

УДК 629.5.05:528.28

doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-575-591

Концепция экспериментального способа калибровки фотосекстана

С.В. Козик¹, С.А. Захаров², В.А. Сибилев¹

¹ Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, Sibilevv01@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

В работе обоснован экспериментальный способ определения калибровочных характеристик навигационного прибора «фотосекстант». Прибор отличается от существующих средств навигации принципами измерения и функциональными особенностями, реализующими нерадиотехнические способы получения обсервованных координат места судна. Предлагаемый способ основан на измерении высоты навигационного светила – определении угловых координат его центра и точек линии горизонта по цифровой фотографии небосвода. Предварительно должно быть определено взаимно-однозначное отображение угловых координат точек пространства в пиксельные координаты их цифровых изображений. Такое отображение названо авторами калибровочными характеристиками цифрового фотоаппарата.

Ключевые слова: навигационная безопасность плавания, пятно рассеяния, калибровка, калибровочные характеристики, оптические измерения, растровое изображение.

Experimental substantiation of the method of calibration of the navigation device “photo sextant”

S.A. Zakharov¹, S.V. Kozik², V.A. Sibilev¹

¹ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

² Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

There are some dangers during using global navigation satellite systems (GNSS). In the merchant shipping GNSS are only positioning device and any its interruptions becomes high threat to the safety of navigation. In the previous paper authors proposed a new method for measuring the altitude of the celestial body. Method is based on the determination of the angular coordinates of the center of the celestial and points of the horizon line as a result of a numerical express analysis of a digital photograph of the sky. In this case, it is necessary to determine the one-to-one mapping between the pixel coordinates of the image points and the angular coordinates of their sources. The term “Calibration characteristics” (CC) was used for this mapping. In this work, an experimental method for determining the CC of a digital camera is proposed and applied. In particular, a schematic diagram of the experimental installation was described. Images and quantitative characteristics of test images were presented. During the formation of the experimental setup, no special precise means of optical measurements were used. A polynomial mathematical model of the CC was presented and an algorithm for processing the experimental data was described in detail, which makes it possible to identify the parameters of the CC. The results of the performed experiment show that the error of the CC does not exceed 4' over the entire field of the frame when using polynomial CC with orders of at least six in all arguments. It has been suggested that with the use of modern optical measurements, the accuracy of the CC can be significantly increased. Thus,

the paper substantiates an experimental method for determining the calibration characteristics of the “photo sextant”.

Keywords: safety of navigation, scattering spot, calibration, calibration characteristics, camera, optical measurements, experimental installation, digital photography, raster photography, raster image, horizon, pixel image.

For citation: *S.A. Zakharov, S.V. Kozik, V.A. Sibilev.* Experimental substantiation of the method of calibration of the navigation device “photo sextant”. *Gidrometeorologiya i Ekologiya. Journal of Hydro-meteorology and Ecology.* 2021, 64: 575—591. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-575-591.

Введение

Существенным аспектом обеспечения навигационной безопасности плавания судна является знание географических координат (широты φ и долготы λ) его местоположения.

Надежность получения координат места судна, их достоверность обеспечивается использованием разнородных средств навигации, реализующих оба метода навигации: метод счисления и метод обсервации.

Анализ навигационной оснащённости современных судов позволяет сделать вывод о том, что существует перекокс в сторону радиотехнических средств навигации, предназначенных для реализации метода обсервации. Эта тенденция связана с повсеместным распространением спутниковых средств получения координат, большой степенью автоматизацией процесса, высокой точности координат места.

Для сохранения возможности применения разнородных средств навигации, необходимы усилия, направленные на совершенствования средств навигации, реализующие нерадиотехнические способы получения обсервованных координат места судна [1].

Один из таких способов — получение координат места судна по наблюдению небесных светил. [2] Чаще всего под термином «наблюдение светила» подразумевается измерение навигационного параметра — высоты светила и момента времени, соответствующего ему. Предложения по усовершенствованию традиционных измерительных и вычислительных средств для данного способа являются объектами интеллектуальной собственности авторов, их описание можно найти в работах [3, 4].

В предыдущих работах авторов [5, 6] обоснован новый способ измерения высоты светила — путем численной обработки цифровой фотографии участка небосвода, что открывает возможности автоматизировать процесс измерения.

В соответствии с принципом измерения и функциональными особенностями предложенного средства навигации предлагается его новое название: «фотосекстан» (ФС).

Создание фотосекстана связано с решением следующих научных задач:

- 1) определение точностных (калибровочных) характеристик оптико-электронной системы ФС;
- 2) идентификация растрового изображения светила и определение угловых и пиксельных координат его центра;

3) идентификация растрового изображения линии горизонта и аппроксимация ее угловых и пиксельных координат;

4) вычисление высоты светила над горизонтом по результатам обработки изображения;

5) тестирование разработанных алгоритмов обработки изображений.

Целью настоящей работы является экспериментальное обоснование способа определения калибровочных характеристик фотосекстана.

Для достижения этой цели должны быть решены следующие основные задачи:

— анализ оптико-электронной системы ФС и разработка математической модели его калибровочных характеристик;

— разработка и изготовление экспериментальной установки и калибровочных изображений (мишеней) для определения калибровочных характеристик ФС;

— разработка и тестирование алгоритма численной обработки цифровых фотографий калибровочных изображений (мишеней), структурная оптимизация полученных калибровочных характеристик.

В настоящей работе далее излагаются примененные научно-технические способы решения перечисленных основных задач и полученные при этом результаты.

Оптико-электронная система фотосекстана

Принципиальная оптико-электронная схема ФС показана на рис. 1.

