

УДК 551.46.077:629.584

# АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА НАД ОБЪЕКТАМИ МОРСКОГО ДНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОТОИЗОБРАЖЕНИЙ

**В.В. Костенко, А.М. Павин**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Институт проблем морских технологий ДВО РАН»<sup>1</sup>

Стабилизация подводных аппаратов над объектами морского дна находит применение во многих прикладных задачах в современной морской индустрии. Решение данной задачи без использования визуальных ориентиров ведет к накоплению ошибки счисления и как следствие – плавному дрейфу аппарата в сторону накопленной ошибки. Цель работы – обосновать структуру и алгоритмы программного обеспечения, предназначенного для удержания подводного аппарата над объектами морского дна в автоматическом режиме. Исходной информацией для удержания служит последовательность цифровых фотоизображений донного объекта, получаемая от видеосистемы аппарата-робота. В качестве объектов морского дна могут выступать любые объекты произвольной формы. Таким образом, задача определения смещения аппарата по последовательности двух изображений сводится к задаче распознавания, где опорный кадр представляет собой искомым объект (шаблон), который необходимо обнаружить на текущем фотокадре и определить его параметры. Применяемый алгоритм распознавания использует ключевые точки на изображении и накопитель Хаффа. Для устранения колебаний в продольном и поперечном направлениях относительно распознанного объекта используются показания доплеровского лага. Применяемые в системе стабилизации алгоритмы управления и распознавания обладают низкой ресурсоемкостью, что позволяет использовать их на борту аппарата в автономном режиме. Проведенные морские испытания подтвердили работоспособность алгоритмов и программного комплекса в целом.

## ВВЕДЕНИЕ

К практическим задачам, связанным со стабилизацией подводного аппарата над объектами морского дна, можно отнести:

- задачи по проведению поисково-обследовательских работ с помощью телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА), где зачастую необходимо зависание аппарата над выбранным объектом для проведения тщательного визуального осмотра [1];
- аналогичные задачи, связанные с поиском и обследованием донных объектов с помощью автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), что также связано с необходимостью зависания и удержания робота над интере-

сующим объектом для проведения фотосъемки объекта поиска с разных ракурсов [2];

- задачи автоматической подводной стыковки АНПА со спускаемым устройством или донной станцией с использованием визуальных ориентиров [3];
- задачи стабилизации телеуправляемого аппарата над интересующими объектами во время обследования мест катастроф;
- задачи удержания аппарата в заданной точке в условиях течения (фото-якорь);
- задачи обследования корпусов судов, подводных пирсов, коммуникаций и др.

Так, при удержании автономного или телеуправляемого аппарата над определенным донным

объектом без использования визуальных ориентиров возникает ошибка счисления местоположения, обусловленная неточностью измерений скорости перемещения аппарата. Поскольку доплеровский лаг имеет погрешность измерения не менее одного-двух миллиметров за секунду, то счисленная траектория за 10 минут работы накопит ошибку не менее 60–120 см, что сопоставимо с физическим размером фотокадра на поверхности дна. Кроме того, для проведения подобной стабилизации необходимо наличие на борту аппарата доплеровского лага, что не всегда оправдано по конструктивным требованиям. Еще одним

<sup>1</sup> 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.: (423) 2432416. E-mail: pavin@bk.ru, kostenko@marine.febras.ru.

примером применения стабилизации аппарата по визуальным ориентирам служит задача сплошного фотопокрывтия района дна с целью получения мозаичированного изображения некоторого участка для составления фотоплана местности. При решении данной задачи аппарат должен двигаться галсами, обеспечивающими перекрытие фотоизображений, и стабилизироваться только в поперечном направлении, а в продольном – осуществлять перемещения со скоростью около половины кадра за период съемки.

Задачу стабилизации аппарата можно разделить на две основные подзадачи: 1) вычисление смещения аппарата за период съемки относительно предыдущего или опорного кадра; 2) выработка управляющих воздействий на движительно-рулевой комплекс с целью стабилизации аппарата в заданной точке. Каждая из этих подзадач имеет свое алгоритмическое решение и может быть реализована в виде отдельной программы или группы программ, работаю-

