

Mashinistov Ruslan Yur'evich – e-mail: rmashinistov@gmail.com; phone: +74991967100, ext. 3203; cand. of phis.-math. sc.; deputy head of laboratory.

Poyda Alexey Anatol'evich – e-mail: Poyda_AA@nrcki.ru; phone: +74991967100, ext. 3311; cand. of phis.-math. sc.; head of laboratory.

Ryabinkin Eugene Alexandrovich – e-mail: rea@grid.kiae.ru; phone: +74991967777; head of department.

УДК 519.87

DOI 10.18522/2311-3103-2016-11-100112

Л.А. Мартынова**ОРГАНИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ
В ИМИТАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ
АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА***

Описана реализация распределенных вычислений при разработке комплексной имитационной модели функционирования автономного необитаемого подводного аппарата. Комплексная имитационная модель формируется из имитационных моделей, воспроизводящих функционирование автономного необитаемого подводного аппарата и его отдельных частей в зависимости от окружающей обстановки - морской среды и наличия других объектов. Имитационные модели отличаются друг от друга особенностями воспроизводимых процессов и степенью детализации. Максимальная степень детализации обеспечивается при буквальном воспроизведении алгоритмов обработки информации в бортовом вычислителе. Однако для большинства задач такая степень детализации является избыточной, поэтому более целесообразным является использование имитационных моделей, являющихся результатом агрегирования более детальных моделей. В работе рассмотрены различные задачи, связанные с необходимостью моделирования функционирования автономного необитаемого подводного аппарата, и соответствующие им уровни детализации воспроизводимых процессов. При этом решается задача организации взаимодействия отдельных имитационных моделей в рамках функционирования единой комплексной имитационной модели. Определены требования, которым должна удовлетворять организация взаимодействия между имитационными моделями: независимо, параллельно, синхронно, с универсальным обменом информацией. В качестве решения указанной задачи взаимодействия имитационных моделей предложено использовать распределенные и параллельные вычисления. Для обеспечения их реализации выработаны подходы к их формированию, описаны принципы реализации распределенных вычислений, отмечены положительные стороны их использования. Реализация распределенных и параллельных вычислений привела к ускорению вычислительного процесса за счет параллелизма вычислений, снижению трудозатрат на разработку программ ввиду независимой их разработки, упрощению локализации ошибок, использованию общих баз данных, возможности использования удалено расположенных компьютеров, перераспределению (по возможности) вычислительных ресурсов между компьютерами. Использование распределенных вычислений позволило более эффективно вести отладку отдельных имитационных моделей, существенно сократить время на формирование комплексной имитационной модели, организовать менее затратный вычислительный процесс, оперативно проводить исследования с использованием имитационного моделирования, что, в свою очередь, привело к существенному сокращению машинного времени на проведение численных экспериментов. На конкретных примерах показаны преимущества использования распределенных вычислений при разработке комплексной имитационной модели функционирования автономного необитаемого подводного аппарата.

Параллельные и распределенные вычисления; имитационная система; имитационная модель; агрегирование; декомпозиция.

* Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-08-01006-а.

L.A. Martynova

**REALIZATION OF DISTRIBUTED COMPUTING IN SIMULATION SYSTEM
OF MODELING THE AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE
OPERATION**

Realization of the distributed calculations when developing complex imitating model of functioning of the independent uninhabited submersible is described. The realization of distributed computing in the development of an integrated simulation model of autonomous underwater vehicle operations. Integrated simulation model is generated from simulation models that reproduce the functioning of autonomous underwater vehicle and its parts, depending on the environment, i.e. the marine environment and the availability of other facilities. Simulation models differ in repeatable processes and level of detail. The maximum degree of detail is provided by the literal reproduction of information processing algorithms in the onboard calculator. However, for most applications this degree of detail is superfluous, therefore more appropriate is the use of simulation models, which are the result of aggregating the more detailed models. The paper discusses various problems associated with the need of modeling the functioning of autonomous underwater vehicle, and the corresponding level of detail reproducible processes. This solves the problem of interaction of individual simulation models in the framework of a single integrated simulation model. The requirements to be met by the organization of interaction between the simulation models: independently, in parallel, simultaneously, with the universal exchange of information. As a solution to this problem of interaction simulation models it is proposed to use the distributed and parallel computing. In order to ensure their implementation developed are the approaches to their formation, described are the principles of the implementation of distributed computing, the positive aspects of their use are marked. Implementation of distributed and parallel computing has led to an acceleration of the computing process by overlapping computation, reduction in labor costs for the development of programs due to independence of their development, simplifying the error localization, use of common databases, the possibility of using the removed located computers, redistribution (if possible) of computing resources between computers. The use of distributed computing has allowed us to more effectively conduct the debugging in individual simulation models, significantly reduce the time for the formation of an integrated simulation model, organize less expensive computational process, promptly conduct research using simulation, which in turn led to a significant reduction in computing time for numerical experiments. On concrete examples showed are the benefits of using the distributed computing with the development of an integrated simulation model of the functioning of autonomous underwater vehicle.

