ПОСТРОЕНИЕ ГРАНИЦ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ АВТОПИЛОТА НАДВОДНОГО РОБОТА ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

А.Н. Греков^{1,2}, Ю.Е. Шишкин¹, С.С. Пелюшенко¹, А.С. Маврин^{1,2}

¹Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

²Севастопольский государственный университет,

РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

E-mail: iurii.e.shishkin@gmail.com

Предложены алгоритм и программа обнаружения границ водных объектов для модуля автопилота надводного робота. Применен способ обнаружения водных объектов на спутниковых картах методом нахождения цвета в пространстве HSV, с использованием эрозии и дилатации – методов цифровой фильтрации изображений. Исследованы следующие операторы построения контуров на изображении: операторы Собеля, Робертса, Превитта и из них для данного модуля выбран тот, который точнее выделяет границу. Создан алгоритм вычисления GPS-координат контуров. Предложенный алгоритм позволяет сохранять результат в формате, пригодном для модуля автопилота надводного робота.

Ключевые слова: Водные тела, спутниковые карты, обнаружение границ, контроль природной среды, эрозия, дилатация, операторы Собеля, Робертса, Превитта, GPS-координаты.

Поступила в редакцию: 09.08.2021.

Введение. За последние годы технологическое развитие и ускорившийся темп роста населения привели к увеличению антропогенной нагрузки и повышению уровня природопользования человеком, что послужило причиной климатических изменений. Это приводит к значимым негативным тенденциям изменения состояния природной среды, гидросферы и атмосферы. Одними из ключевых системообразующих элементов экосистемы являются поверхностные водные объекты: реки, озера, моря и океаны. Вода является важным элементом для существования различных экосистем, в том числе и для существования человека. Вследствие этого автоматизированный мониторинг водных объектов является важным процессом в научных и практических исследованиях [1].

Фактически, в настоящее время отсутствует постоянный мониторинг водных объектов, который фиксировал бы изменения их физико-химических параметров и площадей. Для автоматизации процессов проведения такого мониторинга эффективным и перспективным направлением является использование беспилотного надводного робота [2–4]. При этом задача автоматизации процесса

построения карт для автопилота такого робота исчерпывающе и в полном объеме не разрешена, известны попытки ее решения на основе ансамблевого, вероятностного и сверточного алгоритмов [5, 6].

В нашей работе решается задача построения карт для автопилота надводного робота по спутниковым снимкам местности с использованием методов компьютерного зрения.

Для реализации метода построения границ для автопилота существует множество различных алгоритмов, обладающих различной эффективностью для уникальных целевых задач [1, 7, 8]. В настоящей работе мы исследуем эффективность методов построения контуров водных объектов на спутниковых изображениях с использованием ряда операторов [9]:

- оператор Собеля,
- оператор Робертса,
- оператор Превитта.

Для обнаружения водных объектов в литературе предложены подходы:

- Методы многоспектральных индексов – NDWI (нормализованный разностный водный индекс, normal different water index), MNDWI (модифицирован-

ный нормализованный разностный водный индекс, modified normal different water index), AWEIsh/nsh (автоматизированный индекс водообнаружения с тенью/без тени, automated water extraction index shadow/not shadow variants), NSVDI (нормализованный разностный индекс значения насыщенности, normalized saturation-value difference index) [1, 10].

- Морфологические методы обнаружения [11, 12].

- Методы обнаружения ML classifier [11].

- Особый алгоритм обнаружения, использующий методы индексов и морфологические методы [12].

- Метод SBDS (однополосный срез плотности, single-band density slicing) [13].

Решение данной задачи рассматривалось многими авторами. В частности, в работе [11] исследуются морфологический метод обнаружения (MM) и методы обнаружения ML classifier, и результат анализа сравнивается с результатами методов на основе водных индексов (NDWI, MNDWI, AWEIsh/nsh). В результате MM признается лучшим в большинстве случаев.

В работе [12] предлагается алгоритм обнаружения водных объектов на изображении, использующий методы водных индексов (NDWI, MNDWI и NSVDI) и морфологические методы обнаружения.

В работе [13] исследуются методы обнаружения водных тел на базе NDWI, MNDWI, AWEIsh/nsh методов многоспектральных индексов с добавлением методов определения порогов и кластеризации для увеличения точности обнаружения. Признается повышенная точность метода для обнаружения объектов с повышенной яркостью.