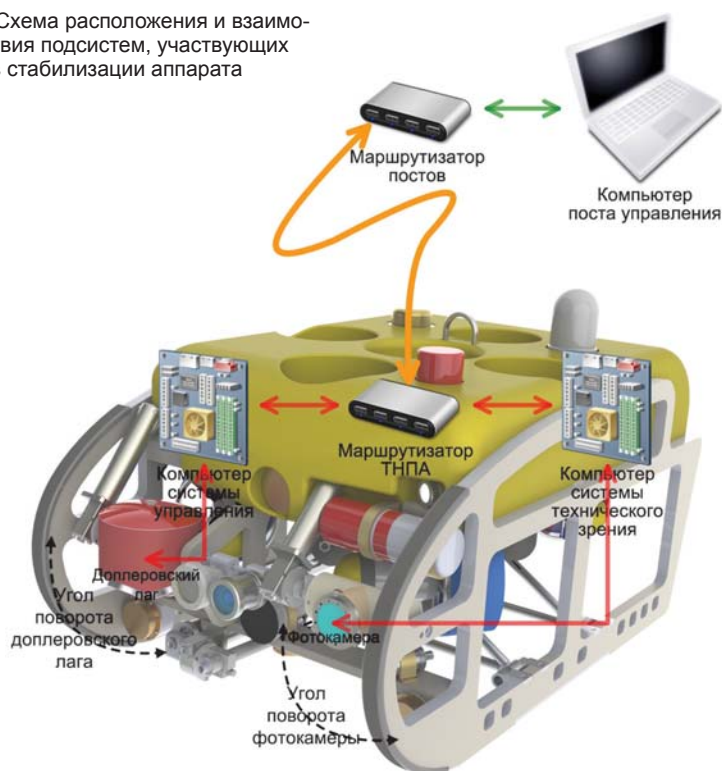
щих на компьютерах подводного аппарата или на компьютере поста управления. На рис. 1 представлена схема расположения и информационного взаимодействия ЭВМ одного из телеуправляемых аппаратов, разработанных в ИПМТ ДВО РАН. Особенностью данного аппарата является наличие отдельного компьютера системы технического зрения, который позволяет решать ресурсоемкие задачи, связанные с обработкой телевизионных и акустических изображений, распознаванием образов, конвертированием и сохранением получаемых данных в режиме реального времени. Локальная вычислительная сеть ТНПА организована таким образом, что все программные модули на всех компьютерах могут взаимодействовать друг с другом путем передачи данных по сети *Ethernet*. Для передачи данных используется специально разработанный механизм обмена сообщений на основе протокола *UDP*. Подобное решение позволяет рационально распределить вычислительные

мощности ЭВМ аппарата и минимизировать информационный поток по локальной сети. Например, при решении ресурсоемких задач, связанных с обработкой телевизионных и акустических изображений, можно использовать компьютер системы технического зрения для анализа больших массивов поступающих данных (при этом трафик сети увеличивается только на пересылку небольшого пакета результатов обработки), а компьютер системы управления – для планирования траектории и выработки управляющих воздействий на движительно-рулевой комплекс (ДРК). Однако в случае, если данные системы технического зрения вынужденно пересылаются по сети (например, на компьютер поста управления для отображения на пульте оператора), то логично задействовать вычислительные мощности компьютера – приемника данных. Таким образом, можно распределить задачу обработки изображений на несколько ЭВМ, проведя предварительную обработку входных данных на компьютере системы технического зрения (при этом размер данных, как правило, уменьшается за счет масштабирования исходного изображения), а решение задачи распознавания переложить на более мощный компьютер поста оператора.

## ■ Организация взаимодействия программных модулей

Описанная во введении архитектура аппаратного комплекса ТНПА предоставляет большие возможности по конфигурированию программного обеспечения под конкретные задачи путем распределения отдельных программных модулей на разных узлах сети аппарата и внешних компьютерах. При разработке программного

Рис. 1. Схема расположения и взаимодействия подсистем, участвующих в стабилизации аппарата



обеспечения стабилизации подводного аппарата над объектами морского дна преследовалась цель написания комплекса программ, способных функционировать на борту как телеуправляемого, так и автономного необитаемого подводного робота. При этом предъявлялось требование минимизации сетевого трафика между компьютерами АНПА и способности функционирования в режиме реального времени на ЭВМ с невысокой вычислительной мощностью (около 300–500 МГц), что связано с энергетическими и конструктивными ограничениями подводных аппаратов. В связи с этим программная реализация задачи была выполнена в виде отдельных программных модулей, обменивающихся данными между собой и способных функционировать на разных компьютерах локальной вычислительной сети подводного робота (в зависимости от конфигурации аппарата, наличия или отсутствия отдельного компьютера системы технического зрения, мощности ЭВМ и их загрузки).

Таким образом, конфигурация программного обеспечения, необходимого для решения задачи стабилизации, состоит из следующих основных модулей (см. рис. 2):

1) драйвер фотосистемы – обеспечивает взаимодействие с камерой подводного аппарата, предварительную обработку, масштабирование изображения и сохранение полученных снимков на жестком диске;

2) драйвер компаса – является частью подсистемы навигационно-пилотажных датчиков и предоставляет в систему управления измененные значения магнитного или гироскопического курса (может быть заменен инерциальной навигационной системой);

3) драйвер доплеровского лага – измеряет скорости под-

водного аппарата относительно грунта и участвует в формировании численной траектории подводного робота;

4) драйвер блока управления двигателями – формирует управляющие коды на движительно-рулевой комплекс (ДРК) аппарата;

5) навигационная система – комплексирует данные от всех навигационных устройств и рассчитывает координаты подводного робота;

6) регуляторы движения – выполняют управление аппаратом путем удержания целевых величин (курса, крена, дифферента, высоты/глубины и координат);

7) интерфейс управления – предназначен для подачи команд начала/окончания стабилизации, выбора нового опорного кадра (шаблона) и отображения текущих фотоизображений в случае необходимости;

8) программа распознавания фотоизображений – сравнивает текущий снимок фотосистемы со снимком, сделанным в момент подачи команды зависания (шаблоном), и определяет смещение текущего кадра относительно шаблона;

9) агент управления – формирует управление подводным аппаратом в зависимости от текущих и накопленных данных распознавания.

