

УДК 004.942

И.В. Кожемякин, И.А. Путинцев, Н.Н. Семенов, М.Н. Чемоданов**РАЗРАБОТКА ПОДВОДНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА,
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТКРЫТЫХ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ДВИЖЕНИЯ, ДОПОЛНЕННЫХ МОДЕЛЬЮ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

Приведены результаты практических исследований применимости программной платформы ROS и симулятора Gazebo для симуляции работы ТНПА, а также для разработки программного обеспечения робота. Даны ссылки на сравнительный анализ различных симуляторов и программных платформ. Кратко описаны достоинства и недостатки подходов к разработке робототехнических комплексов. Приведены особенности разработки подводных робототехнических аппаратов, в том числе с возможностью группового применения. Описан опыт разработки робототехнического комплекса без использования программных каркасов, приведено сравнение с современными методами разработки. Дано описание разработки модели подводного робота в среде Gazebo, с опорой на опыт моделирования автономного подводного аппарата Girona 500. Описана разработка программного обеспечения с использованием программного каркаса (framework) ROS. Описана сетевая модель ROS, приведены схемы взаимодействия разработанных модулей. Описана разработка гидроакустической модели, используемой в качестве расширения к симулятору Gazebo. Подробно описана математическая модель излучателей, приемников, модель распространения сигналов и помех. В модели учтены характеристики направленности как элементов антенных решеток, так и каналов антенн. Учитывается ходовая, рассеянная и реверберационная помехи. В качестве модели отражения используется бликсовая модель. Дается описание цикла разработки в СПбГМТУ телеуправляемого подводного аппарата, с применением описанного комплекса средств и с тем же программным обеспечением, что использовалось при симуляции. В качестве вычислительного модуля аппарата использовался модуль beaglebone black, который, в целом, хорошо зарекомендовал себя. Приведено краткое описание компонентов разработанного аппарата. Описан опыт обучения студентов СПбГМТУ на основе программирования симулируемых моделей телеуправляемых подводных аппаратов.

Симуляция; телеуправление; групповое управление; информационно-измерительная и управляющая система; сетевые технологии; гидроакустика; робототехнический комплекс; мобильный робот; телеуправляемый подводный аппарат.

I.V. Kozhemjakin, I.A. Putincev, N.N. Semenov, M.N. Chemodanov**DEVELOPMENT OF UNDERWATER ROBOTIC SYSTEM, USING
OPEN-SOURCE SIMULATION MODEL EXTENDED BY HYDROACOUSTIC
INTERACTION**

We present results of the practical applicability of the research ROS framework and the Gazebo simulator to simulate operation technical regulations, as well as for software development. Given a reference to a comparative analysis of various simulators and frameworks. Briefly describe the advantages and disadvantages of approaches to development of robotic systems. Peculiarities of development of underwater robotic vehicles, including the possibility of a group of applications. The experience of the development of robotic system without the use of software frameworks, provides a comparison with modern development methods. A description of the development model of the underwater robot in an environment Gazebo, drawing on the experience of the modeling autonomous underwater vehicle Girona 500. We describe the development of software using a software framework ROS. Describe the network model ROS, given the scheme of interaction developed modules. We describe the development of hydroacoustic model to be used as extensions to the Gazebo simulator. Described in detail the mathematical model of the emitters, receivers, model signal propagation and noise. The model takes into account the characteristics of

a directional antenna array elements, and channels of the antennas. Taken into account chassis scattered reverberation and noise. As a reflection model uses bright-points model. Paper describe development cycle of the SMTU's remote operated underwater vehicle, with the use of funds described complex and with the same software, it that was used in the simulation. As the computing module unit is-used beaglebone black module which is generally performed well. Also, given brief description of the developed machine components. Described student learning experience SMTU based programming simulates the proxy-models remotely operated underwater vehicles.

Simulation; remote control; group management; information-measuring and control system; networking technologies; hydroacoustic; robotic complex; mobile robot; remotely operated underwater vehicle.

Введение. Процесс разработки любого нового устройства может быть описан схемой, приведенной на рис. 1 [1]. Разработка включает в себя создание опытного образца и проведение испытаний, по результатам которых может проводиться дополнительное проектирование и изготовление новых образцов, либо доработка имеющихся.

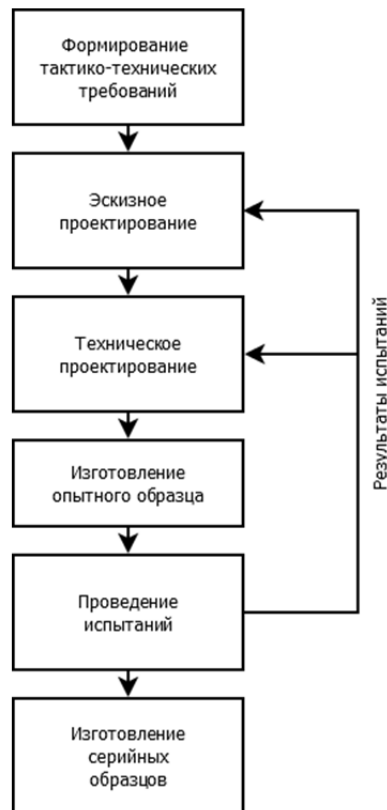


Рис. 1. Этапы разработки нового устройства

К данной схеме правомочно применить аналогию с системами с обратной связью. В данном случае обратную связь обеспечивают испытания. Так же как в теории управления, чем меньше задержка в цепи обратной связи, тем легче добиться желаемого результата за ограниченный период времени. Т.е. удешевление и ускорение проведения испытаний приводит к существенному ускорению разработки новых устройств.

Рост сложности систем приводит к усложнению и удорожанию изготовления опытных образцов. В такой области как робототехника этот процесс является крайне затратным, как во временном, так и в материальном плане.