В работе [10] предлагается автоматизированный метод извлечения рек и озер путем комбинирования водных индексов с методами цифровой обработки изображений, причем отмечается более высокая эффективность данного решения для задачи обнаружения водных объектов по сравнению с методами на основе индексов (NDWI, MNDWI, AWEIsh/nsh), благодаря лучшему обнаружению смешанных пикселей и зашумления.

В работе [13] исследуются особенности метода SBDS для изображения Landsat TM (Thematic Mapper). Признается, что карты Landsat предпочтительнее спутниковых снимков при обнаружении объектов, с использованием инструментов MatLab и ENVI на изображении Landsat и правильным выбором полосы можно достичь отличного результата при картировании водного объекта и его отделении от окружающей суши.

В нашей работе для обработки изображения использован метод обнаружения определенных цветов на HSV-изображении с заранее определенной цветовой палитрой воды. Далее на обработанном изображении мы воспользовались методами удаления шумов, эрозии, дилатации, выделения контуров с помощью оператора Собеля. После чего, для обнаружения GPS-координат контура, воспользовались специально разработанным алгоритмом, описанными в данной статье.

Для разработки алгоритма использовано следующее программное обеспечение: SASPlanet [14] и программа MATLAB Rb2017 [15]. Для получения изображения фрагмента карты используется программа SASPlanet, так как она является свободно распространяемой. Программа MATLAB была выбрана, так как в ней уже реализовали функции построения границ с помощью оператора Собеля.

Алгоритм обнаружения границы водных объектов. Представляет собой последовательность из 9 этапов, осуществляющих полный комплекс мер, направленных на решение целевой задачи от загрузки спутниковых изображений и выделения границ водных объектов до сохранения результатов в виде, пригодном для использования в модуле автопилота.

Этап 1. Получение изображения. Входным изображением является фрагмент карты. Разработанная программа использует фрагмент изображения, получаемый оператором из программы SASPlanet, раздела спутниковых Яндекс-карт. Для функционирования алгоритма необходимо указать целевую область исследования. Пример приводится на рис. 1.

Рис. 1. Фрагмент карты. Красная точка – начальная точка выделения. Выделенная область является исходным изображением примера выполнения исследуемого алгоритма

Fig. 1. Map fragment. The red point is the starting point of the selection. The highlighted area is the initial example of the execution of the algorithm under study

Этап 2. Осуществление бинаризации изображения. Осуществляется преобразование исходного изображения в бинарное изображение, элементы которого могут принимать только два значения – бинаризация.

Отличительной особенностью данного алгоритма является преобразование изображения из цветовой модели RGB в цветовую модель HSV перед бинаризацией.

Для перевода RGB в HSV используются соотношения (1)–(3):

$$H = \begin{cases} 60 \times \frac{G - B}{MAX - MIN} + 0, \text{ если } MAX = R \text{ и } G \geq B \\ 60 \times \frac{G - B}{MAX - MIN} + 360, \text{ если } MAX = R \text{ и } G < B \\ 60 \times \frac{B - R}{MAX - MIN} + 120, \text{ если } MAX = G \\ 60 \times \frac{R - G}{MAX - MIN} + 240, \text{ если } MAX = B \end{cases} \quad (1)$$

$$S = \begin{cases} 0 \text{ если } MAX = 0; \\ 1 - \frac{MIN}{MAX}, \text{ иначе} \end{cases} \quad (2)$$

$$V = MAX, \quad (3)$$

где R,G,B – red, green, blue – параметры модели RGB (цветовая модель, описывающая способ кодирования цвета для цветовоспроизведения с помощью трех цветов, которые принято называть основными: red, green, blue – красный, зеленый, синий); HSV – hue, saturation, value – параметры модели HSV (цветовая модель, в которой координатами цвета являются: hue – цветовой тон, saturation – насыщенность (чем больше этот параметр, тем насыщенней цвет, а чем ближе этот параметр к нулю, тем ближе цвет к нейтральному серому), value – значение цвета).

$H \in [0, 360], S, V, R, G, B \in [0, 1]$, Max – максимальное значение из R, G, и B, MIN – минимальное значение, которое не определено, если MAX=MIN.

В среде MatLab данный перевод осуществлен функцией rgb2hsv.

