

## СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТЫ СВЕТИЛА ПО ЦИФРОВОЙ ФОТОГРАФИИ НЕБОСВОДА

С. В. КОЗИК<sup>1</sup>, С. А. ЗАХАРОВ<sup>2</sup>, В. А. СИБИЛЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова,  
198035, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: Koserbik@mail.ru

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,  
190121, Санкт-Петербург, Россия

Обсуждаются вопросы использования глобальных навигационных спутниковых систем в области гражданского мореплавания, где их применение выявило опасности, носящие ключевой характер, так как в открытом море такие системы являются единственным источником координат места судна. Предложено решение проблемы путем применения навигации по небесным светилам. Рассмотрен новый способ измерения высоты навигационного светила, основанный на определении угловых координат центра светила и точек линии горизонта в результате численного экспресс-анализа цифровой фотографии небосвода. Описаны математические модели и вычислительные алгоритмы обработки изображений светила и линии горизонта, а также представлены результаты их тестирования.

**Ключевые слова:** навигационная безопасность, навигация по небесным светилам, преобразование Хафа, цифровая фотография, растровое изображение, горизонт, высота светила

**Введение.** Основой обеспечения навигационной безопасности плавания (НБП) судна является знание координат его местоположения в заданный момент времени. В современных условиях координаты места судна определяют с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Повсеместное применение ГНСС позволило выявить опасности естественного и искусственного характера при их использовании [1]. Как показывает анализ публикаций, к более актуальным можно отнести опасности искусственного характера, такие как деструктивные радиоэлектронные воздействия, GPS spoofing (подмена GPS-сигнала) и GPS jamming (подавление GPS-сигнала) [2—5].

В частности, GPS jamming относится к методам и средствам внешнего подавления сигналов спутниковой навигации. Так, комплекс радиопомех приемникам системы глобальной радионавигации „Оптим-3.2“, разработанный КБ „Радар“ (Белорусь), позволяет „закрыть“ от спутниковых сигналов территорию радиусом 100 км [6]. Однако в настоящее время собрать устройство для постановки таких радиопомех не составляет большого труда, поэтому они могут быть созданы и использованы в неправомерных целях, например, пиратами и террористами [7].

Перечисленные опасности использования ГНСС приводят к недостаточному обеспечению НБП, что нарушает требование Международной конвенции SOLAS [8, гл. 5]: „Все суда, независимо от размера, должны иметь <...> средства, пригодные для использования в любое

время на протяжении предполагаемого рейса для установления и обновления местоположения судна автоматическим способом“.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что ГНСС не обеспечивают полную гарантию получения на борту судна обсервованных координат его местоположения, и, таким образом, наличие на борту нерадиотехнических средств для определения координат места судна — объективная необходимость.

Единственный способ навигации в открытом море, использующий нерадиотехнические средства, — определение координат места по наблюдению небесных светил. В настоящее время нерадиотехническим средством, реализующим этот способ, является навигационный секстанс [9]. Это аналоговый прибор, модернизация которого не производилась более полувека. Для создания нового средства навигации требуется обосновать возможность измерения высоты светила по результатам математической обработки цифровой растровой фотографии участка небосвода. Технологически отработанный способ измерения будет служить основой для автономной навигационной системы определения координат места судна по небесным светилам.

На основании анализа научных исследований и литературных источников авторами настоящей статьи был сделан вывод, что для реализации предложенного способа требуется решить следующие научные задачи:

- 1) определение точностных характеристик фотосистемы;
- 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 алгоритмов обработки изображений.

В настоящей статье представлены результаты разработки и тестирования математических методов, предназначенных для идентификации и численной обработки изображений светила и горизонта.

**Определение точностных характеристик фотосистемы.** Рассмотрим представленную на рис. 1 схему фотосъемки удаленного точечного объекта с использованием цифрового фотоаппарата; здесь ОС — оптическая система;  $C_1$  — входящий световой поток;  $C_2$  — выходящий световой поток;  $M$  — ПЗС-матрица; РИ — растровое изображение объекта съемки.

