

УДК 551.46.077:629.584

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ НА ФОТОСНИМКАХ МОРСКОГО ДНА

А.М. Павин

Институт проблем морских технологий
ДВО РАН¹

Рассматривается задача идентификации объектов искусственного или естественного происхождения на фотоснимках морского дна. В качестве шаблона может выступать любой объект, в том числе фрагмент ранее полученного снимка, однозначно определяемый контурами своих границ. Обнаружение искомого объекта производится путем перебора ключевых точек или небольших отрезков границ предметов на изображении с последующим увеличением значений ячеек в накопителе. Обработка реальных снимков морского дна подтвердила эффективность представленного алгоритма при решении задач определения смещения аппарата по последовательности фотоснимков, выделения подводного маркера прямоугольной формы и белого фала.

ВВЕДЕНИЕ

Обработка фотоснимков морского дна с целью выделения на них интересных объектов находит применение во многих прикладных задачах, связанных с управлением и навигацией телеуправляемых или автономных необитаемых подводных аппаратов (ТНПА, АНПА). К таким задачам можно отнести: маневрирование вблизи подводных сооружений, обследование подводных коммуникаций [1], подводную стыковку с использованием визуальных ориентиров [2], считывание траектории по фотоснимкам [3], позиционирование над заданным фрагментом дна, сшивка изображений, подсчет морских гидробионтов и другие. Для всех перечисленных задач искомым объектом может иметь произвольную геометрическую форму (например, различные ориентиры-маркеры для проведения стыковки) или вообще оставаться неизвестным до выполнения миссии (как в случае с определением смеще-

ния относительно грунта, где ранее сделанный фотоснимок является искомым объектом).

Во многих случаях искомым объектом однозначно определяется формой своих границ, но контуры предметов на фотоснимке могут быть зашумлены (с прерывистыми или нечеткими границами), что является следствием съемки в условиях мутной воды, заиленности, а также при наличии посторонних предметов, водорослей и морских организмов. Кроме того, необходимым требованием к алгоритму идентификации является возможность его функционирования на борту подводного аппарата в условиях реального времени при обеспечении непрерывной обработки снимков с периодом 1~2 секунды/кадр, что связано с применением фотовспышки на подводном роботе.

■ Предварительная обработка изображения

Предварительная обработка фотоснимка необходима для

уменьшения переборных операций алгоритма, сглаживания шумов на исходном изображении и получения исходных данных для процедуры идентификации. Таким образом, предварительная обработка состоит из трех шагов: 1) масштабирование исходного кадра телевизионной системы (при этом сглаживаются многие шумы изображения); 2) выделение границ объектов с применением карты градиентов; 3) поиск на карте градиентов наиболее контрастных точек (точки интереса, ключевые точки) или отрезков (отрезки интереса), принадлежащих границам объектов. Суть первого этапа заключается в объединении соседних пикселей путем смешивания их яркостей. В результате из исходного снимка размером порядка 1000 пикселей по ширине формируется изображение около 300 пикселей с плавными переходами яркостей от точки к точке.

¹ 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, e-mail: pavin@bk.ru.

Применяемый алгоритм идентификации предполагает использование ключевых точек или отрезков на изображении. К таким точкам (и отрезкам) относятся места, принадлежащие границам объектов на фотоснимке (рис. 1), которые можно обнаружить с помощью операторов Собела, Превита или Щарра [4]. Каждый из этих операторов определяет градиент яркости в каждой точке изображения и позволяет грубо оценить направление границ (перпендикуляр к градиенту). Среди множества точек, принадлежащих контурам объектов, достаточно выбрать порядка тысячи наиболее контрастных для последующего использования в алгоритме идентификации или определения наиболее контрастных отрезков на изображении.

