

УДК 551.46.077:629.584

ОСОБЕННОСТИ НАВИГАЦИОННОГО И АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Ю. В. Ваулин, В. В. Костенко,
А. М. Павин

Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹

Представлена система бортового управления и навигации (СБУН), которая обеспечивает режимы движения телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА), необходимые при идентификации донных целей, а также инспекции гидротехнических сооружений и корпусов кораблей. Приведены результаты натурных испытаний данной системы в составе ТНПА разработки ИПМТ ДВО РАН.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективным способом выполнения поисковых и инспекционных работ под водой является использование комплекса, состоящего из автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) и ТНПА. При этом целесообразно последовательное использование аппаратов «АНПА–ТНПА» с координированием их движения в общем поле маяков гидроакустической навигационной системы с длинной базой (ГАНС ДБ).

Типовой сценарий идентификации донной цели с известными географическими координатами состоит из следующих этапов:

- вывод ТНПА по поверхности в окрестность цели по данным спутниковой навигационной системы;
- заглупление аппарата и выход к цели по данным от маяков ДБ ГАНС района работ;
- допоиск цели в ходе обзорно-поисковой съемки дна с помощью гидролокатора секторного обзора (ГСО);

- наведение по ГСО до визуального контакта с целью;

- детальное обследование донной цели с помощью ГСО, видеокамер и фотосистемы.

Увеличение производительности инспектирования гидротехнических сооружений и бездокового освидетельствования корпусов кораблей требует выполнения следующих операций:

поступательное движение ТНПА вдоль корпуса корабля на заданной дальности обследования со стабилизацией углового положения по сигналам от эхолокационной системы (ЭЛС), доплеровского лага (ДЛ) и навигационных датчиков СБУН;

определение координат ТНПА относительно корпуса обследуемого корабля на основании данных от ДЛ на поворотной платформе и ЭЛС;

гидроакустическая съемка поверхности корпуса корабля ГСО;

фото- телевизионная съемка поверхности корпуса корабля с регулированием угла наклона платформы фото-, телекамер

в продольно-вертикальной плоскости ТНПА;

определение координат перемещений ТНПА относительно объекта по данным цифровой фотосистемы;

передача на корабль-носитель в реальном времени информации, поступающей от видеокамер и ГСО, а также координат ТНПА относительно корпуса обследуемого корабля, определенных средствами СБУН.

Функциональная схема ТНПА, учитывающая требуемый набор систем, необходимых для реализации перечисленных сценариев работы, приведена на рис. 1.

■ Навигационное обеспечение ТНПА

По своему составу и характеристикам навигационную систему ТНПА целесообразно унифицировать с навигационной системой АНПА. Типовая навигационная система (НС)

¹ 690950, Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел./факс: (423) 2432416. E-mail: kostenko@marine.febras.ru

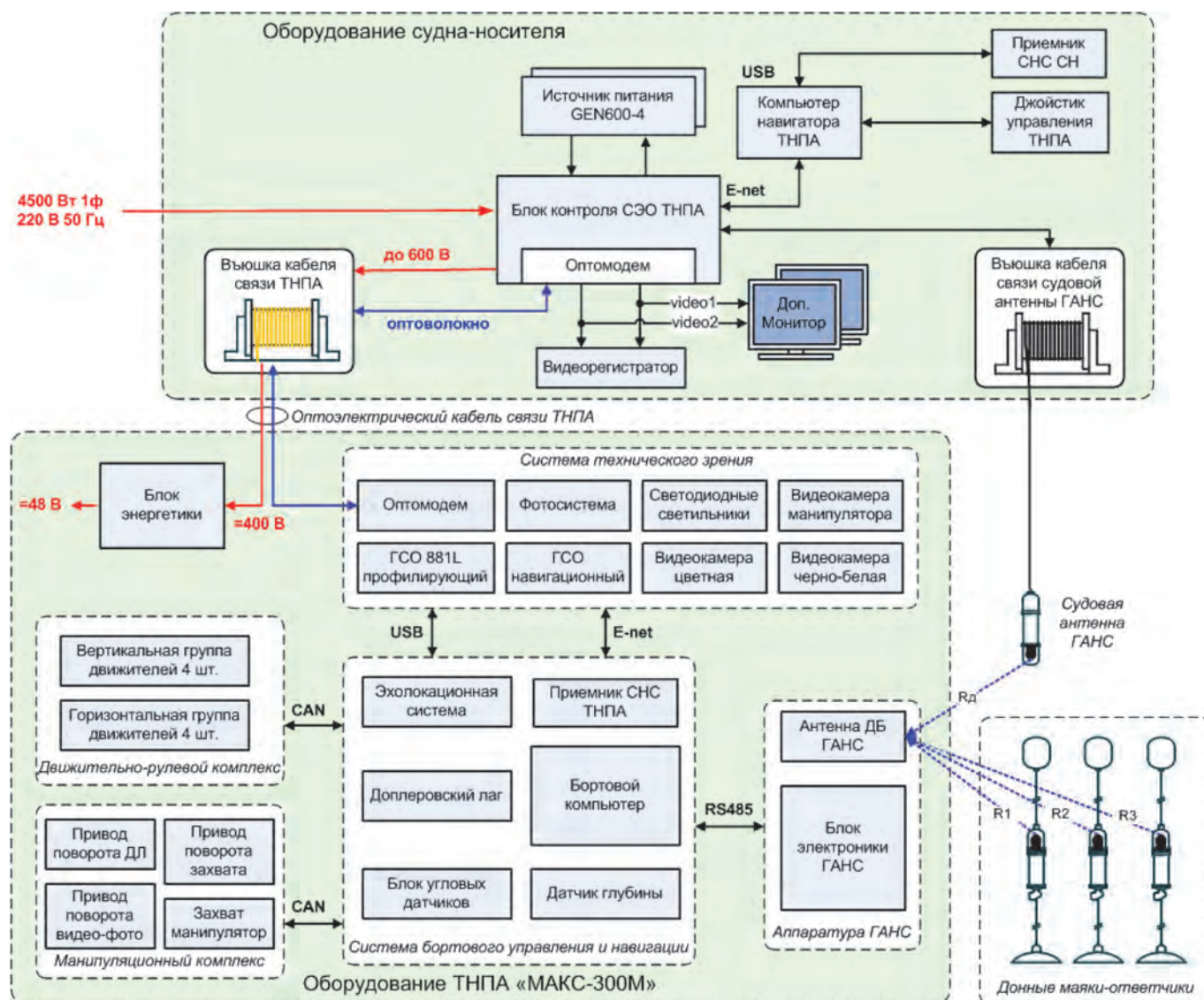


Рис. 1. Функциональная схема ТНПА «МАКС-300М»

ТНПА включает в себя магнитный компас, угловые датчики (крен, дифферент), датчики угловых скоростей (рыскание, крен, дифферент) и датчик глубины. Дополнительно в состав НС включены доплеровский лаг (ДЛ), что позволяет производить на борту ТНПА счисление координат, и эхолотационная система. Полный состав НС ТНПА приведен на рис. 2. Для привязки численных координат к географическим на ТНПА установлен приемник СНС. Наличие приемника СНС на борту ТНПА позволяет с высокой точностью подводить аппарат

к месту погружения по поверхности, например к координатам цели, полученным после ГБО съемки местности, произведенной АНПА.

Отличительной особенностью НС ТНПА «МАКС-300М» является наличие на борту приемопередатчика ГАНС ДБ. ТНПА имеет возможность работать в одном маяковом поле с АНПА. На основе информации об измеренных дальностях до маяков-ответчиков ГАНС ДБ на борту ТНПА осуществляется коррекция численных координат. Таким образом, на ТНПА «МАКС-300М» реализуются

алгоритмы комплексированной навигационной системы, что позволяет существенно повысить точность измерения координат на борту ТНПА и организовывать автоматическое приведение аппарата в точку с заданными географическими координатами.