Оптическая система ФС преобразует входящий световой поток C_1 в выходящий C_2 . После выходного зрачка световой поток формирует в плоскости матрицы M пятно рассеяния. При поглощении светового потока фотоэлементами матрицы M на ней формируется растровое изображение PI . Полученное изображение

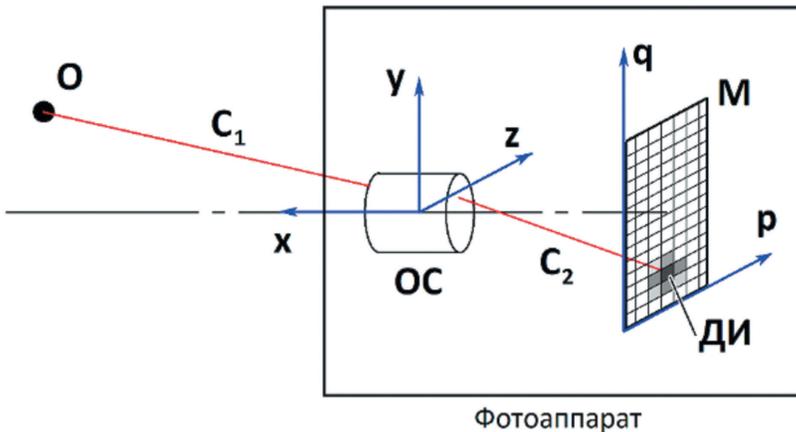


Рис. 1. Оптико-электронная система навигационного прибора «фотосекстант» (условные обозначения даны в тексте).

Fig. 1. Optoelectronic system of the navigation device “photosextant” (the notations are explained below).

проходит численную обработку, целью которой является определение координат центра пятна рассеяния.

В настоящей работе используются следующие системы координат:

1) Пространственное положение точечного объекта описывается системой декартовых прямоугольных координат (x, y, z) (рис. 1). Начало этой системы отсчета лежит в оптическом центре объектива ФС. Ось x направлена по главной оптической оси объектива, ось y направлена вверх перпендикулярно к оси x и лежит в меридиональной плоскости объектива. Ось z образует с ними правую систему координат.

2) Положение центра светила на небосводе и форма линии горизонта описываются Эйлеровыми угловыми координатами (ψ, θ) , которые вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{cases} \theta = -\operatorname{arctg}\left(\frac{y}{x}\right) \\ \psi = \operatorname{arctg}\left(\frac{z \cos \theta}{x}\right) \end{cases}, \quad \begin{cases} y = -x \operatorname{tg} \theta \\ z = \frac{x \operatorname{tg} \psi}{\cos \theta} \end{cases}. \quad (1)$$

3) Расчетное положение центра изображения объекта съемки на растровой фотографии характеризуется пиксельными координатами (p, q) , которые в настоящей работе могут принимать вещественные значения.

Таким образом, в навигационном приборе ФС осуществляется комплексное оптико-электронно-математическое преобразование (входящего светового потока) угловых координат объекта (ψ, θ) в пиксельные координаты центра его растрового изображения (p, q) .

Можно выделить следующие причины искажений входящего светового потока:

- аберрации оптической системы ФС и погрешности изготовления ее элементов;
- неоднородное поглощение и дискретизация выходящего светового потока фотоэлементами матрицы ФС;
- математические (методические и вычислительные) погрешности численной обработки растрового изображения.

Коэффициенты аберраций оптической системы ФС и характеристики фотоэлементов ПЗС-матрицы возможно определить отдельно друг от друга с использованием современных высокоточных интерференционных методов и средств оптических измерений, а также математического аппарата теории оптических измерений. Для определения математической погрешности обработки растрового изображения достаточно применить аппарат математической статистики.

Однако целесообразно рассматривать ФС как единое устройство, которое осуществляет взаимно однозначное отображение координат точек пространства в координаты соответствующих точек растрового изображения. Вещественные функции, описывающие это отображение, необходимы для расчета угловых координат центра светила и точек линии горизонта по их растровым изображениям. Поэтому указанные функции содержат ключевую метрологическую информацию

о ФС как об оптико-электронном преобразователе. В настоящей работе предложено назвать эти функции калибровочными характеристиками (КХ) ФС.

Математическая модель калибровочных характеристик фотосекстанта

В физической оптике для описания компонент aberrаций оптических систем широко используются многочлены Цернике [7]. Однако использование многочленов Цернике в настоящей работе нежелательно, т. к. при этом требуется дополнительный пересчет их значений в пиксельные координаты (p, q) . Поэтому далее калибровочные характеристики ФС выражаются следующими многочленами:

$$\begin{aligned} p(\psi, \theta) &= \sum_{u=0}^U \sum_{v=0}^V c_{uv} \psi^u \theta^v, & q(\psi, \theta) &= \sum_{u=0}^U \sum_{v=0}^V d_{uv} \psi^u \theta^v, \\ \psi(p, q) &= \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N e_{mn} p^m q^n, & \theta(p, q) &= \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N f_{mn} p^m q^n. \end{aligned} \quad (2)$$

Для многочленов $p(\psi, \theta)$ и $q(\psi, \theta)$ предлагается название «прямые калибровочные характеристики». Коэффициенты этих многочленов образуют матрицы:

$$C = \|c_{uv}\|, \quad D = \|d_{uv}\|. \quad (3)$$

Матрицы C и D имеют размерность $S_{C,D} = (U+1)(V+1)$.

Многочлены $\psi(p, q)$ и $\theta(p, q)$ (2b) переводят пиксельные координаты центра пятна рассеяния в угловые координаты соответствующего точечного источника. Поэтому для них предлагается название «обратные калибровочные характеристики». Коэффициенты этих многочленов образуют матрицы:

$$E = \|e_{mn}\|, \quad F = \|f_{mn}\| \quad (4)$$

размерность которых равна $S_{E,F} = (M+1)(N+1)$.

В настоящей работе элементы матриц C, D, E и F вычислялись по методу наименьших квадратов [8], применение которого рассматривается далее.

Пусть заданы угловые и пиксельные координаты K точек пространства, и из них составлены следующие векторы-столбцы:

$\bar{p} = [p_k]$, $\bar{q} = [q_k]$ — векторы-столбцы пиксельных координат;

$\bar{\psi} = [\psi_k]$, $\bar{\theta} = [\theta_k]$ — векторы-столбцы угловых координат.