Если говорить о подводной робототехнике, то затраты на испытания таких аппаратов даже выше чем затраты на испытания сухопутных роботов, в связи с необходимостью работ в бассейне или выезде на акваторию. Помимо этого существует опасность потери опытных образцов.

Еще больше затраты растут при необходимости проверки гидроакустических систем в составе робототехнических комплексов, в виду необходимости специфических условий (больших глубин, известного рельефа дна и т.д.).

При испытаниях группового взаимодействия роботов эти расходы растуткратно количеству одновременно работающих аппаратов.

Одним из способов радикального сокращения издержек и уменьшения временных трат на натурные испытания является симуляция работы робототехнических комплексов на цифровых моделях. При всех неизбежных недостатках цифровых моделей, связанных с невозможностью полностью промоделировать все возможные воздействия среды, симуляция является крайне востребованным методом упрощения разработки устройств.

Существует большое количество сред для симуляции робототехнических комплексов. Помимо этого, существуют как специализированные среды для симуляции подводных робототехнических систем (например, UWSim [2]), так и адаптация обще-робототехнических симуляторов к симуляции движения подводных аппаратов [3]. Сравнительный обзор сред для симуляции работы подводных робототехнических комплексов дан в работе [4].

Таким образом, существует большое количество симуляторов, основной целью которых является имитация движения подводных аппаратов и симуляция работы ряда сенсоров (видеокамеры и т.д.). Немалая часть симуляторов предоставляются совместно с исходными программными кодами (open source). В то же время, в области симуляции гидроакустического взаимодействия открытых альтернатив практически не имеется. В лучшем случае, доступные среды предлагают симуляцию многолучевых эхолотов, представляющих изображение в виде карты глубин. Обзор информации о закрытых моделях гидроакустического взаимодействия представлен в работе [5].

Целью данной работы, является описание разработки и моделирования подводного аппарата на базе симулятора Gazebo [6] и программной платформы Robot Operating System (ROS) [7], на примере разрабатываемого в СПбГМТУ телеуправляемого подводного аппарата.

Помимо этого, описан подход к расширению симулятора Gazebo математической моделью обеспечения гидроакустического взаимодействия подводных объектов, разработанной в СПбГМТУ, на кафедре морских информационно-измерительных систем и технологий.

Выбор симулятора Gazebo и платформы ROS обусловлен следующими их достоинствами:

- ◆ открытость исходных кодов;
- ◆ сравнительно хорошая документированность;
- ◆ большой коллектив разработчиков;
- ◆ активное развитие и дополнение функциональности;
- ◆ гибкость и универсальность.

1. Создание цифровой модели робота. Для выполнения моделирования необходимо описать корпус аппарата и его движители в специальном формате. Симулятор Gazebo поддерживает формат описания симуляций (Simulation Description

Format, SDF) [8] и универсальный формат описания роботов (Unified Robot Description Format, URDF) [9]. Формат URDF является стандартным для платформы ROS и для возможности взаимодействия программного обеспечения, написанного на ROS и симулятора Gazebo необходимо использовать этот формат.

При создании описания робота, необходимо разбить аппарат на составляющие (обычно это геометрические примитивы), для которых нужно задать следующие параметры:

- ◆ геометрические размеры (используются для расчета столкновений и положения центра масс);
- ◆ массу;
- ◆ моменты инерции;
- ◆ плавучесть;
- ◆ расположение центра величины;
- ◆ коэффициент, учитывающий влияние вязкости среды;
- ◆ по каждому движителю:
 - его расположение;
 - ориентацию вектора создаваемого упора;
 - максимальный создаваемый упор в ньютонах;
- ◆ настройки подъемной силы, создаваемой элементом модели (опционально).

Гидродинамическая модель, используемая в Gazebo, достаточно примитивна, и не учитывает присоединенных масс, влияния свободной поверхности, зависимости упора двигателя от скорости движения и т.д. Однако, для оценки основных перемещений робототехнического комплекса, данная система подходит.

Система gazebo обладает хорошей пользовательской документацией, но тем не менее, порог вхождения остается достаточно высоким. Огромную пользу при изучении работы симулятора, в разрезе применения его к подводным аппаратам, принесло изучение материалов по симуляции работы манипулятора A500 для подводного аппарата Girona 500 [10].



Рис. 2. Реальный аппарат и его виртуальная модель в симуляторе Gazebo.

2. Создание программного обеспечения робота. Коллектив СПбГМТУ имел опыт создания прототипа телеуправляемого подводного аппарата без использования каких-либо готовых программных платформ. Такая работа показала свою низкую эффективность, связанную с необходимостью реализовывать как собственные алгоритмы управления и обработки информации, так и служебные системы – взаимодействие по локальной сети, протоколы обмена, системы логирования и архивирования информации и т.п.

Как показала практика, временные затраты на разработку и отладку служебных систем как минимум сопоставимы с разработкой и отладкой собственно алгоритмов, составляющих научную новизну.

При разработке программного обеспечения для нового аппарата, было принято решение использовать платформу ROS, ввиду следующих преимуществ:

- ◆ открытость платформы;
- ◆ хорошая документированность;
- ◆ работа под операционной системой linux;
- ◆ гибкость;
- ◆ мощная сетевая модель;
- ◆ наличие большого числа готовых модулей (джойстики, камеры, i2c и т.д.);
- ◆ возможность использования языка Python при создании модулей, что также повышает скорость разработки;
- ◆ глубокая интегрированность с симулятором Gazebo, что позволяет использовать проверенный в симуляторе код в реальном устройстве практически без изменений.

К недостаткам ROS можно отнести следующее:

- ◆ Объемность, программы, как следствие – повышенные требования к объемам памяти на бортовом модуле;
- ◆ Отсутствие глубоких исследований о производительности сетевого взаимодействия;
- ◆ Отсутствие исследований о накладных расходах на функционирование системы.