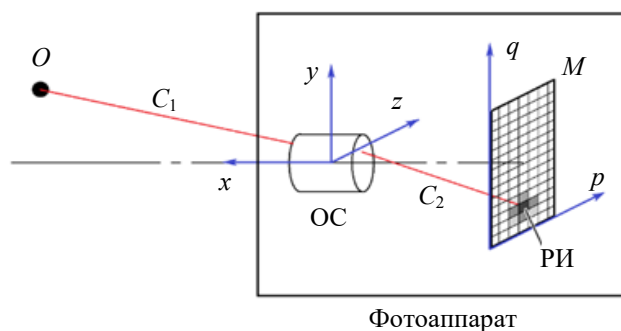


Рис. 1

Пространственные координаты объекта съемки выражаются эйлеровыми угловыми координатами ( $\psi$ ,  $\theta$ ) и прямоугольными декартовыми координатами ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Изображение на растровой фотографии описывается в вещественных пиксельных координатах ( $p$ ,  $q$ ).

Соответствие между угловыми и декартовыми координатами произвольной точки пространства задано следующими формулами:

$$\left. \begin{aligned} \theta &= -\arctg(y/x); \\ \psi &= \arctg(z \cos \theta / x); \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} y &= -x \operatorname{tg} \theta; \\ z &= x \operatorname{tg} \psi / \cos \theta, \end{aligned} \right\}$$

где  $x$  — расстояние по главной оптической оси объектива от оптического центра объектива фотоаппарата до объекта съемки.

В настоящей работе полагаются известными ахроматические абберационные характеристики фотоаппарата, которые в геометрическом приближении заданы взаимно однозначным отображением угловых координат  $(\psi, \theta)$  произвольной точки пространства и пиксельных координат  $(p, q)$  центра ее растрового изображения:

$$p(\psi, \theta), q(\psi, \theta), \psi(p, q), \theta(p, q).$$

Разрешение ПЗС-матриц современных цифровых фотоаппаратов достигает 3000—4000 пкс при апертурном угле до  $60^\circ$ . Соответственно,  $1 \text{ пкс} \approx 1'$ .

**Идентификация растрового изображения светила и определение угловых и пиксельных координат его центра.** Пусть растровое изображение записано в формате BitMap (.bmp) в палитре RGB и каждый пиксел характеризуется тремя цветовыми компонентами  $(r, g, b)$ . Тогда процесс обработки растрового изображения светила может быть разбит на следующие этапы.

1) *Сглаживание.* При сглаживании компоненты  $(r, g, b)$  усредняются по формулам

$$r = \frac{1}{N_{pq}} \sum_{\Delta p=-H_p}^{H_p} \sum_{\Delta q=-H_q}^{H_q} r_{p+\Delta p, q+\Delta q};$$

$$g = \frac{1}{N_{pq}} \sum_{\Delta p=-H_p}^{H_p} \sum_{\Delta q=-H_q}^{H_q} g_{p+\Delta p, q+\Delta q};$$

$$b = \frac{1}{N_{pq}} \sum_{\Delta p=-H_p}^{H_p} \sum_{\Delta q=-H_q}^{H_q} b_{p+\Delta p, q+\Delta q},$$

где  $p, q$  — координаты текущего пиксела;  $N_{pq} = (2H_p + 1)(2H_q + 1)$  — площадь области осреднения;  $H_p, H_q$  — размеры области осреднения.

2) *Маркировка пикселов.* Пусть интенсивность любого пиксела вычисляется по формуле:

$$I = r + g + b.$$

Соответственно по цветовым компонентам фона  $(r_\phi, g_\phi, b_\phi)$  и меток  $(r_m, g_m, b_m)$  могут быть вычислены их интенсивности:

$$I_\phi = r_\phi + g_\phi + b_\phi, I_m = r_m + g_m + b_m.$$

Пикселы маркируются как принадлежащие изображению светила, если выполнен следующий критерий:

$$I \geq (I_m + I_\phi) / 2.$$

3) *Группировка пикселов.* Все маркированные пикселы группируются так, чтобы через все пикселы одной группы можно было провести непрерывную линию без самопересечений и повторений. Каждой группе пикселов соответствует одно вероятное изображение светила.