Контрастность точек фотоснимков заранее неизвестна, поэтому для определения фиксированного числа наиболее контрастных точек необходимо выбирать минимальный порог контрастности для каждого кадра. Определение порога контрастности производится путем построения гистограммы распределения модулей градиентов. Данная гистограмма представляет собой количество точек, обладающих соответствующей контрастностью (рис. 2, а). Таким образом, достаточно суммировать точки, обладающие наибольшей контрастностью, до тех пор пока их количество не превысит необходимое. То значение модуля градиента, при котором суммирование останавливается, и является необходимым порогом.

Определение наиболее контрастных отрезков производится после того, как выбрано необходимое количество точек-претендентов. Для этого

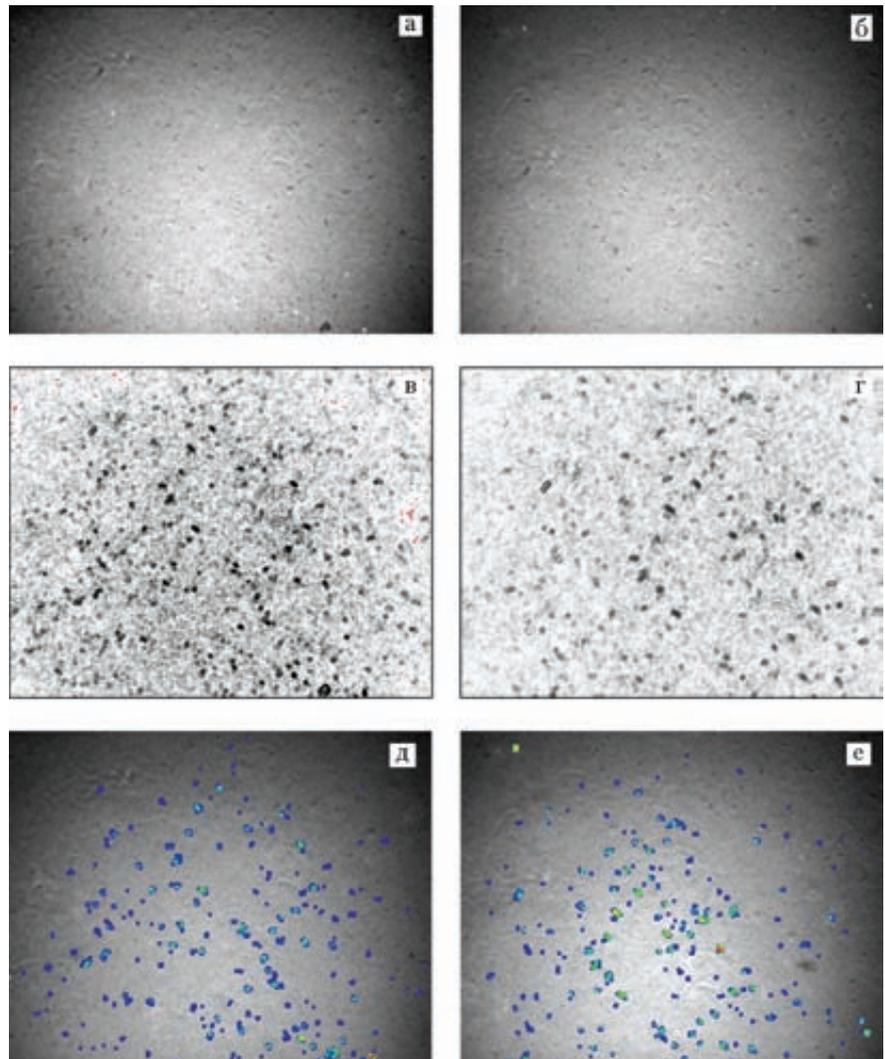


Рис. 1. Подводные фотоснимки, полученные подводным аппаратом «Клавесин»: а, б – два последовательных кадра морского дна; в, г – карты градиентов; д, е – ключевые точки на фотоснимках

исследуется окрестность в направлении перпендикуляра к градиенту с целью обнаружения второй точки, принадлежа-

щей границе объекта (рис. 2, б). Среди множества полученных отрезков выбираются те, у которых величины градиентов мак-