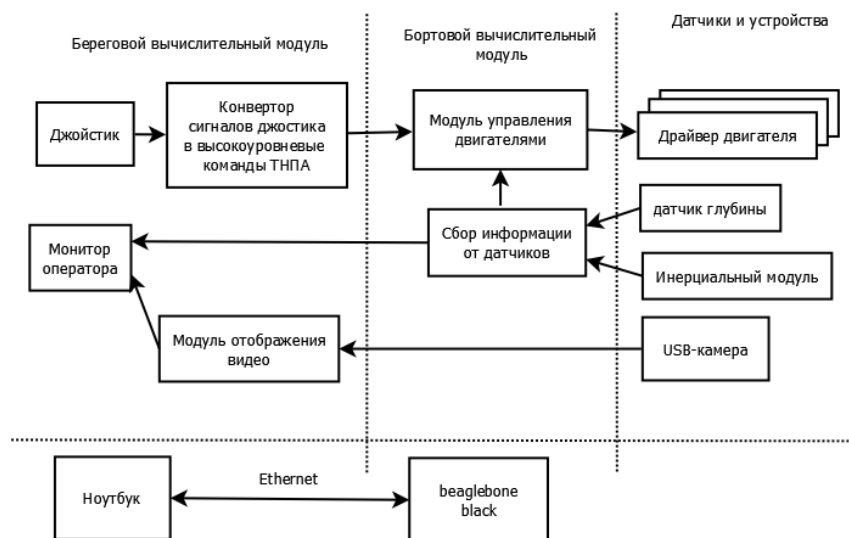


Рис. 3. Схема программных и аппаратных модулей ТНПА

На рис. 3 приведена схема аппаратных модулей и соответствующих им программных модулей. Стоит отметить, что с точки зрения платформы ROS нет никакой разницы между взаимодействием программных модулей, расположенных на локальном компьютере и модулей соединенных по сети.

Разработанный код с минимальными изменениями был перенесен на открытую платформу beaglebone black [11]. В ходе эксплуатации были выявлены следующие достоинства данной платформы:

- ◆ хорошая работа под управлением OS Linux;
- ◆ процессор AM335x с частотой 1 GHz, 512 мегабайт оперативной
- ◆ богатый набор периферии: 5xUART, 6-ти канальный АЦП, 2 порта i2c, 6 каналов аппаратного ШИМ;
- ◆ два встроенных модуля PRU (programmable real time unit), независимые 32-х разрядные процессоры на архитектуре ARM, с частотой 200 MHz, часть памяти которых разделена с основным процессором;
- ◆ открытое программное и аппаратное обеспечение.

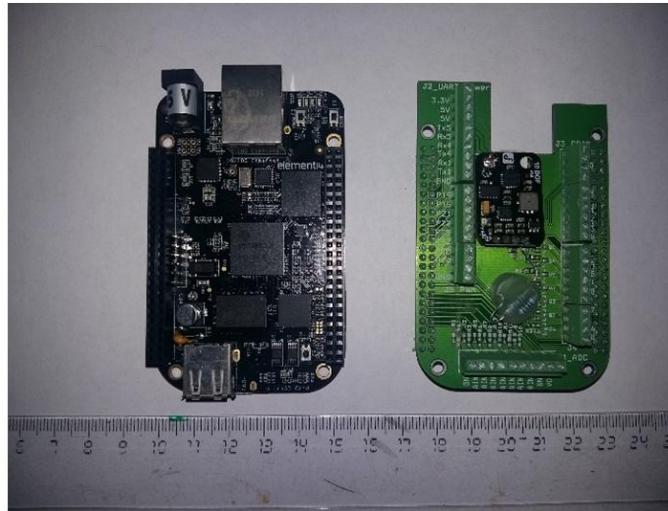


Рис. 4. Beaglebone black и разработанная плата расширения

Также были выделены следующие недостатки:

- ◆ невозможность надежного соединения с разъемами без разработки дополнительной платы расширения;
- ◆ крайне низкая защищенность платы по питанию и входам (в процессе эксплуатации вышло из строя несколько модулей).

В целом, данный модуль хорошо себя зарекомендовал, но проблемы с защищенностью платы на данный момент остановили дальнейшие испытания комплекса (ожидается изготовление платы для защиты процессорного модуля).

Первые бассейновые испытания робототехнического комплекса, показали близкое соответствие движения реального телеуправляемого аппарата и его цифровой модели в симуляторе. Наибольшее расхождение реальности и модели наблюдается из-за недостаточного моделирования влияния кабель-троса телеуправляемого аппарата на его движение.

3. Моделирование гидроакустического взаимодействия. Гидроакустическое взаимодействие не реализовано в симуляторе Gazebo, поэтому авторами было принято решение реализовать расширение (plugin) к этой среде моделирования.

Из среды Gazebo данный плагин получает информацию о положении объектов и их гидроакустических антенн, скорости и ориентации элементов роботов и т.д.

Взаимодействие плагина с алгоритмами управления происходит через интерфейсы излучателей, которые позволяют формировать излучаемый сигнал и приемников, которые получают суммарный сигнал на антеннах, сформированный расширением.

Структура формирования сигналов и помех для каждого автономного робота может быть представлена так, как показано на рис. 5 [11].