Другой особенностью НС ТНПА является развитая эхолотационная система (ЭЛС). Развитая ЭЛС необходима, чтобы обеспечить возможность высокоточного позиционирования и координатной привязки данных измерений в ходе инспектирования донных соору-

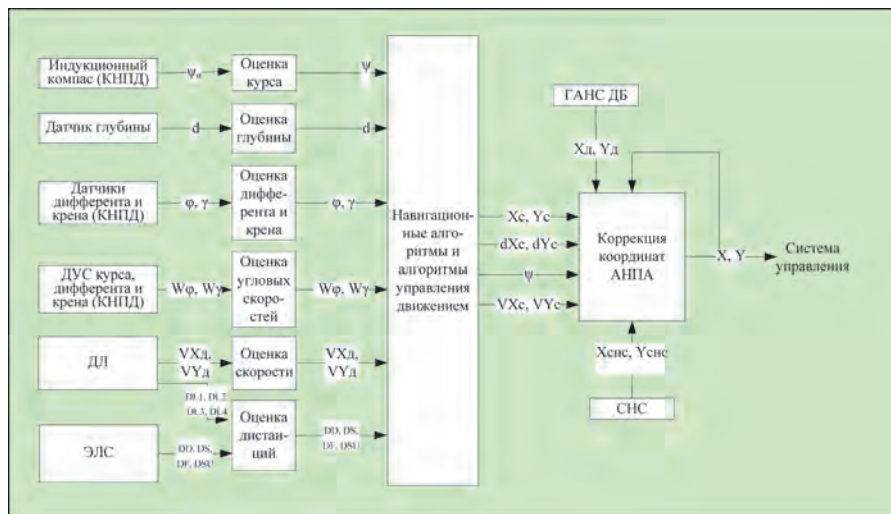


Рис. 2. Навигационная система ТНПА «МАКС-300М»

жений и корпусов судов. ЭЛС ТНПА «МАКС-300М» включает в себя четыре локатора. Кроме данных от ЭЛС в алгоритмах позиционирования ТНПА используются и данные от четырех антенн доплеровского лага.

На рис. 3–4 показана схема расположения лучей ЭЛС.

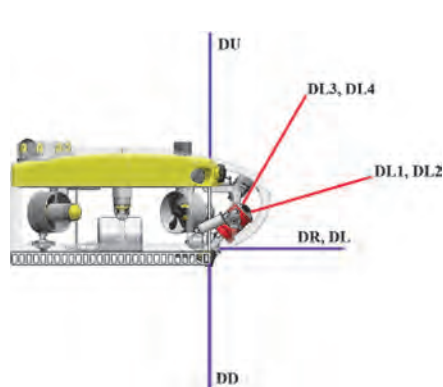


Рис. 3. Конфигурация лучей ЭЛС ТНПА (вид сбоку)

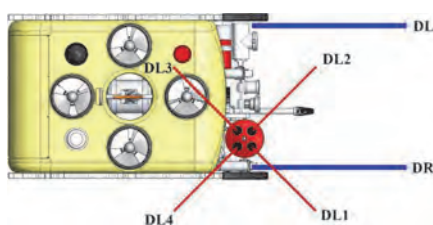


Рис. 4. Конфигурация лучей ЭЛС ТНПА (вид сверху, антенны ДЛ направлены вверх)

используется для стабилизации вертикального отстояния ТНПА от грунта как при обследовании донных объектов, так и при осмотре корпусов судов, причальных стен и пр.

Передние локаторы DR и DL предназначены для стабилизации горизонтального отстояния аппарата до осматриваемого объекта. В случаях бездокового освидетельствования судов очевидна невозможность применения магнитного компаса для стабилизации продольной оси аппарата по нормали к осматриваемой поверхности. На основе данных от этих локаторов можно вычислить угловое положение ТНПА в горизонте относительно осматриваемой вертикальной поверхности γ , а также среднюю дистанцию до нее D_a по очевидным соотношениям:

$$\gamma = \arctg \frac{DL - DR}{B_a}, \quad (1)$$

$$D_a = (DL + DR) / 2;$$

где B_a – расстояние между передними эхолотами.

Локатор DU предназначен для измерения дистанции вверх. Используется для организации движения ТНПА подолдом или в полостях. Локатор

DU устанавливается в специальном кронштейне, позволяющем при необходимости изменять его угол наклона.

Для измерения углового положения ТНПА относительно корпуса судна кроме данных ЭЛС от DR и DL также используются четыре дистанции, измеренные ДЛ. Антенны ДЛ на ТНПА «МАКС-300М» расположены на управляемой поворотной платформе. Благодаря такому техническому решению стало возможным направлять ДЛ на осматриваемый объект и измерять скорость движения относительно объекта. Это может быть полезно, например, при осмотре корпуса судна, когда судно находится в дрейфе, а результаты фото- и видеосъемки необходимо привязать к системе координат, связанной с корпусом судна (рис. 5).

Во время движения аппарата антенны ДЛ ориентируются перпендикулярно корпусу судна в автоматическом или ручном режиме (рис. 5, 6). Кроме того, на основе данных от ДЛ (четыре

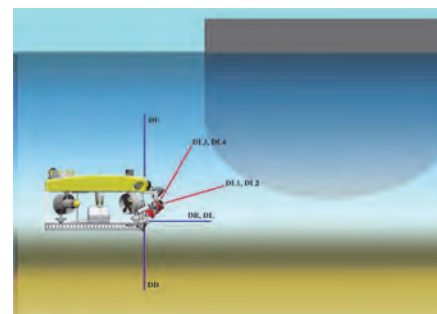


Рис. 5. Использование ДЛ на поворотной платформе для стабилизации ТНПА при осмотре вертикальных и наклонных поверхностей

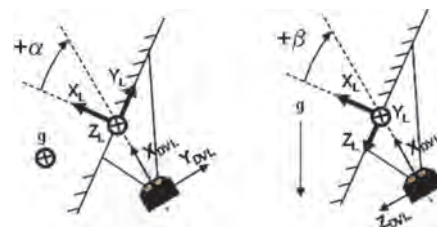


Рис. 6. Угловое положение ДЛ и самого аппарата относительно корпуса судна

дальности до корпуса и две скорости движения относительно него) определяются координаты ТНПА относительно судна.

Также измеряется угловое положение ДЛ и самого аппарата относительно корпуса: α – курсовой угол, β – угол наклона в вертикальной плоскости (рис. 6). Углы наклона антенн ДЛ (DL1, DL2, DL3, DL4) равны 30° относительно осевой линии корпуса блока антенн ДЛ.

Кроме варианта с простым счислением координат по данным ДЛ и датчика глубины при осмотре подводных сооружений можно использовать схему с применением судовой антенны ГАНС (рис. 7). В этом случае судовая антенна ГАНС размещается стационарно на заранее известной глубине погружения и горизонтальном отстоянии от инспектируемой поверхности. СВУН по данным о дальности до судовой антенны ГАНС, глубине погружения судовой антенны и аппарата производит вычисление положения ТНПА в системе координат, привязанной к объекту осмотра. Обозначим через X_a , Y_a , Z_a положение ТНПА в системе координат, центр которой привязан к «реперной» точке «О» инспектируемого объекта (см. рис. 8).

В соответствии с рис. 8 можно определить координаты ТНПА по следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} X_a &= \sqrt{R_0^2 - (H_{ca} - H_a)^2 - (Z_{ca} - Z_a)^2}, \\ Y_a &= h_0 + H_a, \\ Z_a &= D_a \cdot \cos \gamma; \end{aligned} \quad (2)$$

где: R_0 – наклонная дальность между судовой и аппаратной антеннами ГАНС; H_{ca} – глубина погружения судовой антенны ГАНС; H_a – глубина погружения ТНПА; Z_{ca} – вынос судовой антенны ГАНС от инспектируемой поверхности; h_0 – расстоя-

ние от вертикального уровня отсчета (борт судна) до поверхности воды. Для регулирования горизонтальной координаты ТНПА X_a относительно инспектируемой поверхности используются результаты интегрирования скорости перемещения аппарата по ДЛ с периодической поправкой от ГАНС, вычисленной по формуле (2).

