

УДК 551.465

В.А. СЛОБОДЯН, А.Н. БРАШЕВАН

Національний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського "ХАІ", Україна

АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ
ЧЕРНОГО И АЗОВСКОГО МОРЕЙ

Предложен алгоритм автоматического распознавания типов загрязнений на морской поверхности, основанный на методе выделения признаков по взаимной корреляции выделенного контура и контуров тестовых фигур. Выделены наиболее информативные тестовые фигуры. Предложен искусственный дешифровочный признак, сформированный в процессе обработки контура выделенного пятна и представленный как математическая модель контура интересующего участка. Представление контура в таком виде позволяет описать этот признак несколькими коэффициентами аппроксимации. На примере реальных космических снимков участков Черного моря показана работа предложенного алгоритма. Разработанная методика дает возможность с достаточной вероятностью определить характер аномального явления морских акваториях в автоматическом режиме, что позволяет повысить эффективность космического мониторинга морских акваторий.

Ключевые слова: информативность, корреляция, вероятность, векторизация, аппроксимация, математическая модель.

Введение

Основными факторами антропогенного загрязнения моря являются: речной сток; береговой сток; абразия берегов; разливы нефти и нефтепродуктов разного происхождения [1]. Для повышения эффективности мониторинга экологического состояния прибрежных вод необходимо быстро и эффективно определять тип загрязнений. В работе [2] были выделены, систематизированы и описаны словесно наиболее информативные естественные дешифровочные признаки каждого типа загрязнения, характерные для Черного и Азовского морей. Однако для эффективного мониторинга морских акваторий недостаточно применение только естественных дешифровочных признаков. Для автоматизации процесса идентификации аномального явления на морской поверхности необходимо выделение искусственных дешифровочных признаков.

1. Исследование информативности
тестовых фигур

Для решения поставленной задачи был предложен метод выделения признаков по взаимной корреляции исследуемого контура и контуров тестовых фигур. Такой подход использовался, например, в распознавании рукописного текста [3, 4].

Используя метод, описанный в [5], были сформированы выборки данных для каждого типа загрязнения. По полученным данным строились

гистограммы, определялись значения математического ожидания и дисперсии каждого класса при исследовании каждой тестовой фигуры. Анализ показал, что исследуемые законы распределения можно считать нормальными (рис. 1).

Для дальнейшего анализа в качестве решающего правила был выбран байесовский классификатор (1) [6]:

$$P(a_k | \bar{x}) = \frac{f(\bar{x} | a_k)}{\sum_{j=1}^M f(\bar{x} | a_j)} \quad (1)$$

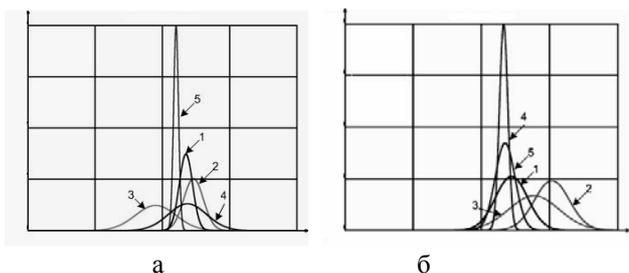


Рис. 1. Плотности распределения типов загрязнения для квадрата (а) и пятиугольника (б)

На рис. 1: 1 – абразия берега, 2 – «цветение» фитопланктона, 3 – речной сток, 4 – нефтяные загрязнения, 5 – береговой сток.

Расчет вероятностей по формуле Байеса дал возможность сформировать матрицы ошибок определения типов загрязнений по каждой тестовой фигуре. Анализ полученных результатов позволил выделить наиболее информативные тестовые

фигуры – треугольник, квадрат и пятиугольник. Вероятность правильного распознавания типов загрязнений по этим фигурам варьируется от 0,6 до 0,9 (табл. 1).