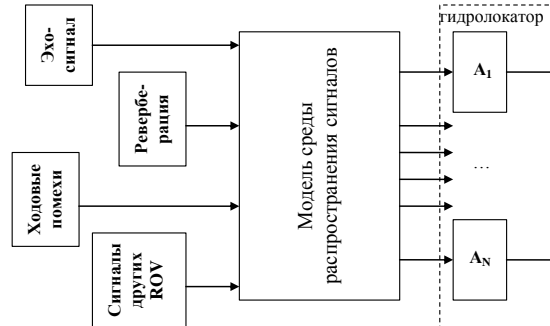


Рис. 5. Структура модели сигналов и помех

В общем случае робот должен иметь возможность посылать гидроакустический сигнал через излучающую антенну, этот сигнал распространяется в соответствии с характеристикой направленности этой антенны, рассеивается и поглощается средой. На каждую приемную антенну каждого робота необходимо формировать свою сумму сигналов и помех с учетом задержек и ослабления.

Сигналами считаем отраженные от объектов в толще воды эхосигналы, а также посланные сигналы другими роботами. Каждый элемент излучающей антенны излучает эффективное давление на интервале $0 < t < \tau_n$ [12]:

$$\frac{p_3 \cdot 10^{-0.05\beta r}}{r} \cdot f(t + \tau_i) \cdot R_3(\varphi_n, \Theta_n), \quad (1)$$

где p_3 – эффективное давление элемента в дальней зоне; β – коэффициент поглощения сигнала средой (дБ/км); $f(t)$ – мгновенные значения излучаемого давления, соответствующее закону модуляции посылки; $R_3(\varphi_n, \theta_n)$ – характеристика направленности элемента; $\tau_i = \frac{1}{c} [y_i (\sin \varphi_{0u} \cdot \sin \Theta_{0u}) + z_i \cos \Theta_{0u}]$ – задержка сигнала элемента i относительно начала координат, обеспечивающая фазирование в направлении $(\varphi_{0u}, \theta_{0u})$. Система координат показана на рис. 3.

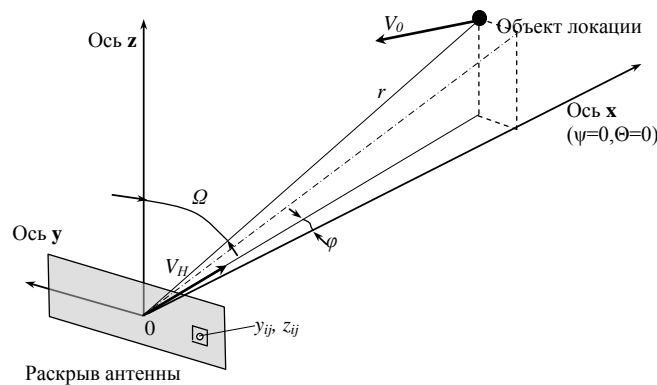


Рис. 6. Система относительных координат робота

Отраженный от объекта локации сигнал имеет бликовую структуру (конструкция большинства искусственных подводных конструкций имеет сложную форму и как следствие многобликовое отражение сигнала) и может быть записан следующим образом [2]:

$$P_{\varepsilon 0}(t) = p_{\varepsilon} \cdot 10^{-0.1\beta t} \sum_{k=1}^m \frac{R_{\text{эк}}}{2r_k^2} \sum_{i=1}^N f \left[\frac{1}{K_{\text{доп}}} \left(t - \frac{2r_k}{c} \right) + \tau_i \right] \cdot R_{\varepsilon}(\varphi_{\text{ук}}, \Theta_{\text{ук}}), \quad (2)$$

где $R_{\text{эк}}$ – эквивалентный радиус k -й точки; r_k – расстояние от начала координат до k -й точки; m – число «блестящих точек»; N – число элементов излучающей антенны; $K_{\text{доп}}$ – коэффициент доплеровских искажений длительности сигнала τ_i , меняющий функцию f на участке τ_i ; β – средний в полосе частот коэффициент поглощения, $R_{\varepsilon}(\varphi_{\text{ук}}, \Theta_{\text{ук}})$ – амплитудная характеристика направленности элемента излучателя в направлении точки k .

Помехами считаем все акустические сигналы, которые приходят на приемную антенну, но не являются полезным сигналом. Такими помехами в активной локации с подвижного робота являются [13]:

1. Реверберация, т.е. отраженные неоднородностями среды собственные посланные сигналы. Реверберационные помехи целесообразно моделировать на основе излученного сигнала с заданной модуляцией, воспроизводя закономерности распространения с рассеянием волн неоднородностями среды. Структурно делятся на объемную реверберацию, при которой рассеяние происходит объемными неоднородностями, и граничную, при которой рассеяние является следствием волнующейся поверхности и неровного дна.
2. Ходовые помехи, то есть помехи, создаваемые движением робота. К ним относят помехи обтекания (зоны турбулентности на углах и перегибах корпуса робота создают широкополосные помехи) и рассеянные границами среды шумы движителя. Помехи обтекания моделируются большим количеством точечных источников широкополосной помехи, расположенных внутри зон турбулентности, а их интенсивность берется по таблицам эмпирических данных для соответствующих скоростей движения и формы корпуса. Рассеянные границами шумы движителя являются следствием рассеяния акустических волн волнующейся поверхностью и неровным дном, и моделируются источниками помех на дне и поверхности.
3. Естественные и искусственные шумы моря – это шумы, не связанные с функционированием робота. К ним относят шум волнующейся поверхности, прибрежные шумы перекачивающейся гальки, звуки морских животных, а также промышленные шумы и шумы дальнего судоходства. Моделируются такие помехи в зависимости от источника либо точечными источниками на заданном расстоянии, либо распределенными по пространству.

Применительно к шумовым помехам можно, задав частотный спектр источника помехи, рассмотреть процесс в полосе частот, определяемой частотными характеристиками источника $G_u(\omega)$, элемента антенны $K_A(\omega)$ и полосового фильтра системы $K_{\text{ПФ}}(\omega)$ со спектром мощности

$$G(\omega) = G_u(\omega) \cdot |K_A(\omega)|^2 \cdot |K_{\text{ПФ}}(\omega)|^2, \quad (3)$$

считая частотные компоненты процесса статистически независимыми и влияние частотной характеристики среды несущественным при не слишком больших расстояниях. При генерировании таких помех необходимо учитывать распространение звука и рассеяние в среде, как это делается при вычислении соответствующих параметров.

