

УДК 004.94+629.58

РЕКОНФИГУРИРУЕМАЯ КРОССПЛАТФОРМЕННАЯ СРЕДА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

**А.В. Инзарцев, А.М. Павин,
Г.Д. Елисеенко, Д.Н. Родькин,
А.В. Сидоренко, О.А. Лебедко,
М.А. Панин**

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки Институт
проблем морских технологий ДВО РАН¹

Создание надежного программного обеспечения автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) различных конфигураций приводит к необходимости построения легко масштабируемой моделирующей среды информационно-управляющей системы. При разработке такой среды предъявляется ряд требований по способности к реконфигурации, совместимости с операционными системами реального времени, наличию интерфейса пользователя, производительности, способности к интеграции различных функциональных модулей.

Поиск оптимальных решений, основанный на опыте создания преемственного ряда АНПА, позволяет определить основные системные свойства моделирующей среды. В настоящей работе принято, что моделирующая среда информационно-управляющей системы АНПА обладает следующими основными свойствами:

- имеет децентрализованную распределенную архитектуру без центрального модуля для связи между процессами;
- содержит веб-интерфейс взаимодействия программного обеспечения симулятора с пользователями;
- обеспечивает обмен данными между веб-клиентом и веб-сервером моделирования на основе веб-сокетов;
- обеспечивает асинхронную передачу данных между симулятором и программным обеспечением АНПА.

Эффективность выбранных подходов и методов формирования моделирующей среды подтверждается опытом решений сложных задач, требующих больших вычислительных ресурсов, в частности, при моделировании процессов, происходящих в режиме реального времени, генерации подводных изображений. Сравнение модельных экспериментов с данными натурных испытаний позволяет говорить о высоком качестве модельных данных.

Опыт создания АНПА позволяет предложить следующие решения для достижения указанных целей:

а) децентрализованная распределенная архитектура без центрального модуля для связи между процессами;

б) веб-интерфейс взаимодействия программного обеспечения симулятора с пользователями;

в) обмен данными между веб-клиентом и веб-сервером модели-

¹ 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а.
Тел /факс: (423) 2432416. E-mail: pavin@bk.ru

рования на основе веб-сокетов; г) асинхронная передача данных между симулятором и программным обеспечением АНПА.

1. Архитектура и интерфейс пользователя среды моделирования

Опыт создания АНПА позволяет выбрать при формировании моделирующей среды принципиальные решения, отвечающие всему многообразию задач имитационного моделирования и соответствующих им практических задач управления и навигации. В наибольшей мере требованиям, предъявляемым к таким задачам, удовлетворяет децентрализованная распределенная архитектура, способная к изменению, реконфигурации в зависимости от особенностей той или иной задачи. Использование асинхронного взаимодействия отдельных исполняемых модулей, часто расположенных в разных сегментах сети, позволяет использовать большие вычисли-

тельные ресурсы при решении задач рендеринга фотоизображений и моделирования акустических эхограмм.

Для взаимодействия оператора со средой моделирования и системой управления АНПА предлагается использовать веб-интерфейс для достижения совместимости с мобильными устройствами. Такой подход позволяет проводить удаленное моделирование с использованием существующей системы управления АНПА с любого компьютера или мобильного устройства без установки дополнительного программного обеспечения. Прототипом данного интерфейса служит ранее разработанный и уже применяемый для отладки программного обеспечения интерфейс оператора АНПА [1] (рис. 1).

Основной проблемой при разработке графического интерфейса является задача размещения данных системы управления/моделирования и пользовательских управляющих элементов в окне браузера. Следует учитывать, что структура

данных, количество органов управления и отображаемые индикаторы могут меняться при добавлении/изменении программных модулей. Для решения данной проблемы предложен подход, обладающий следующими свойствами:

- все данные делятся на входящие и исходящие по отношению к системе управления/моделирования АНПА. Входящие данные могут быть двух типов: команды, которые посылаются одновременно (например, команда включения/выключения какого-либо устройства), и управляющие величины, которые посылаются с определенным интервалом времени (например, заданный курс и скорость аппарата для задания перемещения в режиме телеуправления). Исходящие данные называются сообщениями и могут публиковаться системой управления АНПА и модулями симуляции в любой момент времени;
- входящие и исходящие данные объединяются в интерфейсы согласно их логической принадлежности. Например, интерфейс навигаци-

