

КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ РЕПЕРНЫХ МАРОК, ВНОСИМОЙ ВОЗДУШНЫМ ТРАКТОМ

Е. А. СЫЧЕВА, В. В. КОРОТАЕВ, А. А. МАРАЕВ, А. Н. ТИМОФЕЕВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: aamaraev@corp.ifmo.ru*

Исследовано влияние вертикального градиента температуры воздушного тракта на погрешность измерений при определении пространственного положения активных реперных марок, установленных на контролируемом объекте, с помощью оптико-электронных систем. Для компенсации воздействия воздушной среды предлагается использовать дисперсионный метод. Обоснована взаимосвязь параметров систем и требований к погрешности контроля. Экспериментальное исследование позволило оценить погрешность определения дисперсионной разности. Выведено условие выбора параметров системы, основанное на минимизации неисключенной составляющей погрешности от воздействия воздушного тракта.

Ключевые слова: *система оптико-электронная, градиент температуры воздушного тракта, погрешность неисключенная, марка активная*

Введение. Для обеспечения безопасности при строительстве и эксплуатации крупногабаритных объектов различного функционального назначения (жилые и промышленные помещения, мосты, крупногабаритные суда и пр.) необходимо непрерывно контролировать форму несущих конструкций этих объектов. В ряде случаев мониторинг может эффективно осуществляться с помощью оптико-электронных систем с активными реперными марками (ОЭС АРМ) [1—5]. Система состоит из активных реперных марок и базового блока, который содержит блок обработки, определяющий положение марок, закрепленных на контролируемой поверхности и распределенных в пространстве [6, 7]. В качестве источников излучения в активных марках, как правило, используются полупроводниковые излучающие диоды [8]. Изображения марок регистрируются на матричном приемнике оптического излучения (МПИ) базового блока, а блок обработки вычисляет положение их энергетических центров, которое затем переводит в координаты поверхности контролируемого объекта в пространстве.

На результаты измерений в ОЭС, работающих на больших расстояниях, существенно влияет искривление пучков лучей из-за градиента показателя преломления воздуха, вызванное неоднородностью температурного поля [9]. Поскольку контролируемые конструкции могут эксплуатироваться в различных условиях, следует учитывать как изменение суточной и сезонной температуры окружающей среды, так и воздействие локальных источников тепла, что обуславливает необходимость разработки систем, контролирующих форму поверхностей в режиме реального времени.

В реальных условиях эксплуатации изображение марки может смещаться как из-за деформации элементов самой конструкции (это может указывать на возникновение аварийной ситуации), так и под воздействием неоднородностей воздушной среды в оптическом тракте (это указывает на ложное смещение). Во избежание этого предлагается использовать дисперсионный метод [10—12], позволяющий ослабить воздействие воздушного тракта. Метод основан на измерении координат энергетического центра изображения активной реперной марки одновременно на нескольких длинах волн [13] с последующим определением ошибки, вносимой воздушным трактом.

Целями исследований являются определение возможностей дисперсионного метода в ОЭС АРМ для ослабления воздействия вертикального градиента температуры воздушного тракта на результаты измерений, выявление взаимосвязи параметров системы при контроле положения объектов для различных условий применения ОЭС, а также экспериментальное исследование метода на макете ОЭС с активными реперными марками.

Теоретические основы дисперсионного метода. Под действием вертикального градиента температуры воздушного тракта $\text{grad}T$ происходит смещение пучка лучей Y_i (рис. 1) с длиной волны излучения λ_i , которое можно с небольшими допущениями [14, 15] определить по формуле

$$Y_i = -\frac{(n_i - 1)z_0^2 \text{grad}T}{2n_i T}, \quad (1)$$

где n_i — показатель преломления воздуха для длины волны λ_i при температуре окружающей среды T , z_0 — расстояние до плоскости наблюдения (т.е. зависимость показателя преломления воздушной среды от длины волны будет приводить к соответствующему изменению величины Y_i). Для расчетов использовалась модель показателя преломления воздуха, описанная, например, в [9]: $n(\lambda) - 1 = A + 3B/\lambda^2 + 5C/\lambda^4$, где A , B и C — коэффициенты дисперсии излучения.