После получения изображения в модели HSV, строится его маска – изображение, каждый пиксель которого может иметь только одно из двух значений: 0 (логическая ложь) и 1 (логическая истина); на изображении, 0 строится как черный цвет, а 1 – как белый цвет. Стоит заметить, что исходный массив, описывающий изображение состоит из 3 столбцов – описывающих 3 координаты цветовой модели HSV каждого пикселя. Массив же, описывающий маску, состоит из 1 столбца – описывающего его истинность/ложность. Для построения маски необходимо условие, на которое будет проверяться каждый пиксель исходного изображения, и при соответствии пикселя условию в маске он будет приравнен 1, а при несоответствии – к 0. Так как задачей является найти водные объекты, то условием является 3 диапазона значений для каждой из координат цветовой модели, вместе описывающие цветовую гамму воды (данные диапазоны были выбраны с помощью подпрограммы MatLab – Color Threshholder):

– диапазон значения Hue $[0.399:0.78]$ ($133^\circ - 260^\circ$);

– диапазон значения Saturation $[0.32:1]$ (32% – 100%);

– диапазон значения Value $[0.2:1]$ (20% – 100%).

Следовательно, для построения маски изображения необходимо координаты каждого пикселя проверить на принадлежность данным диапазонам (т.е. для каждого пикселя проходит проверка: если все три координаты пикселя принадлежат соответствующим диапазонам, то соответствующий пикселю элемент в массиве, описывающем маску изображения, присваивается 1, иначе 0). В итоге получается бинарное изображение, где белым выделены водные объекты, а черным – все остальное.

На рис. 2 можно увидеть результат работы метода – наложение маски на исходное изображение. По рисунку можно проверить корректность обнаружения водных объектов методом выбора цветов.

Рис. 2. Результат работы метода выбора цвета в цветовом пространстве HSV

Fig. 2. The result of the work of the color selection method in the HSV color space

Этап 3. Удаление мелких площадей. Операция дилатации направлена на увеличение адекватности выделения области изображения, расширяя его пиксели и тем самым способствуя объедине-

нию областей изображения, которые были разделены в результате шума и др.

Изображение после фильтрации становится светлее и визуально более размытым. То есть темные детали ослабляются или вообще исчезают, что зависит от соотношения их размеров и яркостей с заданными параметрами фильтра [16].

Это операция определения локального максимума по некоторой окрестности, которая задается структурообразующим элементом. Действие операции дилатации по отношению к исследуемому примеру можно наблюдать на рис. 3.

Рис. 3. Применение операции дилатации
Fig. 3. Application of the dilatation operation

Операция эрозии – наряду с преобразованиями дилатации одна из основных операций математической морфологии. Это операция, обратная операции дилатации. Эрозия используется для уменьшения области изображения, приводя к истончению пикселей, расширению и усилению светлых мест на изображении. Суть данного преобразования состоит в том, что нежелательные вкрапления и шумы размываются, а большие и, соответственно, значимые участки изображения изменениям не подвергаются.

В отличие от дилатации эта операция определяет локальный минимум по некоторой окрестности, которая задается структурообразующим элементом.

Пусть задан структурный элемент B . Эрозией множества X называется мно-

жество Y , состоящее из тех элементов исходного множества X , для которых выполняется условие

$$Y = X \ominus B = \{x : B_x \leq X\}. \quad (4)$$

Другими словами, если $x \in X$, $b \in B$, то в множество включаются такие элементы x , для которых при всех b выполняется условие

$$x + x \leq b. \quad (5)$$

Эрозию можно трактовать следующим образом: помещаем центр структурного элемента в точку $x \in X$, если элемент полностью принадлежит X , тогда точка $x \in Y$, где Y – множество подобных точек. Очевидно, что после этой операции множество Y меньше X . Действие операции проиллюстрировано на рис. 4 [16].

Рис. 4. Пример операции эрозии
Fig. 4. An example of an erosion operation

Действие операции эрозии по отношению к исследуемому примеру можно наблюдать на рис. 5.

Рис. 5. Применение операции эрозии
Fig. 5. Application of the erosion operation

Этап 4. Применение операторов выделения контуров. Процесс выделения контуров основан на простейшем перемещении маски фильтра от точки к точке изображения; в каждой точке (x, y) , отклик фильтра вычисляется с использованием предварительно заданных связей. В случае линейной пространственной фильтрации отклик задается суммой произведения коэффициентов фильтра на соответствующие значения пикселей в области, покрытой маской фильтра. Для маски 3×3 элемента результат (отклик) R линейной фильтрации в точке (x, y) изображения составит:

$$R = w(-1, -1)f(x-1, y-1) + w(-1, 0)f(x-1, y) + \dots + w(0, 0)f(x, y) + \dots + w(0, 0)f(x, y) + \dots + w(1, 0)f(x+1, y) + w(1, 1)f(x+1, y+1). \quad (6)$$

Каждый элемент результирующей матрицы есть сумма произведений коэффициентов маски на значения пикселей непосредственно под маской. В частности заметим, что коэффициент $w(0, 0)$ стоит при значении $f(x, y)$, указывая тем самым, что маска центрирована в точке (x, y) .