Parallel and distributed computing; simulation system; simulation model; aggregation; decomposition.

Введение. Автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА) представляет собой сложный робототехнический комплекс морской среды обитания [1–9].

Для выбора тактики его применения и отработки технических решений проведение натурных испытаний для АНПА, в отличие от робототехнических комплексов воздушного и наземного применения, крайне затруднительно. Во-первых, проведение натурального эксперимента – крайне затратное мероприятие и экономически неоправданное. Во-вторых, результаты натурального эксперимента во многом зависят от условий, в которых они проводились – от особенностей морской среды. И принятые технические решения, оптимальные в одних условиях, могут оказаться совершенно неэффективными в других условиях. Это означает, что основные исследования функционирования АНПА необходимо проводить с использованием математического моделирования. При этом наиболее информативным является имитационное моделирование функционирования АНПА.

Имитационное моделирование обеспечивает воспроизведение процессов, сопровождающих функционирование АНПА. При этом имитационное моделирование отдельных процессов функционирования АНПА происходит с различной степенью детализации в зависимости от поставленной в исследованиях задачи. Это

породило необходимость взаимозаменяемости имитационных моделей с разной степенью детализации в составе комплексной имитационной модели, воспроизводящей весь рассматриваемый процесс с участием АНПА в целом.

Ранее программа, реализующая комплексную имитационную модель, строилась единой с использованием так называемых централизованных алгоритмов с последовательным воспроизведением процессов в одной программе.

Такой подход создавал определенные ограничения, поскольку централизованные алгоритмы для своей работы требуют получения всех входных данных, и только после этого производят соответствующие операции над ними, а уже затем распространяют результаты всем заинтересованным сторонам.

Поэтому для достижения хорошей масштабируемости был осуществлен переход к использованию распределенных алгоритмов, предусматривающих параллельное выполнение частей одного и того же алгоритма независимыми процессами [10–27].

В отличие от централизованных алгоритмов, распределенные алгоритмы обладают следующими свойствами.

Отсутствие знания глобального состояния. Централизованные алгоритмы обладают полной информацией о состоянии всей системы и определяют следующие действия, исходя из ее текущего состояния. В свою очередь, каждый процесс, реализующий часть распределенного алгоритма, имеет непосредственный доступ только к своему состоянию, но не к глобальному состоянию всей системы. Соответственно, процессы принимают решения только на основе своей локальной информации. Информацию о состоянии других процессов в распределенной системе каждый процесс может получить только из пришедших сообщений, и эта информация может оказаться устаревшей на момент получения.

Отсутствие общего единого времени. События, составляющие ход выполнения централизованного алгоритма полностью упорядочены: для любой пары событий можно утверждать, что одно из них произошло раньше другого. При выполнении распределенного алгоритма вследствие отсутствия единого для всех процессов времени. События нельзя считать полностью упорядоченными: для некоторых пар событий можно утверждать, какое из них произошло раньше другого, для других – нельзя.

Отсутствие детерминизма. Централизованный алгоритм чаще всего определяется как строго детерминированная последовательность действий, описывающая процесс преобразования объекта из начального состояния в конечное. Таким образом, если централизованный алгоритм запускать на выполнение с одним и тем же набором входных данных, то будет получен один и тот же результат и одинаковая последовательность переходов из состояния в состояние. В свою очередь выполнение распределенного алгоритма носит недетерминированный характер из-за независимого исполнения процессов с различной и неизвестной скоростью, а также из-за случайных задержек передачи сообщений между ними. Поэтому, несмотря на то, что для распределенных систем может быть определено понятие глобального состояния, выполнение распределенного алгоритма может лишь ограниченно рассматриваться как переход из одного глобального состояния в другое, так как для этого же алгоритма выполнение может быть описано другой последовательностью глобальных состояний.

Устойчивость к отказам. Сбой в любом из процессов или каналов связи не должен вызывать нарушения работы распределенного алгоритма.

Перечисленные свойства указывают на отсутствие в распределенных алгоритмах ограничений, присущих централизованным алгоритмам. Но вместе с тем распределенные алгоритмы оказываются более сложными при их проектировании и реализации. Сложности связаны с:

- ◆ обеспечением равномерной загрузки процессоров;
- ◆ обеспечением сбалансированной скорости обмена информацией между отдельными процессами;
- ◆ отсутствием единого времени;
- ◆ отсутствием общей памяти;
- ◆ независимостью и гетерогенностью процессов.

