

Подготовка навигационной системы подводного аппарата перед его погружением

Вавилова Н.Б.*, Парусников Н.А., Филатова Г.А.**

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

Ленинские горы, 1, стр. 52, Москва, 119899, Россия

**e-mail: nb-vavilova@yandex.ru*

***e-mail: subguzel@gmail.com*

Аннотация

Рассматривается задача навигации автономного подводного аппарата (АПА). В качестве источников навигационной информации используются гидроакустический датчик дальности до подводного маяка с известными координатами, лаг и глубиномер. Новшеством является использование в качестве основной информации данных бескарданной инерциальной навигационной системы (БИНС) среднего класса точности. Задача навигации решается как задача коррекции БИНС при помощи внешней информации. Проводится ковариационный анализ точности работы комплексной системы. Предлагается метод подготовки навигационной системы АПА перед погружением, позволяющий получить равноточное решение навигационной задачи и повысить точность определения местоположения на начальных этапах движения под водой.

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

Введение

Задачам освоения и исследования Мирового океана уже давно уделяется большое внимание. Одним из основных средств исследований на сегодняшний день являются автономные подводные аппараты (АПА). Малая инерционность, быстрая подготовка к работе, автономность, возможность установки на борт различного оборудования и многое другое позволяет применять АПА для широкого круга научных и прикладных задач (примеры использования АПА описаны в [1], [2]).

АПА может погружаться в определенный район океана на заданную глубину, двигаться по запрограммированному маршруту, выполнять требуемые работы и по окончании программы возвращаться на обеспечивающее судно. Такие аппараты в нашей стране разрабатываются в единственном месте - Институте проблем морских технологий ДВО РАН им. М.Д. Агеева (Владивосток), с которым налажены контакты лабораторией управления и навигации МГУ им. М.В. Ломоносова.

Ключевым фактором эффективности АПА является точность его навигационной системы. От нее зависит и успешность выполняемой миссии, и ценность исследовательских данных.

Обычно навигационная система АПА включает в себя гидроакустический датчик дальности до наводного маяка с известными координатами, лаг, глубиномер,

блок чувствительных элементов – датчиков угловой скорости (ДУС) и ньютонометров.

Нетривиальность навигационной задачи состоит в том, что ни одно из перечисленных средств само по себе не позволяет определить местоположение АПА в пространстве под водой. Забегая вперед, скажем, что АПА оснащаются также приемниками спутниковой навигационной системы (СНС), которые могут функционировать только в надводном положении и облегчают поиск АПА после всплытия. А под водой только комплексная обработка всей доступной информации дает возможность построить навигационное решение. Схема построения такой обработки играет решающую роль для достижения необходимой точности навигации.

Принципиальным отличием исследуемой в данной работе системы является включение в состав комплекса бескарданной инерциальной навигационной системы среднего класса точности. Информация БИНС рассматривается как основная. Построен алгоритм комплексной системы [6], в которой БИНС корректируется при помощи информации о дальности до специального гидроакустического маяка, скоростной информации от лага и информации о глубине погружения, доставляемой глубиномером. В качестве алгоритма оценивания погрешностей БИНС и инструментальных погрешностей средств дополнительной информации используется калмановская фильтрация. Математические модели построены 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. Проведенное исследование [6] показало принципиальную возможность использования БИНС для навигации АПА, а в результате ковариационного анализа получено, что точность алгоритма приемлема в данной задаче.

Однако в процессе анализа было обнаружено свойство неравноточности навигационного решения. Оценки устанавливаются после интервала времени, длительность которого зависит от траектории движения. Это вызвано переходными процессами оценивания инструментальных погрешностей БИНС. Следует сказать, что стендовая калибровка БИНС не решает полностью проблемы оценки параметров модели инструментальных погрешностей БИНС данного класса, так как у датчиков (ДУС и ньютонометров) имеются погрешности нулей, меняющиеся от запуска к запуску (т.е. индивидуальные в каждом запуске). Попытки разработки способа и устройства для калибровки БИНС, установленной на АПА, в каждом запуске не приводят к успеху из-за конструктивных особенностей АПА.

