

УДК 004.932.2

Б.А. Алпатов, О.Е. Балашов, М.Д. Ершов, В.С. Муравьев, А.Б. Фельдман

## Разработка алгоритмов обработки радиолокационных изображений в задачах мониторинга водного пространства

Для контроля и мониторинга водного пространства в последнее время все шире используется тематическая обработка радиолокационной информации, получаемой от спутников дистанционного зондирования Земли. Среди направлений исследований можно выделить следующие наиболее актуальные: обнаружение нефтяных разливов, обнаружение надводных объектов искусственного происхождения, составление карты скорости морских течений. В работе рассматривается комплекс многоэтапных алгоритмов, решающих указанные задачи.

**Ключевые слова:** РСА-изображения, обнаружение надводных объектов, обнаружение нефтяных разливов, морские течения.

В настоящее время человечество активно использует океан, поэтому задачи мониторинга водного пространства, включающие в себя подзадачи обнаружения кораблей, контроля нефтяных загрязнений, изучения морских течений, являются актуальными. В связи с тем, что водная поверхность занимает значительные по размеру площади, удачным способом получения информации о состоянии океана является дистанционное зондирование, осуществляемое с космических аппаратов, оборудованных радаром с синтезированной апертурной решеткой (TerraSAR-X, ERS-2, COSMO-SkyMed). РСА-радары позволяют получать изображение морской поверхности при любых погодных условиях и в любое время суток.

**Обнаружение нефтяных разливов.** Массовое применение нефтепродуктов по всему миру создает предпосылки к постоянному наращиванию объемов добычи сырой нефти и перевозок нефтепродуктов, что приводит к увеличению вероятности загрязнения водного пространства, следовательно, разработка алгоритма обнаружения нефтяных загрязнений является актуальной задачей. Радиолокационное излучение чувствительно к состоянию морской поверхности из-за наличия на ней ветрового волнения. Нефтяные пленки подавляют взаимодействие ветра с водной поверхностью, и рассеяние радиоволн в сторону антенны уменьшается [1]. Алгоритм автоматизации обнаружения пленочных загрязнений включает следующие основные этапы: предобработка РСА-изображения  $l(m, n)$ , обнаружение темных сегментов, определение параметров обнаруженных темных областей и их классификация.

Предобработка состоит из фильтрации спекл-шума, который заметно влияет на результаты обработки, и маскирования участков земной поверхности, потому что зоной интереса является морская поверхность. С целью фильтрации изображения могут использоваться усредняющий, медианный фильтры, а также адаптивные фильтры Ли и Фроста и др. Маскирование участков земной поверхности выполняется с использованием базы береговых линий в векторном формате.

Важным шагом алгоритма является обнаружение темных пятен, которые, как правило, соответствуют нефтяным загрязнениям. На этом этапе алгоритма обнаружения пленочных загрязнений проводится адаптивная пороговая фильтрация, основанная на оценке шероховатости окружающей морской поверхности и состоящая из следующих шагов:

1) Для каждого пикселя изображения  $l(m, n)$  в локальном окне размером  $w \times w$  вычисляется среднее значение  $\mu(m, n)$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma(m, n)$ .

2) Вычисление отношения  $\lambda(m, n) = \frac{\sigma(m, n)}{\mu(m, n)}$  для каждого пикселя  $l(m, n)$ . В соответствии с полученным значением  $\lambda(m, n)$  в окрестности  $(m, n)$  определяется категория однородности  $K$ .

3) Расчет порогового значения  $T(m, n) = \frac{\mu(m, n)}{d(K)}$ . Коэффициент  $d(K)$ , соответствующий определенной категории однородности, выбирается из предварительно составленной таблицы.

4) Получение бинарного изображения  $b(m, n)$  путем пороговой обработки. Если  $l(m, n) \geq T(m, n)$ , то пиксель считается относящимся к объекту – пятну.

После этапа обнаружения темных пятен выполняется разметка и параметризация полученного бинарного изображения. Все связные области на изображении объединяются в отдельные сегменты, для каждого сегмента определяется набор параметров: площадь  $S$ , периметр  $P$ , координаты центра, округлость  $c$  и эксцентриситет  $\epsilon$  для оценки формы. Для выполнения алгоритма разметки и параметризации вводится матрица меток  $Q$  и производится построчный обход изображения  $b(m, n)$ .