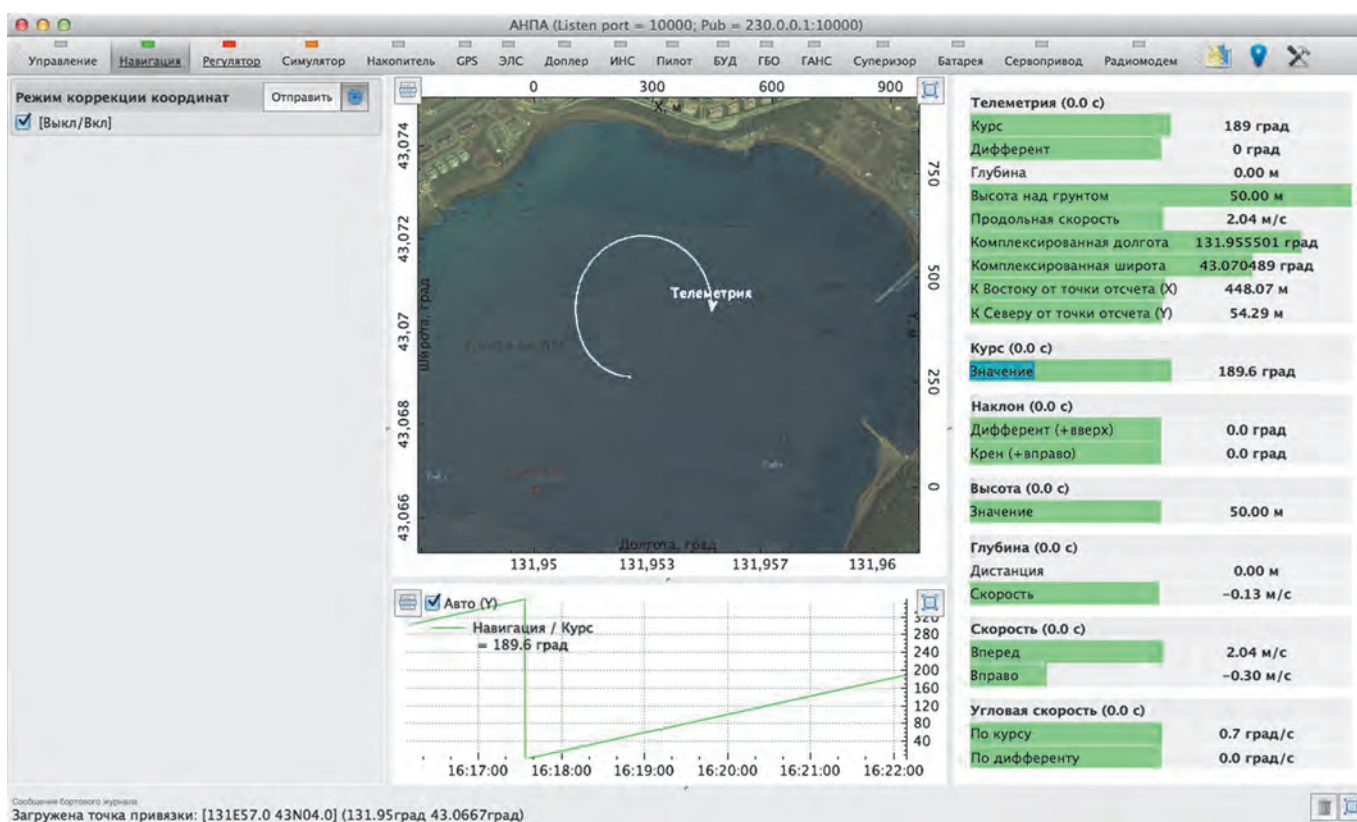


Рис. 1. Графический интерфейс пользователя (сборка под операционную систему MacOS)

онной системы содержит команду включения/выключения коррекции координат (по акустическим маякам) и сообщения курса, скорости, координат, глубины аппарата и др.

Таким образом, взаимодействие пользователя с системой моделирования сводится к приему и отправке сообщений, которые отображаются в браузере. Окно программы графического интерфейса содержит перечисленные ниже составные части.

- Панель меню (рис. 1 – сверху) состоит из списка интерфейсов, содержащих индикатор, соответствующий одному из состояний подсистемы (отсутствие данных – серый цвет, все хорошо – зеленый цвет, наличие предупреждений – желтый цвет, наличие аварий – красный цвет). Клик по соответствующему интерфейсу меняет содержимое панели управления (рис. 1 – слева) и панели отображения (рис. 1 – справа).