Также пусть из элементов матриц C, D, E и F составлены следующие векторы-столбцы:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{c} &= [c_{00} \ c_{01} \ c_{02} \ \dots \ c_{u0} \ c_{u1} \ c_{u2} \ \dots \ c_{UV}] \\ \bar{d} &= [d_{00} \ d_{01} \ d_{02} \ \dots \ d_{u0} \ d_{u1} \ d_{u2} \ \dots \ d_{UV}] \\ \bar{e} &= [e_{00} \ e_{01} \ e_{02} \ \dots \ e_{m0} \ e_{m1} \ e_{m2} \ \dots \ e_{MN}] \\ \bar{f} &= [f_{00} \ f_{01} \ f_{02} \ \dots \ f_{m0} \ f_{m1} \ f_{m2} \ \dots \ f_{MN}] \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Наконец, пусть A и B — матрицы Вандермонда, вычисляемые по формулам:

$$A = \left\| \psi_k^u \theta_k^v \right\| = \begin{vmatrix} \psi_1^0 \theta_1^0 & \psi_1^0 \theta_1^1 & \psi_1^0 \theta_1^2 & \dots & \psi_1^1 \theta_1^0 & \psi_1^1 \theta_1^1 & \psi_1^1 \theta_1^2 & \dots & \psi_1^U \theta_1^0 & \psi_1^U \theta_1^1 & \dots & \psi_1^U \theta_1^V \\ \psi_k^0 \theta_k^0 & \psi_k^0 \theta_k^1 & \psi_k^0 \theta_k^2 & \dots & \psi_k^1 \theta_k^0 & \psi_k^1 \theta_k^1 & \psi_k^1 \theta_k^2 & \dots & \psi_k^U \theta_k^0 & \psi_k^U \theta_k^1 & \dots & \psi_k^U \theta_k^V \\ \psi_K^0 \theta_K^0 & \psi_K^0 \theta_K^1 & \psi_K^0 \theta_K^2 & \dots & \psi_K^1 \theta_K^0 & \psi_K^1 \theta_K^1 & \psi_K^1 \theta_K^2 & \dots & \psi_K^U \theta_K^0 & \psi_K^U \theta_K^1 & \dots & \psi_K^U \theta_K^V \end{vmatrix} \quad (6.1)$$

$$B = \left\| p_k^m q_k^n \right\| = \begin{vmatrix} p_1^0 q_1^0 & p_1^0 q_1^1 & p_1^0 q_1^2 & \dots & p_1^1 q_1^0 & p_1^1 q_1^1 & p_1^1 q_1^2 & \dots & p_1^M q_1^0 & p_1^M q_1^1 & \dots & p_1^M q_1^N \\ p_k^0 q_k^0 & p_k^0 q_k^1 & p_k^0 q_k^2 & \dots & p_k^1 q_k^0 & p_k^1 q_k^1 & p_k^1 q_k^2 & \dots & p_k^M q_k^0 & p_k^M q_k^1 & \dots & p_k^M q_k^N \\ p_K^0 q_K^0 & p_K^0 q_K^1 & p_K^0 q_K^2 & \dots & p_K^1 q_K^0 & p_K^1 q_K^1 & p_K^1 q_K^2 & \dots & p_K^M q_K^0 & p_K^M q_K^1 & \dots & p_K^M q_K^N \end{vmatrix} \quad (6.2.)$$

Тогда элементы матриц C , D , E и F вычисляются по методу наименьших квадратов [8]:

$$\begin{cases} \bar{c} = (A^T A)^{-1} A^T \bar{p}, & \bar{d} = (A^T A)^{-1} A^T \bar{q} \\ \bar{e} = (B^T B)^{-1} B^T \bar{\psi}, & \bar{f} = (B^T B)^{-1} B^T \bar{\theta} \end{cases} \quad (7)$$

Алгебраические уравнения (7) образуют линейную систему. Для определения всех элементов матриц C и D необходимо и достаточно $K = S_{C,D}$ различных точечных объектов фотосъемки. Для расчета элементов матриц E и F необходимо не менее $K = S_{E,F}$ различных точечных объектов.

В настоящей работе для определения матриц C , D , E и F был разработан и применен экспериментальный способ, который рассматривается в следующих подразделах.

Экспериментальная установка для определения калибровочных характеристик «фотосекстанта» и калибровочные мишени

Калибровочные характеристики ФС (2) в настоящей работе были определены экспериментально с использованием экспериментальной установки (ЭУ), принципиальная схема которой представлена на рис. 2.

На рабочей плоскости РП размещается калибровочная мишень КМ. Рабочая плоскость РП предназначена для размещения и жесткой фиксации КМ и должна быть ориентирована перпендикулярно к оптической оси ОО объектива ФС. Для упрощения ориентации ФС рабочая плоскость РП имеет зеркальную поверхность.

Основные размеры ЭУ, показанные на рис. 2, имели следующие значения:

$$H = 0,2 \text{ м}; W = 0,25 \text{ м}; L = 0,198 \text{ м}.$$

Описанная экспериментальная установка была разработана и изготовлена только для принципиальной проверки предлагаемого способа калибровки ФС. При этом отсутствовала возможность использования высокоточных

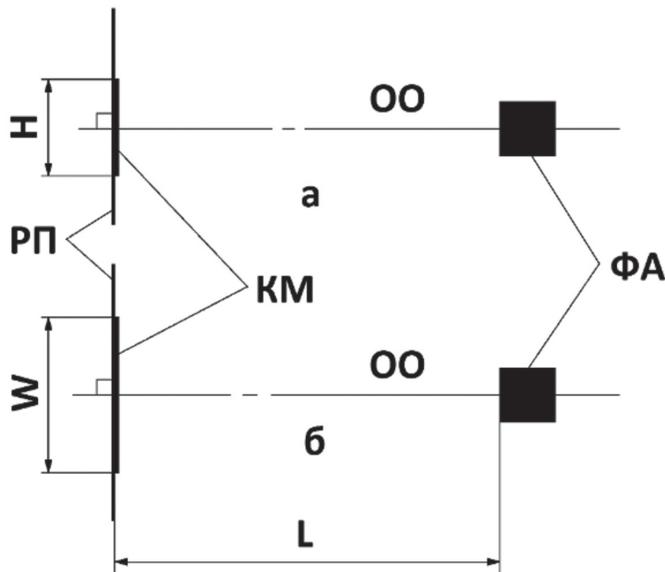


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки:

a — вид сбоку; *б* — вид сверху; РП — рабочая поверхность; КМ — калибровочная мишень;
 ОО — оптическая ось; ФА — фотоаппарат.

Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup:

a — side view; *б* — top view; RP — working surface; KM — calibration target;
 OO — optical axis; FA — camera.