Важным этапом алгоритма обнаружения нефтяных разливов является классификация, требующая комплексной оценки каждого найденного сегмента. В результате формируется набор пленочных загрязнений, которые с большой вероятностью являются нефтяными разливами. Одним из основных признаков, характеризующих нефтяное загрязнение, является его геометрическая форма. Кроме того, выделенные пятна, имеющие слишком малую площадь, скорее всего, образованы из-за сильного волнения морской поверхности и влияния помех. Слишком большие пятна обычно являются пленочными загрязнениями естественного происхождения (скоплениями водорослей) или штилевыми зонами. Важную роль играет оценка краев загрязнений и их текстуры, так как нефтяные разливы, как правило, имеют хорошо выраженный гладкий контур и однородную текстуру [1].

**Обнаружение надводных объектов.** Одной из актуальных задач, возникающих при дешифрировании космических снимков, является обнаружение надводных объектов. В роли таких объектов зачастую выступают корабли и суда различных классов. Разработанный алгоритм обнаружения надводных объектов состоит из следующих основных этапов: предварительного обнаружения, сегментации изображения, совмещенной с процедурой разметки и параметризации, анализа параметров сегментов, определения ориентации и размеров судна.

Предварительное обнаружение объектов заключается в обработке исходного радиолокационного изображения с помощью усредняющей многооконной фильтрации с последующей локальной пороговой обработкой. В окрестности текущего пикселя  $(m, n)$  строится окно размера  $w_0 \times w_0$  и вычисляется усредненное значение  $\bar{\mu}_0(m, n)$ . Введение окна позволяет сгладить шум и найти более точную оценку яркости объекта. Статистические характеристики фона оцениваются в окрестности, ограниченной с одной стороны окном размера  $w_0 \times w_0$ , а с другой – окном фильтра размерностью  $w_\phi \times w_\phi$ , причем  $w_\phi \gg w_0$ . При этом предполагается, что распределение фона в рамке подчиняется нормальному закону.

Для получения бинарного изображения выполняется локальная пороговая обработка в соответствии с правилом

$$b(m, n) = \begin{cases} 1, & \text{при } \bar{\mu}_0(m, n) > \bar{\mu}_\phi(m, n) + \bar{\sigma}_\phi(m, n) t / w_0, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (1)$$

где  $\bar{\mu}_\phi(m, n)$ ,  $\bar{\sigma}_\phi(m, n)$  – среднее и оценка СКО в рамке,  $t$  – пороговый коэффициент. В бинарном изображении  $b(m, n)$  единичные пиксели принадлежат объекту, а нулевые – фону. На данном этапе может использоваться информация о положении суши для маскирования областей на снимке, не содержащих надводные объекты. Описанный подход схож с алгоритмом обнаружения на основе постоянной частоты ложных тревог, который широко используется на практике [2].

Однако при бинаризации по правилу (1) протяженные объекты могут выделяться лишь частично, что приводит к неправильной оценке их размеров и площади. Поэтому для повышения точности оценивания параметров введен этап сегментации изображений, предназначенный для восстановления бинарных масок объектов.

Для сегментации изображения используется алгоритм наращивания областей. На первой итерации при построчном проходе бинарного изображения  $b(m, n)$  отыскивается единичная точка, которая служит в качестве стартовой, а счетчик меток увеличивается на единицу. Далее осуществляется просмотр соседних пикселей в окрестности данной точки. Считается, что анализируемая точка принадлежит к одному сегменту, если выполняется критерий однородности  $|l(m, n) - \mu_l| < T_c$ , где  $l(m, n)$  – яркость анализируемого пикселя на исходном изображении,  $\mu_l$  – средняя яркость сегмента,  $T_c$  – заданный порог. При добавлении точки к сегменту его площадь и средняя яркость пересчитываются, а самой точке присваивается текущая метка. Обход продолжается до тех пор, пока к сегменту добавляются новые пиксели без нарушения условия связности. При пересечении уже размеченных областей они объединяются в один сегмент, а его параметры обновляются. Построчный обход бинарного

изображения продолжается далее до нахождения новой единичной точки, и алгоритм сегментации запускается снова. Останов алгоритма осуществляется по завершении поиска неразмеченных единичных точек. Таким образом, может быть восстановлена форма объекта и оценены его средняя яркость, площадь и размеры. Объекты неподходящей площади и соотношения сторон исключаются из дальнейшего рассмотрения. Для всех оставшихся объектов оценивается ориентация, которая определяется направлением главной оси.