Наличие в составе оборудования цифровой фотосистемы позволяет организовать высокоточное измерение линейных и угловых перемещений аппарата относительно характерных объектов как на грунте, так и на обследуемой поверхности. При этом становятся возможными реализация высокоточного перемещения ТНПА

относительно инспектируемых объектов в режиме детальной видео- фотосъемки, а также «мозаицирование» полученного фотоматериала. Подробнее определение координат по фотоизображениям донных объектов раскрыто в разделе «Динамическое позиционирование аппарата над объектом в режиме видеонавигации».

■ Алгоритмы управления траекторным движением ТНПА

Упомянутое выше навигационное обеспечение позволяет реализовать следующие режимы автоматического движения ТНПА командным уровнем СВУН:

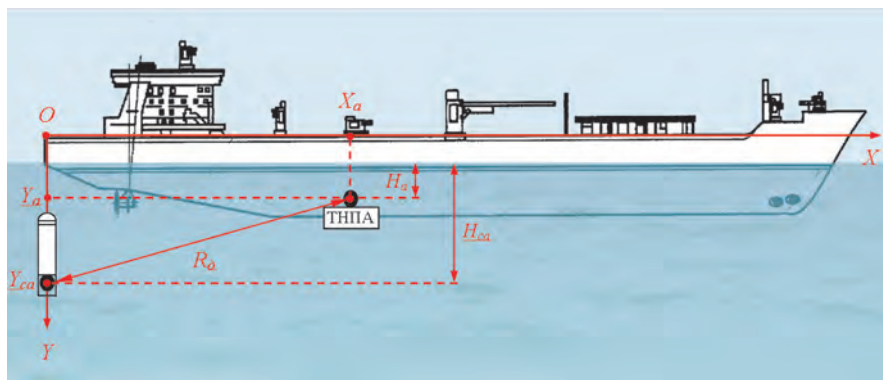


Рис. 7. Позиционирование ТНПА относительно корпуса судна с применением судовой антенны ГАНС

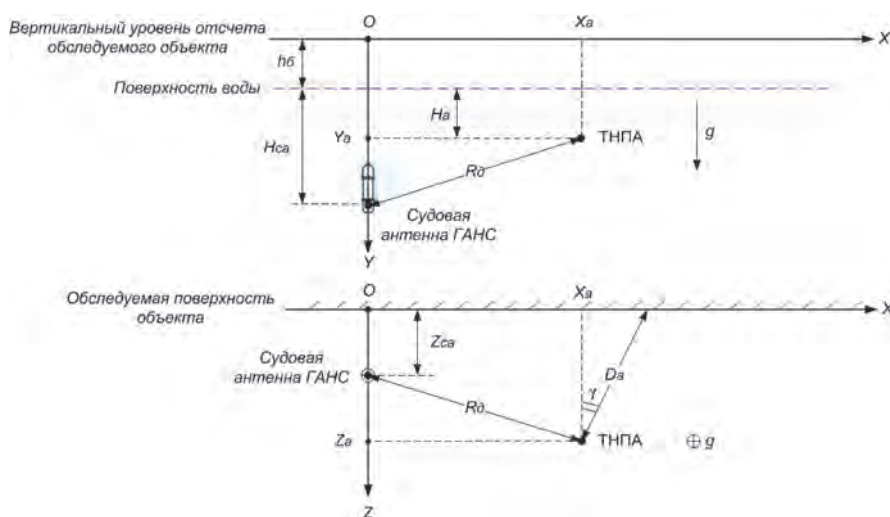


Рис. 8. Система координат, принятая для определения положения ТНПА относительно корпуса судна с применением судовой антенны ГАНС

- автоматическое приведение в точку с заданными географическими координатами;
- автоматическое приведение в толще воды в точку донной поверхности с заданными географическими координатами;
- автоматическое движение в толще воды по заданной траектории при обследовании донной поверхности;
- автоматическая инспекция подводных сооружений и корпусов кораблей вертикальными и горизонтальными галсами;
- динамическое позиционирование аппарата над объектом по данным цифровой фотосистемы.

Автоматическое приведение ТНПА в точку с заданными географическими координатами

Приведение аппарата в заданную точку обеспечивается реализацией исполнительным уровнем СБУН значений угла курса и скорости хода, определенных в соответствии с рис. 9 по следующим формулам (3):

$$\begin{aligned} \varphi_z &= \arctg \frac{X_u - X_a}{Z_u - Z_a}, \\ V_{xz} &= V_{x\max}, \text{ если } R_u \geq 10 \text{ м;} \\ V_{xz} &= 0, \text{ если } R_u < 10 \text{ м;} \end{aligned} \quad (3)$$

$R_u = \sqrt{(X_u - X_a)^2 + (Z_u - Z_a)^2}$,
где: X_u, Z_u – географические координаты цели; X_a, Z_a – географические координаты ТНПА; φ_z – заданный курс движения к цели; R_u – расстояние от ТНПА до цели; V_{xz} – заданная скорость хода ТНПА к цели; $V_{x\max}$ – максимальная скорость хода ТНПА. При этом поправки счисления координат ТНПА по данным ДЛ и магнитного компаса производятся от бортового приемника СНС в случае движения аппарата по поверх-

ности и от ГАНС ДБ – при движении в толще воды.

В соответствии с (3) по завершении сближения ТНПА с целью до дистанции 10 м СБУН перейдет в режим стабилизации нулевой скорости хода со стабилизацией угла курса, соответствующего ориентации аппарата на цель. При этом целесообразно перейти в режим допоиска цели гидролокатором секторного обзора с последующим сближением по ГСО до визуального контакта.

Автоматическая инспекция подводных сооружений и корпусов кораблей

Для автоматической инспекции подводных объектов необходимо организовать траекторное движение ТНПА относительно осматриваемой поверхности на заданной дистанции со стабилизацией углового положения. Возможные при этом варианты траекторий движения аппарата приведены на рис. 10.

Наличие поворотной платформы ДЛ обеспечивает воз-

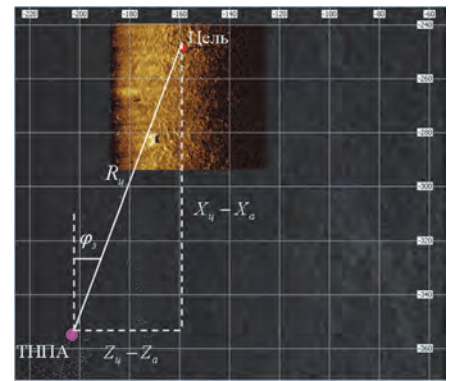


Рис. 9. Фрагмент навигационного планшета оператора ТНПА с интегрированными данными, полученными ГБО АНПА

можность определения скорости движения ТНПА относительно инспектируемой поверхности произвольного наклона (см. рис. 10). С учетом точности навигационного обеспечения и особенностей диаграммы направленности профилирующего ГСО (рис. 11) более предпочтительным вариантом является движение горизонтальными галсами. При этом аппарат движется лагом, ориентируя свою продольную ось перпендикулярно инспектируемой поверхности.