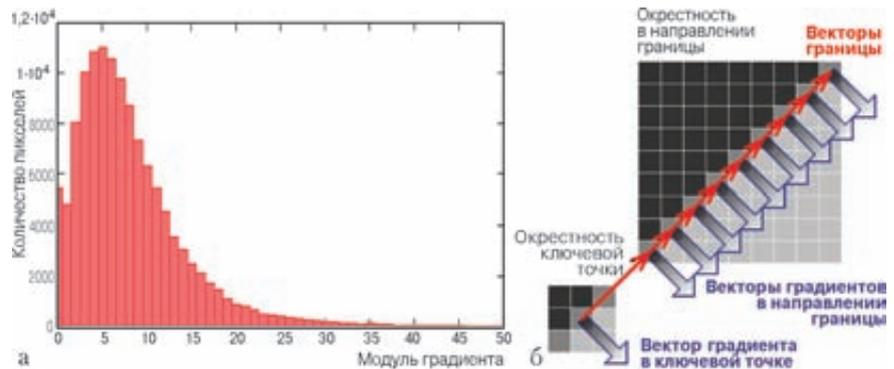


Рис. 2. Определение ключевых точек и отрезков на изображении: а – гистограмма распределения модулей градиентов; б – определение границ объектов

симальны и направления примерно совпадают (рис. 3, в, г). Эти отрезки считаются принадлежащими контурам предметов и используются в дальнейшем для выделения шаблонного объекта. Как показали эксперименты, в большинстве случаев достаточно менее десяти тысяч отрезков, выделенных на границах объектов, для надежной идентификации фигур типа «линия» или «прямоугольник».

■ Определение параметров объекта

Идентифицировать некоторый объект на изображении – это значит установить факт его наличия и некоторый набор параметров, таких как местоположение на фотокадре, поворот и масштаб относительно шаблона. Обозначим за $dx; dy$ – искомые координаты (смещение) идентифицируемого объекта, ρ и φ – его масштаб и поворот. Тогда координаты любых то-

чек на шаблоне $[x'; y']$ связаны с координатами тех же точек на изображении $[x''; y'']$ следующей зависимостью:

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} + \rho \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}. \tag{1}$$

Значения смещений dx и dy в уравнении (1) однозначно определяются, если известен масштаб ρ и поворот φ снимка относительно шаблона, а также определены координаты одной и той же точки в обеих системах координат. В некоторых случаях параметры ρ и φ могут быть известны или вычислены по данным других сенсорных устройств (например, если объект расположен вертикально и известно расстояние до него по акустическим эхолотам). Также при определении смещения аппарата по последовательности фотокадров, φ равно изменению курса между двумя съемками, а ρ – пропорционально изменению высоты над грунтом. А в случае последо-

вательной съемки с небольшой временной задержкой (1-2 с) при прямолинейном движении аппарата данные величины можно принять за константы ($\varphi=0, \rho=1$).

Если ориентация снимка неизвестна, то для определения всех его параметров (dx, dy, ρ и φ) необходима система из четырех уравнений. Данную систему можно получить из системы (1), зная координаты отрезков, принадлежащих контурам объектов на шаблоне $[x'_1; y'_1], [x'_2; y'_2]$ и изображении $[x''_1; y''_1], [x''_2; y''_2]$:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x''_1 \\ y''_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} + \rho \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x''_2 \\ y''_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} + \rho \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_2 \\ y'_2 \end{bmatrix} \end{cases} \tag{2}$$