**Измерение скорости поверхностных течений.** Информация о скорости морских течений помогает лучше изучить океанические процессы. Данный алгоритм позволяет вычислить скорость поверхностных течений. Результатом является контурная карта скорости течений. Для измерения скорости течения на поверхности океана по одному радиолокационному изображению требуется информация об амплитуде и фазе отраженного сигнала [3]. Для решения рассматриваемой задачи можно использовать РСА-изображения с уровнем обработки SSC, например получаемые космическим аппаратом TerraSAR-X.

Для измерения скорости поверхностных вод используется закон Доплера, согласно которому частота отраженного сигнала изменяется пропорционально скорости движения объекта. Движение масс воды в поверхностном слое океана изменяет скорость перемещения спутника относительно объекта (облучаемой поверхности океана). В результате частота отраженного сигнала  $f_{DC}$  согласно закону Доплера изменяется на некоторую величину

$$f_{DCA} = f_{DC} - f_{DCM}, \quad (2)$$

где  $f_{DCM}$  – рассчитываемая частота отраженного сигнала для случая, если бы объект не двигался относительно Земли (течения нет) [3]. Поэтому поверхностные океанские течения проявляются на РСА-изображениях [4]. Частота  $f_{DCM}$  для изображения, полученного от TerraSAR-X, может быть вычислена на основании данных, указанных в паспорте изображения, по выражению  $f_{DCM} = k_0 + k_1 t$ , где  $t$  – время прохождения сигнала антенны от границы изображения до объекта,  $k_0, k_1$  – коэффициенты, хранятся в XML-паспорте изображения. По РСА-изображению можно измерить частоту реального отраженного сигнала  $f_{DC}$  и по выражению (2) найти изменение частоты Доплера. Благодаря этому скорость вод движения на поверхности океана можно оценить по выражению [4]

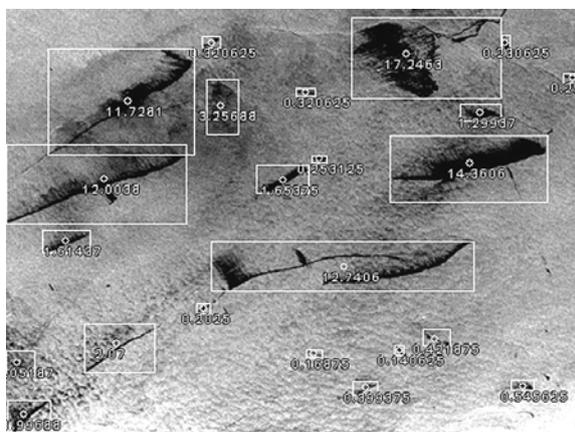
$$V_D = -\frac{\pi f_{DCA}}{k_R \sin \theta}, \quad (3)$$

где  $V_D$  – радиальная скорость объекта (скорость перемещения участка водной поверхности),  $\theta$  – угол падения,  $k_R$  – коэффициент, зависящий от длины волны сигнала, излучаемого антенной. Из (3) по следующему выражению легко получить оценку скорости движения воды на поверхности океана:

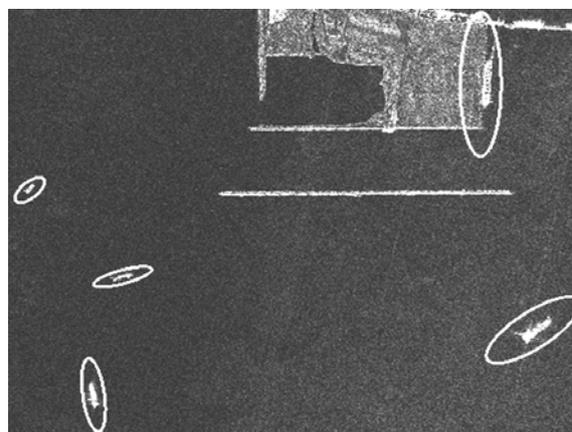
$$V = V_D \sin \theta \cos \psi, \quad (4)$$

где  $\psi$  – угол между плоскостью визирования и направлением течения.