Для проведения обследования оператору сначала необхо-

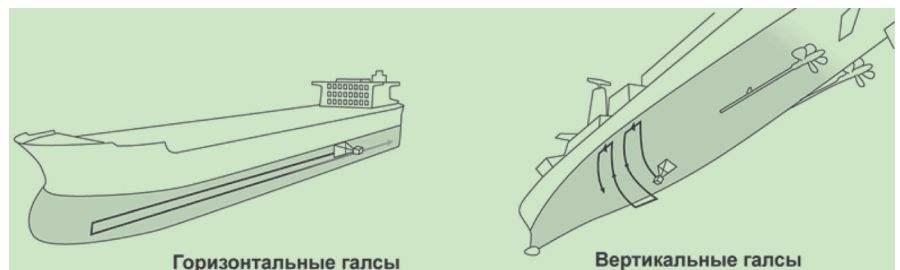


Рис. 10. Варианты траекторий обследования корпуса судна



Рис. 11. Схема ориентации диаграмм направленности ЭЛС, ДЛ и профилирующего ГСО относительно инспектируемой поверхности

димом задать параметры траектории движения: координаты точки старта (X_{ao} , Y_{ao}) относительно «реперной» точки объекта, длину горизонтального галса ΔX , вертикальный шаг между галсами ΔH , максимальную вертикальную координату

обследования Y_{amax} и дистанцию съёмки $Z_{зад}$, с которой ведется обследование поверхности. При этом управление траекторией движения происходит в соответствии с общим алгоритмом, который, в свою очередь, состоит из вспомогательных алгоритмов

«Выход в исходную позицию», «Движение галсом», «Переход по глубине» и «Всплытие в точке старта». Последовательность реализации алгоритмов поясняют блок-схемы (рис. 12), а траектория показана на рис. 13.

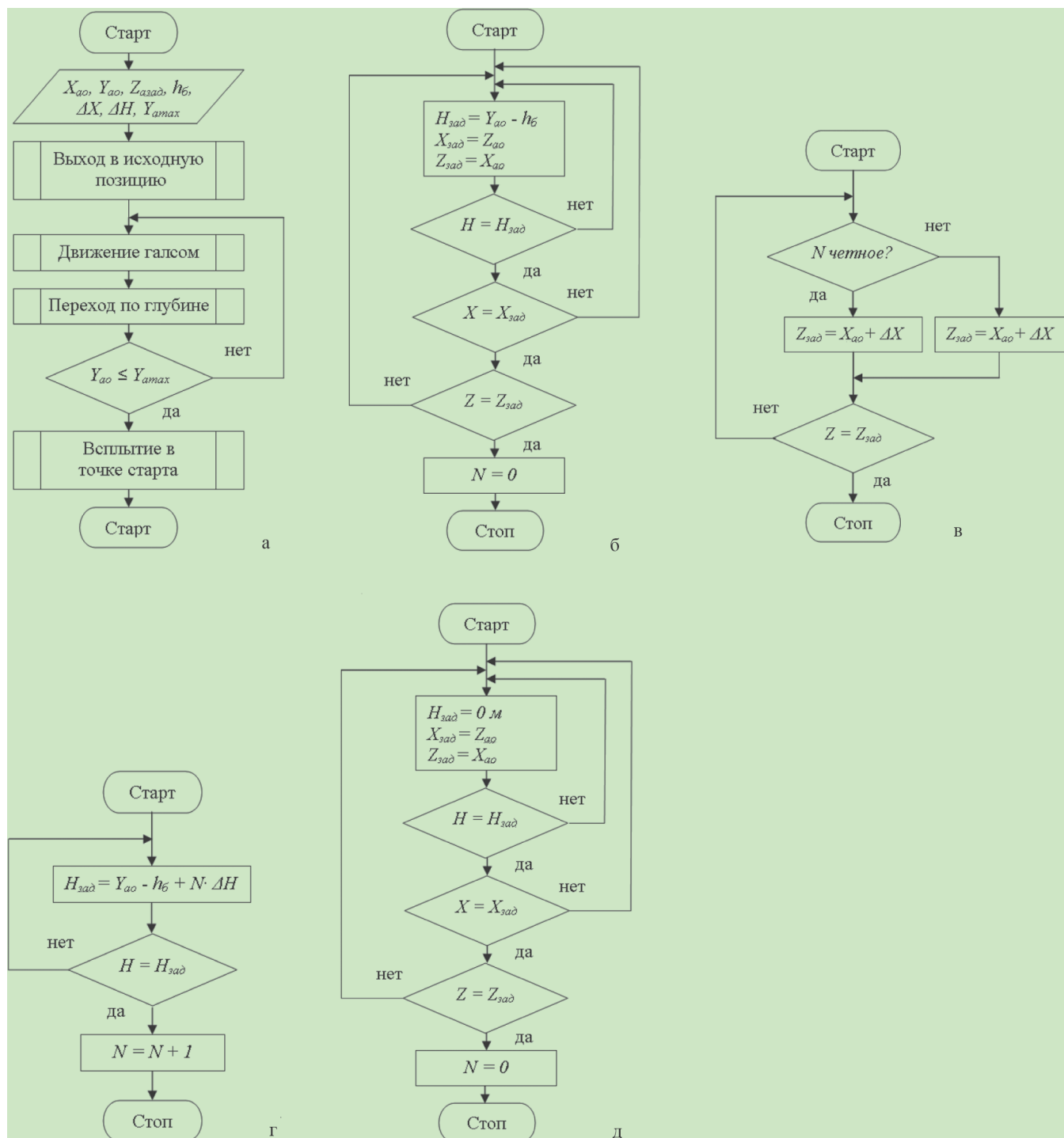


Рис. 12. Блок-схемы алгоритмов движения ТНПА в режиме инспекции причальной стенки: а – общий алгоритм чередования режимов; б – алгоритм «выход в исходную позицию»; в – алгоритм «движение галсом»; г – алгоритм «переход по глубине»; д – алгоритм «всплытие в точке старта»

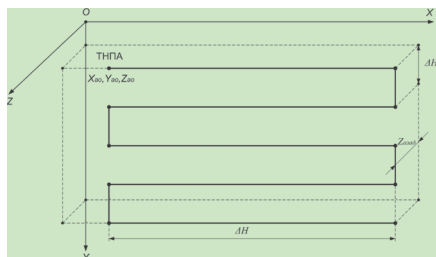


Рис. 13. Заданная траектория движения ТНПА при обследовании причальной стенки горизонтальными галсами

Динамическое позиционирование аппарата над объектом в режиме видеонавигации

Для решения задачи позиционирования аппарата над объектами морского дна в системе управления ТНПА присутствует специализированный модуль, который получает фотоизображения от драйвера телевизионной системы и передает управляющие команды регулятору движения. Основной задачей при этом является определение координат смещения аппарата за период съемки (2 с). Смещение аппарата рассчитывается путем распознавания текущего кадра фотосистемы. В качестве шаблона для распознавания берется предыдущий кадр (при расчете траектории аппарата по счислению пути) или заранее выбранный оператором опорный кадр с объектом позиционирования (для удержания аппарата над выбранным объектом). Распознать 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) распознаваемого объекта, ρ и φ – его масштаб и поворот. Тогда координаты любых точек на шаблоне $[x'; y']$ связаны с координатами тех же точек на изображении $[x''; y'']$ следующей зависимостью:

$$\begin{cases} dx = x'' - x' \cdot \rho \cdot \cos \varphi - y' \cdot \rho \cdot \sin \varphi, \\ dy = y'' + x' \cdot \rho \cdot \sin \varphi - y' \cdot \rho \cdot \cos \varphi. \end{cases}$$

(4)

