

## **Навигация автономного подводного аппарата при помощи корректируемой бескарданной инерциальной навигационной системы**

**Вавилова Н.Б.\*, Парусников Н.А., Субханкулова Г.А.\*\***

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,*

*Ленинские горы, 1, стр. 52, Москва, 119991, Россия*

*\*e-mail: [nb-vavilova@yandex.ru](mailto:nb-vavilova@yandex.ru)*

*\*\*e-mail: [subguzel@gmail.com](mailto:subguzel@gmail.com)*

### **Аннотация**

Рассматривается задача навигации автономного подводного аппарата (АПА). В качестве датчиков дополнительной навигационной информации используются гидроакустический датчик дальности до подводного маяка с известными координатами, лаг и глубиномер. Особенность работы в том, что, в отличие от традиционных методов навигации АПА, предполагается использование бескарданной инерциальной навигационной системы (БИНС) среднего класса точности. Задача навигации решается как задача коррекции БИНС при помощи внешней информации. Исследуются принципиальные возможности такого решения на основе ковариационного анализа с привлечением реальных данных.

**Ключевые слова:** бескарданная инерциальная навигационная система, инструментальные погрешности, фильтр Калмана.

## Введение

Автономные подводные аппараты (АПА) используются для решения широкого круга научных и прикладных задач по исследованию и освоению океана, таких как морская геологическая разведка, изучение подводной обстановки, экологический мониторинг водной среды, работы военного назначения (примеры использования АПА описаны в [1], [2]). АПА может погружаться в определенный район океана на заданную глубину, двигаться по программной траектории, выполнять требуемые работы и по окончании программы возвращаться на обеспечивающее судно. Ценность предоставляемых подводным аппаратом данных определяется точностью их навигационной привязки. Именно поэтому разработка систем высокоточной навигации АПА актуальна.

Принципиальным отличием исследуемой в работе системы является включение в состав комплекса бескарданной инерциальной навигационной системы среднего класса точности. Более того, информация БИНС рассматривается как основная. Задача навигации сводится к построению алгоритма комплексной системы, в которой БИНС корректируется при помощи информации о дальности до специального гидроакустического маяка, скоростной информации от лага, и информации о глубине погружения, доставляемой глубиномером. Основой алгоритма оценивания служит калмановская фильтрация. Математические модели строятся с учетом специфики условий работы аппарата (малые скорости движения, сравнительно малые удаления аппарата от маяка). Работа навигационной системы

исследуется на двух типовых движениях аппарата. Метод исследования – ковариационный анализ с привлечением экспериментальных данных.

В работе используются представления об инерциальной навигации, изложенные в [3] и [4]. Широко известные факты соответствующей теории приводятся без пояснений. Основные принципы работы и устройства АПА описаны в [5].

### **Структура навигационного комплекса АПА**

Традиционно навигация АПА обеспечивается средствами бортовой навигационной системы счисления пути (ССП) и гидроакустической навигационной системы (ГАНС). Формирование текущей оценки координат достигается за счет комплексирования информации бортового и наводного комплекса и активного информационного обмена навигационными данными. При работе АПА накапливающаяся ошибка местоположения уменьшается за счет коррекции данных бортовой системы навигации данными ГАНС.

На практике применяются ГАНС с длинной и ультракороткой базой (ГАНС ДБ, ГАНС УКБ). ГАНС ДБ предполагает развертывание сети из маяков-ответчиков, которые закрепляются на дне. Каждый маяк оборудован приемо-передающим устройством. На борту АПА устанавливается передатчик гидроакустического сигнала и приемник сигнала от маяка. Информация о времени распространения сигнала от аппарата до маяков, а также известные координаты маяка, позволяют получить информацию о местоположении АПА. Аналогичный принцип работы используется для ГАНС УКБ, но в качестве маяков-ответчиков используется малогабаритная антенна, которая может быть установлена на плавающем объекте.

Исследования проведены применительно к малогабаритным АПА с мобильным наводным маяком (в частности разработки Института проблем морских технологий ДВО РАН [6]). В качестве приборной базы для построения алгоритма в работе выбрана система, в состав которой входят автономные подводный и водный аппараты (АПА и АНВА), а также оборудование берегового центра управления.