В связи с этим целью настоящей работы явилось определение подходов, обеспечивающих преодоление перечисленных выше сложностей при реализации распределенных вычислений в имитационном моделировании функционирования АНПА. Рассмотрение имитационной системы моделирования функционирования АНПА с разной степенью детализации и выбор подходов к формированию комплексной имитационной модели с использованием распределенных вычислений ранее не проводились.

Для достижения поставленной в работе цели были решены следующие задачи:

- ◆ выбор подхода к распараллеливанию вычислений;
- ◆ синхронизация процессов, происходящих на разных компьютерах, взаимодействующих по сети;
- ◆ формирование подходов к обмену информацией;
- ◆ формирование комплексной имитационной модели из имитационных моделей отдельных частей АНПА с различной степенью детализации.

1. Описание особенностей имитационной системы АНПА. Особенность имитационной системы АНПА заключается в необходимости использования различной степени детализации имитационных моделей в зависимости от поставленной перед исследованиями задачи.

В идеале при имитационном моделировании желательно буквальное воспроизведение всех процессов, а именно:

- ◆ функционирование АНПА: алгоритмов его поведения и воспроизведение работы его устройств и механизмов;
- ◆ воспроизведение окружающей среды с учетом особенностей ее воздействия на принятие решений в АНПА;
- ◆ функционирование сторонних объектов – как подвижных, так и неподвижных.

Однако, буквальное воспроизведение всех процессов приводит к существенным затратам временных и вычислительных ресурсов. Увеличения вычислительных мощностей, обеспечивающих функционирование глубоко детализированной имитационно модели, влечет за собой цепочку задач, связанных с поиском высокопроизводительных компьютеров, выбором способов охлаждения вычислителей, выделением дополнительной площади для размещения компьютеров и т.д.

Однако не всегда целесообразно детальное моделирование всех происходящих в АНПА процессов, поскольку:

- ◆ возникает перегруженность количества используемых параметров, затрудняющих понимание воспроизводимых процессов и определение причинно-следственных связей;
- ◆ наблюдается высокая нагрузка на вычислительные ресурсы;
- ◆ происходит неоправданная продолжительность проведения численного эксперимента.

Для повышения эффективности проведения исследований функционирования АНПА и сокращения времени на проведение численного эксперимента было решено перейти к использованию имитационных моделей с разной степенью детализации воспроизводимы процессов. Степень детализации зависит от цели проводимых исследований:

Основные задачи, связанные с моделированием АНПА, можно представить в виде иерархической схемы (рис. 1).



Рис. 1. Иерархическая схема задач с использованием АНПА

Для проведения численного эксперимента был разработан целый ряд имитационных моделей по каждой из составных частей АНПА с различной степенью детализации. При формировании имитационных моделей были использованы механизмы агрегирования и декомпозиции имитационных моделей.

Использование сформированной комплексной имитационной модели из имитационных моделей отдельных частей АНПА в численном эксперименте потребовало решения задач обеспечения распределенных вычислений.

2. Подход к распараллеливанию вычислений. При переходе к параллельным вычислениям необходимо было решить две основные задачи [10]:

- ♦ обеспечить равномерную загрузку процессоров, так как если основная вычислительная работа будет ложиться на один из процессоров, то возникает ситуация обычных последовательных вычислений и никакого выигрыша за счет распараллеливания вычислительных процессов не будет;
- ♦ обеспечить сбалансированную скорость обмена информацией между процессорами, так как если вычисления выполняются на высокопроизводительных процессорах, загрузка которых достаточно равномерная, но скорость обмена данными низкая, основная часть времени будет тратиться впустую, на ожидание информации, необходимой для дальнейшей работы данного процессора.

При реализации распределенных вычислений необходимо было:

- ♦ исключить единое времени для компонентов распределенной системы, что влечет за собой отсутствие синхронности в их работе;

- ◆ исключить общую память, что приводит к обмену сообщениями между программными компонентами распределенной системы для их взаимодействия и синхронизации, а также к отсутствию единого для всех процессоров физического времени.

Кроме того, необходимо было преодолеть независимость и гетерогенность, поскольку компьютеры, входящие в состав распределенной системы, слабо связаны: они имеют различный состав и различную производительность и, следовательно, обеспечивают различное время выполнения идентичных задач.

3. Распараллеливание вычислений. Из используемых в настоящее время двух основных подходов к распараллеливанию вычислений (параллелизм данных и параллелизм задач) для имитационного моделирования функционирования АНПА в работе предложено использовать параллелизм задач [10]. Особенности данного подхода 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 вычислительная задача разбивается на несколько относительно самостоятельных подзадач, и каждый процессор загружается своей собственной подзадачей. Для каждой подзадачи пишется своя собственная программа. Все эти программы обмениваются 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.

Далее возникла необходимость решения задачи синхронизации процессов, поскольку из-за разной степени детализации имитационных моделей отдельных процессов, участвующих в функционировании АНПА, моделирование функционирования АНПА происходит с разной скоростью воспроизведения процессов в одном и том же такте имитации. К этому добавляются характерные для распределенных вычислений задачи, связанные с разной скоростью передачи данных и ухода часов каждого из вычислителей.

