

УДК 681.883.022: 681.883.65

© В. В. Вельтищев<sup>1</sup>, С. А. Егоров<sup>1</sup>, А. Н. Кропотов<sup>1</sup>, В. И. Кулешов<sup>2</sup>, А. В. Гурьев<sup>3</sup>, 2014

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана

<sup>2</sup>Секция прикладных проблем при Президиуме РАН, Москва

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

sm42@sm.bmstu.ru

## ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГРУППИРОВКИ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Рассмотрены особенности разработки навигационного обеспечения группировки автономных необитаемых подводных аппаратов, решающей задачи освещения подводной обстановки.

**Ключевые слова:** автономный необитаемый подводный аппарат, гидроакустическая навигационная система, гидроакустический модем.

В настоящее время одним из актуальных и приоритетных направлений развития подводной робототехники является разработка автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) группового управления.

Системы нового поколения, построенные с использованием группировки АНПА, потенциально могут выполнять следующие задачи:

- проведение мониторинга стационарных подводных объектов;
- формирование мобильных быстро развертываемых систем освещения подводной обстановки;
- защита важных подводных объектов;
- обеспечение информационной связи с единым информационно-коммутационным пространством автоматизированных систем связи, наблюдения и управления;
- периодическое пространственно-временное измерение гидрофизических характеристик водной среды, изучение рельефа и характеристик пород дна.

Достижение требуемых функциональных возможностей группировки АНПА зависит от ряда факторов. Одним из существенных условий для реализации группового управления является организация требуемого навигационного обеспечения для всех членов группировки. В традиционных случаях решение навигационной задачи в подводных условиях осуществляется с помощью гидроакустических навигационных систем (ГАНС) с длинной, короткой или ультракороткой базой [1]. Учитывая то, что информационный обмен между отдельными членами группировки АНПА осуществляется с помощью гидроакустических средств, представляется целесообразным рассмотреть возможность комплексного решения задач навигации и группового управления. В настоящей работе рассматриваются некоторые из этих задач и описаны возможности компьютерного моделирования навигационных алгоритмов, проведенные в НИИСМ МГТУ им. Н. Э. Баумана. На рис. 1 изображена предлагаемая схема построения комплексной ГАНС. В состав навигационно-информационной системы входит группа плавающих на поверхности акватории гидроакустических навигационных буйев. Каждый буй оснащен приемником спутниковой навигационной системы GPS/ГЛОНАСС и гидроакустическим модемом. Аналогичный модем установлен и на каждом АНПА, входящем в состав группировки.

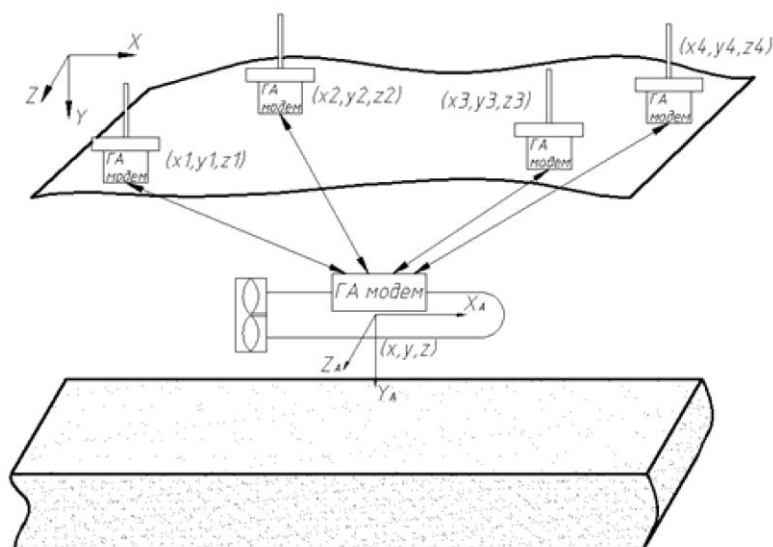


Рис. 1. Гидроакустическая навигационно-информационная система.

ГА модем — гидроакустический модем;  $X, Y, Z$  — глобальная система координат;  $(x_1, y_1, z_1)$  —  $(x_4, y_4, z_4)$  — координаты гидроакустических буйев в глобальной системе координат;  $(x, y, z)$  — координаты АНПА в глобальной системе координат;  $X_A, Y_A, Z_A$  — система координат, связанная с АНПА.

Предлагаемая конфигурация ГАНС является достаточно универсальной и позволяет применять различные алгоритмы определения текущих координат АНПА.

