и  $\delta y_2$  – положение АРМ в плоскости анализа;  $z$  – расстояние между плоскостью анализа и АРМ;  $\lambda_1$  – основная длина волны оптического излучения АРМ;  $\lambda_2$  – вспомогательная длина волны оптического излучения АРМ.

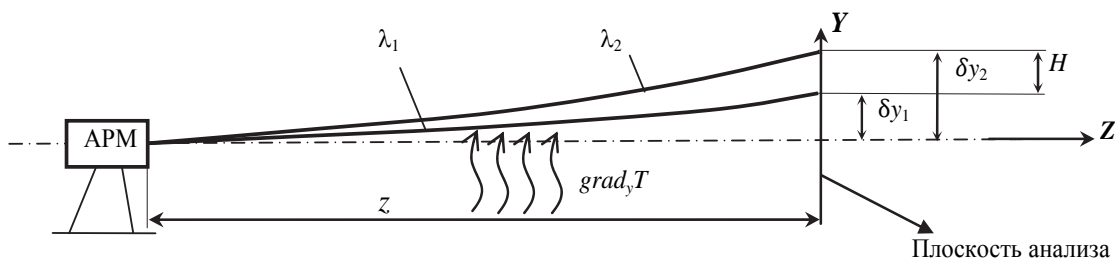


Рис. 1. Схема направления распространения оптического излучения от активной реперной марки в воздушном тракте с вертикальным градиентом температуры

В видимом диапазоне оптического излучения смещение хода луча в воздушном тракте под воздействием вертикального градиента температуры без учета воздействия влажности и давления, которое несущественно [11, 12], описывается выражением

$$\delta y = - \int_0^z \frac{n-1}{nT \cos^2 \nu} \cdot \text{grad}_y T \cdot z dz,$$

где  $n$  – показатель преломления воздуха для заданной длины волны излучения;  $T$  – температура воздушного тракта;  $\text{grad}_y T$  – величина вертикального градиента температуры;  $z$  – расстояние от АРМ до оптической системы приемной части;  $\nu$  – угол между базовым направлением излучения и касательной к направлению излучения в точке наблюдения.

Введем допущение, что при измерениях пучок излучения распространяется в одном «рефракционном блоке», а возможные флуктуации показателя преломления вдоль трассы во времени и пространстве отсутствуют. Тогда предыдущее выражение можно записать как

$$\delta y = - \frac{n-1}{T} \cdot \text{grad}_y T \cdot \frac{z^2}{2}. \tag{1}$$

Измеряя величины  $\delta y_1$  и  $\delta y_2$  для длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  с соответствующими показателями преломления воздушного тракта  $n_1$  и  $n_2$  и находя разность  $H = \delta y_2 - \delta y_1$ , из выражения (1) можно получить величину вертикального градиента температуры в виде

$$\text{grad}_y T = \frac{2T \cdot H}{z^2 (n_1 - n_2)}. \tag{2}$$

Подставляя выражение (2) в (1), получим координаты  $y_1$  реперной марки при скомпенсированном влиянии вертикального градиента температуры для излучения основной длины волны:

$$y_1 = \frac{(n_1 - 1) \cdot H}{(n_1 - n_2)}. \tag{3}$$

### Реализация дисперсионного метода в ОЭС АРМ

Известна реализация дисперсионного метода определения вертикального градиента температуры с использованием RGB-светодиода в качестве активной реперной марки и цифровой видеокамеры в качестве матричного приемника оптического излучения (МПОИ) [13, 14]. В такой системе анализ изображений марки для различных спектральных составляющих производится с помощью разделения сигнала с матричного фотоприемника по пикселям, соответствующим различным по цвету элементам фильтра Байера, нанесенным на матрицу. Различные по цвету элементы создают свое цветовое поле анализа (R-поле, соответствующее красным элементам фильтра Байера, G-поле, соответствующее зеленым элементам, и B-поле, соответствующее синим элементам). Таким образом, становится возможным одновременно анализировать изображение АРМ в различных спектральных диапазонах (рис. 2).

