

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА<sup>1</sup>

Л.А. Мартынова, А.В. Гриненков, А.О. Пронин, Ю.В. Куликовских  
(Санкт-Петербург)

Применение новых технологий к объектам морской среды обитания требует предварительной их проработки с использованием математического моделирования [1], поскольку проведение натурных испытаний – крайне дорогостоящее мероприятие. Поэтому использование мультиагентной технологии [2,3] при построении системы управления (СУ) автономного обитаемого подводного аппарата (АНПА) требует предварительного тестирования реализуемых алгоритмов и взаимодействия подсистем-агентов между собой с помощью имитационного моделирования.

Основными задачами, которые необходимо решить на этапе имитационного моделирования мультиагентной системы управления АНПА, являются:

- тестирование алгоритмов функционирования каждой подсистемы СУ АНПА;
- тестирование алгоритмов взаимодействия подсистем – агентов между собой;
- определение информации, которой должны обмениваться подсистемы-агенты между собой в ходе своего функционирования;
- определение параметров взаимодействия подсистем-агентов между собой.

Ранее [4,5] разрабатываемые имитационные модели для подобных систем отличались тем, что в основе своей имели единый программный файл с использованием централизованных алгоритмов с последовательным воспроизведением процессов в одной программе. Такой подход был оправдан при моделировании централизованного принципа управления подводного аппарата, однако при этом создавал ограничения, связанные с необходимостью получения всех входных данных перед тем, как производить соответствующие операции над ними и распространять результаты всем заинтересованным сторонам.

Мультиагентный подход в основе своей предполагает использование параллельных и распределенных вычислений [6,7], что повлекло за собой для реализации в имитационной модели функционирования мультиагентной СУ необходимость решения специфических задач, связанных с синхронизацией процессов, обменом данными и распределением ресурсов вычислительного процесса.

**Цель работы** заключалась в разработке имитационной модели функционирования мультиагентной СУ АНПА с воспроизведением процессов функционирования каждого агента-подсистемы и взаимодействия между агентами с реализацией параллельных и распределенных вычислений.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- определены подходы к построению имитационной модели;
- разработаны имитационные модели каждого агента;
- разработано взаимодействие агентов между собой;
- проведено тестирование имитационной модели функционирования мультиагентной СУ АНПА.

Научная новизна данной работы заключается в том, что по сравнению с ранее используемой в АНПА мультиобъектовой и многокомпонентной СУ АНПА с иерархической структурой в настоящей работе рассмотрено применение мультиагентной технологии к построению СУ АНПА. Соответственно, математическая имитационная модель такой

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 17-08-00666).

системы также является новой.

Практическая значимость разработанной имитационной модели заключается в появлении возможности тестирования разработанных алгоритмов функционирования отдельных подсистем и СУ в целом, выборе параметров обмена информацией между отдельными подсистемами, оценке вычислительных ресурсов, необходимых для функционирования СУ АНПА, с тем, чтобы в дальнейшем перенести их на аппаратные средства, находящиеся на борту АНПА.

### Особенности мультиагентной СУ

СУ АНПА, как и любого другого робота [8], состоит из подсистем, основными из которых являются (рис. 1):

- система взаимодействия с оператором для получения задания на выполнение миссии;
- интеллектуальная система, определяющая способы выполнения выданного задания;
- система восприятия, обеспечивающая освещение окружающей обстановки;
- система поведения, обеспечивающая движение АНПА в различных условиях: ограниченности пространства для маневра, препятствий, мелководья и т.д.;
- система приводов, обеспечивающая функционирование движительно-рулевых механизмов для перемещения АНПА из одной точки в другую.