Таблица 1
Матрицы ошибок по выделенным тестовым фигурам

Квадрат	1	2	3	4	5
	Берег	Планктон	Река	Нефть	Сток
1 Берег	0,62	0,18	0,01	0	0,18
2 Планктон	0,35	0,51	0	0,05	0,08
3 Река	0,08	0,03	0,77	0	0,12
4 Нефть	0,24	0,28	0,19	0,12	0,16
5 Сток	0,05	0	0,01	0	0,93

Пятиугольник	1	2	3	4	5
	Брег	Планктон	Река	Нефть	Сток
1 Берег	0,31	0,06	0,11	0,26	0,26
2 Планктон	0,06	0,80	0,12	0	0,01
3 Река	0,20	0,45	0,16	0,09	0,10
4 Нефть	0	0	0	0,85	0,14
5 Сток	0,18	0	0,01	0,46	0,35

2. Алгоритм распознавания типов загрязнений морских акваторий

Результаты корреляционного и вероятностного анализа использовались для построения алгоритма определения типов загрязнений морских акваторий. Процесс распознавания причины аномального явления на морской поверхности включает в себя следующие этапы:

1. получение космических снимков;
2. выделение контура аномального участка на морской поверхности;
3. преобразование контура фигуры;
4. аппроксимация контура;
5. создание математической модели контура;
6. расчет коэффициентов корреляции исследуемого пятна и отобранных для анализа тестовых фигур (треугольник, квадрат, пятиугольник);
7. расчет вероятностей типов загрязнений по одномерным, двумерным и трехмерным плотностям распределения;
8. определение максимального значения вероятности и принадлежности исследуемого пятна к одному из классов загрязнений.

Перспективность использования методов дистанционного зондирования для решения задач мониторинга морских акваторий основана на возможности регистрации современной дистанционной аппаратурой широкого спектра значащих параметров водной среды. Примеры регистрации гидрооптических параметров морских акваторий средствами

дистанционного зондирования представлены на рис. 2, 3.

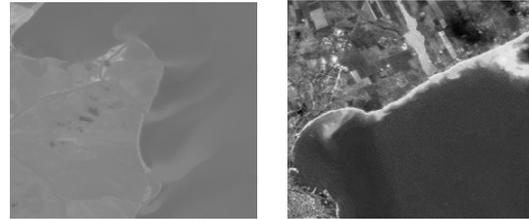


Рис. 2. Речные стоки Рис. 3. Абразия берега

Выделение на космических снимках участков водной поверхности достигается применением линейной разделительной функции $d(x)$ [1]:

$$X(I) \in \begin{cases} w_1, \text{ если } d(I) < 0 \\ w_2, \text{ если } d(I) \geq 0 \end{cases};$$

где $d(x) = W_0 + W_2 I_2 + W_3 I_3$;

I_2 и I_3 – зональные яркости изображения соответственно в каналах съемки K2 и K3;

W_0 , W_2 , W_3 – постоянные коэффициенты (компоненты весового вектора \vec{W}), значения которых оценивают по двумерной гистограмме яркости. Уточнение значений компонентов вектора \vec{W} достигается при помощи итеративных процедур теории распознавания образов, например, методами коррелирующих приращений или наименьшей квадратичной ошибки [2].

Картографирование пятнистости акваторий состоит в выделении участков космических изображений водной поверхности с однородными в заданном смысле характеристиками спектральной яркости. Известен ряд публикаций, посвященных разработке алгоритмов выделения на космических снимках акваторий границ однородных природных образований [2]. В рассматриваемых приложениях для этой цели используются алгоритмы, основанных на байесовских решающих правилах [2]:

$$P(\omega_i | \gamma) = \frac{\rho(u | \omega_i) \cdot \rho(\omega_i)}{\sum_{i=1}^k \rho(u | \omega_i) \cdot \rho(\omega_i)}$$

Здесь $\rho(\omega_i)$ – априорная вероятность того, что поверхностные воды на участке S_p относятся к классу ω_i ; $\rho(u | \omega_i)$ – условная плотность распределения яркости участка в состоянии ω_i ; $P(\omega_i | \gamma)$ – апостериорная вероятность.