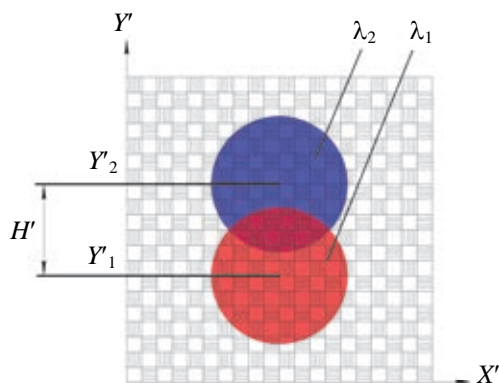


Рис. 2. Координаты изображений активной реперной марки  $Y'_1$  и  $Y'_2$ , формируемых излучением основной  $\lambda_1$  и вспомогательной  $\lambda_2$  длин волн, на едином фотоприемном поле с фильтром Байера

На рис. 2 вертикальными штрихами обозначены красные элементы фильтра Байера, горизонтальными штрихами – синие. Величины  $H'$ ,  $Y'_1$  и  $Y'_2$  на рис. 2, в отличие от соответствующих величин  $H$ ,  $\delta y_1$  и  $\delta y_2$ , относятся к системе координат матричного фотоприемника, т.е. к пространству изображений. Тогда, согласно законам геометрической оптики, величину  $H$  можно выразить через  $H'$ :

$$H = \frac{H' \cdot z}{a'},$$

где  $a'$  – задний отрезок объектива видеокамеры. Тогда расчетное выражение (3) преобразуется к виду

$$y_1 = \frac{(n_1 - 1) \cdot H' \cdot z}{(n_1 - n_2) \cdot a'} \quad (4)$$

Реализация дисперсионного метода может быть интегрирована в каналы контроля ОЭС АРМ без какого-либо конструктивного вмешательства, а лишь с использованием двухцветного источника излучения в качестве активной реперной марки и цветной видеокамеры (на данный момент аберрации оптической системы не учитываются).

Анализируя расчетное выражение (4) можно выделить основные составляющие суммарной погрешности определения положения АРМ:

- погрешность определения показателей преломления воздушного тракта  $dn_i$ ;
- погрешность определения дистанции измерений  $dz$ ;
- погрешность определения разности координат  $dH'$ ;
- погрешность определения заднего отрезка объектива  $da'$ .

Дифференцируя выражение (3) по  $dH'$ , получим составляющую  $dH'$ , определяющую неисключенную погрешность нахождения разности между координатами метки на основной и вспомогательной длинах волн, т.е. погрешность реализации дисперсионного метода:

$$\sigma_{y_{dH'}} = \frac{(n_1 - 1) \cdot dH' \cdot z}{(n_1 - n_2) \cdot a'} \quad (5)$$

Основываясь на принципе равного влияния всех составляющих погрешности [15] и обозначая их количество как  $N$  можно записать суммарную погрешность следующим образом:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{y_{dH'}} \cdot \sqrt{N}.$$

Раскрывая (5) и задаваясь для конкретной системы суммарной допустимой погрешностью  $\sigma_{\Sigma}$ , запишем условие

$$\frac{(n_1 - 1) \cdot dH' \cdot z}{(n_1 - n_2) \cdot a'} \cdot \sqrt{N} \leq \sigma_{\Sigma} \quad (6)$$

Преобразуем выражение (6) так, чтобы в левой части неравенства находились величины, относящиеся к параметрам воздушного тракта, а в правой – величины, относящиеся к аппаратной реализации системы:

$$\frac{n_1 - 1}{n_2 - n_1} \leq \frac{\sigma_{\Sigma} \cdot a'}{z \cdot \sqrt{N} \cdot dH'} \quad (7)$$

В результате получено базовое условие выбора параметров ОЭС АРМ при компенсации влияния вертикального градиента температуры с помощью дисперсионного метода.