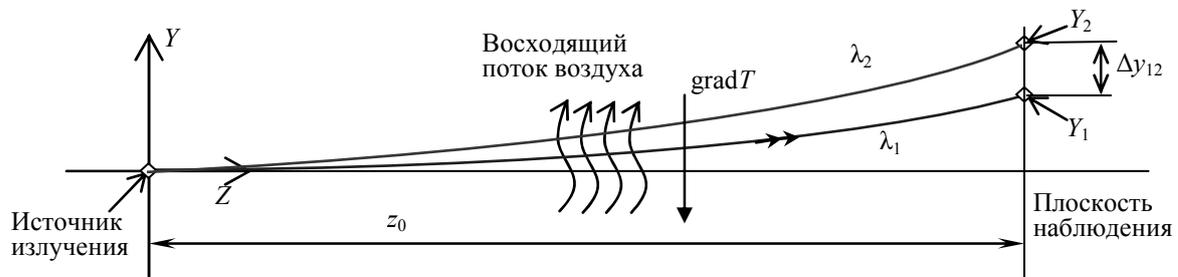


Рис. 1

Такие смещения на МПИ будут определены как координаты y_1 и y_2 изображений марки для λ_1 и λ_2 соответственно, разность между которыми, в соответствии с законами геометрической оптики, составит:

$$\Delta y_{12} = y_1 - y_2 = \frac{\text{grad}T z_0 a'}{2T n_1 n_2} (n_2 - n_1), \quad (2)$$

где a' — задний отрезок оптической системы базового блока, отсюда

$$\text{grad}T = \frac{2T n_1 n_2 \Delta y_{12}}{a' z_0 (n_2 - n_1)}. \quad (3)$$

Если в ОЭС АРМ контроля смещений среднее квадратичное отклонение (СКО) разности координат Δy_{12} обусловлено только внутренними шумами МПИ, СКО $\sigma_{\text{grad}T}$ определения градиента температуры, заданного выражением (3), будет

$$\sigma_{\text{grad}T} = \frac{2n_1 n_2 T \sigma_{\Delta y_{12}}}{a' z_0 (n_2 - n_1)}, \quad (4)$$

где $\sigma_{\Delta y_{12}}$ — СКО разности координат Δy_{12} .

Очевидно, что погрешность δy_{Σ} всей системы содержит неисключенную составляющую погрешности определения вертикального градиента температуры $\sigma_{\text{grad}T}$ по выражению (4).

С учетом (1) и (4) для случая регистрации смещений марки, излучающей на длине волны λ_1 , в плоскости, находящейся на расстоянии z от нее, выражение для неисключенной погрешности при использовании дисперсионного метода в общем виде будет следующим:

$$\sigma_{1\text{grad}T} = \left(1 - \frac{1}{n_1 T}\right) \left| \sigma_{\text{grad}T} \right| \frac{z^2}{2} = \left| \frac{(n_1 - 1)n_2 z^2 \sigma_{\Delta y_{12}}}{a' z_0 (n_2 - n_1)} \right|. \quad (5)$$

Для случая регистрации смещений марки с использованием оптического излучения с длиной волны λ_2 получаем аналогичное выражение:

$$\sigma_{2\text{grad}T} = \left(1 - \frac{1}{n_2 T}\right) \left| \sigma_{\text{grad}T} \right| \frac{z^2}{2} = \left| \frac{(n_2 - 1)n_1 z^2 \sigma_{\Delta y_{12}}}{a' z_0 (n_2 - n_1)} \right|. \quad (6)$$

Как видно из формул (4), (5) для неисключенной составляющей погрешности $\sigma_{\text{grad}T}$, целесообразно определять пространственное положение марки по длине волны, для которой показатель преломления воздуха меньше, т.е. для большей длины волны оптического излучения, так как при этом неисключенная составляющая погрешности $\sigma_{\text{grad}T}$ меньше.