На практике существующие подводные аппараты могут погружаться на глубину до 200 метров и развивать скорость до 3 м/с. Водной аппарат перемещается по поверхности воды и является автономным мобильным носителем навигационного маяка, местоположение которого определяется при помощи спутниковой навигационной системы. Гидроакустическая навигационная система позволяет обмениваться пакетами навигационных сигналов между АПА и АНВА и одновременно измерять время распространения акустического сигнала между ними. Предполагается, что основой бортовой навигационной системы АПА служит БИНС.

### **Математическое описание задачи**

Приборной основой БИНС служит блок из трех ньютометров и трех датчиков угловых скоростей (ДУС), которые жестко связаны с корпусом объекта и их оси чувствительности близки к осям трехгранника  $Mz_1z_2z_3$ , называемого приборным.  $M$  – приведенная чувствительная масса блока ньютометра. В проекциях на оси приборного трехгранника измеряется внешняя сила  $f_z$  и его угловая скорость  $\omega_z$ :

$$f'_z = f_z + \Delta f_z, \quad \omega'_z = \omega_z - v_z,$$

где  $\Delta f_z = (\Delta f_{z_1}, \Delta f_{z_2}, \Delta f_{z_3})^T$  – вектор погрешности измерений ньютометров,  $v_z = (v_{z_1}, v_{z_2}, v_{z_3})^T$  – вектор погрешности измерений ДУС.

Собственные инструментальные погрешности каждого из ньютометров включают в себя постоянную составляющую –  $\Delta f_z^0 = (\Delta f_{z_1}^0, \Delta f_{z_2}^0, \Delta f_{z_3}^0)^T$  и высокочастотную составляющую  $\Delta f_z^s = (\Delta f_{z_1}^s, \Delta f_{z_2}^s, \Delta f_{z_3}^s)^T$ , которая считается белым шумом. С учетом сказанного, вектор инструментальных погрешностей  $\Delta f_z = f'_z - f_z = (\Delta f_{z_1}, \Delta f_{z_2}, \Delta f_{z_3})^T$  имеет следующий вид:

$$\Delta f_z = \Delta f_z^0 + \Delta f_z^s.$$

Для погрешностей ДУС принимается аналогичная модель:  $v_z = v_z^0 + v_z^s$ , где  $v_z^0 = (v_{z_1}^0, v_{z_2}^0, v_{z_3}^0)^T$ ,  $v_z^s = (v_{z_1}^s, v_{z_2}^s, v_{z_3}^s)^T$ . Для исследования основных свойств системы выбрана упрощенная модель инструментальных погрешностей, которая оказывается достаточной.

Опорный трехгранник  $Mx$  ориентирован в географической координатной сетке: ось  $Mx_3$  – направление географической вертикали,  $Mx_1$  – касается параллели и направлена на Восток,  $Mx_2$  – лежит в плоскости меридиана и направлена на Север.  $L$  – матрица ориентации  $Mz$  относительно  $Mx$ .

Введем трехгранник  $M_y$ , как числовой образ приборного трехгранника  $M_z$ .

В нем  $\omega_y = \omega'_z$  – абсолютная угловая скорость, информация о которой доставляется датчиками угловой скорости. Вектор малого поворота  $\beta_y$  определяет ориентацию  $M_y$  относительно  $M_z$ .

Квазимодельный трехгранник  $M_y^x$  является числовым образом опорного трехгранника  $M_x$ . В проекциях на оси квазимодельного трехгранника в бортовом вычислителе определяются координаты и скорости модельной точки  $M'$ .  $L'$  – матрица ориентации модельного трехгранника  $M_y$  относительно  $M_y^x$ . Вектор малого поворота  $\beta_y$  в осях квазимодельного трехгранника примет вид:

$$\beta_x = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)^T = L'^T \beta_y. \quad \text{Векторы погрешностей измерений}$$

$$v_x = (v_1, v_2, v_3)^T = L'^T v_z, \Delta f_x = (\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta f_3)^T = L'^T \Delta f_z.$$