- Панель управления (рис. 1 – слева) содержит элементы управления каждой из подсистем АНПА, которые объединены в команды или управляющие величины. Количество команд, управляющих величин и элементов управления зависит от конфигурации конкретного АНПА, для которого производится моделирование. Интерфейс автоматически реконфигурируется под каждый аппарат и/или его симуляционные данные.

- Панель отображения информации (рис. 1 – справа) состоит из сообщений, генерируемых системой моделирования или подсистемами АНПА. Каждое сообщение представляет набор полей одного из стандартных типов: *boolean*, *integer*, *number*, *enum* или *string*. Поля с числовыми значениями могут быть отображены в виде графиков (рис. 1 – центральная нижняя часть).

- Карта местности (рис. 1 – центр) отображает навигационную информацию с привязкой к географическим координатам: координаты и курс аппарата, его траекторию, разрешенный и запрещенный район плавания. В планах реализации – добавление функционала мозаичирования фотоизображений и изо-

бражений гидролокатора бокового обзора на карту местности с привязкой к карте местности.

- Панель сообщений бортового журнала (рис. 1 – внизу) отображает текстовую и отладочную информацию, появляющуюся в процессе моделирования.

2. Интерфейс взаимодействия процессов

Интерфейс взаимодействия процессов (ИВП) предназначен для обеспечения единого механизма информационного взаимодействия компонентов событийно-ориентированной системы программного управления и навигации автономными роботами. ИВП построен по децентрализованному принципу обмена сообщениями, когда каждый компонент системы является одновременно поставщиком и потребителем данных. Приведенная на рис. 2 схема демонстрирует структуру информационного взаимодействия некоторых компонентов системы.

Обмен между процессами осуществляется посредством сообще-

ний – особым образом структурированных блоков информации, которые посылаются в асинхронном режиме. Таким образом, после публикации сообщения поставщик не блокируется до получения ответного сигнала, а действует по принципу «опубликовал–забыл». Все сообщения обладают уникальным идентификатором (имя сообщения), который равен символьному представлению типа данных. Такой подход позволяет гарантировать отсутствие пересечений идентификаторов у сообщений разных типов. Разные сообщения логически объединены в интерфейсы. Имена интерфейсов, как правило, принадлежат одной программе (например, навигационная программа, драйвер доплеровского лага и др.) или группе однотипных программ (например, агенты управления).

С каждым именем сообщения связан определенный порт операционной системы, который вычисляется как хэш-функция от имени сообщения. Максимальное значение хэш-функции значительно больше выделенного для обмена пула портов (2^{32} – для хэш-функции, про-

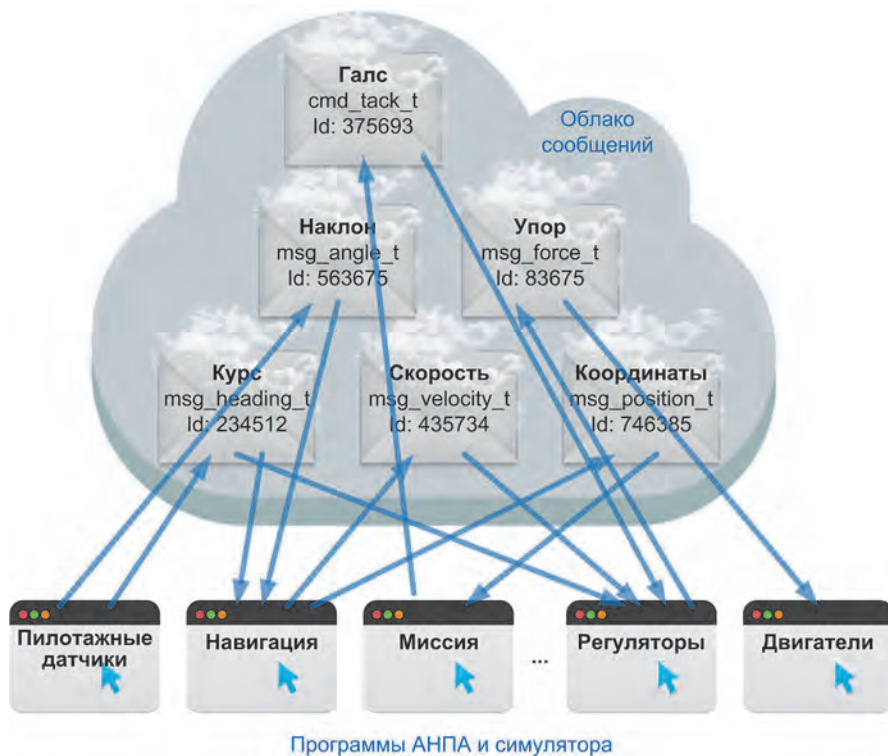


Рис. 2. Структура информационного взаимодействия некоторых компонентов системы управления АНПА с применением ИВП