4) *Параметризация изображения светила.* В общем случае растровое изображение светила близко к эллипсу с центром в точке  $(p_c, q_c)$ , который имеет полуоси  $a$  и  $b$  и повернут на угол  $\alpha$  к горизонтали. В настоящей работе переход от растрового изображения светила к его числовым параметрам называется параметризацией изображения. Параметры эллипса вычисляются по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned}
 p_c &= \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S p_s, & q_c &= \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S q_s; \\
 C &= \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{vmatrix}; \\
 c_{11} &= \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S (p_s - p_c)^2, & c_{22} &= \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S (q_s - q_c)^2; \\
 c_{12} &= c_{21} = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S (p_s - p_c)(q_s - q_c); \\
 \alpha &= \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2c_{12}}{c_{11} - c_{22}}, & U &= \begin{vmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{vmatrix}; \\
 V &= \left\| v_{ij} \right\| = 3CU, & a &= \sqrt[4]{v_{11}^2 + v_{21}^2}, & b &= \sqrt[4]{v_{22}^2 + v_{12}^2},
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $S$  — число пикселей в фотоизображении светила;  $C$  — матрица ковариаций пикселей;  $V$  и  $U$  — вспомогательные матрицы.

5) *Фильтрация изображений светила.* В результате фильтрации должен быть выбран наиболее вероятный вариант параметризованного изображения светила. В процессе фильтрации вероятных изображений светила исключаются эллипсы со слишком малыми или большими размерами полуосей, а также эллипсы, для которых соотношение главных полуосей  $a/b$  значительно отличается от единицы.

**Идентификация растрового изображения линии горизонта и аппроксимация ее угловых и пиксельных координат.** Задача об определении линии горизонта на растровом изображении относится к задачам о поиске границ. Для решения таких задач широко используется преобразование Хафа [10]. Перед его применением растровое изображение должно быть сглажено по алгоритму, описанному в предыдущем разделе. Затем к изображению применяется оператор Собеля для расчета модуля местного градиента яркости  $G_{p,q}$ :

$$G_{(p,q)} = \sqrt{G_{(xp,q)}^2 + G_{(yp,q)}^2};$$

$$G_{x p,q} = M_x \begin{pmatrix} I_{p-1,q-1} & I_{p-1,q} & I_{p-1,q+1} \\ I_{p,q-1} & I_{p,q} & I_{p,q+1} \\ I_{p+1,q-1} & I_{p+1,q} & I_{p+1,q+1} \end{pmatrix} = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 m_x m_{+2, n+2} I_{p+m, q+n};$$

$$G_{y p,q} = M_y \begin{pmatrix} I_{p-1,q-1} & I_{p-1,q} & I_{p-1,q+1} \\ I_{p,q-1} & I_{p,q} & I_{p,q+1} \\ I_{p+1,q-1} & I_{p+1,q} & I_{p+1,q+1} \end{pmatrix} = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 m_y m_{+2, n+2} I_{p+m, q+n};$$

$$M_x = \left\| m_{xij} \right\| = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad M_y = \left\| m_{yij} \right\| = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix},$$

где  $G_{x p,q}$  и  $G_{y p,q}$  — компоненты вектора градиента;  $M_x$  и  $M_y$  — ядра свертки оператора Собеля.

К полученному градиентному изображению применяется преобразование Хафа. Проведем через произвольный пиксел с координатами  $(p, q)$  произвольную прямую, которая характеризуется полярными координатами: углом наклона прямой  $\varphi$  и расстоянием  $l$  по нормали до

центра изображения. Полярные и пиксельные координаты точек, лежащих на этой прямой, связаны друг с другом по формуле

$$l = p \sin \varphi + q \cos \varphi. \tag{2}$$

Основой преобразования Хафа является аккумулятор — матрица голосов  $\Sigma = \|\sigma_{ij}\|$ , элементы которой соответствуют узлам сетки в полярных координатах  $(l_i, \varphi_j)$ :

$$\left. \begin{aligned} l_i &= l_{\min} + i\Delta l, \quad i = 0, \dots, I; \quad \Delta l = 2|l_{\min}| / I; \\ \varphi_j &= \varphi_{\min} + j\Delta\varphi, \quad j = 0, \dots, J; \quad \varphi_{\min} = -\pi/2; \quad \Delta\varphi = \pi/J. \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