На практике применяются различные модификации уравнений ошибок. В данной работе используются уравнения ошибок в комбинированной форме, описанные в [3]. В уравнениях участвуют следующие переменные:  $\Delta y_1, \Delta y_2, \Delta y_3$  – полные ошибки местоположения;  $\delta V_1, \delta V_2, \delta V_3$  – динамические ошибки определения составляющих относительной скорости;  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  – кинематические ошибки определения ориентации. Уравнения ошибок имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
\Delta \dot{y}_1 &= \delta V_1 + \beta_3 V_2 - \beta_2 V_3, \\
\Delta \dot{y}_2 &= \delta V_2 - \beta_3 V_1 + \beta_1 V_3, \\
\Delta \dot{y}_3 &= \delta V_3 + \beta_2 V_1 - \beta_1 V_2, \\
\dot{\beta}_1 &= u_3 \beta_2 - u_2 \beta_3 + v_2, \\
\dot{\beta}_2 &= -u_3 \beta_1 + u_1 \beta_3 + v_2, \\
\dot{\beta}_3 &= u_2 \beta_1 - u_1 \beta_2 + v_3, \\
\delta \dot{V}_1 &= 2u_3 \delta V_2 - 2u_2 \delta V_3 - \omega_0^2 \Delta y_1 - \beta_2 g + \Delta f_1, \\
\delta \dot{V}_2 &= -2u_3 \delta V_1 + 2u_1 \delta V_3 - \omega_0^2 \Delta y_2 + \beta_1 g + \Delta f_2, \\
\delta \dot{V}_3 &= -2u_1 \delta V_2 + 2u_2 \delta V_1 + 2\omega_0^2 \Delta y_3 + \Delta f_3,
\end{aligned}$$

где  $u_{x_0} = (u_1, u_2, u_3)$  – угловая скорость вращения Земли в осях трехгранника

$Mx$ ,  $\omega_0 = \sqrt{g/a} = 1,25 \cdot 10^{-3}$  1/сек – частота Шулера. Ввиду малости, параметры относительного движения не учитываются.

Для решения задачи коррекции БИНС используются измерения дальности до маяка –  $W^d$ , скорость –  $W^V$  и глубина погружения АПА –  $W^h$ .

Информация о дальности до маяка  $\tilde{Z}$  поступает от ГАНС. Она определяется на основе обработки амплитудно-фазовой информации, при этом используется алгоритм вычисления расстояния по измеренному времени распространения сигнала. Имеем:  $\tilde{Z} = \rho + \rho^d$ , где  $\rho$  – истинное расстояние до маяка,  $\rho^d$  – погрешность измерения расстояния. По данным спутниковой системы, установленной на АНВА, известны координаты маяка, которые можно спроектировать в опорный трехгранник. Расстояние до маяка можно определить

следующим образом. Пусть  $(\lambda^M, \varphi^M, h^M)$  - координаты маяка в опорной системе координат  $Mx$ , а  $y^M = (y_1^M, y_2^M, y_3^M)$  - в квазимодельном  $M'y^x$ :

$$\begin{aligned} y_1^M &= (\lambda^M - \lambda') \cdot a \cdot \cos \varphi, \\ y_2^M &= (\varphi^M - \varphi') \cdot a, \\ y_3^M &= h - h', \end{aligned}$$

где  $a = 6378245$  м – длина большой полуоси эллипсоида вращения Земли.

Дальность от АПА до маяка в таком случае будет равна:  $\rho^* = \sqrt{\sum_{i=1}^3 y_i^{M^2}}$ .

Тогда измерение  $W^d$  определяется следующим образом:

$$W^d = \tilde{Z} - \rho^* = h^T \Delta y + \rho^d,$$

где  $h = \left( \frac{y_1^M}{\rho^*}, \frac{y_2^M}{\rho^*}, \frac{y_3^M}{\rho^*} \right)$ .