Характерный спектр шума двигателей МПР в области рабочих частот активных систем имеет спад 6 дБ/октаву [14] и может быть вычислен как G_0/f^2 , где G_0 – приведенный шум на частоте 1кГц в полосе 1 Гц на расстоянии 1м и f – частота (в кГц) [14]. Излучение двигателя слабо направленное и может быть принято ненаправленным. Поле шума, рассеянного границами, принимаем однородным на поверхности поглощающей антенны. Отличия давления на элементах вызваны зависимостью коэффициента обратного рассеяния звука границами от угла θ и разностью хода лучей от рассеивающих участков до элементов. Учитывая слабую зависимость коэффициентов обратного рассеяния от частоты, можем определить рассеянную помеху как сумму рассеяний от элементов поверхности моря и дна при одинаковом спектре источника, определяемом частотной характеристикой тракта и источника [15]

$$n_{s,b}(f) = \frac{\sqrt{G_0}}{f} \cdot \gamma(f) \cdot K_{\text{ПФ}}(f), \quad (4)$$

и шум представляется как белый шум, пропущенный через фильтр с частотной характеристикой (3).

Учитывая определение коэффициента обратного рассеяния как соотношения интенсивностей рассеянной единицей площади поверхности на расстоянии 1 м к интенсивности падающей волны, полагаем, что давление рассеянной волны на 1 м можно представить как $p_{\text{пад}} \sqrt{S_{s,b}(\Theta) \Delta S_{s,b}}$ [16]. Тогда давление в центре антенны в допущении малого затухания на небольших расстояниях:

$$p_{\text{э}_0}(t) \cong n_{s,b}(t) \sum_{S_{s,b}} \sqrt{S_{s,b}(\Theta) \Delta S_{s,b}} \cdot \frac{1}{\rho_{\Delta S}}, \quad (5)$$

где $\Delta S_{s,b}$ – элемент площадки граничной поверхности моря S и дна b ; $\rho_{\Delta S}$ – расстояние от центра антенны до центра площадки $\Delta S_{s,b}$, $S_{s,b}(\Theta)$ – угловая зависимость коэффициента обратного рассеяния звука границей.

При разбиении $S_{s,b}$ на площадки $\Delta S_{s,b}$ разделяем переднюю полуплоскость S относительно антенны на площадки шириной Δx и Δy с центрами, заполняющими сектор углов по θ не менее 45° , из которого в основном приходит помеха (за исключением сильно расчлененного дна, рассеивающего по закону Ламберта). Индексы площадок по оси x – p , по оси y – q . Расстояние до центра площадки

$$\rho_{\Delta S_{pq}}^2 = H_{s,b}^2 + \left(\Delta x \left[\frac{1}{2} + (p-1)\right]\right)^2 + \left(\Delta y \left[\frac{1}{2} + (q-1)\right]\right)^2, \quad (7)$$

где $H_{s,b}$ – расстояние по вертикали до границ s и b .

Величина коэффициента обратного рассеяния может быть вычислена или взята из экспериментов [17, 18]. Коэффициент рассеяния крупными неровностями поверхностного волнения от частоты не зависит и дает основной вклад в рассеянную помеху, так как рассеяние на мелких неровностях значительно меньше и $s_{\text{рез}} \approx -40 \dots -30$ дБ.

Давление, рассеянное элементарным рассеивающим объемом $\Delta V_{\text{П}}$, принимаем

равным $p_{\text{V}}(t) = \frac{p_3 \sqrt{s_{\text{V}} \Delta V}}{r}$ на расстоянии 1 м при однократном рассеянии.

Давление объемной реверберации в центре антенны [14]:

$$p_{V_0}(t) = p_3 \sum_{i=1}^N \sum_n^V \frac{10^{-0.1\beta \cdot r}}{r^2} f\left(\frac{t}{K_{\text{и}}} + \tau_i\right) h_{\text{и}} R_3(\varphi, \Theta) \sqrt{s_{\text{V}} \Delta V}, \quad (8)$$

где $\Delta V = r^2 \sin\theta dr d\varphi d\theta$; $K_{\text{и}} = 1 + (V_{\text{и}}/c) \sin\varphi \cos\theta$ – коэффициент доплеровских искажений при излучении.

Суммирование по n выполняется по всем элементарным объемам, заполняющим объем V , окружающий сектор главного максимума перемноженных характеристик направленности излучения и приема, обуславливающий существенную часть реверберации. При этом $\Delta\varphi$ и $\Delta\theta$ целесообразно принимать как 0,1–0,2 расстройщиков характеристик направленности приемной антенны. Величина Δr сигнала принимается $\sigma\tau_n/4$, где τ_n – длительность излученного импульса. Координаты (φ, θ) определяются центром элементарного объема ΔV .

Сетка центров элементарных объемов определяется как $n\sigma\tau_n/4 = r_n$, $\varphi_n = \pm\Delta\varphi(n-1)$, $\theta_n = \Delta\theta(n-1)$. Вычисление производится до границ среды: $r_n < H/\cos\theta_{ns}$ и $r_n < (H_m - H)/\cos\theta_{nb}$.