При обнаружении перепадов яркости используются дискретные аналоги производных первого и второго порядка. Для простоты изложения будут рассмотрены одномерные производные. Первая производная одномерной функции $f(x)$ определяется как разность значений соседних элементов:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = f(x+1) - f(x). \quad (7)$$

Здесь использована запись в виде частной производной для того, чтобы сохранить те же обозначения в случае двух переменных $f(x, y)$, где придется иметь дело с частными производными по двум пространственным осям. Использование частной производной не меняет существа рассмотрения.

Аналогично, вторая производная определяется как разность соседних значений первой производной

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = f(x+1) + f(x-1) - 2f(x). \quad (8)$$

Так как происходит обработка изображения, которое является двумерной матрицей, рассмотрим двухмерный случай. Градиент является векторной функцией с компонентами $\frac{\partial f}{\partial x}$ и $\frac{\partial f}{\partial y}$,

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy. \quad (9)$$

Вычисление первой производной цифрового изображения основано на различных дискретных приближениях двумерного градиента. По определению, градиент изображения $f(x,y)$ в точке (x,y) – это вектор вида

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Направление вектора градиента совпадает с направлением максимальной скорости изменения функции f в точке (x,y) . Важную роль при обнаружении контуров играет модуль этого вектора, который обозначается $|\nabla f|$ и равен:

$$|\nabla f| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}. \quad (11)$$

Эта величина равна значению максимальной скорости изменения функции f в точке (x,y) , причем максимум достигается в направлении вектора ∇f . Величину $|\nabla f|$ также часто называют градиентом.

Направление вектора градиента также является важной характеристикой. Обозначим $\alpha(x,y)$ угол между направлением вектора ∇f в точке (x,y) и осью x . Тогда:

$$\alpha(x, y) = \arctg\left(\frac{G_y}{G_x}\right). \quad (12)$$

Отсюда легко найти направление контура в точке (x,y) , которое перпендикулярно направлению вектора градиента в этой точке. А вычислить градиент изображения можно, вычислив величины частных производных $\frac{\partial f}{\partial x}$ и $\frac{\partial f}{\partial y}$ для каждой точки [17].

Оператор Собеля. Оператор Собеля использует область изображения 3×3 , принцип заключается в использовании весовых коэффициентов для средних элементов:

$$G_x = (z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3), \quad (13)$$

$$G_y = (z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_5). \quad (14)$$

Это увеличенное значение используется для уменьшения эффекта сглаживания за счет придания большего веса средним точкам [16].

Маски, используемые оператором Собеля, имеют вид матриц

$$\begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Пусть область 3×3 , показанная ниже, представляет собой значения яркости в окрестности некоторого элемента изображения

$$\begin{bmatrix} z_1 & z_2 & z_3 \\ z_4 & z_5 & z_6 \\ z_7 & z_8 & z_9 \end{bmatrix},$$

тогда результат применения оператора Собеля показан на рис. 6.

Рис. 6. Пример применения оператора Собеля выделения контуров
Fig. 6. An example of using the Sobel operator for edge selection

Оператор Робертса. Один из простейших способов нахождения первых частных производных в точке состоит в применении следующего перекрестного градиентного оператора Робертса:

$$G_x = (z_9 - z_5), \quad (15)$$

$$G_y = (z_8 - z_6). \quad (16)$$

Эти производные могут быть реализованы путем обработки всего изображения с помощью оператора, описываемого масками, используя процедуру фильтрации, аналогичную описанной выше

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Используя оператор на входном изображении. Реализация масок размерами 2x2 не очень удобна, т.к. у них нет четко выраженного центрального элемента, что существенно отражается на результате выполнения фильтрации. Но этот недостаток компенсируется очень полезным свойством данного алгоритма – высокую скорость обработки изображения [17].

Результат применения оператора Робертса показан на рис. 7.

Рис. 7. Пример применения оператора Робертса выделения контуров

Fig. 7. An example of using the Roberts operator for edge selection

Оператор Превитта. Оператор Превитта, также как и оператор Робертса, оперирует с областью изображения 3x3, только использование такой маски задается другими выражениями:

$$G_x = (z_7 + z_8 + z_9) - (z_1 + z_2 + z_3), \quad (17)$$

$$G_y = (z_3 + z_6 + z_9) - (z_1 + z_4 + z_7). \quad (18)$$

В этих формулах разность между суммами по верхней и нижней строкам окрестности 3x3 является приближенным значением производной по оси x, а разность между суммами по первому и последнему столбцам этой окрестности – производной по оси y. Для реализации этих формул используется оператор, описываемый масками, который называется оператором Превитта [17].