При помощи датчика глубины погружения измеряется информация  $h^*$  о глубине погружения:  $h^* = h + \rho^h$ , где  $h$  – глубина погружения,  $\rho^h$  – погрешность измерения. Измерение  $W^h$  определим следующим образом:

$$W^h = h' - h^* = \Delta y_3 + \rho^h,$$

где  $h'$  – вычисленное значение высоты.

При помощи лага измеряется скорость движения аппарата относительно воды.

Принцип действия датчика заключается в измерении временного сдвига между

отраженным от грунта акустическим сигналом, принятым на разнесенные по корпусу аппарата антенны.

Информация  $V^*$  от лага описывается соотношением:  $V^* = V_z + \rho^v$ , где  $V_z$  – вектор относительной скорости аппарата в приборных осях  $Mz$ ,  $\rho^v$  – вектор инструментальных погрешностей. Вектор коррекции  $W^v$  описывается соотношением:

$$W^v = V_y' - V^* \square \delta V - \rho^v.$$

Модель ошибок измерений имеет следующий вид:

$\rho^i = \rho^{i0} + \rho^{is}$ , где  $\rho^i$  – ошибки измерений  $\rho^d, \rho^h, \rho^v$ ;  $\rho^{i0}$  – постоянная составляющая погрешности,  $\rho^{is}$  – высокочастотная погрешность типа белого шума.

Вектор состояния динамической системы включает в себя следующие компоненты:

$$\kappa = (\Delta y_1, \Delta y_2, \Delta y_3, \delta V_1, \delta V_2, \delta V_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3, v_{z1}, v_{z2}, v_{z3}, \Delta f_{z1}, \Delta f_{z2}, \Delta f_{z3}, \rho^{d0}, \rho^{v0}),$$

где вектор коррекции:  $W = (W^d, W^h, W^v)$ . Задача сводится к построению оценок вектора состояния при помощи вектора коррекции, линейно зависящего от компонент вектора измерений. Для решения задачи используется фильтр Калмана, описанный в [4], реализованный методом квадратного корня.

Основой для построения фильтра Калмана служит дискретная форма следующих непрерывных соотношений:

$$\dot{\kappa} = A\kappa + q,$$

$$z = H\kappa + r,$$

где  $A$  – матрица динамической системы,  $q$  – вектор шума динамической системы известной интенсивности  $Q$ ,  $H$  – матрица перехода от вектора измерений к вектору состояния системы,  $r$  – погрешность информации известной интенсивности  $R$ .

Матрицы  $A$  имеет следующий вид:

$$A = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & A_{\Delta y \delta V} & A_{\Delta y \beta} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 3} \\ A_{\delta V \Delta y} & A_{\delta V \delta V} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & L'^T & \mathbf{0}_{2 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & A_{\beta \beta} & L'^T & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 3} \end{pmatrix},$$

где  $\mathbf{0}_{i \times j}$  – нулевая матрица размерности  $i \times j$ ,

$$A_{\Delta y \delta V} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, A_{\Delta y \beta} = \begin{pmatrix} 0 & -V_3 & V_2 \\ V_3 & 0 & -V_1 \\ -V_2 & V_1 & 0 \end{pmatrix}, A_{\delta V \Delta y} = \begin{pmatrix} -\omega_0^2 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_0^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2\omega_0^2 \end{pmatrix},$$

$$A_{\delta V \delta V} = \begin{pmatrix} 0 & 2u_3 & -2u_2 \\ -2u_3 & 0 & 2u_1 \\ 2u_2 & -2u_1 & 0 \end{pmatrix}, A_{\beta \beta} = \begin{pmatrix} 0 & u_3 & -u_2 \\ -u_3 & 0 & u_1 \\ u_2 & -u_1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Матрица  $H$  :

$$H = \begin{pmatrix} \frac{y_1^M}{\rho^*} & \frac{y_2^M}{\rho^*} & \frac{y_3^M}{\rho^*} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{22} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{33} \end{pmatrix},$$

где  $L'_{ij}$  – компоненты матрицы  $L'$ .

