

УДК 681.786

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-818-824

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОВОРОТА БАЗОВОГО БЛОКА ПРОГИБОМЕРА

Хоанг Ань Фьонг, А.А. Горбачёв, И.А. Коняхин, Тонг Минь Хоа

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
Адрес для переписки: hoanglaogia_2508@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 18.06.19, принята к печати 22.07.19
Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Хоанг Ань Фьонг, Горбачёв А.А., Коняхин И.А., Тонг Минь Хоа. Анализ погрешности определения параметров поворота базового блока прогибомера // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 5. С. 818–824. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-818-824

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрен способ определения параметров поворота базового блока оптико-электронного прогибомера, влияющих на погрешность определения прогиба крупногабаритного объекта типа плавучего дока. **Метод.** С помощью элементов векторной алгебры и матричного анализа предложены алгоритм и структура математической модели влияния погрешности определения координат изображения коллимационной марки объекта на погрешность определения параметров поворота базового блока прогибомера. **Основные результаты.** Доказана возможность определения параметров поворота базового блока в результате решения систем нелинейных уравнений на основе алгоритма оптимизации Левенберга–Марквардта. Исследования на математической модели позволили оценить влияние погрешности определения координат изображения коллимационной марки объекта на параметры поворота базового блока. **Практическая значимость.** Полученные результаты данной работы позволят разработать алгоритм компенсации параметров поворота базового блока вследствие влияния внешних факторов и в результате – уменьшить погрешность определения пространственных координат контролируемого объекта (прогиба плавучего дока).

Ключевые слова

параметры поворота, оптико-электронный прогибомер, базовый блок, векторная алгебра, матричный анализ, погрешность измерения

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-818-824

ROTATION PARAMETER ESTIMATION ERROR OF DEFLECTOMETER BASIC UNIT

Hoang Anh Phuong, A.A. Gorbachev, I. A. Konyakhin, Tong Minh Hoa

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
Corresponding author: hoanglaogia_2508@mail.ru

Article info

Received 18.06.19, accepted 22.07.19
Article in Russian

For citation: Hoang Anh Phuong, Gorbachev A.A., Konyakhin I.A., Tong Minh Hoa. Rotation parameter estimation error of deflectometer basic unit. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 818–824 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-818-824

Abstract

Subject of Research. The paper proposes a method for determining the rotation parameters of the basic unit of an optical-electronic deflectometer, having an effect on the deflection measurement error of large-scale objects such as a floating dock. **Method.** We proposed an algorithm and mathematical model structure for the effect of the image coordinate estimation error of the collimating mark on the rotation parameter estimation error of the deflectometer basic unit with the use of the elements of vector algebra and matrix analysis. **Main Results.** We have proved that the rotation parameters of the basic unit can be determined as a result of solution of nonlinear equation systems based on the Levenberg–Marquardt optimization algorithm. Studies on a mathematical model have given the possibility to estimate the effect of the image coordinate estimation error of the collimating mark on the rotation parameter estimation error of the basic unit. **Practical Relevance.** The results of this work will enable us to develop an algorithm for compensation of the basic unit rotation parameters due to the effect of external factors and, as a result, to reduce the error in determining the spatial coordinates of the controlled object (deflection of the floating dock).

Keywords

rotation parameters, optical-electronic deflectometer, basic unit, vector algebra, matrix analysis, measurement error

Введение

Плавающие доки представляют собой крупногабаритные конструкции, предназначенные для строительства и обслуживания судов. Поскольку размеры современных судов имеют тенденцию к увеличению, длина современных доков может превышать 200 м, а высота и ширина могут достигать 50 и 100 м [1]. В результате плавучий док испытывает большие нагрузки как от собственного веса, так и от докуемого судна. Под воздействием внутренних и внешних сил конструкция плавучего дока деформируется как в горизонтальном (сдвиг), так и в вертикальном (прогиб) направлениях [2]. Превышение деформации порогового значения, заложенного при проектировании конструкции дока, может привести к разрушению или затоплению плавучего дока [3, 4].

В настоящее время используют два вида систем измерения прогиба плавучих доков: сенсорные, измеряющие локальные деформации в точках, привязанных к отдельным элементам дока [5–9], и оптико-электронные, определяющие взаимные смещения частей дока относительно его базовых конструктивных осей [10–14]. В соответствии с международными правилами безопасности док-станция должна быть оснащена как минимум двумя системами измерения отклонения, основанными на различных физических принципах измерения [15–18].