Наличие на борту АПА приемника СНС, который доставляет полноценную позиционную и скоростную информации при движении АПА над водой, позволяет построить метод подготовки навигационной системы АПА перед погружением для повышения точности навигации под водой. Суть метода в том, что к программному движению под водой перед погружением добавляется участок движения над водой с включенным приемником спутниковой навигации. Этот интервал времени используется для оценки погрешностей БИНС, в том числе и инструментальных

погрешностей датчиков. Исследованию эффективности такого подхода и посвящается данная работа.

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

Основы 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.

ГАНС делятся на два типа: с длинной базой и ультракороткой базой. Принцип работы гидроакустической системы с длинной базой (ГАНС-ДБ) основан на измерении дальностей до объекта навигации от опорных точек, которыми служат донные маяки-ответчики, оборудованные приемо-передающими устройствами. Системы с ультракороткой базой (ГАНС-УКБ) используют дальномерные и угломерные данные до плавающей малогабаритной антенны. Большинство современных аппаратов имеют в составе как дальнобазисные, так и ультракороткобазисные системы. Подробно работа гидроакустической системы АПА описана в [4].

Исследования проведены применительно к малогабаритным АПА с мобильным наводным маяком (в частности разработки Института проблем морских технологий ДВО РАН [5]). В качестве приборной базы для построения алгоритма в работе выбрана система, в состав которой входят автономные подводный и водный аппараты (АПА и АВА), а также оборудование берегового центра управления.

На практике такие подводные аппараты могут погружаться на глубину до 200 метров и развивать скорость до 3 м/с. Водный 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 АВА и одновременно измерять время распространения акустического сигнала между ними. Предполагается, что основой бортовой навигационной системы АПА служит БИНС.

Математическое описание алгоритма коррекции

Алгоритм навигации с применением корректируемой БИНС был подробно описан в [6]. Приведем здесь его основные соотношения в краткой форме.

Приборной основой БИНС служит блок из трех ньютометров и трех датчиков угловых скоростей (ДУС), которые жестко связаны с корпусом объекта. Оси чувствительности ньютометров и датчиков угловых скоростей с точностью до инструментальных погрешностей совпадают с осями приборного трехгранника $Mz_1z_2z_3$, где M – местоположение приведенной чувствительной массы

ньютонометров. В проекциях на оси приборного трехгранника измеряется внешняя сила f_z и его угловая скорость ω_z : $f'_z = f_z + \Delta f_z$, $\omega'_z = \omega_z - v_z$, где

$\Delta f_z = (\Delta f_{z1}, \Delta f_{z2}, \Delta f_{z3})^T$ – вектор погрешности измерений ньютонометров,

$v_z = (v_{z1}, v_{z2}, v_{z3})$ – вектор погрешности измерений датчиков угловой скорости.

Предполагается, что уже проведена предварительная калибровка системы, компенсированы погрешности установки инерциальных датчиков, и собственные инструментальные погрешности каждого из ньютонометров и ДУС включают в себя только ошибку нулевого сигнала (ошибку нуля) и высокочастотную составляющую, которая считается белым шумом. С учетом сказанного, векторы погрешностей

имеют следующий вид: $\Delta f_z = f'_z - f_z = \Delta f_z^0 + \Delta f_z^s$, $v_z = v_z^0 + v_z^s$, где

$\Delta f_z^0 = (\Delta f_{z1}^0, \Delta f_{z2}^0, \Delta f_{z3}^0)^T$ и $v_z^0 = (v_{z1}^0, v_{z2}^0, v_{z3}^0)^T$ – постоянные векторы погрешностей

нулей, $\Delta f_z^s = (\Delta f_{z1}^s, \Delta f_{z2}^s, \Delta f_{z3}^s)^T$ и $v_z^s = (v_{z1}^s, v_{z2}^s, v_{z3}^s)^T$ – высокочастотные

погрешности типа белого шума.