специализированных измерительных устройств и средств оптических измерений. Вследствие этого оценочные измерительные, установочные и личные погрешности измерений имели порядок не менее 10^{-3} м.

В качестве ближайшего структурно-функционального аналога фотосекстанта в настоящем экспериментальном исследовании был использован цифровой фотоаппарат CanonEOS 5D. Его характеристики и использованные настройки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики и использованные настройки фотоаппарата CanonEOS 5D
 Specifications and used settings of the CanonEOS 5D camera

Параметр	Значение (использованное)	Параметр	Значение (использованное)
Фокусное расстояние	28 мм	Формат файлов	CR2
Диафрагма	f/3,5, f/5, f/8	ISO	100
Выдержка	1/400, 1/800, 1/3200, 1/6400	WB баланс белого	Солнце
Разрешение (макс.)	4368×2912	Фильтр	ND 0,6 + градиент
Цветовой фильтр	RGB		

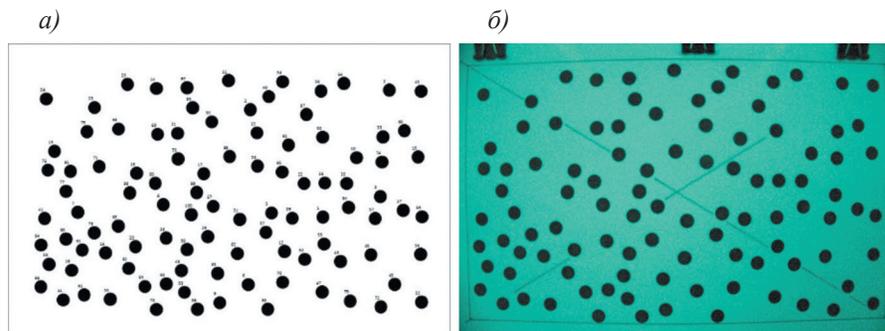


Рис. 3. Пример калибровочной мишени и ее фотографии:
 а) калибровочная мишень; б) фотоизображение калибровочной мишени.
 Fig. 3. An example of a calibration target and its photograph:
 а) calibration target; б) a photographic image of the calibration target.

Использованные КМ представляли собой изображения 100—300 черных круглых меток на белом фоне. Координаты центров меток (z_c, y_c) на каждой мишени были известны точно и заданы случайными величинами с равномерными законами распределения:

$$z_c \sim U[-0,15; 0,15] \text{ — по горизонтали;}$$

$$y_c \sim U[-0,1; 0,1] \text{ — по вертикали.}$$

Радиусы r всех меток на одной и той же мишени были равны, а для разных КМ принимали следующие значения:

$$r = 0,003; 0,004; 0,005; 0,007; 0,01 \text{ м.} \tag{8}$$

Пример КМ и ее изображения показан на рис. 3.

Алгоритм предварительной обработки изображений калибровочных мишеней

Расчет элементов матриц C , D , E и F по формулам (2)—(7) возможен только после предварительной обработки изображений КМ, целью которой является определение пиксельных координат центров изображений меток. Для предварительной обработки изображений КМ был использован алгоритм, исчерпывающе описанный в предыдущей работе авторов [6]. Приведем его краткое изложение.

1) *Сглаживание фотографий*. Если изображение КМ записано в формате BitMap (.bmp) с цветовой палитрой RGB, то осредненные цветовые компоненты $(\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})$ пикселя с координатами (p, q) вычисляются по следующим формулам:

$$\bar{r}_{pq} = \frac{1}{(2H_p + 1)(2H_q + 1)} \sum_{\Delta p = -H_p}^{H_p} \sum_{\Delta q = -H_q}^{H_q} r_{p+\Delta p, q+\Delta q}.$$

$\bar{g}_{pq}, \bar{b}_{pq}$ — аналогично \bar{r}_{pq} (9)

где $H_p = 5, H_q = 5$ — размеры области осреднения.

2) *Маркировка пикселей меток.* Пиксели, принадлежащие изображениям меток, должны быть маркированы по критерию интенсивности, которая вычислялась по формуле:

$$I = \bar{r} + \bar{g} + \bar{b}. \quad (10)$$

По пробным областям с размерами 50×50 пикселей были вычислены средние интенсивности фона (I_Φ) и метки (I_M) по формулам (8) и (9):

$$I_\Phi = \bar{r}_\Phi + \bar{g}_\Phi + \bar{b}_\Phi, \quad I_M = \bar{r}_M + \bar{g}_M + \bar{b}_M. \quad (11)$$

Маркировались все пиксели, интенсивность которых превышала пороговое значение I_Π :

$$I \leq I_\Pi = \frac{(I_M + I_\Phi)}{2}. \quad (12)$$

3) *Группировка пикселей.* На каждом изображении КМ все маркированные пиксели были сгруппированы так, чтобы через все пиксели одной группы можно было провести непрерывную линию. Каждой группе пикселей соответствует изображение одной метки.

4) *Параметризация калибровочных мишеней.* Изображение любой метки близко к эллипсу с центром в точке (p_c, q_c) и полуосями a и b , который повернут на угол α относительно горизонтали. С применением аппарата математической статистики получены следующие формулы для перечисленных параметров:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_c = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S p_s, \quad q_c = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S q_s - \text{координаты центра изображения метки,} \\ C = \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{vmatrix} - \text{ковариационная матрица изображения метки,} \\ c_{11} = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S (p_s - p_c)^2, \quad c_{22} = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S (q_s - q_c)^2, \\ c_{12} = c_{21} = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S (p_s - p_c)(q_s - q_c), \\ \alpha = \frac{1}{2} \arctg \frac{2c_{12}}{c_{11} - c_{22}}, \\ U = \begin{vmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{vmatrix}, \quad V = 3CU, \quad a = \sqrt[4]{v_{11}^2 + v_{21}^2}, \quad b = \sqrt[4]{v_{22}^2 + v_{12}^2}, \end{array} \right. \quad (13)$$

где k — индекс изображения метки; s — индекс пикселя в изображении метки; S — число пикселей в изображении метки; C — центрированная ковариационная матрица изображения метки; α — угол поворота эллипса метки; a и b — большая и малая полуоси эллипса; V и U — вспомогательные матрицы.