Начальная матрица ковариаций:

$$P_0 = \text{diag}(\sigma_{\Delta y_1}, \sigma_{\Delta y_2}, \sigma_{\Delta y_3}, \sigma_{\delta V_1}, \sigma_{\delta V_2}, \sigma_{\delta V_3}, \sigma_{\beta_1}, \sigma_{\beta_2}, \sigma_{\beta_3}, \sigma_{\Delta f_1}, \sigma_{\Delta f_2}, \sigma_{\Delta f_3}, \sigma_{\rho^{d0}}, \sigma_{\rho^{v0}}).$$

### Результаты ковариационного анализа

Анализ точности производился в рамках ковариационных соотношений. Были выбраны априорные среднеквадратические погрешности, соответствующие БИНС среднего класса точности, а также используемым на практике датчикам:  $\sigma_{\Delta f^0} = 0,005 \text{ м/с}^2$ ;  $\sigma_{v^0} = 10^\circ/\text{час}$ ;  $\sigma_{\Delta y} = 10 \text{ м}$ ;  $\sigma_{\delta V} = 0,1 \text{ м/с}$ ;  $\sigma_{\beta_1} = \sigma_{\beta_2} = 0,5^\circ$ ,  $\sigma_{\beta_3} = 1^\circ$ ;  $\sigma_{\rho^{d0}} = 50 \text{ м}$ ;  $\sigma_{\rho^{v0}} = 1 \text{ м/с}$ . Для шумов в системе и измерениях берутся следующие значения на частоте 1 Гц:  $\sigma_{\Delta f^s} = 0,02 \text{ м/с}^2$ ;  $\sigma_{v^s} = 90^\circ/\text{час}$ ;  $\sigma_{\rho^{ds}} = 100 \text{ м}$ ;  $\sigma_{\rho^{vs}} = 1 \text{ м/с}$ .

Рассматривались следующие движения аппаратов, выбранные как основные. На данных движениях были проведены испытания комплекса, в том числе и навигационной системы без использования БИНС [6]. В первом случае АПА двигался прямолинейным галсом на постоянной глубине, а АНВА двигался

«зигзагом» со стороной 200 метров, пересекая при этом траекторию подводного аппарата (Рис.1).

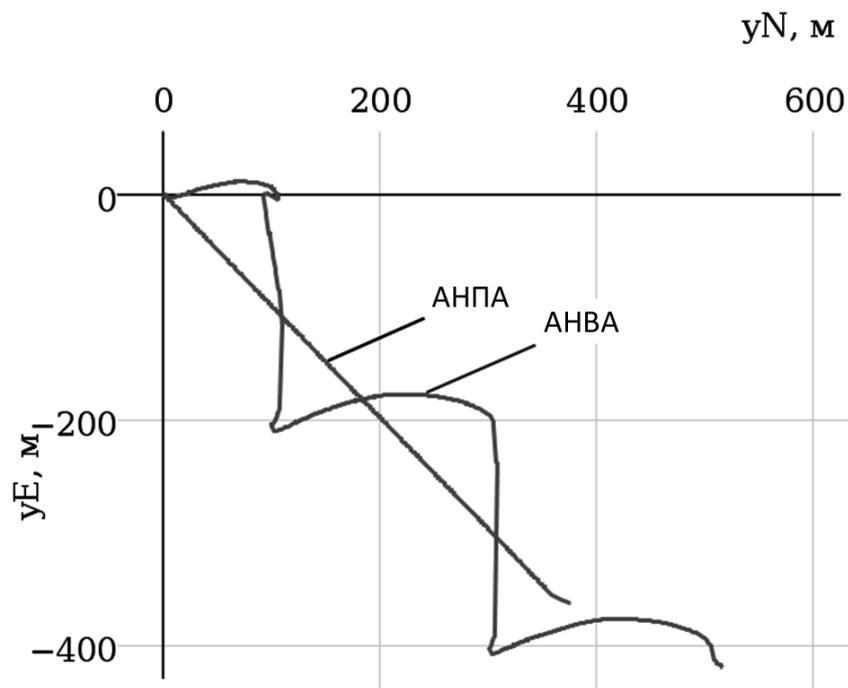


Рисунок 1

Результаты ковариационного анализа приведены в Таблице 1. Таблица показывает, что среднеквадратические отклонения ошибок оценки горизонтальных координат в таком случае не превышает 3 метров.

t, сек	50	250	500	750
$\sigma_{\Delta y_1}$ , м	2,9	2,5	2	1
$\sigma_{\Delta y_2}$ , м	3	2,6	2,3	1,1

Таблица 1

Во втором случае АНБА двигался по траектории близкой к квадрату со стороной 200 метров по часовой стрелке, в то время как АПА шел по квадрату со стороной 100 метров против часовой стрелки (рис.2).