На практике применяются различные модификации уравнений ошибок. Их поведение описывается в опорном трехграннике Mx , жестко связанном с текущей географической вертикалью (ось Mx_3). В данной работе используются уравнения ошибок в комбинированной форме, описанные в [3]. В уравнениях участвуют следующие переменные: $\Delta u_1, \Delta u_2, \Delta u_3$ – полные ошибки местоположения;

$\delta V_1, \delta V_2, \delta V_3$ – динамические ошибки определения составляющих скорости;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – кинематические ошибки определения ориентации. Уравнения ошибок имеют следующий вид:

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

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, $v_x = (v_1, v_2, v_3)^T = L^T v_z$,

$\Delta f_x = (\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta f_3)^T = L^T \Delta f_z$, где L – матрица ориентации трехгранника Mz

относительно Mx , определяемая в бортовом вычислителе БИНС. 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 АНПА – W^h . Вектор коррекции имеет соответствующие компоненты – $w = (w^d, w^h, w^v)$ и получается линеаризацией относительно модельных переменных: $w^d = h^T \Delta y + \rho^d$,

$$w^h = \Delta y_3 + \rho^h, \quad w^v = \delta V - \rho^v, \quad \text{где } h = \left(\frac{y_1^M}{d_{comp}}, \frac{y_2^M}{d_{comp}}, \frac{y_3^M}{d_{comp}} \right), \quad y^M = (y_1^M, y_2^M, y_3^M)$$

– координаты маяка, $d_{comp} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 y_i^{M2}}$, а ρ^d, ρ^h, ρ^v – ошибки измерений. Модель

ошибок измерений имеет следующий вид:

$\rho^* = \rho^{*0} + \rho^{*s}$, где ρ^* – ошибки измерений ρ^d, ρ^h, ρ^v , ρ^{*0} – постоянная составляющая погрешности, ρ^{*s} – высокочастотная погрешность типа белого шума.

Вектор состояния динамической системы включает в себя следующие компоненты:

$\kappa = (\Delta y_1, \Delta y_2, \Delta y_3, \delta V_1, \delta V_2, \delta V_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3, v_{z1}, v_{z2}, v_{z3}, \Delta f_{z1}, \Delta f_{z2}, \Delta f_{z3}, \rho^{d0}, \rho^{h0}, \rho^{v0})$, 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 состояния. Для решения задачи используется фильтр Калмана, описанный в [3].

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: $\sigma_{\Delta f^0} = 0,005 \text{ м/с}^2$; $\sigma_{v^0} = 10^\circ/\text{час}$; $\sigma_{\Delta y} = 10 \text{ м}$; $\sigma_{\delta V} = 0,1 \text{ м/с}$; $\sigma_{\beta_1} = \sigma_{\beta_2} = 0,5^\circ$, $\sigma_{\beta_3} = 1^\circ$; $\sigma_{\rho^{d0}} = 50 \text{ м}$; $\sigma_{\rho^{v0}} = 1 \text{ м/с}$; $\sigma_k = 0,05$. Для шумов в системе и измерениях берутся следующие значения, приведенные к частоте 1 Гц: $\sigma_{\Delta f^s} = 0,02 \text{ м/с}^2$; $\sigma_{v^s} = 90^\circ/\text{час}$; $\sigma_{\rho^{ds}} = 100 \text{ м}$; $\sigma_{\rho^{vs}} = 1 \text{ м/с}$.

Рассматривалось два типа движения АПА и АВА. На данных движениях были проведены испытания комплекса, в том числе и навигационной системы без использования БИНС [5]. В первом случае АПА двигался прямолинейным галсом на постоянной глубине, а АВА двигался «зигзагом» со стороной 200 метров, пересекая при этом траекторию подводного аппарата (рис.1). Во втором случае АВА 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).

В результате ковариационного анализа было выявлено, что среднеквадратические отклонения ошибок оценки координат не превышают 2 метров. Причем полученная точность устанавливается только спустя половину времени движения аппарата. Подробные результаты представлены в [6].