Для заполнения аккумулятора применяется процедура „голосования“, а именно, выбираются только те пиксели изображения, интенсивность  $I$  которых превышает заданный порог  $I_{\text{п}}$ . Для каждого такого пикселя угол  $\varphi$  варьируется в пределах сетки (3), и для каждого дискретного значения  $\varphi_j$  вычисляется координата  $l$  по формуле (2). После округления значения  $l$  с шагом  $\Delta l$  „голос“  $\sigma_{ij}$  аккумулятора  $\Sigma$  увеличивается на единицу:

$$\left. \begin{aligned} l &\rightarrow l_i, \\ \sigma_{ij} &\rightarrow \sigma_{ij} + 1 \text{ при } I \geq I_{\text{п}}. \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

После обхода изображения получим его аккумулятор  $\Sigma$ .

Линия горизонта на градиентном изображении имеет вид узкой светлой полосы с малой кривизной и на аккумуляторе представлена локальным максимумом. В данном исследовании необходимо вручную указать на изображении любую точку линии горизонта, после чего на аккумуляторе автоматически проявляется образ этой линии. В результате определяется прямая линия, проходящая на фотографии наиболее близко к линии горизонта. Этапы обработки изображения представлены на рис. 2, где  $a$  — сглаженное изображение;  $b$  — градиентное изображение;  $в$  — результат обработки по алгоритму Хафа;  $г$  — выбор линии горизонта.

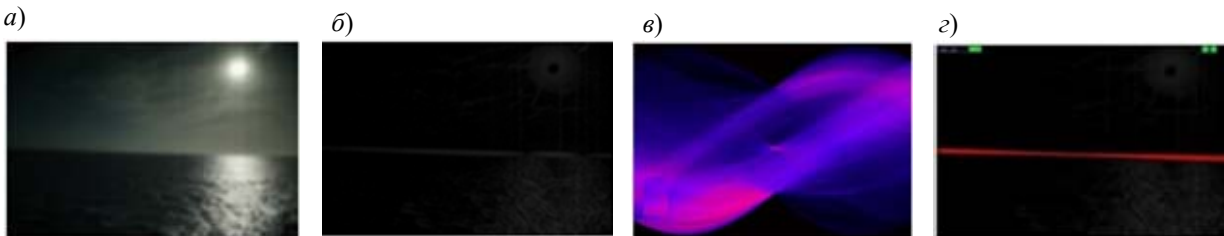


Рис. 2

Далее производится локальное уточнение линии горизонта, а именно, найденная прямая разделяется на  $N=20$  отрезков и на каждом из них задается плавающее „окно“ в форме пиксельного параллелограмма (рис. 3).

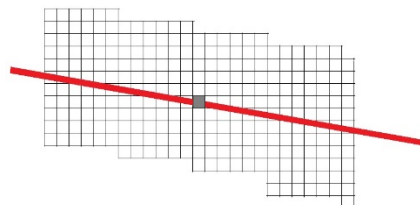


Рис. 3

Центр  $n$ -го „окна“ лежит на найденной прямой в точке  $(p_n, q_n)$ . Затем каждое „окно“ смещается вверх и вниз на переменное расстояние  $\Delta d \leq \Delta d_{\text{max}}$  с малым шагом  $\delta$ . При каждом смещении  $\Delta d$  вычисляется средний по текущему „окну“ модуль градиента  $\bar{G}_n(\Delta d)$ . Макси-

мальный средний модуль градиента равен  $\bar{G}_{n\max}$ . Далее используются только те смещения, при которых выполняется неравенство

$$\bar{G}_n(\Delta d) \geq 0,75\bar{G}_{n\max}.$$

С учетом всех таких смещений вычисляются взвешенные средние координаты  $(\bar{p}_n, \bar{q}_n)$  центра  $n$ -го „окна“, которые являются уточнением первоначальных координат  $(p_n, q_n)$ . После обхода всех „окон“ получаем множество уточненных точек горизонта  $\{\bar{p}_n, \bar{q}_n\}$ ,  $n = 1, N$ . Найденные координаты линии горизонта аппроксимируем параметрическими зависимостями  $\bar{p}(n)$  и  $\bar{q}(n)$ .