Система (2) несложно решается относительно $\rho \cdot \cos(\varphi)$ и $\rho \cdot \sin(\varphi)$, если в левую часть вынести dx, dy и попарно приравнять первое уравнение со вторым и третье с четвертым. Таким образом, приходим к следующей системе из двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{bmatrix} x''_1 \\ y''_1 \end{bmatrix} - \rho \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \end{bmatrix} = \tag{3}$$

$$\begin{aligned} &= \begin{bmatrix} x''_2 \\ y''_2 \end{bmatrix} - \rho \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_2 \\ y'_2 \end{bmatrix} \\ &\left\{ \begin{aligned} (x'_1 - x'_2) \rho \cos \varphi + (y'_1 - y'_2) \cdot \rho \sin \varphi &= (x''_1 - x''_2) \\ (y'_1 - y'_2) \rho \cos \varphi - (x'_1 - x'_2) \cdot \rho \sin \varphi &= (y''_1 - y''_2) \end{aligned} \right. \tag{4} \end{aligned}$$

Обозначив разности координат отрезков $(x'_1 - x'_2) = A, (y'_1 - y'_2) = B, (x''_1 - x''_2) = C, (y''_1 - y''_2) = D$, получим следующее решение относительно $\rho \cos(\varphi)$ и $\rho \sin(\varphi)$:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \rho \cos \varphi \\ \rho \sin \varphi \end{bmatrix} &= \\ &= \frac{1}{-A^2 - B^2} \begin{bmatrix} A & B \\ B & -A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix}. \tag{5} \end{aligned}$$

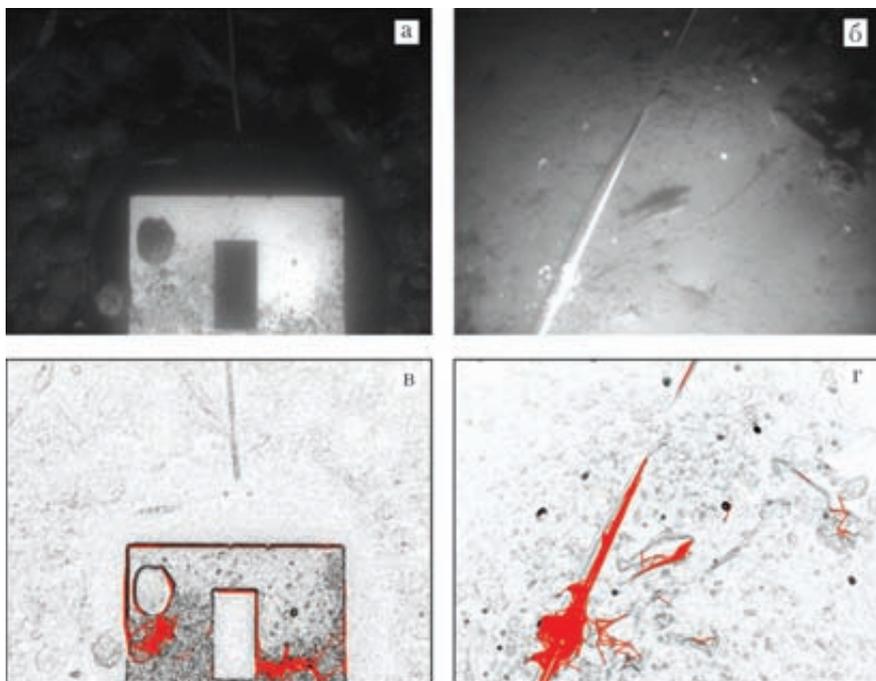


Рис. 3. Подводные фотоснимки, полученные подводным аппаратом: а – с прямоугольным маркером; б – с белым фалом; в – карта градиентов и найденные границы объектов на изображении с фалом; г – карта градиентов и найденные границы объектов (красные отрезки) на изображении с маркером

Таким образом, для решения задачи идентификации достаточно знать координаты любой точки шаблона на изображении, если масштаб и поворот снимка известны, или координаты любого отрезка, если масштаб и поворот не определены.