Регуляторы движения всегда располагаются на компьютере системы управления АНПА или ТНПА, т.к. участвуют в высокоскоростном управляющем цикле, включающем:

- сбор данных от сенсорных устройств – компас, датчики угловых положений, доплеровский лаг и др.;

- расчет демпфирующих управляющих воздействий – дифференциальная составляющая в контуре управления, пропорциональная скорости аппарата;

- расчет пропорциональных управляющих воздействий исходя из смещения аппарата относительно распознанного кадра;

- расчет управляющих величин на каждый из двигателей исходя из конфигурации и мощности движительно-рулевого комплекса.

В свою очередь, программа распознавания фотоизображений может располагаться на компьютере системы технического зрения (при его наличии) или на компьютере поста управления (рис. 2). В первом случае сразу после съемки фотоизображение обрабатывается программой распознавания, затем обнаруженное смещение аппарата передается на компьютер системы управления в виде сообщения агенту управления. При этом нет необходи-

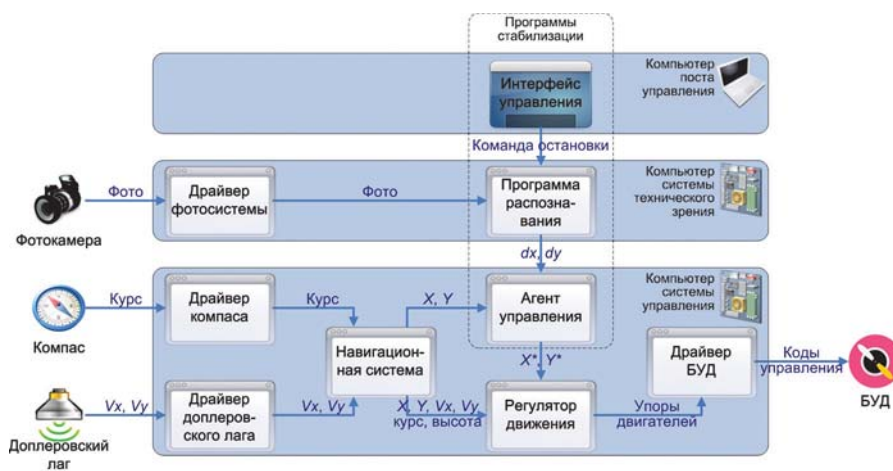


Рис. 2. Взаимодействие программных модулей

мости пересылки фотокадров по сети аппарата и на компьютер поста управления. При размещении программы распознавания на компьютере поста оператора нагрузка на сеть несколько увеличивается, но появляется возможность интерактивного вмешательства в процесс управления во время стабилизации аппарата. Примером может служить выбор нового опорного кадра для стабилизации и указание на нем конкретной точки или объекта стабилизации. Кроме того, компьютеры, находящиеся на самом аппарате, как правило, обладают меньшей вычислительной мощностью в сравнении с компьютерами, предназначенными для слежения и управления аппаратом. Связано это в первую очередь с техническими решениями проблемы охлаждения центрального процессора компьютера на подводном аппарате.

### ■ Обработка изображений и распознавание

Снимок с камеры, поступающий на драйвер фотосистемы, представляет собой развертку строк принимающей матрицы. Для того чтобы перевести его в двумерный массив яркостей (удобный для обработки алгоритмом распознавания), необходимо проделать ряд процедур, связанных со спецификой получения фотоизображений. Последовательность строк черно-белой ка-

меры достаточно просто переводится в двумерный массив. Для этого достаточно знать ширину изображения в пикселях, тогда остаток от деления координаты ячейки на ширину изображения будет равен координате  $X$  (вправо) пикселя, а целое от деления – координате  $Y$  (вниз). Масштабирование такого изображения производится простым объединением ячеек размером  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$ ,  $4 \times 4$  и т.д. с расчетом среднего арифметического значения, которое и представляет собой усредненную яркость нового объединенного пикселя.

Для цветных камер последовательность ячеек связана с чередованием красного, зеленого и синего цветов в определенном порядке. На рис. 3 представлена последовательность красный–зеленый (четные строки) и зеленый–синий (нечетные). Узнать цвет каждого пикселя можно путем интерполяции соответствующих цветов ячеек в скользящем окне не менее  $2 \times 2$ , однако для решения задачи распознавания значения цвета в каждой ячейке матрицы не требуется. Поскольку разрешение матрицы, как правило, сопоставимо или более  $1000 \times 1000$  точек, а для распознавания требуется порядка  $300 \times 300$  пикселей, следовательно, исходное изображение необходимо масштабировать в сторону уменьшения разрешающей способности. Для уменьшения количества операций при масштабировании и получения изображения максимально возможного качества масштабирование имеет смысл производить в целое число раз, объединяя ячейки размером  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$  и т.д. Таким образом, яркость  $F_{i,j}^{RGB}$  каждого канала ( $R$  – красный,  $G$  – зеленый,  $B$  – синий) пикселя с координатами  $[i,j]$  конечного изображения можно получить по формуле:

$$F_{i,j}^{RGB} = \frac{\sum_{m=0}^K \sum_{n=0}^K (W_{m,n}^{RGB}(K) E_{Ki+m, Kj+n}^{RGB})}{\sum_{m=0}^K \sum_{n=0}^K W_{m,n}^{RGB}(K)}, \quad (1)$$

где  $E^{RGB}$  – яркость исходного пикселя изображения (нумерация во всех массивах ведется от нуля);  $K$  – масштаб уменьшения изображения;  $W^{RGB}$  – матрица весов, соответствующая последовательности чередования цветов в ячейках матрицы.