Значения смещений dx и dy в уравнении (4) однозначно определяются, если известен масштаб ρ и поворот φ распознаваемого 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, а направление – по магнитному компасу). 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 последовательной съемки с небольшой временной задержкой (1–2 с) при прямолинейном движении аппарата данные величины можно принять за константы ($\varphi=0^\circ$, $\rho=1$). Если ориентация и «дальность» снимка неизвестны, то для определения всех его параметров (dx , dy , ρ и φ) необходима система из четырех уравнений. Данную систему можно получить из системы (4), зная координаты отрезков, принадлежащих контурам объектов на шаблоне $[x'_1; y'_1]$, $[x'_2; y'_2]$ и изображении $[x''_1; y''_1]$, $[x''_2; y''_2]$:

$$\begin{cases} x''_1 = dx + x'_1 \cdot \rho \cdot \cos \varphi + y'_1 \cdot \rho \cdot \sin \varphi, \\ x''_2 = dx + x'_2 \cdot \rho \cdot \cos \varphi + y'_2 \cdot \rho \cdot \sin \varphi, \\ y''_1 = dy - x'_1 \cdot \rho \cdot \sin \varphi + y'_1 \cdot \rho \cdot \cos \varphi, \\ y''_2 = dy - x'_2 \cdot \rho \cdot \sin \varphi + y'_2 \cdot \rho \cdot \cos \varphi. \end{cases}$$

(5)

Система (5) 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 системе из двух уравнений с двумя неизвестными относительно $\rho \cdot \cos(\varphi)$ и $\rho \cdot \sin(\varphi)$:

Если масштаб и поворот снимка известны, то для решения задачи распознавания

$$\begin{cases} \rho \cdot \cos \varphi = \\ = -\frac{(x'_1 - x'_2) \cdot (x''_1 - x''_2) + (y'_1 - y'_2) \cdot (y''_1 - y''_2)}{(x'_1 - x'_2)^2 + (y'_1 - y'_2)^2}, \\ \rho \cdot \sin \varphi = \\ = -\frac{(y'_1 - y'_2) \cdot (x''_1 - x''_2) - (x'_1 - x'_2) \cdot (y''_1 - y''_2)}{(x'_1 - x'_2)^2 + (y'_1 - y'_2)^2}. \end{cases}$$

(6)

достаточно знать координаты любой точки шаблона на изображении. Поскольку заранее нет соответствия ключевых точек на шаблоне и распознаваемом кадре, то можно перебрать все возможные соответствия, определяя по формулам (4) и (6) 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 распознавания достаточно создать накопитель, аналогичный накопителю Хафа [1, 2], и во время перебора «точек интереса» увеличивать ячейку с координатами $[dx, dy]$. Ячейка, в которой после перебора будет максимальное значение, соответствует координатам распознанного объекта, и чем больше значение в данной ячейке, тем выше вероятность, что искомая фигура присутствует на изображении [3].

Проверка работоспособности алгоритма производилась на реальных фотоснимках, полученных подводным аппаратом во время морских испытаний 2013 года. На рис. 14 представлены результаты рас-

чета смещения ТНПА по фотоизображениям. Можно видеть, что в накопителе (рис. 14, б) имеется явно выраженный максимум, соответствующий перемещению аппарата за период съемки. Во время позиционирования аппарата над выбранным объектом или грунтом данное перемещение подается с обратным знаком на вход регуляторов исполнительного уровня СБУН для последующей выработки управляющих величин для движительно-рулевого комплекса. Результаты испытаний показали, что ТНПА стабильно удерживается над объектами морского дна в течение длительного времени (самый длительный эксперимент длился около 40 минут) без потери объектов из поля зрения в условиях течения порядка 0.1 м/с.

■ Регуляторы исполнительного уровня СБУН

При разработке программы регулятора движения ТНПА преследовались следующие цели:

1) реализация программного модуля в системе управления ТНПА, способного удерживать аппарат на заданном курсе, дифференте и крене с минимальным временем реакции на команды управления оператора;

2) наличие наряду с контурами стабилизации в вертикальном канале (глубина или высота) контуров стабилизации в горизонтальном канале (продольном и поперечном) для отработки режимов стабилизации над объектами морского дна и напротив стенки судна (при решении задач обследования вертикальных поверхностей);

3) наличие возможности простой реконфигурации регулятора под новые разрабатыва-

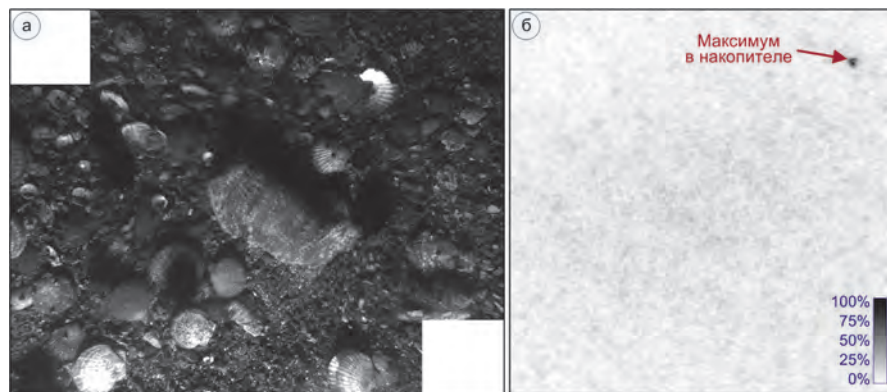


Рис. 14. Результаты определения смещения АНПА по фотоснимкам: а – совмещенная последовательность двух кадров; б – состояние накопителя при расчете смещения

емые аппараты (телеуправляемые и автономные с различным количеством двигателей);

4) реализация в регуляторе некоторого набора функций контрольно-аварийной системы (например, ограничение конструктивной глубины погружения).

Известно, что ТНПА как объект управления представляет собой сложную нелинейную многосвязную динамическую систему высокого порядка, практически не поддающуюся аналитическому исследованию [4]. Если принять допущение о малости значений параметров углового движения $\omega_x = \omega_y = \omega_z = \theta = \varphi = \psi = 0$, то можно упростить классическую математическую модель динамики подводного аппарата до вида системы (7), где: m – масса ТНПА; J_x, J_y, J_z – осевые моменты инерции; λ_{ii} – присоединенные

массы ($i = 1, 2, 3$) и присоединенные моменты инерции ($i = 4, 5, 6$); V_x, V_y, V_z и $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – составляющие соответственно линейных и угловых скоростей движения ТНПА в связанной СК; y_c – метacentрическая высота; $k_x^{zc}, k_y^{zc}, k_z^{zc}, k_\theta^{zc}, k_\varphi^{zc}, k_\psi^{zc}$ – коэффициенты гидродинамического сопротивления; $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ – управляющие воздействия ДРК; T_{ax}, T_{ay}, T_{az} – проекции натяжения ходового конца кабеля в связанной системе координат; θ, φ, ψ – углы крена, курса и дифферента соответственно; $F_x^d = -(m + \lambda_{33}) \cdot V_z \cdot \omega_y$, $F_z^d = (m + \lambda_{11}) \cdot V_x \cdot \omega_y$, $M_x^d = -m \cdot y_c \cdot \dot{V}_z + m \cdot y_c \cdot (V_x \omega_y - V_y \omega_x)$, $M_y^d = (\lambda_{11} - \lambda_{33}) \cdot V_x \cdot \dot{V}_z$, $M_z^d = -m \cdot y_c \cdot \dot{V}_x - (\lambda_{22} - \lambda_{11}) \cdot V_x \cdot V_y + m \cdot y_c \cdot (V_z \omega_y - V_y \omega_z)$ – возмущения, обусловленные взаимовлиянием каналов управления через динамику ТНПА; Q – остаточная плавучесть аппарата; ξ, η ,

$$\begin{cases} (m + \lambda_{11}) \cdot \dot{V}_x + k_x^{zc} \cdot V_x \cdot |V_x| = F_x + F_x^d + T_{ax}, \\ (m + \lambda_{22}) \cdot \dot{V}_y + k_y^{zc} \cdot V_y \cdot |V_y| = F_y - Q + T_{ay}, \\ (m + \lambda_{33}) \cdot \dot{V}_z + k_z^{zc} \cdot V_z \cdot |V_z| = F_z + F_z^d + T_{az}, \\ (J_x + \lambda_{44}) \cdot \dot{\omega}_x + k_\theta^{zc} \cdot \omega_x \cdot |\omega_x| - m \cdot y_c \cdot g \cdot \theta = M_x + M_x^d, \\ (J_y + \lambda_{55}) \cdot \dot{\omega}_y + k_\varphi^{zc} \cdot \omega_y \cdot |\omega_y| = M_y + M_y^d, \\ (J_z + \lambda_{66}) \cdot \dot{\omega}_z + k_\psi^{zc} \cdot \omega_z \cdot |\omega_z| - m \cdot y_c \cdot g \cdot \psi = M_z + M_z^d, \\ \dot{\theta} = \omega_x, \quad \dot{\varphi} = \omega_y, \quad \dot{\psi} = \omega_z, \\ \dot{\xi} = V_x \cdot \cos \varphi + V_z \cdot \sin \varphi, \quad \dot{\eta} = V_y = -\dot{H}, \\ \dot{\zeta} = -V_x \cdot \sin \varphi + V_z \cdot \cos \varphi; \end{cases} \quad (7)$$