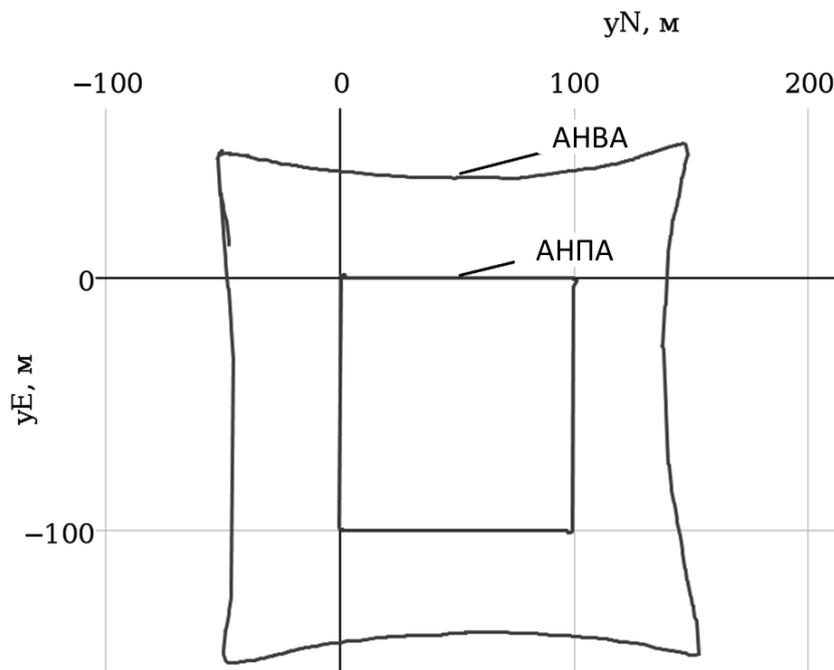


Рисунок 2

Результаты исследования при описанном движении показаны в Таблице 2.

СКО ошибок оценок горизонтальных координат также не превышают 3 метров.

t, сек	50	250	500	750
$\sigma_{\Delta y_1}$ , м	3	2	1,9	1,5
$\sigma_{\Delta y_2}$ , м	2,9	2,8	1,4	1,6

Таблица 2

### Выводы:

Исследована принципиальная возможность использования бескарданной инерциальной навигационной системы для навигации АПА, построен алгоритм работы навигационной системы и проведен ковариационный анализ точности такой системы с использованием БИНС. Показано, что СКО ошибки оценки координат не превышает 3 метров.

### Библиографический список

1. Кропотов А.Н., Макашов А.А., Плясунов В.М. Реализация системы видеопозиционирования подводного аппарата // Труды МАИ, 2015, №80: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=57004>
2. Малышев В.В., Кабанов Д.С. Оптимизация алгоритма доставки полезной нагрузки автоматическим подводным аппаратом // Труды МАИ, 2012, №57: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=31138>
3. Голован А.А., Парусников Н.А. Математические основы навигационных систем. Часть I. Математические модели инерциальной навигации. – М.: МАКС Пресс, 2011. - 132 с.
4. Голован А.А., Парусников Н.А. Математические основы навигационных систем. Часть II. Приложения методов оптимального оценивания к задачам навигации. – М.: МАКС Пресс, 2012. 170 с.
5. Агеев М.Д. Автономные подводные роботы: системы и технологии. – М.: Наука, 2005. – 398 с.
6. Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С, Кушнерик А.А., Туфанов И.Е., Щербатюк А.Ф. Малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат МАРК нового поколения для выполнения групповых операций // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. №6. С. 59-65.