Матрица весов  $W^{RGB}(K)$  определяется для каждого цвета, масштаба и цветовой последовательности строк матрицы фотокамеры индивидуально. Если веса подбирать в такой пропорции, чтобы их сумма для каждого цвета была равна единице, то знаменатель в формуле (1) сократится. Например, для  $K=2$  матрицы весов будут следующие (см. рис. 3):

$$\begin{aligned} W^R(2) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ W^G(2) &= \begin{bmatrix} 0 & 0,5 \\ 0,5 & 0 \end{bmatrix}, \\ W^B(2) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

После расчета массивов яркости каждого канала масштабированного изображения ( $F_{i,j}^R$ ,  $F_{i,j}^G$ ,  $F_{i,j}^B$ ) производится выделение ключевых элементов на распознаваемом изображении. В качестве ключевых элементов выбирается фиксированное количество наиболее контрастных точек (от нескольких сотен до нескольких тысяч, в зависимости от производительности ЭВМ и периода обновления кадров). Выбор наипростейших ключевых элементов на снимке (точек) для определения смещения одного кадра относительно другого достаточен в случае, если известны масштаб и поворот изо-



Рис. 3. Объединения ячеек матрицы фотокамеры в пиксели (цифрами указаны веса соответствующего цвета в пикселе): а – размером  $2 \times 2$ ; б – размером  $3 \times 3$

бражения. При решении задачи стабилизации поворот снимка всегда может быть вычислен из показаний компаса, а масштаб – путем измерения высоты над грунтом. Наиболее контрастные точки определяются путем отбора точек изображения с максимальной величиной градиента [4]. Блок-схема алгоритма распознавания, содержащая расчет карты градиентов и отбор наиболее контрастных точек, приведена на рис. 4.

Определение смещения аппарата производится с помощью сопоставления ключевых точек шаблона и текущего изображения. Предполагается, что все правильно сопоставленные точки дадут одинаковый вектор перемещения подводного аппарата относительно опорного кадра. Неверно сопоставленные ключевые точки дадут различные, относительно редко совпадающие перемещения. Для определения истинного смещения аппарата использовался метод, основанный на преобразовании Хаффа [5]. Суть метода состоит в создании многомерного накопителя, каждая ячейка которого определяет состояние распознанного объекта – смещение по двум координатам, масштаб и поворот (если необходимы). Для каждой сопоставленной пары точек изображения и шаблона рассчитывается смещение и увеличивается соответствующая ячейка. Координаты ячейки с наибольшим значением веса соответствуют параметрам смещения. Для оценки надежности алгоритма можно проанализировать состояние накопителя во время идентификации объекта. Если в накопителе имеется явно выраженный максимум, соответствующий смещению аппарата, и его значение в разы превышает величины в других ячейках, то можно говорить о надежном распознавании искомого объек-

та. Блок-схема алгоритма расчета смещения изображения относительно опорного кадра приведена на рис. 4. Подробнее о методе распознавания, использованного для расчета смещения изображения, см. [6].

#### ■ Управление аппаратом во время стабилизации

Для управления аппаратом необходимо знание о местоположении объекта, над которым происходит стабилизация. Оценку местоположения можно производить не только по текущим и накопленным данным распознавания в предыдущие моменты времени. Такой подход позволяет в случае отсутствия текущей информации о взаимном расположении объекта и аппарата, например, из-за появившихся посторонних объектов (заплывшая в кадр рыба или морская

травя), воспользоваться накопленными данными для краткосрочного удержания аппарата в заданной точке.

Для расчета усредненного местоположения опорного кадра (рис. 5) в пространстве использовалась методика, аналогичная обнаружению протяженного объекта по данным сенсорных систем [7]. Показателем наличия опорного кадра на текущем изображении в момент времени  $t$  является величина  $p_t^{<n>}$ . Для учета данных, предшествующих текущему моменту времени, производится их накопление по следующей формуле:

$$q_t = k \cdot q_{t-1} + (1-k) \cdot p_t, \quad (3)$$

где  $q_t$  – суммарная величина контактов (кадров, где был идентифицирован опорный кадр) к моменту времени  $t$ ;  $k$  – коэффициент затухания («забывания» информации).