Пример аппроксимированной линии горизонта показан на рис. 4.



Рис. 4

**Расчет высоты светила.** Пусть известны угловые координаты светила  $(\psi_S, \theta_S)$  и текущей точки горизонта  $(\psi_H, \theta_H)$ . Тогда единичные векторы  $\mathbf{e}_S$  и  $\mathbf{e}_H$  радиус-векторов этих точек и высота светила  $h$  определяются по формулам

$$\mathbf{e}_S = \begin{pmatrix} \cos \psi_S \cos \theta_S \\ \sin \theta_S \cos \psi_S \\ \sin \psi_S \end{pmatrix}, \quad \mathbf{e}_H = \begin{pmatrix} \cos \psi_H \cos \theta_H \\ \sin \theta_H \cos \psi_H \\ \sin \psi_H \end{pmatrix};$$

$$\cos h = \mathbf{e}_S \cdot \mathbf{e}_H = \cos \psi_S \cos \psi_H \cos(\theta_S - \theta_H) + \sin \psi_S \sin \psi_H,$$

$$h = \arccos[\cos \psi_S \cos \psi_H \cos(\theta_S - \theta_H) + \sin \psi_S \sin \psi_H].$$

Поскольку в настоящей работе линия горизонта описывается параметрическими зависимостями  $(\psi_H(n), \theta_H(n))$  с параметрической переменной  $n$ , то высота светила принимается равной минимуму функции  $h(n)$ . Этот минимум может быть определен, например, по методу поразрядного осреднения [11].

**Результаты тестирования алгоритмов обработки изображений.** Рассмотренные выше методы обработки изображений, предназначенные для определения параметров светила и поиска линии горизонта, были протестированы с использованием искусственных растровых изображений. Далее приводятся характеристики тестовых изображений, результаты их обработки и значения полученной погрешности.

1) *Тестирование метода обработки изображения светила.* Цель тестирования заключается в том, чтобы определить наименьшую возможную погрешность параметризации изображения светила по выражениям (1). Тестовые изображения светила имели прямоугольную, а не эллиптическую форму, что позволило упростить их создание и контроль параметров, но при этом сохранить две взаимно ортогональные оси симметрии. Использованное тестовое изображение, представленное на рис. 5, имеет размер  $828 \times 568$  пкс и содержит 27 белых прямоугольных областей, размеры сторон которых составляют  $15 \dots 81$  пкс. Исходные значения параметров тестовых изображений светила и результаты их оценки по вышеописанному методу приведены в табл. 1, где приняты следующие обозначения:  $p_c, q_c$  — истинные координаты центра тестового изображения светила;  $a, b$  — истинные максимальный и минимальный размеры сторон изображения светила;  $p_{c_p}, q_{c_p}$  — расчетные координаты центра изображения

светила;  $c$ ,  $d$  — расчетные большая и малая полуоси эллипса;  $\Delta p_c$ ,  $\Delta q_c$  — погрешности вычисления расчетных координат  $p_{c\_p}$ ,  $q_{c\_p}$ .