Поскольку заранее нет соответствия ключевых точек/отрезков на шаблоне и отснятом кадре, то можно перебрать все возможные соответствия, определяя по формулам (1) и (5) необходимые параметры. Очевидно, что если искомый объект действительно присутствует на фотографии, то для разных участков его границ параметры dx , dy , ρ и φ должны быть одинаковы. Поэтому для обнаружения объекта достаточно создать накопитель, аналогичный накопителю Хафа [4] и во время перебора «отрезков интереса» увеличивать ячейку с координатами $[dx, dy, \rho, \varphi]$. Ячейка, в которой после перебора будет максимальное значение, соответствует координатам объекта, и чем больше значение в данной ячейке, тем выше вероятность, что искомая фигура присутствует на изображении. Пример кода на языке C для расчета смещения одного изображения относительно другого приведен в листинге 1.

■ Результаты обработки снимков морского дна

Проверка работоспособности алгоритма производилась на реальных фотоснимках, полученных подводными аппаратами ИПМТ ДВО РАН. Примеры исходных изображений дна для решения задачи определения смещения аппарата приведены на рис. 1, а, б, на рис. 2, а, б приведены снимки прямоугольного маркера и белого фала.

При проведении экспериментов по обнаружению прямоугольного маркера и белого фала предполагалось, что местоположение, направление и масштаб объектов не известны, т.е. вычисляются алгоритмом. Можно видеть, что в обоих случаях успешно выделяется как контрастный маркер (рис. 4, а), так и белый фал (рис. 4, б). Причем во втором случае маркер распознается даже несмотря на явное прерывание контура и отсутствие более 20% объекта на снимке.

Для оценки надежности алгоритма можно проанализировать состояние накопителя во время идентификации объекта. Если в накопителе имеется явно выраженный максимум, соответствующий параметрам искомого объекта, и его значение в разы превышает величины в других ячейках, то можно гово-

рить о надежной идентификации искомого объекта. К сожалению, отобразить на плоскости все значения накопителя с четырьмя степенями свободы проблематично. Однако можно выбрать максимальные значения, соответствующие плоскости смещения $dx-dy$ (рис. 4, в, г) и плоскости масштаба-поворота $\rho-\varphi$ (рис. 4 д, е).

Рассмотрим подробно состояние накопителей во время обнаружения белого фала (рис. 4, г, е). Можно видеть, что местоположению фала соответствуют полоса (максимальные значения) в пространстве смещения (рис. 4, г) и такие же области в пространстве масштаба поворота, определяющие направление (рис. 4, е). Следует отметить одно преимущество алгоритма – во время его работы образуется относительно мало белого шума в других ячейках накопителя, например, в сравнении с преобразованием Хафа. Данный факт объясняется использованием не всех контрастных точек изображения (и перебором для них всех возможных направлений объекта), а только отрезков, соответствующих границам предметов.

На рис. 5, а представлены результаты расчета смещения аппарата по фотоснимкам. В центре изображения находится опорный кадр, полученный фотосистемой АНПА «Клаксин». Последующий снимок смещен на величину, соответствующую местоположению максимума в накопителе (рис. 5, б). Можно видеть, что максимум в накопителе явно выражен и соответствует перемещению аппарата за период съемки. Причем верное определение смещения производится в условиях отсутствия на самом изображении ярко выраженных объектов со значительными габаритами (имеются только мелкие объекты, мало отличающиеся друг от друга).

```
// фрагмент кода расчета перемещения аппарата (root_dx, root_dy)
// исходя из координат ключевых точек (n) текущего изображения (nx[n], ny[n])
// (где n=0..M-1, M - количество ключевых точек в текущем изображении)
// и координат ключевых точек (n) предыдущего изображения (px[n], py[n])
// (где n=0..M-1, M - количество ключевых точек в предыдущем изображении)

for (n=0; n<M; n++) // цикл по ключевым точкам (n) текущего изображения
for (n=0; n<M; n++) // цикл по ключевым точкам (n) предыдущего изображения
{
    dx = nx[n]-px[n]; // расчет вектора смещения (dx,dy) ключевой точки текущего
    dy = ny[n]-py[n]; // относительно ключевой точки предыдущего изображения

    Acc[MAX_DX+dx][MAX_DY+dy]++; // увеличение ячейки накопителя (Acc) с учетом
                                // максимальных возможных смещений АНПА (MAX_DX, MAX_DY)

    // Если вес накопителя (Acc) в текущей ячейке больше, чем в рассчитанной ранее
    if (Acc[MAX_DX+dx][MAX_DY+dy] > Acc[MAX_DX+root_dx][MAX_DY+root_dy])
    {
        root_dx = dx; // то вектор смещения (dx,dy) запоминается и
        root_dy = dy; // считается величиной перемещения АНПА (root_dx, root_dy)
    }
}
```