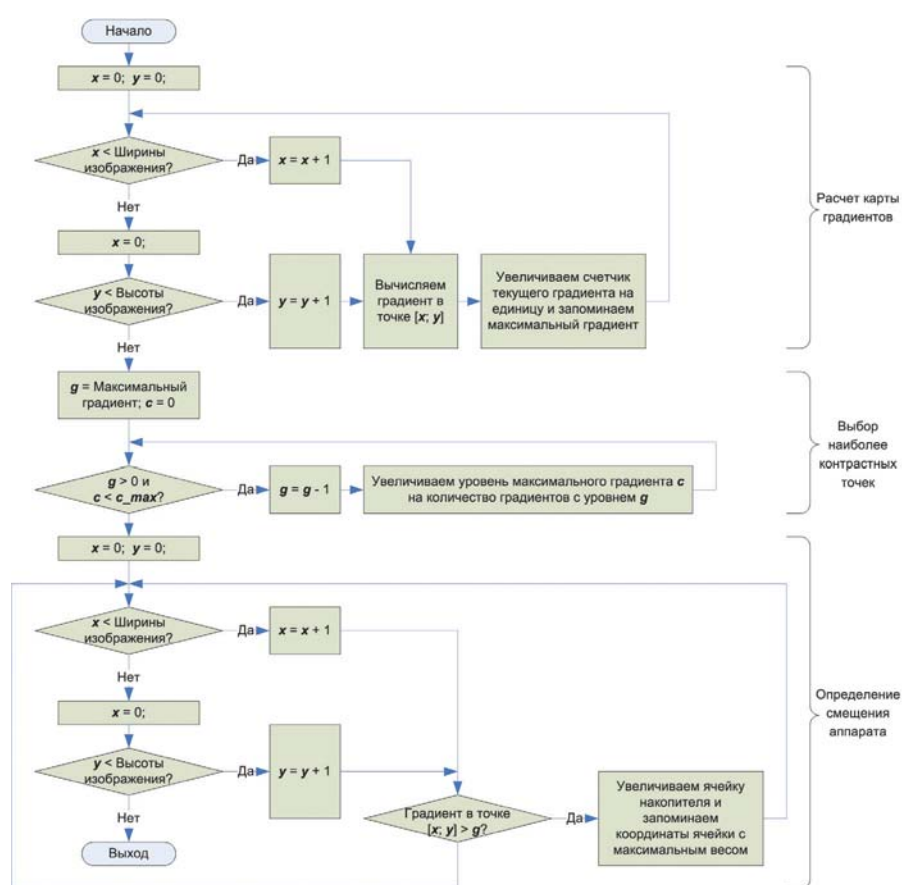


Рис. 4. Блок-схема алгоритма определения смещения аппарата по последовательности фотоизображений

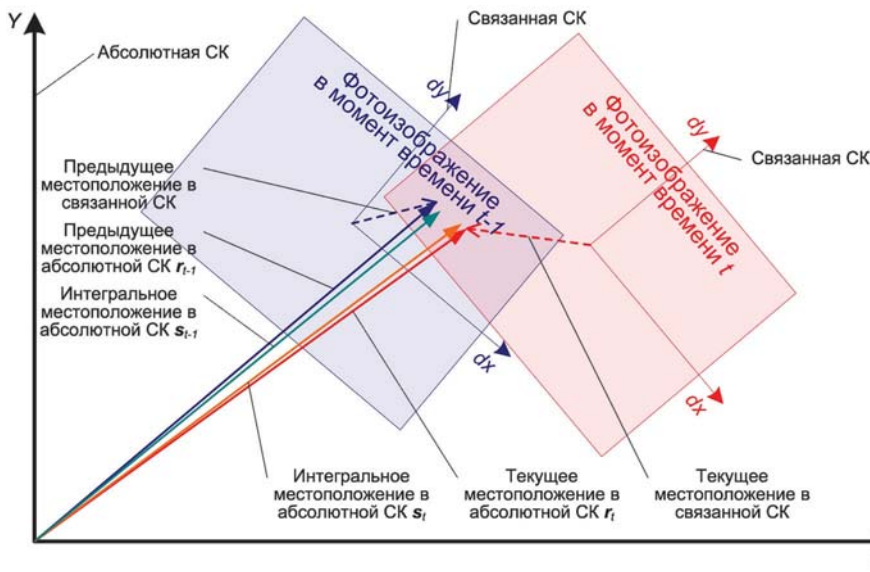


Рис. 5. Определение усредненного (интегрального) местоположения объекта

Коэффициент  $k$  лежит в пределах  $(0, 1)$  и подбирается с учетом характеристик распознающей системы. В свою очередь, интегральная оценка местоположения опорного кадра в пространстве  $s_t$  рассчитывается исходя из текущего распознанного местоположения  $r_t$  и интегральной оценки в предыдущий момент времени  $s_{t-1}$ :

$$\bar{s}_t = \frac{1}{q_t} \cdot (k \cdot q_{t-1} \cdot \bar{s}_{t-1} + (1-k) \cdot p_t \cdot \bar{r}_t). \quad (4)$$

Таким образом, для выработки управления на движительно-рулевой комплекс аппарата рассчитывается смещение его фотокамеры относительно точки распознанного интегрального местоположения опорного кадра  $s_t$  и применяется пропорционально-дифференциальный (ПД) регулятор с насыщением. Пропорциональные составляющие характеризуются отклонением камеры от точки  $s_t$  и ограничены некоторой константой, а дифференциальные составляющие вычисляются исходя из продольной и поперечной скоростей по данным доплеровского лага (при его наличии). Управление по угловым степеням свободы производится также с помощью ПД-регулятора, при этом стабилизируются заданный курс, нулевой крен и нулевой дифферент. Полученный после применения ПД-регуляторов вектор упоров матрицируется с учетом расположения (и направления) двигателей и передается в драйвер движительно-рулевого комплекса (см. рис. 2).

