

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОРГАНИЗАЦИИ СЕТЕЙ АНПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Е.Г. Литуненко, А.М. Грузликов, Н.В. Колесов, Ю.М. Скородумов, Е.В. Лукоянов

Разработка сети автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) представляет собой сложную многофакторную задачу, решение которой требует выполнения целого ряда жестких требований, среди которых, в частности, требования по отказоустойчивости, оперативности информационных обменов, энергоэффективности и др. В результате при проектировании сети оказывается весьма актуальным использование имитационного моделирования для проверки предлагаемых решений. Целью настоящей работы является разработка и апробация программной среды исследования сетей АНПА. Среда реализована в рамках объектно-ориентированного подхода на языке Python. К основным полученным результатам можно отнести сформированные принципы реализации программной среды для имитационного моделирования. В работе приводятся результаты апробации среды на примере исследования алгоритмов планирования для обеспечения оперативности информационных обменов между абонентами сети. При этом имитационная модель создана на основе разработанного и изготовленного в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» макета аппаратно-программных средств сетевой гидроакустической связи в части концепции и протокола информационно-технического взаимодействия абонентов. Разработанная программная среда позволяет повысить эффективность разработок сетей АНПА за счет варьирования широкого спектра параметров сети и ее абонентов.

Ключевые слова: программная среда, имитационное моделирование, группы подводных аппаратов, АНПА, планирование информационных обменов

Введение

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) характеризуются широким спектром применений с возможностью работать в экстремальных условиях, что позволяет им решать задачи по сбору информации в интересах геологоразведочных, поисковых, океанографических и других исследований. Ограниченность ресурсов отдельно взятого АНПА делает невозможными для него продолжительные миссии. В этих случаях используются сети АНПА [1–6], где информационное взаимодействие между аппаратами осуществляется с использованием средств звукоподводной связи. В настоящее время особенно актуальными задачами, требующими выполнения группами подводных аппаратов, являются обследование месторождений полезных ископаемых [7], в том числе подледные исследования, мониторинг состояния водной среды, например, с целью

анализа влияния глобального потепления [8], патрулирование и обследование границ морских акваторий [9] и другие.

При проектировании сетей подводных аппаратов необходимо учитывать особенности, отличающие подводные гидроакустические сети от наземных [1]:

- подводные сети используют акустические, а не радиосигналы, которые передают информацию на относительно низких частотах и на существенно ограниченные дальности;

- по сравнению с наземными сетями абоненты подводных сетей требуют для формирования сигналов больших затрат по мощности.

При этом к абонентам подводных сетей предъявляются высокие требования в части надежности и дальности связи, точности позиционирования абонентов в условиях ограниченных габаритов и энергопотребления систем, обеспечивающих сетевое взаимодействие абонентов [6].

В результате разработка сети АНПА представляет собой сложную многофакторную задачу, при решении которой необходимо учесть и такие параметры, как требования по отказоустойчивости, оперативности информационных обменов, энергоэффективности и др. Существует множество протоколов организации подводной сетевой связи [10–12], однако в них не рассматриваются вопросы повышения оперативности информационных обменов, благодаря которым возможно увеличение эффективности работы сети.

Следует отметить, что при разработке алгоритмов информационных обменов в сетях подводных аппаратов, передающих информацию по гидроакустическому каналу связи, прежде всего необходимо учитывать гидроакустические условия распространения сигнала. К таким условиям можно отнести вертикальное распределение скорости звука, параметры дна, зависимость коэффициента затухания гидроакустического сигнала от частоты, что приводит к низкой скорости передачи сигнала и к снижению дальности распространения сигнала и др. Эти факторы усиливают требования к выбору маршрута передачи информации с использованием узлов сети в качестве ретрансляторов. Очевидно, что маршрут будет динамически меняться из-за изменения топологии сети АНПА в результате движения аппаратов согласно заданной миссии. В силу вышеуказанных особенностей решение проблемы маршрутизации существенно отличается от решения в случае компьютерной сети, и прежде всего, тем, что в АНПА время передачи сообщений значительно превышает время обработки передаваемой информации. По этой причине задача сокращения времени доставки выдвигается на передний план. Для решения этой задачи можно выделить два способа – разработка эффективного алгоритма маршрутизации в сети и разработка алгоритма планирования информационных обменов. В настоящей статье рассматривается оптимизация очередности информационных обменов по критерию минимизации суммарного или среднего времени доставки сообщений путем упорядочивания выходных очередей на узлах абонентов сети. Также приведены структура имитационной модели и некоторые результаты исследований.

При проектировании сети оказывается весьма актуальным использование имитационного моделирования для проверки предлагаемых решений. В статье предлагается разработанная авторами программная среда имитационного моделирования. Ее возможности иллюстрируются на примере исследования оперативности информационного обмена между абонентами сети.