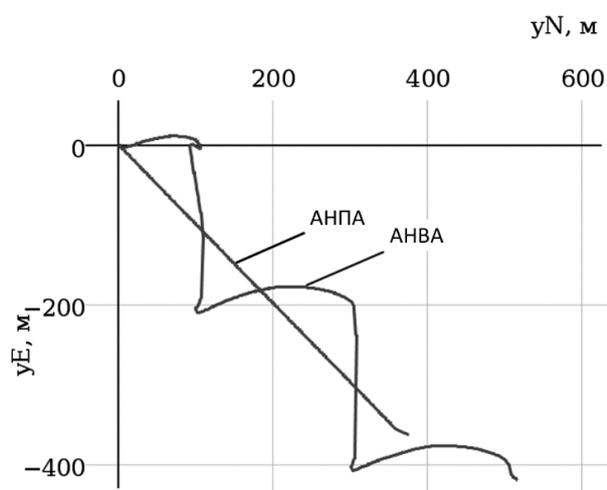


Рисунок 1

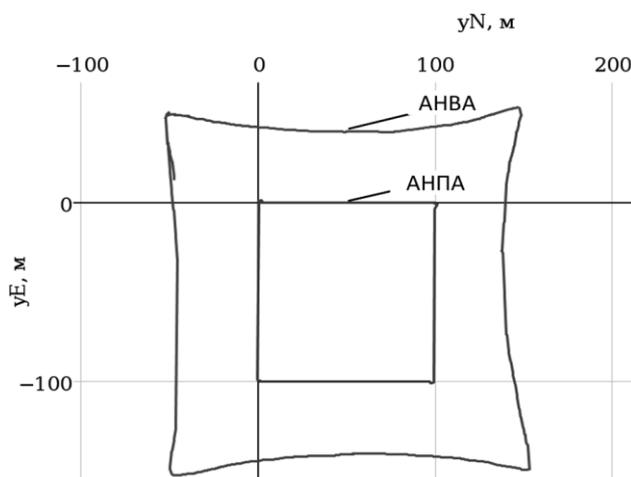


Рисунок 2

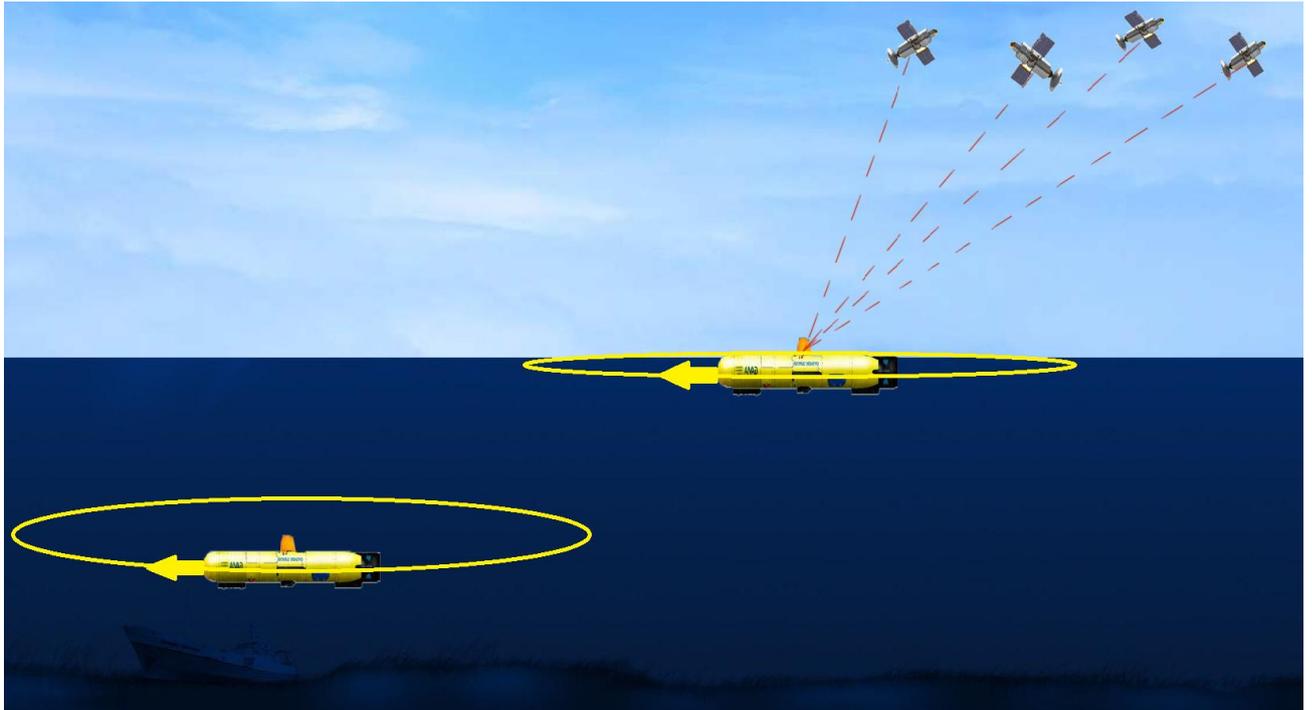
Подготовка навигационной системы перед погружением