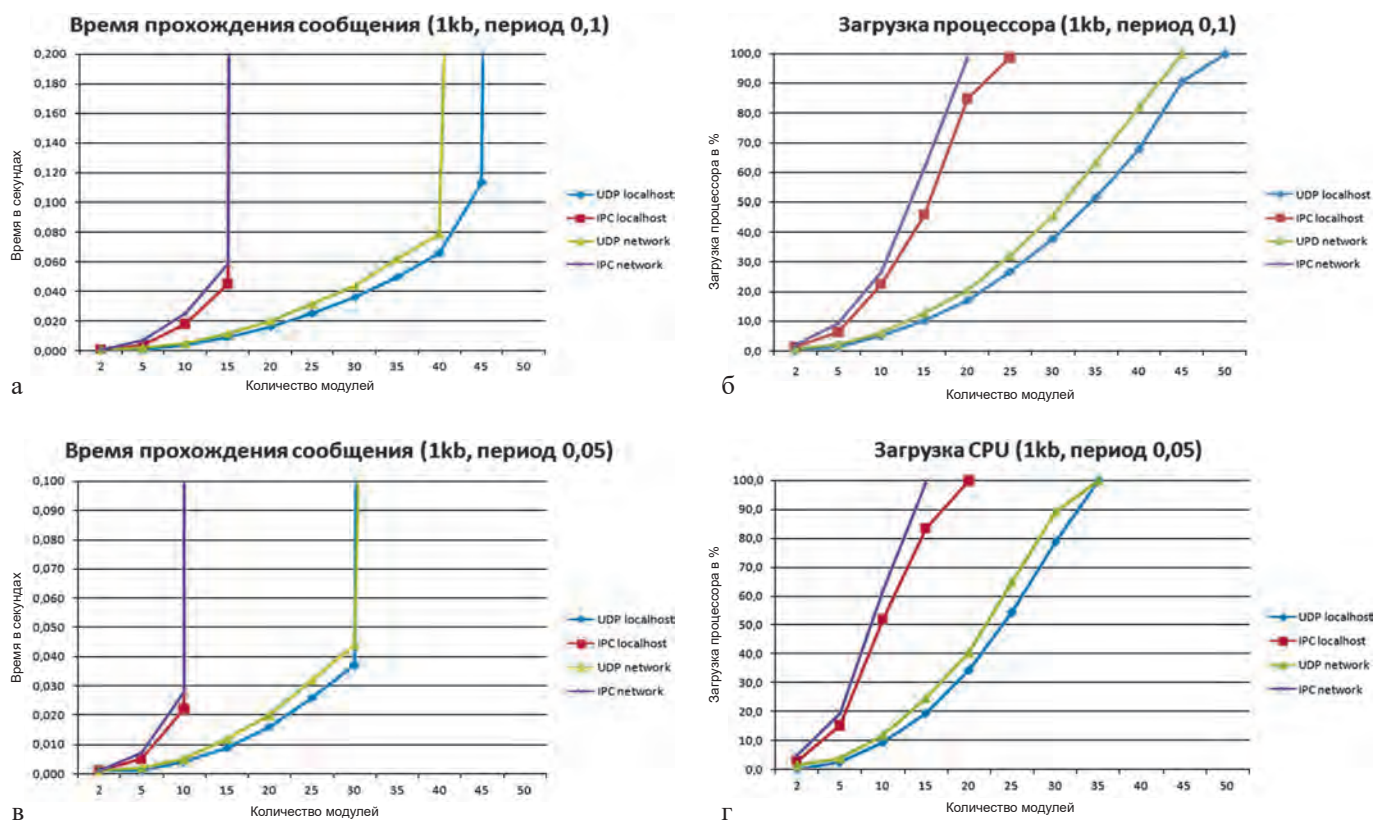


Рис. 3. Сравнение систем обмена сообщениями IPC и ИВП: а – зависимость времени прохождения сообщений от количества модулей (период 0,1 с); б – рост нагрузки центрального процессора от количества модулей (период 0,1 с); в – зависимость времени прохождения сообщений от количества модулей (период 0,05 с); г – рост нагрузки центрального процессора от количества модулей (период 0,05 с)