На рис. 6 приведена структурная схема регулирования движения подводного аппарата во время стабилизации

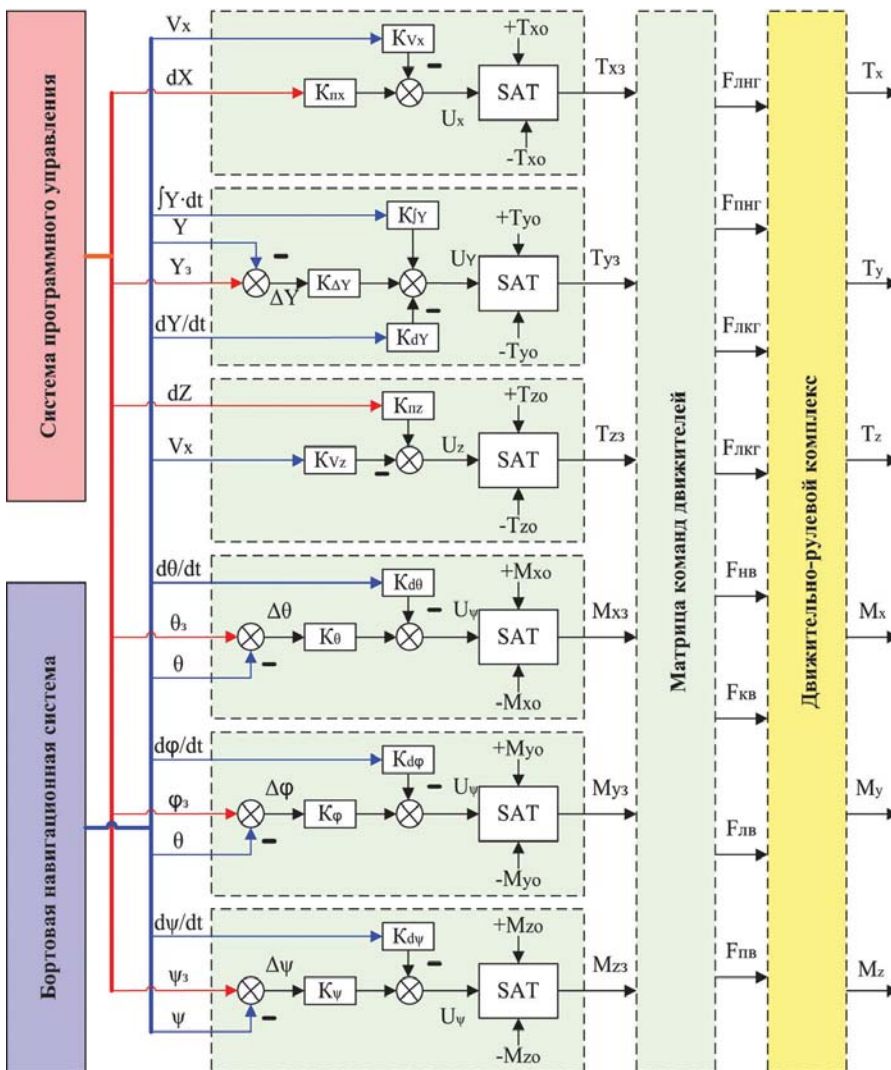


Рис. 6. Структурная схема регулирования движения подводного аппарата во время стабилизации

$Y_3$  – заданная вертикальная координата (глубина или высота);  
 $\varphi_3$  – заданный курс аппарата;  
 $\theta_3$  – заданный крен;  
 $\psi_3$  – заданный дифферент;  
 $dX$  – заданное рассогласование по продольной оси;  
 $dZ$  – заданное рассогласование по поперечной оси аппарата.

Кроме того, регуляторам необходимы аналогичные текущие значения регулируемых величин, которые формируются бортовой навигационной системой и участвуют в формировании выходного сигнала регуляторов:  $Y$ ,  $dY/dt$ ,  $\int Y \cdot dt$ ,  $\varphi$ ,  $d\varphi/dt$ ,  $\theta$ ,  $d\theta/dt$ ,  $\psi$ ,  $d\psi/dt$ . На основании полученных данных регуляторы формируют заданные значения управляющих воздействий с учетом ограниченных характеристик движителей. Далее вектор заданных управляющих сил и моментов распределяется между движителями движительно-рулевого комплекса в соответствии с матрицей, учитывающей количество движителей и компоновочную схему их размещения на аппарате. Обработка движителями команд управления формирует управляющие воздействия в соответствии со значениями, назначенными регуляторами каналов управления. Использование регулировки ограничений сигналов на выходе регуляторов позволяет исключить эффект насыщения движителей и обеспечить независимость каналов управления, а также максимально использовать эффективность движительно-рулевого комплекса во всех режимах работы аппарата.

### ■ Результаты морских испытаний

На рис. 7 представлены результаты расчета смещения аппарата по двум последовательным фото-

снимкам, полученным телеуправляемым подводным аппаратом в одном из запусков. Карты градиентов шаблона и изображения представлены яркостно-цветовой палитрой (верхнее и среднее изображения по центру), где яркость пропорциональна величине модуля градиента, а цвет (тональность) определяет его направление. Можно видеть, что контуры объекта на обоих фотоснимках достаточно ярко выражены и точки, входящие в контур, имеют приблизительно одинаковые направления градиента. Среди множества точек отображена тысяча наиболее контрастных для каждого снимка (два верхних правых изображения).