Это правило используется при принятии решения об отнесении рассматриваемого элемента к одному из классов множества. Для решения поставленной задачи необходимо выполнить построение статистической модели выделенных параметров

изображения [7]. Однако законы распределения реальных экспериментальных данных являются многомодовыми (мультимодальными). Одним из методов аппроксимации многомодовых законов распределения является применение смесей нормальных распределений вида [7]:

$$f(x) = \sum_{k=1}^M p_k \cdot \varphi_k(x) = \sum_{k=1}^M p_k \cdot \frac{\exp\left\{-\frac{(x - m_k)^2}{2 \cdot \sigma_k^2}\right\}}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_k^2}},$$

где M – количество нормальных ядер $\varphi_k(x)$;

m_k, σ_k – параметры k -го нормального распределения $\varphi_k(x)$;

p_k – весовые коэффициенты, обеспечивающие выполнение требования

$$\int f(x) dx = 1.$$

Процедура нахождения параметров M, m_k, σ_k, p_k основывается на минимизации среднеквадратической ошибки аппроксимации.

В качестве экспериментальной оценки плотности вероятности используется гистограмма экспериментальных данных.

Построение многомодовой статистической модели данных включает в себя следующие этапы:

1. определение количества составляющих в смеси распределения M ;
2. определение статистических оценок параметров m_k, σ_k для каждой из мод распределения $k = 1 \dots M$;
3. определение весовых коэффициентов для каждой из составляющих смеси распределения $p_k, k = 1 \dots M$.

В данной работе необходимо выделить аномальный участок на поверхности морских акваторий. Для решения этой задачи используется метод, описанный в [4]. Здесь учитываются параметры обработки: размер окружения пиксела при усреднении интенсивности (установка чувствительности) и допустимого отрезка значений изменений цвета.

Выделенный аномальный участок необходимо оконтурить, а контур векторизовать. Для решения этой задачи был разработан **алгоритм векторизации контуров** выделенных участков, представленный на рис. 4. В результате оконтуривания аномальных пятен в файл сохраняются координаты каждой точки контура $(x_i, y_i, i=1, N)$, где N – количество точек контура).

Результаты применения разработанного алгоритма представлены на рис. 5, 6. На рис. 5 приведен контур речного стока, выделенного со снимка, представленного на рис. 2. На рис. 6 приведен контур

абразии берега, полученный в процессе обработки снимка, представленного на рис. 3.



Рис. 4. Алгоритм векторизации выделенного пятна

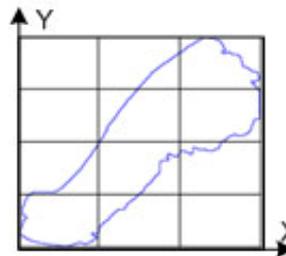


Рис. 5. Контур речного стока

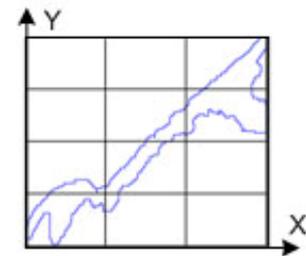


Рис. 6. Контур абразии берега

Для проведения следующих исследований строилась зависимость параметров контура, при этом исследовалась зависимость вектора (vec) (от начала координат до каждой точки контура) от приращения угла между соседними векторами (θ).

$$vec_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2},$$

$$\cos \theta_i = \frac{x_i \cdot x_{i+1} + y_i \cdot y_{i+1}}{\sqrt{(x_i^2 + y_i^2) \cdot (x_{i+1}^2 + y_{i+1}^2)}},$$

$$Vec(\theta) = \{vec_i, \theta_i\}.$$

Для **аппроксимации** контура использовался метод наименьших квадратов [6]:

$$F(x) = a_0 + ax + a_2x^2 + \dots + a_Nx^N,$$

$$F(y) = b_0 + by + b_2y^2 + \dots + b_Ny^N,$$

где a_N, b_N – коэффициенты аппроксимации; N – степень аппроксимации.