тив 10000 – для выделенного пула портов), поэтому номер порта ассоциируется со значением, равным остатку от деления значения хэш-функции на диапазон выделяемого пула портов. Таким образом, все сообщения посылаются в ассоциированный с ними порт и доступны для прослушивания всеми компонентами системы. Программы-потребители заводят поток, который находится в ожидании всех необходимых программе сообщений. При получении нового сообщения проверяется его уникальное имя внутри интерфейса, и сообщение помещается либо в память, либо в очередь на обработку событий (если подразумевается реакция по приходу данного сообщения). Как правило, каждая программа подписана на небольшое количество сообщений, поэтому количество слушающих потоков у большинства программ получается относительно невелико (в среднем 1~5). Таким образом, количество «ненужных» принима-

емых потоком сообщений крайне мало (только сообщения с коллизией по номеру хэш-функции).

При выборе механизма межпроцессного взаимодействия был проведен ряд численных экспериментов с несколькими системами обмена сообщениями. На рис. 3 представлены результаты изменений временных задержек и нагрузки центрального процессора для двух систем: *IPC* (*Inter Process Communication*) – разработка Мас-сачусетского технологического института [2] и ИВП – разработка ИПМТ ДВО РАН. Система *IPC* обладает центральным сервером и обеспечивает обмен посредством протокола *TCP/IP*. ИВП основан на протоколе *UDP* и обеспечивает децентрализованную асинхронную передачу сообщений. Для проведения экспериментов использовались два компьютера с операционными системами *QNX 6.5.0* и *Windows XP Service Pack 2*. Технические характеристики каждого из компьютеров

следующие: частота процессора 3 МГц, оперативная память 2 Мб. Суть эксперимента заключалась в последовательном наращивании количества модулей (участвующих в обмене сообщениями) и измерении временной задержки в прохождении сообщений и нагрузки центрального процессора. Измерения проводились для двух режимов: по локальному хосту и по сети. Каждый новый добавленный модуль осуществлял одну публикацию сообщения за период работы, но данное сообщение принималось всеми другими модулями системы, т.е. связь модулей была «каждый с каждым» (т.е. полносвязанный граф – наихудший с точки зрения производительности вариант конфигурации взаимодействия модулей).

Результаты экспериментов (рис. 3) показывают, что библиотека *IPC* с центральным сервером не справляется с передачей сообщений уже при 15 (для периода взаимодействия 0,1 с) и 10 (для 0,05 с) полно-

связанных модулях. На максимальном количестве модулей временная задержка между сообщениями превышает период публикации. Однако децентрализованная передача сообщений с использованием ИВП превышает порог публикации из 40 модулей (для периода взаимодействия 0,1 с) и 30 (для 0,05 с), что примерно в 2,5 раз больше, чем у системы ИРС.

3. Среда моделирования движения

Для отладки алгоритмов управления и навигации разработана среда моделирования поведения АНПА, которая включает один базовый модуль (модуль динамики АНПА) и модули различных подсистем АНПА: фото, гидролокаторы, доплеровский лаг и др. Каждый модуль представляет собой отдельный исполняемый файл, который можно запустить на одном или нескольких компьютерах (в одном сегменте сети).

Модуль динамики вычисляет движение АНПА в различных режимах движения: крейсерский ход, лаговые перемещения, смешанные режимы движения. Траектория АНПА рассчитывается в связанной системе

координат, где оси координат направлены вдоль осей симметрии подводного робота (рис. 4). Для расчета положения и скорости в связанной системе координат используется модель, упомянутая в [3].

В связанной системе координат в любой момент времени известны тяга движителей, составляющие силы сопротивления жидкости и положение движителей. Следовательно, зная положение движителей и создаваемый ими упор, можно найти развиваемую движительным комплексом обобщенную силу (упор и момент сил) – f . Сопротивление аппарата зависит от его гидродинамических характеристик и обобщенной скорости (линейная и угловая), так как форма аппарата в этой системе координат не изменяется, то r (обобщенная сила сопротивления жидкости в связанной с аппаратом системе координат) зависит только от v (шестимерный вектор скорости АНПА в связанной СК). Также в связанной системе координат описываются инерционные свойства аппарата: масса аппарата, моменты инерции и присоединенные массы жидкости по соответствующим степеням свободы. Таким образом, можно вывести следующее векторно-матричное уравнение для расчета положения и скорости аппарата в связанной системе координат:

$$\mathbf{M} \cdot dv/dt = \mathbf{f}(u) + \mathbf{r}(v) + \mathbf{g}(\varphi, \psi, \theta) + \mathbf{h}(\varphi, \psi, \theta), \quad (1)$$