Решение задачи синхронизации было найдено путем упорядочивания событий и реализации логических часов [10].

4. Упорядочивание событий. При моделировании функционирования АНПА имеет значение не точное время наступления того или иного события (например, события отправки или получения сообщения), а порядок, в котором эти события происходили, т.е. требуется определить произошло ли данное событие в данном процессе до или после другого события в другом процессе. Для реализации указанного подхода использована модель логических часов Л. Лэмпорта [10], отсчитывающая логическое время и используемая для упорядочивания событий, происходящих в различных процессах распределенной системы.

Механизм логических часов позволяет отслеживать причинно-следственный порядок событий распределенного вычисления и, как следствие, упорядочивать события в одну или несколько последовательностей, которые могли бы происходить в системе. Использование логического времени, отсчитываемого такими часами, значительно упрощает разработку алгоритмов для распределенных систем.

Принцип построения логических часов связан с формированием подхода, позволяющего каждому событию в распределенной системе приписывать некоторое числовое значение, которое можно интерпретировать как время наступления этого события. По сути логическими часами является функция, отображающая множество событий распределенного вычисления в некоторое упорядоченное множество, представляющее собой совокупность допустимых значений логического времени. Сложность реализации заключалась в том, что в распределенных системах

каждый процесс может управлять работой только своих часов независимо от часов других процессов. При этом отметка логического времени события, происходящего в рассматриваемом процессе, будет определяться показаниями часов этого процесса на момент наступления для всех событий процесса. Показания часов изменяются между наступлением событий процесса, т.е. сам факт изменения показаний событием не является.

В распределенной имитационной системе функционирования АНПА реализовано условие непротиворечивости логических часов. Это означает, что несмотря на то, что такие часы работают в независимых процессах, отметки логического времени, назначаемые событиям, удовлетворяют фундаментальному условию монотонного возрастания времени. Все события прошлого любого события отмечены временем меньшим, чем время последующего события, и наоборот, все будущие события имеют время наступления большее, чем текущее событие.

Для реализации механизма логических часов была определена структура данных, поддерживаемая локально каждым процессом для представления логического времени из множества и хранения текущих показаний своих часов.

Логические часы каждого процесса включают в себя две составляющие:

- ◆ логические локальные часы для измерения собственного хода выполнения процесса, то есть логические локальные часы используются процессом для записи информации о ходе своего собственного выполнения;
- ◆ логические глобальные часы для описания локального представления процесса о глобальном времени, то есть логические глобальные часы используются процессом для записи информации о ходе выполнения других процессов; логические глобальные часы позволяют процессу назначать непротиворечивые отметки времени для собственных событий.

Показания логических локальных и логических глобальных часов хранятся в одной структуре данных, описывающей логическое время.

Для линейного упорядочивания события распределенного вычисления использована часовая функция, предложенная Л. Лэмпортом и отображающая множество событий распределенного вычисления в множество неотрицательных целых чисел. Это означает, что логическое локальное время процесса и его представление о логическом глобальном времени выражаются одной скалярной величиной.

5. Описание каналов передачи сообщений. В работе реализованы каналы передачи данных, обладающие перечисленными ниже свойствами.

Свойство очередности. Канал сохраняет порядок передаваемых по нему сообщений: если отправка сообщения 1 происходит раньше, чем отправка сообщения 2 по одному и тому же каналу, то получение сообщения 1 также происходит раньше, чем получение сообщения 2. При отправке сообщения по такому каналу оно помещается в конец очереди, а при получении сообщения оно извлекается из начала очереди.

Емкость каналов. Емкость канала определяется количеством сообщений, которые могут находиться в канале в состоянии пересылки. Канал считается переполненным, если число содержащихся в нем сообщений в точности совпадает с его емкостью. В модели распределенной системы события отправки сообщения не зависят от состояния канала, то есть каналы имеют неограниченную емкость и, как следствие, никогда не переполняются.

Надежность. Канал считается надежным, если каждое сообщение, отправленное по этому каналу, обязательно будет доставлено получателю в единственном экземпляре и в том виде, в котором оно было отправлено (естественно, при условии, что принимающий процесс оказывается способным получить это сообщение). В ненадежном канале возможно возникновение ошибок разных типов:

потеря сообщения, искажение сообщения, дублирование или спонтанное порождение сообщения. Потеря сообщения приводит к тому, что отправленное сообщение никогда не сможет быть получено. Искажение сообщения происходит, когда полученное сообщение оказывается отличным от отправленного. Дублирование сообщения возникает в том случае, когда сообщения принимаются чаще, чем отправляются. Спонтанное порождение сообщения происходит, если получатель принимает сообщение, которое вообще никогда не было отправлено.