В работах [19, 20] рассматриваются основы построения и принципы работы оптико-электронной системы измерения деформации плавучего дока. Система реализована по схеме двухканальной оптико-электронной системы контроля линейных смещений. В состав прогибомера (рис. 1, а) входят контрольные элементы КЭ1 и КЭ2, размещаемые в исследуемых точках объекта (могут применяться дополнительные контрольные элементы КЭ3 и КЭ4, размещаемые в промежуточных точках), и измерительный базовый блок (ББ). Также на топ-палубе возможна установка коллимационных марок КМ1 и КМ2 для контроля стабильности углового положения ББ. В состав ББ входит система отклонения лучей (СОЛ), состоящая из двух отражающих поверхностей 1 и 2 (рис. 1, б), основная функция которой состоит в изменении направления оптического излучения на 90° от КЭ1 и КЭ2 по обоим каналам, объективов 3, формирующий изображение контрольных элементов на многоэлементном приемнике оптического излучения (МПОИ) 4. Все элементы в ББ жестко зафиксированы относительно друг друга, поэтому изменение положения ББ (перемещение или поворот) приводит к изменению положения всех расположенных внутри него элементов.

На рис. 1, б приняты следующие обозначения: A_1 и A_2 — орты падающих пучков на отражающие поверхности 1 и 2, A'_1 и A'_2 — орты отраженных пучков, N_1 и N_2 — орты нормалей к отражающим поверхностям 1 и 2, θ — угол между ортом A_2 и осью Z неподвижной системы координат XYZ , f' — заднее фокусное расстояние объектива 3, $O_c X_c Y_c Z_c$ — система координат камеры до поворота базового блока.

В качестве СОЛ в базовом блоке может использоваться система с двумя одиночными зеркалами или отражательная призма [21, 22]. Каждое из зеркал (или отражательных граней призмы) формирует измерительный канал, причем отражающая поверхность измерительного канала 1 расположена под углом 45° к оси Z (рис. 1, б), а отражающая поверхность измерительного канала 2 — под углом -45° к оси Z неподвижной системы координат (СК) XYZ [23].

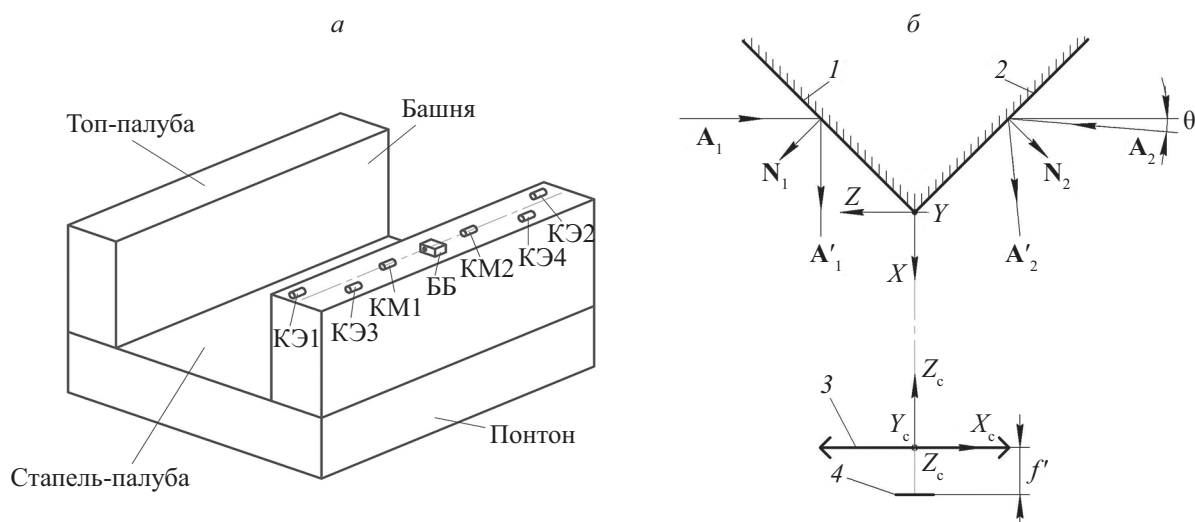


Рис. 1. Плавучий док с возможным размещением на нем оптико-электронного прогибомера (а) и схема базового блока прогибомера (б)

Деформация конструкции дока вызывает линейный сдвиг контрольных элементов — прогиб дока. Поскольку излучение от КЭ проецируется на приемник оптического излучения, разработанное программное обеспечение автоматически распознает изображения КЭ и определяет их местоположение на МПОИ.

Координаты КЭ (X_i, Y_i, Z_i) в неподвижной системе координат XYZ (расстояния от ББ до КЭ Z_i известны) определяют из выражения:

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} = \mathbf{M}_i^{-1} \cdot \mathbf{T}_{X_c Y_c Z_c \rightarrow XYZ} \cdot \begin{pmatrix} -(Z_i + z_c) / f' & 0 & 0 \\ 0 & -(Z_i + z_c) / f' & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где i — номер измерительного канала $i = 1, 2$; \mathbf{M}_i — матрицы действия отражающей поверхности i -го измерительного канала; $\mathbf{T}_{X_c Y_c Z_c \rightarrow XYZ}$ — матрица преобразования СК камеры $X_c Y_c Z_c$ в СК XYZ ; z_c — координата начала СК XYZ в СК камеры $X_c Y_c Z_c$ по оси OZ_c ; (x_i, y_i) — координаты изображения КЭ на МПОИ в i -ом измерительном канале.