где t – время; v – обобщенная скорость аппарата; \mathbf{M} – матрица $[6 \times 6]$ массы аппарата с учетом присоединенных масс жидкости и моментов инерции; $\mathbf{f}(u)$ – обобщенная тяга движительного комплекса, зависящая от управляющего вектора u ; $\mathbf{r}(v)$ – обобщенная сила сопротивления жидкости, зависящая от скорости аппарата в связанной системе координат; $\mathbf{g}(\varphi, \psi, \theta)$ – вес аппарата в воде; $\mathbf{h}(\varphi, \psi, \theta)$ – архимедова сила и момент остойчивости; φ – курс подводного аппарата; ψ – дифферент; θ – крен.

Зависимость силы сопротивления жидкости от скорости аппарата (в первом приближении) является линейной для угловых и квадратичной для поступательных составляющих обобщенной скорости:

$$\mathbf{r}(v) = \mathbf{R}^1 \cdot v + \mathbf{R}^2 \cdot [v \otimes \text{mod}(v)], \quad (2)$$

где \mathbf{R}^1 – матрица $[6 \times 6]$ коэффициентов сопротивления, в которой существенными являются элементы $R^1_{4,4}$, $R^1_{5,5}$, $R^1_{6,6}$, определяющие моменты сил сопротивления (линейная зависимость) по соответствующим вращательным степеням свободы; \mathbf{R}^2 – матрица $[6 \times 6]$ коэффициентов сопротивления, в которой существенными являются элементы $R^2_{1,1}$, $R^2_{2,2}$, $R^2_{3,3}$, определяющие силы сопротивления (квадратичная зависимость) по соответствующим поступательным степеням свободы; $\text{mod}(x) = [|x_1|, |x_2|, |x_3|, |x_4|, |x_5|, |x_6|]$; $[\otimes]$ – оператор покомпонентного перемножения векторов: $[x \otimes y] = [x_1 \cdot y_1, x_2 \cdot y_2, x_3 \cdot y_3, x_4 \cdot y_4, x_5 \cdot y_5, x_6 \cdot y_6]$.

Для учета различий сил сопротивлений в разных направлениях введены дополнительные две матрицы поправочных коэффициентов, которые преобразуют силу сопротивления жидкости к следующему виду:

$$\mathbf{r}(v) = \mathbf{R}^1 \cdot v + \Delta \mathbf{R}^1 \cdot \text{mod}(v) + \mathbf{R}^2 \cdot [v \otimes \text{mod}(v)] + \Delta \mathbf{R}^2 \cdot [v \otimes v], \quad (3)$$

где $\Delta \mathbf{R}^1$ – матрица $[6 \times 6]$ поправочных коэффициентов сопротивления