Для достаточно точной аппроксимации было предложено зависимость вида $V(\theta)$ представить в комплексном виде:

$$\dot{V}(\theta) = \begin{bmatrix} \text{Re}(\dot{V}) \\ \text{Im}(\dot{V}) \end{bmatrix}.$$

При этом $\dot{V} = |V| \cdot e^{j\theta}$. На рис. 7, 8 представлены аппроксимированные контуры.

После аппроксимации реальной и мнимой части зависимости $V(\theta)$ формируются математические модели, вид которых представлен на рис. 9, 10. При этом контур описывается несколькими (до 15) коэффициентами аппроксимации.

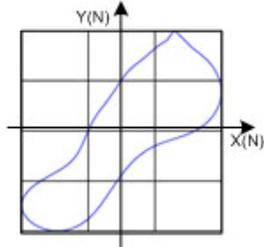


Рис. 7. Аппроксимированный контур речного стока

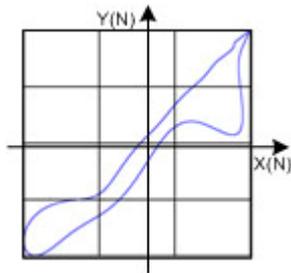


Рис. 8. Аппроксимированный контур абразии берега

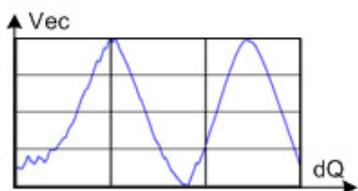


Рис. 9. Математическая модель контура речного стока

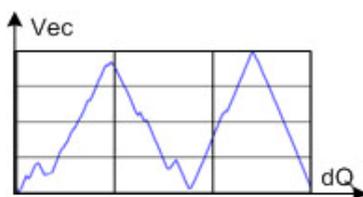


Рис. 10. Математическая модель контура абразии берега

Расчет коэффициентов корреляции между исследуемым пятном и предложенными тестовыми

фигурами дает значения функции $f(x_1, x_2, x_3 | k)$. Расчет проводился по формуле [9]:

$$r_{12} = \frac{K(x_1, x_2)}{\sigma_{x_1} \cdot \sigma_{x_2}}, \quad -1 \leq r \leq 1,$$

где r_{12} – нормированный коэффициент корреляции,

$$K_{12} = K(x_1; x_2) = M[\dot{x}_1 \cdot \dot{x}_2] =$$

$$= \int \int_{-\infty}^{\infty} (x_1 - \bar{x}_1) \cdot (x_2 - \bar{x}_2) \cdot f(x_1, x_2) dx_1 dx_2.$$

Вероятности типов загрязнения рассчитывались по одномерным, двумерным(2) и трехмерным(3) плотностям распределения [8].

Двумерная плотность распределения:

$$f(x_1, x_2) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sqrt{1 - r_{12}^2}} \times \exp \left\{ - \left(\frac{x_1 - m_1}{\sigma_1} \right)^2 - 2r_{12} \cdot \left(\frac{x_1 - m_1}{\sigma_1} \right) \times \left(\frac{x_2 - m_2}{\sigma_2} \right) + \left(\frac{x_2 - m_2}{\sigma_2} \right)^2 / 2 \cdot (1 - r_{12}^2) \right\}, \quad (2)$$

где $r_{12} = \frac{K_{12}}{\sigma_1 \sigma_2}$ – нормированный коэффициент корреляции x_1 и x_2 [8].

Трехмерная плотность распределения:

$$f(\bar{x}) = \frac{1}{(2\pi)^2 |K|^{1/2}} \times \exp \left\{ - \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M |K_{ij}| \cdot (x_i - m_i) \cdot (x_j - m_j)}{2 |K|} \right\}, \quad (3)$$

где $M=3$; $|K|$ – определитель матрицы $[K]$;

$|K_{ij}|$ – алгебраическое дополнение элемента K_{ij} .

В качестве решающей функции выбрана формула Байеса (1).

Определение вероятности типа загрязнения дало следующие результаты:

- по одномерным законам распределения $P=0,5$;
- по двумерным законам распределения $P=0,7$;
- по трехмерным законам распределения $P=0,9$.

