

УДК 65.012.122

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕТЯХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНОЙ МОДЕЛИ

Е.Г. Литуненко

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. М. Посадская, 30
E-mail: lisa.litunenko@gmail.com

Н.В. Колесов

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. М. Посадская, д. 30.
E-mail: kolesovnv@mail.ru

Ю.М. Скородумов

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. М. Посадская, 30
E-mail: skorum@mail.ru

В.С. Тюльников

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. М. Посадская, 30
E-mail: victor.tyulnikov@gmail.com

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, гидроакустическая сеть подводных аппаратов, обменные процессы, имитационное моделирование.

Аннотация: В работе анализируются обменные процессы в сети автономных подводных аппаратов. Предлагается программная модель сети и приводятся полученные на ее основе результаты исследования.

1. 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 [1-4], где информационное взаимодействие между аппаратами осуществляется с использованием средств звукоподводной связи.

Проектирование сети АНПА представляет собой сложную многофакторную задачу, решение которой требует выполнения целого ряда жестких требований, среди которых, в частности, требования по оперативности информационных обменов, отказоустойчивости, энергоэффективности и др. В докладе рассмотрены способы обеспечения первого из этих свойств.

Прежде всего, следует отметить, что при разработке алгоритмов информационных обменов в сетях подводных аппаратов, передающих информацию по гидроакустическому каналу связи, необходимо учитывать условия, создаваемые водной средой. К таким условиям можно отнести низкую скорость передачи сигнала, зависимость коэффициента затухания гидроакустического сигнала от частоты, что приводит 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 для подводных сетей и разработка алгоритма оптимизации информационных обменов. В настоящем докладе рассматриваются алгоритмы оптимизации информационных обменов по критерию минимизации суммарного или среднего времени доставки сообщений, путем упорядочивания выходных очередей на узлах сети подводных аппаратов. Также, приведена структура имитационной модели и некоторые результаты исследований.

2. Анализ оперативности обменов в сети АНПА

В ранее опубликованных работах [5] 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. В общем случае маршрут передачи сообщения является многошаговым и время доставки сообщения определяется как сумма времени ожидания в очереди на каждом узле и времени переноса между соседними узлами маршрута – $e_{[k],i}^w$ и $e_{[k],i}^t$ соответственно. Поскольку заранее определить очереди на узлах-ретрансляторах невозможно, необходимо перейти к минимизации оценки времени доставки сообщения $\hat{\Delta}_{[k]}$, 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

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

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 [5].

3. Имитационная модель системы обмена в сети АНПА

Для исследования эффективности алгоритмов планирования информационных обменов, разработана 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 [6]. 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.

Процесс моделирования осуществляется псевдопараллельно, т.е. он разбивается на шаги. Дискретность модели выбирается таким образом, чтобы величина шага моделирования была значительно меньше времени излучения и переноса сообщений. При моделировании вводится допущение о связности сети в течение периода связи, то есть для всех сообщений маршрут всегда существует.

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

Рассмотрим более подробно результаты экспериментов для связи в режиме «один-к-одному». В таких условиях смоделирована ситуация, когда связь осуществляется между двумя узлами без ретрансляции, связь осуществляется с ретрансляцией, при этом все сообщения следуют к одному получателю, 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 разницы 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. 1. Синей линией показаны результаты экспериментов, а красной – аппроксимирующая прямая.