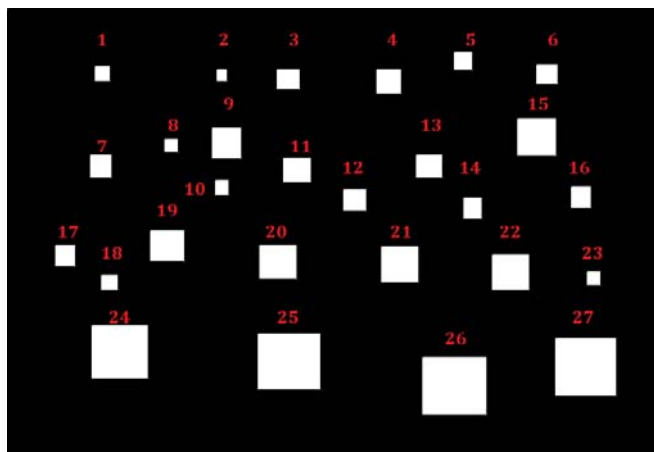


Рис. 5

Таблица 1

№ п/п	$p_c$ , пкс	$q_c$ , пкс	$a/b$	$p_{c\_p}$ , пкс	$q_{c\_p}$ , пкс	$c/d$	$\Delta p_c$ , пкс	$\Delta q_c$ , пкс
1	-293,5	201,0	0,95	-293,47	201,47	1,00	0,03	0,047
2	-142,5	199,5	0,87	-142,46	199,47	0,87	0,04	-0,03
3	-58,5	194,5	1,16	-58,48	194,48	1,16	0,02	-0,02
4	68,5	191,5	1,00	68,52	191,48	1,00	0,02	-0,02
5	162,5	217,5	1,00	162,52	217,48	1,00	0,02	-0,02
6	268,5	200,5	1,08	268,52	200,48	1,08	0,02	-0,02
7	-295,5	84,5	0,93	-295,48	84,48	0,93	0,02	-0,02
8	-206,5	110,5	1,00	-206,47	110,47	1,00	0,03	-0,03
9	-136,5	113,5	0,95	-136,49	113,49	0,95	0,01	-0,01
10	-142,5	57,5	0,89	-142,47	57,47	0,90	0,03	-0,03
11	-47,5	79,5	1,13	-47,49	79,48	1,13	0,01	-0,02
12	25,5	41,5	1,07	25,52	41,48	1,07	0,02	-0,02
13	119,5	84,5	1,14	119,52	84,48	1,14	0,02	-0,02
14	174,5	31,5	0,85	174,52	31,48	0,85	0,02	-0,02
15	255,5	121,5	1,04	255,51	121,49	1,04	0,01	-0,01
16	311,5	45,5	0,93	311,52	45,48	0,93	0,02	-0,02
17	-340,5	-28,5	0,93	-340,48	-28,52	0,93	0,02	-0,02
18	-284,5	-62,5	1,11	-284,48	-62,53	1,10	0,02	-0,03
19	-211,5	-16,5	1,10	-211,49	-16,51	1,10	0,01	-0,01
20	-71,5	-36,5	1,09	-71,49	-36,51	1,09	0,01	-0,01
21	82,5	-39,5	1,04	82,51	-39,51	1,04	0,01	-0,01
22	222,5	-49,5	1,04	222,51	-49,51	1,04	0,01	-0,01
23	327,5	-57,5	1,00	327,53	-57,53	1,00	0,03	-0,03
24	-271,5	-150,5	1,06	-271,49	-150,51	1,06	0,01	-0,01
25	-57,5	-162,5	1,11	-57,49	-162,51	1,11	0,01	-0,01
26	151,5	-193,5	1,11	151,51	-193,51	1,11	0,01	-0,01
27	317,5	-169,5	1,05	317,51	-169,51	1,05	0,01	-0,01

Анализ таблицы показывает, что параметры симметричного тестового изображения светила вычисляются с высокой точностью. Так, погрешность расчетных координат центра тестового изображения не превышает 0,04 пкс, а расчетное отношение максимальной стороны к минимальной практически совпадает с истинным. Следовательно, основным источником погрешности при обработке натуральных фотографий может быть только асимметричность и неоднородность изображения светила.

2) *Тестирование метода обработки изображения горизонта.* Аналогично предыдущему методу, тестирование данного метода проводилось с целью расчетной оценки наименьшей возможной погрешности при обработке изображений горизонта. Тестовые изображения были разделены горизонтальными границами на области с однородным черным или белым фоном: см. рис. 6, где *а* — центральное положение горизонта, *б* — нижнее положение, *в* — верхнее и нижнее положения.



Рис. 6

Размер тестового изображения — 2752×1598 пкс. Ордината линии горизонта находится в диапазоне –471...570 пкс. Обработка тестовых изображений горизонта проводилась по соответствующему методу. Истинные ( $q_H$ ) и расчетные ( $q_{H_p}$ ) значения ординаты горизонта представлены в табл. 2.