5) *Фильтрация и идентификация изображений меток.* Фильтрация выполняется после параметризации КМ и состоит в исключении изображений меток

со слишком малыми или большими размерами полуосей либо такими, у которых соотношение главных полуосей a/b значительно отличается от единицы. Идентификация заключается в установлении корректного соответствия между метками КМ и их отфильтрованными и параметризованными изображениями.

Описанный алгоритм (1)—(5) был применен для обработки изображений всех КМ. В результате для каждой КМ было получено взаимно однозначное соответствие между угловыми координатами ее меток и пиксельными координатами центров их изображений. Это позволило выполнить расчет коэффициентов калибровочных характеристик ФС.

Итеративный алгоритм расчета калибровочных характеристик ФС

Экспериментальная установка для определения была разработана и изготовлена для принципиальной проверки предлагаемого способа калибровки ФС. Поэтому значения измерительных, установочных и личных погрешностей измерений были не менее 10^{-3} м.

По этим причинам особое внимание было уделено методике измерений и математической обработке полученных результатов. Во-первых, при измерениях были использованы семь КМ, каждая из которых отличалась от остальных количеством меток и их радиусами. Дополнительная информация о КМ приведена в разделе 4.

Во-вторых, при расчете матриц C , D , E и F (3, 4) был разработан и применен итеративный алгоритм, в ходе которого многократно чередовались этапы объединения, восстановления и корректировки КМ. Содержание этих этапов раскрывается далее.

1) На этапе объединения КМ параметры всех меток и их изображений объединялись в одно общее множество, и по формулам (3)—(7) вычислялись матрицы C , D , E и F . Было установлено, что в формулах метода наименьших квадратов (7) матрицы $A^T A$ и $B^T B$ плохо обусловлены, что выражалось в значительных погрешностях калибровочных характеристик (2). Для повышения обусловленности матриц $A^T A$ и $B^T B$ оказалось достаточным применить следующие преобразования координат:

$$\psi \mapsto \frac{18}{\pi} \psi, \quad \theta \mapsto \frac{18}{\pi} \theta, \quad p \mapsto 0,001p, \quad q \mapsto 0,001q. \quad (14)$$

После этого по формулам (3)—(7) вычислены матрицы C , D , E и F прямых и обратных калибровочных характеристик в первом приближении.

2) На этапе восстановления вычислялись восстановленные КМ. А именно, по формулам обратных калибровочных характеристик (2) для каждого изображения метки с координатами (p_{ck}, q_{ck}) вычислены восстановленные угловые координаты метки $(\psi_{ck \text{ восст}}, \theta_{ck \text{ восст}})$ и декартовы координаты $(z_{ck \text{ восст}}, y_{ck \text{ восст}})$. Восстановленные координаты меток существенно не совпадают с исходными. При этом центр изображения КМ, имеющий координаты $(0, 0)$, отображается не в точку КМ $(0, 0)$, а в некоторую другую точку с координатами $(\psi_{0 \text{ восст}}, \theta_{0 \text{ восст}})$ и $(z_{0 \text{ восст}}, y_{0 \text{ восст}})$. Таким образом, восстановленная мишень смещена по отношению к истинной.

Восстановленная мишень, в целом, характеризуется равномерным растяжением или сжатием по отношению к исходной мишени с масштабом $\mu \neq 1$ и повернута относительно нее на малый угол ε .

В настоящей работе выдвинуто предположение о том, что перечисленные погрешности сдвига, масштабирования и поворота представляют собой только случайные погрешности монтажа КМ и ФА на экспериментальной установке.

3) На этапе корректировки вносились расчетные поправки в параметры меток КМ. Вначале каждая мишень центрировалась, т. е. из декартовых координат всех меток одной и той же КМ был вычтен сдвиг ее центра $(z_{0 \text{ восст}}, y_{0 \text{ восст}})$. После этого угловые координаты центров всех меток (ψ_{ck}, θ_{ck}) вычислялись заново. Затем для каждой мишени по методу наименьших квадратов были вычислены общий коэффициент масштаба μ и общий угол поворота ε :

$$\left\{ \begin{array}{l} W = \begin{bmatrix} -y_{ck} & z_{ck} \\ \dots & \dots \\ z_{ck} & y_{ck} \\ \dots & \dots \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} z_{ck \text{ восст}} \\ \dots \\ y_{ck \text{ восст}} \\ \dots \end{bmatrix} \\ \left\{ \begin{array}{l} z'_{ck} = -y_{ck \text{ восст}} \cdot \mu \sin \varepsilon + z_{ck \text{ восст}} \cdot \mu \cos \varepsilon \\ y'_{ck} = z_{ck \text{ восст}} \cdot \mu \sin \varepsilon + y_{ck \text{ восст}} \cdot \mu \cos \varepsilon \end{array} \right. \\ R = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = (W^T W)^{-1} W^T Y \\ \mu = \sqrt{r_1^2 + r_2^2}, \quad \varepsilon = \arctg \frac{r_1}{r_2} \end{array} \right. \quad (15)$$

где W — матрица Вандермонда для метода наименьших квадратов (5); (z_{ck}, y_{ck}) — центрированные координаты i -ой метки на предыдущей итерации обработки; (z'_{ck}, y'_{ck}) — координаты k -ой метки на текущей итерации обработки; Y — вектор-столбец координат центрированных восстановленных меток мишени; $(z_{ck \text{ восст}}, y_{ck \text{ восст}})$ — центрированные восстановленные координаты центра k -ой метки мишени; R — вектор-столбец решения системы линейных уравнений; μ, ε — параметры преобразования координат исходных меток.

Для достижения сходимости значений μ и ε требовалось выполнить две-три итерации.

В результате преобразований (15) координаты меток КМ корректируются так, что минимизируется их среднее квадратичное отклонение от восстановленных координат. Тем самым уменьшается общий разброс меток исходных мишеней, устраняются погрешности установки КМ в эксперименте и повышается точность расчета калибровочных характеристик.