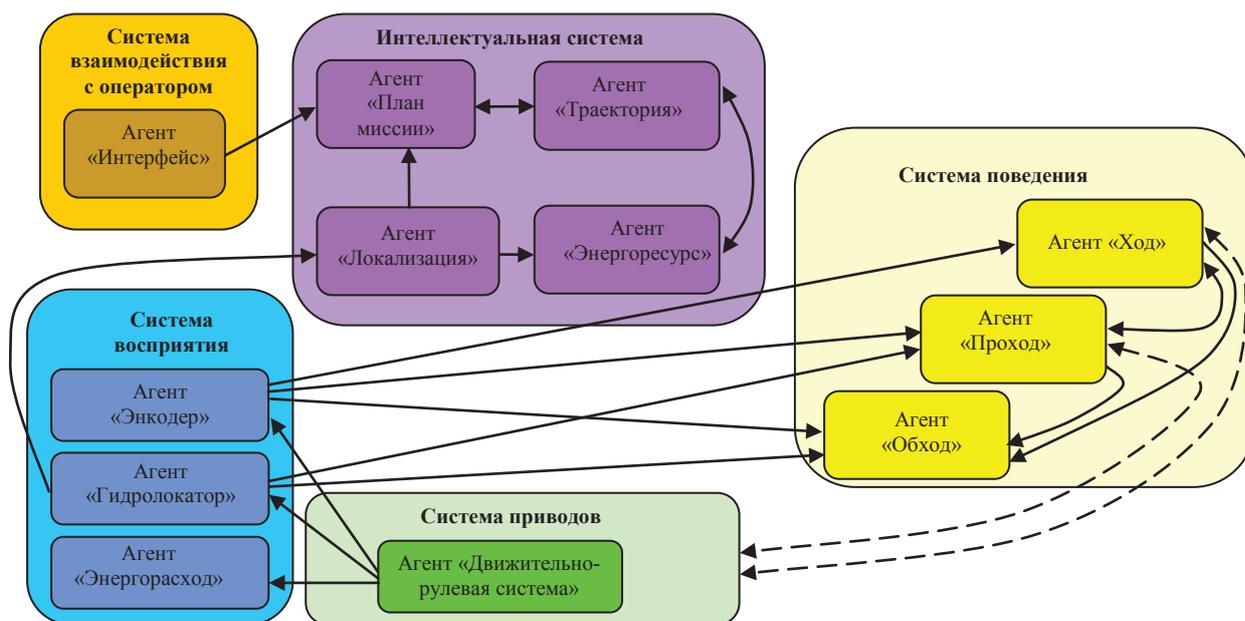


Рис. 1. Структура мультиагентной системы управления АНПА

Каждая подсистема состоит из одного либо группы агентов. Так, система взаимодействия с оператором реализует свои функции при помощи агента «Интерфейс», интеллектуальную систему образуют когнитивные агенты «План миссии», «Траектория», «Энергоресурс» и «Локализация». Система восприятия обеспечивается агентами, соответствующими каждому датчику. Этими же агентами производится обработка данных, полученных от гидролокатора, как основного средства освещения обстановки. Обработка данных включает в себя предварительную обработку «сырой» информации с антенн, первичную и вторичную обработки информации для формирования трасс движения объектов по отдельным отметкам от цели, классификацию обнаруженных объектов, позволяющую на ранних этапах обработки

информации выделить класс цели и с учетом результатов выделения – определить координаты и параметры ее движения. Система поведения обеспечивается набором агентов движения, по одному для каждого основного типа поведения: «Ход», «Проход» [через узкость], «Обход» [препятствий]. Система приводов представлена единственным агентом «Движительно-рулевая система».

### Описание имитационной модели

При формировании имитационной модели переход к параллельным вычислениям потребовал решения двух основных задач [7]:

- обеспечение равномерной загрузки процессоров;
- обеспечение сбалансированной скорости обмена информацией между процессорами.

Из используемых в настоящее время двух основных подходов к распараллеливанию вычислений (параллелизм данных и параллелизм задач) был выбран параллелизм задач [7]. Особенности его являются большая гибкость и большая свобода при разработке программы, эффективно использующей ресурсы параллельного компьютера и, как следствие, возможность достижения максимального быстродействия.