Заключение

В статье предложен алгоритм распознавания типов загрязнений Черного и Азовского морей с

применением тестовых фигур. Решение данной задачи обосновано необходимостью автоматизировать процесс космического мониторинга морских акваторий. Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что применение разработанного алгоритма позволяет идентифицировать типы загрязнений с достаточной вероятностью, что дает возможность автоматизировать процесс распознавания аномальных явлений на морской поверхности.

Литература

1. Красовский Г.Я. *Інформаційні технології космічного моніторингу водних екосистем і прогнозу водоспоживання міст* / Г.Я. Красовский, В.А. Петросов. – К.: Наукова думка, 2003. – 224 с.
2. Красовский Г.Я. *Аэрокосмический мониторинг поверхностных вод* / Г.Я. Красовский – Л.: ВНИИКАМ, 1992. – 231 с.
3. Гонсалес Р. *Принципы распознавания образов: пер. с англ.* / Р. Гонсалес, Дж. Ту. – М.: Мир,

1978. – 416 с.

4. Прэтт У. *Цифровая обработка изображений: пер. с англ.* / У. Прэтт. – М.: Мир, 1982. – Кн. 2. – 480 с.

5. Слободян В.А. *Исследование информативности тестовых фигур с применением корреляционного анализа* // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – №2 (49). – С. 89-92.

6. Вентцель Е.С. *Теория случайных процессов и ее инженерные приложения* / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Высш. шк., 2000. – 383 с.

7. Брашеван А.Н. *Статистическая модель многомодовых экспериментальных данных* // *Радиоэлектронные и компьютерные системы*. – 2003. – №2. – С. 82-85.

8. *Математические модели электронных аппаратов и систем: учеб. пособие* / М.Ф. Бабаков, А.В. Попов, М.И. Луханин; Мин-во образования и науки Украины: Нац. аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. ин-т». – Х.: Изд-во Нац. аэрокосмического ун-та, 2003. – 109 с.

Поступила в редакцию 2.06.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.Я. Красовский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

АЛГОРИТМ РОЗПІЗНАВАННЯ ЗАБРУДНЕНЬ ЧОРНОГО Й АЗОВСЬКОГО МОРІВ

В.О. Слободян, О.М. Брашеван

Запропоновано алгоритм автоматичного розпізнавання типів забруднень на морській поверхні, заснований на методі виділення ознак по взаємній кореляції виділеного контуру й контурів тестових фігур. Виділені найбільш інформативні тестові фігури. Запропоновано штучну дешифрувальну ознаку, сформовану у процесі обробки контуру виділеної плями і представлену як математична модель контуру цікавлячої ділянки. Представлення контуру в такому вигляді дозволяє описати цю ознаку декількома коефіцієнтами апроксимації. На прикладі реальних космічних знімків ділянок Чорного моря показана робота запропонованого алгоритму. Розроблена методика дає можливість із достатньою ймовірністю визначити характер аномального явища морських акваторій в автоматичному режимі, що дозволяє підвищити ефективність космічного моніторингу морських акваторій.

Ключові слова: інформативність, кореляція, ймовірність, векторизація, апроксимація, математична модель.

ALGORITHM OF RECOGNITION CONTAMINATIONS OF BLACK AND AZOV SEAS

V.A. Slobodyan, A.N. Brashevan

The algorithm of automatic recognition types of contaminations on a marine surface, based on the method of features extraction on mutual correlation of the selected contour and contours of tests figures, is offered. The most informing tests figures are selected. The artificial decoding sign formed in the process of treatment of contour of the selected spot and represented as mathematical model of contour of interesting area is offered. Presentation of contour in such kind allows to describe this sign by a few coefficients of approximation. On the example of the real spaces pictures of areas of the Black sea work of the offered algorithm is shown. The developed method enables with sufficient probability to define character of the anomalous phenomenon marine aquatoriums in the automatic mode, that allows to promote efficiency of the space monitoring of marine aquatoriums.

Key words: informing, correlation, probability, vectorization, approximation, mathematical model.

Слободян Вера Александровна – научный сотрудник Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Брашеван Александра Николаевна – аспирантка Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.