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Результат применения оператора Превитта показан на рис. 8.

В ходе проведенного эксперимента наилучшим образом по критерию четкости и детализации изображения при выделении контуров показал себя оператор Собеля, результат применения которого продемонстрирован на рис. 6.

Рис. 8. Пример применения оператора Превитта выделения контуров

Fig. 8. An example of using the Prewitt operator for edge selection

Так как алгоритм используется для надводного робота, который будет выполнять функции только в закрытых водоемах и в прибрежных водах, была использована часть, удаляющая пустое водное пространство для выделения закрытых водоемов и прибрежных вод.

Этап 5. Загрузка данных из файла привязки. Для вычисления GPS-координат границы разработан способ вычисления таких координат для произвольной точки изображения, для этого осуществляется связь фрагмента карты с географическими координатами.

Программа SASPlanet позволяет вместе с фрагментом карты получить его файл привязки (текстовый файл, содержащий опорные точки, описывающие трансформацию координат). Данный файл используется для загрузки из файла привязки географических координат опорных точек фрагмента карты.

Для увеличения быстродействия программы реализован проблемно-ориентированный алгоритм поиска координат в файле привязки. Реализован типовой способ создания файла привязки программы SASPlanet и написан код загрузки строк, содержащих данные опорных точек, а также преобразования этих данных в пригодную для дальнейшей работы форму. Разрабатываемая программа предназначена для использования с фрагментами карт, скачанных программой SASPlanet.

Этап 6. Разметка GPS-координатной площади. По загруженным координатам из файла привязки, т.е. теперь мы имеем пиксельные координаты и соответствующим им географическим координатам вычисляется масштаб 1 пикселя (деления пиксельной координатной сетки) в географических минутах. Однако, так как в географических координатах минута широты и долготы различны, то масштабы 1 пикселя на оси широты и 1 пикселя на оси долготы вычисляются отдельно.

На рис. 9, 10 схематично показаны координатные сетки, используемые в работе и деления осей.

Рис. 9. Координатные сетки

Fig. 9. Coordinate grids

Рис. 10. Деления координатных осей

Fig. 10. Divisions of the coordinate axes

Для вычисления цен делений был построен и реализован в виде программы следующий алгоритм:

1) Переводим географические координаты углов координатной сетки в минуты: $C = D * 60 + M$, где D (degrees) – градусы географических координат точки, M (minutes) – минуты географических координат точки, C (coordinates) – итоговые географические координаты точки в минутах.

2) Находим расстояние между 2 точками на координатной линии в географических минутах и в пикселях

$$Cd = |K2 - K1|; Pd = |P2 - P1|, \quad (19)$$

где Cd – расстояние между точками в географических минутах, Pd – расстояние между точками в пикселях, $K1$ и $K2$ – географические координаты 1 и 2 точек в минутах, $P1$ и $P2$ – координаты 1 и 2 точек в пикселях.

3) Находим цену 1 пикселя в географических минутах: $DV = \frac{Cd}{Pd}$, где DV (division value) – цена деления.

Итоговая формула имеет вид:

$$DV = \frac{|(D2 * 60 + M2) - (D1 * 60 + M1)|}{|P2 - P1|}, \quad (20)$$

где D1, D2 – градусы географических координат точек 1 и 2; M1, M2 – минуты географических координат точек 1 и 2; P1 и P2 – координаты 1 и 2 точек в пикселях; DV – искомая цена деления.

С помощью данного алгоритма можно найти цену деления по оси широты и цену деления по оси долготы (DV_s и DV_d соответственно).

Этап 7. Получение GPS-координат границы. После получения цен делений осей пиксельной координатной сетки появилась возможность нахождения географических координат границы (контура) водного объекта. Так как граница представлена массивом, состоящим из пиксельных координат точек, составляющих границу, то вычисление географических координат границы состоит из вычисления географических координат каждой точки этого массива.