■ Анализ оперативности обменов в сети АНПА

В ранее опубликованных работах [13] показано, что последовательность сообщений в выходной очереди узла сети влияет на оперативность связи между абонентами, а именно – на время нахождения сообщений в сети. Таким образом, внедрение алгоритмов упорядочивания выходной очереди сообщений позволит повысить оперативность связи. Ниже приводятся основные сведения и алгоритм упорядочивания сообщений в очереди, не имеющих предварительной упорядоченности.

В качестве критерия оперативности используются либо суммарное время Δ_s доставки всех сообщений из передаваемой последовательности, либо среднее по сообщениям время $\bar{\Delta}$ доставки. Для удобства изложения параметры сообщения, расположенного на k -й позиции в очереди рассматриваемого узла, сопровождаются нижним индексом $[k]$. Для такого сообщения время ожидания в очереди и время переноса имеют обозначения $e_{[k]}^w$ и $e_{[k]}^t$ соответственно. При этом под временем переноса будем понимать время от момента начала передачи сообщения до момента конца его приема, а под временем доставки $\Delta_{[k]}$ сообщения между передающим узлом и узлом-адресатом – сумму:

$$\Delta_{[k]} = e_{[k]}^w + e_{[k]}^t.$$

Для одношагового маршрута получаем

$$e_{[k]}^t = e_{[k]} + \frac{d_{[k]}}{v} = e_{[k]} + e_{[k]}^d.$$

Здесь $e_{[k]}$ – длительность сообщения, расположенного на k -й позиции в очереди, $e_{[k]}^d = d_{[k]}/v$ – время прохождения сигнала между передающим узлом и узлом-адресатом, $d_{[k]}$ – расстояние между передающим узлом и узлом-адресатом для сообщения на k -й позиции в очереди, v – средняя скорость распространения звука в заданной акватории.

В случае многошагового маршрута выражение для времени доставки сообщения принимает вид:

$$\Delta_{[k]} = \sum_{i=1}^{r_{[k]}} (e_{[k],i}^w + e_{[k],i}^t),$$

где $r_{[k]}$ – общее число шагов маршрута, по которому передается сообщение, находящееся на k -й позиции в очереди, i – порядковый номер шага маршрута.

Ясно, что в случае многошагового маршрута предсказать размер и содержание очередей сообщений в узлах-ретрансляторах на маршруте следования передаваемого сообщения невозможно. В связи с этим при дальнейшем анализе используется не точное значение для $\Delta_{[k]}$, а его оценка $\hat{\Delta}_{[k]}$, где время ожидания на каждом последующем шаге, кроме первого, заменим на его верхнюю границу. Для этого через \bar{n} обозначается верхняя граница длины очередей, а через E – верхняя граница длительности сообщений. В результате их произведение составит верхнюю границу времени ожидания на любом шаге для рассматриваемого сообщения. Тогда получаем:

$$\hat{\Delta}_{[k]} = e_{[k]}^w + e_{[k]}^t + (r_{[k]} - 1)\bar{n}E + \sum_{i=2}^{r_{[k]}} e_{[k],i}^t$$

Можно доказать, например, что верхняя граница $\hat{\Delta}_s$ для суммарного времени доставки в системе связи n неупорядоченных сообщений минимальна, если сообщения упорядочены по неубыванию длительностей:

$$e_{[1]} \leq e_{[2]} \leq \dots \leq e_{[n]}$$

Это утверждение формулирует частный оптимальный алгоритм упорядочивания сообщений. Авторами также предложены оптимальные алгоритмы упорядочивания для случаев наличия предварительных упорядоченностей в выходной очереди, для случаев, когда сообщения имеют разные приоритеты и алгоритмы оптимизации по критерию среднего времени доставки сообщений [7].

■ Концепция организации сетевой гидроакустической связи

При проектировании программной среды для моделирования и исследования сетей подводных аппаратов за основу взята концепция организации сетевой гидроакустической связи, предложенная в [14, 15]. Основные особенности концепции приведены ниже.

Рассматриваемая подводная сеть включает в себя не только неподвижные и дрейфующие узлы, но и подвижные подводные аппараты, оснащенные приемными и излучающими гидроакустическими антеннами, а также модемом для формирования и первичной обработки сигналов. Все узлы выполняют функции приема и передачи сообщений. Для обеспечения обмена информацией на расстоянии, превышающем акустическую видимость, узлы выступают в качестве ретрансляторов. При этом ретранслируемые сообщения попадают в выходную очередь узла вме-

сте с собственными сообщениями абонента и подлежат планированию. Построение маршрута передачи сообщений между абонентами сети осуществляется на основании локальных таблиц маршрутизации, динамически обновляющихся в процессе функционирования сети. Каждое принятое узлом сообщение (пакет данных) используется для обновления его локальной таблицы маршрутизации. Формат единичной записи таблицы маршрутизации определяется табл. 1.