На рис. 3 представлена зависимость среднеквадратического отклонения (СКО) разности координат изображений  $dH'$  на МПОИ от длины волны  $\lambda_2$ , при  $\lambda_1=0,3$  мкм,  $a'=1000$  мм, дистанции  $z=300$  м и  $N=4$ ,  $\sigma_{\Sigma}=0,5$  мм. Из графика видно, что величина  $dH'$ , определяющая позиционную чувствительность к смещениям изображений марки для двух длин волн, должна составлять величину не более 0,11 мкм для длины волны  $\lambda_2=0,9$ .

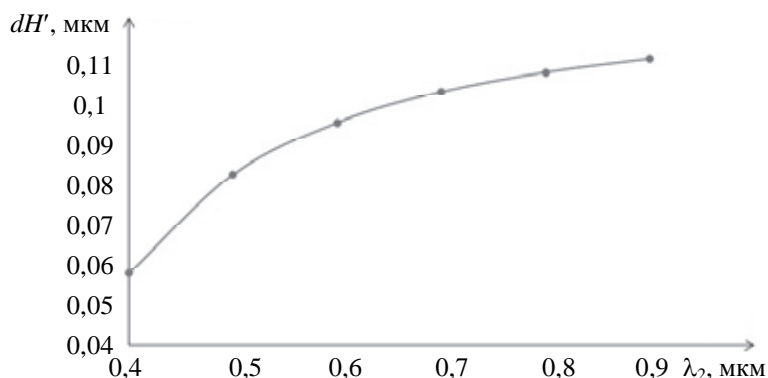


Рис. 3. Зависимость требуемого среднеквадратического отклонения разности координат изображений  $dH'$  на матричном приемнике оптического излучения от выбранной длины волны  $\lambda_2$  для дисперсионного метода

### Экспериментальные исследования

С учетом разработанного критерия (7) были выбраны параметры оптической схемы и сформирована физическая модель ОЭС АРМ (рис. 4), состоящая из базового блока, представляющего собой цветную телевизионную видеокамеру с КМОП-матрицей OmniVision OV5620 (размер пикселя 2,2 мкм) в связке с объективом Юпитер-21М (фокусное расстояние 200 мм), активной реперной марки в виде RGB-светодиода VL-L515 фирмы Vetlux ( $\lambda_b = 462$  нм и  $\lambda_r = 630$  нм), устройств ввода и вывода, пульта управления АРМ, нагревательного элемента и блока обработки информации.



Рис. 4. Экспериментальный стенд с физической моделью опико-электронной системы с активными реперными марками

Управление физической моделью ОЭС АРМ осуществлялось при помощи виртуального инструмента, разработанного в программной среде LabVIEW. В этой программе сигнал, поступающий от видеокамеры, передается на блок обработки, где сначала из поступившего электрического сигнала цифрового изображения выбирается необходимый цветовой канал, а затем из сформированного изображения выбирается интересующая область (или области) [16]. Далее происходит вычисление координат изображения АРМ в заданной области. Для нахождения координат центра изображений на различных цветовых полях использовался алгоритм энергетического взвешивания [17].

Экспериментально получено, что постоянная разница в определении энергетического центра изображения АРМ в синем и красном полях не превышала 1,5 мкм, что обусловлено структурой МПОИ с шаблоном Байера, в то время как оценка СКО основной погрешности контроля положения АРМ на дистанции 4 м не превысила 0,31 мкм (рис. 5).