Анализ СКО ошибок оценок погрешностей определения координат показал, что ошибки определения координат в конце интервала движения (в смысле СО) более чем в два раза меньше начального состояния (1.5 м по сравнению с 3 м). Переходный процесс связан с промежуточными процессами в оценках инструментальных погрешностей БИНС.

Для того чтобы оценить комбинации инструментальных погрешностей БИНС, которые оказывают влияние на точность навигации в начале движения, предлагается следующий режим подготовки АПА перед погружением (рис. 3):

1. Перед погружением АПА добавляется движение его над водой по траектории, близкой к программному движению под водой. При этом работает приемник спутниковой навигации на борту АПА, и информация от него используется для коррекции БИНС.
2. После погружения алгоритм коррекции продолжает работать с использованием корректирующей информации от ГАНС и лага, как описывалось выше.

Рисунок 3. Иллюстрация подготовки перед погружением



Уравнения измерений при использовании спутниковых измерений имеют вид:

$$W^y = y' - y^* = \Delta y$$

$$W^v = V' - V^* = \delta V + [V, \beta],$$

где y' – вычисленные координаты, y^* – информация от СНС, V' – вычисленная скорость, V^* – скоростная информация от СНС, $[V, \beta]$ – векторное произведение.

Эффективность предложенного режима иллюстрируется результатами ковариационного анализа. На Графиках 1-4 представлены поведение СКО ошибок оценок погрешностей определения координат в двух вариантах – без подготовки (точка-пунктир) и с использованием режима подготовки (сплошная линия) для траекторий, описанных в предыдущем разделе.

График 1. Зависимость СКО ошибки оценки первой координаты от времени для траектории «квадрат»