При реализации параллелизма задач вычислительные задачи были разбиты на несколько относительно самостоятельных подзадач, и каждый процессор загружался своей собственной подзадачей. Для каждой подзадачи была написана своя собственная программа. Все эти программы обменивались результатами своей работы. При реализации распараллеливания вычислений путем параллелизма задач был минимизирован обмен данными между задачами, так как пересылка данных представляет собой наиболее ресурсоемкий процесс.

Кроме того, была решена задача синхронизации процессов, поскольку моделирование функционирования АНПА происходит с разной скоростью воспроизведения процессов в одном и том же такте имитации. Дополнительно были решены характерные для распределенных вычислений задачи, связанные с разной скоростью передачи данных и ухода часов каждого из вычислителей. Решение задачи синхронизации обеспечивалось путем упорядочивания событий и реализации логических часов [7], поскольку при моделировании функционирования АНПА имеет значение не точное время наступления того или иного события (например, события отправки или получения сообщения), а последовательность, в котором эти события происходили. Для реализации указанного подхода использована модель логических часов Л. Лэмпорта [7], отсчитывающая логическое время и используемая для упорядочивания событий, происходящих в различных процессах распределенной системы. Механизм логических часов позволил отслеживать причинно-следственный порядок событий распределенного вычисления и упорядочить события в одну или несколько последовательностей. Использование логического времени, отсчитываемого такими часами, значительно упростило разработку алгоритмов для распределенных систем.

### Сценарии имитационного моделирования

Имитационное моделирование функционирования АНПА с мультиагентной СУ было протестировано при выполнении двух сценариев: функционирование СУ АНПА при загрузке миссии в АНПА и функционирование СУ АНПА в ходе выполнения миссии. Диаграмма обмена информацией между агентами представлена на рис.2.

*Сценарий 1.* В СУ АНПА передается план миссии и момент начала ее выполнения агенту «Интерфейс». Агент «Интерфейс» перенаправляет поступившее сообщение агенту «План миссии» для оценки необходимых энергоресурсов для выполнения миссии. При этом оценивается расстояние для прохождения миссии и скоростные режимы, исходя из времени на прохождение каждого участка. Полученные результаты расчетов передаются агенту

«Траектория». Агент «Траектория» производит расчет необходимых ресурсов с учетом удельного расхода энергоресурса на единицу времени или на единицу расстояния. Результат расчета в виде потребного ресурса передается агенту «Энергоресурс». Агент «Энергоресурс» производит анализ возможности выполнения миссии путем сравнения потребностей в энергоресурсе с возможностями АНПА по запасам энергоресурса. Если ресурса достаточно для выполнения миссии, принимается, что миссия может быть выполнена, в противном случае агенту «Траектория» выдается сообщение о невозможности выполнения миссии. От агента «Траектория» сообщение о невозможности выполнения миссии передается агенту «План миссии», который, в свою очередь, передает его агенту «Интерфейс» для корректировки миссии. В случае достаточности энергоресурса для выполнения миссии оператору на экране выдается сообщение о том, что миссия принята. В случае положительного решения агента «Энергоресурс» относительно возможности выполнения миссии дальнейшее управление передается агенту «Траектория», тот, в свою очередь, передает агенту «План миссии». Агент «План миссии» передает агенту «Ход» сообщение о первом участке миссии. Агент «Ход» формирует параметры движения АНПА. В момент, когда текущее время совпадет с заданным временем начала выполнения миссии, которое отслеживает агент «План миссии», агенту «Двигательно-рулевое устройство» передается сообщение о старте миссии и параметрах движения АНПА.