Для вычисления географических координат точки используются соотношения:

$$Sh = Dsz * 60 + Ms - DVs * Y, \quad (21)$$

$$Dol = Ddz * 60 + Md + DVd * X. \quad (22)$$

где Sh – искомая широта точки, Dol – искомая долгота точки; Dsz – градусы широты начала координат (точки, имеющей пиксельные координаты (0,0)), Ms – минуты широты начала координат; Ddz – градусы долготы начала координат, Md – минуты долготы начала координат; DV_s – цена деления по оси широты, DV_d – цена деления по оси долготы; Y – пиксельные координаты точки по оси широты, X – пиксельные координаты точки по оси долготы.

Данные формулы справедливы в случае, когда точка начала координат находится в верхнем левом углу фрагмента карты, т.е. имеет вид рис. 11.

Рис. 11. Положение координатной сетки
Fig. 11. Position of the coordinate grid

где Тнк – точка начала координат, Тдк – вторая точка по линии долготы, Тшк – вторая точка по линии широты.

Этап 8. Нахождение площади и периметра. С помощью функции regionprops измеряются площади и периметры водных объектов в пикселях.

Затем находится соотношение километр/пиксель. Для этого найденная ранее DV_s – цена деления по оси широты (т.е. отношение географической минуты к пикселю) умножается на коэффициент перевода минут в километры.

$KP = 1.852 * DVs$, где KP – значение отношения километр/пиксель.

После чего найденные площади и периметры переводятся в километры с помощью найденного отношения.

$$AK = AP * KP, \quad (23)$$

$$PerK = PerP * KP. \quad (24)$$

где AP – площадь в пикселях, PerP – периметр в пикселях, AK – искомая площадь в км, PerK – искомый периметр в км.

Этап 9. Сохранение результата. Результат работы программы записывается в 3 файла. В первый файл формата *.xls записываются площадь и периметр водных объектов. В другие 2 файла форматов *.xls и *.txt записывается информация о GPS-координатах точек, составляющих контуры водоемов.

Для записи информация группируется в таблицы, после чего записывается в файлы с помощью функции writable.

Заключение. В данной статье приведен анализ различных способов обработки изображения, на основании которого предложен метод обнаружения границ для автопилота надводного робота. Для этого используется метод обнаружения определенных цветов на HSV-изображении с заранее определенной цветовой палитрой воды. Данный метод является наиболее подходящим для построения карт местности по спутниковым снимкам за счет своей скорости обработки данных и высокого качества решения сопоставимого с выполняемым вручную.

Для определения водного пространства наилучшими и наиболее универ-

сальными считаются методы многоспектральных водных индексов. Однако для успешного применения этих методов требуется большой объем вычислительных ресурсов, что является неприемлемым для автопилота из-за высоких требований к оперативности принятия решений. Поэтому был выбран метод определения цвета в пространстве HSV, так как все расчеты для этого метода должны быть сделаны единожды, во время определения цветовой палитры водных объектов. После чего используется только сравнение координат с файлом границ, без дополнительных расчетов, что повышает скорость определения водных тел.

Для улучшения качества обработки изображения применялись методы удаления шумов, эрозии, дилатации, выделения контуров.

В ходе исследований для реализации алгоритма выделения контура для автопилота был выбран оператор Собеля. Данный оператор был признан более точным, чем операторы Робертса и Превитта. В ходе исследований было обнаружено, что на практике оператор Собеля лучше и точнее обнаруживает границу, при меньших затратах времени, нежели альтернативные варианты.

Для осуществления возможности проверки адекватности использованного алгоритма в программе был реализован способ нахождения площади водных объектов. После этого используется разработанный алгоритм обнаружения GPS-координат контуров водных объектов. Положительной особенностью данного алгоритма является его высокая точность при невысоких требованиях к вычислительным ресурсам. Результатом выполнения алгоритма является файл границ водного объекта в формате, пригодном для использования автопилотом надводного робота.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополя в рамках научного проекта № 18-48-920018 и в рамках государственного задания Института природно-технических систем № АААА-А19-119040590054-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Катаев М.Ю., Бекеров А.А. Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2017. Т. 20, № 4. С. 105–108. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-105-108
2. Шишкин Ю.Е., Греков А.Н. Концепция интеллектуальной системы автоматизированного экологического мониторинга на базе малогабаритных автономных роботов // Системы контроля окружающей среды. 2018. № 14 (34). С. 63–69. DOI: 10.33075/2220-5861-2018-4-63-69
3. Shishkin I.E., Grekov A.N., Nikishin V.V. Intelligent Decision Support System for Detection of Anomalies and Unmanned Surface Vehicle Inertial Navigation Correction // Proceedings – 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon. 2019. P. 1–6. DOI:10.1109/rusautocon.2019.8867601
4. Shishkin I.E., Grekov A.N., Grekov N.A. A multi-model system of intelligent unmanned surface vehicles for environmental monitoring // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. 2019. С. 1–6. DOI:10.1109/FarEastCon.2019.8934037
5. Шишкин Ю.Е. Ансамблевый подход построения карт по спутниковым изображениям для проведения мониторинговых наблюдений морских акваторий // Системы контроля окружающей среды – 2020: тезисы докладов Междунар. науч.-техн. конф. 2020. С. 23.
6. Баландин Д.В., Коган М.М. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. М., 2007. 280 с.
7. Алгазинов Э.К., Сирота А.А. Анализ и компьютерное моделирование информационных процессов и систем: Прикладная информатика. М.: Диалог-МИФИ. 2009. 416 с.
8. Томакова Р.А., Филист С.А. Метод обработки и анализа сложноструктурируемых изображений на основе встроенных функций среды matlab // Вестник