Таблица 2

$q_H$ , пкс	$q_{H_p}$ , пкс	$\Delta q_H$ , пкс
–1	–1,03	–0,03
–349	–349	0
570	570,06	0,06
356	356	0
–471	–470,97	0,03

Согласно результатам тестирования (см. табл. 2) погрешность определения ординаты  $q_H$  по модулю не превышает 0,06 пкс, что соответствует 3,5". Следует отметить, что указанная погрешность достигнута при равномерном распределении цветового тона по обе стороны от линии горизонта. Обработка реальных фотографий также дает корректное положение линии горизонта (см. рис. 3 и 4).

**Заключение.** Представлены пути решения основных научных задач для реализации способа измерения высоты светила по растровой фотографии.

На первом этапе обработки цифровой растровой фотографии должны быть определены пиксельные координаты центра изображения светила и точек изображения горизонта. На втором этапе по этим данным должны быть рассчитаны угловые координаты центра светила и точек линии горизонта, после чего производится расчет высоты светила.

Произведено тестирование предлагаемых математических моделей с использованием искусственных изображений. Анализ результатов тестирования позволяет сделать вывод, что погрешность обработки изображения составляет сотые доли пиксела и удовлетворяет задачам измерения высоты светила.

Предполагается, что погрешность возрастет при переходе к зашумленным изображениям с существенно неоднородным распределением интенсивности пикселов. Разработка таких тестовых изображений представляет собой отдельную задачу.

Показана принципиальная возможность точного определения центра изображения светила и точек изображения линии горизонта в результате численной обработки растровых изображений. Тем самым обоснован предлагаемый способ измерения высоты светила по цифровой фотографии небосвода.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якушенко С. А. Проблемы навигационной безопасности аппаратуры спутниковой навигации // Радиотехника, электроника и связь. 2019. № 4.
2. Goward D. GPS Spoofing Attack in Black Sea // The Maritime Executive [Электронный ресурс]: <<https://www.maritime-executive.com/editorials/mass-gps-spoofing-attack-in-black-sea>>, 10.01.2021.
3. 14 US companies urge for action on GPS interference // Safety4Sea [Электронный ресурс]: <<https://safety4sea.com/14-us-companies-urge-for-action-on-gps-interference/>>, 10.01.2021.
4. Guidelines for Autonomous Shipping: Guidance Note NI 641 DT R01 E. Bureau Veritas, 2019. Oct.
5. Hambling D. What would the world do without GPS // BBC Future [Электронный ресурс]: <<https://www.bbc.com/future/article/20201002-would-the-world-cope-without-gps-satellite-navigation>>, 10.01.2021.
6. Комплекс радиопомех приемникам спутниковых РНС GPS, ГЛОНАСС, GALILEO, BeiDou « Оптима-3.2» [Электронный ресурс]: <<https://bsvt.by/ru/protivovozdushnaya-oborona/sredstva-reb-i-rer/kompleks-radiopomeh-priemnikom-sputnikovyh-rns-gps-glonass-galileo-beidou-optima-32>>, 10.01.2021.
7. Милерис Л. Л., Мулина Е. В., Сидоренко В. С., Кириллов Н. О., Ермаков С. В. Обоснование необходимости использования на морских судах астронавигационных систем // Вестн. молодежной науки. 2020. № 1 (23).
8. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года (текст, измененный Протоколом 1988 года к ней, с поправками). СПб: ЗАО „ЦНИИМФ“, 2008. 984 с.
9. Козик С. В., Сибилев В. А., Алцыбеев Г. О. Концепция навигационного прибора „Электронный секстант“ // Морской Вестник. 2020. № 4 (76). С. 116—118.
10. Волегов Д. Б., Гусев В. В., Юрин Д. В. Обнаружение прямых линий на изображениях на основе преобразования Хартгли. Быстрое преобразование Хафа // Intern. Conf. Graphicon, Novosibirsk, Russia. 2006.
11. Гончаров В. А. Методы оптимизации: Учеб. пособие М.: Моск. гос. ин-т электронной техники, 2009. 188 с.

**Сведения об авторах**

- Сергей Викторович Козик** — канд. воен. наук, доцент; ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова, кафедра судоходства на внутренних водных путях; E-mail: Koserbik@mail.ru
- Станислав Андреевич Захаров** — СПбГМТУ, кафедра проектирования и технологии производства морских подводных аппаратов и роботов; ст. преподаватель; E-mail: zacharowsa1985@yandex.ru
- Вадим Алексеевич Сибилев** — аспирант; ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, кафедра судоходства на внутренних водных путях; E-mail: Sibilev01@mail.ru

Поступила в редакцию  
23.01.2021 г.