Таблица 1

Формат единичной записи таблицы маршрутизации

№ поля	Поле	Описание
1	ID	Номер узла, доступного для связи
2	ID_GW	Номер узла ретранслятора для доступа к узлу ID (в случае прямой видимости совпадает с полем ID)
3	KU	Курсовой угол на узел ID в локальной системе координат передающего узла, град
4	D	Дистанция от передающего узла до узла с номером ID, м
5	Tin	Локальное время внесения записи об узле ID в таблицу маршрутизации, мс

Передаваемые сообщения включают в себя заголовки и данные. Формат передаваемого сообщения приведен в табл. 2. В заголовке содержится вся необходимая для функционирования сети информация, которая формируется, в том числе, на основании таблицы маршрутизации (поля 3 и 4 табл. 2). В поле данных попадает та информация, которую необходимо передать – запрос или ответ на запрос, навигационная, пользовательская или другая информация.

Таблица 2

Формат передаваемого сообщения

Поле	Заголовок пакета
1	Номер узла, инициировавшего отправку сообщения (истинный отправитель)
2	Номер целевого узла (истинный получатель)
3	Номер текущего отправителя
4	Номер текущего получателя
5	Максимальное число элементарных актов передачи пакета по маршруту (TTL)
6	Тип сообщения
7	Приоритет сообщения в очереди
8	Номер сообщения
9	Локальное время отправки сообщения, мс
10	Число байт в области данных пакета
11	Контрольная сумма CRC16
Данные пакета	

В сети применяется пространственное разрешение сигналов, что может приводить к одновременному получению сигналов от разных абонентов и как следствие – к возникновению очередей на ретрансляцию сообщений. Кроме того, режимы приема и излучения сигнала в каждом узле разнесены во времени и все узлы рассматриваемой сети синхронизированы и работают в системе единого времени. Таким образом, переключения между режимами приема и излучения производятся синхронно для всех абонентов.

Предложенные технические решения апробированы в натуральных условиях на макете сетевой подводной связи, разработанном и изготовленном в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Макет включает в себя три дрейфующих буй (рис. 1) и буксируемый подводный аппарат, оснащенные модемом сетевой гидроакустической связи, приемными и излучающими антеннами.



Рис. 1. Дрейфующий буй из состава макета сетевой подводной связи разработки АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

Недостатком макета является ограниченное количество узлов, сложность изменения их параметров, в том числе физических и программных, дороговизна проведения натуральных испытаний. В этой связи актуальной является разработка имитационной модели, с помощью которой можно производить апробацию новых алгоритмов и исследовать эффективность работы сети при различных характеристиках как самих узлов (дальность связи, наличие алгоритмов упорядочивания выходных очередей и др.), так и сети в целом (количество, расположение, траектории движения узлов и др.).

Имитационная модель системы обмена в сети АНПА

Для исследования эффективности алгоритмов планирования информационных обменов разрабо-

тана имитационная модель, основные принципы работы которой, в том числе протокол информационно-технического взаимодействия, дальность связи и принцип разделения каналов связи, выбраны в соответствии с разрабатываемыми в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» модемами сетевой гидроакустической связи [15]. Такой подход позволяет имитировать работу сети подводных аппаратов в условиях, приближенных к реальным. При реализации модели использовался объектно-ориентированный подход, при котором все элементы модели являются объектами соответствующих классов. В данном случае модель включает:

- класс узлов (абонентов) сети, отвечающий за координаты узла и траекторию движения;
- класс-модем, отвечающий за обработку сообщений, излучение и прием сообщений из среды, а также маршрутизацию сообщений;
- класс-генератор, передающий в модем команды на формирование излучения с заданной частотой;
- класс-планировщик, отвечающий за упорядочивание выходной очереди сообщений в модеме перед излучением;
- класс среды распространения сигнала, отвечающий за перенос сообщений между абонентами и передачу их во входные очереди модемов.

Тактирование модели для осуществления псевдопараллельного процесса моделирования и создание объектов классов осуществляется в общем потоке программы.

Взаимодействие классов друг с другом приведено на диаграмме классов (рис. 2).

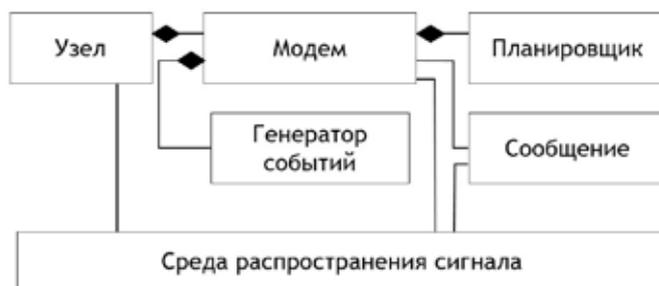


Рис. 2. Диаграмма классов

Модель с такой структурой позволяет имитировать сеть на всех уровнях в соответствии со структурой сетевой модели OSI.

Процесс моделирования осуществляется псевдопараллельно, т.е. он разбивается на шаги. Дискретность модели выбирается таким образом, чтобы вели-

чина шага моделирования была значительно меньше времени излучения и переноса сообщений. При этом учитываются такие условия работы сети, как низкая скорость и ограниченная дальность распространения сигнала. При моделировании вводится допущение о связности сети в течение периода связи, т. е. для всех сообщений маршрут всегда существует.