Таким образом, предложенные и описанные подходы позволили организовать распределенные вычисления при проведении численного эксперимента с использованием комплексной имитационной модели функционирования АНПА.

6. Описание работы имитационной системы с распределенными вычислениями. Процесс проведения исследований с использованием имитационной модели происходит в несколько этапов.

На первом этапе формируется так называемая комплексная имитационная модель функционирования АНПА, включающая в себя имитационные модели отдельных подсистем рассматриваемой системы. В зависимости от особенностей поставленной перед АНПА задачи задаются параметры АНПА и алгоритмы его поведения, положение сторонних объектов с их характеристиками, внешние условия, включающие в себя гидрологические и гидроакустические условия, рельеф дна, тип грунта, волнение моря, профиль скорости звука и аномалию его распространения, другие данные.

На втором этапе в рамках комплексной имитационной модели организуется взаимодействие между имитационными моделями отдельных подсистем.

На третьем этапе проводится численный эксперимент с получением результатов имитационного моделирования.

На четвертом этапе производится анализ полученных результатов и корректировка входных параметров.

При возникновении необходимости более детального рассмотрения отдельных процессов происходит реконфигурация комплексной имитационной модели, в результате которой имитационные модели отдельных подсистем заменяются на более детальные, и численный эксперимент проводится заново.

Пусть перед исследователем поставлены три задачи, связанные с проведением исследований с участием АНПА, требующие имитационного моделирования.

Задача 1. Моделирование перемещения АНПА и объектов для оценки безопасности движения АНПА. Дополнительно учитывается достаточность энергоресурса АНПА (3-й уровень детализации процессов).

Задача 2. Обработка информации системы освещения обстановки для исключения столкновения с другими объектами. Дополнительно моделируется функционирование системы освещения обстановки и системы управления (5-й и 6-й уровни детализации процессов).

Задача 3. Тестирование алгоритмов системы освещения обстановки в различных условиях, в том числе и в непредсказуемых (случайных).

Как видно из условий, задачи отличаются уровнем детализации процессов, необходимых для воспроизведения в имитационных моделях.

Пусть имеются имитационные модели:

- ◆ функционирования системы управления;
- ◆ функционирования системы освещения обстановки;
- ◆ функционирования системы электропитания.

Для решения задачи №1 достаточно воспроизвести поведение АНПА и расход его энергии при реализации этого поведения. По остальным подсистемам необходим минимальный набор данных для воспроизведения, характеризующий возможность исключения аварийных и нестандартных ситуаций, например, обход препятствий, ускорение-торможение. Характеристики этих режимов известны, и нет необходимости детально воспроизводить процессы, порождающие их.

Для решения задачи №2 по исключению столкновений с другими объектами необходимо воспроизведение процессов, связанных с обнаружением целей. Для этого с минимальным уровнем детализации моделируются процессы энергетической системы, но более детально – процессы обнаружения, классификация и определения координат и параметров движения объекта. Используемый в имитационных моделях освещения обстановки уровень детализации моделирования принимать промежуточный.

Для решения задачи №3, связанной с отработкой алгоритмов функционирования системы освещения обстановки (СОО) в различных условиях, в том числе и с элементами случайности, происходит буквальное воспроизведение алгоритмов обработки поступающей информации.

На рис. 2 и 3 схематично изображены процессы, которые воспроизводятся на этапе предварительной обработки информации в системе освещения обстановки.

На рис. 2 наглядно показано, что для воспроизведения процессов на третьем уровне детализации достаточно обнаружить моделировать, например, на «геометрическом» уровне, как результат агрегирования более детальной имитационной модели, воспроизводящей процессы пятого уровня детализации:

- ◆ предварительной обработки;
- ◆ первичной обработки;
- ◆ вторичной обработки;
- ◆ комплексной обработки;
- ◆ классификации;
- ◆ траекторного анализа;
- ◆ процесса определения координат и параметров движения объекта.



Рис. 2. Объемы воспроизводимых процессов для задач №1 (третий уровень) и №2 (пятый уровень)

Вместе с тем перечисленные процессы являются результатом агрегирования еще более детальных процессов, позволяющих обрабатывать и отлаживать алгоритмы обработки информации, поступающей на элементы фазированной решетки, как это представлено на рис. 3.