**Результаты экспериментов.** В качестве исходных данных для проведения экспериментов использовались РСА-снимки, полученные со спутников дистанционного зондирования Земли TerraSAR-X, ERS-2. Результат работы алгоритма выделения нефтяных разливов и алгоритма обнаружения надводных объектов продемонстрирован на рис. 1.



Результат обнаружения нефтяных пятен



Результат обнаружения надводных объектов

Рис. 1. Результаты работы алгоритмов обработки радиолокационных изображений

Пятна, классифицированные как нефтяные разливы, обведены прямоугольником, также отображены размеры этих разливов в квадратных километрах. Найденные надводные объекты отмечены эллипсами.

**Заключение.** В работе описаны разработанные алгоритмы обработки РСА-изображений. Также показаны результаты работы описанных алгоритмов на натуральных изображениях. Представленные алгоритмы позволяют решать ряд важных научно-практических задач, среди которых контроль незаконного рыболовства, контроль загрязнений океана нефтепродуктами, обнаружение неизвестных месторождений нефти, изучение жизни фитопланктона, изучение скорости течений поверхностных вод.

Работа была выполнена при поддержке гранта НШ-252.2014.10.

#### *Литература*

1. Верба В.С. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В.С. Верба, Л.Б. Неронский, И.Г. Осипов, В.Э. Турук. – М.: Радиотехника, 2010. – 681 с.
2. Hinz S. Automatic Ship Detection in Space-borne SAR Imagery / S. Hinz, F. Meyer // International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2009. – Vol. 38. – P. 1–6.
3. Chapron B. Direct Measurements of Ocean Surface Velocity from Space: Interpretation and Validation / B. Chapron, C. Fabrice, A. Fabrice // Journal of Geophysical Research. – 2005. – Vol. 110. – P. 1–17.
4. Backscatter and Doppler Signals of Surface Current in SAR Images: A Step Towards Inverse Modeling / J.A. Johannessen, V. Kudryavtsev, B. Chapron, F. Collard, D. Akimov, K.-F. Dagestad // Proceedings of OceanSAR. – St. John's, Canada, 2006. – 10 p.

---

#### **Алпатов Борис Алексеевич**

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. автоматизации и информационных технологий в управлении (АИТУ) Рязанского государственного радиотехнического университета  
Тел.: +7 (491-2) 46-03-42  
Эл. почта: aitu@rsreu.ru

#### **Балашов Олег Евгеньевич**

Канд. техн. наук, доцент каф. АИТУ  
Тел.: +7 (491-2) 46-03-42  
Эл. почта: balashov.o.e@rsreu.ru

#### **Ершов Максим Дмитриевич**

Инженер каф. АИТУ  
Тел.: +7 (491-2) 46-03-42  
Эл. почта: mslayer@yandex.ru

#### **Муравьев Вадим Сергеевич**

Канд. техн. наук, доцент каф. АИТУ  
Тел.: +7 (491-2) 46-03-42  
Эл. почта: muraviev.v.s@rsreu.ru

#### **Фельдман Александр Борисович**

Канд. техн. наук, науч. сотрудник каф. АИТУ  
Тел.: +7 (491-2) 46-03-42  
Эл. почта: feldman.a.b@rsreu.ru

Alpatov B.A., Balashov O.E., Ershov M.D., Muraviev V.S., Feldman A.B.

#### **Development of SAR image processing algorithms for marine monitoring**

SAR image processing is extensively used for marine monitoring and control. For this purpose image data can be acquired from Earth observation satellites. The main areas of research include the most relevant: detection of oil spills, detection of surface objects of artificial origin (ships) and mapping of sea currents speed. The paper describes several complex algorithms that solve these problems.

**Keywords:** SAR image, ship detection, oil spill detection, sea currents mapping.