Оптимизация порядков матриц калибровочных характеристик ФА

Порядки M, N, U и V матриц C, D, E и F выбирались таким образом, чтобы был достигнут минимум полной среднеквадратической погрешности (СКП) δ

калибровочных характеристик по всем КМ. Также учитывались значения частных среднеквадратичных погрешностей δ_i для отдельных КМ. Перечисленные величины получились по следующим формулам:

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^T K_i \delta_i^2}, \quad \text{где } \delta_i = \sqrt{\frac{1}{K_i} \sum_{k=1}^{K_i} (\psi_{ck \text{ восст}} - \psi_{ck})^2 + (\theta_{ck \text{ восст}} - \theta_{ck})^2}, \quad (16)$$

где $T = 7$ — количество мишеней; K_i — количество меток на i -ой КМ.

При слишком малых значениях порядков M, N, U и V преобладают погрешности определения, вызванные низкой точностью многочленов (2). При слишком больших значениях порядков преобладают погрешности округления в методе наименьших квадратов (7).

Зависимость значений $\delta, \min \delta_i$ и $\max \delta_i$ от порядков M и N показана на рис. 4.

Зависимость среднеквадратической погрешности для прямых калибровочных характеристик имеет аналогичный вид. По рис. 4 видно, что при значениях $M (N) > 6$ среднеквадратическая погрешность снижается незначительно, а при $M (N) < 6$ резко увеличивается. Окончательно выбраны значения порядков калибровочных характеристик $M = N = U = V = 6$.

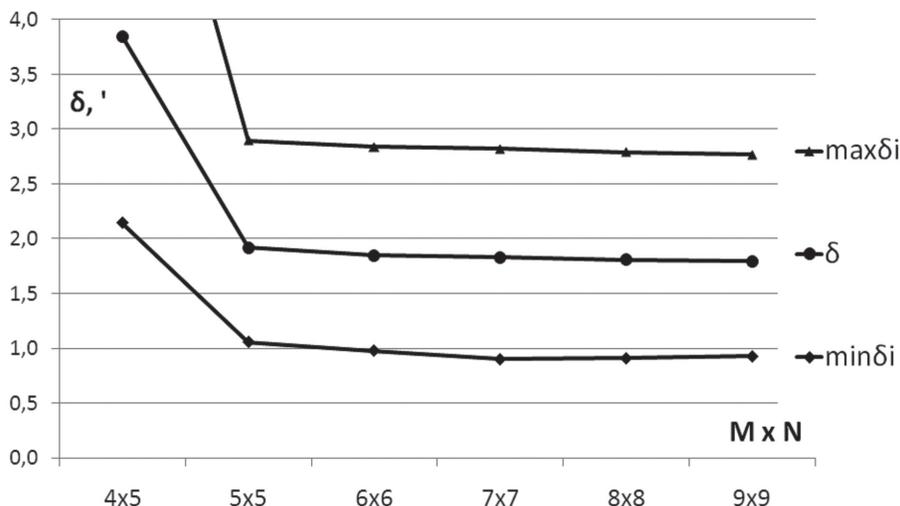


Рис. 4. Зависимость среднеквадратической погрешности калибровочных характеристик от порядков калибровочных характеристик: δ — полная среднеквадратическая погрешность по всем калибровочным мишеням; $\min \delta_i$ — наименьшая частная среднеквадратическая погрешность; $\max \delta_i$ — наибольшая частная среднеквадратическая погрешность.

Fig. 4. Dependence of the root-mean-square error of the calibration characteristics on the orders of the calibration characteristics: δ — standard deviation for all calibration targets; $\min \delta_i$ — the smallest private standard deviation; $\max \delta_i$ — the largest private standard deviation.

Также по рис. 4 видно, что разброс частных СКП $\max \delta_i - \min \delta_p$, равный $2'$, двукратно превышает минимальное значение, равное $1'$. При использовании более точных средств измерений и при более точном изготовлении экспериментальной установки следует ожидать, что полная СКП и разброс частных СКП снизятся до значений $30'' \div 1'$.

Значения коэффициентов калибровочных характеристик ФА

В результате обработки измерительных данных, описанной в предыдущих разделах, получены матрицы C , D , E и F . Общий характер aberrаций оптической системы использованного объектива иллюстрируется рис. 5.

На рис 5 б показаны изолинии коэффициента неоднородности δm масштабного коэффициента $m(y,z)$, который был вычислен по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} m(y,z) &= \frac{\sqrt{p^2 + q^2}}{\sqrt{y^2 + z^2}} \\ \delta m(y,z) &= \frac{m(y,z) - 1}{m_{cp}} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Здесь $m(y,z)$, пкс/мм – местное значение коэффициента масштаба; y, z (мм) — декартовы координаты точек тестовой сетки; $m_{cp} = 17,42$ пкс/мм — среднее значение коэффициента масштаба m .

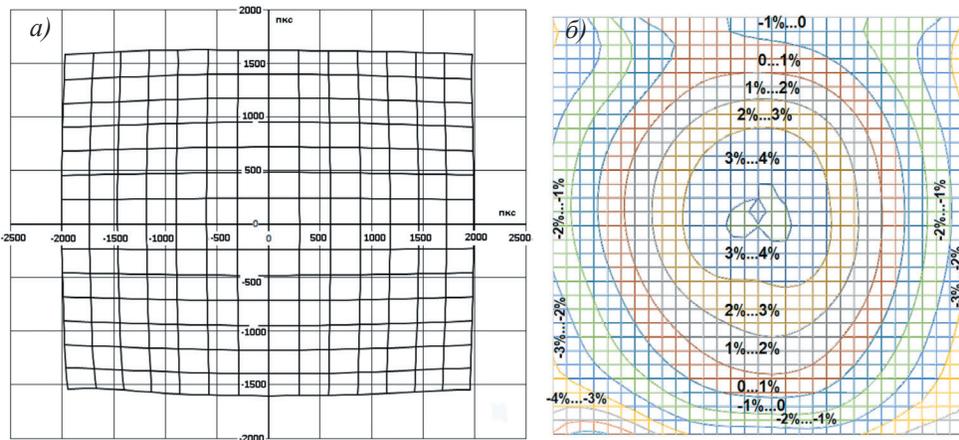


Рис. 5. Аберрации исследованной оптической системы:

- а) изображение тестовой сетки (вычислено с использованием матриц C и D);
 б) распределение коэффициента неоднородности δm масштабного коэффициента $m(y,z)$.