Рассмотрим подробнее функционирование модели на примере взаимодействия двух узлов. Диаграмма взаимодействия объектов классов приведена на рис. 3. На начальном этапе создаются объекты узлов, модемов, планировщиков и генераторов, после чего определяются их свойства, узлам сопоставляются модемы, а модемам – планировщики и генераторы. Объекты узлов, в свою очередь, связываются с объектом класса среды. В соответствии с установленным периодом излучения генераторы формируют команду на излучение и передают ее в соответствующие модемы, после чего модемы формируют собственные сообщения и передают в планировщики выходных очередей, состоящих из сгенерированных и ранее полученных сообщений. Планировщик возвращает в модем упорядоченную очередь сообщений, которая передается в среду и распространяется по всем направлениям на дальность, заданную как параметр модема. По достижении соседнего узла сообщение попадает во входную очередь его модема, после чего

обрабатывается и терминируется, если доставлено получателю, или попадает в выходную очередь, если предназначено для ретрансляции.

■ Результаты моделирования

С помощью разработанной модели был проведен ряд экспериментов со следующими параметрами:

- узлы одинаковые и функционируют по одному и тому же алгоритму, выполняют функции излучения и приема сообщений из среды, а также ретрансляции сообщений;

- узлы неподвижны относительно друг друга;
- инициатором информационного обмена является один узел, на вход которого подается очередь сообщений, остальные находятся в режиме ожидания.

Исследования проводились для разных условий:

- «один к одному»: одношаговый маршрут, многошаговый маршрут, сочетание разных маршрутов для сообщений из одной очереди;

- «один ко многим»: одношаговый маршрут от одного узла к нескольким.

При исследовании проведено сравнение предложенного алгоритма упорядочивания для очереди, состоящей из сообщений, не имеющих предварительной упорядоченности, и алгоритма FIFO (first in,