Для эффективного применения дисперсионного метода при выборе параметров ОЭС, в предположении, что все составляющие погрешности влияют одинаково, предлагается учитывать соотношение

$$\sigma_{\text{grad}T} \leq \delta y_{\Sigma} / \sqrt{N}, \quad (7)$$

где N — число неисключенных составляющих погрешностей проектируемой системы, δy_{Σ} — суммарная погрешность. Исходя из специфики ОЭС в качестве неисключенных составляющих учитываются погрешность, вызванная деградацией источников излучения; погрешность измерения расстояния от источника до приемной части; погрешность квантования получаемого оптического сигнала по уровню; погрешность определения координат на фотоприемнике, обусловленная внутренними шумами; погрешность измерения температуры; погрешность, вызванная изменением температуры излучателя и пр.

Тогда из выражений (5) и (7) получим взаимосвязь параметров системы, при которых эффективно применять дисперсионный метод:

$$\frac{(n_1 - 1)n_2 z^2 \sigma_{\Delta y_{12}}}{a' z_0 (n_2 - n_1)} \leq \frac{\delta y_{\Sigma}}{\sqrt{N}}. \quad (8)$$

Выражение (8) позволяет определять границы применимости дисперсионного метода в ОЭС, так как связывает параметры среды для длин волн λ_1 и λ_2 выбираемых источников излучения с СКО определения координат изображений на матричном фотоприемном поле и задним отрезком объектива.

Из (8) получим выражение, определяющее требования к системе, при которых реализуется указанное в (7) условие:

$$\frac{\sigma_{\Delta y_{12}}}{a'} \leq \frac{\delta y_{\Sigma} z_0 (n_2 - n_1)}{(n_1 - 1)n_2 z^2 \sqrt{N}}, \quad (9)$$

где отношение $\sigma_{\Delta y_{12}} / a' = \delta\varphi$ представляет собой требуемую потенциальную чувствительность регистрации смещения на матрице в ОЭС АРМ. Таким образом, для выполнения условия (7) необходимо, чтобы потенциальная чувствительность удовлетворяла соотношению (9), содержащему параметры самой системы и ее элементов и параметры среды для рабочих длин волн. Это ограничение определяет методику расчета и выбора параметров, проектируемых ОЭС:

— по формуле (9) рассчитывается требуемая потенциальная чувствительность $\delta\varphi$, с учетом показателей преломления воздуха n_1 и n_2 для выбранных длин волн активных марок, задаваемой погрешности контроля положения марки δy_{Σ} , расстояний до базовой марки z_0 и

расстояния до контролируемой точки z и количества неисключенных погрешностей системы в целом N ;

— на основе выражения (9) и СКО определения координат при регистрации изображения для выбранного МПИ и алгоритма обработки изображений марок $\sigma_{\Delta 12}$ выбирается задний отрезок объектива a' ;

— СКО определения координат при регистрации изображения также зависит от облученности изображения марки, поэтому при энергетическом расчете для класса исследуемых ОЭС следует соблюдать следующее условие [10]:

$$\frac{L\pi\tau_c D^2}{8a'^2} \leq 0,8E_{\text{нас}}, \quad (10)$$

где L — яркость источника оптического излучения марки, τ_c — коэффициент пропускания оптического излучения средой, D — диаметр входного зрачка объектива базового блока, $E_{\text{нас}}$ — максимально допустимая облученность на МПИ (облученность насыщения).

Расчеты по предложенной методике показали, что для $\text{grad}T = 0,1$ град/м, цветного МПИ OV5620 с размером пиксела $2,25 \times 2,25$ мкм, $\lambda_1 = 0,369$ мкм ($n_1 = 1,000\ 309\ 9$), $\lambda_2 = 0,92$ мкм ($n_2 = 1,000\ 278\ 1$), при $z_0 = 300$ м, $\delta y_{\Sigma} = 0,5$ мм, $z = 200$ м, $N = 5$ требуется объектив с фокусным расстоянием 200 мм и диаметром входного зрачка не менее 54 мм.