Забайкальского государственного университета. 2012. № 1 (80). С. 3–9.

9. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / ред. Р. Гонсалес, Р. Вудс. М.: Техносфера, 2009. 1104 с.

10. Hao Jiang, Min Feng, Yunqiang Zhu An Automated Method for Extracting Rivers and Lakes from Landsat Imagery // Remote Sens. 2014. № 6. P. 5067–5089. DOI:10.3390/rs6065067

11. Rishikeshan C.A., Ramesh H. An automated mathematical morphology driven algorithm for water body extraction from remotely sensed images // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2018. Vol. 146. P. 11–21.

12. AlMaazmi Alya. Water bodies extraction from high resolution satellite images using water indices and optimal threshold // Proc. SPIE No. 10004, Image and Signal Processing for Remote Sensing, 18 October 2016. Vol. XXII, No. 100041J.

13. Ranjay Shrestha, Liping Di. Land/Water Detection and Delineation with Landsat Data using MatLab/ENVI // Agro-

Geoinformatics, 2013 Second International Conference on DOI:10.1109/Argo-Geoinformatics.2013.6621909

14. Пантелейкина Т.П., Москалева С.А. Использование программных средств SasPlanet и GoogleEarth в образовательном процессе // Развитие регионов в XXI веке: сборник материалов I Междунар. науч. конф. Северо-Осетинский гос. университет им. К.Л. Хетагурова. 2013. С. 374–379.

15. Томакова Р.А., Филист С.А. Метод обработки и анализа сложноструктурируемых изображений на основе встроенных функций среды matlab // Вестник Забайкальского государственного университета. 2012. № 1 (80). С. 3–9.

16. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1101 с.

17. Алгоритмы выделения контуров на изображении // электронный ресурс // <https://habr.com/ru/post/114452/> (дата обращения: 18.06.2021).

CONSTRUCTION OF OBJECT BOUNDARIES FOR THE AUTOPILOT OF A SURFACE ROBOT FROM SATELLITE IMAGES USING COMPUTER VISION METHODS

A.N. Grekov^{1,2}, Y.E. Shishkin¹, S.S. Peliushenko¹, A.S. Mavrin^{1,2}

¹Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

²Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

An algorithm and a program for detecting the boundaries of water bodies for the autopilot module of a surface robot are proposed. A method for detecting water objects on satellite maps by the method of finding a color in the HSV color space, using erosion, dilation - methods of digital image filtering is applied. The following operators for constructing contours on the image are investigated: the operators of Sobel, Roberts, Prewitt, and from them the one that detects the boundary more accurately is selected for this module. An algorithm for calculating the GPS coordinates of the contours is created. The proposed algorithm allows saving the result in a format suitable for the surface robot autopilot module.

Keywords: Water bodies, satellite maps, boundaries detection, environmental control, erosion, dilatation, Sobel, Roberts, Prewitt operators, GPS coordinates.

REFERENCES

1. Kataev M.Y., and Bekerov A.A. Metodyka obnaruzheniya vodnykh ob'ektov po mnogostupennatym sputnikovym izmereniyam (Method for detecting water bodies using multispectral satellite measurements). *Doklady tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2017, Vol. 20, No. 4, pp. 105–108. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-105-108

2. Shishkin Ju.E., and Grekov A.N. Konceptiya intellektual'noy sistemy avtomatizirovannogo jekologicheskogo monitoringa baze malogabaritnykh avtonomnykh robotov Sistemy kontrolja okruzhajushhej sredy. (The concept of an intelligent automated environmental monitoring system based on small-

sized autonomous robots). *Monitoring systems of environment*, 2018, No. 14 (34), pp. 63–69. DOI: 10.33075/2220-5861-2018-4-63-69