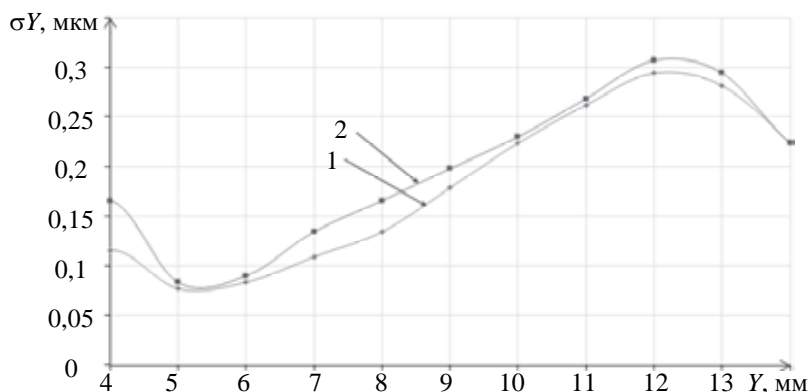


Рис. 5. Зависимости оценок среднеквадратического отклонения основной погрешности определения координаты энергетического центра активной реперной метки  $\sigma_Y$  в опико-электронной системе в синем (кривая 1) и красном (кривая 2) каналах видеокамеры при вертикальном смещении активной реперной метки  $Y$

После выхода источника теплового излучения на режим и стабилизации градиента температуры воздушного тракта величина дисперсионной разности составила  $H^t=0,13$  пкс, что соответствует вертикальному градиенту температуры  $grad_y T = -2,39$  К/м. При этом в ходе эксперимента относительная погрешность определения дисперсионной разности изменялась незначительно и в среднем составляла 6%.

Результаты исследований показали, что для увеличения чувствительности регистрации смещений в ОЭС АРМ целесообразно использовать дифракционные [18] и интерференционные явления при анализе углов прихода разноспектральных пучков от меток.

### Заключение

В результате теоретических и экспериментальных исследований:

- предложен базовый критерий (7) выбора параметров оптико-электронной системы контроля пространственного положения крупногабаритных конструкций с активными реперными марками, позволяющий подобрать параметры системы таким образом, чтобы минимизировать влияние вертикального градиента температуры воздушного тракта;
- экспериментально подтверждена реализуемость двухволнового дисперсионного метода для ослабления влияния вертикального градиента температуры воздушного тракта, а условие (7) позволяет найти количественную меру этой эффективности и выбрать ряд параметров аппаратуры.