По найденным координатам КЭ рассчитываются величины их смещений в вертикальном направлении (по оси OY) в каждом из каналов:

$$\Delta Y_i = Y_i - Y_{0i}, \quad (2)$$

где Y_{0i} — начальные координаты КЭ (ненагруженный плавучий док).

При симметричном расположении КЭ относительно ББ величина прогиба h определяется, как полу-сумма вертикальных смещений КЭ в каждом из каналов:

$$h = \frac{\Delta Y_1 + \Delta Y_2}{2}. \quad (3)$$

На работу прогибомера может оказывать воздействие ряд метеорологических факторов: влажность воздуха, атмосферное давление, температура и т. д. Изменение влияющих факторов может привести к повороту ББ прогибомера [24, 25]. Это приведет к изменению значений параметров $\mathbf{M}_i, \mathbf{T}_{X_c Y_c Z_c \rightarrow XYZ}, z_c$ выражения (1) и дополнительной погрешности определения координат КЭ.

Таким образом, поворот ББ вызывает погрешность определения деформации конструкции плавучего дока. Поэтому в данной работе будем рассматривать влияние погрешности определения координат изображения коллимационной марки объекта на параметры поворота базового блока с помощью элементов векторной алгебры и матричного анализа.

Метод определения параметров поворота базового блока прогибомера

Рассмотрим поворот ББ в неподвижной СК XYZ вокруг произвольной оси на угол φ . В статье будем использовать три системы координат: неподвижную СК XYZ , СК камеры $X_c Y_c Z_c$ до поворота базового блока, СК камеры $X'_c Y'_c Z'_c$ после поворота базового блока. Направление произвольной оси поворота в неподвижной системе координат XYZ задается зенитным η и азимутальным χ углами (рис. 2) и единичным направляющим вектором $\mathbf{L} = (l_x, l_y, l_z)$, причем $l_x = \sin \eta \cdot \sin \chi, l_y = \cos \eta, l_z = \sin \eta \cdot \cos \chi$.

Параметры поворота ББ прогибомера могут быть найдены путем ввода в рассматриваемую систему двух коллимационных марок (КМ) (рис. 1). Данные КМ позволяют оценить параметры поворота базового блока прогибомера: зенитный η и азимутальный χ углы, а также угол поворота φ самого блока (рис. 2).

В неподвижной СК XYZ направление нормалей отражательных поверхностей 1 и 2 представлено ортами $\mathbf{N}_1 = (\sin(\pi/4), 0, \cos(\pi/4))$ и $\mathbf{N}_2 = (\sin(\pi/4), 0, -\cos(\pi/4))$.

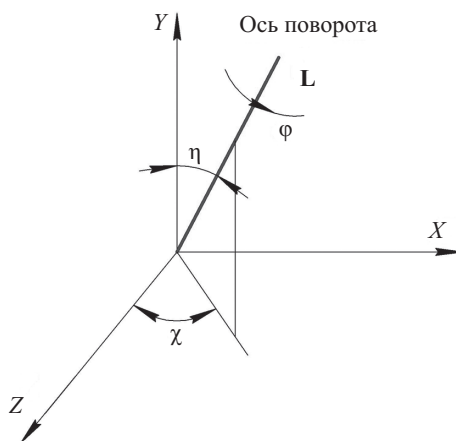


Рис. 2. Параметры поворота базового блока: азимутальный угол η , зенитный угол χ и угол поворота φ

Значения ортов нормалей $\mathbf{N}'_1, \mathbf{N}'_2$ как результаты поворота ортов нормалей $\mathbf{N}_1, \mathbf{N}_2$ отражательных поверхностей 1 и 2 (рис. 1, б) вокруг оси \mathbf{L} (рис. 2), определяются выражением:

$$\mathbf{N}'_i = \mathbf{R} \cdot \mathbf{N}_i, \quad (4)$$

где i — номер измерительного канала, $i = 1, 2$, \mathbf{R} — матрица поворота вокруг оси \mathbf{L} [26]:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} l_x^2 \cdot (1 - \cos \varphi) + \cos \varphi & l_x \cdot l_y \cdot (1 - \cos \varphi) - l_z \cdot \sin \varphi & l_x \cdot l_z \cdot (1 - \cos \varphi) + l_y \cdot \sin \varphi \\ l_x \cdot l_z \cdot (1 - \cos \varphi) + l_y \cdot \sin \varphi & l_y^2 \cdot (1 - \cos \varphi) + \cos \varphi & l_y \cdot l_z \cdot (1 - \cos \varphi) - l_x \cdot \sin \varphi \\ l_x \cdot l_z \cdot (1 - \cos \varphi) - l_y \cdot \sin \varphi & l_y \cdot l_z \cdot (1 - \cos \varphi) + l_x \cdot \sin \varphi & l_z^2 \cdot (1 - \cos \varphi) + \cos \varphi \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Орты \mathbf{B}_i отраженных пучков после поворота ББ рассчитывается по формуле:

$$\mathbf{B}_i = \mathbf{M}'_i \cdot \mathbf{A}_i, \quad (6)$$

где \mathbf{A}_i — орт падающего пучка i -го измерительного канала, \mathbf{M}'_i — матрица действия i -го измерительного канала после поворота базового блока [22]:

$$\mathbf{M}'_i = \begin{pmatrix} 1 - 2n_{xi}'^2 & -2n_{xi}'n_{yi}' & -2n_{xi}'n_{zi}' \\ -2n_{xi}'n_{yi}' & 1 - 2n_{yi}'^2 & -2n_{yi}'n_{zi}' \\ -2n_{xi}'n_{zi}' & -2n_{yi}'n_{zi}' & 1 - 2n_{zi}'^2 \end{pmatrix},$$

где $(n_{xi}', n_{yi}', n_{zi}')$ — координаты проекции ортов нормалей \mathbf{N}'_i i -го измерительного канала на оси неподвижной СК XYZ .

В процессе поворота ББ вокруг произвольной оси \mathbf{L} МПОИ поворачивается вместе с СОЛ, поэтому следует перейти к СК камеры $X'_c Y'_c Z'_c$ после поворота базового блока. Пересчет координат орта отраженного пучка из неподвижной СК XYZ в СК $X'_c Y'_c Z'_c$ осуществляется выражением:

$${}^c \mathbf{B}_i = \mathbf{T}_{XYZ \rightarrow X'_c Y'_c Z'_c} \cdot \mathbf{B}_i, \quad (7)$$

где $\mathbf{T}_{XYZ \rightarrow X'_c Y'_c Z'_c}$ — матрица преобразования СК XYZ в СК $X'_c Y'_c Z'_c$.

В общем случае матрицу преобразования СК XYZ в СК $X'_c Y'_c Z'_c$ можно записать в виде [27]:

$$\mathbf{T}_{XYZ \rightarrow X'_c Y'_c Z'_c} = \begin{pmatrix} \mathbf{i}'_c \cdot \mathbf{i} & \mathbf{i}'_c \cdot \mathbf{j} & \mathbf{i}'_c \cdot \mathbf{k} \\ \mathbf{j}'_c \cdot \mathbf{i} & \mathbf{j}'_c \cdot \mathbf{j} & \mathbf{j}'_c \cdot \mathbf{k} \\ \mathbf{k}'_c \cdot \mathbf{i} & \mathbf{k}'_c \cdot \mathbf{j} & \mathbf{k}'_c \cdot \mathbf{k} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где, например, $(\mathbf{i}'_c \cdot \mathbf{i})$ — скалярное произведение ортов \mathbf{i}'_c и \mathbf{i} .

Обозначим $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}; \mathbf{i}_c, \mathbf{j}_c, \mathbf{k}_c; \mathbf{i}'_c, \mathbf{j}'_c, \mathbf{k}'_c$ соответственно орты систем координат $XYZ, X_c Y_c Z_c, X'_c Y'_c Z'_c$. В неподвижной СК XYZ эти орты можно записать в виде:

$$\mathbf{i} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{j} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{k} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{i}_c = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{j}_c = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{k}_c = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix};$$

Орты $\mathbf{i}'_c, \mathbf{j}'_c, \mathbf{k}'_c$ в неподвижной СК XYZ после поворота СК $X_c Y_c Z_c$ определяются выражениями:

$$\mathbf{i}'_c = \mathbf{R} \cdot \mathbf{i}_c,$$

$$\mathbf{j}'_c = \mathbf{R} \cdot \mathbf{j}_c,$$

$$\mathbf{k}'_c = \mathbf{R} \cdot \mathbf{k}_c.$$

Изображение отраженного пучка в плоскости МПОИ смещается. Координаты этого изображения в СК $X'_c Y'_c Z'_c$ в зависимости от неизвестных параметров поворота η, χ, φ можно определить по формулам [28]:

$$\begin{cases} X_i(\eta, \chi, \varphi) = f' \cdot \operatorname{tg} \left[\arcsin \sqrt{x_{Bi}^2 + y_{Bi}^2} \right] \cdot \frac{x_{Bi}}{\sqrt{x_{Bi}^2 + y_{Bi}^2}}, \\ Y_i(\eta, \chi, \varphi) = f' \cdot \operatorname{tg} \left[\arcsin \sqrt{x_{Bi}^2 + y_{Bi}^2} \right] \cdot \frac{y_{Bi}}{\sqrt{x_{Bi}^2 + y_{Bi}^2}}, \end{cases} \quad (9)$$

где (x_{Bi}, y_{Bi}) — координаты ортов ${}^c \mathbf{B}_i$ отраженных пучков коллимационных марок КМ1 и КМ2 по осям OX и OY в СК $X'_c Y'_c Z'_c$ i -го измерительного канала, f' — заднее фокусное расстояние объектива камеры.