3. Shishkin I.E., Grekov A.N., and Nikishin V.V. Intellektual'naja sistema podderzhki prinjatija reshenij dlja obnaruzhenija anomalij i korrekcii inercial'noj navigacii bespilotnyh nazemnyh transportnyh sredstv (Intelligent Decision Support System for Detection of Anomalies and Unmanned Surface Vehicle Inertial Navigation Correction). *Materialy Mezhdunarodnoj Rossijskoj konferencii po avtomatizacii 2019 goda, RusAutoCon 2019*, Vol. 1, pp. 1–6. DOI:10.1109/rusautocon.2019.8867601

4. Shishkin I.E., Grekov A.N., and Grekov N.A. A multi-model system of intelligent unmanned surface vehicles for environmental monitoring. *Mezhdunarodnaja mnogoprofil'naja konferencija po promyshlennomu inzhiniringu i sovremennym tehnologijam, FarEastCon 2019*, pp. 1–6. DOI:10.1109/FarEastCon.2019.8934037

5. Shishkin Yu.E. Kompleksnyj podhod k postroeniju kart na osnove sputnikovyh izobrazhenij dlja provedenija monitoringovyh nabljudenij za morskoy akvatoriej (An ensemble approach to constructing maps based on satellite images for conducting monitoring observations of marine aquatics). *Monitoring systems of environment – 2020*, tezisy dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, 2020, p. 23.

6. Balandin D.V., and Kogan M.M. Sintez zakonov upravlenija na osnove linejnyh matrichnyh neravenstv (Synthesis of control laws based on linear matrix inequalities). Moscow. 2007, 280 p.

7. Algazinov E.K., and Sirota A.A. Analiz i komp'yuternoe modelirovanie in-formacionnyh processov i sistem: Prikladnaja informatika (Analysis and computer modeling of information processes and systems: Applied informatics). Moscow: Dialog-MEPhI. 2009, 416 p.

8. Tomakova R.A., and Filist S.A. Metod obrabotki i analiza slozhnostrukturiruemyh izobrazhenij na osnove vstroennyh funkcij sredy matlab (Method of processing and analysis of complex structured images based on the built-in functions of the matlab environment). *Bulletin of the Trans-Baikal State University*, 2012, No. 1 (80), pp. 3–9.

9. Gonzalez R. Cifrovaja obrabotka izobrazhenij (Digital image processing). Moscow: Technosphere, 2009. 1104 p.

10. Hao Jiang, Min Feng, and Yunqiang Zhu. An Automated Method for Extracting Rivers and Lakes from Landsat Imagery (An Automated Method for Extracting Rivers and Lakes from Landsat Imagery). *Remote Sens.*, 2014, No. 6, pp. 5067–5089. DOI:10.3390/rs6065067

11. Rishikeshan C.A., and Ramesh H. An automated mathematical morphology driven algorithm for water body extraction from remotely sensed images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, Vol. 146, pp. 11–21.

12. AlMaazmi Alya. Water bodies extraction from high resolution satellite images using water indices and optimal threshold. Proc. SPIE No. 10004, Image and Signal Processing for Remote Sensing, 18 October 2016, Vol. XXII, No. 100041J.

13. Ranjay Shrestha, and Liping Di. Land/Water Detection and Delineation with Landsat Data using MatLab/ENVI. *Agro-Geoinformatics*, 2013 Second International Conference on DOI:10.1109/Argo-Geoinformatics.2013.6621909

14. Pantileikina T.P., and Moskaleva S.A. The use of SASPlanet and GoogleEarth software tools in the educational processDevelopment of regions in the XXI century (The use of SASPlanet and GoogleEarth software tools in the educational processDevelopment of regions in the XXI century): a collection of materials of the I International. scientific conf. North Ossetian State. K. L. Khetagurov University, 2013, pp. 374–379.

15. Tomakova R.A., and Filist S.A. Metod obrabotki i analiza slozhnostrukturiruemyh izobrazhenij na osnove vstroennyh funkcij sredy matlab (Method of processing and analysis of complex structured images based on built-in functions of the matlab environment). *Bulletin of the Trans-Baikal State University*, 2012, Vol. 1 (80), pp. 3–9.

16. Gonzalez R. Cifrovaja obrabotka izobrazhenij (Digital image processing). Moscow: Technosphere, 2012. 1101 p.

17. Algorithms for selecting contours in an image / electronic resource // <https://habr.com/ru/post/114452/> // (accessed: 18.06.2021).