Экспериментальное исследование. Для проведения эксперимента, подтверждающего возможность использования дисперсионного метода в системах с активными реперными марками, разработан стенд (рис. 2, 3), который включает в себя блок питания марки (БПМ), пульт управления маркой (ПУМ), реперную марку (РМ), источник теплового воздействия (ИТВ), фотоприемный модуль (ФМ), персональный компьютер (ПК). Фотоприемный модуль, в свою очередь, состоит из объектива (ОБ), матричного приемника оптического излучения (МПИ), блока предварительной обработки (БПО).

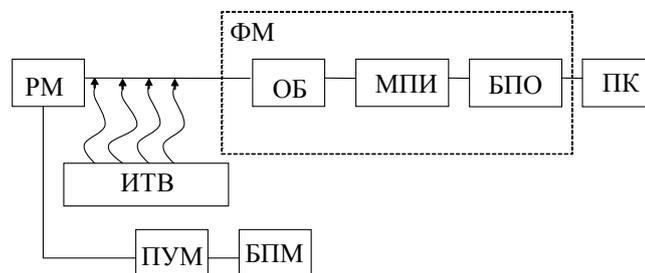


Рис. 2

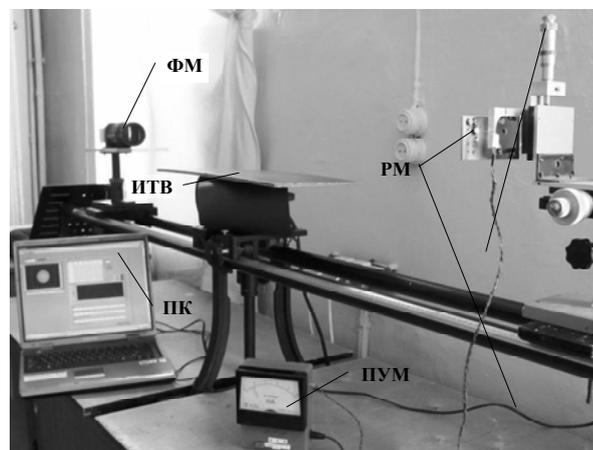


Рис. 3

В качестве источника излучения в РМ использовался RGB-светодиод BL-L515, имеющий излучатели с длинами волн $\lambda_B = 462$ и $\lambda_R = 630$ нм. Для разделения в ФМ изображений с

λ_B и λ_R предложено использовать цветную видеокамеру с фильтром Байера и анализировать положения изображений марок на матричном поле с красным (R) и синим фильтром (B) соответственно [11, 16, 17]. Для этой цели использовалась цветная телевизионная камера высокого разрешения VEC-545 с МПИ OV5620 производства фирмы OmniVision, которая совместно с объективом Юпитер 21М (фокусное расстояние 200 мм) формирует ФМ.

ИТВ располагался на участке воздушного тракта на расстоянии 0,9 м от объектива канала ОЭС.

Методика и результаты исследований. Оценка координат энергетического центра изображения РМ на фотоприемнике проводилась в БПО и ПК с помощью программы, реализованной в среде LabVIEW и основанной на алгоритме взвешенного суммирования [11, 18—20] для матричных полей R и B .

Сигнал, поступающий от фотоприемника, передается на БПО, где сначала из поступившего электрического сигнала цифрового изображения выбирается необходимый цветовой канал, а затем из сформированного изображения выбирается интересующая область (или области). Далее изображение, полученное через соответствующий фильтр МПИ, передается в БПО и ПК, где происходит вычисление координат изображения РМ. Результаты вычислений одновременно для трех цветовых каналов (R , G , B) сохраняются в виде таблицы, содержащей порядковый номер измерения и вычисленные координаты по вертикальной и горизонтальной осям для каждого канала.