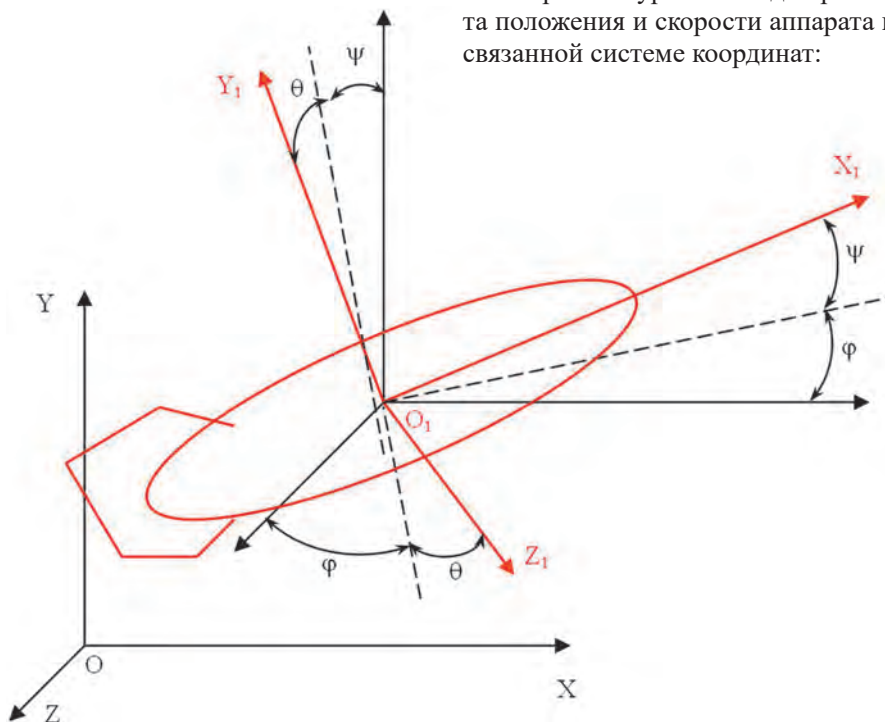


Рис. 4. Связанная система координат

(для положительных и отрицательных направлений) для линейной зависимости силы сопротивления жидкости; ΔR^2 – матрица [6×6] поправочных коэффициентов сопротивления (для положительных и отрицательных направлений) для квадратичной зависимости силы сопротивления жидкости.

Моделирование движения производится итерационным способом, где положение аппарата между двумя итерациями меняется дискретно (в диапазоне 0,01–0,1 секунды модельного времени). Решение уравнений 1–3 на данном промежутке представляется несложным, если принять во внимание, что за время интегрирования Δt величины курса, крена и дифферента меняются не существенно. Тогда изменение векторов сил, действующих на АНПА, также невелико (по сравнению с их значениями), следовательно, силы, действующие на АНПА, могут рассматриваться как константы. Таким образом, решение уравнений (1–3) в матричном виде в связанной с аппаратом системой координат будет иметь вид:

$$d\vec{v} / dt = \begin{bmatrix} M_{11} & \dots & M_{16} \\ \dots & \dots & \dots \\ M_{61} & \dots & M_{66} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \vec{f};$$

$$\vec{f} = \begin{bmatrix} f_1(\vec{u}) \\ \dots \\ f_6(\vec{u}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1(\varphi, \psi, \theta) \\ \dots \\ g_6(\varphi, \psi, \theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1(\varphi, \psi, \theta) \\ \dots \\ h_6(\varphi, \psi, \theta) \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} R_{11}^1 & \dots & R_{16}^1 \\ \dots & \dots & \dots \\ R_{61}^1 & \dots & R_{66}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \dots \\ v_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta R_{11}^1 & \dots & \Delta R_{16}^1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \Delta R_{61}^1 & \dots & \Delta R_{66}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |v_1| \\ \dots \\ |v_6| \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} R_{11}^2 & \dots & R_{16}^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ R_{61}^2 & \dots & R_{66}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 |v_1| \\ \dots \\ v_6 |v_6| \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta R_{11}^2 & \dots & \Delta R_{16}^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ \Delta R_{61}^2 & \dots & \Delta R_{66}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (v_1)^2 \\ \dots \\ (v_6)^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Зная скорость аппарата и относительное перемещение в связанной системе координат, а также положение аппарата в абсолютной системе координат, не представляет сложности найти новое положение и скорость аппарата в абсолютной системе координат.

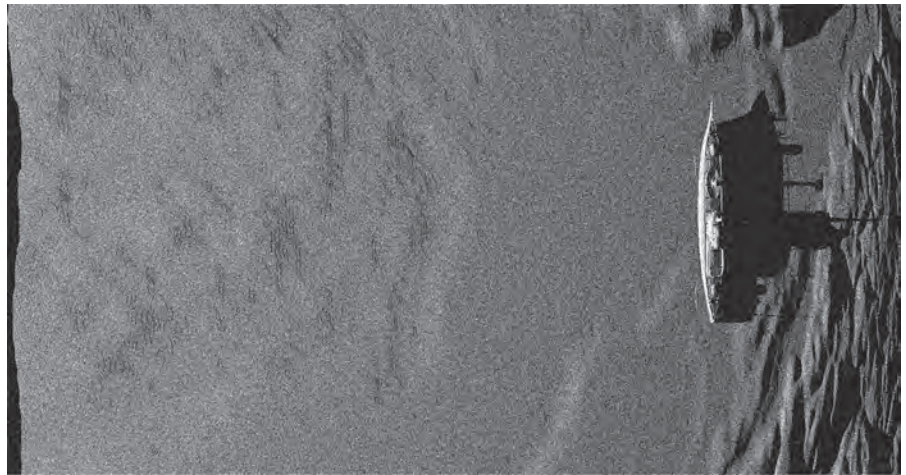


Рис. 5. Изображение, сгенерированное модулем симуляции гидролокатора бокового обзора

4. Модуль генерации акустических и фотографических изображений

Формирование гидролокационных изображений с учетом волновых свойств акустического сигнала, свойств среды распространения и свойств отражающих поверхностей – достаточно сложная задача,

требующая больших вычислительных ресурсов. Однако если целью моделирования является создание реалистичного изображения для визуального представления данных и обработки сигнала алгоритмами распознавания образов, то появляется возможность существенно ускорить процесс моделирования [4, 7]. Применяемая модель генерации акустических изображений базируется на методологии геометрической акустики.