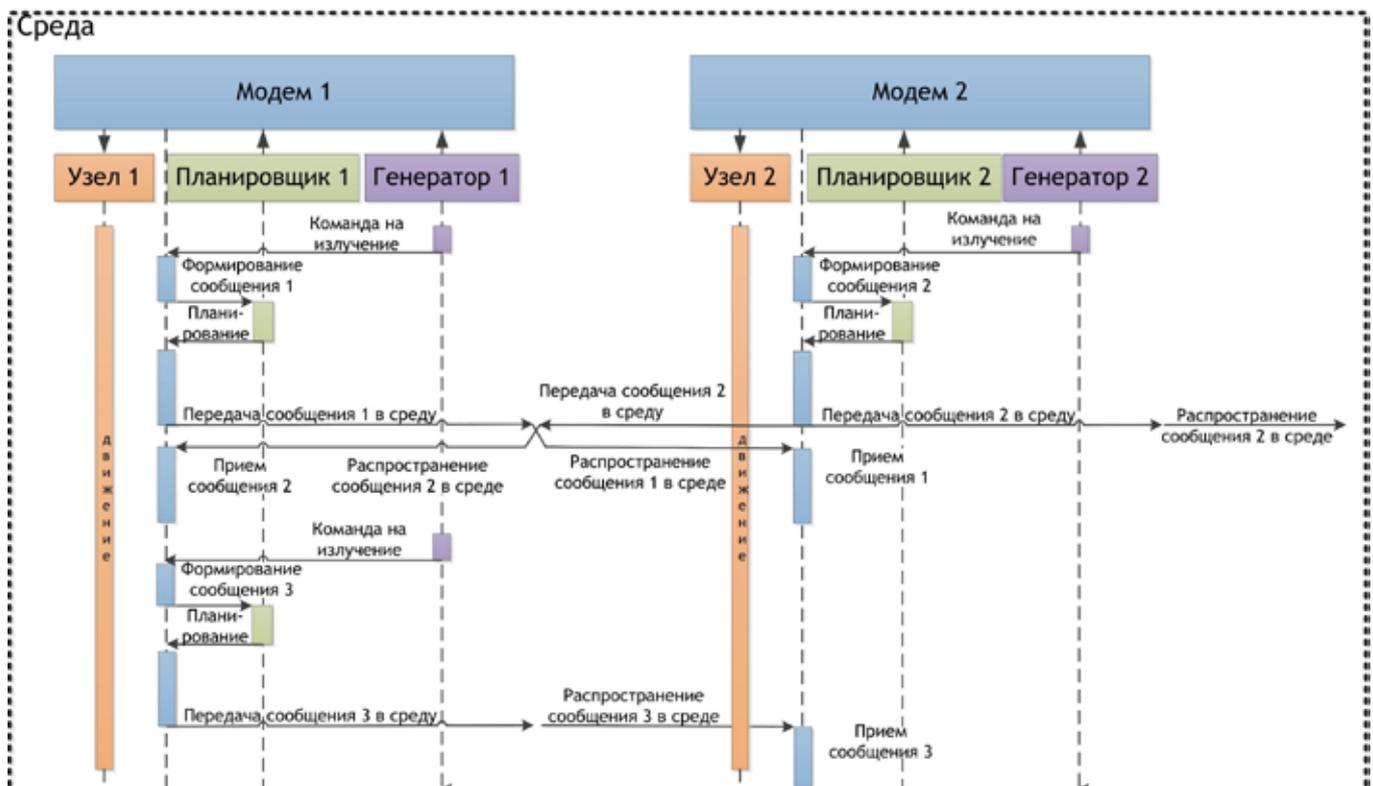


Рис. 3. Диаграмма взаимодействия объектов классов

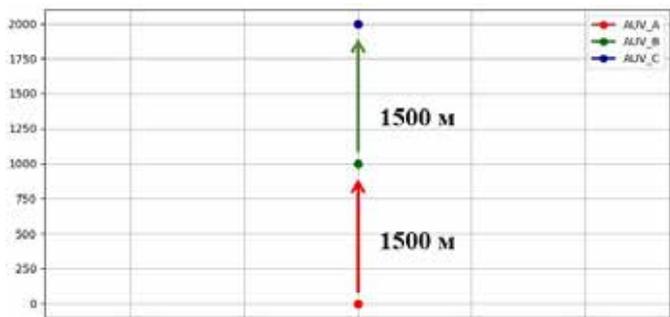


Рис. 4. Схема расположения узлов сети при проведении экспериментов

first out), при котором сообщения отправляются в том же порядке, в котором они попали в узел, т. е. выходная очередь соответствует входной.

Эксперимент проведен для упрощенной топологии сети, представляющей собой три узла, расположенных в ряд, как показано на рис. 4. При этом крайние узлы (AUV_A и AUV_C) могут связываться только посредством ретрансляции сообщений через средний узел (AUV_B). Расстояния от центрального узла до крайних одинаковые и выбраны в соответствии с предельно достижимыми дальностями, получаемыми с помощью изготовленного макета сетевой связи. В эксперименте инициатор обменов выступал только один крайний узел (AUV_A), остальные – в качестве получателей и ретранслятора. Излучение сигналов осуществлялось периодически, причем период излучения выбран с учетом максимальной длительности выходной очереди таким образом, чтобы на узлах не возникала потеря информации, связанная с одновременным излучением и приемом сигналов. На начальном этапе моделирования в узел-инициатор подавались входные очереди сообщений максимального размера. Очереди формировались следующим образом:

- размер очереди задавался от трех до пяти сообщений с суммар-

ной длительностью, равной максимальной, при этом задавалось не более двух сообщений одинаковой длительности;

- для сообщений сразу задавались получатели;
- осуществлялся полный перебор комбинаций длительностей сообщений при разном количестве сообщений в очереди, а также для разных получателей.

В таких условиях смоделированы ситуации, когда связь осуществляется между двумя узлами без ретрансляции (от AUV_A к AUV_B), связь осуществляется с ретрансляцией, при этом все сообщения следуют к одному получателю (от AUV_A к AUV_C) либо связь осуществляется с ретрансляцией, но сообщения из очереди адресованы разным узлам – часть сообщений следует по одношаговому маршруту, часть – по двухшаговому.

Оценка эффективности использования алгоритма планирования проводилась путем вычисления разни-