Неизвестные параметры поворота ББ η , χ , φ можно определить в результате решения системы нелинейных уравнений (9) для двух измерительных каналов. По найденным параметрам поворота находятся отклонения параметров \mathbf{M}_i , $\mathbf{T}_{X_c Y_c Z_c \rightarrow XYZ}$, z_c в алгоритме измерения прогиба (формулы (1)–(3)), что позволяет скомпенсировать влияние поворота ББ на определение координат КЭ.

Анализ погрешности определения параметров поворота базового блока прогибомера с помощью компьютерной модели

Рассмотрим влияние погрешности определения координат изображения коллимационной марки объекта на параметры поворота базового блока.

Моделирование выполнялось при следующих параметрах базового блока: заднее фокусное расстояние объектива f' , равное 100 мм (при других экспериментах 200 и 300 мм); направление пучков коллимационных марок КМ1 и КМ2 соответственно, $\mathbf{A}_1 = (0, 0, -1)$, $\mathbf{A}_2 = (-\sin \theta, 0, \cos \theta)$, где $\theta = 20^\circ$ — угол между ортом падающего пучка на отражающую поверхность 2 и осью Z (рис. 1, б).

Модель, синтезированная в среде MATLAB, реализована на основе следующего алгоритма:

1. По заданным истинным значениям параметров поворота $\eta = 45^\circ$, $\chi = 30^\circ$, $\varphi = 1^\circ$ рассчитываются координаты изображений коллимационных пучков на МПОИ с учетом формул (4)–(9).

2. Генерируются случайным образом значения средних квадратических отклонений (СКО) σ рассчитанных координат изображений коллимационных пучков на МПОИ (X_i , Y_i) (число генераций $N = 50$). Далее рассчитываются координаты изображений коллимационных марок на МПОИ с генерированными погрешностями их определения.

3. Определяются значения параметров поворота ББ η_j , χ_j , φ_j ($j = 1..N$) решением системы нелинейных уравнений (9). Для решения систем нелинейных уравнений используется алгоритм оптимизации Левенберга–Марквардта с начальным приближением $(\eta_0, \chi_0, \varphi_0) = (0, 0, 0)$.

Сравнение заданных в п. 1 параметров поворота с найденными в результате выполнения п. 3 позволяет рассчитать СКО погрешности определения параметров поворота σ_η , σ_χ , σ_φ .