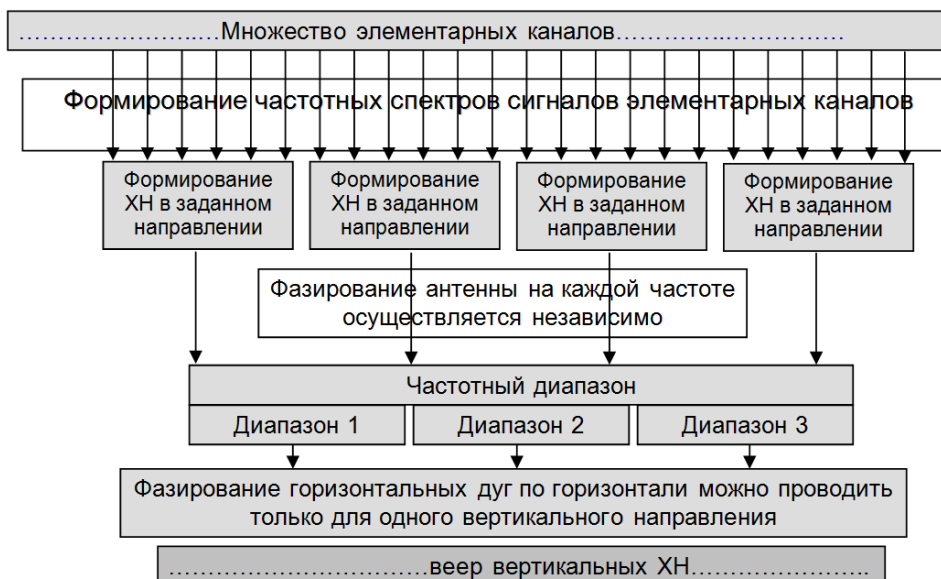


Рис. 3. Воспроизводимые процессы для задачи №3 (шестой уровень) на этапе предварительной обработки информации

На шестом уровне детализации, в отличие от третьего и пятого уровней, потребовалось детально моделировать обработку информации, поступающей с каждого элемента многотысячной фазированной антенной решетки.

Приведенные схематично на рис. 3 процессы раскрывают используемые алгоритмы этапа предварительной обработки информации, поступающей с элементов фазированной антенной решетки, результатами которой является вектор вертикальных характеристик направленности (ХН). Такими же по объему являются алгоритмы этапов первичной, вторичной, комплексной обработки поступающей информации в системе освещения обстановки. Не менее объемными являются процессы, воспроизводимые и по другим системам АНПА.

Сказанное показало, что при решении различных задач формируется комплексная имитационная модель, включающая в себя имитационные модели с различной степенью детализации. Использование распределенных вычислений при проведении численного эксперимента функционирования АНПА позволило существенно упростить формирование комплексной имитационной модели и проведение численного эксперимента.

Заключение. Предложена реализация распределенных и параллельных вычислений в имитационной системе функционирования АНПА.

Реализация распределенных вычислений привела к возможности:

- ◆ существенного сокращения времени на проведение исследований, связанных с функционированием АНПА;
- ◆ проведения независимого тестирования имитационных моделей на этапе их разработки;

- ◆ взаимозаменяемости имитационных моделей отдельных систем АНПА, отличающихся степенью детализации, при имитационном моделировании;
- ◆ оперативной замены одной имитационной модели на другую в случае нехватки вычислительных ресурсов при имитационном моделировании.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под ред. Агеева М.Д. – М.: Наука, 2005. – 398 с.
2. *Инзарцев А.В. и др.* Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. – 2007. – № 2 (4). – С. 5-14.
3. *Гизитдинова М.Р., Кузьмицкий М.А.* Мобильные подводные роботы в современной океанографии и гидрофизике // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2010. – Т. 3, № 1. – С. 4-13.
4. *Боженев Ю.А.* Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2011. – Т. 4, № 1. – С. 4-68.
5. *Millar G., Mackay L.* Maneuvering under the ice // Sea technology. – 2015. – Vol. 56, No. 4. – P. 35-38.
6. *Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю.* Угроза из глубины: XXI век. – Хабаровск: КГУП "Хабаровская краевая типография", 2011. – 304 с.
7. *Белосов И.* Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС США // Зарубежное военное обозрение. – 2013. – № 5. – С. 79-88.
8. *Викторов Р.В., Илларионов Г.Ю., Квашиин А.Г.* Двойное применение автономных необитаемых подводных аппаратов типа "REMUS" // Двойные технологии. – 2010. – № 3. – С. 54-62.
9. *Кузьмицкий М.А., Гизитдинова М.Р.* Мобильные подводные роботы в решении задач ВМФ: Современные технологии и перспективы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2011. – Т. 4, № 3. – С. 37-48.
10. *Косяков М.С.* Введение в распределенные вычисления. – СПб.: НИУ ИТМО, 2014. – 155 с.
11. *Бродский Ю.И.* Модельный синтез и модельно-ориентированное программирование как технология реализации имитационных моделей сложных многокомпонентных систем, с ориентацией на параллельные и распределенные вычисления // Материалы конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика». ИММОД-2013. – Казань: Изд-во «Фэн» Академии наук РТ, 2013. – Т. 1. – С.114-118.
12. *Бродский Ю.И.* Распределенное имитационное моделирование сложных систем. – М.: ВЦ РАН, 2010. – 156 с.
13. *Бусленко Н.П.* Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
14. *Вавилов Д.В.* Агрегирование и взаимодействие моделей в программных инструментальных средствах имитационного моделирования // Материалы конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика». ИММОД-2007. – С. 38-41.
15. *Вавилов Д.В., Рыков В.В.* Агрегирование и взаимодействие имитационных моделей // Сб. докладов конференции «Состояние, проблемы и перспективы разработки корабельных информационно-управляющих комплексов». – М.: ФГУП «НПО «Агат», 2005. – С. 38-41.
16. *Davis Paul K.* Exploratory analysis enabled by multiresolution, multiperspective modeling // Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference. – P. 113-115.
17. *Савин Г.И.* Системное моделирование сложных процессов. – М.: Фазис: ВЦ РАН, 2000. – 276 с.
18. *Chandy K.M., Lamport L.* Distributed snapshots: determining global states of distributed systems // ACM Transactions on Computer Systems. – 1985. – No. 3 (1). – P. 63-75. '
19. *Chandy K.M. Misra J.* The Drinking Philosophers Problem ACM TOPLAS, 6:4. – October 1984. – P. 632-646.
20. *Charron-Bost B.* Concerning the size of logical clocks in distributed systems // Information Processing Letters. – 1991. – No. 39. – P. 11-16.
21. *Charron-Bost B., Tel G., Mattem F.* Synchronous, asynchronous, and causally ordered communication // Distributed Computing. – 1996. – No. 9 (4). – P. 173-191.