1. Традиционный алгоритм работы ГАНС с длинной базой, основанный на измерении дистанций между АНПА и навигационными (реперными) буйами в режиме «запрос-ответ». Недостатки режима — увеличивается время гидроакустического обмена в сети. Так как идут запросы от АНПА, будет иметь место их высокая гидроакустическая активность (низкая гидроакустическая скрытность работ). К преимуществам метода можно отнести простоту и надежность решения навигационной задачи.

2. Измерение дистанций между АНПА и буйами по времени следования сигнала от гидроакустического модема буйа до АНПА. Навигационные гидроакустические сообщения в этом случае посылают только буйи. Для расчета дистанции до буйев используется единое точное время для всех навигационных буйев и членов группировки АНПА. Точное время излучения кодируется в гидроакустической посылке, излучаемой каждым буйем. Алгоритм допускает уход часов на аппарате, однако точное время всех четырех буйев должно быть синхронизировано. Недостатки режима: требуется точная фиксация моментов излучения и приема гидроакустических сообщений; из-за ухода часов на АНПА увеличивается ошибка решения навигационной задачи. Для компенсации этой погрешности необходимо использовать дополнительный 4-ый буй. Общий алгоритм решения навигационной задачи характеризуется высоким быстродействием и не требует гидроакустической активности АНПА.

3. Алгоритм, использующий измеренные разности дистанций между АНПА и буйами (разностно-дальномерный алгоритм). В этом случае буйи по очереди, с выдерживанием высокоточного интервала времени, излучают гидроакустические посылки. На каждом АНПА фиксируются промежутки времени между приходами сообщений от пары буйев. По измеренным промежуткам времени определяются разности дистанций до пар буйев и далее вычисляются координаты АНПА (используются алгоритмы пересечения сфер и сферической интерполяции [2, 3]). Недостатки режима: требуется минимум 4 буйа и измерение глубины погружения АНПА. Преимущества: требуется фиксация только промежутков времени, поэтому нет зависимости точности определения координат АНПА от ухода часов аппаратов.

Полная схема, состоящая из четырех буюв, является достаточной для реализации всех возможностей указанных выше алгоритмов. В случае выхода из строя или потери связи с одним из буюв сохраняется возможность решения навигационной задачи с использованием оставшихся трех. В этом случае для определения местоположения подводного аппарата возможно применение следующих алгоритмов длиннобазовой навигации:

- по «запросу-ответу»;
- по времени следования сигнала от маяка-излучателя, без коррекции ухода часов на аппарате (возможно использование в течение малого промежутка времени);
- по разности времени прихода гидроакустических сигналов, излучаемых модемами буюв (только с использованием алгоритма пересечения сфер, при наличии информации о предыдущих координатах аппарата).

При двух активных буювах местоположение аппарата может быть определено в режиме «запрос-ответ» или по времени распространения сигнала от буюва до АНПА (в течение малого промежутка времени). Для разрешения неопределенности, возникающей вследствие наличия двух решений навигационной задачи, необходима дополнительная информация о предыдущих координатах аппарата и его текущих параметрах движения.

Для навигации по одному активному буюву (схема одномаяковой навигации) могут применяться алгоритмы на основе метода наименьших квадратов [4], в том числе с использованием виртуальных маяков-ответчиков.

Вне зависимости от используемого навигационного алгоритма возможно приведение подводного аппарата к любому активному буюву при всплытии АНПА на поверхность.

Для детального анализа возможностей предложенной системы в МГТУ им. Н. Э. Баумана используются следующие методы исследований:

- численное моделирование навигационных алгоритмов на ЭВМ;
- полунатурное моделирование алгоритмов с использованием виртуального имитатора работы реальных гидроакустических модемов;
- натурная отработка на макетных образцах гидроакустических буювов.

Компьютерное моделирование навигационных алгоритмов проводилось в программе MATLAB. Рассматривались алгоритмы с измерением дистанций от буювов до АНПА по времени распространения гидроакустического сигнала, а также с измерением разности дистанций между ними. В основу была положена схема с четырьмя неподвижными поверхностными буювами, расположенными в вершинах квадрата. На исследуемую область (пространство полигона) с определенным шагом наносились точки, соответствующие истинному положению аппарата. В каждой из них рассчитывались навигационные координаты АНПА по выбранному алгоритму. В процессе моделирования оценивалась точность решения навигационной задачи при различных погрешностях измерения времени распространения сигнала, для разного взаимного расположения АНПА и навигационных буювов. На рис. 2 представлены типичные результаты моделирования разностно-дальномерного навигационного алгоритма в форме геометрических искажений исходной сетки полигона. Из рисунка видно, что погрешность зависит от положения АНПА относительно системы буювов и не превышает 20 м для заданной 1 % ошибки измерения интервалов времени распространения сигнала.