После применения процедуры распознавания точки шаблона совмещаются с границами исходного изображения (левое нижнее изображение) и явно выраженный максимум наблюдается в двумерных срезах четырехмерного накопителя (центральное и правое изображения снизу). Четырехмерный

накопитель использовался для вычисления смещения по двум осям и уточнения масштаба и поворота в небольших пределах. Явно выраженный максимум в накопителе свидетельствует о высокой степени уверенности в правильном сопоставлении изображения и шаблона, т.к. в данном месте накопителя (пространстве признаков) сконцентрировано наибольшее количество совпадающих сопоставлений.

На рис. 8 приведены результаты испытаний системы стабилизации на одном из телеуправляемых аппаратов, разработанных в ИПМТ ДВО РАН. Период съемки телевизионной системой данного аппарата составил 2 секунды. На графиках отображены изменения численных координат (рис. 8, а) и смещения аппарата по данным фотосистемы (рис. 8, б) в течение первых трех с половиной минут стабилизации. За общее время зависания ТНПА над грунтом, которое составило более получаса,

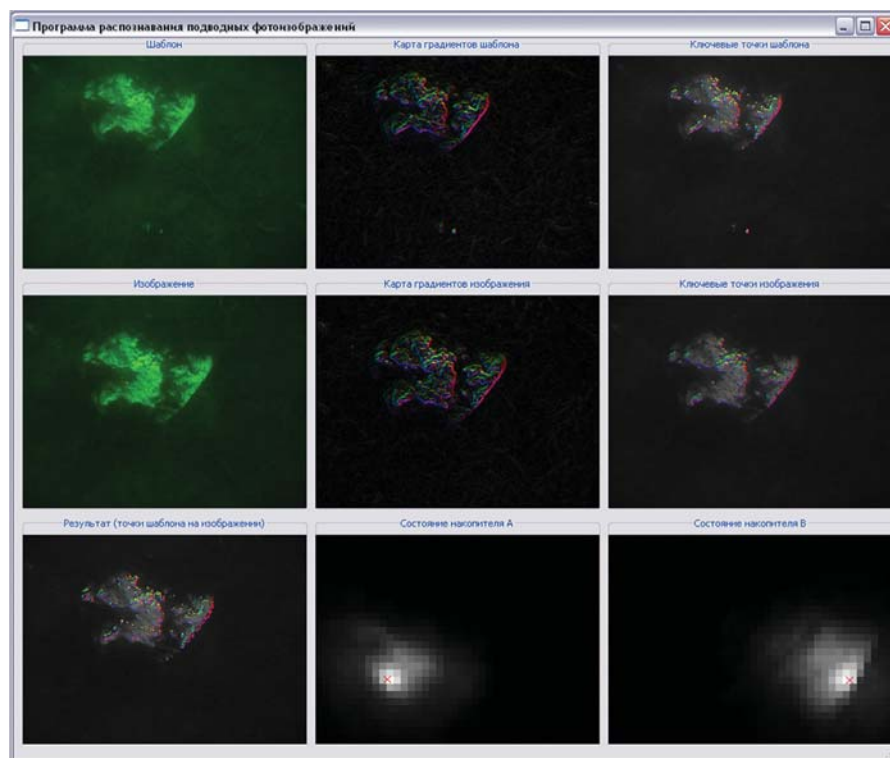


Рис. 7. Скриншот программы определения смещения аппарата по фотоснимкам

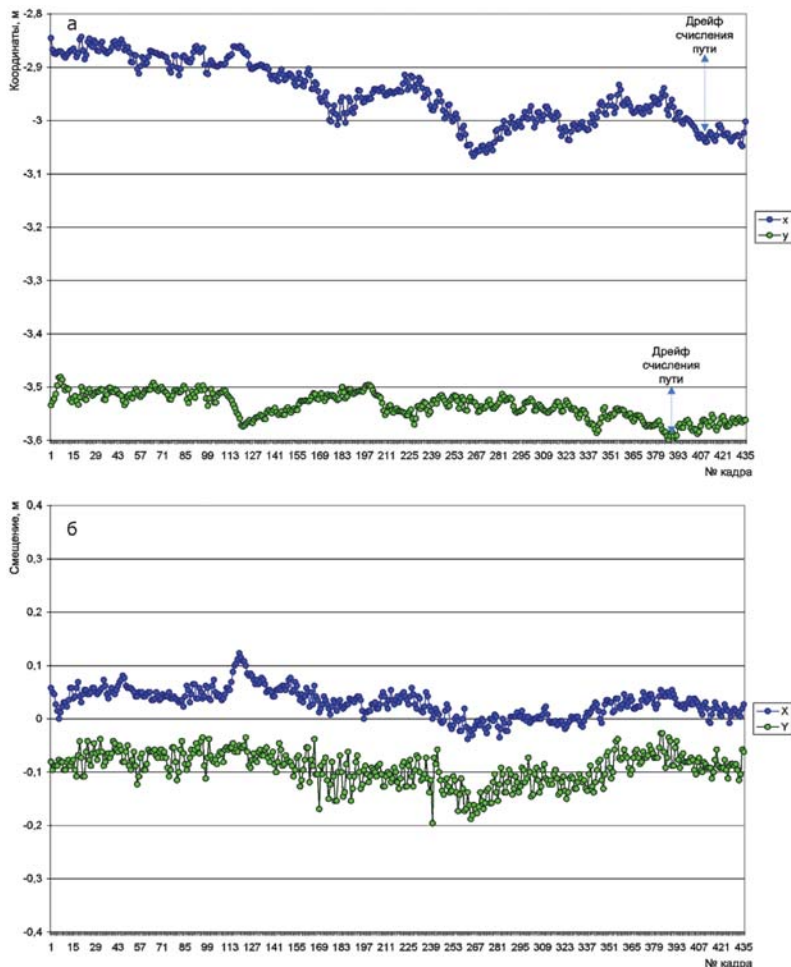


Рис. 8. Смещение аппарата: а – по счислению пути на основе доплеровского лага; б – по данным фотосистемы