Регистрация изображения и вычисление координат энергетического центра осуществлялись циклами (100 кадров через 1 с) с интервалом 300 с между циклами при включенном источнике теплового воздействия до момента стабилизации значений координат энергетического центра изображений по вертикальной оси в каналах R и B (произошло через 50 мин после начала эксперимента).

Исследование зависимости положения изображения марки от времени наблюдения при воздействии вертикального градиента температуры, создаваемого источником теплового воздействия, показало одновременное смещение координат энергетического центра изображений марки как в синем, так и в красном канале. При этом процесс стабилизировался через 50—60 минут, когда источник теплового воздействия вышел на стабильный режим работы.

В этот момент времени СКО (максимальное, полученное в эксперименте) определения координаты энергетического центра каждого изображения РМ в каналах R и B составило не более 0,4 пиксела (0,9 мкм), что обусловлено структурой МПИ с шаблоном Байера. При этом для каждого момента времени СКО определения координаты для обеих длин волн имели близкие значения (различие составило 10^{-3} размера элемента).

Вычисления показали, что значение дисперсионной разности Δy_{12} (рис. 4) между энергетическими центрами изображения РМ в каналах R и B относительно начального момента времени возрастает с увеличением влияния температуры на воздушный тракт и в момент максимального воздействия (промежуток 40—60 мин) составляет максимум 0,13 пкс (0,286 мкм). Расчеты показали, что эта величина соответствует $\text{grad}T = -2,39$ град/м при $z_0 = 2,73$ м по формуле (3).

При расчете выявлено, что относительная погрешность $\sigma_{\Delta y_{12}} / \Delta y_{12}$ (рис. 5) определения дисперсионной разности почти не изменяется и равна в среднем 6 % (после 10 мин), при $\Delta y_{12} = 0,13$ пкс (40—60 мин), $\sigma_{\Delta y_{12}} = 0,008$ пкс (0,018 мкм).