В работе сознательно опущены аспекты моделирования дифракции, интерференции и других явлений, связанных с волновой природой упругих колебаний, и используется только геометрическая акустика, реализованная средствами библиотеки *OpenGL* на современных графических картах.

Генерация снимков гидролокатора бокового обзора (ГБО) производится на основе изображений, получаемых средствами генерации трёхмерной сцены морского дна. Сцена строится путем формирования рельефа дна (заданного картой высот) и размещения ряда объектов, таких как: камни, затонувшие суда, подводные лодки и др. В месте нахождения подводного аппарата размещается источник света, параметры которого определяют яркость каждого пикселя на сцене. В этой же точке размещается камера, которая определяет диаграмму направленности антенны ГБО. Яркость пикселя представляет собой интенсивность отраженного сигнала, вычисляемую через косинус угла наклона между вектором нормали к точке поверхности и вектором направления на источник света. Задание параметров камеры определяет горизонтальный и вертикальный углы диаграммы направленности антенны, что позволяет имитировать работу ГБО с определенными параметрами и формировать изображения с разным угловым разрешением [5, 6].

На рис. 5 приведен фрагмент сгенерированной эхограммы ГБО с антенны правого борта аппарата на основе построенной заранее трехмерной сцены морского дна. На



Рис. 6. Сгенерированное изображение морского дна

снимке отчетливо видны лежащая на дне подводная лодка и акустическая тень от нее.

Сформированная сцена морского дна проецируется на виртуальное «окно сенсора ГБО». Данная проекция представляет собой набор откликов (яркостей и дальностей) от покрываемой области дна. Чтобы получить из данного набора акустическое изображение, необходимо отсортировать отклики яркости в соответствии со временем их прихода. Время прихода определяется дальностью до отражающей поверхности, а дальность до каждой точки поступает из буфера глубины, предоставляемого графической библиотекой *OpenGL*. Отсортированная в соответствии с буфером глубины строка откликов представляет собой строку эхограммы ГБО.

Модуль рендеринга фотоснимков морского дна также генерирует

двухмерные изображения, используя трехмерную компьютерную графику на основе стандарта *OpenGL*. Этот модуль обеспечивает визуализацию морского дна и подводных объектов с учетом распространения и рассеивания света в морской среде (рис. 6).

Как показал опыт решения практических задач, предложенная архитектура моделирующей среды АНПА может быть эффективно использована и для решения других сложных задач, требующих больших вычислительных ресурсов. Будущее направление исследований видится в доработке визуального интерфейса моделирующего комплекса, а также интеграции его с интерфейсом управления АНПА. Предполагается, что результатом исследований будет единый пользовательский интерфейс управления, моделирования, диагностики и предстартовой симуляции АНПА любой конфигурации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Елисеенко Г.Д., Павин А.М. Программное обеспечение подготовки и сопровождения миссии АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2013. №2(16). С. 16–23.
2. Inter Process Communication (IPC) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cs.cmu.edu/~ipc/>.
3. Pavin A. Simulation Environment for AUV Control Algorithms Development // Proc. of 14th Intern. Symp. «Unmanned Untethered Submersible Technology» (UUST05). Durham, New Hampshire, USA, 2005.
4. Бобков В.А., Морозов М.А., Багницкий А.В., Инзарцев А.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф., Туфанов И.Е. Имитационный моделирующий комплекс для исследовательского автономного подводного робота // Научная визуализация. 2013. Т. 5, № 4. С. 47–70.
5. Бобков В.А., Морозов М.А. Моделирование работы гидролокационных устройств средствами машинной графики // Подводные исследования и робототехника. 2012. №1 (13). С. 46–51.
6. Bagnitsky A., Inzartsev A., Pavin A., Melman S., Morozov M. Side Scan Sonar using for Underwater Cables & Pipelines Tracking by Means of AUV // Proc. of Symp. on Underwater Technology 2011. The University of Tokyo, Japan, 2011.
7. Хмельнов А.Е., Золотарев В.В. Моделирование гидролокационных изображений с использованием графических ускорителей // Подводные исследования и робототехника. 2011. №1(11). С. 41–48.