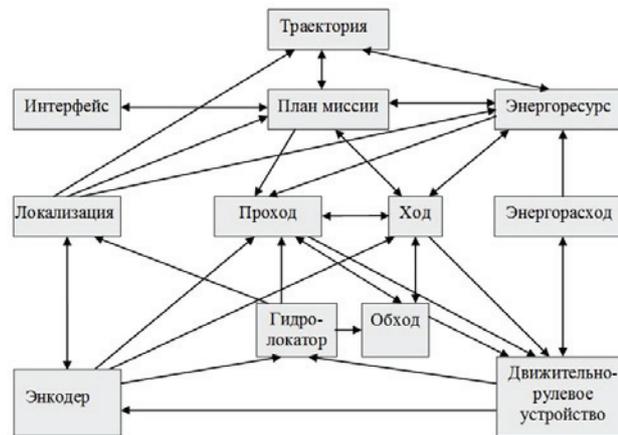


Рис. 2. Диаграмма обмена информацией между подсистемами-агентами

*Сценарий 2.* В ходе движения АНПА агент «Двигательно-рулевое устройство» передает со своих датчиков данные в «Энкодер» о параметрах движения. Агент «Энкодер» определяет локальные координаты АНПА, оценивает пройденное расстояние между предыдущим и текущим положениями АНПА и передает полученные результаты агенту «Локализация» для определения глобальных координат (географических координат широты, долготы) положения АНПА. Агент «Локализация» осуществляет пересчет локальных координат в географические и передает данные агенту «План миссии» для оценки соответствия положения АНПА заданному маршруту. Постоянно происходит освещение окружающей обстановки с участием агента «Гидролокатор». Одновременно происходит оценка достаточности оставшегося энергоресурса для выполнения миссии, для чего направляется запрос агенту «Энергоресурс», а от него запрос агенту «Энергорасход» о текущем расходе энергоресурса при текущем скоростном режиме. Агент «Энергорасход» производит оценку расхода, и результаты оценки передает агенту «Энергоресурс». Агент «Энергоресурс» производит расчет оставшегося энергоресурса и сравнивает его с необходимым запасом для завершения выполнения миссии. Если остаток близок к критическому, то миссия прекращается, о чем последовательно передается сообщение агенту «План миссии», затем агенту «Интерфейс». Если же оставшегося ресурса достаточно для выполнения миссии, то

агент «Ход» вырабатывает параметры движения для обеспечения выполнения АНПА миссии. Вырабатываемые параметры движения АНПА передаются агенту «Движительно-рулевое устройство». Датчики агента «Движительно-рулевое устройство» постоянно передают данные о формируемых в процессе движения параметрах агенту «Энкодер».

Описанный алгоритм циклически повторяется до тех пор, пока агент «Локализация» не сообщит о достижении первой маршрутной точки, или агент «Энергоресурс» не сообщит об окончании запасов энергоресурса и прекращении выполнения миссии.

### Результаты имитационного моделирования

Для оценки ресурсов, необходимых для обмена информацией между агентами, был проведен численный эксперимент с использованием имитационной модели. Рассматривался тактический эпизод, связанный с движением АНПА при входе в узкость, а затем – при обходе возникшего препятствия. При движении АНПА функционировала мультиагентная система управления, при этом происходил обмен информацией между агентами в виде сообщений, содержащих данные, команды, запросы, ответы.

Эксперимент проводился в два этапа. *На первом этапе* исследований осуществлялась отправка одиночного сообщения с различными интервалами при их изменении от 0 до 100 мс с дискретностью 10 мс.

Результаты моделирования показали, что с увеличением интервала между отправками от 0 до 70 мс доля принятых сообщений по отношению к передаваемым возросла от 15% до 100%, и с дальнейшим увеличением интервалов – не менялась. Вместе с тем оказалось, что с увеличением интервала объем отправляемой информации упал в 2 раза. Так, при интервале в 0 мс было отправлено 790 сообщений, а при интервале в 70 мс – лишь 414 сообщений.

Поскольку при полноценном функционировании мультиагентной СУ происходит «пакетная» отправка сразу нескольких различных информационных сообщений различным адресатам, то *на втором этапе* исследований проводились численные эксперименты по оценке влияния количества отправленных сообщений на долю принятых сообщений от общего числа отправленных.

При проведении численного эксперимента в качестве параметров отправок были приняты количество отправок и интервал между отправлениями. Рассматривались три значения интервала между отправлениями: 10 мс, 40 мс и 70 мс. Для каждого из указанных значений перебиралось количество отправленных сообщений от 1 до 100 с интервалом 10 сообщений. В результате оценивалось количество принятых адресатами сообщений для каждого варианта их передачи.