ζ – скорости движения центра масс аппарата в неподвижной системе координат.

Таким образом, регулирование движения аппаратом можно разложить на параллельное управление шестью каналами, каждый из которых представляет собой классический ПИД-регулятор. При этом межканальные влияния учитываются в виде возмущений [5]. Каналы управления представляют собой шесть степеней свободы (курс, дифферент, крен, вертикальное перемещение, продольное перемещение, перемещение лагом). В большинстве этих степеней свободы можно пренебречь интегральной составляющей, т.к. оператору ТНПА несложно компенсировать статические отклонения этих параметров от заданных значений. Основными критериями выбора структуры регуляторов движения в первую очередь явились простота их построения и использования, а также легкость

в настройке, прозрачность процесса функционирования и высокая скорость программной реализации (низкая ресурсоемкость).

Регулятор ТНПА реализован в системе управления в виде отдельного исполняемого файла, который использует только базовые математические функции языка С и может быть откомпилирован в любой современной операционной системе. Единственной дополнительной подключаемой компонентой является используемая в аппаратах ИПМТ библиотека интерфейсных функций, необходимая для обмена сообщениями между программами внутри системы и по сети. Поскольку регулятор непосредственно не взаимодействует с какими-либо устройствами ТНПА (выступает как математический модуль, потребляющий и публикующий сообщения), то он может быть использован не только для управления аппа-

ратом, но и для проведения моделирования его движения.

Принцип работы регулятора заключается в циклическом ожидании сообщений навигационной системы и команд регулятору. После получения от навигационной системы метки начала нового навигационного цикла регулятор движения рассчитывает и посылает новые управляющие воздействия блоку управления двигателям. Особенностью разработанного регулятора является одновременное исполнение функций арбитра входящих команд управления. Рассмотрим формат используемой команды управления (рис. 15 – нижняя структура *tack_t*). Первым ее полем числится лимит на обработку галса, который определяет время выполнения данного действия. Если в течение этого времени придет новое сообщение с таким же или более высоким приоритетом (второе поле *priority*), то команда будет подменена, иначе – отбро-

```

/// Режимы управления аппаратом по каждой степени свободы
enum mode_heading_t {heading_force = 0, heading_velocity = 1, heading_difference = 2, heading_target = 3
enum mode_pitch_t {pitch_force = 0, pitch_difference = 2, pitch_target = 3
enum mode_roll_t {roll_force = 0, roll_difference = 2, roll_target = 3
enum mode_up_t {up_force = 0, up_velocity = 1, up_difference = 2, up_target_depth = 3,
enum mode_forward_t {forward_force = 0, forward_velocity = 1, forward_difference = 2
enum mode_right_t {right_force = 0, right_velocity = 1, right_difference = 2

/// Структуры управления аппаратом по каждому каналу
struct tack_heading_t {double value; mode_heading_t mode;};
struct tack_pitch_t {double value; mode_pitch_t mode;};
struct tack_roll_t {double value; mode_roll_t mode;};
struct tack_up_t {double value; mode_up_t mode;};
struct tack_forward_t {double value; mode_forward_t mode;};
struct tack_right_t {double value; mode_right_t mode;};

/// Входные параметры движения регулятору
struct tack_t
{
    double time_limit; // Лимит времени на обработку целевых данных
    priority_t priority ; // Приоритет команды управления
    tack_heading_t heading ; // Управление по каналу курса
    tack_pitch_t pitch ; // Управление по каналу дифферента
    tack_roll_t roll ; // Управление по каналу крена
    tack_up_t up ; // Управление по вертикальному каналу вверх
    tack_forward_t forward ; // Управление по продольному каналу вперед
    tack_right_t right ; // Управление по поперечному каналу вправо
};

```

Рис. 15. Фрагмент интерфейса команд регулятору движения ТНПА



Рис. 16. Установка условной цели на оборудованном ГАНС ДБ полигоне

шена. Таким образом, удается реализовать параллельное функционирование на борту аппарата нескольких подсистем управления с разными приоритетами. Например, ТНПА может самостоятельно стабилизироваться над объектом управления на низком приоритете, но при получении команд ручного управления (с более высоким приоритетом) будет исполнять их.

Еще одним интересным решением было использование единой команды-галса с одновременной реализацией разных режимов управления по всем степеням свободы (рис. 15 – поля *heading*, *pitch*, *roll*, *up*, *forward*, *right* и определенные выше для них типы). Для этого на каждую степень свободы выделено два поля: *mode* – режим управления по конкретной степени свободы и *value* – значение управляемой величины в данном режиме. Режимы управления представлены перечисляемым типом, т.е. на программном уровне можно задать только возможный режим управления для данного канала. Например, ручное управление с помощью прямого задания упоров может осуществляться для всех степеней свободы (*heading_force*, *pitch_force*...), режим управления скоростью (**velocity*) не определен для крена и дифферента, а режим целевого значения для вертикального канала бывает двух типов: целевая глубина (*up_target_depth*) и целевая высота (*up_target_altitude* – осталась за рамками скриншота). Таким

образом, может быть реализовано более тысячи различных режимов управления движением аппарата, представляющих комбинацию небольшого числа состояний для каждого канала управления. В их числе – режимы продольной и поперечной стабилизации (*forward_difference* и *right_difference*), которые используются для позиционирования над объектами дна по фотоизображениям или напротив борта обследуемого судна (значение *value* при этом представляет отрабатываемое рассогласование). Причем при работе вблизи сильно намагниченных объектов можно выбрать режим рассогласований для курса, чтобы не задействовать магнитный компас (дифференциальная составляющая при этом обрабатывается регулятором, а медленно накапливающаяся ошибка – оператором).

■ Результаты натурных испытаний

Целью испытаний являлась проверка навигационного и алгоритмического обеспечения ТНПА «МАКС-300М» при работе в реальных условиях в комплексе с поисковым АНПА. Предварительно в районе натуральных испытаний была развернута ГАНС ДБ из трех МО и установлена условная цель, процесс установки показан на рис. 16.

На первом этапе средствами АНПА была произведена ГБО-съемка донной поверхности. При этом навигация АНПА осуществлялась в режиме с коррекцией численных координат по данным ГАНС ДБ (рис. 17).