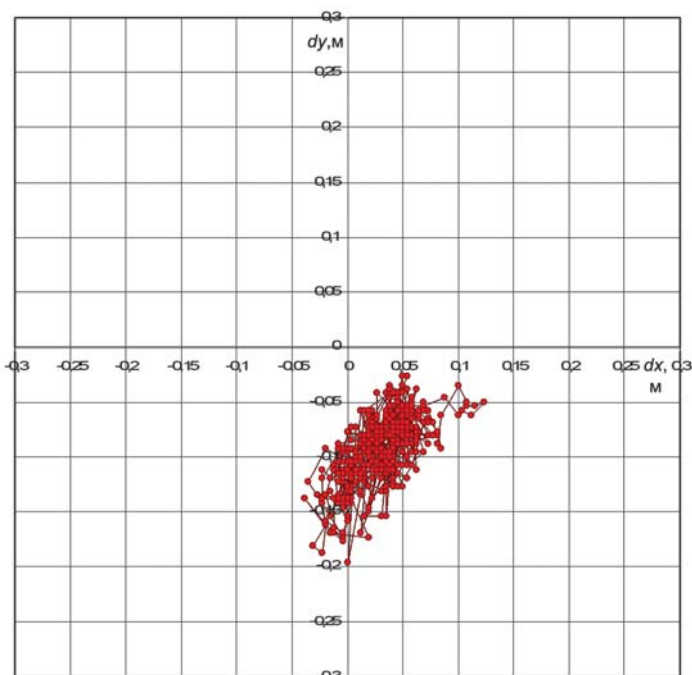


Рис. 9. Относительные координаты ТНПА во время стабилизации по данным фотосистемы

аппарат ни разу не потерял из поля зрения выбранную для стабилизации точку на поверхности дна. Можно видеть, что за первые три с половиной минуты стабилизации аппарат накопил существенную погрешность в счислении пути (рис. 8, а): около 20 см по координате  $x$  (географическая широта в метрах от условной точки) и около 5 см по координате  $y$  (долгота).

При этом смещение аппарата по данным фотосистемы (рис. 9) с установленным алгоритмом распознавания опорного кадра в среднем около 5–10 см и не имеет накапливающегося тренда. Небольшое статичное отклонение по оси  $Y$  (вправо относительно продольной оси аппарата) объясняется наличием течения в районе работ, неровностями динамики самого аппарата и движительно-рулевого комплекса. Статичная составляющая (как в продольном, так и в поперечном смещениях аппарата относительно выбранной на грунте точки стабилизации) может быть легко убрана применением интегральной составляющей в законе управления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан комплекс программ, предназначенный для обеспечения автоматического удержания подводного аппарата над выбранным объектом на поверхности дна. В качестве исходных данных используются фотоизображения малокадрового телевидения с периодом съемки 2 секунды, что позволяет стабилизировать подводный робот вблизи грунта без накопления погрешности в смещении аппарата. Для устранения колебаний относительно объекта зависания в продольном и поперечном направлениях используются показания доплеровского лага. Применяемые в системе ста-



билизации алгоритмы управления и распознавания обладают низкой ресурсоемкостью, что позволяет их использовать на борту аппарата в автономном режиме. Проведенные морские испытания подтвердили работоспособность алгоритмов и программного комплекса в целом. В дальнейшем планируется установка данного комплекса на большинство разрабатываемых в

ИПМТ ДВО РАН аппаратов, предназначенных для решения задач обследовательского характера. К перспективам развития комплекса можно отнести доработку графического интерфейса программы стабилизации с целью реализации интерактивного режима управления аппаратом относительно грунта. Предполагается, что применение описанного алгоритма

распознавания позволит составлять мозаичированную фотокарту рельефа дна в режиме реального времени и управлять аппаратом путем указания целевой точки на этой карте.

Авторы выражают свою благодарность А.А. Кушнерику за помощь в подготовке иллюстративного материала и проведении натурального эксперимента.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ваулин Ю.В., Костенко В.В., Павин А.М. Особенности навигационного и алгоритмического обеспечения телеуправляемого необитаемого подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. 2013. №16. С. 4–16.
2. Инзарцев А.В., Павин А.М., Багницкий А.В. Планирование и осуществление действий обследовательского подводного робота на базе поведенческих методов // Подводные исследования и робототехника. 2013. №15. С. 4–15.
3. 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 3-й Всерос. науч.-техн. конф., Владивосток, 22–25 сент. 2009 г. Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 399–404.
4. 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.
5. Павин А.М. Идентификация подводных протяженных объектов на акустических снимках гидролокатора бокового обзора // Приборы. 2009. №12. С. 43–50.
6. Павин А.М. Идентификация подводных объектов произвольной формы на фотоснимках морского дна // Подводные исследования и робототехника. 2011. №12. С. 26–30.
7. 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.