Листинг 1. Фрагмент кода на языке C для расчета смещения одного изображения относительно другого

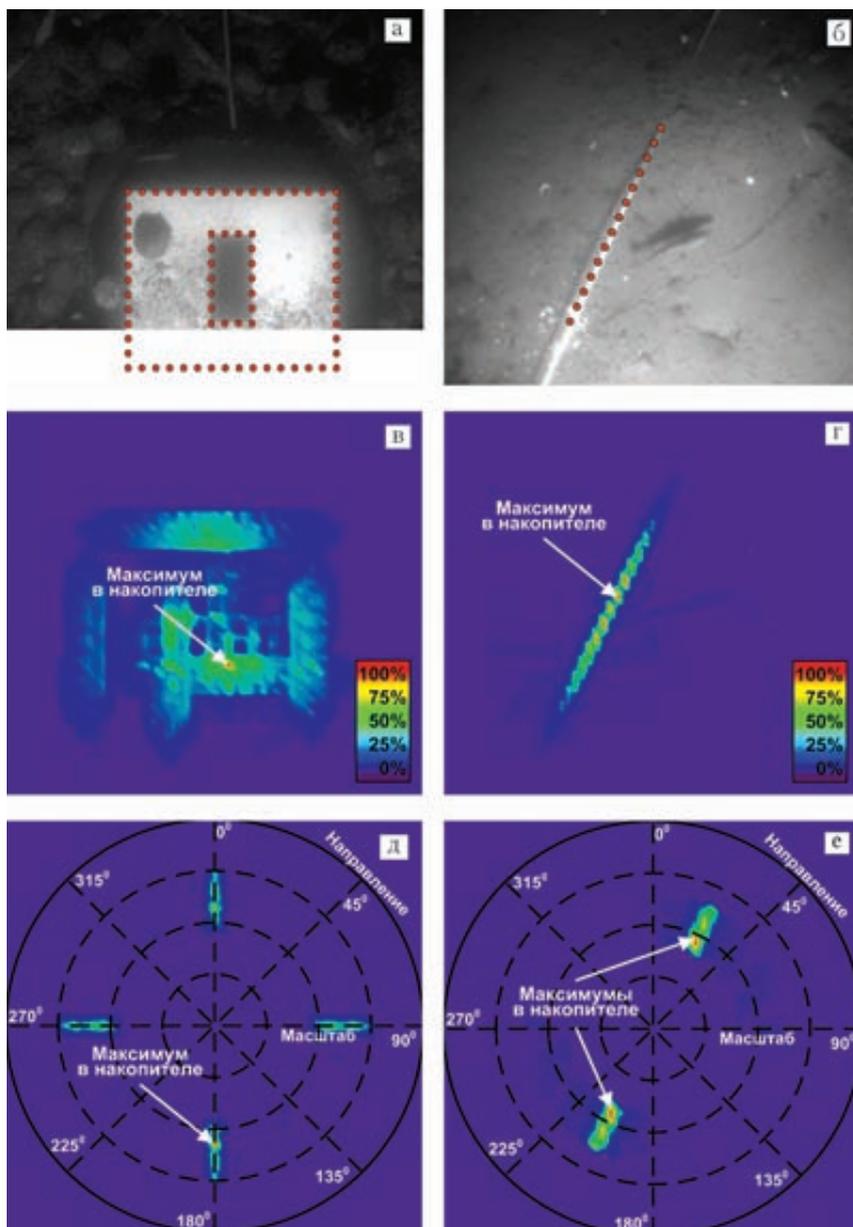


Рис. 4. Состояние накопителей в плоскости смещения (в, г) и масштаба-поворота (д, е) во время обнаружения прямоугольного маркера (а) и белого фала (б)