Величина граничной реверберации определяется коэффициентами обратного рассеяния s_s и s_b , зависящими от угла θ [15]. Давление на расстоянии 1 м от единичной рассеивающей площадки представляется аналогично (3) при падении волны элемента i и однократного рассеяния:

$$p_{s,b}(t) = \frac{P_s}{r} f(t + \tau_i) h_{iu} R_s(\varphi, \Theta) \sqrt{s_{s,b}(\Theta) \Delta S_{s,b}}. \quad (9)$$

Давление в центре антенной решетки находится суммированием рассеянных волн облученной области границы:

$$p_{(s,b)0}(t) = p_s \sum_{i=1}^N \sum_{j_s,b}^S \frac{10^{-0.1\beta r_{j(s,b)}}}{r_{s,b}^2 + H_{s,b}^2} f\left(\frac{t}{K_{u(s,b)}^2} + \tau_i\right) h_{iu} R_s(\varphi_j, \Theta_j) \sqrt{s_{(s,b)j}(\Theta_j) \Delta S_{s,b}}. \quad (10)$$

В формуле (10) элементарная площадка $\Delta S = r_{s,b} \cdot \Delta\varphi \cdot \sin\theta \cdot \Delta r_{s,b}$, где $r_{s,b}$ – цилиндрическая координата центра площадки ΔS . Номер рассеивающей площадки $j_{s,b}$ и $r_{s,b} = \Delta r_{s,b} [1/2 + (j_{s,b} - 1)]$, где $j = 1, 2, 3 \dots$. Угол $\theta_j = \arctg(r_{s,b}/H_{s,b})$. Величина $\Delta r_{s,b}$ может приниматься $\sigma\tau_n/4$.

Коэффициент доплеровских искажений масштаба времени:

$$K_{u(s,b)} = [(1 + Vn/c) \cdot \sin\theta_j \cos\varphi_j]^2.$$

Рандомизация реверберационных помех происходит вследствие суммирования большого числа близких детерминированных импульсов со случайными начальными фазами.

Локальная шумовая помеха излучается ненаправленным источником с равномерным в первом приближении спектром в рабочей полосе частот активной гидролокационной системы. Шум достигает антенны по водному лучу и с отражением от дна и поверхности состоящим из когерентной и рассеянной частей [17]. Локальная помеха представляется аналогично (1) и ее спектр мощности $G(f) = |K(f)|^2 N_0$, где $K(f)$ учитывает частотные характеристики элемента антенны и полосового фильтра.

Давление помехи, пришедшей по водному лучу к центру антенны, представим в виде $p_o(t) = n(t)/r_l$, где $n(t)$ – результат пропускания шума с заданной спектральной плотностью N_0 через фильтр $K(f)$. Напряжение на выходе элемента l с задержками τ_l :

$$u_l(t) = \frac{n(t - \tau_l)}{r_l} h_{lu} R_s(\varphi_l, \Theta_l) \gamma, \quad (11)$$

где (φ_l, θ_l) – координаты источника шума, $\tau - \tau_l$ – задержка, обусловленная углами компенсации приемных каналов φ_{0L} и θ_{0L} , r_l – расстояние от антенны до локального источника помехи.

Рассеянная компонента может быть определена на основании решения задачи о рассеянии поверхностью излучения точечного источника [14]. Рассеянное поле двухмасштабной модели рассеяния характеризуется коэффициентом рассеяния m_s

на крупных неровностях, достигающим значения порядка 1.0, и на резонансных неровностях m_p , имеющих порядок $-40 \dots -30$ дБ, поэтому можно положить $m_p = 0.0001 \dots 0.003$, не зависящим от углов.

Тогда коэффициент рассеяния звука крупными неровностями поверхности может быть вычислен по формуле

$$m_s(\Theta_s, \varphi_s, \Theta_{0s}, \varphi_{0s}) = \frac{1.6 \times 10^2}{3 + 5.12V} \cdot \frac{[1 + \cos \Theta_s \cos \Theta_{0s} - \sin \Theta_s \sin \Theta_{0s} \cos(\varphi_s - \varphi_{0s})]^2}{(\cos \Theta_s + \cos \Theta_{0s})^4} \times \quad (12)$$

$$\times \exp \left[-\frac{5 \times 10^2}{3 + 5.12V} \cdot \frac{\sin^2 \Theta_s + \sin^2 \Theta_{0s} - 2 \cdot \sin \Theta_s \sin \Theta_{0s} \cos(\varphi_s - \varphi_{0s})}{(\cos \Theta_s + \cos \Theta_{0s})^2} \right] + 10^{-3}.$$

Коэффициент m_s сильно зависит от скорости ветра V и не зависит от частоты, т.е. может обоснованно применяться к рассеянию относительно узкополосных сигналов активных систем. Углы в формуле (12) показаны на рис. 4.

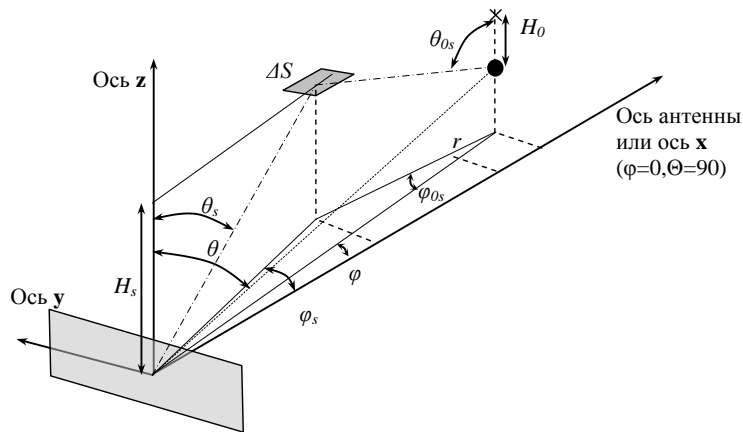


Рис. 4. Система координат для определения m_s .

Давление рассеянной компоненты помехи локального источника в центре антенны находится суммированием шумов, рассеянных элементарными площадками ΔS :

$$p_0(t) = \sum_{k=1}^S n(t) \cos \Theta_s \cos \Theta_{0s} \frac{\sqrt{m_s \Delta S_k}}{H_s H_0}, \quad (13)$$

где шумы площадок ΔS независимы.