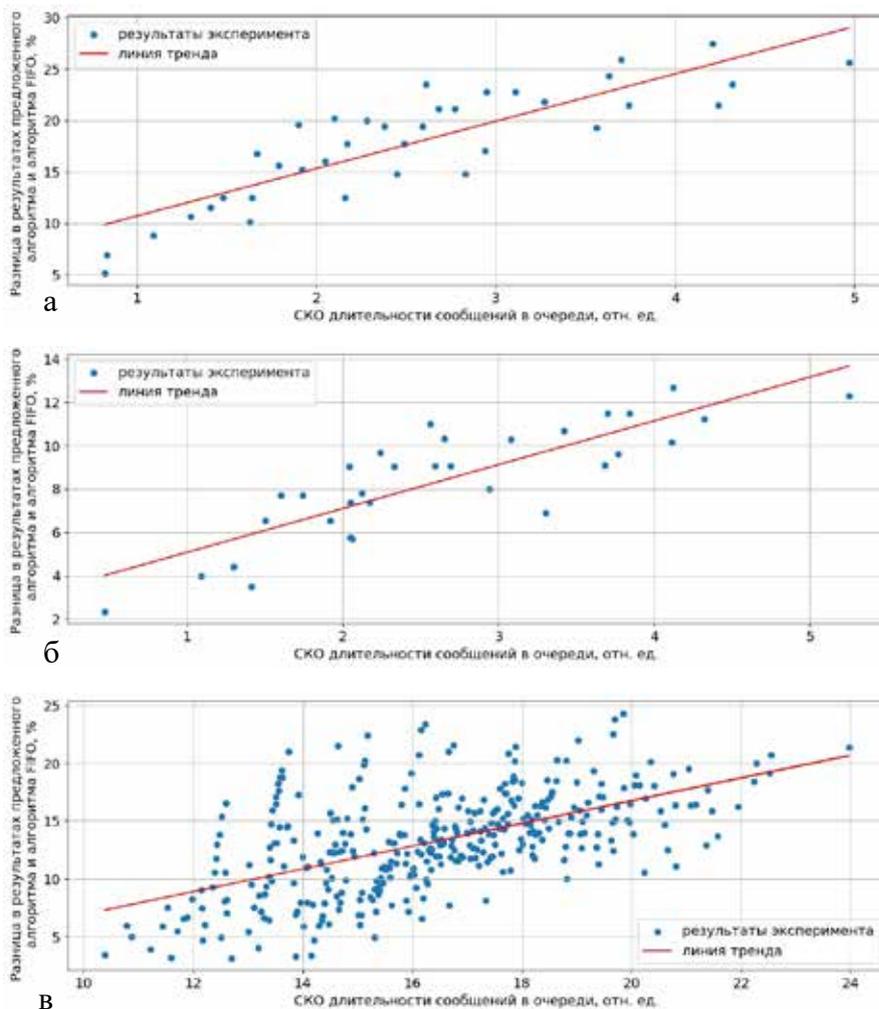


Рис. 5. Графики зависимости разницы результатов, полученных с использованием предложенного алгоритма, и результатов, полученных с использованием алгоритма FIFO, от значения СКО длительностей сообщений в очереди при: а – одношаговом маршруте; б – двухшаговом маршруте для всех сообщений; в – сочетании в очереди сообщений с одношаговым и многошаговым маршрутами

Заключение

цы результатов, полученных с использованием предложенного алгоритма, и результатов, полученных с использованием алгоритма FIFO. Дополнительно проведена оценка зависимости полученной разницы от СКО длительностей сообщений, находящихся в очереди. Графики полученных зависимостей приведены на рис. 5. Синими точками показаны результаты экспериментов, а красной линией – их линейная аппроксимация.

В первом случае (рис. 5, а) выигрыш от использования алгоритма планирования составил до 27,4%, в то время как для второго случая (рис. 5, б) – до 13,1%. При этом в третьем случае (рис. 5, в) – до 24,3%, значения выигрыша в этом случае представляют собой средний случай между первыми двумя. Кроме того, во всех представленных случаях можно выделить тренд, определяющий увеличение выигрыша от упорядочивания с увеличением СКО длительности сообщений в очереди. Это объясняется тем, что при перестановке в очереди сообщений с большей разницей в их длительности эффект от упорядочивания выше.

Важно отметить и то, что в результате экспериментов подтверждена оптимальность предложенного алгоритма упорядочивания для случая, когда на узлы-ретрансляторы и узлы-получатели поступают сообщения только от одного узла, сообщения из выходящей очереди которого исследуются.

В статье описаны принципы построения разработанной авторами программной среды для моделирования и исследования сетей АНПА. Особенностью разработанной модели является то, что она основана на концепции и протоколе информационно-технического взаимодействия разработанного и изготовленного макета аппаратно-программных средств сетевой гидроакустической связи. Имитационная модель позволяет провести большой спектр экспериментов по сравнению с натурными условиями в виду гибкой настройки как параметров узлов, так и параметров сети в целом. Приводятся результаты апробирования среды на примере исследования проблемы обеспечения оперативности сетевых информационных обменов. Исследование проводилось на основе предложенной авторами математической модели. Принципиальной особенностью программной модели является учет условий работы сети. Полученные результаты исследований подтверждают эффективность предложенных алгоритмов и позволяют выделить зависимость эффективности применения алгоритмов от параметров передаваемой очереди сообщений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10071, <https://rscf.ru/project/23-79-10071/>