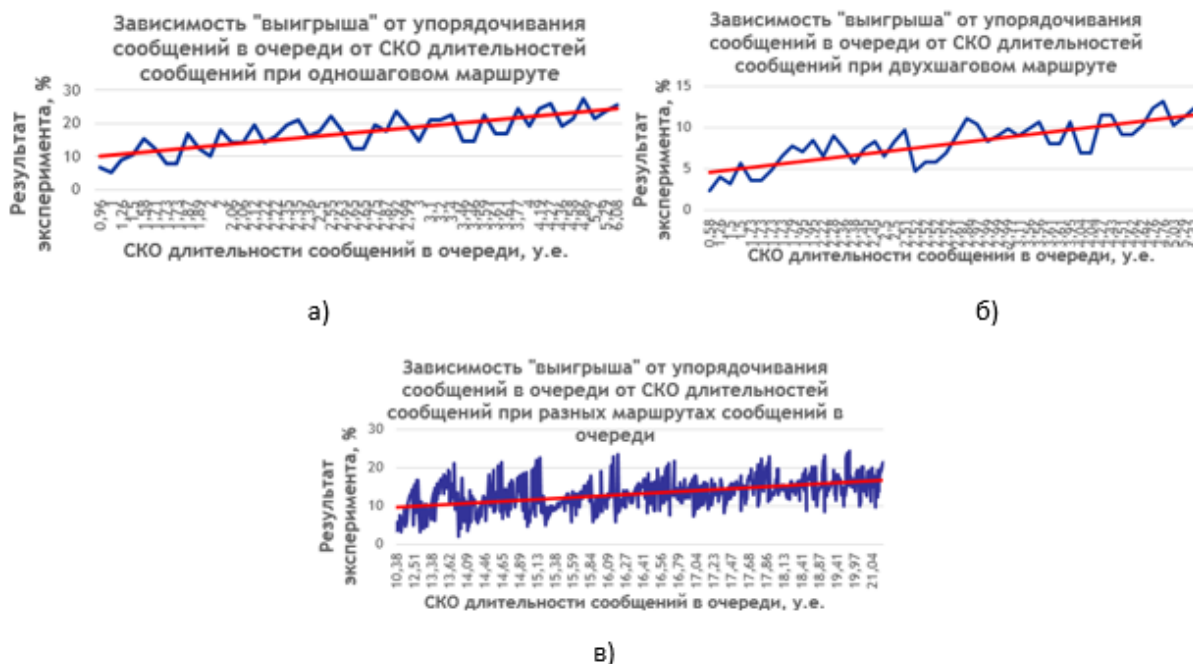


Рис. 1. Графики зависимости разницы результатов, полученных с использованием предложенного алгоритма, и результатов, полученных с использованием алгоритма FIFO, от значения СКО длительностей сообщений в очереди при а) одношаговом маршруте, б) двухшаговом маршруте для всех сообщений, в) сочетании в очереди сообщений с одношаговым и многошаговым маршрутом.

В первом случае (рис. 1а) выигрыш от использования алгоритма планирования составил до 27,4%, в то время как для второго случая (рис. 2б) – до 13,1%. При этом, в третьем случае (рис. 1в) – до 24,3%, при этом значения выигрыша в этом случае представляют собой средний случай между первыми двумя. Кроме того, во всех представленных случаях можно выделить тренд, что с увеличением СКО длительности сообщений в очереди увеличивается и выигрыш от упорядочивания. Это объясняется тем, что при перестановке в очереди сообщений с большей разницей 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 получатели поступают сообщения только от одного узла, сообщения из выходной очереди которого исследуются.

5. Заключение

В докладе на основе разработанной авторами математической и программной моделей анализируются информационные обмены в сети АНПА. Принципиальной особенностью моделей 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 № 22-29-00339, <https://rscf.ru/project/22-29-00339/>.

Список литературы

1. Ramírez I.S., Bernalte Sánchez P.J., Papaalias M., Márquez F.P.G. Autonomous underwater vehicles and field of view in underwater operations // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, No. 3. P. 277.
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: Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук, 2018. 368 с.
4. Федосов В.П. и др. Сети связи для подводных автономных роботизированных комплексов. Таганрог: ЮФУ, 2018. 178 с.
5. Грузликов А.М., Колесов Н.В., Литуненко Е.Г., Скородумов Ю.М. Оптимизация информационных обменов в сети автономных абонентов // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2022, Т. 6, № 6. С. 56-64.
6. Skorodumov Iu.M., Gruzlikov A.M., Lukoyanov E.V., Toropov A.B., Litunenko E.G., Mukhin D.A. Information Exchange in Underwater Acoustic Network // *2022 International Conference on Ocean Studies (ICOS)*. Vladivostok, Russia, 2022. P. 71-76.