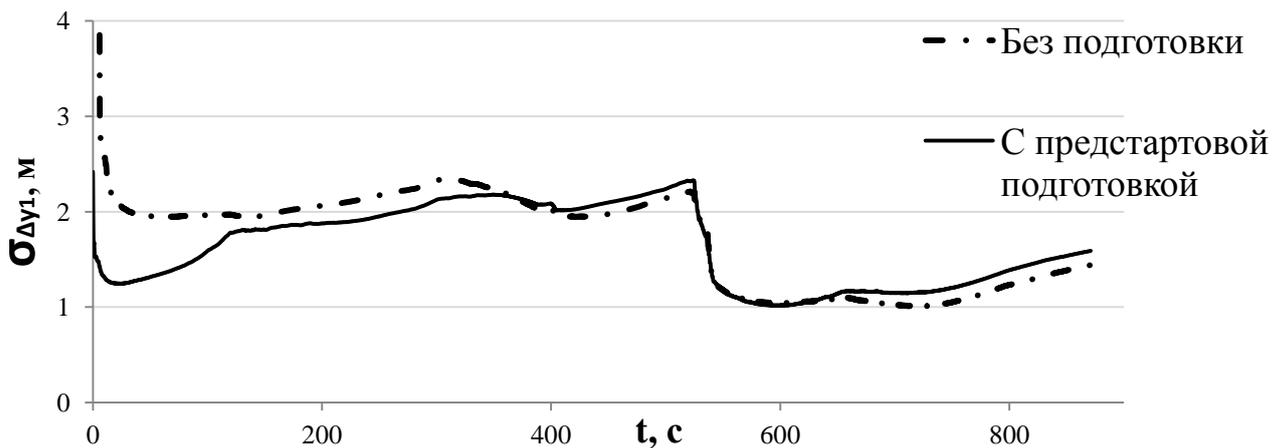


График 2. Зависимость СКО ошибки оценки второй координаты от времени для траектории «квадрат»

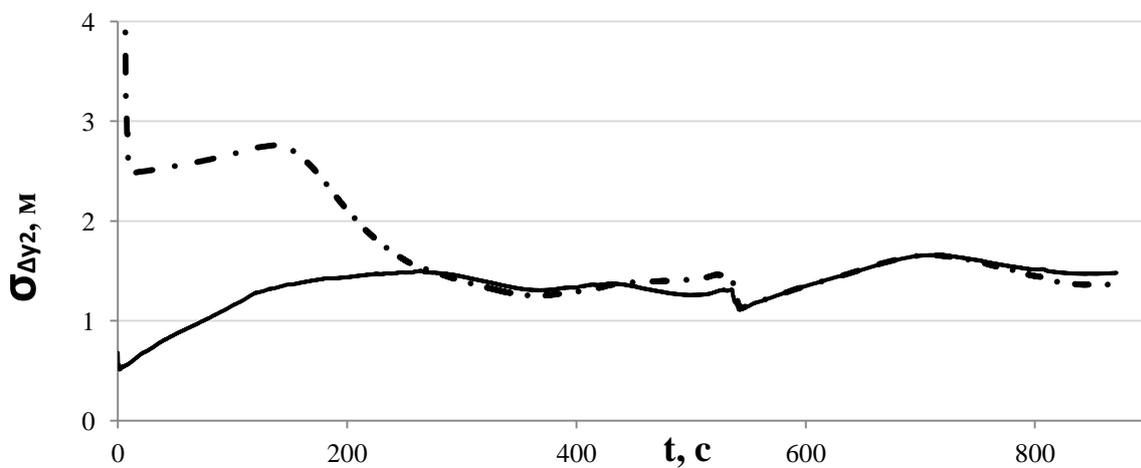


График 3. Зависимость СКО ошибки оценки первой координаты от времени для траектории «зигзаг»