### Литература

1. Vasilev A.S., Konyakhin I.A., Timofeev A.N., Lashmanov O.U., Molev F.V. Electrooptic converter to control linear displacements of the large structures of the buildings and facilities // *Proceedings of SPIE*. 2015. V. 9525. doi: 10.1117/12.2184528
2. Коротаев В.В., Пантюшин А.В., Тимофеев А.Н. Оптико-электронные системы контроля положения реперных меток // *Путь и путевое хозяйство*. 2012. № 11. С. 34–37.
3. Zhao X., Li X., Liang H., Deng F., Zhou L., Chen W. The detecting method of building deformation based on terrestrial laser point cloud // *Proc. 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Computational Intelligence and Security*. Wuxi, Jiangsu, China, 2016. P. 466–469. doi: 10.1109/CIS.2016.112
4. Mikheev S.V., Konyakhin I.A., Barsukov O.A. Optical-electronic system for real-time structural health monitoring of roofs // *Proceedings of SPIE*. 2016. V. 9896. Art. 98961C. doi: 10.1117/12.2227862
5. Прилепин М.Т., Голубев А.Н. Инструментальные методы геодезической рефрактометрии. М.: ВИНТИ, 1979. 91 с.
6. Запругаева Л.А., Свешникова И.С. Расчет и проектирование оптических систем. М.: МИИГАиК, 2009. 176 с.
7. Ingensand H., Boeckem B. A high-accuracy alignment system based on the dispersion effect // *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Workshop on Accelerator Alignment (IWA97)*. 1997.
8. Грызулин С.И. Юстировка оптических трактов. М.: МАКС Пресс, 2011. 194 с.
9. *Optical Methods in Engineering Metrology*. Ed. D.C. Williams. Springer, 2012. 477 p.
10. Якушенков Ю.Г. Основы оптико-электронного приборостроения. М.: Логос, 2013. 376 с.
11. Деметьев В.Е. Современная геодезическая техника и ее применение. М.: Академический Проект, 2008. 591 с.
12. Неумывакин Ю.К. Автоматизация геодезических измерений в мелиоративном строительстве. М.: Недра, 1984. 128 с.
13. Богатинский Е.М., Коротаев В.В., Мараев А.А., Тимофеев А.Н. Исследование путей ослабления влияния воздушного тракта в распределенных оптико-электронных системах предупреждения техногенных катастроф // *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО*. 2010. № 3 (67). С. 130.
14. Мараев А.А., Тимофеев А.Н., Ярышев С.Н. Исследование метода спектральной селекции при перекрестных связях в каналах цветных видеокамер // *Приборостроение*. 2012. Т. 55. № 4. С. 17–21.
15. Латыев С.М. Конструирование точных (оптических) приборов. СПб.: Политехника, 2007. 579 с.
16. Лашманов О.Ю., Пантюшин А.В., Тимофеев А.Н., Ярышев С.Н. Исследование возможности применения спектрального метода для ослабления влияния воздушного тракта в оптико-электронных системах контроля положения // *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО*. 2011. № 3 (73). С. 5–9.
17. Андреев А.Л., Коротаев В.В., Пашковский Д.М. Селекция изображений малоразмерных объектов на неоднородном фоне в условиях помех // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2013. Т. 56. № 10. С. 88–93.
18. Nekrylov I.S., Timofeev A.N., Kleshchenok M.A. The research of the possibility of the dispersion method sensitivity increase for the air tract vertical temperature gradient determination by analyzing the diffraction pattern // *Proceedings of SPIE*. 2017. V. 10231. Art. 1023115. doi: 10.1117/12.2266744

### References

1. Vasilev A.S., Konyakhin I.A., Timofeev A.N., Lashmanov O.U., Molev F.V. Electrooptic converter to control linear displacements of the large structures of the buildings and facilities. *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9525. doi: 10.1117/12.2184528
2. Korotaev V.V., Pantyushin A.V., Timofeev A.N. Optoelectronic systems for control of the reference markers position. *Railway Track and Facilities*, 2012, no. 11, pp. 34–37. (in Russian)
3. Zhao X., Li X., Liang H., Deng F., Zhou L., Chen W. The detecting method of building deformation based on terrestrial laser point cloud. *Proc. 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Computational Intelligence and Security*. Wuxi, Jiangsu, China, 2016, pp. 466–469. doi: 10.1109/CIS.2016.112
4. Mikheev S.V., Konyakhin I.A., Barsukov O.A. Optical-electronic system for real-time structural health monitoring of roofs. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9896, art. 98961C. doi: 10.1117/12.2227862
5. Prilepin M.T., Golubev A.N. *Instrumental Methods of Geodesic Refractometry*. Moscow, VINITI, 1979, 91 p. (in Russian)
6. Zapryagaeva L.A., Sveshnikova I.S. *Calculation and Design of Optical Systems*. Moscow, MIIGAiK Publ., 2009, 176 p. (in Russian)
7. Ingensand H., Boeckem B. A high-accuracy alignment system based on the dispersion effect. *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Workshop on Accelerator Alignment, IWA97*, 1997.
8. Gryzulin S.I. *Alignment of Optical Paths*. Moscow, MAKS Press, 2011, 194 p. (in Russian)
9. *Optical Methods in Engineering Metrology*. Ed. D.C. Williams. Springer, 2012, 477 p.
10. Yakushenkov Yu.G. *Fundamentals of Optoelectronic Instrumentation*. Moscow, Logos Publ., 2013, 376 p. (in Russian)
11. Dement'ev V.E. *Modern Geodetic Engineering and its Application*. Moscow, Akademicheskii Proekt Publ., 2008, 591 p. (in Russian)
12. Neumyvakin Yu.K. *Automation of Geodetic Measurements in Meliorative Land Development*. Moscow, Nedra Publ., 1984, 128 p.
13. Bogatinskii E.M., Korotaev V.V., Maraev A.A., Timofeev A.N. Research of ways of optical path influence decrease in distributed optical-electronic systems for prevention of anthropogenic disasters. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2010, no. 3, p. 130. (in Russian)
14. Maraev A.A., Timofeev A.N., Yaryshev S.N. Study of multispectral selection method under cross-impacts in color videocamera channels. *Journal of Instrument Engineering*, 2012, vol. 55, no. 4, pp. 17–21. (in Russian)
15. Latyev S.M. *Construction of Precise (Optical) Devices*. St. Petersburg, Politekhnik Publ., 2007. 579 p. (in Russian)
16. Lashmanov O.Yu., Pantyushin A.V., Timofeev A.N., Yaryshev S.N. Application possibility analysis of multispectral method for air channel influence minimization in optical-electronic target attitude control systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011, no. 3, pp. 5–9. (in Russian)
17. Andreev A.L., Korotaev V.V., Pashkovsky D.M. Selection of small objects images against an inhomogeneous background