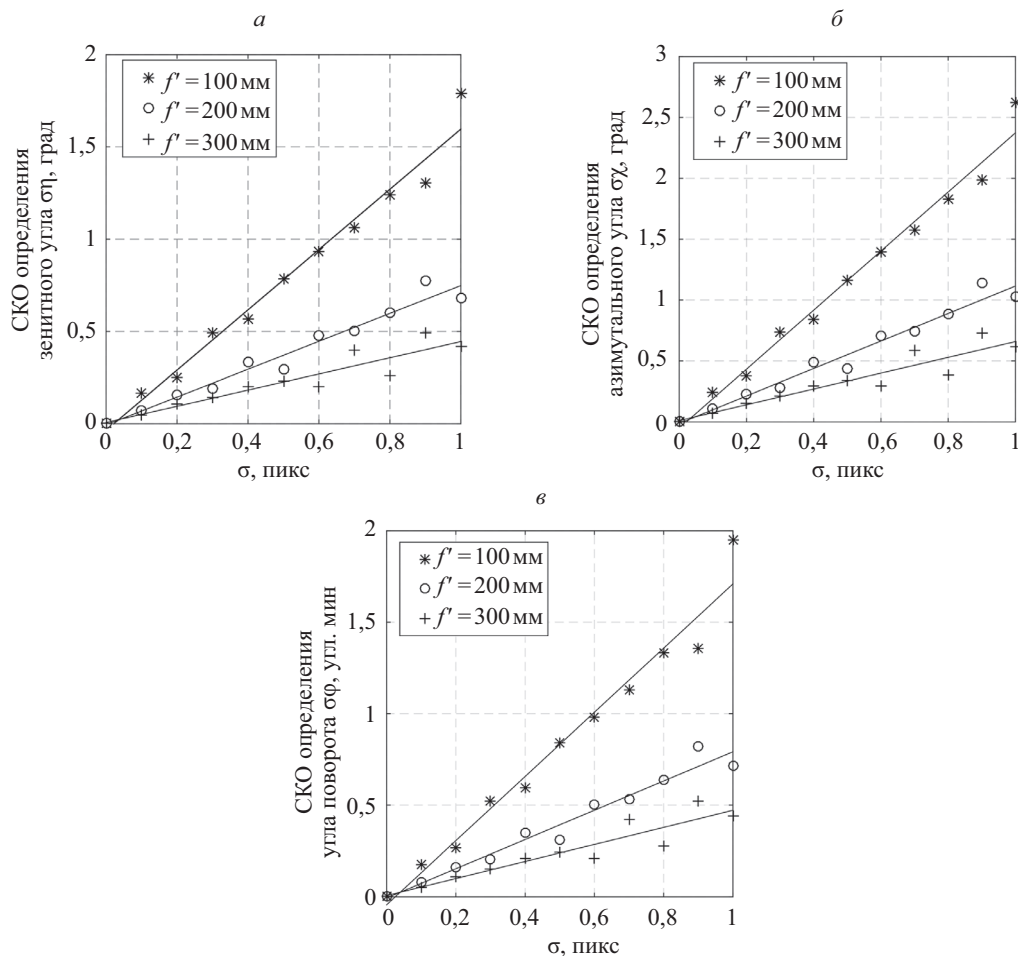


Рис. 3. Среднее квадратическое отклонение определения положения оси поворота (а и б) и угла поворота (в) для различных значений фокусного расстояния объектива

На рис. 3 приведены полученные зависимости СКО погрешности определения параметров поворота базового блока от СКО погрешности определения координат изображений коллимационной марки объекта на МПОИ при различных значениях фокусного расстояния объектива. Из графиков видно, что СКО погрешности определения параметров поворота базового блока уменьшается с увеличением значения фокусного расстояния объектива ББ прогибомера. Наибольшее влияние СКО σ определения координат изображений коллимационных пучков оказывает на направление оси поворота (зенитный η и азимутальный χ углы).

Заключение

В данной работе был предложен способ определения параметров поворота базового блока опико-электронного докового прогибомера с помощью дополнительных коллимационных марок контролируемого объекта. Исследования на математической модели показали, что погрешность определения координат изображений коллимационных марок на многоэлементном приемнике в значительной степени определяет величину суммарной погрешности измерения положения базового блока по зенитному η и азимутальному χ углам. При этом влияние на погрешность измерения угла поворота базового блока ϕ незначительно. На основе полученных результатов может быть разработан алгоритм компенсации составляющей суммарной погрешности измерения опико-электронного докового прогибомера вследствие изменения положения базового блока системы в результате влияния внешних условий.

Литература

1. Gaythwaite J.W. Design of marine facilities for the berthing, mooring, and repair of vessels. American Society of Civil Engineers, 2004. 531 p.
2. Ганьшин В.Н., Стороженко А.Ф., Ильин А.Г. и др. Измерение вертикальных смещений сооружений и анализ устойчивости реперов. М.: Недра, 1981. 215 с.
3. Смирнов А.Г. Анализ причин аварий плавучих доков // Судостроение. 2001. № 3. С. 45–47.
4. Антоненко С.В., Линник Е.В., Голобокова Н.Ю., Рыбалкин Ю.Г. Обеспечение эксплуатационной надёжности плавучих доков // Морские интеллектуальные технологии. 2013. № S2. С. 4–8.
5. Froggatt M., Moore J. High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter // Applied Optics. 1998. V. 37. N 10. P. 1735–1740. doi: 10.1364/AO.37.001735
6. Korotaev V.V., Pantiushin A.V., Serikova M.G., Anisimov A.G. Deflection measuring system for floating dry docks // Ocean Engineering. 2016. V. 117. P. 39–44. doi: 10.1016/j.oceaneng.2016.03.012
7. Zou L., Bao X., Yang S., Chen L., Ravet F. Effect of Brillouin slow light on distributed Brillouin fiber sensors // Optics letters. 2006. V. 31. N 18. P. 2698–2700. doi: 10.1364/OL.31.002698
8. Lynch J.P., Wang Y., Loh K.J., Yi J.-H., Yun C.-B. Performance monitoring of the Geumdang Bridge using a dense network of high-resolution wireless sensors // Smart Materials and Structures. 2006. V. 15. N 6. P. 1561–1575. doi: 10.1088/0964-1726/15/6/008
9. Yang G., Liang H., Wu C. Deflection and inclination measuring system for floating dock based on wireless networks // Ocean engineering. 2013. V. 69. P. 1–8. doi: 10.1016/j.oceaneng.2013.05.014
10. Stiros S.C., Psimoulis P.A. Response of a historical short-span railway bridge to passing trains: 3-D deflections and dominant frequencies derived from Robotic Total Station (RTS) measurements // Engineering Structures. 2012. V. 45. P. 362–371. doi: 10.1016/j.engstruct.2012.06.029
11. Carbonari S., Gara F., Roia D., Leoni G., Dezi L. Tests on two 18-years-old prestressed thin walled roof elements // Engineering Structures. 2013. V. 49. P. 936–946. doi: 10.1016/j.engstruct.2012.12.037
12. Newman T.S., Jain A.K. A survey of automated visual inspection // Computer vision and image understanding. 1995. V. 61. N 2. P. 231–262. doi: 10.1006/cviu.1995.1017
13. Коротаев В.В., Тимофеев А.Н., Иванов А.Г. Проблемы разработки опико-электронных систем для контроля деформаций крупногабаритных объектов // Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 4. С. 43–46.
14. Горбачев А.А., Коняхин И.А., Мусяков В.Л., Тимофеев А.Н. Исследование особенностей построения инвариантных опти-