На втором этапе производились запуски ТНПА. При этом относительная система координат, в которой работала НС ТНПА, была привязана к систе-

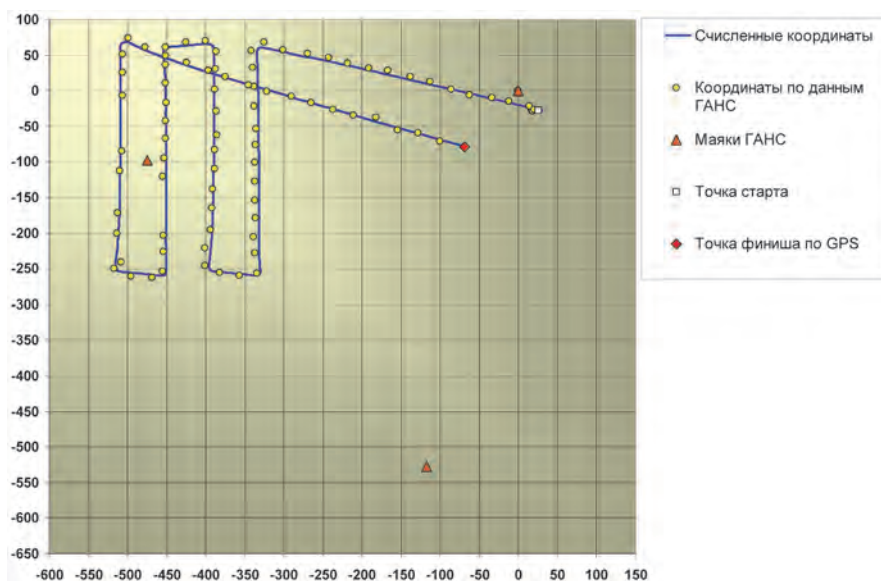


Рис. 17. Траектория движения АНПА во время предварительной ГБО съемки района

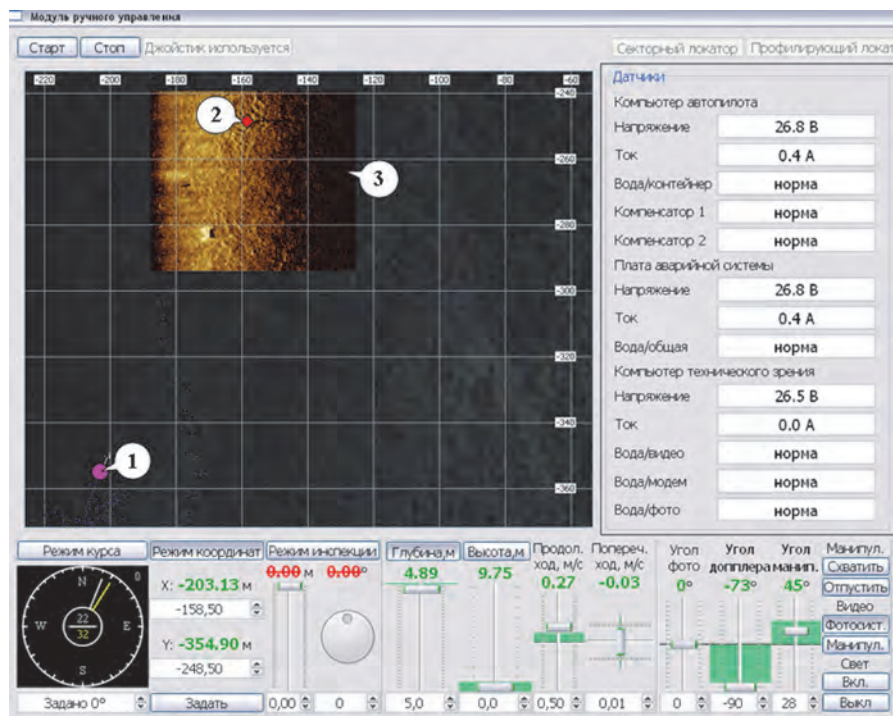


Рис. 18. ГБО-изображение цели привязывается к карте района на графическом планшете оператора ТНПА, где 3 – ГБОграмма, полученная АНПА, 2 – отметка цели (точка финиша), 1 – отметка ТНПА (точка старта)

ме координат, в которой велась ГБО-съемка района. На рис. 18 показан скрин планшета ТНПА с картой местности и изображением участка ГБО-съемки.

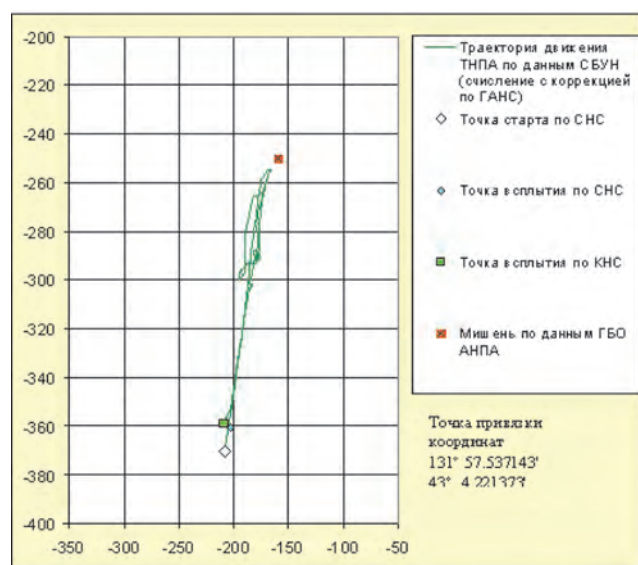
Далее ТНПА в автоматическом режиме двигался к отметке цели. Траектория движения

ТНПА к цели с известными географическими координатами показана на рис. 19, а, а конечное его положение в районе поиска на момент захвата цели бортовым ГСО – на рис. 19, б.

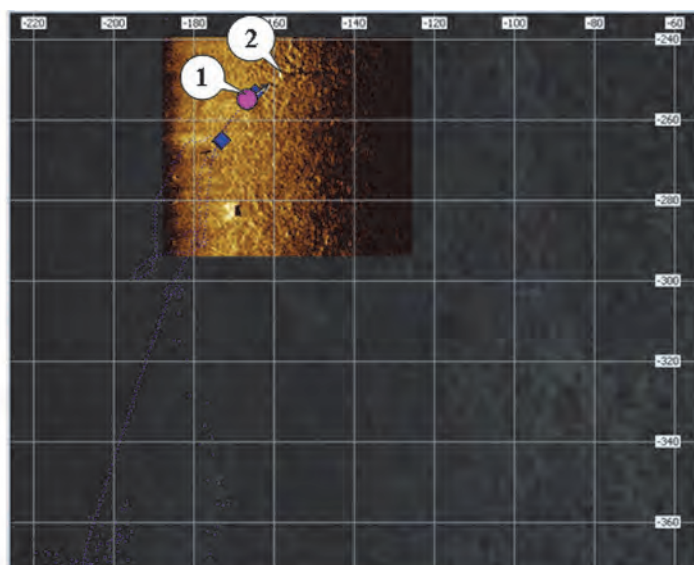
ГСО-граммы ТНПА в процессе его сближения с це-

лью приведены на рис. 20. На рис. 21 приведены стоп-кадры видеосъемки и цифровые фотографии в момент выхода аппарата на визуальный контакт с мишенью.

Результаты проведенного эксперимента подтвердили, что применение на ТНПА развитой навигационной системы с возможностью счисления координат по данным от ДЛ, пилотажных датчиков и ГАНС ДБ позволяет значительно упростить работу по поиску и обнаружению объектов с известными географическими координатами. В ходе испытаний подтверждена возможность управления движением ТНПА в полностью автоматическом режиме по заданной программе как полностью автономным аппаратом. При этом оператор может в любой момент прервать выполнение миссии и взять управление на себя. Практическая целесообразность таких режимов очевидна, например, при площадной фотосъемке дна, возврате ТНПА к обеспечивающему судну, обследовании гидротехнических сооружений и т.п.