**Ссылка для цитирования:** 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.

**METHOD FOR MEASURING A CELESTIAL BODY HEIGHT  
FROM THE SKY DIGITAL PHOTOGRAPH**

**S. V. Kozik<sup>1</sup>, S. A. Zakharov<sup>2</sup>, V. A. Sibilev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
198035, St. Petersburg, Russia  
E-mail: Koserbik@mail.ru

<sup>2</sup>St. Petersburg State Marine Technical University,  
190121, St. Petersburg, Russia

The widespread use of global navigation satellite systems (GNSS) has made possible to identify the dangers of its use. In the merchant shipping GNSS are only positioning device and any its interruptions becomes high threat to the safety of navigation. A solution to the problem by using celestial navigation is proposed. A new method for measuring the height of a celestial body based on processing of a digital pho-

tograph of the sky is considered. Mathematical models and computational algorithms for photos processing are described, and the results of their testing with imitation examples are presented..

**Keywords:** navigation safety, celestial navigation, Hough transform, digital photography, raster image, horizon, star height, identification

#### REFERENCES

1. Yakushenko S.A. *Scientific Session of SUAI*, St. Petersburg, April 08-12, 2019, pp. 224-226. (in Russ.)
2. Goward D. *GPS Spoofing Attack in Black Sea* / The Maritime Executive, <https://www.maritime-executive.com/editorials/mass-gps-spoofing-attack-in-black-sea>.
3. *14 US companies urge for action on GPS interference* / Safety4Sea, <https://safety4sea.com/14-us-companies-urge-for-action-on-gps-interference/>.
4. *Guidelines for Autonomous Shipping* / Guidance Note NI 641 DT R01 E, Bureau Veritas, October 2019. 38 p.
5. Hambling D. *What would the world do without GPS* / BBC Future, <https://www.bbc.com/future/article/20201002-would-the-world-cope-without-gps-satellite-navigation>.
6. <https://bsvt.by/ru/protivovozdushnaya-oborona/sredstva-reb-i-rer/kompleks-radiopomeh-priemnikam-sputnikovyh-rns-gps-glonass-galileo-beidou-optima-32>. (in Russ.)
7. Mileris L.L., Mulina E.V., Sidorenko V.S., Kirillov N.O., Ermakov S.V. *Vestnik molodezhnoy nauki*, 2020, no. 1(23). (in Russ.)
8. *Mezhdunarodnaya konventsiya po okhrane chelovecheskoy zhizni na more 1974 goda (tekst, izmenenny Protokolom 1988 goda k ney, s popravkami* (International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974 (text as amended by the 1988 Protocol thereto, as amended)), St. Petersburg, 2008, 984 p. (in Russ.)
9. Kozik S.V., Sibilev V.A., Altsybeyev G.O. *Morskoy Vestnik*, 2020, no. 4(76), pp. 116–118. (in Russ.)
10. Volegov D.B., Gusev V.V., Yurin D.V. *International Conference Graphicon*, July 1–5, 2006, Novosibirsk, 2006. (in Russ.)
11. Goncharov V.A. *Metody optimizatsii* (Optimization Methods), Moscow, 2009, 188 p.

#### Data on authors

- Sergey V. Kozik** — PhD, Associate Professor; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Department of Inland Waterways Navigation; E-mail: Koserbik@mail.ru
- Stanislav A. Zakharov** — St. Petersburg State Marine Technical University, Department of Design and Technology of Production of Marine Submersibles and Robots; Senior Lecturer; E-mail: zacharowsa1985@yandex.ru
- Vadim A. Sibilev** — Post-Graduate Student; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Department of Inland Waterways Navigation; E-mail: Sibilev01@mail.ru

**For citation:** Kozik S. V., Zakharov S. A., Sibilev V. A. Method for measuring a celestial body height from the sky digital photograph. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 5. P. 412–421 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-5-412-421