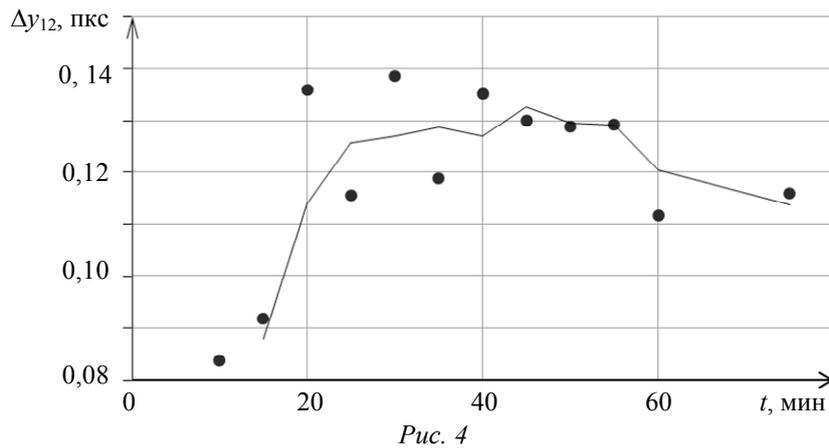


Рис. 4

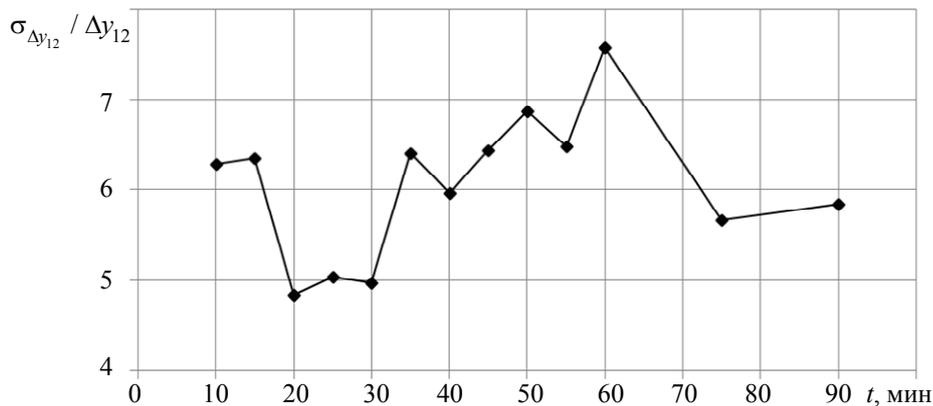


Рис. 5

Обсуждение результатов и заключение. В настоящей работе предложены:

— методика расчета и выбора параметров ОЭС АРМ, позволяющая построить систему, обеспечивающую требуемую точность определения пространственного положения марок при компенсации воздействия вертикального градиента температуры воздушного тракта;

— алгоритм определения координат марки в двух спектральных диапазонах, позволяющий компенсировать воздействие вертикального градиента температуры воздушного тракта, для цветных фотоприемных матричных полей.

В результате исследований доказана возможность практического применения дисперсионного метода в ОЭС АРМ для определения пространственного положения марки по ее изображению на современных цветных видеокамерах. Показано, что пространственное положение марки с учетом компенсации воздействия градиента температуры должно измеряться по каналу с большей длиной волны излучения, менее подверженному воздействию градиента температуры.

Экспериментальные исследования показали, что:

— с изменением вертикального градиента температуры воздушного тракта в ОЭС АРМ относительная погрешность определения дисперсионной разности постоянна — в среднем 6 %;

— возможно применение дисперсионного метода в ОЭС АРМ с целью ослабления воздействия рефракции на результаты контроля пространственного положения марки при выполнении условия (8), которое связывает параметры среды для длин волн λ_1 и λ_2 выбираемых источников излучения с СКО определения координат изображений на матричном фотоприемном поле и задним отрезком объектива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков Б. Н. Геодезический контроль сооружений и оборудования промышленных предприятий. Новосибирск: СГГА, 2003. 356 с.
2. Шубарев В. А., Михайлов А. Н., Молев Ф. В., Коняхин И. А., Тимофеев А. Н., Васильев А. С. Оптико-электронный преобразователь контроля смещений элементов крупногабаритных конструкций // Вопросы радиоэлектроники. 2014. Т. 1, № 2. С. 53—62 ISSN: 0233-9950
3. 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 // Proc. of SPIE. Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX. 2015, June 22. Vol. 9525. DOI: 10.1117/12.2184528
4. Mikheev S. V., Koniakhin I. A., Barsukov O. Optical-electronic system for real-time position control of roof's supporting structure // Proc. of SPIE. Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX. 2017, June 25—29. Vol. 9525. P. 952542-1—952542-8. DOI: 10.1117/12.2184837
5. 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.
6. Korotaev V. V., Pantiushev A. V., Serikova M. G., Anisimov A. G. Deflection measuring system for floating drydocks // Ocean Engineering. 2016. P. 39—44, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.03.012
7. Mikheev S. V., Konyakhin I. A., Barsukov O. A. Optical-electronic system for real-time structural health monitoring of roofs [9896-49] // Proc. of SPIE. Optics, Photonics and Digital Technologies for Imaging Applications. Photonics Europe 2016. Brussels, 3—7 April 2016. Vol. 9896. P. 98961C-1—98961C-6. DOI: 10.1117/12.2227862.
8. 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.
9. Дементьев В. Е. Современная геодезическая техника и ее применение. М.: Академический Проект, 2008. 591 с.
10. Коротаев В. В., Мараев А. А., Тимофеев А. Н. Телеориентирование в луче с оптической равносигнальной зоной. СПб: Университет ИТМО, 2015. 339 с.
11. Лаишманов О. Ю., Пантюшин А. В., Тимофеев А. Н., Ярышев С. Н. Исследование возможности применения спектрально-аналитического метода для ослабления влияния воздушного тракта в оптико-электронных системах контроля положения // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО, 2011. № 3(73). С. 5—9.
12. Nekrylov I. S., Timofeev A. N., Yaryshev S. N., Nikulin A. V. The research of the nonexcluded air control error component using the optical-electronic system based on the dispersion method // Proc. of SPIE. Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX. 2015, June 22. Vol. 9525. DOI: 10.1117/12.2184719.
13. Якушенков Ю. Г. Основы оптико-электронного приборостроения. М.: Логос, 2013. 376 с.
14. Неумывакин Ю. К. Автоматизация геодезических измерений в мелиоративном строительстве. М.: Недра, 1984. 128 с.
15. Вагнер Е. Т. Лазеры в самолетостроении. М.: Машиностроение, 1982. 184 с.
16. Мараев А. А., Пантюшин А. В., Тимофеев А. Н., Ярышев С. Н. Исследование метода спектрально-аналитической селекции в оптико-электронной системе предупреждения техногенных катастроф // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 12. С. 80—81.
17. Мараев А. А., Тимофеев А. Н., Ярышев С. Н. Исследование метода спектрально-аналитической селекции при перекрестных связях в каналах цветных видеокамер // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 4. С. 17—22.
18. Андреев А. Л. Автоматизированные видеоинформационные системы. СПб: НИУ ИТМО, 2011. 120 с.
19. Андреев А. Л. Моделирование и расчет автоматизированных видеоинформационных систем наблюдения за объектами. Метод. указания к лабораторным работам. СПб: НИУ ИТМО, 2013. 82 с.
20. Андреев А. Л., Коротаев В. В., Паиковский Д. М. Селекция изображений малоразмерных объектов на неоднородном фоне в условиях помех // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 10. С. 88—93.