а



б

Рис. 19. Автоматическое наведение ТНПА на цель с известными географическими координатами

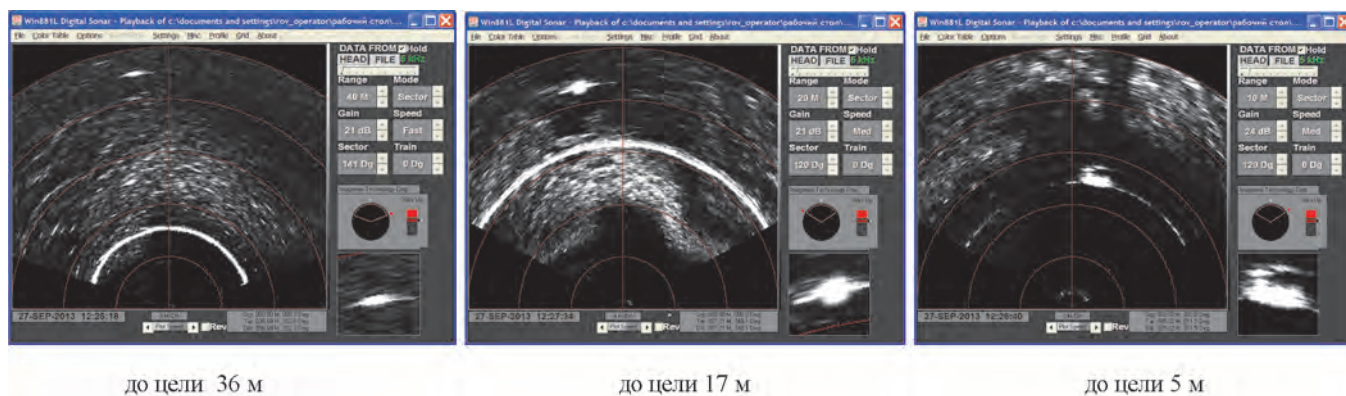


Рис. 20. Этапы автоматического сближения ТНПА с цели по ГСОграммам

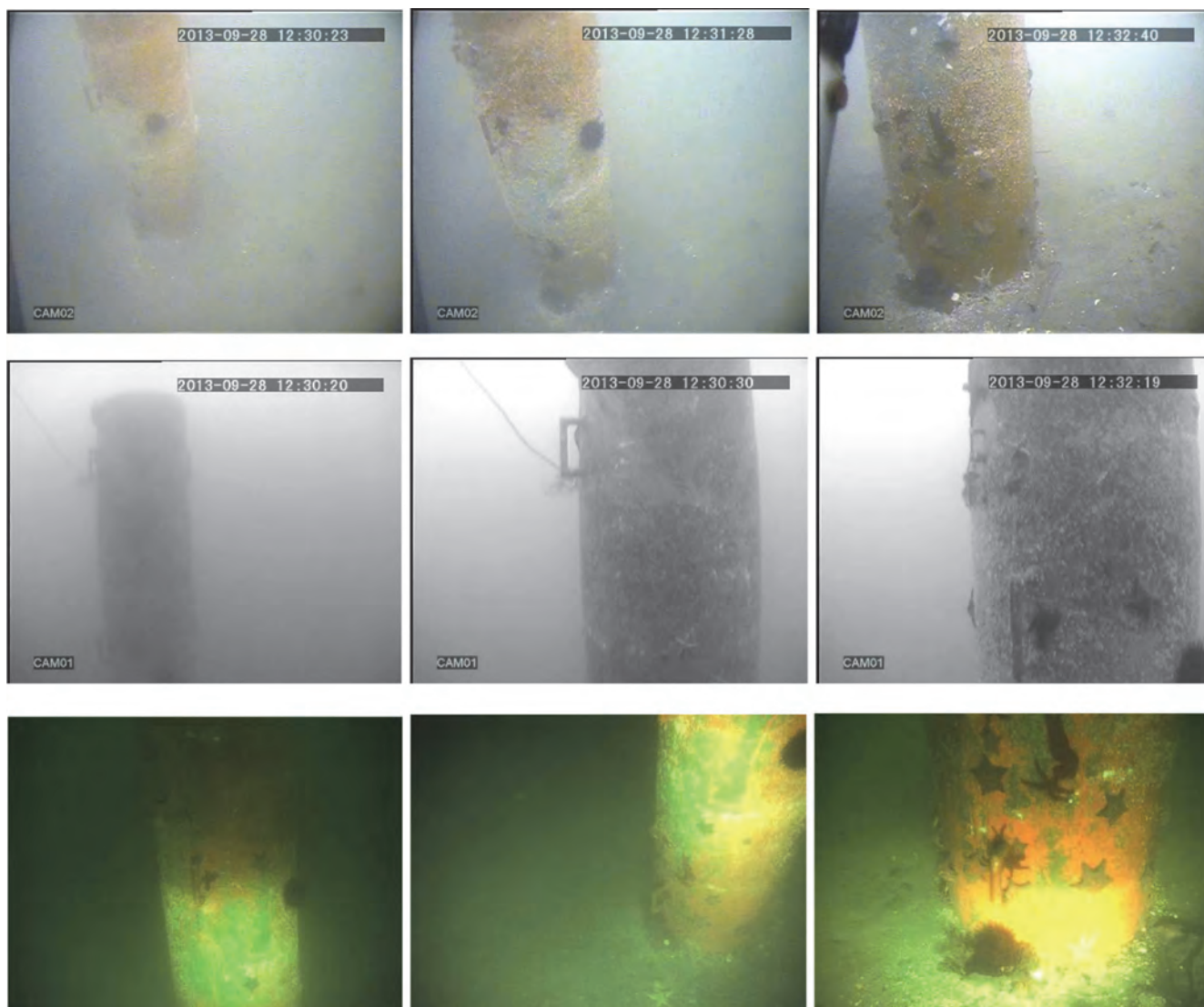


Рис. 21. Видеоматериалы выхода ТНПА на визуальный контакт с условной целью в полуавтоматическом режиме

ВЫВОДЫ

Для эффективного решения задач идентификации средствами ТНПА целей, обнару-

женных АНПА, целесообразно использование на аппаратах идентичных навигационных систем с наличием ГАНС ДБ и приемника спутниковой навигационной системы.

Автоматизация инспекции подводных сооружений и корпусов кораблей вертикальными и горизонтальными галсами требует оснащения ТНПА эхолокационной системой и допле-

ровским лагом на поворотной платформе.

Наличие комплексированных навигационных данных о координатах ТНПА на поверхности и в толще воды позволяет автоматизировать режимы движения аппарата к цели с известными географическими координатами.

Цифровая фотосистема ТНПА на поворотной платформе позволяет измерять перемещения аппарата относительно идентифицируемых объектов с достаточной для динамического позиционирования точностью.

Разработан и реализован в системе управления ТНПА программный модуль регулятора исполнительного уровня СБУН, который обеспечивает высокое качество стабилизации заданных параметров траекторного движения.

В ходе натурных испытаний подтверждена возможность выхода ТНПА в окрестности цели с известными географическими координатами с дальнейшим допоиском и сближением по данным от бортового гидролокатора секторного обзора до визуального контакта.

ЛИТЕРАТУРА

Ваулин Ю.В., Щербатюк А.Ф. Система отслеживания протяженных объектов на основе телевизионной информации для подводного робота // Морские технологии: Вып.3. Владивосток, 2000. С. 80–91.

Inzartsev A., Pavin A. AUV Application for Inspection of Underwater Communications // Underwater Vehicles / edited by Alexander V. Inzartsev. Vienna: In-Tech Publishers, 2009. P. 215–234.

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

Пантов Е.Н. и др. Основы теории движения подводных аппаратов / Е.Н. Пантов, Н.Н. Махин, Б.Б. Шереметов. Л.: Судостроение, 1973.

Ваулин Ю.В., Костенко А.В., Павин А.М. Навигационное и алгоритмическое обеспечение ТНПА для эффективного решения задач идентификации донных целей и инспекции морских объектов // Материалы науч. – техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана». Владивосток: 2013. С. 30–40.