ЛИТЕРАТУРА

1. Sathish K., Venkata R.C., Anbazhagan R., Pau G. Review of Localization and Clustering in USV and AUV for Underwater Wireless Sensor Networks // *Telecom*. 2023. No. 4. P. 43–64.
2. Yang Y., Xiao Y., Li T. A survey of autonomous underwater vehicle formation: Performance, formation control, and communication capability // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2021. Vol. 23, No. 2. P. 815.
3. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. Владивосток, 2018. 368 с.
4. Федосов В.П., Тарасов С.П., Пивнев П.П., Воронин В.В., Кучерявенко С.В., Легин А.А., Ломакина А.В., Франц В.А. Сети связи для подводных автономных роботизированных комплексов. Таганрог: ЮФУ, 2018. 178 с.
5. Щербатюк А.Ф. О методе навигации группы АНПА без использования гидроакустических маяков // *Гироскопия и навигация*. 2022. Т. 30, № 4. С. 119.
6. Кебкел К.Г., Машошин А.И., Мороз Н.В. Пути решения проблем создания сетевой подводной связи и позиционирования // *Гироскопия и навигация*. 2019. Т. 27, № 2 (105). С. 106–135.
7. Маевский А.М., Гайкович Б.А. Разработка легкого интервенционного автономного необитаемого подводного аппарата в целях использования в подводных резидентных системах // *Материалы XIV Всерос. науч.-практ. конф. и X молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах»*. Ростов-на-Дону, 2019. С. 83.
8. Ali M.F. et al. Recent advances and future directions on underwater wireless communications // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2020. Vol. 27. P. 1379–1412.
9. Киселев Л.В., Медведев А.В. Траекторное обследование границ морских акваторий группой автономных подводных роботов // *Изв. ЮФУ. Технические науки*. 2018. № 3 (197). С. 185–197.
10. Pompili D., Akyildiz I.F. Overview of networking protocols for underwater wireless communications // *IEEE Communications magazine*. 2009. Vol. 47, No. 1. P. 97–102.
11. Park S.H., Mitchell P.D., Grace D. Reinforcement Learning Based MAC Protocol (UW-ALOHA-Q) for Underwater Acoustic Sensor Networks // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7.
12. Potter J. et al. The JANUS underwater communications standard // *IEEE*. 2014. P. 1–4.
13. Грузликов А.М., Колесов Н.В., Литуненко Е.Г., Скородумов Ю.М. Оптимизация информационных обменов в сети автономных абонентов // *Изв. РАН. Теория и системы управления*. 2022, Т. 6, № 6. С. 56–64.
14. Литуненко Е.Г., Поляков Д.Ю., Крючков Р.Л. Принципы взаимодействия абонентов гидроакустической сети // *Материалы XXIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением»*. Санкт-Петербург, 2021. С. 321–323.
15. Skorodumov Iu.M., Gruzlikov A.M., Lukoyanov E.V., Toropov A.B., Litunenko E.G., Mukhin D.A. Information Exchange in Underwater Acoustic Network // *International Conference on Ocean Studies (ICOS)*. Vladivostok, Russia, 2022. P. 71–76.

Об авторах

ЛИТУНЕНКО *Елизавета Геннадьевна*, аспирант, инженер
2 категории

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

Адрес: 197046, Санкт-Петербург, Малая Посадская ул., д. 30,
Россия

Область научных интересов: исследование, организация и планирование информационных обменов в сетях подводных аппаратов

Тел.: +7(981)852-10-42,

E-mail: lisa.litunenکو@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5280-0593>

КОЛЕСОВ *Николай Викторович*, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

Адрес: 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30,
Россия

Область научных интересов: диагностирование сложных систем управления и обработки информации в реальном времени, планирование вычислений в системах реального времени

E-mail: kolesovnv@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3287-7504>

ГРУЗЛИКОВ *Александр Михайлович*, к.т.н., начальник отдела

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

Адрес: 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30,
Россия

Область научных интересов: разработка и исследование методов высокоуровневого проектирования распределенных вычислительных систем, разработка программного обеспечения и интеллектуальный анализ данных

E-mail: agruzlikov@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8814-0726>

СКОРОДУМОВ *Юрий Михайлович*, к.т.н., начальник лаборатории

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

Адрес: 197046, Санкт-Петербург, Малая Посадская ул., д. 30,
Россия

Область научных интересов: исследование, организация и планирование информационных обменов в сетях подводных аппаратов

E-mail: skorum@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0825-1720>

ЛУКОЯНОВ *Егор Васильевич*, к.т.н., старший научный сотрудник

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

Адрес: 197046, Санкт-Петербург, Малая Посадская ул., д. 30,
Россия

Область научных интересов: исследование алгоритмов сетевой связи, диагностирование сложных систем управления и обработки информации в реальном времени

E-mail: lukoyanov.egor@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3882-4315>

Для цитирования:

Литуненко Е.Г., Грузликов А.М., Колесов Н.В., Скородумов Ю.М., Лукоянов Е.В. ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОРГАНИЗАЦИИ СЕТЕЙ АНПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ // Подводные исследования и робототехника. 2024. № 2 (48). С. 48–57. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_48_02_06. EDN: SANDJL.



RESEARCH OF ALGORITHMS OF AUV NETWORK ORGANIZATION USING THE SIMULATION SOFTWARE

E.G. Litunenکو, A.M. Gruzlikov, N.V. Kolesov, Iu.M. Skorodumov, E.V. Lukoyanov

Development of a network of autonomous underwater vehicles (AUV) is a complex multifactorial task. Solution of this problem requires the fulfillment of a number of stringent requirements, including, requirements for fault tolerance, efficiency of information exchanges, energy efficiency, etc. As a result, it is very important to use simulation for test proposed solutions of AUV network design. The purpose of current research is development and test a software environment for designing AUV networks. The simulation environment is implemented within the framework of an object-oriented approach in Python. The main results obtained include the established principles for implementing a software environment for simulation of AUV networks. The layout of the hardware and software for underwater communication network developed in Concern CSRI Elektropribor is the basis of the developed simulation model. The results of testing the software are presented using the example of solving the problem of ensuring the efficiency of information exchanges. The developed software environment makes it possible to increase the efficiency of AUV network development.

Keywords: software environment, simulation modeling, groups of underwater vehicles, AUV, information exchange scheduling.