under noise conditions. *Journal of Instrument Engineering*, 2013, vol. 56, no. 10, pp. 88–93. (in Russian)

18. Nekrylov I.S., Timofeev A.N., Kleshchenok M.A. The research of the possibility of the dispersion method sensitivity increase for the air tract vertical temperature gradient determination by analyzing the diffraction pattern. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10231, art. 1023115. doi: 10.1117/12.2266744

### Авторы

**Сычева Елена Александровна** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57190682466, ORCID ID: 0000-0001-7045-5383, easycheva@corp.ifmo.ru

**Коротаев Валерий Викторович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 6603855670, ORCID ID: 0000-0001-7102-5967, korotaev@grv.ifmo.ru

**Некрылов Иван Сергеевич** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57050342500, ORCID ID: 0000-0001-7023-5532, ivan.s.nekrylov@outlook.com

**Тимофеев Александр Николаевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57189271286, ORCID ID: 0000-0002-7344-9832, timofeev@grv.ifmo.ru

**Клещенко Максим Андреевич** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 56202570600, ORCID ID: 0000-0003-1787-214X, mkleshchenok@corp.ifmo.ru

**Родригеш Жоел Жозе Пуга Козлью** – Ph.D., профессор, старший научный сотрудник, Национальный институт телекоммуникаций – Инател, Санта-Рита-ду-Сапукаи, 37540-000, Бразилия, профессор-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 25930566300, ORCID ID: 0000-0001-8657-3800, joeljr@ieee.org

### Authors

**Elena A. Sycheva** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57190682466, ORCID ID: 0000-0001-7045-5383, easycheva@corp.ifmo.ru

**Valery V. Korotaev** – D.Sc., Professor, Head of Chair, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 6603855670, ORCID ID: 0000-0001-7102-5967, korotaev@grv.ifmo.ru

**Ivan S. Nekrylov** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57050342500, ORCID ID: 0000-0001-7023-5532, ivan.s.nekrylov@outlook.com

**Alexander N. Timofeev** – PhD, Senior scientific researcher, leading engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57189271286, ORCID ID: 0000-0002-7344-9832, timofeev@grv.ifmo.ru

**Maksim A. Kleshchenok** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 56202570600, ORCID ID: 0000-0003-1787-214X, mkleshchenok@corp.ifmo.ru

**Joel Jose Puga Coelho Rodrigues** – PhD, Professor, Senior scientific researcher, National Institute of Telecommunications - Inatel, Santa Rita do Sapucaí, 37540-000, Brazil, professor-researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 25930566300, ORCID ID: 0000-0001-8657-3800, joeljr@ieee.org