References

1. Gaythwaite J.W. Design of marine facilities for the berthing, mooring, and repair of vessels. American Society of Civil Engineers, 2004, 531 p.
2. Ganshin V.N., Storozhenko A.F., Ilyin A.G. et al. Measurement of vertical displacements of structures and stability analysis of benchmarks. Moscow, Nedra, 1981, 215 p. (in Russian)
3. Smirnov A.G. Analysis of causes of floating docks accidents. Sudostroenie, 2001, no. 3, pp. 45–47. (in Russian)
4. Antonenko S.V., Linnik E.V., Golobokova N.Yu. Maintenance of operational reliability of floating docks. Marine intellectual technologies, 2013, no. S2, pp. 4–8. (in Russian)
5. Froggatt M., Moore J. High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter. Applied Optics, 1998, vol. 37, no. 10, pp. 1735–1740. doi: 10.1364/AO.37.001735
6. Korotaev V.V., Pantiushin A.V., Serikova M.G., Anisimov A.G. Deflection measuring system for floating dry docks. Ocean Engineering, 2016, vol. 117, pp. 39–44. doi: 10.1016/j.oceaneng.2016.03.012
7. Zou L., Bao X., Yang S., Chen L., Ravet F. Effect of Brillouin slow light on distributed Brillouin fiber sensors. Optics letters, 2006, vol. 31, no. 18, pp. 2698–2700. doi: 10.1364/OL.31.002698
8. Lynch J.P., Wang Y., Loh K.J., Yi J.-H., Yun C.-B. Performance monitoring of the Geumdang Bridge using a dense network of high-resolution wireless sensors. Smart Materials and Structures, 2006, vol. 15, no. 6, pp. 1561–1575. doi: 10.1088/0964-1726/15/6/008
9. Yang G., Liang H., Wu C. Deflection and inclination measuring system for floating dock based on wireless networks. Ocean engineering, 2013, vol. 69, pp. 1–8. doi: 10.1016/j.oceaneng.2013.05.014
10. Stiros S.C., Psimoulis P.A. Response of a historical short-span railway bridge to passing trains: 3-D deflections and dominant frequencies derived from Robotic Total Station (RTS) measurements. Engineering Structures, 2012, vol. 45, pp. 362–371. doi: 10.1016/j.engstruct.2012.06.029
11. Carbonari S., Gara F., Roia D., Leoni G., Dezi L. Tests on two 18-years-old prestressed thin walled roof elements. Engineering Structures, 2013, vol. 49, pp. 936–946. doi: 10.1016/j.engstruct.2012.12.037
12. Newman T.S., Jain A.K. A survey of automated visual inspection. Computer vision and image understanding, 1995, vol. 61, no. 2, pp. 231–262. doi: 10.1006/cviu.1995.1017
13. Korotaev V.V., Timofeev A.N., Ivanov A.G. Problems in the development of optoelectronic systems for monitoring displacements of large-sized objects. Journal of Optical Technology, 2000, vol. 67, no. 4, pp. 336–339. doi: 10.1364/JOT.67.000336
14. Gorbachev A.A., Konyakhin I.A., Musyakov V.L., Timofeev A.N. Study of the structural features of invariant optoelectronic systems with a unified matrix analysis field. Journal