22. *Fidge C.* Logical time in distributed computing systems // IEEE Computer. – August 1991. – P. 28-33.
23. *Fowler J., Zwaenepoel W.* Causal distributed breakpoints // Proceeding: of the 10th International Conference on Distributed Computing System. – 1990. – P. 134-141.
24. *Mattern F.* Virtual time and global states of distributed systems // Proceedings of die Parallel and Distributed Algorithms Conference. – North-Holland, 1988. – P. 215-226.
25. *Raymond K.* Tree-based algorithm for distributed mutual exclusion // ACM Transactions on Computer Systems. – 1989. – No. 7. – P. 61-77.
26. *Raynal M.* A simple taxonomy of distributed mutual exclusion algorithms // Operating Systems Review. – 1991. – No. 25 (2). – P. 47-50.
27. *Ricart G., Agrawala A.K.* An optimal algorithm for mutual exclusion in computer networks // Communications of die ACM. – 1981. – No. 24 (1). – P. 9-17.

REFERENCES

1. Avtonomnye podvodnye roboty. Sistemy i tekhnologii [Autonomous underwater robots. Systems and technologies], ed. by Ageeva M.D. Moscow: Nauka, 2005, 398 p.
2. *Inzartsev A.V. i dr.* Primenenie avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata dlya nauchnykh issledovaniy v Arktike [The application of Autonomous underwater vehicle for scientific research in the Arctic], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater researches and robotics], 2007, No. 2 (4), pp. 5-14.
3. *Gizitdinova M.R., Kuz'mitskiy M.A.* Mobil'nye podvodnye roboty v sovremennoy okeanografii i gidrofizike [Mobile underwater robots in modern Oceanography and Hydrophysics], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and applied Hydrophysics], 2010, Vol. 3, No. 1, pp. 4-13.
4. *Bozhenov Yu.A.* Ispol'zovanie avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov dlya issledovaniya Arktiki i Antarktiki [The use of Autonomous underwater vehicles for exploration of the Arctic and Antarctic], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and applied Hydrophysics], 2011, Vol. 4, No. 1, pp. 4-68.
5. *Millar G., Mackay L.* Maneuvering under the ice, *Sea technology*, 2015, Vol. 56, No. 4, pp. 35-38.
6. *Illarionov G.Yu., Sidenko K.S., Bocharov L.Yu.* Ugroza iz glubiny: XXI vek [Threat from the depths: the XXI century]. Khabarovsk: KGUP "Khabarovskaya kraevaya tipografiya", 2011, 304 p.
7. *Belousov I.* Sovremennyye i perspektivnyye neobitaemye podvodnye apparaty VMS SShA [Modern and perspective unmanned underwater vehicles, the US Navy], *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* [Foreign military review], 2013, No. 5, pp. 79-88.
8. *Viktorov R.V., Illarionov G.Yu., Kvashnin A.G.* Dvoynoe primeneniye avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov tipa "REMUS" [Dual use Autonomous non-manned underwater vehicles such as "REMUS"], *Dvoynyye tekhnologii* [Dual technology], 2010, No. 3, pp. 54-62.
9. *Kuz'mitskiy M.A., Gizitdinova M.R.* Mobil'nye podvodnye roboty v reshenii zadach VMF: Sovremennyye tekhnologii i perspektivy [Mobile underwater robots in the tasks of the Navy: Modern technologies and perspectives], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and applied Hydrophysics], 2011, Vol. 4, No. 3, pp. 37-48.
10. *Kosyakov M.S.* Vvedeniye v raspredelennyye vychisleniya [Introduction to distributed computing]. St. Petersburg: NIU ITMO, 2014, 155 p.
11. *Brodskiy Yu.I.* Model'nyy sintez i model'no-orientirovannoye programmirovaniye kak tekhnologiya realizatsii imitatsionnykh modeley slozhnykh mnogokomponentnykh sistem, s orientatsiyey na parallel'nyye i raspredelennyye vychisleniya [Model synthesis and model-oriented programming technology implementation of simulation models of complex multicomponent systems, with a focus on parallel and distributed computing], *Materialy konferentsii «Imitatsionnoye modelirovaniye. Teoriya i praktika»*. IMMOD-2013 [Materials of the conference "simulation. Theory and practice". IMMOD-2013]. Kazan': Izd-vo «Fen» Akademii nauk RT, 2013, Vol. 1, pp. 114-118.
12. *Brodskiy Yu.I.* Raspredelennoye imitatsionnoye modelirovaniye slozhnykh sistem [Distributed simulation of complex systems]. Moscow: VTs RAN, 2010, 156 p.