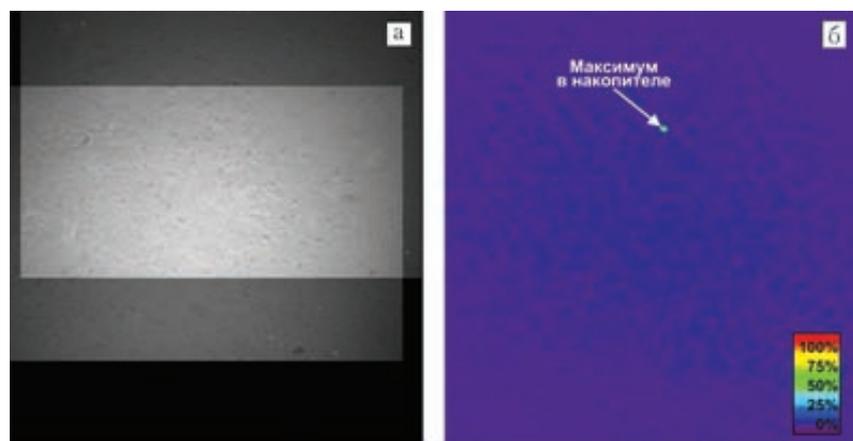


Рис. 5. Результаты определения смещения АНПА по фотоснимкам: а – совмещенная последовательность двух кадров; б – состояние накопителя

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм, позволяющий определить факт наличия и координаты эталонного объекта (заданного своими границами) на фотоизображении морского дна. К достоинствам алгоритма следует отнести низкую ресурсоемкость, т.к. производится всего два цикла перебора по ключевым точкам (или отрезкам) шаблона и снимка. Данная особенность позволяет использовать алгоритм на борту АНПА в режиме реального времени и обрабатывать не менее одного кадра в секунду для идентификации объектов и/или определения траектории аппарата. Результаты постобработки реальных изображений морского дна позволяют с уверенностью говорить о возможности применения алгоритма для решения задач навигации и управления АНПА. Дальнейшее направление работ видится в интеграции алгоритма в систему технического зрения подводных роботов и проведении морских испытаний. К перспективам развития можно отнести использование цветовой составляющей фотоизображений и применение данного алгоритма для обнаружения объектов на гидроакустических снимках.

В заключение автор выражает признательность коллегам из ИПМТ ДВО РАН: Воронцову А.В. за многочисленные обсуждения, исходные данные и изготовление макета подводного маркера; Инзарцеву А.В. и Киселеву Л.В. за ценные замечания, дополнения и помощь при подготовке работы к печати. А также другим сотрудникам ИПМТ ДВО РАН, причастным к разработке аппаратов и морским испытаниям, чей вклад, так или иначе, был использован в данной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инзарцев А.В., Павин А.М. Интегрированная система технического зрения и управления АНПА для поиска и обследования протяженных кабельных линий // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 4. С. 15–20.

2. Воронцов А.В., Кушнерик А.А., Щербатюк А.Ф. Некоторые алгоритмы приведения малого АНПА к донной станции в ближней зоне на основе обработки визуальной информации // Технические проблемы освоения мирового океана: материалы третьей всерос. науч.-техн. конф. Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 399–404.

3. Борейко А.А., Воронцов А.В., Кушнерик А.А., Щербатюк А.Ф. Алгоритм обработки видеоизображений для решения некоторых задач управления и навигации автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. 2010. № 1(9). С. 29–39.

4. Павин А.М. Идентификация подводных протяженных объектов на акустических снимках гидролокатора бокового обзора // Приборы. 2009. № 12. С. 43–50.