Полунатурное моделирование выполнялось на программно-имитационном комплексе с использованием виртуального имитатора работы реальных гидроакустических модемов. Структурная схема комплекса представлена на рис. 3.

В состав комплекса вошли специализированная программа, моделирующая работу АНПА и буювов, программа-протоколировщик и программный имитатор работы модемов, разработанный фирмой EvoLogics GmbH (Германия). Доступ к имитатору, функционирующему на сервере компании, осуществляется в режиме удаленного доступа. Фирма EvoLogics является одним из мировых лидеров в области разработки гидроакустических

модемов. Ее программный имитатор воспроизводит характеристики реальных модемов этой компании. В имитаторе моделируется работа верхнего уровня интерфейса модемов с учетом основных физических свойств водной среды. Учтены такие особенности, как задержка распространения сигнала, отражение сигнала от дна и поверхности воды, повреждение пакета данных при передаче, ошибки синхронизации пакета, а также битовые ошибки информации с заданным уровнем их появления.

В процессе полунатурного моделирования анализировалось решение навигационной задачи в статике с неподвижными четырьмя буями и аппаратом, для чего использовалось пять одновременно функционирующих специализированных программ. При исследовании алгоритмов навигации оценивалась точность получаемых навигационных решений с учетом нестабильности задержек при обмене данными с удаленно работающим имитатором. Анализ результатов показал, что среднеквадратическое отклонение полученного навигационного решения в идеальных условиях среды составляет величину порядка 6 м. Данный результат является приемлемым для дальнейшего исследования и развития навигационных алгоритмов. В будущем планируется наращивание функциональности программного комплекса для отработки алгоритмов навигации с дрейфующими буями и подвижной группировкой АНПА.

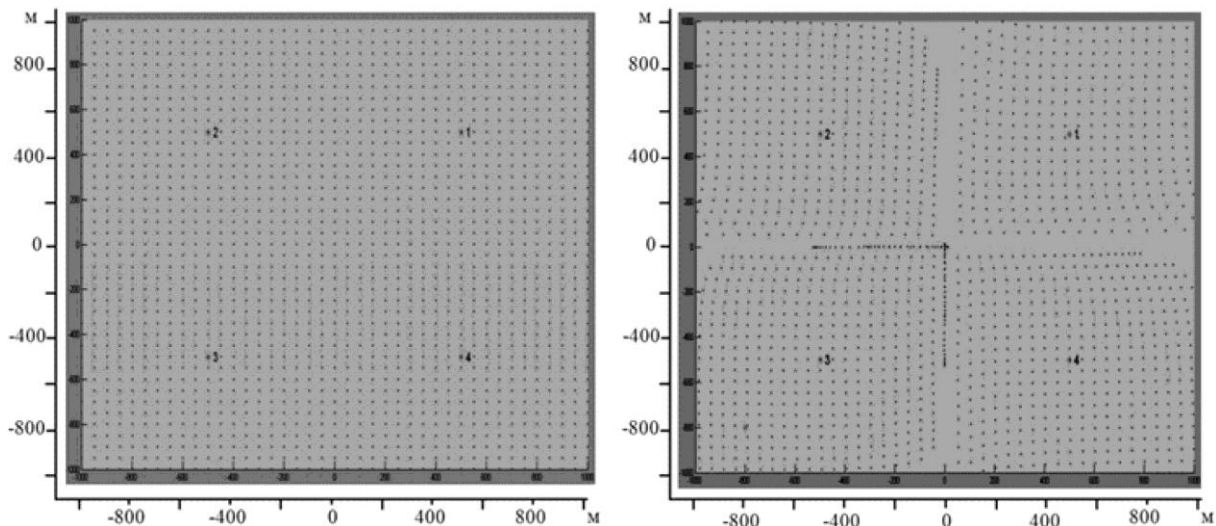


Рис. 2. Вычисленные координаты АНПА по разностно-дальномерному алгоритму: слева — без погрешностей; справа — с погрешностями.