Суммирование по площадкам ΔS целесообразно проводить за пределами интервала корреляции $n(t)$, что несложно. Расчет целесообразно вести от проекции оси канала L на плоскость XOY по площадкам $\Delta S = \sin \theta_{sk} r_k \Delta r \Delta \varphi$, где использованы цилиндрические координаты плоскости S ; при этом $r_k = \Delta r(1/2 + (k-1))$, $\theta_{sk} = \arctg(r_k/H_s)$. Величину $\Delta \varphi$ целесообразно принять $2-3^\circ$ и $\Delta r = 50 \dots 100$ м в зависимости от расстояния до источника шума. Число k находится делением расстояния от антенны до источника на Δr .

Таким образом, данный плагин позволяет реализовать с любой заданной точностью структуру сигналов и помех при взаимодействии нескольких подвижных роботов [19, 20] по гидроакустическому каналу, включая активное позиционирование (эхолокация, доплеровский лаг, использование гидроакустических маяков), передачу информации между роботами и поиск объектов в процессе взаимных перемещений и нестационарных помех.

Практическое сравнение результатов гидроакустического моделирования и натуральных испытаний ожидаются по мере готовности гидроакустического оборудования, к лету 2016-го года.

Заключение. Предложенный стек программного обеспечения позволяет существенным образом сократить временные и финансовые затраты на разработку опытного образца подводного робототехнического комплекса, а также повысить надежность функционирования полученного программного обеспечения. Все это приводит к возможности создавать новые образцы робототехнических комплексов предельно малыми коллективами специалистов за ограниченное время.

Большинство использованных технологий являются открытыми, т.е. потенциально могут применяться в том числе в военной сфере.

Данная платформа предполагается к использованию в различных проектируемых в СПбГМТУ робототехнических комплексах: микро-АНПА, ТНПА разных классов, подводный глайдер.

Отдельным плюсом является возможность обучения студентов вузов подводной робототехнике на приближенных к реальности цифровых моделях, т.к. возможности обеспечить каждого студента реальным робототехническим комплексом для практических занятий не представляется возможным, в то время как копирование виртуальных моделей имеет стоимость близкую к нулю. Данный подход к обучению студентов специальностей, связанных с робототехникой, уже апробируются в СПбГМТУ.

К выявленным недостаткам следует отнести высокий порог вхождения в систему моделирования, отсутствия штатных моделей для гидроакустического моделирования и малое количество доступной информации на русском языке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Войтов Д.В.* Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты. – М.: Моркнига, 2012. – 504 с.
2. *Prats M. et al.* An open source tool for simulation and supervision of underwater intervention missions // Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2012.
3. Gazebo gets better at flying and diving. – URL: <http://www.osrfoundation.org/gazebo-gets-better-at-flying-and-diving/> (дата обращения: 19.02.2016).
4. *Cook D., Vardy A., Lewis R.* A survey of AUV and robot simulators for multi-vehicle operations // Autonomous Underwater Vehicles (AUV), 2014 IEEE/OES.
5. *Чемоданов М.Н.* Структура программного обеспечения имитационной модели акустического взаимодействия технических подводных объектов // Материалы 10-й Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» (Таганрог-Домбай, 2015). – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2015. – Т. 3.
6. Gazebo. – URL: <http://www.gazebosim.org> (дата обращения: 19.02.2016).
7. ROS. – URL: <http://www.ros.org> (дата обращения: 19.02.2016).
8. SDF. – URL: <http://sdformat.org/> (дата обращения: 19.02.2016).
9. URDF. – URL: <http://wiki.ros.org/urdf> (дата обращения: 19.02.2016).
10. *Kermorgant O.* A dynamic simulator for underwater vehicle-manipulators // International Conference on Simulation, Modeling and Programming for Autonomous Robots SIMPAR 2014, Oct 2014.
11. *Гусев В.Г.* Системы пространственно-временной обработки гидроакустической информации. – Л.: Судостроение, 1988.
12. *Урик Р. Дж.* Основы гидроакустики: Пер с англ. – Л.: Судостроение, 1978. – 446 с.
13. *Eckart Carl.* Principles of underwater sound. NDRC Summary technical reports, Div. 6, Vol. 7, National research council, Committee on Undersea Warfare, 1946. – 313 p.

14. Белов Б.П., Миронов И.В. Семенов Н.Н. Цифровое формирование направленности гидроакустической антенны во временной области // Сборник научных трудов «Фундаментальная и прикладная гидрофизика». – СПб.: СПб научный центр РАН, 2011. – № 4 (1). – С. 32-47.
15. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика // Механика турбулентности. Ч. 1-2. – М.: Наука, 1965-1967.
16. Семенов Н.Н. Сравнение различных типов сигнала послышки для активного гидролокатора. – СПб.: Политехника, 2008. – № 9 (41). – С. 23-28.
17. Семенов Н.Н., Сетин А.И. Обработка экспериментальных данных отражения ФМ-сигнала от объекта сложной формы // XII Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА-2014). 27–29 мая 2014 года, Санкт-Петербург.
18. Вудворд Ф.М. Теория вероятностей и теория информации с применением в радиолокации. – М.: Сов. Радио, 1955. – 128 с.
19. Алешин Б.С. Ориентация и навигация подвижных объектов. – М.: Физматлит, 2006. – 426 с.
20. Тягунов О.А. Математические модели и алгоритмы управления промышленных транспортных роботов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2007. – Т. 5, № 5. – С. 63-69.