References

1. Sathish, K., Venkata, R.C., Anbazhagan, R., Pau, G. Review of Localization and Clustering in USV and AUV for Underwater Wireless Sensor Networks *Telecom*, no. 4. pp. 43–64, 2023.
2. Yang Y., Xiao Y., Li T. A survey of autonomous underwater vehicle formation: Performance, formation control, and communication capability *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2021. Vol. 23. No. 2. P. 815.
3. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., et al., *Underwater Robotic Systems: Systems, Technologies, Applications Dal'nauka*, Vladivostok, 2018 [in Russian].
4. Fedosov V.P., Tarasov S.P., Pivnev P.P., et al., *Communication Networks for Underwater Autonomous Robotic Systems YuFU, Taganrog*, 2018 [in Russian].
5. Scherbatyuk A.F. Multiple AUV Navigation without Using Acoustic Beacons, *Gyroscopy and Navigation*, vol. 13, no. 4, pp. 253–261, 2022.
6. Kebkal K.G., Mashoshin A.I., and Morozs N.V. Solutions for underwater communication and positioning network development, *Gyroscopy and Navigation*, vol. 10, no. 3, pp. 161–179, 2019.
7. Maevskiy A.M., Gaikovich B.A. Development of a light intervention autonomous underwater vehicle for use in underwater resident technology *Proceedings of XIV scientific and practical conference "Control and information processing in technical systems"*, p. 83, 2019.
8. Ali M. F. et al. Recent advances and future directions on underwater wireless communications *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 27, pp. 1379–1412, 2020.
9. Kiselev L.V., Medvedev A.V. Trajectory survey of the boundaries of marine areas by a group of autonomous unmanned robots *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences* no. 3 (197), pp. 185–197, 2018.
10. Pompili D., Akyildiz I. F. Overview of networking protocols for underwater wireless communications *IEEE Communications magazine* vol. 47, no. 1, pp. 97–102, 2009.
11. Park, S.H.; Mitchell, P.D.; Grace, D. Reinforcement Learning Based MAC Protocol (UW-ALOHA-Q) for Underwater Acoustic Sensor Networks *IEEE access* vol. 7, pp. 165531–165542, 2019.
12. Potter J. et al. The JANUS underwater communications standard 2014 *Underwater communications and networking (UComms)*, pp. 1–4, 2014.
13. Gruzlikov A.M., Kolesov N.V., Litunenکو E.G., Skorodumov Iu.M. Optimization of Information Exchange in a Network of Autonomous Participants *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2022, Vol. 61, No. 6, pp. 935–943.
14. Litunenکو E.G., Polyakov D.Y., Kryuchkov R.L. Principles of interaction between subscribers of the sonar network *Proceedings of XXIII Young Scientists Conference "Navigation and Motion Control"*, 2021, pp. 321–323.
15. Skorodumov Iu.M., Gruzlikov A.M., Lukoyanov E.V., Toropov A.B., Litunenکو E.G., Mukhin D.A. Information Exchange in Underwater Acoustic Network 2022 *International Conference on Ocean Studies (ICOS)*. Vladivostok, Russia, 2022. P. 71–76.

Recommended citation:

Litunenکو E.G., Gruzlikov A.M., Kolesov N.V., Skorodumov Iu.M., Lukoyanov E.V. RESEARCH OF ALGORITHMS OF AUV NETWORK ORGANIZATION USING THE SIMULATION SOFTWARE // *Подводные исследования и робототехника*. 2024. No. 2 (48). P. 48–57. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_48_02_06. EDN: SAHDJL.

About the authors

LITUNENKO Elizaveta Gennadijevna, PhD student, engineer
State Research Center of the Russian Federation – Concern CSRI
Elektropribor, JSC

Scientific interests: research, organization and scheduling of information exchanges in networks of underwater vehicles

Phone: +7(981)852-10-42

E-mail: lisa.litunenko@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5280-0593>

KOLESOV Nikolai Victorovich, D.Sc., Professor, Chief
Researcher

State Research Center of the Russian Federation – Concern CSRI
Elektropribor, JSC

Scientific interests: diagnosis of complex control systems and real time information processing systems, scheduling of calculations in real-time systems

E-mail: kolesovnv@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3287-7504>

GRUZLIKOV Alexander Mikhailovich, Ph.D., Chief of
department

State Research Center of the Russian Federation – Concern CSRI
Elektropribor, JSC

Scientific interests: development and research of high-level design methods for distributed computing systems, software development and intelligent data processing

E-mail: agruzlikov@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8814-0726>

SKORODUMOV Iurii Mikhailovich, Ph.D., Head of
laboratory

State Research Center of the Russian Federation – Concern CSRI
Elektropribor, JSC

Scientific interests: research, organization and scheduling of information exchanges in networks of underwater vehicles

E-mail: skorum@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0825-1720>

LUKOYANOV Egor Vasilevich, Ph.D., senior researcher
State Research Center of the Russian Federation – Concern CSRI
Elektropribor, JSC

Scientific interests: research of network communication algorithms, diagnosis of complex control systems and real time information processing systems

E-mail: lukoyanov.egor@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3882-4315>