- Сведения об авторах**
- Елена Александровна Сычева** — аспирант; Университет ИТМО, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: easycheva@corp.ifmo.ru
- Валерий Викторович Коротаев** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра оптико-электронных приборов и систем; заведующий кафедрой; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru
- Антон Андреевич Мараев** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: aamaraev@corp.ifmo.ru
- Александр Николаевич Тимофеев** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: timofeev@grv.ifmo.ru

Поступила в редакцию
01.03.18 г.

Ссылка для цитирования: Сычева Е. А., Коротаев В. В., Мараев А. А., Тимофеев А. Н. Компенсация погрешности определения пространственного положения реперных марок, вносимой воздушным трактом // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 4. С. 348—355.

COMPENSATION OF ERROR CAUSED BY INHOMOGENEOUS AIR PATH IN THE CONTROL SYSTEM OF REFERENCE MARKS SPATIAL POSITION

E. A. Sycheva, V. V. Korotaev, A. A. Maraev, A. N. Timofeev

*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: aamaraev@corp.ifmo.ru*

The effect of vertical temperature gradient in the air on spatial position of active reference marks measurement accuracy is investigated for the case when the marks are mounted on an object controlled by an optical electronic system. To compensate the effect of air medium inhomogeneity, application of the dispersion method is proposed. Interrelation of control accuracy requirements and system parameters is shown. Accuracy of dispersion difference evaluation is estimated experimentally. A condition is derived for system parameters choice based on minimization of non-excluded error component.

Keywords: optical-electronic system, air path temperature gradient, non-excluded error, active reference mark

Data on authors

- Elena A. Sycheva** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: easycheva@corp.ifmo.ru
- Valery V. Korotaev** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; Head of the Department; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru
- Anton A. Maraev** — PhD; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: aamaraev@corp.ifmo.ru
- Aleksander N. Timofeev** — PhD; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: timofeev@grv.ifmo.ru

For citation: Sycheva E. A., Korotaev V. V., Maraev A. A., Timofeev A. N. Compensation of error caused by inhomogeneous air path in the control system of reference marks spatial position. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 4. P. 348—355 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-4-348-355