REFERENCES

1. Voytov D.V. Teleupravlyaemye neobitaemye podvodnyye apparaty [Remote-controlled unmanned underwater vehicles]. Moscow: Morkniga, 2012, 504 p.
2. Prats M. et al. An open source tool for simulation and supervision of underwater intervention missions, *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2012.*
3. Gazebo gets better at flying and diving. Available at: <http://www.osrfoundation.org/gazebo-gets-better-at-flying-and-diving/> (accessed 19 February 2016).
4. Cook D., Vardy A., Lewis R. A survey of AUV and robot simulators for multi-vehicle operations, *Autonomous Underwater Vehicles (AUV), 2014 IEEE/OES.*
5. Chemodanov M.N. Struktura programmnoy obespecheniya imitatsionnoy modeli akusticheskogo vzaimodeystviya tekhnicheskikh podvodnykh ob'ektov [The software structure of the simulation model the acoustic interaction of underwater technical objects], *Materialy 10-y Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya» (Taganrog-Dombay, 2015)* [Proceedings of 10-th all-Russian scientific-practical conference "Advanced systems and control problems" (Taganrog-Dombay, 2015)]. Rostov-na-Donu: YuFU, 2015, Vol. 3.
6. Gazebo. Available at: <http://www.gazebosim.org> (accessed 19 February 2016).
7. ROS. Available at: <http://www.ros.org> (accessed 19 February 2016).
8. SDF. Available at: <http://sdformat.org/> (accessed 19 February 2016).
9. URDF. Available at: <http://wiki.ros.org/urdf> (accessed 19 February 2016).
10. Kermorgant O. A dynamic simulator for underwater vehicle-manipulators, *International Conference on Simulation, Modeling and Programming for Autonomous Robots SIMPAR 2014, Oct 2014.*
11. Gusev V.G. Sistemy prostranstvenno-vremennoy obrabotki gidroakusticheskoy informatsii [System of spatial-temporal processing sonar information]. Leningrad: Sudostroenie, 1988.
12. Urik R. Dzh. Osnovy gidroakustiki [Fundamentals of hydroacoustics]: translation from English. Leningrad: Sudostroenie, 1978, 446 p.
13. Eckart Carl. Principles of underwater sound. NDRC Summary technical reports, Div. 6, Vol. 7, National research council, Committee on Undersea Warfare, 1946, 313 p.
14. Belov B.P., Mironov I.V. Semenov N.N. Tsifrovoe formirovanie napravlenosti gidroakusticheskoy anteny vo vremennoy oblasti [Digital formation orientation guide-robustiously antenna in the time domain], *Sbornik nauchnykh trudov «Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika»* [Collection of scientific papers "Fundamental and applied Hydrophysics"]. St. Petersburg: SPb nauchnyy tsentr RAN, 2011, No. 4 (1), pp. 32-47.

15. *Monin A.S., Yaglom A.M.* Statisticheskaya gidromekhanika [Statistical mechanics], *Mekhanika turbulentnosti* [Mechanics of turbulence]. Part 1-2. Moscow: Nauka, 1965-1967.
16. *Semenov N.N.* Sravnenie razlichnykh tipov signala posylki dlya aktivnogo gidrolokatora [Comparison of different types of signal packages for active sonar]. St. Petersburg: Politekhnik, 2008, No. 9 (41), pp. 23-28.
17. *Semenov N.N., Setin A.I.* Obrabotka eksperimental'nykh dannykh otrazheniya FM-signalov ot ob"ekta slozhnoy formy [Analysis of the experimental data of the reflection FM signal from the subject is complex], *XII Vserossiyskaya konferentsiya «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki» (GA-2014). 27–29 maya 2014 goda, Sankt-Peterburg* [XII all-Russian conference "Applied technologies of hydroacoustics and Hydrophysics" (HA 2014). On may 27-29, 2014, St. Petersburg].
18. *Vudvord F.M.* Teoriya veroyatnostey i teoriya informatsii s primeneniem v radiolokatsii [Probability theory and information theory with application in radar]. Moscow: Sov. Radio, 1955, 128 p.
19. *Aleshin B.S.* Orientatsiya i navigatsiya podvizhnykh ob"ektov [Orientation and navigation of moving objects]. Moscow: Fizmatlit, 2006, 426 p.
20. *Tyagunov O.A.* Matematicheskie modeli i algoritmy upravleniya promyshlennykh transportnykh robotov [Mathematical models and algorithms for control of transport industrial robots], *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* [Information-measuring and control systems], 2007, Vol. 5, No. 5, pp. 63-69.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.И. Машошин.

Кожемякин Игорь Владilenович – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; e-mail: 1861vp@mail.ru; 190008, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3; тел.: +78127146822; управление оборонных исследований и разработок; начальник управления.

Семенов Николай Николаевич – e-mail: nsemenoff@mail.ru; тел.: +79219404062; кафедра морских информационных систем и технологий; к.т.н.; доцент.

Путинцев Иван Андреевич – e-mail: ivanputiin@mail.ru; тел.: +79633483047; кафедра морских информационных систем и технологий; соискатель.

Чемоданов Михаил Ниеолаевич – e-mail: Mikhail.chemodanov@gmail.com; тел.: +79218654765; кафедра морских информационных систем и технологий; аспирант; ассистент.

Kozhemyakin Igor Vladilenovich – Saint-Petersburg State Marine Technical University; e-mail: 1861vp@mail.ru; Russia, 190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya str., 3; phone: +78127146822; Division of Defense Research and Development; head of Division.

Semenov Nikolay Nikolaevich – e-mail: nsemenoff@mail.ru; phone: +79219404062; the department of marine control systems and technologies; cand. of eng. sc.; associate professor.

Putintsev Ivan Andreevich – e-mail: ivanputiin@mail.ru; phone: +79633483047; the department of marine information systems and technologies; applicant.

Chemodanov Mikhail Nikolaevich – e-mail: Mikhail.chemodanov@gmail.com; phone: +79218654765; the department of marine control systems and technologies; postgraduate student.