Fig. 5. Aberrations of the explored optical system:

- а) image of a test grid (calculated using matrices C and D);
 б) distribution of relative local inaccuracy δm of scale factor $m(y,z)$

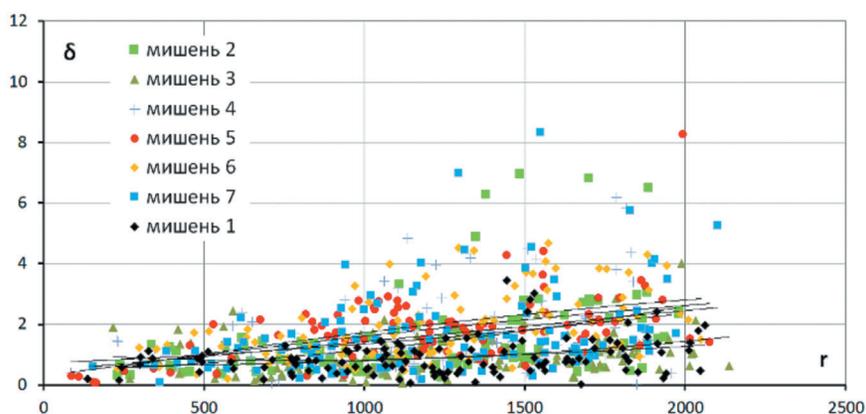


Рис. 6. Распределение погрешностей отображений (δ) на калибровочных мишенях:

r (пиксель) — расстояние от центра фотографии до текущей метки;

Δ (') — локальная погрешность обратного отображения.

Fig. 6. Distribution of display errors (δ) on calibration targets:

r (pixel distance) — from the center of the photo to the current mark; Δ (') — local error of back display

Исследование погрешностей калибровочных характеристик

Для оценки погрешностей многочленов (2) для каждой мишени были рассчитаны локальные погрешности Δ координат центров меток и расстояния r от центров меток до центра фотографии по следующим формулам:

$$\Delta = \sqrt{(y_{ck \text{ восст}} - y_{ck})^2 + (z_{ck \text{ восст}} - z_{ck})^2}, \quad r = \sqrt{y_{ck}^2 + z_{ck}^2}, \quad (18)$$

где y_{ck} , z_{ck} — фактические координаты центра k -ой метки, $y_{ck \text{ восст}}$, $z_{ck \text{ восст}}$ — восстановленные координаты центра k -ой метки.

Зависимости локальной погрешности Δ от расстояния r для шести различных мишеней показаны на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что локальная погрешность расчета угловых координат центров меток не превосходит 4' для большинства мишеней, а для некоторых мишеней не превосходит 2'. При этом максимальные погрешности наблюдаются вблизи краев фотографии.

Заключение

В ходе выполненной работы проведено экспериментальное обоснование способа определения калибровочных характеристик фотосекстанта. При этом решены следующие задачи:

— Выполнен анализ оптико-электронной системы фотосекстанта, и на основе положений геометрической оптики разработана математическая модель его калибровочных характеристик. Для математического описания взаимно однозначного

отображения угловых координат произвольного точечного объекта и пиксельных координат центра его изображения использованы многочлены высоких порядков.

— Разработана и изготовлена экспериментальная установка, предназначенная для определения калибровочных характеристик ФС. В качестве ближайшего аналога фото-секстанта использован цифровой фотоаппарат Canon EOS 5D. В качестве объектов фотосъемки использованы калибровочные мишени — изображения прямоугольной формы с нанесенными на них 100—300 круглыми темными метками малого радиуса.

— С использованием ранее разработанного алгоритма предварительной численной обработки цифровых фотографий калибровочных мишеней разработан уточненный итерационный алгоритм расчета калибровочных характеристик фотосекстанта, использующий объединение серии фотоизображений, полученных на экспериментальную установку. Особенностью разработанного алгоритма является итерационная компенсация установочных погрешностей фотосъемки отдельных калибровочных мишеней.

Таким образом, в настоящей работе предложен и апробирован экспериментальный способ определения калибровочных характеристик навигационного прибора «фотосекстанта».

Тестирование предложенного способа показало, что локальная погрешность расчета угловых координат точечных объектов не превосходит $4'$ для всех КМ и $2'$ для некоторых из них. При этом среднеквадратические погрешности одних и тех же калибровочных характеристик, вычисленные для различных мишеней, имеют многократный разброс значений от $1'$ до $3'$. Это позволяет сделать вывод о том, что после повышения точности экспериментальной установки, применения современных средств оптических измерений и снижения указанного разброса локальная погрешность калибровочных характеристик снизится до значений, меньших $30'' \dots 1'$.

Список литературы

1. Козик С.В., Сибилев В.А., Алцыбеев Г.О. Концепция навигационного прибора «Электронный секстант» // Морской Вестник. 2020. Т. 76, № 4. С. 116—118.
2. Козик С.В., Сибилев В.А. К вопросу применения современных технических средств определения координат места судна по небесным светилам // Морская Радиоэлектроника. 2021. Т. 76, № 2. С. 18—21.
3. Сибилев В.А., Козик С.В., Алцыбеев Г.О. Цифровой секстант. Патент 194783 РФ, МПК G 01 C 1/08. № 2019132933, 2019.
4. Сибилев В.А., Козик С.В., Алцыбеев Г.О., Денисова А.А., Филиппов М.А. Навигационный астрономический помощник. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ 2020614451. РФ. № 2020613416, 2020.
5. Козик С.В., Сибилев В.А., Золотов В.Д. Измерение высоты навигационного светила по фотографии небосвода // Научные труды азербайджанской государственной морской академии. 2020. № 2. С. 95—100.
6. Козик С.В., Захаров С.А., Сибилев В.А. Способ измерения высоты светила по цифровой фотографии небосвода // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 5. С. 412—421. doi: 10.17586/0021-3454-2021-64-5-412-421.
7. Безидько С.Н., Ровенская Т.С. Полиномы Цернике в проектировании оптических систем. Ч. 1. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 44 с.: ил.

8. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное изд. М.: Финансы и статистика, 1983. 471 с.
9. Волегов Д.Б., Гусев В.В., Юрин Д.В. Обнаружение прямых линий на изображениях на основе преобразования Хартли. Быстрое преобразование Хафа // Труды 16-й Международной конференции по компьютерной графике и зрению ГрафиКон'2006. 2006. С. 182—191.
10. Гончаров В.А. Методы оптимизации: учебное пособие. М.: Московский государственный институт электронной техники, 2009. 188 с.
11. Данилов А.А., Спутнова Д.В., Тюрина Ю.Г. Об установлении интервалов между калибровками средств измерений // Системы обработки информации. 2018. № 4. С. 98—102.
12. Баранова П.О., Садаева Е.Ю. ИСО/МЭК 17025-2017 «Новые требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий» // Интерактивная наука. 2018. № 5. С. 43—46.
13. Артисевич А.Е., Шабат А.Б. Три теоремы о матрицах Вандермонда // Владикавказский математический журнал. 2020. Т. 22, № 1. С. 5—12.
14. Formela K., Weintrit A., Neumann T. Overview of definitions of maritime safety, safety at sea, navigational safety and safety in general // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2019. Т. 13. P. 285—290. doi: 10.12716/1001.13.02.03.
15. Hambling D. What would the world do without GPS // BBC Future [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.bbc.com/future/article/20201002-would-the-world-cope-without-gps-satellite-navigation> (дата обращения 10.04.2021).

References

1. Kozik S.V., Sibilev V.A., Altsybeev G.O. The concept of the navigation device “Electronic sextant”. *Morskoy vestnik*. Marine Bulletin. 2020, 4 (76): 116—118. [In Russian].
2. Kozik S.V., Sibilev V.A. Use of modern technical means of determining the position of the vessel by celestial bodies. *Morskaya Radioelektronika*. Marine Radioelectronics. 2021, 76, 2: 18—21. [In Russian].
3. Sibilev V.A., Kozik S.V., Altsybeev G.O. *Cifrovoj sekstan*. Digital Sextant. Patent 194783 RF. MPK G 01 C 1/08. № 2019132933, 2019. [In Russian].
4. Sibilev V.A., Kozik S.V., Altsybeev G.O., Denisova A.A., Filippov M.A. *Navigacionnyj astronomicheskij pomoshchnik*. *Svidetel'stvo o gosregistracii programmy dlya EVM 2020614451*. Celestial navigation helper. Certificate of state registration of a computer program 2020614451. RF. № 2020613416, 2020. [In Russian].
5. Kozik S.V., Sibilev V.A., Zolotov V. D. Measurement of the height of the navigation luminary from the photograph of the sky. *Nauchnie trudi azerbaydjansskoy gosudarstvenoy akademii*. Scientific works of the Azerbaijan State Maritime Academy. 2020, 2: 95—100. [In Russian].
6. Kozik S.V., Zakharov S.A., Sibilev V.A. Substantiation of a method for measuring the height of a star from a digital photograph of the sky. *Izvestia vuzov priborostroenia*. Proc. of universities Instrumentation. 2021, 4 (64): 412—421. doi: 10.17586/0021-3454-2021-64-5-412-421. [In Russian].
7. Bezdidko S.N., Rovenskaya T.S. *Polinomy Cernike v proektirovanii opticheskikh sistem*. *Chast' 1*. Zernike polynomials in the design of optical systems. Part 1. Moscow: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 2006: 44 p. [In Russian].
8. Ayvazyan S.A., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. *Prikladnaya statistika: Osnovy modelirovaniya i pervichnaya obrabotka dannyh*. Applied Statistics: Basics of Modeling and Primary Data Processing. Reference ed. Moscow: Finance and statistics, 1983: 471 p. [In Russian].
9. Volegov D.B., Gusev V.V., Yurin D.V. Detection of straight lines in images based on the Hartley transform. Rapid Hough Transformation. *Trudy 16-i Mezhdunarodnoi konferentsii po komp'yuternoi grafike i zreniiu GrafiKon'2006*. Proceedings of the 16th International Conference on Computer Graphics and Vision GraphiCon' 2006. 2006: 182—191. [In Russian].
10. Goncharov V.A. *Metody optimizacii: uchebnoe posobie*. Optimization methods: textbook. Moscow: Moscow State Institute of Electronic Technology, 2009: 188 p. [In Russian].
11. Danilov A.A., Sputnova D.V., Tyurina Y.G. On the establishment of intervals between calibrations of measuring instruments. *Sistemy obrabotki informacii*. Information processing systems. 2018, 4: 98—102. [In Russian].

12. *Baranova P.O., Saldaeva E. Y.* ISO / IEC 17025-2017 “New requirements for the competence of testing and calibration laboratories”. *Interaktivnaya nauka*. Interactive Science. 2018, 5: 43—46. [In Russian].
13. *Artisevich A.E., Shabat A.B.* Three theorems on Vandermonde matrices. *Vladikavkazskij matematicheskij zhurnal*. Vladikavkaz mathematical journal. 2020, 1 (22): 5—12. [In Russian].
14. *Formela K., Weintrit A., Neumann T.* Overview of definitions of maritime safety, safety at sea, navigational safety and safety in general. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2019, 13: 285—290. doi: 10.12716/1001.13.02.03.
15. *Hambling D.* What would the world do without GPS. *BBC Future*. Available at: <https://www.bbc.com/future/article/20201002-would-the-world-cope-without-gps-satellite-navigation> (accessed 10.04.2021).

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 07.04.2021

Принята к публикации после доработки 25.08.2021

Сведения об авторах

Козик Сергей Викторович, канд. воен. наук, доцент, профессор кафедры судоходства на внутренних водных путях, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, Koserbik@mail.ru.

Захаров Станислав Андреевич, старший преподаватель кафедры проектирования и технологии производства морских подводных аппаратов и роботов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, zacharowsa1985@yandex.ru.

Сибилев Вадим Алексеевич, аспирант кафедры судоходства на внутренних водных путях, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, Sibilevv01@mail.ru.

Information about authors

Kozik Sergey Viktorovich, PhD (Military Sci.), Associate Professor, professor, department of inland waterways navigation, Admiral Makarov state university of maritime and inland shipping.

Zakharov Stanislav Andreevich, senior lecturer, department of design and technology of production of marine submersibles and robots, Saint-Petersburg state marine technical university.

Sibilev Vadim Alekseevich, postgraduate student, department of inland waterways navigation, Admiral Makarov state university of maritime and inland shipping.