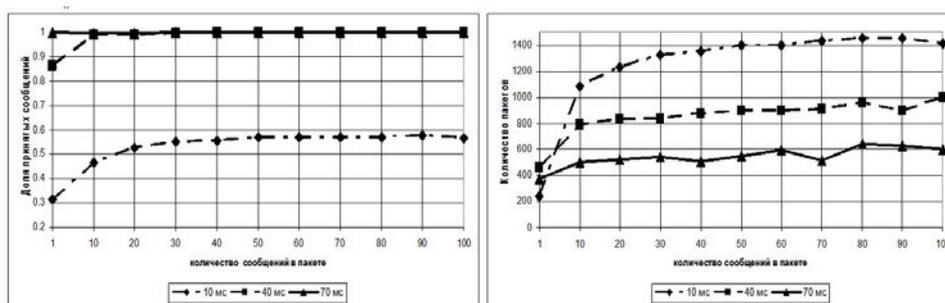


Рис. 3. Доля (слева) и количество (справа) принятых сообщений

Из результатов, представленных на рис.3, видно, что при увеличении временного интервала между отправкой сообщений от 10 мс до 40 мс доля принятых сообщений выросла от 0,55 до 1,00. Вместе с тем объем передаваемой информации существенно сократился с увеличением интервала между отправлением сообщений.

### Выводы

1. Анализ особенностей функционирования мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата позволил разработать имитационную модель ее функционирования, в которой каждой подсистеме-агенту соответствует самостоятельная программа, а обмен информацией происходит по сетевым протоколам.

2. С использованием разработанной имитационной модели были проведены исследования по определению допустимых временных интервалов между передачей сообщений и ограничений по скорости их отправки.

3. Результаты исследований показали, что с увеличением временных интервалов между отправлением сообщений повышается доля принятых сообщений из числа отправленных, но вместе с тем сокращается скорость передачи сообщений. Так, при рассмотрении интервалов 10 мс, 40 мс и 70 мс между отправлением пакетов различного объема (от 1 до 100 сообщений в пакете) оказалось, что доля принятых сообщений выросла от 0,55 до 1,00. Однако при этом количество передаваемых пакетов сократилось с 1400 при интервале 10 мс до 850 при интервале 40 мс и до 600 при интервале 70 мс. Полученные результаты позволили выявить оптимальный вариант обмена информацией между агентами: временной интервал между передачей сообщений – 40 мс, допустимый объем передаваемой информации – 800 сообщений.

4. Результаты исследований позволили определить параметры обмена информацией между подсистемами-агентами и в дальнейшем разрабатывать алгоритмы системы управления с учетом полученных ограничений.

### **Литература**

1. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / Под ред. М.Д. Агеева. М.: Наука, 2005. 320 с.
2. **Ржевский Г.А., Скобелев П.О.** Как управлять сложными системами? Мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления предприятиями. Самара: Офорт, 2015. 290 с.
3. **Бусленко Н.П.** Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 400с.
4. **Мартынова Л.А., Малышкин Г.С., Шебалов А.Н.** Разработка системы имитационных и аналитических моделей и модельные исследования влияния состава и параметров системы самонаведения ПМО // Судостроительная промышленность. Сер.V. 1996. Вып.15. С.32–42.
5. **Мартынова Л.А., Новаков В.А.** Программно-аппаратный комплекс имитационного моделирования и отображения боевых действий // Системный анализ при создании и применении кораблей, вооружения и военной техники. – Научно-тематический сборник (труды ВМА им. Кузнецова). – Вып.14. СПб.: ООО «НИЦ «Моринтех». 2003. С.171–179.
6. **Бродский Ю.И.** Распределенное имитационное моделирование сложных систем М.: ВЦ РАН, 2010, 156 с.
7. **Косяков М.С.** Введение в распределенные вычисления. СПб: НИУ ИТМО, 2014. 155 с.
8. **Innocenti B.** A multi-agent architecture with distributed coordination for an autonomous robot. Ph.D. dissertation –Universitat de Girona, 2009. P.147.