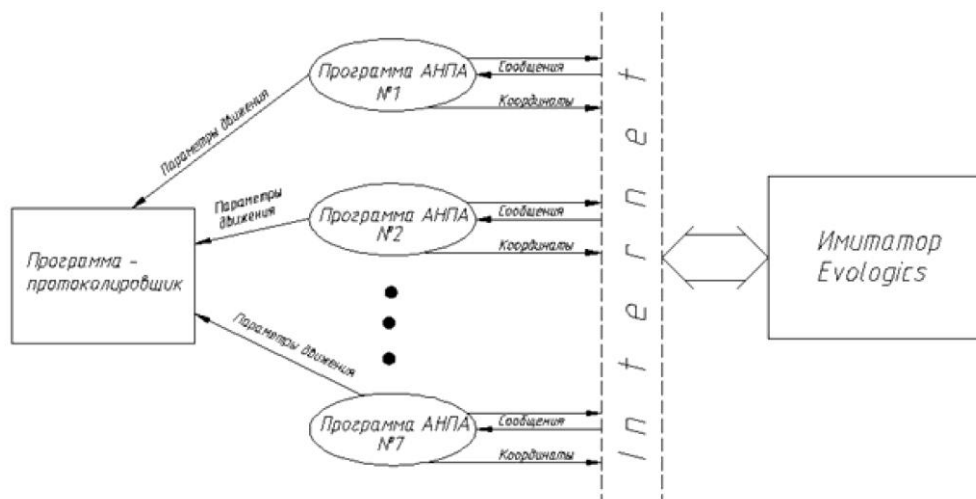


Рис. 3. Структура программно-имитационного комплекса.

Параллельно с математическим и полунатурным моделированием в МГТУ им. Н.Э. Баумана разрабатываются макетные образцы навигационных буев и АНПА. В настоящее время производится отладка бортового программного обеспечения АНПА и системы ГАНС. Внешний вид макетов АНПА и гидроакустического буя представлен на рис. 4.

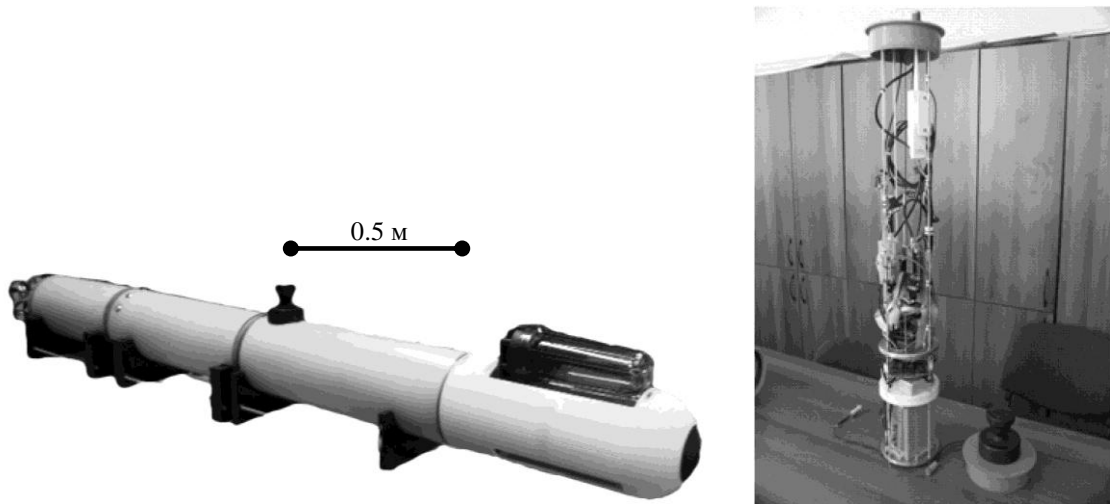


Рис. 4. Внешний вид макетов АНПА и гидроакустического буя.

В дальнейшем планируется формирование полноценной навигационной сети поверхностных реперов ГАНС из 4-х буев и проведение экспериментальной отработки различных навигационных алгоритмов в реальных условиях.

#### Литература

1. Милн П. Х. Гидроакустические системы позиционирования. Л.: Судостроение, 1989.
2. Chan Y. T., Ho K. C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location // IEEE Transactions on Signal Processing. 1994. V. 42, N 8. P. 1905—1915.
3. Smith J. O., Abel J. S. Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements // IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing. 1987. V. 35, N 12. P. 1661—1669.
4. Scherbatyuk A. Ph. The AUV Positioning Using Ranges from One Transponder LBL // Proceedings OCEANS Conference. San-Diego, USA, 1995. P. 1620—1623.

Статья поступила в редакцию 12.03.2014 г.



V. V. Vel'tishchev<sup>1</sup>, S. A. Egorov<sup>1</sup>, A. N. Kropotov<sup>1</sup>, V. I. Kuleshov<sup>2</sup>, A. V. Gur'ev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow

<sup>2</sup>Defense Problem Section RAS, Moscow

<sup>3</sup>Saint-Petersburg Department of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS

### The Navigation Support of the Autonomous Unmanned Underwater Vehicle's Group

This paper describes the specifics of navigation support of the autonomous unmanned underwater vehicle's group meeting the challenges of underwater scenery report.

**Key words:** autonomous underwater vehicles, hydroacoustic position system, hydroacoustic modem.