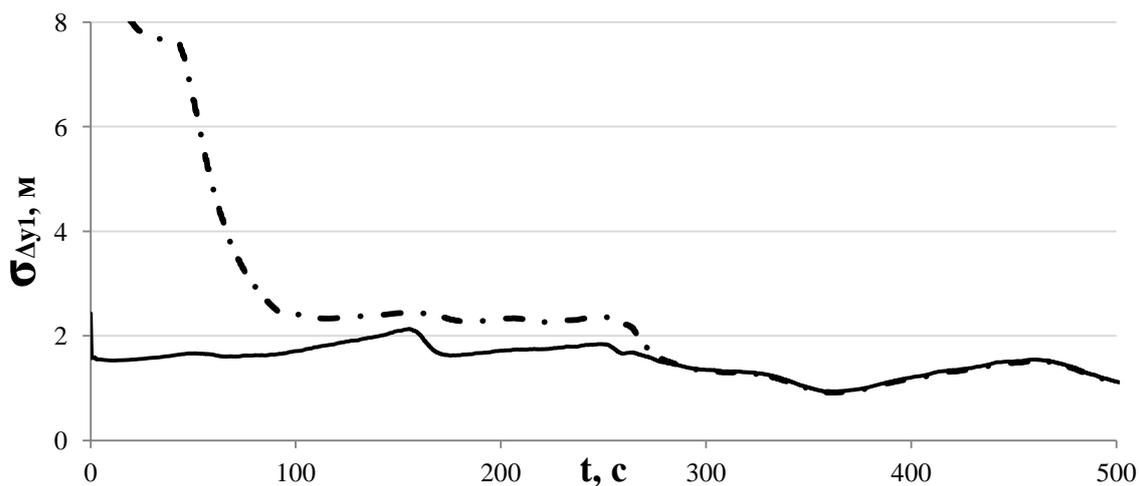
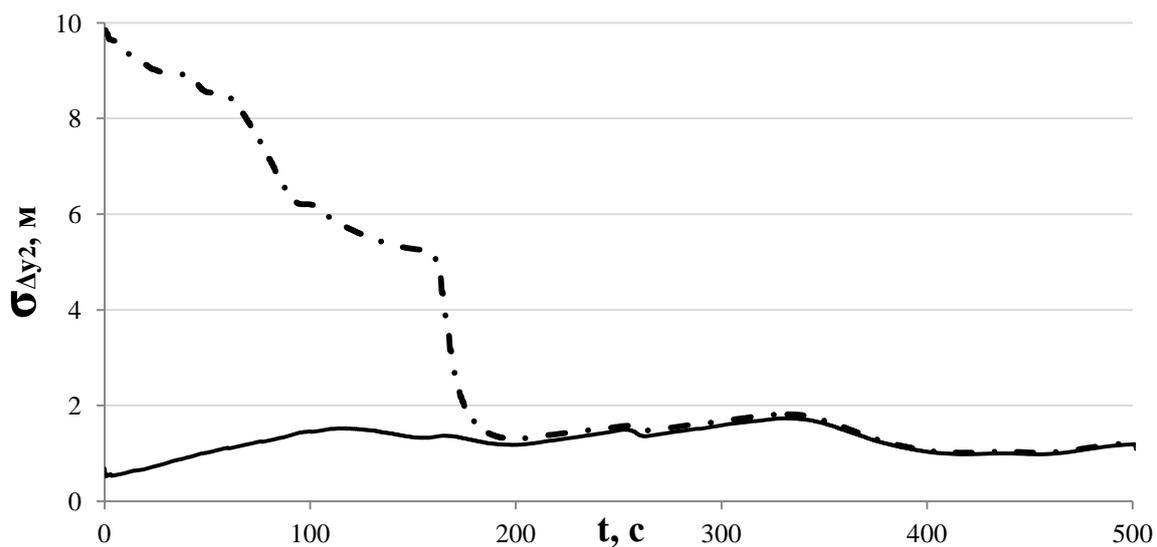


График 4. Зависимость СКО ошибки оценки второй координаты от времени для траектории «зигзаг»



Значения СКО ошибок оценок координат при использовании алгоритма предстартовой подготовки в несколько раз меньше аналогичных значений,

полученных без использования алгоритма на первых этапах движения аппарата. Предстартовая подготовка, таким образом, может использоваться для навигации в реальном времени с целью получения более точных оценок с самого начала движения АПА.

Выводы

Показана принципиальная возможность построения навигационной системы АПА на основе корректируемой БИНС.

Разработан метод подготовки АПА перед погружением, позволяющий уменьшить ошибки на первом этапе движения аппарата.

Разработанные методы позволяют добиться более высокой точности навигационных данных по сравнению с существующими системами.

Библиографический список

1. Кропотов А.Н., Макашов А.А., Плясунов В.М. Реализация системы видеопозиционирования подводного аппарата // Труды МАИ. 2015. № 80. URL: <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. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=31138>
3. Голован А.А., Парусников Н.А. Математические основы навигационных систем. – М.: МАКС Пресс. Часть I, 2011. - 136 с. Часть II, 2012. – 170 с.

4. Агеев М.Д. Автономные подводные роботы: системы и технологии. – М.: Наука, 2005. - 400 с.
5. 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.
6. Вавилова Н.Б., Парусников Н.А., Субханкулова Г.А. Навигация автономного подводного аппарата при помощи корректируемой бескарданной инерциальной навигационной системы // Труды МАИ. 2016. № 89. URL: www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=73316