13. *Buslenko N.P.* Modelirovanie slozhnykh system [Modeling of complex systems]. Moscow: Nauka, 1978, 400 p.
14. *Vavilov D.V.* Agregirovanie i vzaimodeystvie modeley v programmnykh instrumental'nykh sredstvakh imitatsionnogo modelirovaniya [The aggregation and interaction of models in software tools for simulation modeling], *Materialy konferentsii «Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika». IMMOD-2007* [Materials of the conference "simulation. Theory and practice". IMMOD-2007.], pp. 38-41.
15. *Vavilov D.V., Rykov V.V.* Agregirovanie i vzaimodeystvie imitatsionnykh modeley [The aggregation and interaction of simulation models], *Sb. dokladov konferentsii «Sostoyanie, problemy i perspektivy razrabotki korabel'nykh informatsionno-upravlyayushchikh kompleksov»* [The proceedings of the conference "State, problems and prospects of development of shipborne information and control systems"]. Moscow: FGUP «NPO «Agat», 2005, pp. 38-41.
16. *Davis Paul K.* Exploratory analysis enabled by multiresolution, multiperspective modeling, *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, pp. 113-115.
17. *Savin G.I.* Sistemnoe modelirovanie slozhnykh protsessov [System modeling of complex processes]. Moscow: Fazis: VTs RAN, 2000, 276 p.
18. *Chandy K.M., Lamport L.* Distributed snapshots: determining global states of distributed systems, *ACM Transactions on Computer Systems*, 1985, No. 3 (1), pp. 63-75. '
19. *Chandy K.M. Misra J.* The Drinking Philosophers Problem *ACM TOPLAS*, 6:4. October 1984, pp. 632-646.
20. *Charron-Bost B.* Concerning the size of logical clocks in distributed systems, *Information Processing Letters*, 1991, No. 39, pp. 11-16.
21. *Charron-Bost B., Tel G., Mattem F.* Synchronous, asynchronous, and causally ordered communication, *Distributed Computing*, 1996, No. 9 (4), pp. 173-191.
22. *Fidge C.* Logical time in distributed computing systems, *IEEE Computer*, August 1991, pp. 28-33.
23. *Fowler J., Zwaenepoel W.* Causal distributed breakpoints, *Proceeding: of the 10th International Conference on Distributed Computing System*, 1990, pp. 134-141.
24. *Mattern F.* Virtual time and global states of distributed systems, *Proceedings of die Parallel and Distributed Algorithms Conference. North-Holland*, 1988, pp. 215-226.
25. *Raymond K.* Tree-based algorithm for distributed mutual exclusion, *ACM Transactions on Computer Systems*, 1989, No. 7, pp. 61-77.
26. *Raynal M.* A simple taxonomy of distributed mutual exclusion algorithms, *Operating Systems Review*, 1991, No. 25 (2), pp. 47-50.
27. *Ricart G., Agrawala A.K.* An optimal algorithm for mutual exclusion in computer networks, *Communications of die ACM*, 1981, No. 24 (1), pp. 9-17.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Г.А. Опарин.

Мартынова Любовь Александровна – Концерн АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: martynowa999@bk.ru; 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30; тел.: +79219411395; д.т.н.; с.н.с.; в.н.с.

Martynova Lyubov Alexandrovna – Concern JSC "Concern" Central Research Institute "Elektroprigor"; e-mail: martynowa999@bk.ru; 30, Malaja Posadskaja street, St. Petersburg, 197046, Russia; phone: + 79219411395; dr. of eng. sc.; senior researcher; leading researcher.