- ко-электронных систем с единым матричным полем анализа // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 12. С. 24–29.
15. Rules for Classification and Construction. Floating Docks. Germanischer Lloyd Aktiengesellschaft, 1993.
 16. Rules for Classification of Floating Docks. China Classification Society, 2009.
 17. Rules for Building and Classing. Steel Floating Dry Docks. American Bureau of Shipping, 2009.
 18. Rules for Technical Supervision during Construction of Ships and Manufacture of Materials and Products for Ships, Part V Technical Supervision During Construction of Ships. Russian Maritime Register of Shipping, 2014.
 19. Gorbachev A.A., Hoang A.P. Invariant electro-optical system for deflection measurement of floating docks // Proceedings of SPIE. 2017. V. 10329. P. 103294F. doi: 10.1117/12.2270653
 20. Gorbachev A.A., Pantyushin A.V., Serikova M.G., Korotaev V.V., Timofeev A.N. System for deflection measurements of floating dry docks // Proceedings of SPIE. V. 9525. P. 95254C. doi: 10.1117/12.2184925
 21. Справочник конструктора оптико-механических приборов / Под общ. ред. В.А. Панова. Л.: Машиностроение, 1980. 742 с.
 22. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. 237 с.
 23. Горбачёв А.А. Инвариантность в оптических схемах оптико-электронных систем контроля прогиба // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2006. Т. 6. № 7(30). С. 91–96.
 24. Хоанг А.Ф., Горбачёв А.А., Михеев С.В., Клещенок М.А. Анализ влияния поворота базового блока прогибомера на определение координат изображений контрольных элементов // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 9. С. 805–813. doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-9-805-813
 25. Hoang A.P., Gorbachev A.A., Konyakhin I.A. Image displacement analysis for electro-optical system for deflection measurement of floating docks // Proceedings of SPIE. 2019. V. 11053. P. 110534A. doi: 10.1117/12.2512563
 26. Kovács E. Rotation about an arbitrary axis and reflection through an arbitrary plane // Annales Mathematicae et Informaticae. 2012. N 40. P. 175–186.
 27. Грейм И.А. Зеркально-призмные системы. М.: Машиностроение, 1981. 125 с.
 28. Хоанг В.Ф., Коняхин И.А. Анализ погрешности измерения параметров поворота объекта методом автоколлимации с помощью компьютерных моделей на основе кватернионов // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 12. С. 1157–1160. doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-12-1157-1160
 - of Optical Technology, 2007, vol. 74, no. 12, pp. 810–814. doi: 10.1364/JOT.74.000810
 15. Rules for Classification and Construction. Floating Docks. Germanischer Lloyd Aktiengesellschaft, 1993.
 16. Rules for Classification of Floating Docks, China Classification Society, 2009.
 17. Rules for Building and Classing. Steel Floating Dry Docks. American Bureau of Shipping, 2009.
 18. Rules for Technical Supervision during Construction of Ships and Manufacture of Materials and Products for Ships, Part V Technical Supervision During Construction of Ships. Russian Maritime Register of Shipping, 2014.
 19. Gorbachev A.A., Hoang A.P. Invariant electro-optical system for deflection measurement of floating docks. Proceedings of SPIE, 2017, vol. 10329, pp. 103294F. doi: 10.1117/12.2270653
 20. Gorbachev A.A., Pantyushin A.V., Serikova M.G., Korotaev V.V., Timofeev A.N. System for deflection measurements of floating dry docks. Proceedings of SPIE, vol. 9525, pp. 95254C. doi: 10.1117/12.2184925
 21. Handbook of the designer of optical-mechanical devices. Ed. by V.A. Panov. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1980, 742 p. (in Russian)
 22. Pogarev G.V. Alignment of optical instruments. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1982, 237 p. (in Russian)
 23. Gorbachev A.A. Invariance in optical schemes of optoelectronic deflection control systems. Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2006, vol. 6, no. 7(30), pp. 91–96. (in Russian)
 24. Hoang A.P., Gorbachev A.A., Mikheev S.V., Kleshchenok M.A. Analysis of the effect of deflectometer base unit rotation on determination of image coordinates of reference elements. Journal of Instrument Engineering, 2018, vol. 61, no. 9, pp. 805–813. (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-9-805-813
 25. Hoang A.P., Gorbachev A.A., Konyakhin I.A. Image displacement analysis for electro-optical system for deflection measurement of floating docks. Proceedings of SPIE, 2019, vol. 11053, pp. 110534A. doi: 10.1117/12.2512563
 26. Kovács E. Rotation about an arbitrary axis and reflection through an arbitrary plane. Annales Mathematicae et Informaticae, 2012, no. 40, pp. 175–186.
 27. Greym I.A. Mirror-prism systems. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 125 p. (in Russian)
 28. Hoang V.P., Konyakhin I.A. Error analysis of object rotation parameters measurement with autocollimation method using computer models on the base of quaternions. Journal of Instrument Engineering, 2017, vol. 60, no. 12, pp. 1157–1160. (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-12-1157-1160

Авторы

Хоанг Ань Фыонг — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57195609605, ORCID ID: 0000-0002-7435-2557, hoanglaogia_2508@mail.ru

Горбачёв Алексей Александрович — кандидат технических наук, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 26325293200, ORCID ID: 0000-0002-4905-0688, gorbachev@niuitmo.ru

Коняхин Игорь Алексеевич — доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 6507383012, ORCID ID: 0000-0002-8935-5662, igor@grv.ifmo.ru

Тонг Минь Хоа — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57207759981, ORCID ID: 0000-0002-5139-7912, hoa.chiton@mail.ru

Authors

Hoang Anh Phuong — postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57195609605, ORCID ID: 0000-0002-7435-2557, hoanglaogia_2508@mail.ru

Alexey A. Gorbachev — PhD, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 26325293200, ORCID ID: 0000-0002-4905-0688, gorbachev@niuitmo.ru

Igor A. Konyakhin — D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 6507383012, ORCID ID: 0000-0002-8935-5662, igor@grv.ifmo.ru

Tong Minh Hoa — postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57207759981, ORCID ID: 0000-0002-5139-7912, hoa.chiton@mail.ru